O tecido do cosmo

O espaço, o tempo e a textura da realidade

Brian Greene



Companhia Das Letras

DADOS DE COPYRIGHT

Sobre a obra:

A presente obra é disponibilizada pela equipe ***Le Livros*** e seus diversos parceiros, com o objetivo de oferecer conteúdo para uso parcial em pesquisas e estudos acadêmicos, bem como o simples teste da qualidade da obra, com o fim exclusivo de compra futura.

É expressamente proibida e totalmente repudiável a venda, aluguel, ou quaisquer uso comercial do presente conteúdo

Sobre nós:

O ***Le Livros*** e seus parceiros disponibilizam conteúdo de dominio publico e propriedade intelectual de forma totalmente gratuita, por acreditar que o conhecimento e a educação devem ser acessíveis e livres a toda e qualquer pessoa. Você pode encontrar mais obras em nosso site: ***LeLivros.link*** ou em qualquer um dos sites parceiros apresentados neste link.

"Quando o mundo estiver unido na busca do conhecimento, e não mais lutando por dinheiro e poder, então nossa sociedade poderá enfim evoluir a um novo nível."



BRIAN GREENE

O tecido do cosmo
O espaço, o tempo e a textura da realidade

Tradução
José Viegas Filho

Revisão técnica
Marco Moriconi (Instituto de Física, UFF-RJ)

2ª reimpressão 2010

COMPANHIA DAS LETRAS

Copyright © 2004 by Brian R. Greene, Publicado originalmente nos Estados Unidos

Título original
The fabric of the cosmos: space, time, and the texture of reality

Capa
Ângelo Venosa

Preparação
Maysa Monção

Revisão
Ana Maria Barbosa Carmen S. da Costa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Greene, Brian, 1963-

O tecido do cosmo: o espaço, o tempo e a textura da realidade/Brian Greene; tradução José Viegas Filho; revisão técnica Marco Moriconi.
São Paulo : Companhia das Letras, 2005.

Título original: The fabric of the cosmos : space, time, and the texture of reality Bibliografia.
ISBN 978-85-359-0759-9

1. Astronomia 2. Cosmologia 3. Cosmologia Obras de divulgação.

05-7970 CDD-523.1

Índices para catálogo sistemático:

1. Cosmologia : Astronomia 523.1
2. Universo : Astronomia 523.1
[2010]

Todos os direitos desta edição reservados à
EDITORA SCHWARCZ LTDA.
Rua Bandeira Paulista 702 cj. 32 04532-002 São Paulo SP
Telefone (11) 3707-3500 Fax (11) 3707-3501
www.companhiadasletras.com.br

Para Tracy

Sumário

Prefácio

PARTE I: O CENÁRIO DA REALIDADE
1. Os caminhos da realidade
O *espaço, o tempo e por que as coisas são como são*
2. O universo e o balde
O *espaço é uma abstração humana ou uma entidade física?*
3. A relatividade e o absoluto
O *espaço-tempo é uma abstração einsteiniana ou uma entidade física?*
4. O espaço emaranhado
Que significa "separação" em um universo quântico?

PARTE II: O TEMPO E A EXPERIÊNCIA
5. O rio gelado
O *tempo passa?*
6. O acaso e a seta
O *tempo tem uma direção?*
7. O tempo e o quantum
Percepções a respeito da natureza do tempo a partir do reino quântico

PARTE III: O ESPAÇO-TEMPO E A COSMOLOGIA
8. Os flocos de neve e o espaço-tempo
A simetria e a evolução do cosmo
9. A vaporização do vácuo
O *calor, o nada e a unificação*
10. A desconstrução do Big-Bang
O *que foi que explodiu?*
11. Diamantes quânticos no céu
Inflação, agitação quântica e a seta do tempo

PARTE IV: ORIGENS E UNIFICAÇÃO
12. O mundo em uma corda
O *tecido segundo a teoria das cordas*
13. O universo em uma brana

Especulações sobre o espaço e o tempo na teoria-M

PARTE V: REALIDADE E IMAGINAÇÃO
14. Assim na terra como no céu
Experimentações com o espaço e o tempo
15. Teleportadores e máquinas do tempo
Viagem através do espaço e do tempo
16. O futuro de uma alusão
Perspectivas para o espaço e o tempo
Notas
Glossário
Sugestões de leitura

Orelha do Livro

Desde que Copérnico nos ensinou que não é o Sol que gira ao redor da Terra, e sim o contrário, nossa crença em um mundo simples, ordenado e previsível tem sofrido os mais duros golpes. Em O tecido do cosmo, Brian Greene, um dos físicos mais importantes da atualidade, discorre sobre os grandes temas da cosmologia através de uma viagem pelo uni verso que nos faz olhar a realidade de maneira completamente diferente.

O espaço é uma abstração humana ou uma entidade física? Por que o tempo tem uma direção? O universo existiria sem o espaço e o tempo? O que foi que explodiu no Big-Bang? Podemos viajar rumo ao passado? Tomando como guia os conceitos de espaço e tempo, Greene nos conduz ao princípio do mundo e ao futuro mais remoto; às especulações e descobertas de grandes no mês da física como Newton e Einstein; aos limites extremos do universo observável e ao mundo infinitamente peque no das flutuações quânticas, onde tudo parece se dissolver. Para explicar o Big Bang, o autor também nos mostra os últimos desenvolvimentos da teoria das supercordas e da Teoria-M, que pretendem chegar a um consenso sobre o comportamento de todas as coisas que existem, da menor partícula ao maior buraco negro.

"O tecido do cosmo destina-se sobretudo ao leitor comum, com pouco ou nenhum conhecimento científico formal, mas com um desejo intenso de compreender os mecanismos de funcionamento do universo, desejo que o ajudará a desvendar diversos conceitos com plexos e desafiadores", diz o autor no prefácio do livro. O grande trunfo de Greene, consagrado mundialmente com o livro *O universo elegante*, é ser capaz de traduzir estas questões altamente complexas em uma linguagem clara, didática e bem-humorada. Com o uso de analogias e metáforas e sem abrir mão da elegância do raciocínio abstrato, ele nos permite acompanhar a luta entre os mistérios quase insondáveis do universo e a atrevida e paciente obstinação do homem em desvendá-los.

Brian Greene

Gradou-se na Universidade Havard e doutorou-se na Universidade de Oxford. Em 1990 tornou-se professor da Faculdade de Física da Universidade de Cornell e, em 1995, recebeu o título de professor catedrático. Em 1996, transferiu-se para a Universidade de Columbia, onde hoje é professor de física e matemática.

Foi convidado para palestras em mais de 25 países e é responsável por importantes descobertas da teoria das supercordas. Seu primeiro livro, *O universo elegante*, foi finalista do Prêmio Pulitzer.

Contracapa

"O espaço e o tempo prendem a imaginação mais do que qualquer outro tema científico. E por boas razões. Eles compõem o cenário da realidade, o verdadeiro tecido do cosmo. Toda a nossa existência – tudo o que fazemos, pensamos e vivenciamos – ocorre em alguma região do espaço durante algum intervalo de tempo. Contudo, a ciência ainda está tentando compreender o que são, na verdade, o espaço e o tempo. Serão eles entidades físicas reais ou simplesmente ideias úteis? Se forem reais, serão elementares ou terão componentes ainda mais básicos? Que se pode entender por espaço vazio?
O tempo teve um início? Ele tem um sentido, como uma seta, que viaja inexoravelmente do passado para o futuro, tal como indica a nossa experiência cotidiana? Poderemos manipular o espaço e o tempo? Neste livro, acompanharemos trezentos anos de pesquisas científicas apaixonadas, que buscam dar respostas, ou pelo menos sugestões de respostas, a essas perguntas básicas e profundas a respeito da natureza do universo."
Do autor de O universo elegante, finalista do Prêmio Pulitzer.

Prefácio

O espaço e o tempo prendem a imaginação mais do que qualquer outro tema científico. E por boas razões. Eles compõem o cenário da realidade, o verdadeiro tecido do cosmo. Toda a nossa existência — tudo o que fazemos, pensamos e vivenciamos — ocorre em alguma região do espaço durante algum intervalo de tempo. Contudo, a ciência ainda está tentando compreender o que são, na verdade, o espaço e o tempo. Serão eles entidades físicas reais ou simplesmente ideias úteis? Se forem reais, serão elementares ou terão componentes ainda mais básicos? Que se pode entender por espaço vazio? O tempo teve um início? Ele tem um sentido, como uma seta, que viaja inexoravelmente do passado para o futuro, tal como indica a nossa experiência cotidiana? Poderemos manipular o espaço e o tempo? Neste livro, acompanharemos trezentos anos de pesquisas científicas apaixonadas, que buscam dar respostas, ou pelo menos sugestões de respostas, a essas perguntas básicas e profundas a respeito da natureza do universo.

Nossa viagem também nos levará, repetidas vezes, a outra questão, estreitamente relacionada com esta e tão abrangente e difícil como ela: o que é a realidade? Nós, seres humanos, só temos acesso às experiências internas da percepção e do pensamento. Como podemos, então, estar certos de que essas experiências internas refletem verdadeiramente o mundo exterior? Os filósofos se dedicaram a esse problema há muito tempo. O cinema o popularizou, com histórias sobre mundos artificiais, gerados por estímulos neurológicos sofisticados, que existem somente nas mentes dos protagonistas. E os físicos, como eu, têm a nítida consciência de que a realidade que observamos — a matéria que evolui no cenário do espaço e do tempo — pode ter muito pouco a ver com a realidade externa, se é que ela existe. Apesar de tudo, como as observações são a única coisa com que podemos contar, temos de levá-las a sério. Escolhemos para ser nossos guias os dados objetivos e o arcabouço da matemática, e não a imaginação desenfreada ou o ceticismo implacável, e buscamos as teorias mais simples e mais audaciosas, capazes de explicar e prever os resultados dos experimentos que fazemos hoje e que faremos no futuro. Isso impõe uma forte restrição sobre as teorias que buscamos. (Neste livro, por exemplo, não haverá nenhuma sugestão de que eu esteja flutuando em um tanque, ligado a mil fios, que me produzem estímulos mentais, que me fazem *pensar* que estou agora escrevendo este texto.) Mas o fato é que nos últimos cem anos as descobertas da física impuseram modificações na nossa percepção da realidade cotidiana que são tão contundentes, alucinantes e desnorteantes quanto os exemplos mais imaginativos da ficção científica. Esses acontecimentos revolucionários estão descritos nas páginas que seguem.

Muitas das questões que exploramos aqui são as mesmas que, sob diferentes aspectos, levantaram as sobrancelhas de Aristóteles, Galileu, Newton, Einstein e inúmeros outros pensadores de todos os tempos. E como este livro tem o propósito de relatar o próprio ato de fazer ciência, seguimos as respostas dadas por cada geração a estas questões, assim como as refutações e reinterpretações feitas pelos cientistas das gerações subsequentes ao longo dos séculos.

Por exemplo, na desconcertante questão de saber se o espaço completamente vazio é uma entidade real, como uma tela de pintura em branco, ou simplesmente uma ideia abstrata, acompanharemos o pêndulo da opinião científica em suas oscilações entre a declaração de Isaac Newton, no século XVII, de que o espaço é real, a conclusão oposta de Ernst Mach, no século XIX, e a extraordinária reformulação da questão como um todo, feita por Einstein no século XX, quando ele fez a fusão entre o espaço e o tempo e basicamente refutou Mach. A seguir, encontraremos novas descobertas que voltaram a transformar a questão por meio da redefinição do termo “vazio”, afetado pelo

conceito de que o espaço é inevitavelmente preenchido por campos quânticos, e talvez também por uma energia difusa e uniforme, denominada constante cosmológica — ecos modernos da velha e desacreditada noção de um "éter", que preencheria o espaço. E descreveremos também como modernos experimentos feitos no espaço exterior podem dar confirmação a certas características particulares das conclusões de Mach que estão de acordo com a relatividade geral de Einstein, o que ilustra bem a evolução da rede fascinante e emaranhada do desenvolvimento científico.

Na nossa própria era, encontramos a visão enriquecedora da cosmologia inflacionária a respeito da seta do tempo, o amplo estoque de novas dimensões espaciais trazidas pela teoria das cordas, a sugestão radical da teoria-M de que o espaço que habitamos pode ser apenas uma membrana que flutua em um cosmo maior, além da fantástica especulação atual de que o universo que vemos pode ser apenas um holograma cósmico. Ainda não sabemos se as mais recentes dessas proposições teóricas são corretas. Mas, por mais extravagantes que pareçam, temos de levá-las a sério porque elas indicam a direção para onde nos leva a nossa obstinada investigação das leis mais profundas do universo. Realidades estranhas e inesperadas podem surgir não só da imaginação fértil da ficção científica, mas também das descobertas da vanguarda da física moderna.

O tecido do cosmo destina-se sobretudo ao leitor comum, com pouco ou nenhum conhecimento científico formal, mas com um desejo intenso de compreender os mecanismos de funcionamento do universo, desejo que o ajudará a desvendar diversos conceitos complexos e desafiadores. Assim como no meu primeiro livro, *O universo elegante*, mantive-me sempre próximo ao cerne das ideias científicas, substituindo os detalhes matemáticos por metáforas, analogias, histórias e ilustrações. Quando chegarmos nas partes mais difíceis do livro, alertarei o leitor e proporcionarei breves resumos para os que prefiram passar ao largo dessas discussões mais especializadas. Desse modo, o leitor poderá percorrer o caminho das descobertas e ganhar não só o conhecimento da visão de mundo da física atual, mas também o entendimento de como essa visão de mundo prevaleceu.

Estudantes, leitores ávidos de material científico, professores e outros profissionais também podem encontrar muito interesse no livro. Embora os capítulos iniciais cubram o material básico e necessário para compreender a relatividade geral e a mecânica quântica, o foco dado à corporalidade do espaço e do tempo afasta-se um pouco do convencional. Os capítulos seguintes cobrem uma vasta gama de tópicos — como o teorema de Bell, experimentos de escolha retardada, o problema quântico da medição, a expansão acelerada, a possibilidade de que venhamos a produzir buracos negros com a próxima

geração de aceleradores de partículas, fantásticas máquinas do tempo à base de buracos de minhoca —, o que atualizará os leitores em alguns dos temas mais tentadores e debatidos da cosmologia.

Uma parte do material apresentado é controvertida. Nas questões que permanecem sem solução, discuti no texto os principais pontos de vista. Nos casos em que penso havermos chegado a um certo grau de consenso, releguei as opiniões contrárias às notas do final do texto. Alguns cientistas, sobretudo os que defendem pontos de vista minoritários, podem divergir, em certos aspectos, dos meus julgamentos, mas, tanto no texto principal quanto nas notas, busquei sempre oferecer um tratamento equilibrado. Nas notas, o leitor particularmente diligente encontrará explicações mais completas, esclarecimentos e nuances que são relevantes para os aspectos que tratei de maneira simplificada, assim como (para quem gosta) breves contrapartidas matemáticas à orientação que adotei de deixar o texto principal livre de equações. Um pequeno glossário propicia uma referência rápida para alguns dos termos científicos mais específicos.

Mesmo um livro deste tamanho não logra esgotar o vasto campo do espaço e do tempo. Concentrei o foco nos pontos que considero interessantes e essenciais para a elaboração de um quadro geral da realidade pintada pela ciência moderna. Sem dúvida, muitas dessas escolhas refletem predileções pessoais, pelo que peço desculpas aos que prefeririam que as suas próprias áreas de trabalho ou de estudo recebessem maior atenção.

Ao escrever O *tecido do cosmo* tive a sorte de receber contribuições valiosas de numerosos e dedicados leitores. Raphael Kasper, Lubos Motl, David Steinhardt e Ken Vineberg leram várias versões do manuscrito como um todo, por vezes repetidamente, e ofereceram muitas sugestões pormenorizadas e pertinentes, que aperfeiçoaram de forma substancial a clareza e a precisão da apresentação. Expresso-lhes os meus sinceros agradecimentos. David Albert, Ted Baltz, Nicholas Boles, Tracy Day, Peter Demchuk, Richard Easther, Anna Hall, Keith Goldsmith, Shelley Goldstein, Michael Gordin, Joshua Greene, Arthur Greenspoon, Gavin Guerra, Sandra Kauffman, Edward Kastenmeier, Robert Krulwich, Andrei Linde, Shani Offen, Maulik Parikh, Michael Popowits, Marlan Scully, John Stachel e Lars Straeter leram o manuscrito, no todo ou em parte, e os seus comentários foram extremamente úteis. Beneficiei-me de conversas com Andreas Albrecht, Michael Bassett, Sean Carrol, Andréa Cross, Rita Greene, Alan Guth, Mark Jackson, Daniel Kabat, Will Kinney, Justin Khoury, Hiranya Peiris, Saul Perlmutter, Koenraad Schalm, Paul Steinhardt, Leonard Susskind, Neil Turok, Henry Tye, William Warmus e Erick Weinberg. Devo agradecimentos especiais a Raphael Gunner, cujo agudo senso do que seja um argumento genuíno e cuja disposição de criticar diversas das minhas tentativas

revelaram-se inestimáveis. Eric Martinez proporcionou-me uma assistência crucial e incansável na fase da produção do livro e Jason Severs fez um excelente trabalho na criação das ilustrações. Agradeço aos meus agentes, Katinka Matson e John Brockman. E tenho uma grande dívida de gratidão para com o meu editor, Marty Asher, por ter sido uma fonte inesgotável de incentivos, conselhos e observações profundas, que aprimoraram substancialmente a qualidade do trabalho final.
Durante a minha carreira, as minhas pesquisas científicas têm sido financiadas pelo Departamento de Energia, pela National Science Foundation e pela Alfred P. Sloan Foundation. Registro e agradeço o apoio.

PARTE I

O cenário da realidade

1. Os caminhos da realidade

O espaço, o tempo e por que as coisas são como são

Na velha e empoeirada estante do meu pai não havia nenhum livro que fosse proibido. Mas, enquanto eu crescia, nunca vi ninguém consultar nenhum deles. Os livros eram, na maior parte, grossos tomos — uma história geral da civilização, uma coleção de volumes de capa igual, com as grandes obras da literatura ocidental, e tantos outros de que já não me lembro — que pareciam colados às prateleiras, ligeiramente curvada por décadas sob constante pressão. Mas lá no alto, na última prateleira, havia um livro fininho que de vez em quando chamava a minha atenção porque parecia tão fora de lugar quanto Gulliver na Terra dos Gigantes. Pensando bem, não sei por que esperei tanto tempo antes de dar uma olhada. Talvez, com o passar dos anos, os livros tenham se tornado bens de raiz da família, incorporados à paisagem doméstica, admirados em sua permanência, mais do que um material de leitura. Por fim, na minha adolescência, a atitude reverente deu lugar aos impulsos impetuosos. Subi em busca do livrinho, tirei a poeira e abri a página um. As primeiras linhas eram, para dizer o mínimo, impactantes.

"Só existe um problema verdadeiramente filosófico: o suicídio." Assim começava o texto. Meus olhos piscaram. "Se o mundo tem três dimensões, ou se a mente tem nove ou doze categorias", continuava, "é uma preocupação posterior." Essas dúvidas, o texto explicava, são parte de um jogo da humanidade, mas elas só merecem atenção depois que a única questão verdadeira estiver resolvida. O livro era O *mito de Sísifo*, escrito pelo filósofo Albert Camus, nascido na Argélia e ganhador do Prêmio Nobel. Depois de um momento, o frio gelado das suas palavras derreteu-se à luz da compreensão. É verdade, eu pensei. Você pode ficar ponderando e analisando as coisas até cansar, mas a verdadeira questão é saber se todas as suas ponderações e análises terminarão por convencê-lo de que a vida vale a pena. Essa é a questão essencial. Tudo o mais são detalhes.

Meu encontro casual com o livro de Camus deve ter ocorrido durante uma fase em que eu me sentia especialmente impressionável, porque as suas palavras persistiram na minha mente mais do que quaisquer outras. Quantas vezes fiquei imaginando como várias pessoas que conheci, ou de quem ouvi falar, ou que vi na televisão, responderiam à mais essencial de todas as perguntas. Com o tempo,

no entanto, foi a sua segunda assertiva — sobre o papel do progresso científico — que foi se revelando particularmente desafiadora. Camus reconhecia o valor de compreender a estrutura do universo, mas, no meu ponto de vista de então, ele rejeitava a possibilidade de que essa compreensão pudesse fazer qualquer diferença na nossa conclusão do valor que tem a vida. Sou o primeiro a admitir que o grau de sofisticação da minha leitura adolescente da filosofia existencialista correspondia ao apreço de Bart Simpson pela poesia romântica, mas, mesmo assim, a conclusão de Camus não deixava de me parecer deslocada. Para este aspirante a físico, parecia lógico que uma avaliação bem fundamentada da vida requeresse necessariamente um entendimento tão completo quanto possível do cenário da vida — o universo. Lembro-me de pensar que, se a nossa espécie vivesse em cavernas profundamente enterradas nas profundezas do subsolo e não conhecesse, portanto, a superfície da terra, o brilho da luz do Sol, a brisa do mar e as estrelas do céu, ou se a evolução tivesse tomado outro rumo e só possuíssemos o sentido do tato, de modo que só pudéssemos conhecer as coisas que pertencessem ao ambiente imediato, ou se as faculdades mentais dos seres humanos parassem de desenvolver-se durante a infância, de modo que a nossa capacidade emocional e analítica nunca fosse além das de um menino de cinco anos — em suma, se as nossas experiências nos propiciassem apenas uma imagem empobrecida da realidade —, a nossa avaliação da vida estaria irremediavelmente comprometida. Quando, afinal, chegássemos à superfície da terra, ou quando ganhássemos os sentidos da visão, audição, olfato e paladar, ou quando as nossas mentes estivessem finalmente livres para desenvolver-se como acontece normalmente, a nossa ideia coletiva da vida e do cosmo sofreria inevitavelmente uma mudança radical. O caráter limitado da nossa percepção anterior da realidade nos teria feito ver a mais fundamental de todas as questões filosóficas sob ângulos diferentes.

Você pode perguntar: e daí? Com certeza, qualquer avaliação sensata concluiria que, embora não possamos conhecer tudo a respeito do universo — todos os aspectos referentes ao comportamento dà matéria e ao funcionamento da vida —, temos as noções básicas a respeito das pinceladas essenciais que desenharam a tela da natureza. Com certeza, como antecipa Camus, o progresso da física, como, por exemplo, o conhecimento do número das dimensões do espaço; ou o progresso da neuropsicologia, como, por exemplo, o conhecimento de todas as estruturas organizacionais do cérebro; ou ainda o progresso de qualquer outra área do conhecimento científico pode preencher importantes detalhes, mas o seu impacto sobre a avaliação que fazemos da vida e da realidade seria mínimo. Com certeza, a realidade é o que pensamos dela; a realidade nos é revelada pelas nossas experiências.

Até certo ponto, esta visão da realidade é compartilhada por muitos de nós, pelo menos implicitamente. Eu me vejo claramente entre os que pensam dessa maneira na vida cotidiana. É fácil ser seduzido pela face que a natureza revela diretamente aos nossos sentidos. Contudo, nas décadas que se seguiram à minha primeira leitura do texto de Camus aprendi que a ciência moderna nos conta uma história muito diferente. A *lição essencial* que emerge das investigações científicas dos últimos cem anos é a de que a experiência humana muitas vezes é um falso guia para o conhecimento da verdadeira natureza da realidade. Logo abaixo da superfície do cotidiano está um *mundo* que mal reconhecemos. Seguidores do ocultismo, devotos da astrologia e os que se atêm a princípios religiosos que falam de uma realidade que está além da experiência chegaram a essa conclusão há muito tempo e a partir de diferentes perspectivas. Mas não é isso o que tenho em mente. Refiro-me ao trabalho engenhoso de inovadores e pesquisadores incansáveis — os homens e as mulheres que fazem ciência — que dissecaram, folha por folha, camada por camada, enigma por enigma, a cebola cósmica, e revelaram um universo ao mesmo tempo surpreendente, estranho, impressionante, elegante e completamente diferente do que qualquer um de nós poderia esperar.

Esses desenvolvimentos não são meros detalhes. Os avanços da física nos obrigaram e continuam a nos obrigar a fazer revisões radicais na nossa concepção do cosmo. Hoje, estou tão convencido quanto estava décadas atrás de que Camus acertou ao escolher o valor da vida como a questão mais essencial, mas as descobertas da física moderna persuadiram-me de que avaliar a vida pela ótica da experiência cotidiana é como contemplar um quadro de Van Gogh através de uma garrafa. A ciência moderna disparou sucessivos golpes sobre as evidências produzidas pela nossa experiência perceptiva rudimentar, revelando que ela com frequência gera conceitos nebulosos a respeito do mundo em que vivemos. Assim, embora Camus tenha isolado as questões da física, classificando-as como secundárias, eu me convenci de que elas são primárias. Para mim, a realidade física constrói o cenário e fornece a luz para que possamos ver bem a questão de Camus. Julgar a existência sem contemplar as concepções da física moderna é como lutar no escuro com um inimigo desconhecido. Aprofundando o nosso conhecimento da verdadeira natureza da realidade física, reconfiguramos profundamente o senso a respeito de nós mesmos e a nossa experiência do universo.

A preocupação central deste livro é explicar algumas das mais proeminentes e cruciais dessas revoluções na imagem que fazemos da realidade, concentrando-nos intensamente naquelas que afetam o projeto de longo prazo da nossa espécie, de compreender o espaço e o tempo. De Aristóteles a Einstein, das pirâmides aos

observatórios no alto da montanha, do astrolábio ao telescópio espacial Hubble, o espaço e o tempo estão presentes no pensamento humano desde que aprendemos a pensar. Com o advento da era científica moderna, a sua importância cresceu vertiginosamente. Ao longo dos últimos três séculos, os acontecimentos da física revelaram que o espaço e o tempo são os conceitos mais indispensáveis, mais capazes de causar perplexidade, e, ao mesmo tempo, mais úteis na nossa análise científica do universo. Esses avanços também mostraram que o espaço e o tempo ocupam o alto da lista das construções científicas imemoriais que passam por fantásticas revoluções, a cargo da pesquisa de vanguarda.

Para Isaac Newton, o espaço e o tempo simplesmente eram — formavam o cenário cosmológico inerte no qual os eventos do universo eram exibidos. Para o seu contemporâneo e frequente rival Gottfried Wilhelm von Leibniz, “espaço” e “tempo” não eram mais do que palavras que nos permitem pensar nas relações entre os lugares onde os objetos estão e os momentos em que os eventos acontecem. Nada mais. Mas para Albert Einstein o espaço e o tempo eram a matéria-prima que compõe a realidade. Com as teorias da relatividade, Einstein transformou o pensamento a respeito do espaço e do tempo e revelou o papel protagonista que eles desempenham na evolução do universo. Desde então, o espaço e o tempo são as joias da coroa da física, simultaneamente, familiares e misteriosos. A compreensão definitiva do espaço e do tempo tornou-se o grande prêmio da física e o maior dos seus desafios.

Os desdobramentos de que trataremos neste livro entrelaçam o tecido do espaço e do tempo de diversas maneiras. Algumas ideias atuais questionam aspectos básicos do espaço e do tempo, que por séculos, quando não por milênios, pareciam inquestionáveis. Outras buscam um vínculo entre a nossa compreensão teórica do espaço e do tempo e os traços com que os identificamos na nossa experiência cotidiana. Outras mais levantam questões que seriam insondáveis dentro dos limites da nossa percepção comum.

Falaremos apenas o mínimo necessário sobre filosofia (e absolutamente nada sobre o suicídio e o sentido da vida). Mas no nosso empenho científico em resolver os mistérios do espaço e do tempo recusaremos resolutamente quaisquer restrições. Desde o menor grão do universo e desde os seus primeiros momentos até as maiores distâncias e o futuro mais longínquo, examinaremos o espaço e o tempo em ambientes familiares e estranhos, buscando sem tréguas o conhecimento da sua verdadeira natureza. Como a história do espaço e do tempo ainda não acabou de ser escrita, não chegaremos a conclusões definitivas. Mas encontraremos uma série de desenvolvimentos — alguns profundamente bizarros, outros que dão claro prazer, alguns experimentalmente verificáveis,

outros inteiramente especulativos — que nos darão uma ideia sobre o quão próximos estamos de envolver com as nossas mentes o tecido do cosmo e tocar com as mãos a textura da realidade.

REALIDADE CLÁSSICA

Os historiadores divergem quanto à data exata em que teria começado a era científica moderna, mas o certo é que quando Galileu Galilei, René Descartes e Isaac Newton nos delegaram os seus ensinamentos, ela passava por um intenso desenvolvimento. Naqueles dias, a nova atitude científica estava em plena formação e os padrões que se identificavam por meio de observações terrestres e astronômicas tornavam cada vez mais clara a existência de uma ordem que presidia a todos os eventos do cosmo, ordem acessível ao raciocínio bem estruturado e à análise matemática. Esses pioneiros do pensamento científico moderno argumentavam que, se vistos da maneira correta, os acontecimentos do universo não só eram explicáveis, mas também previsíveis. O poder da ciência para prever aspectos — de modo consistente e quantitativo — se havia revelado.

Os primeiros estudos científicos concentraram-se no tipo de coisas que se podiam ver ou experimentar na vida diária. Galileu fez cair pesos do alto de uma torre inclinada (pelo menos assim nos diz a lenda) e observou bolas que rolavam por um plano inclinado. Newton estudou maçãs que caíam (pelo menos assim nos diz a lenda) e a órbita da Lua. O objetivo dessas pesquisas era o de afinar a nascente observação científica com o aspecto harmônico da natureza. Por certo, a realidade física era o objeto da experiência, mas o desafio era o de perceber a rima e a razão que estavam por trás do ritmo e da regularidade. Muitos heróis, célebres ou não, contribuíram para o progresso rápido e impressionante que então se fez, mas foi Newton quem ficou com os louros. Com um punhado de equações matemáticas, ele sintetizou tudo o que se sabia a respeito do movimento, assim na terra como no céu, e, ao fazê-lo, compôs a partitura do que ficaria conhecido como *física clássica.*

Nas décadas que se seguiram à obra de Newton, as suas equações foram desenvolvidas em uma elaborada estrutura matemática que ampliou significativamente o seu alcance e a sua utilidade prática. A física clássica tornou-se gradualmente uma disciplina científica sofisticada e madura. As percepções originais de Newton foram, com certeza, o farol que iluminou todos esses progressos. Mesmo hoje, mais de trezentos anos depois, as equações de Newton são reproduzidas nos quadros-negros das aulas de introdução à física no mundo inteiro, impressas nos planos de voo da Nasa, para computar as trajetórias das naves espaciais, e embutidas nos cálculos complexos das

pesquisas de vanguarda. Newton resolveu uma pletora de fenômenos físicos dentro de um esquema teórico unificado.

Mas, ao formular as leis do movimento, ele encontrou um obstáculo decisivo, que teve uma importância particular para a nossa história (veja o capítulo 2). Todos sabiam que as coisas podem mover-se, mas que dizer do cenário em que o movimento ocorre? É o espaço, todos responderiam. Mas Newton retrucaria: e o *que é* o espaço? Uma entidade física real ou uma ideia abstrata, nascida do esforço humano para compreender o cosmo? Newton percebeu que essa pergunta crucial tinha de ser respondida e que, se ele não tomasse uma posição quanto ao significado do espaço e do tempo, as suas equações que descreviam o movimento careceriam de sentido. A compreensão requer um contexto; a percepção requer uma âncora.

Assim, com algumas rápidas sentenças no *Principia Mathematica*, Newton articulou uma concepção do espaço e do tempo e os declarou entidades absolutas e imutáveis que proporcionavam ao universo um cenário rígido e constante. Segundo ele, o espaço e o tempo constituíam uma armação invisível que dava a forma e a estrutura do universo.

Nem todos estavam de acordo. Houve quem argumentasse, de maneira persuasiva, que pouco sentido havia em atribuir existência a algo que não se vê, não se toca e não se sente. Mas o poder de explicação e de previsão das equações de Newton aquietaram os críticos. Por duzentos anos, a concepção absoluta do espaço e do tempo foi um dogma.

REALIDADE RELATIVÍSTICA

O caráter clássico da visão de mundo de Newton era belo e tranquilizador. De acordo com ela, os fenômenos naturais eram descritos com notável precisão, e os detalhes dessa descrição — a sua forma matemática — alinhavam-se harmoniosamente com a experiência. Se um objeto sofre um impulso, ele ganha aceleração. Se uma pedra é arremessada com mais força, o impacto causado pela sua colisão será maior. Se você pressionar um objeto, sentirá que ele reage contrariamente a essa pressão. Quanto maior for um objeto, maior será a sua atração gravitacional. Essas são algumas das propriedades mais básicas do mundo natural, e quando se aprende o esquema newtoniano vê-se que elas são representadas com clareza meridiana nas suas equações. Ao contrário do inescrutável palavrório das bolas de cristal, a ação das leis de Newton estava à disposição de quem quer que desejasse prová-la, bastando para isso um mínimo de conhecimento matemático. A física clássica proporcionava uma âncora confiável para a intuição humana.

Newton incluíra a força da gravidade nas suas equações, mas foi só em 1860 que o cientista escocês James Clerk Maxwell aplicou o esquema da física clássica para explicar a ação das forças elétrica e magnética. Maxwell precisou construir novas equações para fazê-lo, e a matemática por ele utilizada requeria maior treinamento por parte de quem quisesse entendê-la por completo. Mas essas novas equações explicaram os fenômenos elétricos e magnéticos com o mesmo êxito que Newton tivera ao explicar as leis do movimento. Ao final do século XIX, parecia evidente que os segredos do universo não poderiam resistir ao poder intelectual do homem.

Com efeito, com a incorporação da eletricidade e do magnetismo, prevalecia uma sensação crescente de que o trabalho da física teórica logo estaria concluído. Muitos imaginavam que a física caminhava rapidamente para explicar todos os problemas e as suas leis logo estariam escritas e consagradas definitivamente. Em 1894, o renomado físico experimental Albert Michelson afirmou que "a maioria dos grandes princípios gerais já está formalmente estabelecida" e citou um "eminente cientista" — que muitos creem ser o físico britânico lorde Kelvin — que declarara que tudo o que restava por fazer era a determinação de alguns números com uma quantidade maior de casas decimais.[1] Em 1900, o próprio Kelvin notou que havia "duas nuvens" no horizonte — uma relativa às propriedades do movimento da luz e outra referente a aspectos da radiação que os objetos emitem quando aquecidos,[2] mas a sensação geral era a de que estes eram meros detalhes que logo seriam resolvidos.

Em uma década tudo mudou. Tal como Kelvin antecipara, os dois problemas foram prontamente enfrentados, mas estavam longe de ser meros detalhes. Cada um deles deu início a uma revolução que levou a uma reformulação drástica das leis da natureza. Os conceitos clássicos de espaço, tempo e realidade — os mesmos que, por centenas de anos, haviam funcionado tão bem e exposto de maneira tão concisa a nossa intuição a respeito do mundo — caíram fragorosamente.

A revolução da relatividade, que tratou da primeira das "nuvens" de Kelvin, ocorreu em 1905 e em 1915, quando Albert Einstein concluiu as suas teorias da relatividade especial e da relatividade geral (veja o capítulo 3). Tratando de decifrar enigmas que envolviam a eletricidade, o magnetismo e o movimento da luz, ele percebeu que a concepção newtoniana do espaço e do tempo, a pedra angular da física clássica, estava errada. Em um período que durou algumas intensas semanas, na primavera de 1905, Einstein concluiu que o espaço e o tempo não são independentes e absolutos, como pensava Newton, mas sim interligados e relativos, o que foi profundamente inquietante para a experiência comum. Uns dez anos depois, Einstein cravou o último prego no caixão de

Newton, ao reescrever as leis da física gravitacional. Dessa vez, ele não só demonstrou que o espaço e o tempo são partes de uma mesma totalidade, mas também revelou que, com as suas dobras e curvas, eles participam da evolução cósmica. Longe de serem as estruturas rígidas e imutáveis descritas por Newton, o espaço e o tempo, na visão einsteiniana, são flexíveis e dinâmicos.

As duas teorias da relatividade estão entre as conquistas mais preciosas da humanidade e com elas Einstein derrubou o conceito newtoniano da realidade. Embora a física clássica pareça captar por meio da matemática praticamente tudo o que vivenciamos fisicamente, a realidade que ela descreve não é a realidade do nosso mundo. A nossa realidade é relativística. Contudo, como as diferenças entre a realidade clássica e a relativística só se manifestam em condições extremas (como velocidades extremas e gravidade extrema), a física newtoniana ainda proporciona uma aproximação extremamente precisa e útil em muitas circunstâncias. Utilidade e realidade são, no entanto, padrões muito diferentes. Como veremos, aspectos do espaço e do tempo que eram para nós absolutamente naturais revelaram-se falsas criações da perspectiva newtoniana.

REALIDADE QUÂNTICA

A segunda anomalia a que se referiu lorde Kelvin levou à revolução quântica, uma das maiores reviravoltas a que o conhecimento humano moderno foi submetido. Quando as coisas se acalmaram e a poeira baixou, o esquema conceitual da física clássica desaparecera para dar lugar ao da realidade quântica. Uma característica básica da física clássica diz que, se as posições e as velocidades de todos os objetos em determinado momento forem conhecidas, as equações de Newton, juntamente com os aperfeiçoamentos de Maxwell, podem informar as suas posições e velocidades em qualquer outro momento, passado ou futuro. A física clássica declara, sem hesitações, que o passado e o futuro estão gravados no presente. A relatividade especial e a relatividade geral também compartilham essa conclusão. Embora os conceitos relativísticos de passado e futuro sejam mais sutis do que os seus correspondentes na física clássica (veja os capítulos 3 e 5), as equações da relatividade, quando conjugadas com uma informação completa sobre o presente, determinam passado e futuro de maneira igualmente completa.

Por volta da década de 1930, contudo, os físicos viram-se forçados a introduzir um esquema conceituai inteiramente novo, denominado *mecânica quântica.* De maneira inesperada, descobriu-se que só as leis quânticas eram capazes de resolver uma série de enigmas e explicar uma variedade de dados dos domínios atômico e subatômico, que haviam aparecido recentemente. Mas de acordo com

as leis quânticas, mesmo que se logre determinar com a maior precisão possível o estado em que as coisas se encontram no dia de hoje, o máximo que se pode esperar é uma previsão das *probabilidades* do estado em que elas estariam em algum momento do futuro ou do passado. Segundo a mecânica quântica, o universo *não* está gravado no presente. Segundo a mecânica quântica, o universo participa de um jogo de azar.

Embora ainda persista alguma controvérsia sobre como interpretar com precisão estes desenvolvimentos, a maior parte dos físicos concorda em que as probabilidades estão profundamente inseridas no tecido da realidade quântica. Enquanto a intuição humana e a sua expressão por meio da física clássica supõem uma realidade em que as coisas são definitivamente *ou* de uma maneira *ou* de outra, a mecânica quântica descreve uma realidade em que por vezes as coisas flutuam em um estado nebuloso, em que são em parte de uma maneira e em parte de outra. As coisas só alcançam a sua definição quando uma observação adequada as força a abandonar as possibilidades quânticas e fixar-se em um resultado específico. O resultado alcançado, contudo, não pode ser previsto: só podemos prever a *probabilidade* de que as coisas aconteçam desta ou daquela maneira.

Para falar a verdade, isso é muito estranho. Não estamos acostumados a uma realidade que permanece ambígua até ser percebida. E a estranheza da mecânica quântica não termina aqui. Há um outro aspecto que é pelo menos tão insólito quanto este e que foi revelado pela primeira vez em um artigo escrito em 1935 por Einstein e dois colegas mais jovens, Nathan Rosen e Boris Podolsky, e que se destinava a atacar a teoria quântica.[3] Com as idas e vindas do progresso científico, o trabalho de Einstein pode ser visto hoje como um dos primeiros a apontar que a mecânica quântica — quando tomada do ponto de vista formal — implica que algo que é feito aqui pode estar *instantaneamente* ligado a algo mais, que acontece em outro lugar, independentemente da distância. Einstein considerava que essas conexões eram ridículas e interpretou o fato de que elas apareciam na matemática da teoria quântica como prova de que a teoria carecia ainda de grandes aperfeiçoamentos para que viesse a tomar uma forma aceitável. Mas por volta da década de 1980, quando realizações teóricas e tecnológicas permitiram submeter a exame minucioso esses alegados absurdos quânticos, os pesquisadores confirmaram que *é possível* haver um vínculo instantâneo entre coisas que ocorrem em pontos muito distantes um do outro. O que Einstein refutou como absurdo pode realmente acontecer no laboratório, em condições adequadas (veja o capítulo 4).

As implicações desses aspectos da mecânica quântica para o quadro que formamos da realidade são objeto de pesquisas ainda hoje. Muitos cientistas, entre os quais me incluo, veem-nas como parte de uma atualização quântica radical do significado e das propriedades do espaço. Normalmente, a separação espacial implica a independência física. Se você quiser controlar o que acontece do outro lado de um campo de futebol, tem de ir lá, ou, pelo menos, mandar alguém ou alguma coisa (um ajudante, um agitar de moléculas de ar, portadoras de uma mensagem falada, um piscar de luz, para chamar a atenção de alguém etc.) para manifestar a sua influência no outro lado do campo. Se você não fizer nada — se permanecer espacialmente isolado —, não causará impacto, uma vez que o espaço intermediário é responsável pela ausência de conexão física. A mecânica quântica desafia esse ponto de vista ao revelar que, pelo menos em certas circunstâncias, existe a possibilidade de transcender o espaço. Conexões quânticas a longa distância podem superar a separação espacial. Dois objetos podem estar bem separados no espaço, mas, do ponto de vista da mecânica quântica, é como se fossem uma única entidade. E como o espaço e o tempo têm um vínculo estreito, descoberto pelo próprio Einstein, as conexões quânticas também têm tentáculos temporais. Mais adiante veremos alguns experimentos recentes, inteligentes e verdadeiramente maravilhosos, que exploraram diversas interconexões espaço-temporais surpreendentes, resultados da aplicação da mecânica quântica, os quais, como constataremos, constituem um forte desafio à visão clássica e intuitiva do mundo a que nos acostumamos.

Apesar dessas múltiplas e impressionantes descobertas, um aspecto básico do tempo perdura — ele parece ter uma direção que aponta do passado para o futuro — para o qual nem a relatividade nem a mecânica quântica fornecem uma explicação. Neste caso, o único avanço convincente provém das pesquisas feitas em uma área da física que se chama *cosmologia.*

REALIDADE COSMOLÓGICA

Abrir os nossos olhos para a verdadeira natureza do universo sempre foi um dos propósitos essenciais da física. É difícil imaginar uma experiência mais capaz de abrir as nossas mentes do que a de aprender*. como o fizemos ao longo do último século, que a realidade que vivenciamos é apenas um pálido vislumbre da realidade que existe. Mas também faz parte dos objetivos da física explicar os elementos da realidade que efetivamente percebemos. A partir da nossa rápida marcha pela história da física, poderia parecer que isso já foi alcançado, na medida em que os progressos da física anterior ao século XX dão boa conta de explicar a experiência comum. Até certo ponto, isso é verdade. Mas mesmo nas

questões de todo dia estamos longe de ter um entendimento total. E entre os aspectos da vida comum que têm resistido a uma explicação completa está aquele que leva a um dos mais profundos mistérios da física moderna que ainda não foi resolvido — o mistério que o grande físico britânico Sir Arthur Eddington denominou *a seta do tempo.*[4]

Nós damos por certo que existe uma direção temporal na qual as coisas se desenvolvem. Os ovos se quebram e não se desquebram; as velas derretem e não desderretem; as lembranças são do passado e nunca do futuro; as pessoas envelhecem e não remoçam. Estas assimetrias comandam as nossas vidas; a distinção entre avançar e recuar no tempo é um elemento fundamental da realidade vivencial. Se avançar e recuar no tempo tivessem a mesma simetria que percebemos existir entre esquerda e direita, ou para a frente e para trás, o mundo seria irreconhecível. Os ovos tanto se quebrariam quanto se desquebrariam; as velas desderreteriam assim como derretem; nós nos lembraríamos do futuro com a mesma intensidade com que nos lembramos do passado; as pessoas remoçariam, tanto quanto envelheceriam. Com certeza, essa realidade simétrica no tempo não é a nossa realidade. Mas de onde vem a assimetria do tempo? O que é responsável por essa propriedade, a mais elementar de todas as propriedades do tempo?

Acontece que as leis da física que conhecemos e aceitamos não mostram essa assimetria (veja o capítulo 6): ambas as direções do tempo, para a frente e para trás, são tratadas indistintamente pelas leis. *E essa é a origem de um enorme desafio*. Nada nas equações fundamentais da física revela nenhum sinal de tratar uma direção do tempo diferentemente da outra, e isso é totalmente contraditório com tudo o que vivenciamos.[5]

É surpreendente que, embora estejamos considerando um aspecto familiar da vida diária, a resolução mais convincente deste desencontro entre a física fundamental e a experiência básica requeira que focalizemos a atenção no menos familiar de todos os eventos — a origem do universo. As raízes dessa percepção estão no trabalho do grande físico do século XIX, Ludwig Boltzmann. Posteriormente, ela foi desenvolvida por muitos pesquisadores, sobretudo pelo matemático britânico Roger Penrose. Como veremos, as condições especiais que prevaleciam na criação do universo (um ambiente altamente ordenado durante o Big-Bang ou logo depois dele) podem ter dado uma direção ao tempo, do mesmo modo como dar corda em um relógio, tensionando a sua mola espiral para formar um estado inicial altamente ordenado, faz com que ele marque o tempo para a frente. Assim, e logo explicaremos como, é o quebrar de um ovo — e não o seu desquebrar — que dá conta das condições da origem do universo, cerca de 14 bilhões de anos atrás.

Esse vínculo inesperado entre a experiência cotidiana e o universo primitivo nos dá indicações de por que os eventos se desenvolvem no tempo de uma maneira e nunca da outra, mas não chega a resolver completamente o mistério da seta do tempo. Na verdade, ele transfere o desafio para o domínio da *cosmologia* — o estudo da origem e da evolução do cosmo como um todo — e nos obriga a descobrir se o universo teve mesmo o começo altamente ordenado requerido por esta explicação para a seta do tempo.

A cosmologia é um dos temas que há mais tempo preocupam os homens. E é fácil ver por quê. Nós somos contadores de história, e que história pode ser mais fascinante do que a da criação? Há milênios as tradições filosóficas e religiosas de todo o mundo oferecem as mais diversas versões sobre como tudo — o universo — começou. Também a ciência, ao longo da sua história, tem participado do processo. Mas foi a descoberta da relatividade geral por Einstein que marcou o nascimento da cosmologia científica moderna.

Logo depois da publicação da relatividade geral de Einstein, tanto ele quanto outros cientistas a aplicaram ao universo como um todo. Em poucas décadas essas pesquisas levaram a uma hipótese para o que agora se denomina *teoria do Big-Bang*, que logrou explicar diversos aspectos das observações astronômicas (veja o capítulo 8). Em meados da década de 1960, as evidências em favor da cosmologia do Big-Bang cresceram com a descoberta de uma névoa praticamente uniforme de radiação em micro-ondas que permeia o espaço — invisível a olho nu, mas facilmente mensurável por detectores de micro-ondas —, a qual era prevista pela teoria. Já na década de 1970, depois de dez anos de amplo escrutínio e progresso substancial na determinação de como os componentes básicos do cosmo respondem a mudanças extremas de temperatura e pressão, a teoria do Big-Bang claramente conquistou o lugar de teoria cosmológica principal (veja o capítulo 9).

Apesar desse êxito, a teoria padecia de falhas significativas. Tinha dificuldade em explicar por que o espaço tem a forma geral revelada pelas observações astronômicas e não encontrava explicação para a uniformidade apresentada pela temperatura da radiação em micro-ondas em todo o céu, comprovada pelos intensos estudos realizados depois da sua descoberta. Além disso, o que mais importa para a nossa história é que a teoria do Big-Bang não fornecia uma razão que explicasse convincentemente por que o universo se apresentava de maneira altamente ordenada logo ao seu início, condição necessária para a seta do tempo.

Estas e outras questões em aberto inspiraram um importante avanço nas décadas de 1970 e 1980, conhecido como *cosmologia inflacionária* (veja o capítulo 10). A cosmologia inflacionária modifica a teoria do Big-Bang com a inclusão de um

surto bastante breve de expansão extraordinariamente rápida durante os momentos iniciais do universo (segundo esse enfoque, o tamanho do universo aumentou mais de 1 milhão de trilhões de trilhões de vezes em menos do que um milionésimo de trilionésimo de trilionésimo de segundo). Como ficará claro dentro em pouco, este crescimento estupendo do jovem universo propicia grandes avanços na superação das limitações do modelo do BigBang, possibilitando a explicação da forma do espaço e da uniformidade da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, além de sugerir por que o universo primitivo pode ter sido altamente ordenado — o que nos permite progressos significativos tanto na explicação das observações astronômicas quanto na da seta do tempo, que todos nós conhecemos (veja o capítulo 11).

Contudo, apesar de todo esse êxito, a cosmologia inflacionária continua incubando, há duas décadas, o seu próprio vício de origem. Tal como a teoria padrão do Big-Bang, por ela modificada, a cosmologia inflacionária baseia-se nas equações descobertas por Einstein com a teoria da relatividade geral. Ainda que o poder dessas equações para descrever os objetos de grande massa seja atestado por um grande volume de artigos de pesquisa, há muito tempo se sabe que a análise precisa dos objetos pequenos — como era o universo observável quando tinha a idade de uma fração de segundo — requer o emprego da mecânica quântica. O problema, no entanto, está em que, quando se tenta combinar as equações da relatividade geral com as da mecânica quântica, o resultado é desastroso. As equações perdem completamente o sentido e isso impede que logremos determinar como o universo teve início e se ao nascer ele satisfazia as condições necessárias para explicar a seta do tempo.

Não seria exagerado descrever essa situação como um pesadelo para os teóricos: a falta de um instrumental matemático para analisar um domínio vital que fica além da acessibilidade experimental. E como o espaço e o tempo são tão inextricavelmente ligados a esse domínio inacessível — a origem do universo —, a compreensão total do espaço e do tempo requeivque descubramos equações que incluam as condições extremas de densidade, energia e temperatura que caracterizam os primeiros momentos do universo. Este é um objetivo absolutamente essencial, que, no entender de muitos cientistas, requer o desenvolvimento de uma *teoria unificada.*

REALIDADE UNIFICADA

Nos últimos séculos, os físicos buscaram consolidar o conhecimento do mundo natural mostrando que fenômenos diversos e aparentemente distintos são, na verdade, comandados por um único conjunto de leis da física. Para Einstein, este

objetivo da unificação — explicar o mais vasto conjunto de fenômenos com o mínimo de princípios físicos — tornou-se a paixão da sua vida. Com as suas duas teorias da relatividade, Einstein uniu o espaço, o tempo e a gravidade. Esse triunfo o fez pensar ainda mais longe. Ele sonhou em descobrir um esquema único e abrangente, capaz de conter todas as leis da natureza. Referia-se a esse esquema como a *teoria unificada*. Embora muitos rumores ocasionalmente proclamassem que Einstein teria encontrado tal teoria, todos revelaram-se infundados, e o sonho do grande cientista permaneceu apenas um sonho.

Nos últimos trinta anos de vida, Einstein concentrou-se na busca da teoria unificada e acabou se afastando das correntes principais da física. Muitos dos cientistas mais jovens viam a sua busca solitária da maior de todas as teorias como o delírio de um sábio que, ao final da vida, tomou o rumo errado. Mas, nas décadas que se seguiram à morte de Einstein, um número cada vez maior de físicos retomou o seu propósito, e hoje o desenvolvimento de uma teoria unificada está entre as questões mais importantes da física teórica.

Há muitos anos os cientistas perceberam que o principal obstáculo à realização da teoria unificada residia no conflito fundamental entre os dois maiores avanços da física no século XX: a relatividade geral e a mecânica quântica. Embora esses esquemas se apliquem tipicamente a campos que são completamente diferentes — a relatividade geral às coisas grandes, como as estrelas e as galáxias, e a mecânica quântica às coisas pequenas, como as moléculas e os átomos — ambas se afirmam universais, destinadas a funcionar em todos os campos. No entanto, como mencionamos, sempre que as duas teorias são usadas em conjunto, as equações combinadas produzem respostas sem sentido. Por exemplo, quando a mecânica quântica é empregada com a relatividade geral para calcular a probabilidade da ocorrência deste ou daquele processo relativo à gravidade, em geral a resposta encontrada não é algo como uma probabilidade de 24%, ou 63%, ou 91%, mas sim uma probabilidade *infinita*. Isso não significa uma probabilidade tão alta que você devesse apostar nela todo o seu dinheiro. As probabilidades de mais de 100% não têm sentido. Os cálculos que produzem probabilidades infinitas simplesmente mostram que a combinação das equações da relatividade geral e da mecânica quântica é impossível.

Os cientistas sabem da existência dessa tensão há mais de meio século, mas por muito tempo poucos sentiram-se compelidos a encontrar uma solução para o problema. Na prática, a maior parte dos pesquisadores utilizava a relatividade geral exclusivamente para analisar os objetos de grande massa e reservavam a mecânica quântica para a análise dos objetos pequenos e leves, mantendo ambas as teorias a uma distância razoável uma da outra, de modo a não provocar a sua hostilidade recíproca. A prática dessa política de distensão permitiu, ao longo

dos anos, grandes avanços na compreensão de cada um dos dois campos, mas não pôde produzir uma paz duradoura.

Alguns poucos campos — situações físicas extremas, nas quais se apresentam grandes massas e pequenos volumes ao mesmo tempo — situam-se exatamente na zona de fronteira entre as duas teorias e por isso requerem o emprego simultâneo da relatividade geral e da mecânica quântica. O centro de um buraco negro, onde toda a massa de uma estrela fica concentrada em um ponto minúsculo, e o Big-Bang, em que se imagina que todo o universo observável estivesse contido em um grão muito menor do que um simples átomo, são os dois exemplos mais frequentes. Sem uma união profícua entre a relatividade geral e a mecânica quântica, o colapso de uma estrela e a origem do universo permanecerão misteriosos para sempre. Muitos cientistas preferiram deixar de lado esses temas, ou, pelo menos, não preocupar-se com eles até que outros problemas menos difíceis estivessem resolvidos.

Mas alguns pesquisadores tinham pressa. A existência de um conflito entre as leis conhecidas da física representava a impossibilidade de conhecer a verdade mais profunda — e isso bastava para impedir que esses cientistas descansassem. Os que deram o mergulho, contudo, viram que as águas eram profundas e com fortes correntes. Durante muito tempo poucos progressos foram registrados e as coisas pareciam negras. Apesar de tudo, a tenacidade dos que tiveram a determinação de conservar o rumo e manter vivo o sonho de unir a relatividade geral e a mecânica quântica está sendo recompensada. Os cientistas estão agora explorando os caminhos abertos pelos pioneiros e aproximando-se de uma fusão harmoniosa das leis do grande e do pequeno. O enfoque considerado por muitos como o mais promissor é a *teoria das supercordas* (veja capítulo 12).

Como veremos, a teoria das supercordas começa por fornecer uma nova resposta para uma velha pergunta: quais são os componentes mínimos e indivisíveis da matéria? Por muitas décadas a resposta convencional era a de que a matéria é composta por partículas — elétrons e quarks — que podem ser descritas como pontos, que são indivisíveis e que não têm tamanho nem estrutura interna. A teoria convencional afirma e os experimentos confirmam que essas partículas combinam-se de distintas maneiras para produzir prótons, nêutrons e a grande variedade de átomos e moléculas que formam tudo o que encontramos. A teoria das supercordas conta uma história diferente. Não nega o papel-chave desempenhado pelos elétrons, quarks e outras espécies de partículas reveladas pelos experimentos, mas afirma que essas partículas não são pontos. De acordo com a teoria, cada partícula é composta por um filamento mínimo de energia, algumas centenas de bilhões de bilhões de vezes menor do que um simples núcleo atômico (muito menor do que as escalas que podemos examinar), que

tem a forma de uma pequena corda. E assim como uma corda de violino pode vibrar em diferentes padrões, que produzem diferentes tons musicais, os filamentos da teoria das supercordas também podem vibrar em diferentes padrões. Mas as suas vibrações não produzem notas musicais. O que elas produzem, diz a teoria, são as propriedades das diferentes partículas. Uma corda que vibre em determinado padrão teria a massa e a carga elétrica de um elétron. Segundo a teoria, essa corda vibrante *é* o que tradicionalmente chamamos de elétron. Uma corda que vibre em outros padrões poderá ter as propriedades requeridas para identificá-la como um quark, um neutrino ou qualquer outro tipo de partícula. Todas as espécies de partículas estão unificadas na teoria das supercordas, uma vez que cada uma delas deriva de um padrão vibratório diferente, executado por uma mesma entidade.

Passar de partículas pontuais a cordas tão pequenas que se assemelham a um ponto não parece ser impressionante como mudança de perspectiva. Mas é. Com base nesse começo humilde, a teoria das supercordas combina a relatividade geral e a mecânica quântica em uma teoria única e coerente, que elimina as perniciosas infinitudes nas probabilidades, que tanto afligiam as tentativas anteriores de união. E como se isso não fosse suficiente, a teoria das supercordas revelou ter o fôlego necessário para entrelaçar todas as forças da natureza e toda a matéria em uma mesma tapeçaria teórica. Em síntese, a teoria das supercordas é a candidata principal ao título de teoria unificada, que Einstein tanto buscou.

Essa é uma pretensão grandiosa e, se correta, representa um avanço monumental. Mas o aspecto mais impressionante da teoria das supercordas, que, sem dúvida, faria palpitar o coração de Einstein, é o profundo impacto que ela exerce sobre o entendimento que temos do tecido do cosmo. Como veremos, a fusão entre a relatividade geral e a mecânica quântica que a teoria das supercordas oferece só faz sentido, matematicamente, se submetermos a nossa concepção do espaço-tempo a uma outra revolução. Em vez das três dimensões espaciais e uma dimensão temporal da experiência comum, ela requer *nove* dimensões espaciais e uma temporal. E em uma versão mais robusta da teoria das supercordas, denominada *teoria-M*, a unificação requer dez dimensões espaciais e uma temporal — um substrato cósmico composto de um total de onze dimensões espaço-temporais. Como não vemos essas dimensões adicionais, a teoria das supercordas nos informa que *até aqui só vimos uma fatia estreita da realidade.*

Evidentemente, a falta de comprovação através de observações para as dimensões adicionais pode significar também que elas não existem e que a teoria das supercordas está errada. Essa conclusão seria, no entanto, extremamente apressada. Mesmo décadas antes da descoberta da teoria das supercordas,

cientistas de visão, inclusive Einstein, refletiram sobre a ideia da existência de outras dimensões espaciais, além das que vemos, e sugeriram hipóteses quanto a onde elas poderiam estar escondidas. Os estudiosos da teoria das cordas refinaram substancialmente essas ideias e concluíram que as dimensões adicionais podem ser tão compactas que, para nós e para os equipamentos de que dispomos, torna-se impossível vê-las (veja o capítulo 12), ou ainda que elas possam ser tão grandes que se tornem invisíveis para os elementos com que examinamos o universo (veja o capítulo 13). Ambos os cenários apresentam profundas implicações. O impacto das formas geométricas de dimensões radicalmente compactadas sobre as vibrações das cordas pode conter as respostas a algumas das questões mais fundamentais da física, como, por exemplo, por que o universo tem estrelas e planetas. Por outro lado, a possibilidade de que as dimensões adicionais sejam enormes abre espaço para algo ainda mais notável: a existência de outros mundos, próximos a nós — próximos, não no espaço comum, e sim nas dimensões adicionais — e dos quais, até agora, não temos nenhuma consciência.

A existência de dimensões adicionais é uma ideia corajosa e não apenas o sonho de uma base teórica. Logo poderá ser possível testá-la. A existência das dimensões adicionais pode também levar a resultados espetaculares com a nova geração de aceleradores de partículas, tais como a sintetização, pelo homem, de um buraco negro microscópico, ou a produção de uma grande variedade de novas espécies de partículas nunca antes descobertas (veja o capítulo 13). Estes e outros resultados exóticos poderão proporcionar as primeiras comprovações da existência de outras dimensões além das que são diretamente visíveis, o que nos levaria a aproximar-nos mais da consagração da teoria das supercordas como a tão esperada teoria unificada.

Se a teoria das supercordas estiver correta, teremos forçosamente de aceitar que a realidade conhecida é apenas uma leve cortina que nos oculta a rica e espessa textura do tecido cósmico. Apesar da afirmação de Camus, a determinação do número de dimensões espaciais — especialmente o fato de sabermos que não seriam apenas três — seria muito mais do que um detalhe científico interessante, mas em última análise inconsequente. A descoberta de dimensões adicionais revelaria que a totalidade da experiência humana nos manteve completamente alienados de um aspecto básico e essencial do universo. Ela nos ensinaria que mesmo as características do cosmo que pensamos ser imediatamente acessíveis aos nossos sentidos não o são, necessariamente.

REALIDADE PASSADA E FUTURA

Com o desenvolvimento da teoria das supercordas, os pesquisadores estão otimistas quanto a que possamos finalmente dispor de um esquema que abrangerá todas as condições, por mais extremas que sejam, o que nos permitirá, um dia, com a ajuda de equações, explorar o passado remoto e compreender como eram as coisas no exato momento em que teve início o universo que conhecemos. Até agora, ninguém domina a teoria com destreza suficiente para aplicá-la de maneira inequívoca ao Big-Bang, mas o entendimento da cosmologia projetada pela teoria das supercordas tornou-se uma das mais altas prioridades das pesquisas atuais. Nos últimos anos, complexos programas de pesquisas sobre a cosmologia das supercordas em todo o mundo produziram novos esquemas cosmológicos (veja o capítulo 13), sugeriram novas maneiras de testar a teoria por meio de observações astrofísicas (veja o capítulo 14) e propiciaram as primeiras especulações a respeito do papel que as supercordas poderão desempenhar na explicação da seta do tempo.

Em razão do amplo papel que desempenha na nossa vida cotidiana e do seu vínculo íntimo com a origem do universo, a seta do tempo preenche um lu- gar-chave entre a realidade que vivenciamos e a realidade mais sutil que a ciência de vanguarda trata de descobrir. Ela proporciona, assim, um fio condutor entre muitos dos temas que discutiremos e reaparecerá constantemente nos capítulos que se seguem. E isso é muito conveniente. O tempo está entre os fatores mais importantes que dão conformação às nossas vidas. À medida que formos nos familiarizando com a teoria das supercordas e com o seu desdobramento, a teoria-M, o nosso conhecimento se aprofundará e o nosso enfoque sobre a origem do tempo e a sua seta ganhará progressiva nitidez. Se deixarmos voar a nossa imaginação, podemos até mesmo supor que o alcance do nosso conhecimento nos permitirá, um dia, navegar pelo espaço-tempo e assim nos libertarmos das amarras espaço-temporais às quais estamos presos há milênios (veja o capítulo 15).

É claro que a possibilidade de que alcancemos esse último propósito é extremamente pequena. Mas mesmo que nunca cheguemos a ter o poder de controlar o espaço e o tempo, o conhecimento traz as suas próprias recompensas. Decifrar a verdadeira natureza do espaço e do tempo seria um testemunho da capacidade intelectual humana. Poderíamos, finalmente, entender o espaço e o tempo — os elementos que marcam, silenciosa e permanentemente, os limites extremos da experiência humana.

A MAIORIDADE NO ESPAÇO E NO TEMPO

Quando virei a última página do *Mito de Sísifo*, muitos anos atrás, surpreendi-me por ver que o texto projetara um sentimento de otimismo. Afinal de contas, não seria de esperar que a história de um homem condenado a empurrar uma pedra até o topo de uma montanha, sabendo perfeitamente que ela voltará a cair e ele terá de fazer tudo de novo, tivesse um final feliz. Camus nos fala, no entanto, de uma profunda esperança na capacidade de Sísifo para exercer o livre-arbítrio, para perseverar diante de obstáculos insuperáveis e para afirmar a escolha da sobrevivência, mesmo quando condenado a uma tarefa absurda em um universo indiferente. Abrindo mão de tudo o que esteja além da experiência imediata e deixando de preocupar-se com a compreensão dos significados mais profundos, Sísifo, segundo Camus, triunfa.

Fiquei absolutamente impressionado com a capacidade de Camus de encontrar esperança onde a maior parte de nós só encontraria desespero. Mas desde então, e sobretudo depois de adulto, vi que não podia aceitar a afirmação do autor de que um conhecimento mais profundo do universo não poderia tornar a vida mais rica e gratificante. Sísifo era o herói de Camus, mas os grandes cientistas — Newton, Einstein, Niels Bohr e Richard Feynman — tornaram-se os meus. E quando li a descrição de uma rosa, feita por Feynman — em que ele explica que pode sentir, como qualquer pessoa, o perfume e a beleza da flor, mas o fato de ser um estudioso de física enriquecia enormemente a sua experiência porque ele podia perceber também a maravilha e a magnificência dos processos moleculares, atômicos e subatômicos envolvidos —, converti-me definitivamente. Eu queria o que Feynman descrevia: avaliar a vida e conhecer o universo em todos os níveis possíveis, e não só naqueles que são acessíveis aos frágeis sentidos humanos. A busca da compreensão mais profunda do cosmo tornou-se a minha razão de ser.

Como físico profissional, há muito tempo percebi que havia grande dose de ingenuidade na minha empolgação juvenil com a física. Os físicos geralmente não passam os dias contemplando flores em estado de êxtase cósmico. Ao contrário, dedicamos boa parte do nosso tempo lutando com equações matemáticas complexas rabiscadas em quadros-negros surrados. O progresso pode ser lento. As ideias promissoras, na maior parte das vezes, não levam a nada. Assim é a natureza da pesquisa científica. Mesmo assim, até nos períodos em que o progresso era mínimo, vi que o esforço empregado nessa luta e nesses cálculos apenas me fazia sentir uma relação mais íntima com o cosmo. Vi que é possível conhecer o universo não só decifrando os seus mistérios, mas também fazendo uma imersão neles. Ter respostas é fabuloso. Quando elas são confirmadas por experimentos, melhor ainda. Mas mesmo as respostas que afinal se revelam falsas são resultado de um profundo engajamento com o cosmo, o

qual ilumina intensamente os problemas e o próprio universo. Mesmo quando a “pedra” de uma exploração científica particular rola pela montanha, encosta abaixo, aprendemos algo e a nossa experiência do cosmo se enriquece.

Evidentemente, a história da ciência revela que a pedra do nosso esforço científico coletivo — composto por contribuições de inúmeros cientistas de todos os continentes através dos séculos — não rola encosta abaixo. Ao contrário de Sísifo, não temos de voltar continuamente ao ponto de partida. Cada geração trabalha a partir do ponto onde chegou a anterior, rende homenagem ao duro trabalho, aos êxitos e à criatividade dos seus antecessores e avança um pouco mais. Teorias novas e medições mais refinadas são a marca do progresso científico, que resulta do que foi feito antes, quase sempre sem ter de recomeçar do zero. Sendo assim, a nossa tarefa está longe de ser absurda ou inútil. Levando a pedra ao topo da montanha, realizamos a mais nobre e fina das tarefas: descobrir o lugar onde vivemos, gozar com as maravilhas que descobrimos e legar o conhecimento aos que nos seguirão.

Para uma espécie que, na escala cósmica, mal aprendeu a andar, os desafios são assombrosos. Mas ao longo dos últimos trezentos anos progredimos da realidade clássica para a relativística e daí para a quântica e agora nos aventuramos a explorar a realidade unificada. Nossas mentes e nossos instrumentos varrem a amplidão do espaço e do tempo e nos aproximam cada vez mais de um mundo que continua a mostrar-se um mestre na arte de ocultar a sua natureza. No nosso percurso pertinaz com vistas a penetrar nos segredos do cosmo, ganhamos a intimidade que ocorre apenas quando nos aproximamos da clareza da verdade. As nossas explorações ainda têm muito o que progredir, mas para vários de nós parece ser que a humanidade está finalmente chegando ao fim da infância.

Por certo, a nossa maioridade, aqui nos arrabaldes da Via Láctea,[6] já vem chegando há algum tempo. De uma maneira ou de outra, exploramos o mundo e contemplamos o cosmo há milênios. Mas na maior parte desse período, poucas e breves foram as investidas que fizemos no desconhecido e cada vez regressamos com um pouco mais de entendimento, mas basicamente iguais. A impetuosidade de Newton nos fez hastear a bandeira da pesquisa científica moderna e nunca mais ela foi baixada. Desde então só fizemos avançar. E todas as nossas viagens começaram com uma simples pergunta.

O que é o espaço?

2. O universo e o balde

O espaço é uma abstração humana ou uma entidade física?

Nem sempre um balde de água é o personagem central de um debate que dura trezentos anos. Mas um balde que pertenceu a Sir Isaac Newton não é um balde qualquer, e um pequeno experimento que ele descreveu em 1689 exerceu profunda influência sobre alguns dos físicos mais proeminentes do mundo desde então. O experimento é o seguinte: pegue um balde cheio de água e pendure-o com uma corda; torça bem a corda, de modo que ela esteja pronta para desenrolar-se, e solte-a. Inicialmente, o balde começa a girar, mas a água no seu interior permanece razoavelmente estacionária, com a superfície serena e plana. À medida que a rotação do balde ganha rapidez, o seu movimento é pouco a pouco transmitido à água, por meio da fricção, e ela começa também a girar. Então, progressivamente a superfície da água toma uma forma côncava, mais alta na borda e mais baixa no centro, como na figura 2.1.
Esse é o experimento — que não chega a causar palpitações cardíacas. Mas se refletirmos um pouco, veremos que esse balde de água que gira é extremamente enigmático. Resolver esse enigma, como ainda não fizemos em mais de trezentos anos, é um dos passos mais importantes para alcançar a compreensão da estrutura do universo. Saber o porquê disso requer alguns conhecimentos, mas você verá que vale a pena.

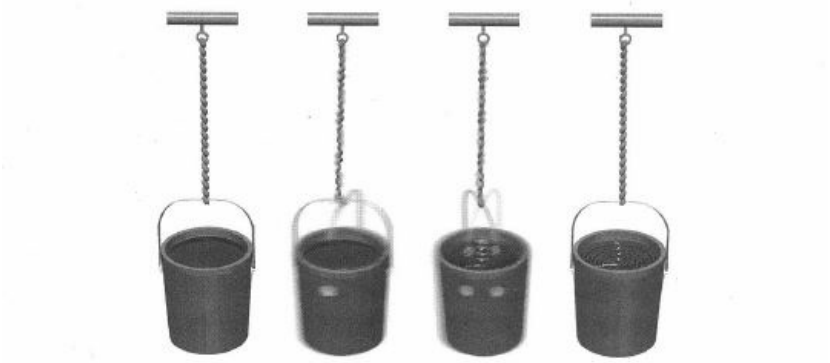


Figura 2.1. *No início, a superfície da água está plana e assim permanece quando o balde começa a girar. Em seguida, à medida que a água começa também a girar, a sua superfície torna-se côncava e permanece côncava enquanto a água estiver girando, mesmo quando a rotação do balde sofre desaceleração e pára.*

A RELATIVIDADE ANTES DE EINSTEIN

“Relatividade” é uma palavra associada a Einstein, mas o seu conceito vem de muito antes. Galileu, Newton e tantos outros sabiam bem que a *velocidade*— ou seja, a rapidez e a direção do movimento de um objeto (a palavra inglesa *velocity* distingue-se da palavra *speed* justamente por se referir simultaneamente à rapidez do movimento de um objeto e à sua direção. Em português não dispomos de uma palavra única que contenha os dois conceitos N. T.) — é relativa. Na nossa era, do ponto de vista de um goleiro de futebol, uma falta cobrada da entrada da área pode chegar a uma velocidade de cem quilômetros por hora. Do ponto de vista da bola, é *o goleiro* quem se aproxima a cem quilômetros por hora. Ambas as descrições estão corretas. O que muda é a perspectiva. O movimento só tem significado em termos de uma relação: a velocidade de um objeto só pode ser especificada em relação à de outro objeto. Provavelmente você já teve essa experiência. Quando o trem em que você se encontra está ao lado de outro e você percebe a existência de um movimento relativo entre eles, não se pode dizer de imediato qual dos dois trens está realmente movendo-se sobre os trilhos. Galileu descreveu esse efeito usando o meio de transporte da sua época, os barcos. Deixe cair uma moeda quando estiver em um barco que navega em águas serenas, disse ele, e ela chegará aos seus pés exatamente como se estivesse em terra firme. Da sua perspectiva, você estará certo se declarar que está estacionário e é a água que passa sob o casco da embarcação. E como, segundo este ponto de vista, você não está em movimento, a moeda cairá exatamente da mesma maneira como ocorreria antes de você ter embarcado.

Evidentemente, há circunstâncias em que o seu movimento parece intrínseco, quando você pode senti-lo e parece em condições de declarar que tem a certeza de estar se movendo, sem ter de recorrer a comparações externas. Isso é o que acontece com o movimento *acelerado*, no qual a sua velocidade e/ou a sua direção sofrem alteração. Se o barco em que você está de repente dá uma guinada, diminui a velocidade, ou a aumenta, ou muda de direção, ou é apanhado em um rodamoinho e começa a rodar e a rodar, você sabe que está se movendo. E isso você percebe sem ter de olhar para outro lugar e comparar o seu movimento com algum ponto de referência. Você sabe que está em movimento mesmo com os olhos fechados, porque sente o movimento. Quando o seu movimento é uniforme e segue uma trajetória reta e imutável — denominado *movimento a velocidade constante* —, você não o sente. Mas sente, sim, as *mudanças* na sua velocidade.

Se você refletir por um momento a esse respeito, verá que aqui há algo estranho. O que é que as mudanças de velocidade têm de tão especial que lhes permite ser independentes do contexto e ter significado intrínseco? Se a velocidade é algo

que só faz sentido por meio de comparações — pois dizemos que *uma coisa* se move com relação a *outra* —, por que é que as mudanças de velocidade apresentam essa peculiaridade de não requererem comparações para ter sentido? Será que, na verdade, elas, *sim*, precisam que façamos uma comparação? Será que existe alguma comparação implícita ou oculta que atua cada vez que experimentamos o movimento acelerado ou nos referimos a ele? Pensando assim, estamos nos dirigindo a uma questão fundamental, que se relaciona, talvez de maneira surpreendente, com os aspectos mais profundos que envolvem o significado do espaço e do tempo.

A percepção que Galileu tinha do movimento, especialmente a sua afirmação de que a Terra se move, fez cair sobre ele a fúria da Inquisição. Descartes, mais cauteloso, buscou evitar semelhante destino, no *Principia Philosophiae*, e baseou a sua explicação do movimento em um esquema equivocado, que não resistiu ao exame profundo a que Newton o submeteu cerca de trinta anos depois. Descartes disse que os objetos resistem a mudanças em seu estado de movimento: algo que está imóvel permanecerá imóvel até que algo ou alguém o force a mover-se. Algo que se move em linha reta e a velocidade constante manterá esse movimento até que algo ou alguém o force a alterá-lo. Mas qual é o significado real das noções de "imobilidade" e "linha reta e velocidade constante"? perguntou Newton. Imobilidade ou velocidade constante com relação a quê? Imobilidade ou velocidade constante a partir de que ponto de vista? E se a velocidade não for constante, com respeito a que e de que ponto de vista ela não é constante? Descartes trabalhou corretamente certos aspectos do significado do movimento, mas Newton mostrou que ele deixara sem resposta algumas questões cruciais.

Newton — um homem para quem a busca da verdade era tão importante que chegou a colocar uma agulha entre o seu próprio globo ocular e o osso para estudar a anatomia do olho e, já maduro, como chefe da Casa da Moeda, impôs os castigos mais severos aos falsificadores, tendo mandado mais de cem para o patíbulo — não tolerava um raciocínio falso ou incompleto. Portanto, ele decidiu procurar a verdade. Isso o levou a trazer o balde para a discussão.[1]

O BALDE

Quando deixamos o balde, ele e a água no seu interior estavam girando e a superfície da água tinha uma forma côncava. A questão colocada por Newton era: *por que* a superfície da água toma essa forma? Você dirá: porque ela está girando, pois, assim como você se sente empurrado contra a porta do carro

quando ele faz uma curva fechada, também a água é empurrada contra a borda do balde por causa da sua rotação. E o único lugar para onde a água que sofre a pressão pode ir é para cima. O raciocínio está correto, mas não resolve a questão que Newton tinha em mente. Ele queria saber o que *significa* dizer que a água está girando: girando com relação a quê? Ele estava conjecturando a respeito dos próprios fundamentos do movimento e não parecia nem um pouco disposto a aceitar que o movimento acelerado — como a rotação — dispense a necessidade de comparações externas. (os termos força *centrífuga* e força *centrípeta* são por vezes usados quando se descreve o movimento de rotação. Mas eles são meros nomes. A nossa intenção é saber por que o movimento de rotação dá origem à força).

Uma sugestão natural seria usar o próprio balde como objeto de referência. Mas, como Newton demonstrou, isso não dá certo. Veja bem: no início, quando fazemos o balde começar a girar, evidentemente há um movimento *relativo* entre o balde e a água, uma vez que a água não se move imediatamente. Mesmo assim, a superfície da água mantém-se plana. Pouco depois, quando a água também está girando e *não há* movimento relativo entre ela e o balde, a superfície da água fica *côncava*. Portanto, tomando o balde como nosso objeto de referência, obtemos exatamente o oposto do que esperávamos: quando há movimento relativo, a superfície da água está plana; e quando não há movimento relativo, a superfície está côncava.

Na verdade é possível levar o experimento com o balde de Newton um pouco mais adiante. O balde gira, a corda se distende e volta a torcer-se, agora no sentido contrário, o que faz com que o balde perca aceleração, chegando a parar, momentaneamente, enquanto a água continua a girar. Neste ponto, existe um movimento relativo entre a água e o balde, que é *o mesmo* que ocorria no começo do experimento (exceto quanto à diferença irrelevante entre o movimento horário e o anti-horário), mas a forma da superfície da água é *diferente* (antes era plana e agora é côncava); isso mostra de maneira conclusiva que o movimento relativo não logra explicar a forma da superfície.

Descartado o balde como referência relevante para o movimento da água, Newton teve a coragem de dar o passo seguinte. Imagine, sugeriu ele, outra versão do experimento do balde giratório, levado a efeito no espaço profundo, frio e completamente vazio. Não podemos desenvolver exatamente o mesmo experimento, uma vez que a forma da superfície da água depende, em parte, da atração gravitacional da Terra, e nesta versão a Terra está ausente. Então, para criarmos um exemplo mais praticável, imaginemos um grande balde — grande como um parque de diversões — que flutua na escuridão do espaço vazio, e imaginemos que um destemido astronauta, Homer, está amarrado à parede interior do balde. (Newton não usou este exemplo; ele sugeriu duas pedras

atadas por uma corda, mas o efeito é o mesmo). O sinal de que o balde está girando, análogo à força centrífuga sofrida pela água, que produz nela a superfície côncava, é que Homer se sentirá pressionado contra a parede do balde, com a pele do rosto mais esticada, o estômago ligeiramente comprimido e o cabelo espichando-se em direção à parede. Aqui vem a pergunta: no espaço *totalmente* vazio — sem o Sol, sem a Terra, sem o ar, sem nada —, o que poderia fazer o papel de "algo" com relação ao qual o balde está girando? Em princípio, como estamos imaginando que o espaço é completamente vazio, exceto pelo balde e o seu conteúdo, pareceria que simplesmente não há nada que possa servir como "algo". Newton discordou.

A sua resposta leva ao último dos recipientes como o esquema referencial relevante: *o próprio espaço.* Ele considerou que o cenário transparente e vazio em que todos nos encontramos e em que todos os movimentos ocorrem é uma entidade física real, à qual deu o nome de *espaço absoluto.*[2] É impossível segurar ou apertar o espaço absoluto, ou cheirá-lo, ou prová-lo, ou ouvi-lo, mas Newton declarou que ele é "algo": o "algo" que fornece a referência mais verdadeira para descrever o movimento. Um objeto está verdadeiramente em repouso quando está em repouso com relação ao espaço absoluto. Um objeto está verdadeiramente em movimento quando está em movimento com relação ao espaço absoluto. E o mais importante, concluiu Newton, é que um objeto está verdadeiramente acelerando quando estiver acelerando com relação ao espaço absoluto.

Newton usou essa hipótese para explicar o experimento do balde terrestre da seguinte maneira. No início do experimento, o balde está girando com relação ao espaço absoluto, mas a água está estacionária com relação a ele. Por isso, a superfície da água está plana. À medida que a rotação da água se equipara à do balde, ela passa a girar com relação ao espaço absoluto e por isso a sua superfície torna-se côncava. À medida que a rotação do balde desacelera, porque a corda se retorce no sentido contrário ao inicial, a água continua a girar — com relação ao espaço absoluto — e por isso a sua superfície permanece côncava. Assim, embora o movimento relativo entre a água e o balde não possa explicar as observações, o movimento relativo entre a água e o espaço absoluto pode. O próprio espaço proporciona o esquema referencial verdadeiro para definir o movimento.

O balde é apenas um exemplo. O raciocínio é, naturalmente, mais geral. Segundo a perspectiva de Newton, quando o carro em que você está faz uma curva fechada, você sente a alteração no seu movimento porque ele se altera com relação ao espaço absoluto. Quando o avião em que você está rola pela pista para decolar, você se sente pressionado contra o assento porque está acelerando com

relação ao espaço absoluto. Se você rodopiar, como quem patina no gelo, sentirá que os braços tenderão a abrir-se porque você estará movendo-se com relação ao espaço absoluto. Por outro lado, se alguém pudesse fazer girar o rinque de patinação, estando você parado (supondo uma situação idealizada que despreza o atrito entre os patins e o gelo) — o que criaria o mesmo movimento relativo entre você e o gelo —, você não sentiria os braços tendendo a abrir-se porque não estaria acelerando com relação ao espaço absoluto. E para que você não se distraia com detalhes irrelevantes referentes aos exemplos que envolvem o corpo humano, quando as duas pedras do exemplo de Newton giram no espaço vazio amarradas por uma corda, a corda se estica porque as pedras se movem com relação ao espaço absoluto. O espaço absoluto tem a palavra final no que diz respeito ao movimento.

Mas, afinal, o que é o espaço absoluto? Ao lidar com essa questão, Newton usou um pouco de malabarismo e um pouco de recurso autoritário. Começou por escrever nos *Principia*: "Não defino tempo, espaço, lugar e movimento porque são conhecidos por todos".[3] Com isso, ele evitou ter de descrevê-los com rigor e precisão. As suas palavras seguintes ficaram famosas: "O espaço absoluto, em sua natureza própria, sem referência a nenhuma coisa externa, permanece sempre similar e imóvel". Ou seja, o espaço absoluto apenas é; e é para sempre. Ponto final. Mas existem indícios de que Newton não se sentia inteiramente satisfeito ao declarar simplesmente a existência e a importância de algo que não se pode ver, medir nem interferir. Ele escreveu:

> É matéria de grande dificuldade descobrir e distinguir claramente os movimentos verdadeiros de corpos específicos dos movimentos aparentes, porque as partes do espaço imóvel em que esses movimentos são executados não estão, de modo algum, sob a observação dos nossos sentidos.[4]

Newton nos deixa, portanto, em uma posição até certo ponto desconfortável. Põe o espaço absoluto no centro da descrição do elemento mais básico e essencial da física — o movimento —, mas deixa vaga a sua definição e reconhece a sua própria insatisfação com a situação assim criada. Muitos outros também expressaram essa insatisfação.

DEBATE ESPACIAL

Einstein disse que, quando alguém usa palavras como "vermelho", "duro" ou "desapontamento", todos sabemos o que se está querendo dizer. Mas para a palavra "espaço", "cuja relação com a experiência psicológica é menos direta, há uma grande incerteza quanto à interpretação".[5] Essa incerteza vem já de muito

tempo e a luta para compreender o significado do espaço é antiga. Demócrito, Epicuro, Lucrécio, Pitágoras, Platão, Aristóteles e muitos dos seus seguidores através dos tempos enfrentaram-se, de uma maneira ou de outra, com a questão do significado do "espaço". Há uma diferença entre espaço e matéria? O espaço tem existência independente da presença de objetos materiais? O espaço vazio existe? O espaço e a matéria são mutuamente excludentes? O espaço é finito ou infinito?

Durante milhares de anos, as análises filosóficas do espaço têm causado outras tantas indagações teológicas. Segundo alguns, Deus é onipresente, ideia que dá ao espaço um caráter divino. Essa linha de pensamento foi defendida por Henry More, teólogo e filósofo do século XVII que, de acordo com certas opiniões, foi um dos mentores de Newton.[6] Ele acreditava que se o espaço fosse vazio não existiria, mas acrescentava que essa é uma observação irrelevante porque, mesmo quando despido de objetos materiais, o espaço é preenchido pelo espírito, de modo que ele *nunca* está verdadeiramente vazio. O próprio Newton adotou uma versão dessa ideia, admitindo que o espaço é preenchido por uma "substância espiritual", assim como por uma substância material, mas tomou o cuidado de acrescentar que tal elemento espiritual "não pode ser um obstáculo para o movimento da matéria, sendo como se nada afetasse o seu caminho".[7] O espaço absoluto, declarou Newton, é o sensório de Deus.

Estas reflexões filosóficas e religiosas sobre o espaço podem ser curiosas ou provocantes, mas, tal como vemos a partir do comentário acautelador de Einstein, falta-lhes fundamentalmente exatidão nas descrições. Mesmo assim, *existe* uma questão fundamental e bem formulada que surge a partir dessa discussão: devemos atribuir ao espaço uma realidade independente, como fazemos para outros objetos materiais mais comuns, como o livro que você está lendo, ou devemos concebê-lo simplesmente como uma palavra que descreve relações entre objetos materiais comuns?

O grande filósofo alemão Gottfried Wilhelm von Leibniz, contemporâneo de Newton, acreditava firmemente que o espaço não existe em qualquer sentido convencional. Falar de espaço, afirmava ele, não é nada mais do que uma maneira fácil e conveniente de codificar onde estão as coisas, umas com relação às outras. Mas ele declarava que, não havendo objetos *no* espaço, ele perde qualquer significado ou existência independente. Pense no alfabeto. Ele coloca em ordem as letras que usamos — diz-nos que *a* está ao lado de *b*, que *d* está cinco letras antes de *j*, que há três letras entre *q e u*, e assim por diante. Mas sem as letras o alfabeto não tem significado. Ele não tem uma existência independente e superior à das letras. Ao contrário, o alfabeto só existe em função

das letras cujas relações lexicográficas ele produz. Leibniz afirmava que a mesma coisa é válida para o espaço: o espaço não tem nenhum significado além de propiciar a verbalização natural para a discussão do relacionamento entre a localização de um objeto e a de outro. De acordo com Leibniz, se todos os objetos fossem removidos do espaço — se o espaço fosse completamente vazio —, ele seria tão carente de significado quanto um alfabeto sem letras.

Leibniz adiantou uma série de argumentos em favor da sua posição, denominada *relacionista.* Ele argumentava, por exemplo, que se o espaço realmente existe como uma entidade, como uma substância ambiental, Deus teria de escolher o lugar que o universo ocuparia dentro dessa substância. Mas como poderia Deus, cujas decisões são todas plenamente justificadas e nunca aleatórias ou casuais, distinguir um lugar do espaço vazio uniforme de qualquer outro lugar, se todos são iguais? Para os ouvidos acostumados à ciência, a formulação desse argumento parece estranha, mas se removermos o elemento teológico, como o próprio Leibniz fez em outras posições que defendeu, somos assaltados por questões espinhosas: qual a localização do universo no espaço? Se o universo como um todo se movesse três metros para a direita ou para a esquerda — mantendo intactas todas as posições relativas dos objetos materiais —, como poderíamos saber? Com que velocidade o universo como um todo se move através do espaço? Se somos fundamentalmente incapazes de detectar o espaço, ou as mudanças que ocorrem nele, como podemos afirmar que ele realmente existe?

Foi nesse ponto que Newton trouxe o balde e mudou o debate de maneira espetacular. Embora ele concordasse quanto a que a detecção direta de certas características do espaço absoluto é difícil, ou talvez impossível, argumentava que a existência do espaço absoluto tem consequências observáveis: as acelerações, como as que ocorrem com o balde, são acelerações com relação ao espaço absoluto. Assim, a forma côncava da água, segundo Newton, é uma consequência da existência do espaço absoluto. E ele argumentava ainda que, uma vez que tenhamos uma evidência sólida em favor da existência de algo, por mais indireta que seja ela, a discussão está encerrada. Com um golpe de mestre, Newton deslocou o debate sobre o espaço das especulações filosóficas para o terreno dos dados cientificamente verificáveis. O efeito foi visível. No devido momento, Leibniz foi forçado a reconhecer: “Admito que há uma diferença entre o movimento verdadeiramente absoluto de um corpo e uma simples mudança relativa da sua situação com relação a outro corpo”.[8] Não se tratava de uma capitulação com relação ao espaço absoluto de Newton, mas a verdade é que a posição relacionista sofreu um duro golpe.

Nos duzentos anos seguintes, os argumentos de Leibniz e outros contra a atribuição de uma realidade independente ao espaço praticamente não produziram ecos na comunidade científica.[9] O pêndulo se deslocara com clareza para o ponto de vista de Newton. As suas leis do movimento, baseadas no seu conceito de espaço absoluto, passaram a predominar. Por certo, o êxito dessas leis em descrever as observações foi a razão essencial da sua aceitação. É importante notar, contudo, que o próprio Newton via todas as suas realizações na física apenas como os elementos que constituíam os alicerces do que ele considerava ser a sua descoberta principal: o espaço absoluto. Para ele, o espaço era tudo.[10]

MACH E O SIGNIFICADO DO ESPAÇO

Quando eu era menino, meu pai e eu fazíamos um jogo enquanto andávamos pelas ruas de Manhattan. Um de nós dois olhava para o que estava acontecendo e secretamente se fixava em algo — um ônibus que passava, uma pomba que aterrissava, um homem que, sem querer, deixava cair uma moeda — e então descrevia como a coisa pareceria a partir de uma perspectiva diferente, como o volante do ônibus, a pomba ao aterrissar ou a moeda ao cair. O jogo consistia em que um de nós fazia uma descrição incomum, como: “Estou andando em uma superfície cilíndrica e avermelhada, envolvida por paredes espessas e apertadas, e uma chuva grossa está caindo do céu”, e o outro tinha, então, de descobrir que este era o ponto de vista de uma formiga andando em um cachorro-quente no momento em que o vendedor lhe punha o molho. Paramos de jogar anos antes de eu começar a estudar física, mas o jogo é pelo menos parcialmente responsável por certa aflição que senti quando descobri as leis de Newton.

O jogo nos fazia ver o mundo de diferentes pontos de vista e partia do princípio de que todos eles têm o mesmo valor. Mas, de acordo com Newton, se bem que você certamente possa contemplar o mundo a partir da perspectiva que escolher, os diferentes pontos de vista não estavam, de modo algum, em pé de igualdade. Do ponto de vista de uma formiga na bota do patinador, o gelo e o rinque estão girando; do ponto de vista de um espectador na arquibancada, é o patinador que está girando. Os dois pontos de vista parecem ser igualmente válidos; parecem estar em pé de igualdade; parecem manter uma relação de simetria em cada rotação. No entanto, de acordo com Newton, uma dessas perspectivas é mais correta do que a outra, uma vez que, se, *na verdade*, quem gira é o patinador, os seus braços tenderão a abrir-se; enquanto, *na verdade*, se fosse o rinque que girasse, isso não aconteceria. Aceitar o espaço absoluto de Newton significava aceitar um conceito absoluto de aceleração e, em particular, aceitar uma resposta

absoluta a respeito de quem ou o que de fato está girando. Lutei para entender como isso se dava. Todas as fontes que consultei — livros e professores — concordavam que só o movimento relativo era relevante ao considerarmos o movimento à velocidade constante. Por quê, então, eu me perguntava, o movimento acelerado tem de ser tão diferente? Por que a aceleração *relativa* não poderia ser, como a velocidade relativa, a única coisa relevante quando consideramos o movimento a velocidades não constantes? A existência do espaço absoluto decretava o contrário, mas isso me parecia estranhamente peculiar.

Muito tempo depois verifiquei que nos últimos séculos diversos físicos e filósofos — por vezes em silêncio, por vezes em voz alta — já haviam se debruçado sobre o mesmo problema. Embora o balde de Newton parecesse mostrar de maneira definitiva que é o espaço absoluto o que seleciona uma perspectiva com relação a outra (se alguém ou alguma coisa está girando com relação ao espaço absoluto, estará girando *de verdade*; se não, não estará), essa solução deixava insatisfeitas muitas pessoas que refletem a respeito dessas questões. Além da intuição de que nenhuma perspectiva deveria ser "mais correta" do que as outras, e além da proposta claramente razoável de Leibniz, de que apenas o movimento relativo entre os objetos materiais tem significado, o conceito de espaço absoluto deixava muitas cabeças pensando como pode ser que o espaço absoluto nos permita identificar o movimento acelerado verdadeiro, como no caso do balde, e não logre fazer o mesmo com relação ao movimento a velocidade constante. Afinal, se o espaço absoluto existe realmente, deveria propiciar uma referência para *todos* os movimentos, e não apenas para o movimento acelerado. Se o espaço absoluto existe realmente, por que não nos proporciona uma maneira de identificar onde estamos localizados no sentido absoluto, em um sentido que não requeira usar a nossa posição com relação a outros objetos materiais como ponto de referência? E se o espaço absoluto existe realmente, como pode ser que nos afete (fazendo abrir os nossos braços quando giramos, por exemplo) e que, aparentemente, nós não tenhamos meios de afetá-lo?

Nos séculos que se seguiram ao trabalho de Newton, estas questões foram por vezes debatidas, mas foi só em meados do século XIX, quando entrou em cena o físico e filósofo austríaco Ernst Mach, que surgiu uma visão nova, corajosa, ampla e extremamente influente a respeito do espaço — visão que, entre outras coisas, exerceria um forte impacto sobre Albert Einstein.

Para bem compreender o enfoque de Mach — ou melhor, para uma apreciação moderna das ideias frequentemente atribuídas a Mach —, voltemos ao balde por um momento. (existe um debate a respeito das verdadeiras ideias de Mach sobre o material que se

segue. Certos trechos da sua obra são um tanto ambíguos e certas ideias a ele atribuídas provêm de interpretações dadas posteriormente. Como ele aparentemente conhecia essas interpretações e não se preocupou em corrigi-las, diz-se que ele concordou com tais conclusões. Mas a precisão histórica pode ser mais bem preservada se, cada vez que eu escrever "Mach argumentou" ou "as ideias de Mach", você tiver em mente que me refiro à "interpretação predominante dada a um enfoque iniciado por Mach"). Há algo estranho na argumentação de Newton. O experimento do balde nos desafia a explicar por que a superfície da água é plana em uma situação e côncava em outra. Na busca de explicações, examinamos as duas situações e verificamos que a diferença básica entre elas era se a água estava ou não girando. Naturalmente, tentamos explicar a forma da superfície da água em função do seu estado em movimento. Mas eis a questão: antes de introduzir o espaço absoluto, Newton concentrou-se exclusivamente no balde como referência possível para a determinação do movimento da água e, como vimos, esse método não funcionou. Porém há outras referências que podem ser naturalmente usadas para avaliar o movimento da água, como o prédio onde se realiza o experimento — o chão, o teto, as paredes. Ou, se a prova for feita ao ar livre em um dia ensolarado, as árvores, ou os prédios à volta, ou o próprio solo propiciariam a referência "estacionária" para determinar se a água está ou não girando. E se estivéssemos realizando o experimento flutuando no espaço exterior, recorreríamos às estrelas como nossa referência estacionária.

Isso leva à questão seguinte. Será que Newton usou o balde com tanta ligeireza que deu atenção apenas superficial ao movimento relativo que costumamos invocar na vida real, como o que existe entre a água e o prédio, ou a água e a terra, ou a água e as estrelas? Será que esse movimento relativo *pode* explicar a forma da superfície da água e eliminar a necessidade de introduzir o conceito de espaço absoluto? Essa foi a linha de pensamento trazida por Mach na década de 1870.

Para compreender melhor o ponto de vista de Mach, imagine que você está flutuando no espaço exterior, sentindo-se calmo, estático e sem peso. Você vê as estrelas à distância e elas também parecem perfeitamente estacionárias. (É um belo momento zen.) De repente, passa alguém, puxa o seu corpo e o deixa girando no espaço. Você notará duas coisas. Primeiro, sentirá que os seus braços e pernas parecerão querer separar-se do corpo e, se você deixasse, eles sairiam voando. Segundo, se você olhar para as estrelas, elas já não parecerão estacionárias, mas sim percorrendo grandes arcos circulares através do firmamento. A sua experiência revela, portanto, uma associação íntima entre a força que você sentiu sobre o seu corpo e a percepção do movimento com relação às estrelas distantes. Mantenha isso em mente enquanto voltamos ao experimento, mas em um contexto diferente.

Imagine agora que você está imerso na escuridão do espaço *completamente* vazio: sem estrelas, sem galáxias, sem planetas, sem ar, sem nada — só a escuridão total. (Um belo momento existencial.) Se, desta vez, você começar a girar, será capaz de sentir que está girando? Os seus braços e pernas se abrirão? A nossa experiência da vida cotidiana nos leva a dizer que sim: toda vez que passamos de um estado em que não estamos girando (estado no qual não sentimos nada) para um estado em que estamos girando, temos a sensação de que os braços e pernas são puxados para fora. Mas o exemplo atual é diferente de qualquer outra coisa que tenhamos experimentado. No universo conhecido, sempre há outros objetos materiais, ou próximos ou, pelo menos, à distância (como as estrelas), que podem servir como referência para os nossos diversos estados de movimento. Neste exemplo, contudo, não há nenhuma maneira de distinguir o girar do não-girar por meio de comparações com outros objetos materiais. *Não há* outros objetos materiais. Mach levou a sério esta observação e, com base nela, deu um passo de gigante. Sugeriu que, neste caso, pode não haver maneira de *sentir* a diferença entre os vários estados de rotação. Mais especificamente, Mach argumentou que, em um universo inteiramente vazio, não há *distinção* entre girar e não girar — não há percepção de movimento ou de aceleração se não houver meios de comparação —, de modo que girar e não girar são a mesma coisa. Se as duas pedras de Newton estivessem girando amarradas por uma corda em um universo vazio, o raciocínio de Mach diz que a corda estaria distendida. Se você girasse pelo espaço em um universo vazio, os seus braços e pernas não tenderiam a abrir-se e o fluido dos seus ouvidos não seria afetado. Você não sentiria nada.

Esta é uma sugestão profunda e sutil. Para absorvê-la realmente, você tem de se concentrar plenamente no exemplo e imaginar com convicção a quietude escura e uniforme do espaço totalmente vazio. Não é como uma sala escura, em que você sente o chão sob os pés e os olhos vão pouco a pouco ajustando-se ao mínimo de luz que passa pelo vão da porta. Ao contrário, estamos considerando que não existe *coisa alguma,* que não há chão e que não há nenhuma luz à qual ajustar-se. Independentemente de para onde você vá ou olhe, não sentirá nem verá absolutamente nada. Você está dentro de um casulo de invariável escuridão, sem referências materiais para fazer comparações. E sem essas referências, dizia Mach, os próprios conceitos de movimento e aceleração deixam de ter sentido. Não se trata apenas de que se você girar não sentirá nada. É mais profundo. Em um universo vazio, ficar perfeitamente estacionário e girar uniformemente são estados indistinguíveis. (embora eu aprecie os exemplos humanos porque eles possibilitam uma conexão imediata entre a física que estamos discutindo e as sensações inatas, existe uma desvantagem decorrente da nossa capacidade de mover voluntariamente uma parte do corpo com relação a outra — na

verdade, usar uma parte do corpo como referência para o movimento de outra (como alguém que gira um braço com relação à cabeça). Ressalto que mencionei o movimento de rotação *uniforme* — movimento em que todas as partes do corpo giram conjuntamente — para evitar essas complicações irrelevantes. Assim, quando digo que o seu corpo está girando, imagine que, como as duas pedras de Newton, amarradas por uma corda, ou como um patinador nos momentos finais da apresentação nas olimpíadas de inverno, todas as partes do seu corpo giram à mesma velocidade).

Newton, é claro, teria discordado. Ele dizia que mesmo o espaço completamente vazio contém *espaço*. E, embora o espaço não seja tangível nem passível de apreensão, Newton argumentava que ele sempre provê um "algo" com relação ao qual se pode dizer que os objetos materiais se movem. Mas lembre-se de como Newton chegou a essa conclusão: ele refletiu sobre o movimento de rotação e *supôs* que os resultados familiares obtidos em laboratório (a superfície da água torna-se côncava; Homer sente-se pressionado contra a parede do balde; os seus braços tendem a abrir-se quando você gira; a corda que amarra as duas pedras que giram estica-se) permaneceriam válidos se o experimento fosse realizado no espaço vazio. Essa premissa levou-o a buscar algo que, no espaço vazio, servisse como referência para que o movimento pudesse ser definido. E o "algo" que ele encontrou foi o próprio espaço. Mach contestou vigorosamente a premissa-chave: ele arguiu que o que acontece no laboratório não é o que aconteceria no espaço completamente vazio.

Esse foi o primeiro desafio importante à obra de Newton em mais de dois séculos e durante anos reverberaram ondas de choque na comunidade científica (e mais ainda: em 1909, quando vivia em Londres, Vladimir Lênin escreveu um panfleto filosófico que, entre outras coisas, discutia o trabalho de Mach[11]). Mas ainda que Mach tivesse razão e não houvesse noção de rotação em um universo vazio — estado de coisas que eliminaria a justificativa de Newton para o espaço absoluto —, continuaríamos sem resposta para o experimento com o balde terrestre, em que a água com certeza toma a forma côncava. Sem invocar o espaço absoluto — se o espaço absoluto não for um "algo" — como Mach explicaria a forma da água? A resposta deriva de uma reflexão a respeito de uma objeção simples ao raciocínio de Mach.

MACH, O MOVIMENTO E AS ESTRELAS

Imagine um universo que não seja completamente vazio, como concebera Mach, mas sim com apenas umas poucas estrelas espalhadas pelo céu. Se você fizer o experimento no espaço exterior, agora as estrelas — ainda que pareçam pequenas velas acesas a distâncias enormes — proporcionam um meio de determinar o seu estado de movimento. Se você começar a girar, os pontos distantes de luz passarão a circular à sua volta. E como as estrelas proporcionam

uma referência que permite distinguir o girar do não-girar, você também pode ter a expectativa de sentir essa diferença. Mas como é que um punhado de estrelas tão distantes pode fazer tanta diferença e a sua presença ou ausência atuar como um interruptor que liga ou desliga a sensação de girar (ou, generalizando, a sensação do movimento acelerado)? Se você é capaz de sentir o movimento de rotação em um universo que tem apenas umas poucas estrelas distantes, talvez isso signifique que a ideia de Mach esteja errada — talvez, como Newton supôs, em um universo vazio você *também* seja capaz de experimentar a sensação de girar.

Mach deu uma resposta a essa objeção. De acordo com ele, se você girar em um universo vazio não sentirá nada (ou, mais precisamente, nem sequer existe o conceito de girar ou não girar). No outro lado do espectro, em um universo repleto de estrelas e outros objetos materiais, como o nosso, a força que abre os seus braços e pernas é o que marca a sua experiência quando você gira. (Tente.) E aí está o xis da questão: em um universo não vazio, mas com menos massa do que o nosso, Mach sugeriu que a força que você sentiria ao girar ficaria entre o nada e o que você sente no universo. Portanto, a força seria proporcional à quantidade de matéria que existe no universo. Em um universo que tivesse uma única estrela, você sentiria apenas uma força mínima sobre o seu corpo ao girar. Com duas estrelas, a força seria um pouco maior, e assim por diante, até chegar a um universo com o conteúdo material que tem o nosso, quando então você sentiria por completo a nossa familiar força de rotação. Segundo esse enfoque, a força que você experimenta em virtude da aceleração deriva de um efeito coletivo: a influência coletiva de toda a matéria que existe no universo.

Também neste caso a proposição é válida para todos os tipos de movimento acelerado, e não apenas para a rotação. Quando o avião em que você está acelera na pista, quando o carro em que você está freia e para, quando o elevador em que você está começa a subir, as ideias de Mach implicam que a força que você experimenta representa a influência conjunta de toda a matéria que compõe o universo. Quanto mais matéria, maior será a força. Quanto menos matéria, menor será a força. E se não houver matéria alguma, você não sentirá absolutamente nada. Assim, de acordo com a maneira de pensar de Mach, as únicas coisas que importam são o movimento relativo e a aceleração relativa. *Você só sente a aceleração quando acelera com relação à distribuição média de toda a matéria que existe no universo, além de você próprio.* Sem esse material externo — sem pontos de referência para a comparação —, Mach afirmava que não haveria maneira de sentir a aceleração.

No entender de muitos físicos, esta é uma das propostas mais sedutoras feitas a respeito do cosmo nos últimos 150 anos. Várias gerações de cientistas sentiram

uma profunda dificuldade de aceitar que o tecido do espaço, que não se toca, não se segura e não se aperta, seja realmente um “algo” — um “algo” suficientemente substancial para proporcionar a referência final e absoluta para o movimento. Para muitos, parecia absurdo, ou, pelo menos, cientificamente irresponsável fazer depender o entendimento do movimento de algo tão completamente imperceptível, tão inteiramente estranho aos nossos sentidos, a ponto de assemelhar-se a uma entidade mística. Mas esses mesmos físicos defrontavam-se com o problema de explicar o balde de Newton. O ponto de vista de Mach causou comoção porque trouxe a possibilidade de uma resposta nova, em que o espaço não é um “algo”; uma resposta que retorna à concepção relacionista advogada por Leibniz. O espaço, na opinião de Mach, é muito semelhante ao que imaginara Leibniz — é a palavra que expressa a relação entre a posição de um objeto e a de outro. Mas, como um alfabeto sem letras, o espaço não tem uma existência independente.

MACH VERSUS NEWTON

Estudei Mach quando fazia o meu curso de graduação na universidade e as suas ideias foram para mim como uma mensagem dos céus. Aí estava, finalmente, uma teoria sobre o espaço e o movimento que punha todas as perspectivas em pé de igualdade, uma vez que apenas o movimento relativo e a aceleração relativa tinham significado. Ao contrário da referência newtoniana para o movimento — uma coisa invisível chamada espaço absoluto —, Mach propôs que a referência estava aí, exposta à visão de todos — a matéria distribuída pelo cosmo. Eu estava certo de que a resposta de Mach era a verdadeira. Também vi que eu não era o único a pensar assim. Estava seguindo uma longa fila de cientistas, que inclui Albert Einstein, que se sentiram arrebatados ao tomar contato, pela primeira vez, com as ideias de Mach.

Mach estava certo? Será que Newton ficou tão envolvido com o rodamoinho do seu balde a ponto de chegar a uma conclusão inconsistente a respeito do espaço? O espaço absoluto de Newton existe ou o pêndulo efetivamente deslocara-se para a perspectiva relacionista? Essas perguntas não puderam ser respondidas nas primeiras décadas depois que Mach apresentou as suas ideias. Na maioria dos casos, isso se deveu a que a sugestão de Mach não chegava a ser uma teoria ou uma descrição completa, uma vez que ele não explicava *como* o conteúdo material do universo exerceria a influência prevista. Se as suas ideias estavam certas, de que maneira as estrelas e a casa do vizinho podiam contribuir para que você tenha a sensação de estar ou não girando? Sem a especificação de um

mecanismo físico que comprovasse a proposta de Mach, era difícil investigá-la com precisão.

Do ponto de vista moderno, é razoável pensar que a gravidade possa ter algo a ver com as influências envolvidas na sugestão de Mach. Nas décadas subsequentes, essa possibilidade ganhou a atenção de Einstein, que se inspirou muito na proposta de Mach para desenvolver a sua própria teoria da gravidade, a teoria da relatividade geral. Quando finalmente a poeira da relatividade baixou, a questão de saber se o espaço é um “algo” — de saber se a visão absolutista ou a visão relacionista é a correta — transformou-se de tal modo que reduziu a pedaços todas as maneiras anteriores de conceber o universo.

3. A relatividade e o absoluto

O espaço-tempo é uma abstração einsteiniana ou uma entidade física?

Algumas descobertas dão respostas a perguntas. Outras são tão profundas que colocam as perguntas em perspectivas radicalmente diferentes, mostrando que os mistérios preexistentes eram o resultado de falsas percepções derivadas da nossa falta de conhecimento. Você pode passar a vida inteira — e na Antiguidade alguns o fizeram — pensando no que acontece quando se chega ao fim do mundo, ou tratando de imaginar quem ou o que vive abaixo da Terra. Quando aprendemos que a Terra é redonda, vemos que esses mistérios não encontram propriamente uma resolução, mas se tornam irrelevantes.
Durante as primeiras décadas do século XX, Albert Einstein fez duas descobertas profundas, e cada uma delas provocou uma revolução na nossa compreensão do espaço e do tempo. Einstein desmantelou as estruturas rígidas e absolutas armadas por Newton e construiu a sua própria torre, sintetizando o espaço e o tempo de maneira completamente nova e inesperada. Quando ele concluiu o trabalho, o espaço e o tempo estavam de tal modo mesclados um ao outro que as suas respectivas realidades já não podiam ser consideradas separadamente. Assim, já na terceira década do século XX, a questão da corporalidade do espaço havia sido ultrapassada. Com a reformulação einsteiniana, sobre a qual falaremos adiante, a pergunta passou a ser: será que o *espaço-tempo* é um "algo"? Com essa modificação aparentemente pequena, a compreensão do cenário da realidade transformou-se por completo.

MACH VERSUS NEWTON

Estudei Mach quando fazia o meu curso de graduação na universidade e as suas ideias foram para mim como uma mensagem dos céus. Aí estava, finalmente, uma teoria sobre o espaço e o movimento que punha todas as perspectivas em pé de igualdade, uma vez que apenas o movimento relativo e a aceleração relativa tinham significado. Ao contrário da referência newtoniana para o movimento — uma coisa invisível chamada espaço absoluto —, Mach propôs que a referência estava aí, exposta à visão de todos — a matéria distribuída pelo cosmo. Eu estava certo de que a resposta de Mach era a verdadeira. Também vi que eu não era o único a pensar assim. Estava seguindo uma longa fila de cientistas, que

inclui Albert Einstein, que se sentiram arrebatados ao tomar contato, pela primeira vez, com as ideias de Mach.

Mach estava certo? Será que Newton ficou tão envolvido com o rodamoinho do seu balde a ponto de chegar a uma conclusão inconsistente a respeito do espaço? O espaço absoluto de Newton existe ou o pêndulo efetivamente deslocara-se para a perspectiva relacionista? Essas perguntas não puderam ser respondidas nas primeiras décadas depois que Mach apresentou as suas ideias. Na maioria dos casos, isso se deveu a que a sugestão de Mach não chegava a ser uma teoria ou uma descrição completa, uma vez que ele não explicava *como* o conteúdo material do universo exerceria a influência prevista. Se as suas ideias estavam certas, de que maneira as estrelas e a casa do vizinho podiam contribuir para que você tenha a sensação de estar ou não girando? Sem a especificação de um mecanismo físico que comprovasse a proposta de Mach, era difícil investigá-la com precisão.

Do ponto de vista moderno, é razoável pensar que a gravidade possa ter algo a ver com as influências envolvidas na sugestão de Mach. Nas décadas subsequentes, essa possibilidade ganhou a atenção de Einstein, que se inspirou muito na proposta de Mach para desenvolver a sua própria teoria da gravidade, a teoria da relatividade geral. Quando finalmente a poeira da relatividade baixou, a questão de saber se o espaço é um “algo” — de saber se a visão absolutista ou a visão relacionista é a correta — transformou-se de tal modo que reduziu a pedaços todas as maneiras anteriores de conceber o universo.

ESPAÇO VAZIO É VAZIO?

A luz era o ator principal do drama da realidade escrito por Einstein nos primeiros anos do século XX. E foi a obra de James Clerk Maxwell que armou o palco em que Einstein construiu o seu espetáculo. Em meados do século XIX, Maxwell descobriu quatro poderosas equações que estabeleceram, pela primeira vez, um arcabouço teórico rigoroso para o estudo da eletricidade, do magnetismo e da relação íntima entre eles.[1] Maxwell desenvolveu essas equações por meio da análise cuidadosa da obra do físico inglês Michael Faraday, que, no início do século xix, realizara dezenas de milhares de experimentos, os quais revelaram aspectos até então desconhecidos da eletricidade e do magnetismo. O grande avanço proporcionado por Faraday foi o conceito de *campo*. Esse conceito, que foi posteriormente expandido por Maxwell e outros, exerceu uma enorme influência sobre o desenvolvimento da física nos últimos dois séculos e está presente em muitos dos pequenos mistérios que encontramos na vida cotidiana. Quando passamos pela segurança do aeroporto, como é que uma máquina que

não nos toca pode determinar se estamos ou não carregando objetos metálicos? Quando fazemos uma ressonância magnética, como é que um aparelho que permanece fora dos nossos corpos pode tomar imagens detalhadas das nossas entranhas? Quando olhamos para uma bússola, como é que a agulha aponta sempre para o Norte, embora nada pareça tocá-la? A resposta à última pergunta invoca o campo magnético da Terra, e o conceito de campo magnético ajuda a explicar também os dois exemplos anteriores.

Não conheço melhor maneira de transmitir o conceito de campo magnético do que a velha experiência dos bancos da escola que mostra como os pedaços de ferro se alinham em torno de um ímã. Com umas poucas sacudidas, os pedaços formam um padrão ordenado de arcos que começam no pólo norte do ímã e se estendem até o polo sul, como mostra a figura 3.1. O padrão desenhado pelos pedaços de ferro é uma comprovação direta de que o ímã cria um "algo" invisível que preenche o espaço à sua volta — um "algo" que pode, por exemplo, exercer uma força sobre pequenos pedaços de metal. Esse "algo" invisível é o *campo magnético* e, segundo a nossa intuição, ele se assemelha a uma névoa ou essência que permeia uma área do espaço e aí exerce uma força que vai além da extensão física do próprio ímã. O campo magnético dá ao ímã o que um exército dá a um ditador e o que os auditores dão à Receita Federal: influência além dos seus limites físicos, que permite que se exerça uma força no "campo". Por isso, o campo magnético também é chamado de campo de força.

A capacidade que têm os campos magnéticos de permear o espaço é o que os faz tão úteis. O campo magnético do detector de metais do aeroporto penetra nas roupas das pessoas e faz com que os objetos metálicos revelem os seus próprios campos magnéticos — os quais exercem uma influência recíproca sobre o detector e fazem soar o alarme. O campo magnético de um aparelho de ressonância penetra no corpo do paciente e faz com que determinados átomos girem de maneira a gerar os seus próprios campos magnéticos — campos que a máquina detecta e decodifica para apresentar uma imagem dos tecidos dos órgãos internos do paciente. O campo magnético da Terra penetra na cápsula onde está a bússola e afeta a agulha, fazendo-a apontar ao longo de um arco que, em decorrência de processos geofísicos de grande duração, se alinha em uma direção norte—sul quase perfeita.

Os campos magnéticos são um dos tipos conhecidos de campo, mas Faraday analisou um outro: o *campo elétrico.* Esse é o campo que faz com que o seu pulôver de caxemira estale, ou que lhe dá um choque na mão quando você toca uma maçaneta de metal em uma sala atapetada, ou provoca vibrações na sua pele se você estiver nas montanhas durante uma tempestade com raios. E se, durante a tempestade, você levasse uma bússola, veria que a agulha oscilaria para cá e

para lá, conforme os locais onde se produzem os raios, e isso lhe daria uma boa ideia da profunda interconexão entre os campos elétricos e magnéticos — descoberta pelo físico dinamarquês Hans Oersted e analisada exaustivamente por Faraday por meio de experimentos.

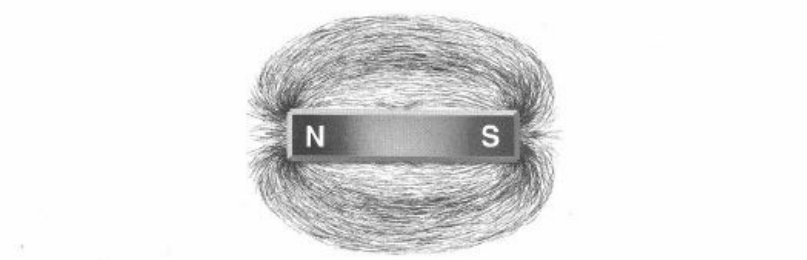


Figura 3.1. *A limalha de ferro espalhada em torno de um ímã mostra o seu campo magnético.*

Assim como as oscilações da bolsa de valores afetam o mercado de títulos, que, por sua vez, afetam o mercado de ações, e assim por diante, os cientistas verificaram que as alterações nos campos elétricos podem produzir modificações em campos magnéticos próximos, que, por sua vez, podem acarretar alterações no campo elétrico e assim por diante. Maxwell descobriu as expressões matemáticas dessas inter-relações e, como as equações mostravam que os campos elétricos e magnéticos são tão emaranhados quanto os cabelos de um rastafári, ele os denominou campos *eletromagnéticos* e chamou de força *eletromagnética* a influência que exercem.

Hoje em dia estamos imersos em um mar de campos eletromagnéticos. O telefone celular e o rádio do carro funcionam a distâncias enormes porque os campos eletromagnéticos emitidos pelas companhias telefônicas e pelas estações de rádio penetram em amplas áreas do espaço. A mesma coisa acontece com as conexões sem fio da internet; os computadores conseguem captar toda a rede internacional a partir de campos eletromagnéticos que vibram ao nosso redor — na verdade, passando por dentro dos nossos corpos. Evidentemente, a tecnologia eletromagnética ainda não estava desenvolvida na época de Maxwell, mas, entre os cientistas, o seu feito teve amplo reconhecimento: por meio da linguagem dos campos, Maxwell revelara que a eletricidade e o magnetismo, vistos como coisas separadas, eram, na verdade, apenas aspectos diferentes de uma mesma entidade física.

Posteriormente veremos outros tipos de campos — campos gravitacionais, campos nucleares, campos de Higgs etc. — e ficará cada vez mais claro que o conceito de campo é essencial para as formulações modernas das leis da física. Mas, por enquanto, o próximo passo fundamental da nossa história ainda se deve a Maxwell. Prosseguindo na análise das suas equações, ele descobriu que as alterações e distúrbios dos campos eletromagnéticos viajam em movimento

ondulatório a uma velocidade determinada: cerca de 1,08 bilhão de quilômetros por hora. Como esse valor é exatamente igual ao que outros experimentos haviam estabelecido para a velocidade da luz, Maxwell percebeu que a luz não poderia deixar de ser uma onda eletromagnética que tem as propriedades adequadas para interagir com os elementos químicos da nossa retina e causar-nos a sensação da visão. Essa conquista tornou ainda mais notáveis as maravilhosas descobertas desse grande cientista: ele desvendou a ligação entre a força produzida pelos ímãs, a influência exercida pelas cargas elétricas e a luz que nos permite ver o universo. Mas isso também provocou um profundo questionamento.

Quando dizemos que a velocidade da luz é de 1,08 bilhão de quilômetros por hora, a experiência — e a nossa discussão até aqui — nos ensina que essa afirmação carece de sentido se não especificarmos com relação a que a velocidade está sendo medida. O interessante é que as equações de Maxwell simplesmente produziram esse número — 1,08 bilhão de quilômetros por hora — sem especificar ou tomar por base nenhuma referência. É como se alguém o convidasse a uma festa em uma casa trinta quilômetros ao Norte sem estabelecer a referência, ou seja, sem dizer ao Norte *de quê*. A maior parte dos cientistas, inclusive Maxwell, buscou explicar a velocidade dada pelas suas equações do seguinte modo: as ondas conhecidas, como as do mar, ou as do som, são transportadas por uma substância, um meio. As ondas do mar são transportadas pela água. As ondas de som são transportadas pelo ar. E as velocidades dessas ondas são especificadas *com relação ao meio*. Quando dizemos que a velocidade do som na temperatura ambiente é de cerca de 1224 quilômetros por hora (também conhecida como Mach 1, em homenagem ao mesmo Mach que vimos anteriormente), afirmamos que as ondas de som viajam a essa velocidade pelo ar sem agitação. Naturalmente, portanto, os físicos supunham que as ondas de luz — ondas eletromagnéticas — também deveriam viajar através de algum meio particular, que nunca foi visto ou detectado, mas que deve existir. Para dar respeitabilidade a este meio transportador de luz foi-lhe dado o nome de *éter luminífero*, ou simplesmente *éter*, antigo termo usado por Aristóteles para descrever uma substância hipotética e mágica, de que seriam feitos os corpos celestes. Para que essa hipótese se adaptasse aos resultados de Maxwell, sugeriu-se que as equações por ele desenvolvidas tomavam implicitamente a perspectiva de alguém que estivesse em repouso com relação ao éter. O número de 1,08 bilhão de quilômetros por hora produzido pelas equações era, então, a velocidade da luz com relação ao éter estacionário.

Como se vê, há uma similaridade notória entre o éter luminífero e o espaço absoluto de Newton. Ambos têm origem nas tentativas de proporcionar uma referência para a definição do movimento; o movimento acelerado levou ao espaço absoluto e o movimento da luz levou ao éter luminífero. Na verdade, muitos físicos viam o éter como a representação terrena do espírito divino que Henry More, Newton e outros acreditavam permear o espaço absoluto. (Newton e alguns de seus contemporâneos chegaram a usar o termo "éter" para descrever o espaço absoluto.) Mas o que é, afinal, o éter? De que é feito? De onde vem? Ele existe em todos os lugares?

Essas perguntas a respeito do éter são as mesmas que por séculos se fizeram a respeito do espaço absoluto. Mas, enquanto o teste de Mach para o espaço absoluto requeria que algo ficasse girando em um universo completamente vazio, os físicos lograram propor experimentos mais factíveis para determinar se o éter realmente existia. Por exemplo, se você sair nadando ao encontro de uma onda que se aproxima, o encontro se dará mais rapidamente; se você nadar afastando-se da onda, o encontro demorará mais tempo para ocorrer. Do mesmo modo, se você se mover através do suposto éter ao encontro de uma onda de luz ou afastando-se dela, de acordo com o mesmo raciocínio, a aproximação da luz deveria dar-se a uma velocidade maior ou menor do que 1,08 bilhão de quilômetros por hora. Mas em 1887, quando Albert Michelson e Edward Morley mediram a velocidade da luz, obtiveram repetidamente o mesmo resultado — 1,08 bilhão de quilômetros por hora — *independentemente do movimento deles próprios ou do da fonte de luz.* Todos os tipos de argumentos foram imaginados para explicar esses resultados. Quem sabe, como alguns chegaram a pensar, os observadores estivessem carregando, involuntariamente, o éter consigo, em seu movimento. Quem sabe ainda, disseram outros, o equipamento se envergasse ao viajar pelo éter, o que afetaria as medições. Mas só quando Einstein teve a sua percepção revolucionária a explicação se fez finalmente clara.

ESPAÇO RELATIVO, TEMPO RELATIVO

Em junho de 1905, Einstein escreveu um artigo com um título pouco inspirador: "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento". O texto acabou, de uma vez por todas, com a ideia do éter luminífero. Com um único golpe, ele também mudou para sempre o nosso entendimento do espaço e do tempo. Einstein colocou as suas ideias no papel durante um intenso período de cinco semanas em abril e maio de 1905, mas as questões que ele assim resolveu o estavam atormentando há mais de dez anos. Ainda adolescente, Einstein lutava com a questão de como uma pessoa veria um raio de luz se viajasse exatamente à

mesma velocidade da luz. Como ele e a luz estariam percorrendo o éter exatamente à mesma velocidade, estariam sempre juntos. Assim, concluiu Einstein, a partir da perspectiva da pessoa, a luz pareceria não estar se movendo. O viajante poderia, então, estender o braço e recolher um punhado de luz imóvel, assim como se recolhe um punhado de neve aqui na Terra.

Mas aí está o problema. Acontece que as equações de Maxwell não permitem que a luz pareça estacionária. E efetivamente não há nenhum depoimento confiável de que alguém tenha recolhido um punhado de luz estática. E o adolescente Einstein pensava: como resolver este aparente paradoxo?

Dez anos depois, ele deu ao mundo a resposta com a teoria da relatividade especial. Muito já se debateu a respeito das raízes intelectuais da descoberta de Einstein, mas não há dúvida de que a sua crença inabalável na simplicidade desempenhou um papel crucial. Einstein conhecia pelo menos alguns experimentos que não haviam logrado comprovar a existência do éter.[2] Por quê, então, ficar dando voltas em torno desses experimentos, buscando descobrir as suas falhas? Ao contrário, declarou Einstein, devemos tomar o caminho mais simples: os experimentos não conseguiram encontrar o éter porque o éter não existe. E como as equações de Maxwell que descreviam o movimento da luz — movimento de ondas eletromagnéticas — não supõem nenhum meio, tanto o experimento quanto a teoria convergiriam para a mesma conclusão: a luz, ao contrário de qualquer outro tipo de onda já encontrado, não necessita de um meio que a transporte. A luz é um viajante solitário. A luz pode viajar pelo espaço vazio.

Que fazer, então, com a equação de Maxwell que atribui à luz a velocidade de 1,08 bilhão de quilômetros por hora? Se não existe um éter que propicie o padrão de referência de repouso, que seria o “algo” com relação ao qual essa velocidade deve ser interpretada? Novamente Einstein abandonou o convencionalismo e respondeu com uma simplicidade absoluta. Se a teoria de Maxwell não invoca nenhum padrão de repouso em particular, a interpretação mais direta é a de que não é necessário invocá-lo. *A velocidade da luz,* disse Einstein, *é de 1,08 bilhão de quilômetros por hora com relação a tudo e a todos.*

Essa é realmente uma afirmação simples, que se ajusta bem a uma máxima atribuída com frequência a Einstein: “Faça tudo da maneira mais simples possível, mas não simples demais”. O problema está em que a conclusão também parece ser louca. Se você partir na mesma direção de um raio de luz, o bom senso diz que, da sua perspectiva, a velocidade da luz emitida tem de ser menor do que 1,08 bilhão de quilômetros por hora. Se você, ao contrário, partir em direção a um raio de luz que se aproxima, o bom senso diz que, da sua perspectiva, a velocidade da luz que se aproxima tem de ser maior do que 1,08

bilhão de quilômetros por hora. Einstein passou a vida desafiando o bom senso e não foi dessa vez que deixou de fazê-lo. Ele argumentou com vigor no sentido de que, independentemente da velocidade com que você se aproxima ou se afasta de um raio de luz, a velocidade desse raio será sempre de 1,08 bilhão de quilômetros por hora — nem um pouco mais, nem um pouco menos, em qualquer circunstância. Essa era a resposta ao paradoxo que o assombrou na adolescência: a teoria de Maxwell não é compatível com a luz estacionária porque a luz nunca é estacionária. Independentemente do seu estado de movimento — quer você se dirija a um raio de luz, quer se afaste dele, ou fique parado —, a luz conserva a sua velocidade fixa e imutável de 1,08 bilhão de quilômetros por hora. Mas é natural que perguntemos: como pode a luz comportar-se de uma maneira tão estranha?

Reflita um momento sobre a velocidade. A sua medida é o resultado da divisão da distância percorrida por um objeto pelo tempo que dura o seu deslocamento. É uma medida de espaço (a distância percorrida) dividida por uma medida de tempo (a duração da viagem). Desde a época de Newton, o espaço era concebido como algo absoluto, que existia "sem nenhuma referência externa". Portanto, as medições do espaço e das separações espaciais devem também ser absolutas: independentemente de quem meça a distância entre duas coisas no espaço, se as medidas forem tomadas com o devido cuidado, as respostas sempre coincidirão. E, embora ainda não tenhamos discutido esta questão diretamente, Newton declarou que isso também é válido com relação ao tempo. A descrição que ele dá para o tempo no *Principia* reflete a linguagem por ele utilizada para o espaço: "O tempo existe em si e por si e transcorre de maneira igual, sem nenhuma referência externa". Em outras palavras, de acordo com Newton, existe um conceito universal e absoluto de tempo que se aplica em todos os lugares e em todos os momentos. Em um universo newtoniano, independentemente de quem meça o tempo que algo demora para acontecer, se a medição for feita com precisão, os resultados sempre coincidirão.

Essas premissas a respeito do espaço e do tempo são compatíveis com a nossa experiência cotidiana e por essa razão estão na base da conclusão de que a luz deveria parecer-nos viajar mais vagarosamente quando corremos em direção a ela. Para entender melhor, imagine que Bart, que acabou de ganhar um skate com propulsão nuclear, decide aceitar o maior de todos os desafios e apostar uma corrida com um raio de luz. Apesar de ficar um pouco desapontado ao ver que a velocidade máxima do skate é de apenas 800 milhões de quilômetros por hora, ele confirma a disposição de vencer a qualquer preço. Lisa, sua irmã, está atenta, com um laser, e começa a contagem regressiva a partir do número onze (que é o número favorito do seu herói, Schopenhauer) e, quando ela chega ao zero, Bart e

o raio laser dão a partida. O que é que Lisa vê? Bem, para cada hora que passa, Lisa vê que a luz viaja 1,08 bilhão de quilômetros por hora, enquanto Bart viaja 800 milhões de quilômetros por hora. Por isso, ela conclui que a luz se afasta de Bart 280 milhões de quilômetros a cada hora. Agora vamos trazer Newton para a história. As suas ideias determinam que as observações de Lisa sobre o espaço e o tempo são absolutas e universais, no sentido de que qualquer outra pessoa que faça essas medições corretamente obterá as mesmas respostas. Para Newton, esses fatos a respeito do movimento através do espaço e do tempo eram tão incontroversos como dois e dois são quatro. Assim, de acordo com ele, Bart concordará com Lisa e relatará que o raio de luz se afasta dele à velocidade de 280 milhões de quilômetros por hora.

Mas em seu regresso, Bart não concorda de modo algum. Ao contrário, desanimado, ele diz que por mais que se esforçasse e por mais que apertasse o acelerador do skate, via que a luz se afastava dele a 1,08 bilhão de quilômetros por hora e nem um pouquinho menos.[3] Se, por alguma razão, você não confia em Bart, lembre-se de que milhares de experimentos meticulosos efetuados nos últimos cem anos, nos quais a velocidade da luz foi medida com o uso de fontes e receptores móveis, confirmam essas observações com precisão.

Como pode ser?

Einstein compreendeu, e a resposta que ele encontrou é uma extensão lógica e profunda da discussão que tivemos até aqui. A explicação decorre de que as medições de distâncias espaciais e de durações temporais feitas por Bart — os dados que ele usa para conhecer a velocidade com que a luz se afasta dele — são diferentes das medições de Lisa. Pense nisso. Como a velocidade não é nem mais nem menos do que a distância dividida pelo tempo, não existe outra maneira de que Bart tenha encontrado um resultado diferente do de Lisa para a velocidade com que a luz se afasta dele. Então, concluiu Einstein, as ideias de Newton sobre o espaço e o tempo absolutos estavam erradas. Einstein percebeu que aqueles que estão em movimento relativo entre si, como Bart e Lisa, não obterão resultados idênticos para as medidas de distância e tempo. Os enigmáticos dados experimentais sobre a velocidade da luz só podem ser explicados se as percepções do espaço e do tempo forem diferentes.

SUTIL MAS NAO MALICIOSO

A relatividade do espaço e do tempo é uma conclusão fascinante. Há mais de 25 anos eu a conheço, mas até hoje, sempre que me sento tranquilamente e me ponho a refletir sobre ela, fico pasmo. A partir da afirmação bem conhecida de que a velocidade da luz é constante, concluímos que *o espaço e o tempo*

dependem do observador. Cada um de nós leva o seu próprio relógio, o seu próprio monitor da passagem do tempo. Todos os relógios têm a mesma precisão, mas quando nos movemos, uns com relação aos outros, os relógios não mais concordam entre si. Perdem a sincronização. Medem diferentes quantidades do tempo transcorrido entre dois eventos determinados. O mesmo ocorre com as distâncias. Cada um de nós leva a sua própria trena, o seu próprio monitor das distâncias no espaço. Todas as trenas têm a mesma precisão, mas quando nos movemos, uns com relação aos outros, elas não mais concordam entre si. Medem diferentes distâncias entre as localizações de dois eventos determinados. Se o espaço e o tempo não se comportassem dessa maneira, a velocidade da luz não seria constante e dependeria do estado de movimento do observador. Mas ela é constante; o espaço e o tempo, sim, comportam-se dessa maneira. O espaço e o tempo ajustam-se de uma maneira que lhes permite compensar-se exatamente, de modo que as observações da velocidade da luz sempre dão o mesmo resultado, independentemente da velocidade do observador.

A determinação detalhada e precisa dos dados quantitativos de como as medições do espaço e do tempo divergem entre si é mais complicada, mas não requer nada mais do que a álgebra que aprendemos na escola secundária. Não é a complexidade matemática que torna desafiadora a teoria da relatividade especial de Einstein. É o grau de estranheza das ideias e a sua aparente inconsistência com as nossas experiências cotidianas. Mas quando Einstein formulou a ideia central de sua teoria — a ideia de que era necessário romper com a perspectiva newtoniana de mais de duzentos anos a respeito do espaço e do tempo —, preencher os detalhes passou a ser coisa mais fácil. Ele logrou estabelecer com precisão como e quanto as medições de distância e tempo feitas por uma pessoa devem diferir das medições feitas por outra, de tal modo que todas as medições produzam o mesmo valor para a velocidade da luz.[4]

Para perceber melhor o que Einstein descobriu, imagine que Bart, a contragosto, fez a revisão obrigatória do seu skate e teve de reduzir a sua velocidade máxima para cem quilômetros por hora. Se ele sair andando a essa velocidade em direção ao norte — ao mesmo tempo que lê, assobia, boceja e ocasionalmente dá uma olhada no trânsito — e em seguida entrar em uma estrada que vai para o nordeste, a sua velocidade com relação ao norte será *menor* do que cem quilômetros por hora. A razão é clara. Inicialmente, a totalidade da sua velocidade estava aplicada ao rumo norte, mas quando ele mudou a direção para o nordeste, uma parte dessa velocidade dirigiu-se para o rumo leste, o que reduz a velocidade no rumo norte. Esta ideia extremamente simples nos permite entender a relatividade especial. Veja como:

Estamos acostumados com o fato de que os objetos se movem pelo espaço, mas há um outro tipo de movimento que é igualmente importante: os objetos também se movem através do tempo. Agora mesmo, seu relógio de pulso e o da parede estão andando e mostrando que você e tudo o mais que está à sua volta movem-se sem cessar através do tempo, passando inexoravelmente de um segundo para o próximo e assim por diante. Newton achava que esse movimento através do tempo era totalmente independente do movimento através do espaço — achava que os dois tipos de movimento não tinham nada a ver um com o outro. Einstein descobriu que eles são intimamente ligados. Na verdade, a descoberta *revolucionária* da relatividade especial é esta: quando você olha para algo, como um carro estacionado, que, do seu ponto de vista, está parado — ou seja, não se move através do espaço —, *a totalidade* do movimento do carro se dá através do tempo. O carro, o motorista, a rua, você, a sua roupa, tudo está se movendo através do tempo em perfeita sincronia: avançando uniformemente, segundo a segundo. Mas se o carro começar a andar, parte do seu movimento através do tempo será *desviada* para o espaço. E, assim como a velocidade de Bart no rumo norte diminuiu quando ele desviou parte do seu movimento para o rumo leste, também a velocidade do carro através do *tempo* diminui quando ele desvia parte do seu movimento através do tempo em movimento através do *espaço.* Isso significa que a progressão do carro através do tempo sofre desaceleração e, portanto, *o tempo passa mais devagar para o carro em movimento e para o seu motorista do que para você e tudo o mais que permaneça estacionário.*

Essa é a essência da relatividade especial. Na verdade, podemos ser um pouco mais precisos e avançar um pouco mais na descrição. Por causa da revisão obrigatória, Bart teve de limitar a velocidade do skate a cem quilômetros por hora. Isso é importante para a nossa história porque, se ele tivesse aumentado a velocidade ao tomar o rumo nordeste, poderia ter compensado o desvio e mantido, assim, a mesma velocidade com relação ao norte. Mas com o limite imposto, por mais que ele exija do motor, a sua velocidade total — a combinação das velocidades no rumo norte e no rumo leste — permanece fixa em cem quilômetros por hora. Portanto, quando ele mudou o rumo em direção a leste, inevitavelmente a sua velocidade no rumo norte diminuiu.

A relatividade especial declara a existência de uma lei válida para todos os tipos de movimento: *a velocidade combinada do movimento de qualquer objeto através do espaço e do seu movimento através do tempo é sempre precisamente igual à velocidade da luz.* A sua reação inicial e instintiva talvez seja de perplexidade, uma vez que estamos acostumados à ideia de que só a luz pode viajar à velocidade da luz. *Mas essa ideia refere-se apenas ao movimento*

através do espaço. Aqui estamos falando de algo correlato, porém mais rico: o movimento combinado de um objeto através do espaço e do tempo. O fato-chave descoberto por Einstein é que estes dois tipos de movimento são sempre complementares. Quando se dá a partida no carro estacionado, para o qual você estava olhando, o que na verdade acontece é que uma parte do seu movimento à velocidade da luz é transformada de movimento através do tempo em movimento através do espaço, *mantendo-se constante a sua velocidade combinada total.* Esse desvio significa que, inevitavelmente, o movimento do carro através do tempo sofre desaceleração.

Se Lisa, por exemplo, pudesse ver o relógio de Bart quando ele viajava a 800 milhões de quilômetros por hora, veria que ele andava a uma velocidade correspondente a dois terços da velocidade do relógio dela própria. Para cada três horas transcorridas no relógio de Lisa, ela veria que só duas horas haveriam transcorrido no relógio de Bart. O movimento rápido de Bart através do espaço teria causado uma redução significativa na sua velocidade através do tempo.

Além disso, a velocidade máxima através do espaço é alcançada quando a totalidade do movimento à velocidade da luz através do tempo é convertida em movimento à velocidade da luz através do espaço — o que é uma maneira de compreender por que é impossível viajar pelo espaço a uma velocidade maior do que a da luz. A luz, que sempre viaja à velocidade da luz através do espaço, é especial porque sempre opera a conversão total. Assim como uma viagem no rumo leste não enseja nenhuma sobra de movimento com relação ao rumo norte, o movimento à velocidade da luz através do espaço não enseja nenhuma sobra de movimento para uma viagem através do tempo! O tempo para quando se viaja à velocidade da luz através do espaço. Um relógio usado por uma partícula de luz não anda. A luz realiza o sonho de Ponce de León e da indústria de cosméticos: não envelhece.[5]

Esta descrição deixa claro que os efeitos da relatividade especial são mais pronunciados quando as velocidades (através do espaço) chegam a ser uma fração significativa da velocidade da luz. Mas a estranha complementaridade entre os movimentos através do espaço e do tempo vigora sempre. Quanto menor a velocidade, menor o desvio com relação à física anterior à relatividade — ou seja, com relação ao bom senso aparente —, mas o desvio existe sempre.

É verdade. Não se trata de jogo de palavras, prestidigitação ou ilusão de óptica. É assim que o universo funciona.

Em 1971, Joseph Hafele e Richard Keating colocaram relógios atômicos de césio a bordo de um avião da Pan American que deu a volta ao mundo. A comparação entre os relógios que fizeram a viagem e outros, idênticos, que ficaram estacionários no solo, mostrou que o tempo transcorrido nos relógios

que viajaram era menor. A diferença era mínima — alguns centésimos de bilionésimos de segundo —, mas estava precisamente de acordo com as descobertas de Einstein. É difícil obter uma comprovação mais concreta do que esta.

Em 1908, espalhou-se a notícia de que experimentos recentes e sofisticados estavam produzindo dados que comprovariam a existência do éter.[6] Se isso fosse verdade, significaria que existe um padrão absoluto de repouso e que a relatividade especial de Einstein estaria errada. Ao ouvir o rumor, Einstein respondeu: “O Senhor é sutil, mas malicioso Ele não é”. Examinar os aspectos mais profundos do funcionamento da natureza para testar as nossas percepções a respeito do espaço e do tempo era um enorme desafio, ao qual todos, até Einstein, dedicaram o melhor das suas vidas. Porém fazer com que uma teoria surpreendente e bonita como a da relatividade existisse, mas, ao mesmo tempo, fosse irrelevante para o funcionamento do universo seria uma maldade. Einstein não aceitou essa possibilidade e desconsiderou os novos experimentos. Ele tinha razão. Afinal, revelou-se que os experimentos estavam errados e o éter luminífero desapareceu definitivamente do discurso científico.

E O BALDE?

Essa é uma bela história para a luz. A teoria e a experimentação concordam em que a luz não carece de um meio que transporte as suas ondas e que, independentemente tanto do movimento da fonte de luz quanto do observador, a velocidade da luz é fixa e imutável. Todos os pontos de vista são igualmente válidos. Não há um padrão absoluto ou preferencial de repouso. Ótimo. Mas e o balde?

Lembre-se de que, embora o éter luminífero fosse visto por muitos como a substância física que dava credibilidade ao espaço absoluto de Newton, não foi por isso que Newton introduziu a ideia do espaço absoluto. Ao contrário, depois de lutar com o movimento acelerado, como o do balde que gira, Newton viu-se diante da necessidade de invocar um material invisível com relação ao qual o movimento pudesse ser definido sem ambiguidades. Mas desfazer-se do éter não significava desfazer-se do balde. Como, então, a teoria da relatividade especial de Einstein resolveu a questão?

Verdade seja dita, a atenção de Einstein, na relatividade especial, estava concentrada em um tipo especial de movimento: o movimento a velocidade constante. Só em 1915, dez anos depois, ele dedicou-se efetivamente ao movimento mais generalizado, o movimento acelerado, por meio da teoria da relatividade geral. Mesmo assim, Einstein e outros repetidas vezes consideraram

a questão do movimento giratório empregando o ponto de vista da relatividade especial; e concluíram, como Newton, e não como Mach, que, mesmo em um universo completamente vazio, sentem-se os efeitos centrífugos da rotação — Homer se sentiria pressionado contra a parede interna do balde; e a corda que amarra as duas pedras do experimento de Newton ficaria esticada.[7] Einstein desmantelou o espaço absoluto e o tempo absoluto de Newton, mas como ele explicaria isto?

A resposta é surpreendente. Apesar do nome, a teoria de Einstein não proclama que tudo é relativo. A relatividade especial efetivamente afirma que *algumas coisas* são relativas: as velocidades, as distâncias através do espaço, a duração do tempo transcorrido. Mas, na verdade, a teoria introduz um novo conceito absoluto, enormemente abrangente: o espaço-tempo absoluto. Ele é tão absoluto para a relatividade especial quanto o espaço absoluto e o tempo absoluto o eram para Newton. E, em parte por essa razão, Einstein não sugeriu nem apreciava o termo "teoria da relatividade". Em vez disso, ele e outros físicos sugeriram a teoria dos invariantes, ressaltando que, em sua essência, a teoria envolve algo em torno do que todos estão de acordo, algo que *não é* relativo.[8]

O espaço-tempo absoluto é o próximo — e essencial — capítulo da história do balde, porque, mesmo que despido de toda referência material para a definição do movimento, o espaço-tempo absoluto da relatividade especial propicia "algo" com relação ao qual pode-se dizer que os objetos aceleram.

A MODELAGEM DO ESPAÇO E DO TEMPO

Imagine que Marge e Lisa, para terem algo que fazer juntas, inscrevem-se em um curso de extensão em planejamento urbano e recebem a tarefa de redesenhar a malha das ruas e avenidas da cidade de Springfield, de acordo com dois requisitos. Primeiro: a configuração da malha viária deve ser tal que o grande monumento nuclear fique bem no centro, na esquina da rua 5 com a Quinta Avenida. Segundo: a distância entre as ruas e entre as avenidas deve ser de cem metros e os cruzamentos devem ser perpendiculares. Antes da aula, Marge e Lisa comparam os planos e veem que há um erro horrível. Marge configurou corretamente a malha, com o monumento no centro, ficando o mercado na rua 8 com a Quinta Avenida e a usina nuclear na rua 3 com a mesma Quinta Avenida, como se vê na figura 3.2a. Mas no plano de Lisa, os endereços são completamente diferentes: o mercado está na rua 7, próximo à Terceira Avenida, e a usina está na rua 4 com a Sétima Avenida, como aparece na figura 3.2b. Evidentemente, alguém cometeu um erro.

Mas depois de refletir por um momento, Lisa percebe o que está ocorrendo. Não houve erro. Tanto ela quanto Marge estão certas. Elas simplesmente escolheram orientações diferentes para as malhas de ruas e avenidas. Marge as orientou em um sentido e Lisa em outro. Elas diferem entre si em função de um ângulo, de uma rotação. Na figura 3.2c vê-se claramente, a partir de uma tomada vertical, a diferença angular na orientação das malhas. A lição a ser aprendida aqui é simples, mas importante. A cidade — uma região do espaço — pode ter a sua malha viária organizada com liberdade. Não existem ias "absolutas", nem avenidas "absolutas". A escolha de Marge é tão válida quanto a de Lisa — ou quanto a de qualquer outra.
Mantenha esta ideia em mente enquanto introduzimos o tempo neste quadro. Estamos acostumados a pensar no espaço como o cenário do universo, mas os processos físicos ocorrem em alguma região do espaço e *durante certo intervalo de tempo.*

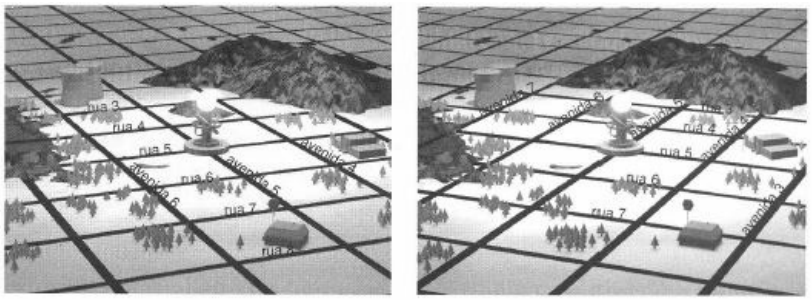


Figura 3.2. (*a*) *A malha viária de Marge.* (*b*) *A malha viária de Lisa.*

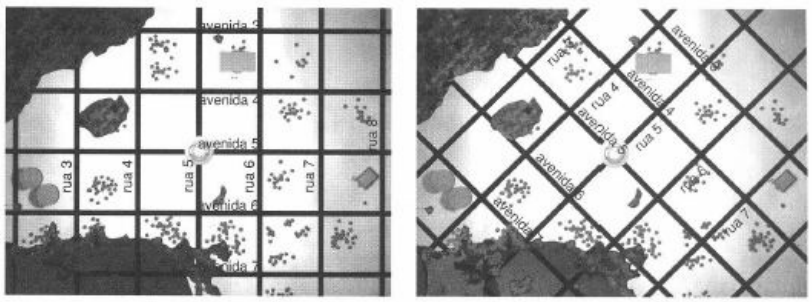


Figura 3.2. (*c*) *As malhas viárias de Marge e de Lisa vistas do alto. Ambas diferem por uma rotação.*

Imagine, por exemplo, que Itchy e Scratchy enfrentam-se em um duelo, como mostra a figura 3.3a, e que a luta entre eles é filmada e depois registrada em um livro em que cada quadro do filme ocupa uma página. Cada página será, então, uma "fatia do tempo", que mostra o que aconteceu em uma região do espaço em determinado momento. Para ver o que acontece em outro momento, abre-se uma outra página. (tal como as imagens de um filme, as páginas do livro da figura 3.3 mostram apenas

momentos representativos do tempo. Isso poderia suscitar a interessante questão de saber se o tempo é descontínuo ou infinitamente divisível. Mais adiante voltaremos a essa questão, mas por enquanto imagine que o tempo seja infinitamente divisível e que, portanto, o nosso livro possa ter um número infinito de páginas que se interpolam entre as que se mostram aqui**).** Para fins de terminologia, uma região do espaço considerada durante um intervalo de tempo denomina-se uma região do espaço-tempo. Pode-se conceber uma região do espaço-tempo como um registro de tudo o que acontece em uma determinada região do espaço durante determinado período de tempo. (É lógico que o espaço é tridimensional e que as páginas são bidimensionais, mas vamos aceitar esta simplificação para facilitar o raciocínio e possibilitar as ilustrações.)

Sigamos agora a visão do professor de matemática de Einstein, Hermann Minkowski (que uma vez chamou o seu aluno de bicho preguiçoso), e consideremos a região do espaço-tempo como uma entidade em si própria; consideremos, portanto, o livro como um objeto autônomo. Para isso, imaginemos, como na figura 3.3b, que todas as páginas do livro são completamente transparentes, de modo que quando se olha para o livro vê-se um bloco contínuo que contém todos os eventos que ocorrem durante certo intervalo de tempo. Nessa perspectiva, as páginas devem ser vistas apenas como algo que propicia um modo conveniente de organizar o conteúdo do bloco — ou seja, de organizar os eventos do espaço-tempo. Assim como a malha viária permite especificar localizações urbanas com facilidade, por meio dos endereços, a divisão do bloco do espaço-tempo em páginas permite identificar facilmente um evento (Itchy que atira, Scratchy que é atingido etc.) por meio da determinação do momento em que o evento ocorre — a página em que ele aparece — e a sua localização, dentro dos limites do espaço descrito nas páginas.

Aqui está o ponto crucial: assim como Lisa percebeu que há maneiras diferentes e igualmente válidas de dividir uma região do espaço em ruas e avenidas, Einstein percebeu que há maneiras diferentes e igualmente válidas de dividir uma região do espaço-tempo — um bloco, como o da figura 3.3c — em sucessivos momentos do tempo. *As páginas das figuras 3.3a, b e c*— cada uma das quais denota um momento do tempo — *são apenas uma das várias divisões possíveis*.

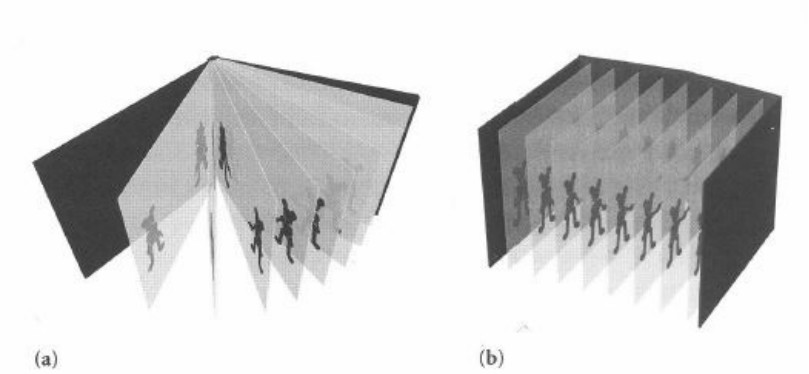


Figura 3.3. (*a*) *O livro do filme do duelo.* (*b*) *O mesmo livro, com a lombada expandida.*

Isso pode parecer apenas como um prolongamento trivial do que sabemos intuitivamente a respeito do tempo, mas constitui a base para nos desfazermos de algumas das noções mais fundamentais que nos acompanham há milênios. Até 1905, pensava-se que todos experimentamos a passagem do tempo de maneira idêntica, que concordamos sobre quais são os eventos que ocorrem em determinado momento e que, portanto, concordaríamos também sobre o que estaria em certa página de um bloco do espaço-tempo. Mas quando Einstein enunciou que os relógios de dois observadores em movimento relativo marcam o tempo de modo diferente, tudo mudou. Os relógios que estão em movimento relativo perdem a sincronização e, em consequência, produzem noções diferentes de simultaneidade. Cada página da figura 3.3b representa o ponto de vista de apenas um observador dos eventos espaciais que ocorrem em dado momento do tempo, tal como experimentado por ele. Outro observador, se estiver em movimento relativo com relação ao primeiro, declarará que os eventos que aparecem em uma mesma página *não* acontecem ao mesmo tempo.

Isso denomina-se *relatividade da simultaneidade* e pode ser observado diretamente. Imagine que Itchy e Scratchy, de pistola na mão, estão agora de frente um para o outro, um em cada lado de um longo vagão de trem em movimento, com um árbitro dentro do trem e outro fora, na plataforma da estação.

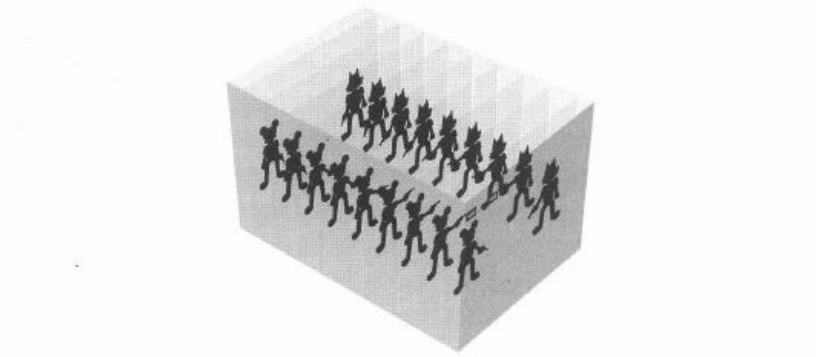


Figura 3.3. (*c*) *Bloco do espaço-tempo que contém o duelo. As páginas, ou "fatias do tempo", organizam os eventos no bloco. Os espaços entre as fatias existem apenas para a clareza visual; não implicam que o tempo seja divisível, questão que abordaremos mais adiante.*

Para que o duelo seja o mais justo possível, as partes concordaram em abandonar a regra dos três passos e combinaram que, em vez disso, os dois atirarão quando uma pequena pilha de pólvora, colocada no meio do vagão, exploda. O primeiro árbitro, Apu, acende o pavio da pólvora, dá um gole no seu suco de pera com mostarda e sai do caminho. A pólvora explode e Itchy e Scratchy atiram. Como ambos estão à mesma distância da pólvora, Apu sabe que a luz da explosão os alcança simultaneamente. Por isso, ele levanta a bandeira verde e declara que o duelo foi justo. Mas o segundo árbitro, Martin, observando da plataforma, emite um claro sinal de impugnação, afirmando que Itchy recebeu o sinal de luz da explosão antes que Scratchy. Explica ele que, como o trem estava em movimento, Itchy se aproximava do clarão enquanto Scratchy se afastava dele. Isso significa que a luz viajou menos até chegar a Itchy, porque ele se aproximou dela durante a trajetória; por outro lado, a luz teve que viajar mais para chegar até Scratchy porque ele se afastou dela durante a trajetória. Como a velocidade da luz é constante, seja para a esquerda ou para a direita, qualquer que seja a perspectiva, Martin afirma que a luz demorou mais para chegar até Scratchy porque teve que cobrir uma distância maior, o que tornou o duelo injusto.

Quem tem razão, Apu ou Martin? A resposta inesperada de Einstein é que ambos têm razão. Embora as conclusões dos nossos dois árbitros sejam diferentes, as observações e os raciocínios de cada um deles são impecáveis. Como no caso da bola e do goleiro, eles simplesmente têm perspectivas diferentes para a mesma sequência de eventos. O lado chocante das revelações de Einstein é que as perspectivas diferentes produzem conclusões diferentes, mas igualmente válidas, a respeito de quais eventos acontecem ao mesmo tempo. É claro que, a velocidades corriqueiras como a de um trem, a disparidade é mínima — Martin afirma que Scratchy recebeu o sinal de luz menos de um trilionésimo de segundo antes que Itchy —, mas se o movimento do trem fosse mais rápido, próximo à velocidade da luz, a diferença de tempo seria substancial.

Pense nas consequências disso para as páginas do nosso livro de imagens, que cortam em fatias uma região do espaço-tempo. Como os observadores que se movem um com relação ao outro não concordam quanto à simultaneidade das coisas, tampouco haverá concordância quanto à maneira pela qual cada um deles organizará as páginas do livro de modo que cada página contenha todos os eventos que ocorrem em dado momento. Ao contrário, os observadores que se movem um com relação ao outro dividem o bloco do espaço-tempo em páginas, ou fatias, de maneiras diferentes, mas igualmente válidas. O que_Lisa e Marge descobriram com relação ao espaço, Einstein descobriu com relação ao espaço-tempo.

O ÂNGULO DAS FATIAS

A analogia entre a malha viária e as fatias de tempo pode ser explicada um pouco melhor. Assim como os planos de Marge e de Lisa diferem entre si em função de uma rotação, também as fatias de Apu e de Martin, as suas páginas, diferem em função da rotação, mas uma rotação que envolve tanto o espaço quanto o tempo. Isto é o que ilustram as figuras 3.4a e 3.4b, nas quais vemos que as fatias de Martin apresentam uma rotação com relação às de Apu, o que o levou a concluir que o duelo foi injusto. Há, no entanto, uma diferença crucial de detalhe, porque, enquanto o ângulo de rotação entre os esquemas de Marge e de Lisa era apenas uma questão de escolha, o ângulo de rotação entre as fatias de Apu e de Martin é determinado pelas suas velocidades relativas. Basta um esforço mínimo para vermos por quê.

Imagine que Itchy e Scratchy fizeram as pazes e, em vez de tentar atirar um no outro, eles agora querem apenas ter certeza de que os relógios que estão na frente e na traseira do trem estão perfeitamente sincronizados. Como eles continuam equidistantes da pólvora, elaboram o seguinte plano. Estabelecem o acordo de colocar os seus relógios marcando meio-dia no momento em que veem a luz da explosão da pólvora.

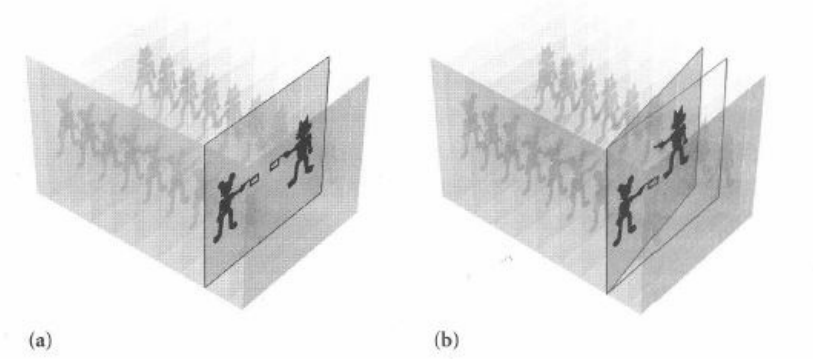


Figura 3.4. *Fatias do tempo de acordo com (a) Apu e (b) Martin, que estão em movimento relativo um com relação ao outro. As suas fatias apresentam diferenças por uma rotação através do espaço e do tempo. Segundo Apu, que está no trem, o duelo foi justo; segundo Martin, que está na plataforma da estação, foi injusto. Ambos os pontos de vista são igualmente válidos. Em (b) destaca-se o ângulo que diferencia as suas fatias através do espaço-tempo.*

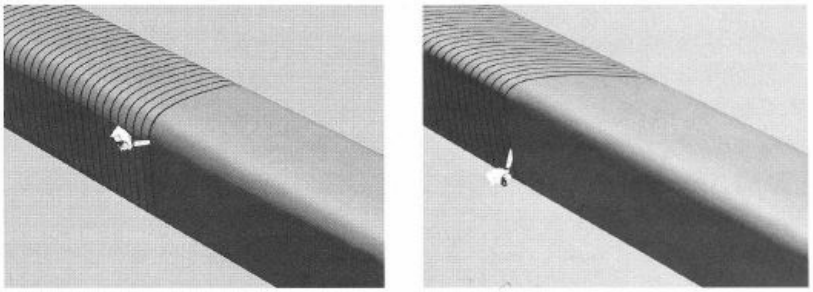
Das suas perspectivas, a luz terá de viajar a mesma distância para chegar até onde estão, e como a velocidade da luz é constante, ela chegará até eles simultaneamente. Mas, repetindo o raciocínio anterior, Martin, e qualquer outra pessoa que esteja na plataforma, dirá que Itchy está viajando em direção à luz emitida enquanto Scratchy está se afastando dela; portanto, Itchy receberá o sinal um pouco antes que Scratchy. Os observadores da plataforma concluirão, assim, que Itchy acertou o relógio para o meio-dia *antes* de Scratchy e afirmarão, em conseqüência, que o relógio de Itchy estará um pouco adiantado com relação ao de Scratchy. Por exemplo, para um observador na plataforma, como Martin, quando forem 12h06 no relógio de Itchy, o relógio de Scratchy poderá estar marcando apenas 12h04 (o número exato depende do comprimento e da velocidade do trem; quanto mais longo ele for e mais rápido andar, maior será a discrepância). Mas do ponto *de*, vista de Apu, e de todos os que estejam no trem, Itchy e Scratchy executaram a sincronização perfeitamente. Também neste caso, embora seja difícil aceitá-lo, não há nenhum paradoxo; *os observadores em movimento relativo não concordam quanto à simultaneidade — não concordam quanto a que coisas acontecem ao mesmo tempo.*

Isso significa que uma página do livro-bloco vista da perspectiva dos que estão no trem, página que contém eventos que eles consideram simultâneos — como o disparar dos relógios de Itchy e Scratchy —, contém eventos que aparecem em páginas *diferentes* na perspectiva dos que estão na plataforma (segundo os observadores da plataforma, Itchy armou o relógio *antes* de Scratchy, de modo que esses dois eventos aparecem em páginas diferentes na perspectiva dos observadores da plataforma). Aí está. Uma mesma página, na perspectiva dos que estão no trem, contém eventos que estão em páginas anteriores e posteriores para um observador da plataforma. É por isso que as fatias de Martin e de Apu

na figura 3.4 aparecem em rotação, uma com relação à outra: o que de uma perspectiva é uma única fatia, aparece em múltiplas fatias na outra perspectiva.
Se a concepção de Newton a respeito do espaço e do tempo absolutos estivesse correta, todos concordariam quanto ao fatiamento do espaço-tempo. Cada fatia representaria o espaço absoluto visto em determinado momento do tempo absoluto. Mas não é assim que o mundo funciona. E a mudança do tempo rígido de Newton para o tempo flexível de Einstein inspira uma mudança na nossa metáfora. Em vez de vermos o espaço-tempo como um livro rígido, será mais conveniente, por vezes, pensá-lo como um enorme pão de fôrma. E em vez de as páginas que compõem o livro — as fatias fixas do tempo newtoniano — devemos pensar na multiplicidade de ângulos em que o pão pode ser cortado para produzir novas fatias paralelas, como na figura 3.5a. Cada fatia do pão representa o espaço em determinado momento do tempo, a partir da perspectiva de um observador. Mas, como ilustra a figura 3.5b, um outro observador, que esteja em movimento com relação ao primeiro, fatiará o pão do espaço-tempo em um ângulo diferente. Quanto maior for a velocidade relativa dos dois observadores, maior será o ângulo entre as respectivas fatias paralelas (como se vê nas notas finais, o limite de velocidade estabelecido pela luz traduz-se em um ângulo máximo de rotação de 45° para o fatiamento[9]) e tanto maior será a discrepância entre os relatos dos observadores quanto à simultaneidade dos eventos.

O BALDE, SEGUNDO A RELATIVIDADE ESPECIAL

A relatividade do espaço e do tempo requer uma mudança radical de pensamento. Há, contudo, um ponto importante, mencionado antes e ilustrado agora com o pão de fôrma, que muitas vezes fica esquecido: *nem tudo é relativo na relatividade*.



(a) (b)

Figura 3.5. *Assim como um pão de fôrma pode ser fatiado em diferentes ângulos, também um bloco de espaço-tempo pode produzir "fatias de tempo" segundo diferentes ângulos, conforme o ponto de vista de diferentes observadores em movimento relativo. Quanto maior for a velocidade relativa entre os observadores, maior será o ângulo entre as fatias (até o limite de 45 graus, que corresponde à velocidade máxima, estabelecida pela luz).*

Mesmo que eu e você possamos fatiar o pão de maneiras diferentes, temos de estar de acordo com relação a outra coisa: a totalidade do próprio pão. Embora as nossas fatias difiram entre si, se eu puser todas as minhas fatias juntas e você fizer o mesmo com as suas, ambos reconstituiremos o mesmo pão de fôrma. Não poderia ser de outro modo. Ambos imaginamos estar cortando o mesmo pão.

Da mesma maneira, o conjunto de todas as fatias do espaço em sucessivos momentos do tempo, a partir da perspectiva de qualquer observador (veja a figura 3.4), reproduz coletivamente a mesma região do espaço-tempo. Observadores diferentes fatiam uma região do espaço-tempo de diferentes maneiras, mas a região em si mesma, tal como o pão como um todo, tem existência independente. Assim, embora Newton estivesse efetivamente errado, a sua intuição de que existe algo absoluto, algo em torno do que todos estaríamos de acordo, não foi totalmente afastada pela relatividade especial. O espaço absoluto não existe. O tempo absoluto não existe. Mas, de acordo com a relatividade especial, o espaço-tempo absoluto, sim, existe. Feita esta observação, voltemos ao balde.

Em um universo vazio, com relação a *quê o* balde gira? Segundo Newton, a resposta é o espaço absoluto. Segundo Mach, nem sequer faz sentido dizer que o balde está girando. Segundo a relatividade especial de Einstein, a resposta é o espaço-tempo absoluto.

Para bem compreender este ponto, vejamos novamente as malhas viárias propostas para Springfield. Lembre-se de que Marge e Lisa discordaram quanto aos endereços do mercado e da usina nuclear porque as duas malhas estavam em rotação, uma com relação à outra. Mesmo assim, independentemente da maneira como cada uma delas decidiu compor a malha, há algumas coisas a respeito das quais elas certamente estão de acordo. Por exemplo, se elas decidissem marcar no chão uma linha reta da usina até o mercado, divergiriam quanto às ruas pelas

quais a linha passaria, como se vê na figura 3.6, mas claramente estariam de acordo quanto à *forma* da trilha: uma linha reta. A forma geométrica é independente da especificação da malha escolhida.

Einstein percebeu que algo semelhante é. válido para o espaço-tempo. Embora dois observadores em movimento relativo cortem as fatias do tempo de maneiras diferentes, há coisas a respeito das quais eles concordam. Considere, por exemplo, uma linha reta que se desloque não só pelo espaço, mas sim pelo espaço-tempo. Embora a inclusão do tempo torne a trajetória menos familiar, basta refletir um momento para apreender o seu significado. Para que a trajetória de um objeto através do espaço-tempo seja reta, não só o objeto tem de mover-se em linha reta através do espaço, mas também o seu movimento tem de ser uniforme através do tempo. Logo, tanto a velocidade quanto a direção têm de ser invariáveis. Ainda que diferentes observadores cortem o pão do espaço-tempo em ângulos diferentes e não concordem, portanto, quanto ao tempo transcorrido e à distância coberta entre vários pontos da trajetória, eles concordarão, como Marge e Lisa, quanto à forma da trajetória através do espaço-tempo. Assim como a forma geométrica da trilha que vai do mercado à usina nuclear independe do "fatiamento" viário especificamente utilizado, também as formas geométricas das trajetórias através do espaço-tempo são independentes do fatiamento temporal utilizado.[10]

Esta conclusão é simples mas essencial porque com ela a relatividade especial propicia um critério absoluto — a respeito do qual todos concordam, independentemente da velocidade e da direção dos seus movimentos relativos — para decidir se alguma coisa está ou não em aceleração. Se a trajetória de um objeto através do espaço-tempo for uma linha reta, como a do astronauta (a), que aparece em suave repouso na figura 3.7, ele não estará em aceleração.

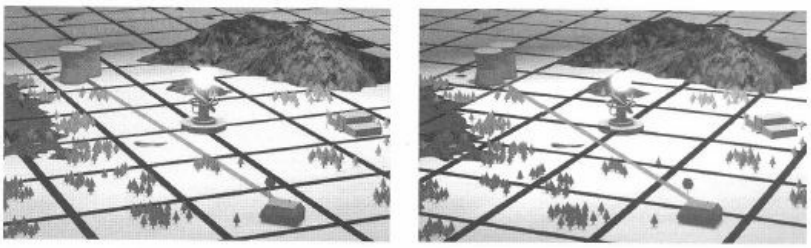


Figura 3.6. *Independentemente de qual seja a malha viária escolhida, todos concordam quanto à forma da trajetória, que, neste caso, é uma linha reta.*

Se a trajetória de um objeto tiver outra forma qualquer, que não seja uma linha reta através do espaço-tempo, ele *estará* acelerado. Por exemplo, se o astronauta ligar o jato manual e ficar indefinidamente voando em círculos, como o astronauta (b) da figura 3.7, ou se ele enveredar pelo espaço profundo em

velocidade crescente, como o astronauta (c), as suas trajetórias através do espaço-tempo serão curvas — o sinal que identifica a aceleração. Desse modo, aprendemos, por meio desses raciocínios, que *as formas geométricas das trajetórias no espaço-tempo propiciam o padrão absoluto que determina se algo está em aceleração*. O espaço-tempo, e já não apenas o espaço, serve de referência.

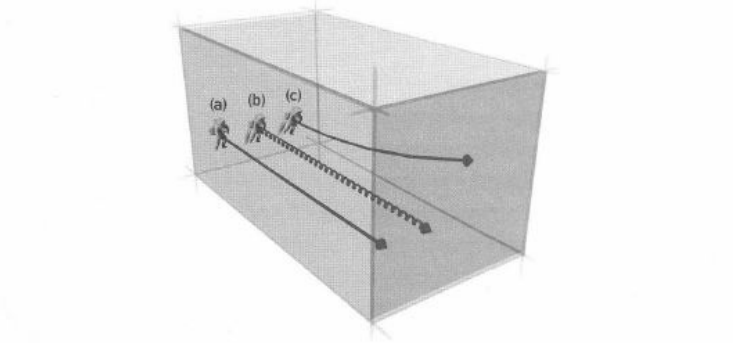


Figura 3.7. *Trajetórias de três astronautas pelo espaço-tempo. O astronauta (a) não está acelerado e, portanto, segue uma linha reta através do espaço-tempo. O astronauta (b) voa em um círculo que se repete e, portanto, segue em uma espiral através do espaço-tempo. O astronauta (c) está acelerado rumo ao espaço profundo e, portanto, segue uma trajetória curva através do espaço-tempo.*

Portanto, nesse sentido, a relatividade especial nos diz que o espaço-tempo é, em si mesmo, o árbitro definitivo do movimento acelerado. O espaço-tempo propicia o pano de fundo com relação ao qual se pode dizer que algo, como um balde que gira, está em aceleração, mesmo em um universo vazio. Com essa visão, o pêndulo passou para o outro lado: de Leibniz, o relacionista, para Newton, o absolutista, para Mach, o relacionista, e de volta para Einstein, cuja relatividade especial mostrava, outra vez, que o cenário da realidade — visto como espaço-tempo, e não como espaço — é “algo” capaz de propiciar uma referência definitiva para o movimento.[11]

A GRAVIDADE E A VELHA PERGUNTA

A esta altura, você pode estar pensando que a história do balde terminou, com o descrédito das ideias de Mach e a reforma de base feita por Einstein nos conceitos absolutos de Newton a respeito do espaço e do tempo. A verdade, contudo, é mais sutil e mais interessante. Mas se você não conhece bem os temas de que tratamos até aqui, pode ser útil fazer uma pausa antes de chegarmos à última seção deste capítulo. A tabela 3.1 contém um resumo que refrescará a sua memória e facilitará a retomada do caminho.

Muito bem. Se você está acompanhando a leitura, presumo que esteja pronto para o próximo grande passo na história do espaço-tempo, passo catalisado, em

grande parte, por ninguém menos do que Ernst Mach. A relatividade especial concluiu, ao contrário da teoria de Mach, que, mesmo em um universo vazio, você se sentiría pressionado contra a parede interna de um balde que gira, e uma corda que estivesse amarrando duas pedras em revolução ficaria esticada, mas, apesar disso, Einstein conservou uma fascinação profunda pelas ideias de Mach e percebeu que uma consideração séria e atenta dessas ideias requeria um aprofundamento significativo das suas implicações. Mach nunca chegara a especificar um mecanismo por meio do qual as estrelas distantes e a matéria do universo como um todo realizariam o papel de determinar a intensidade com que os seus braços se abrem quando você gira, ou com que você se sente pressionado contra a parede de um balde em rotação. Einstein começou a suspeitar que se esse mecanismo existisse, teria relação com a gravidade.

Newton	O espaço é uma entidade; o movimento acelerado não é relativo; posição absolutista.
Leibniz	O espaço não é uma entidade; todos os aspectos do movimento são relativos; posição relacionista.
Mach	O espaço não é uma entidade; o movimento acelerado é relativo à distribuição média da massa no universo; posição relacionista.
Einstein (relatividade especial)	O espaço e o tempo são individualmente relativos; o espaço-tempo é uma entidade absoluta.

Tabela 3.1. *Resumo de algumas concepções sobre a natureza do espaço e do espaço-tempo.*

Essa possibilidade apresentava interesse especial para Einstein porque, na relatividade especial, ele ignorara por completo a gravidade para tornar possível a análise. Ele especulou que, talvez, uma teoria mais robusta, que englobasse a relatividade especial e a gravidade, chegasse a uma conclusão diferente sobre as ideias de Mach. Talvez, ele conjecturou, uma generalização da relatividade especial que incorporasse a gravidade pudesse permitir que a matéria, próxima e distante, determinasse a força que sentimos quando aceleramos.

Havia ainda uma segunda razão, e mais premente, para que Einstein voltasse a atenção para a gravidade. Ele percebeu que a relatividade especial, com a sua afirmação central de que a velocidade da luz é o limite máximo abaixo do qual qualquer coisa ou qualquer influência pode viajar, estava em conflito direto com a lei da gravidade universal de Newton — a conquista monumental que, por mais de duzentos anos, lograra prever, com precisão fantástica, os movimentos da Lua, dos planetas, dos cometas e de todas as coisas que aparecem no céu.

Apesar do êxito experimental da lei de Newton, Einstein percebeu que, segundo ela, a gravidade exerceria a sua influência de um lugar a outro, do Sol para a Terra, da Terra para a Lua, e assim por diante, instantaneamente, em tempo zero, *muito mais rápido do que a luz*. E isso contradizia diretamente a relatividade especial.

Para ilustrar a contradição, imagine que você teve uma noite horrível (o seu time perdeu, ninguém se lembrou do seu aniversário, comeram a manga que você tinha guardado na geladeira) e precisa distrair-se um pouco. Então você leva a família para dar um passeio de bote nas águas tranquilas da baía, no silêncio da noite. A Lua está bem alta e a maré está cheia (a gravidade da Lua atrai a água e cria as marés) e os belos reflexos do luar dançam na superfície do mar. Mas, como se todas as irritações do dia já não bastassem, extraterrestres hostis roubam a Lua e a levam para o outro lado da galáxia. O desaparecimento súbito da Lua já seria algo insólito, mas, se a lei da gravidade de Newton estivesse certa, o episódio demonstraria algo ainda mais estranho. A lei de Newton prevê que as águas começariam a baixar em razão de haver cessado a atração gravitacional da Lua pouco mais que um segundo *antes* que você visse a Lua desaparecer do céu. *Como um corredor que parte antes do tiro, as águas pareceriam baixar mais de um segundo antes da hora.*

A razão está em que, de acordo com Newton, no exato momento em que a Lua desaparece também desaparece, *instantaneamente*, a sua atração gravitacional, e sem esse fator, a maré começaria imediatamente a baixar. Mas como a luz leva pouco mais de um segundo para atravessar os 384 mil quilômetros que separam a Lua da Terra, você não veria a Lua desaparecer imediatamente. Por mais de um segundo, pareceria que as águas estariam afastando-se de uma Lua que ainda brilhava no céu. Assim, de acordo com o enfoque de Newton, a gravidade pode afetar-nos antes da luz — a gravidade pode viajar mais rápido do que a luz — e isso Einstein tinha certeza de que estava errado.[12]

Portanto, por volta de 1907, Einstein ficou obcecado com o propósito de formular uma nova teoria da gravidade que fosse pelo menos tão precisa quanto a de Newton e não conflitasse com a teoria da relatividade especial. Essa tarefa revelou-se maior do que todas as outras. A inteligência maravilhosa de Einstein encontrara, finalmente, um desafio à altura. Seus cadernos correspondentes a esse período estão cheios de ideias ainda em formulação, por vezes bem próximas de uma conclusão correta, da qual se afastava por pequenos erros que o levavam por caminhos longos e infrutíferos, assim como de exclamações de que ele havia deslindado o problema, seguidas logo depois da admissão de que cometera outro erro. Finalmente, em 1915, Einstein voltou à luz. Embora ele

tenha recebido ajuda em momentos críticos, principalmente do matemático Marcel Grossmann, a descoberta da *relatividade geral* foi o resultado da luta heroica de um único cérebro para dominar o universo. Essa conquista foi a joia da coroa da física pré-quântica.

A viagem de Einstein para a relatividade geral começou com uma pergunta decisiva que Newton timidamente evitara dois séculos antes. Como a gravidade exerce a sua influência através da imensa extensão do espaço? Como o Sol, tão distante, afeta o movimento da Terra? O Sol não toca a Terra — como, então, isso acontece? Em síntese: como funciona a gravidade? Embora Newton tivesse descoberto uma equação que descrevia o efeito da gravidade com grande precisão, ele reconhecia claramente que deixara sem resposta a importante questão de como atua a força da gravidade. No *Principia*, ele escreveu: "Deixo este problema para a consideração do leitor".[13] Como se vê, há uma similaridade entre este problema e o que Faraday e Maxwell resolveram no século XIX, utilizando a ideia do campo magnético com relação ao modo pelo qual um ímã exerce influência sobre coisas que ele não toca. Poderia sugerir-se uma resposta similar: a gravidade exerce influência por meio de outro campo — o campo gravitacional. Em sentido amplo, essa é a resposta correta. Mas tornar essa resposta real de uma maneira que não conflite com a relatividade especial é mais fácil de falar do que de fazer.

Muito mais fácil. Foi a essa tarefa que Einstein entregou-se, com coragem e dedicação. Com um esquema fascinante, que ele desenvolveu depois de quase uma década pesquisando no escuro, Einstein derrubou a veneranda teoria da gravidade de Newton. Igualmente fascinante é o fato de que, com isso, a história deu uma volta completa, porque o avanço revolucionário de Einstein vinculava-se intimamente à questão que Newton focalizou com o balde: qual a verdadeira natureza do movimento acelerado?

A EQUIVALÊNCIA ENTRE GRAVIDADE E ACELERAÇÃO

Na relatividade especial, a atenção de Einstein dirigia-se principalmente aos observadores que se movem a velocidades constantes — observadores que não sentem o movimento e que podem, portanto, afirmar que estão estacionários e todo o resto do mundo se move ao seu redor. Itchy, Scratchy e Apu, no trem, não sentem nenhum movimento. Da sua perspectiva, Martin e todos os que estejam na plataforma são os que se movem. Martin tampouco sente algum movimento. Para ele, o trem e os passageiros são os que estão em movimento. Nenhuma das duas perspectivas é melhor do que a outra. Mas o movimento acelerado é

diferente porque é possível *senti-lo.* Você se sente apertado contra o encosto do assento do seu carro quando acelera para a frente; você se sente empurrado para o lado quando o trem em que viaja faz uma curva fechada; você se sente pressionando o solo quando está em um elevador que sobe.

Por outro lado, Einstein se intrigava com o fato de que essas forças que sentimos são muito familiares. Quando você se aproxima de uma curva, por exemplo, o seu corpo se retesa, preparando-se para o empurrão lateral, porque você sabe que a força que entrará em ação é inevitável. Não há como impedir a sua influência. A única maneira de evitar a força é mudar os planos e não fazer a curva. Isso chamou a atenção de Einstein. Ele reconheceu que exatamente as mesmas características se aplicam à força gravitacional. Se você estiver no planeta Terra, estará sujeito à atração gravitacional desse planeta. É inevitável. Não há como impedir. Você pode proteger-se da força eletromagnética, ou da força nuclear, mas não existe maneira de proteger-se da força da gravidade. Um dia, em 1907, Einstein constatou que isso não era uma simples analogia. Em um desses momentos de iluminação que os cientistas passam a vida buscando, Einstein percebeu que a gravidade e o movimento acelerado são dois lados da mesma moeda.

Modificando os planos do seu movimento (para evitar a aceleração), você pode evitar sentir-se empurrado contra o assento do carro ou para o lado. Do mesmo modo, Einstein compreendeu que modificando da maneira correta o seu movimento, você também pode evitar as sensações normalmente associadas com a atração gravitacional. A ideia é maravilhosamente simples. Imagine que Barney deseja desesperadamente vencer o Concurso de Emagrecimento de Springfield, competição entre todos os homens barrigudos da cidade, para ver quem perde mais peso no prazo de um mês. Depois de duas semanas fazendo dieta líquida (cerveja sem álcool), Barney vê que ainda não consegue ler o resultado da pesagem na balança do banheiro porque tem a visão bloqueada pela barriga e, em um surto de frustração, pula pela janela, com a balança grudada nos pés. Antes de cair na piscina do vizinho, Barney consegue olhar para a balança — e o que é que ele vê? Bem, Einstein foi o primeiro a perceber, e a perceber por inteiro, que a balança marcará zero. A balança cai exatamente à mesma velocidade que Barney e, em consequência, os pés não a pressionam. *Em uma queda livre, Barney experimenta a mesma sensação de falta de peso que os astronautas experimentam no espaço exterior.*

Com efeito, se imaginarmos que Barney pula pela janela e entra por um longo túnel do qual todo o ar foi extraído, durante a queda não só a resistência do ar estaria eliminada, mas também, como todos os átomos do seu corpo estariam

caindo à mesma velocidade, todas as pressões e constrições corporais — a pressão para cima, dos pés contra os tornozelos, das pernas contra os quadris, e a pressão para baixo, dos braços contra os ombros etc. — também estariam eliminadas.[14] Se Barney fechar os olhos durante a queda, terá exatamente a mesma sensação que teria se estivesse flutuando na escuridão do espaço profundo. (Se você preferir exemplos não humanos: se jogarmos no túnel duas pedras amarradas por uma corda, ela permanecerá frouxa, tal como aconteceria se corda e pedras estivessem no espaço exterior.) Assim, modificando o seu estado de movimento — cedendo completamente à gravidade —, Barney logra simular um ambiente sem gravidade. (A Nasa treina os seus astronautas para os ambientes sem gravidade do espaço exterior, fazendo-os voar em um avião 707 modificado, chamado o *cometa do vômito*, *Vomit Comet*, que entra periodicamente em estado de queda livre)

Igualmente, por meio de uma mudança adequada do movimento, pode-se criar uma força essencialmente igual à gravidade. Imagine, por exemplo, que Barney se junta a um grupo de astronautas em uma cápsula espacial, com a balança do banheiro ainda presa aos pés e registrando peso zero. Se a cápsula ligar os foguetes e acelerar, as coisas mudarão significativamente. Barney se sentirá pressionado contra o piso, assim como você se sente pressionado contra o piso de um elevador que acelera para cima. E como os seus pés ainda estão apoiados sobre a balança, ela já não registrará peso zero. Se o comandante da cápsula lograr a aceleração exata, a balança registrará o mesmo número que Barney não pôde ver no banheiro: o seu peso real; e Barney, graças à aceleração adequada, experimentará uma força indistinguível da gravidade.

O mesmo raciocínio é válido para outros tipos de movimento acelerado. Se Barney juntar-se a Homer no balde do espaço exterior e ficar perpendicular a ele, com os pés e a balança contra a parede do balde que gira, a balança registrará um peso diferente de zero, uma vez que os pés a pressionarão. Se o balde girar no ritmo adequado, o registro da balança será o mesmo que Barney não pôde ver no banheiro: a aceleração do balde que gira também pode simular a gravidade terrestre.

Tudo isso levou Einstein a concluir que a força que sentimos com a gravidade e a força que sentimos com a aceleração são a mesma. São equivalentes. Einstein deu a isso o nome de *princípio da equivalência.*

Veja o que isso significa. Agora mesmo você está sentindo a influência da gravidade. Se estiver de pé, sentirá que o chão suporta o seu peso. Se estiver sentado, sentirá esse suporte em uma outra parte do corpo. A menos que você esteja lendo em um avião, ou em um carro, sentirá também que está estacionário — que não está em aceleração, nem sequer em movimento. Mas, de acordo com

Einstein, você, na verdade, está em aceleração. Como você está sentado, isso soa um pouco estranho, mas não se esqueça de fazer a pergunta usual: aceleração com relação a quê? Aceleração do ponto de vista de quem?

Com a relatividade especial, Einstein proclamou que o espaço-tempo absoluto proporciona a referência, mas a relatividade especial não leva em conta a gravidade. Assim, por meio do princípio da equivalência, Einstein proporcionou uma referência mais robusta, que inclui os efeitos da gravidade. E isso provocou uma mudança radical de perspectiva. *Como a gravidade e a aceleração são equivalentes, se você sente a influência da gravidade é porque está em aceleração*. Einstein argumentou que apenas aqueles observadores que não sentem força alguma — nem sequer a força da gravidade — podem declarar que não estão em aceleração. Esses observadores que não experimentam nenhuma força proporcionam os verdadeiros pontos de referência para a discussão do movimento, e é esse reconhecimento que provoca uma grande reviravolta na nossa maneira de pensar a respeito dessas coisas. Quando Barney salta da janela para o túnel sem ar, normalmente descreveríamos o seu movimento como de aceleração rumo à superfície da Terra. Mas Einstein não estaria de acordo com essa descrição. De acordo com ele, Barney *não* está em aceleração. *Ele* não sente força alguma. *Ele* não tem peso. *Ele* sente como se estivesse flutuando na escuridão profunda do espaço vazio. *Ele* proporciona o padrão em função do qual todos os movimentos devem ser comparados. E, por meio dessa comparação, quando você está calmamente em casa, lendo o seu livro, *você* está em aceleração. Da perspectiva de Barney, que está em queda livre — e, de acordo com Einstein, essa é a perspectiva que constitui a verdadeira referência para o movimento —, você, a Terra e todas as outras coisas que normalmente consideramos estacionárias estão *em aceleração para cima.* Einstein argumentaria que foi a cabeça de Newton que correu ao encontro da maçã, e não o contrário.

É evidente que essa é uma maneira radicalmente diferente de considerar o movimento. Mas ela tem por base a simples constatação de que você só sente a influência da gravidade quando resiste a ela. Por outro lado, quando você cede completamente à gravidade, deixa de senti-la. Supondo que você não esteja sujeito a nenhuma outra influência (como a resistência do ar), quando você cede à gravidade e se sujeita a entrar em queda livre, se sentirá como se estivesse flutuando no espaço vazio — perspectiva que, sem hesitação, consideramos como destituída de aceleração.

Em resumo, apenas os indivíduos que estão flutuando livremente, independentemente de estarem nas profundidades do espaço exterior ou em rota

de colisão com a superfície da Terra, podem afirmar que não experimentam aceleração. Se você passar por um desses observadores e constatar que há aceleração relativa entre vocês dois, de acordo com Einstein, você está em aceleração.
Veja que nem Itchy, nem Scratchy, nem Apu, nem Martin podiam afirmar verdadeiramente que estavam estacionários durante o duelo, uma vez que estavam todos sentindo a atração da gravidade. Isso não é relevante para a nossa conversa anterior porque estávamos então ocupados apenas com o movimento horizontal, que não é afetado pela gravidade vertical experimentada por todos os participantes. Mas, como importante questão de princípio, o vínculo apontado por Einstein entre a gravidade e a aceleração significa, novamente, que só podemos considerar como estacionários aqueles observadores que *não* sentem força alguma.
Tendo estabelecido o vínculo entre a gravidade e a aceleração, Einstein estava pronto para enfrentar o desafio de Newton e buscar a explicação de como a gravidade exerce a sua influência.

CURVAS, DEFORMAÇÕES E GRAVIDADE

Com a relatividade especial, Einstein mostrou que cada observador corta o espaço-tempo em fatias paralelas, consideradas por ele como a totalidade do espaço em sucessivos instantes do tempo. Isso tem a inesperada consequência de que os observadores que se movem uns com relação aos outros a velocidade constante cortarão o espaço-tempo em ângulos diferentes. Se um desses observadores começar a acelerar, pode-se pensar que as sucessivas alterações na velocidade e/ou na direção do seu movimento resultarão em sucessivas alterações no ângulo e na orientação das suas fatias. Basicamente, é isso o que acontece.

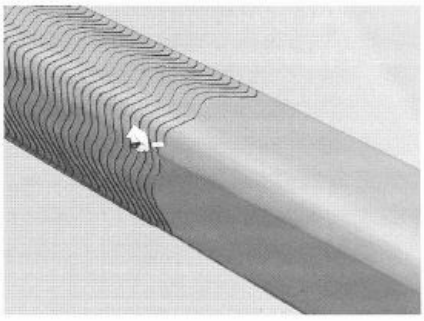


Figura 3.8. *De acordo com a relatividade geral, não só o pão do espaço-tempo é espacialmente cortado em diferentes ângulos para diferentes momentos do tempo (por observadores em movimento relativo), mas as próprias fatias são deformadas ou recurvadas pela presença da matéria ou da energia.*

Einstein (valendo-se de incursões matemáticas articuladas por Carl Friedrich Gauss, Georg Bernhard Riemann e outros matemáticos do século XIX) desenvolveu essa ideia — após diversas tentativas — e mostrou que os cortes feitos em ângulos diferentes através do pão do espaço-tempo unem-se harmoniosamente em fatias que são *curvas*, mas que se encaixam com perfeição como as colheres em um faqueiro, como ilustra esquematicamente a figura 3.8. *As fatias espaciais cortadas por um observador em aceleração são deformadas.*
Com esse conceito, Einstein pôde invocar o princípio da equivalência e produzir consequências profundas. Como a gravidade e a aceleração são equivalentes, Einstein compreendeu que a própria gravidade deve ser simplesmente a consequência de que o tecido do espaço-tempo mostra-se curvo e deformado. Vejamos o que isso significa.
Se você rolar uma bola de gude sobre um piso de madeira lisa, ela percorrerá uma linha reta. Mas se você acabou de passar por uma inundação e o chão da sua casa secou-se cheio de detritos que afetam a sua uniformidade, a bola não rolará da mesma maneira. Ao contrário, a sua trajetória será guiada pelas curvas de nível do piso. Einstein aplicou esta ideia simples ao tecido do universo e imaginou que, sem a presença da matéria e da energia — sem o Sol, a Terra e as estrelas —, o espaço-tempo não se apresenta nem curvo nem deformado, tal como o piso de madeira lisa. Isso é o que mostra esquematicamente a figura 3.9a, em que focalizamos uma fatia do espaço. Evidentemente, o espaço é, na verdade, tridimensional e, portanto, a figura 3.9b apresenta uma descrição mais precisa, mas as ilustrações bidimensionais são mais fáceis de entender, de modo que vamos continuar a usá-las.

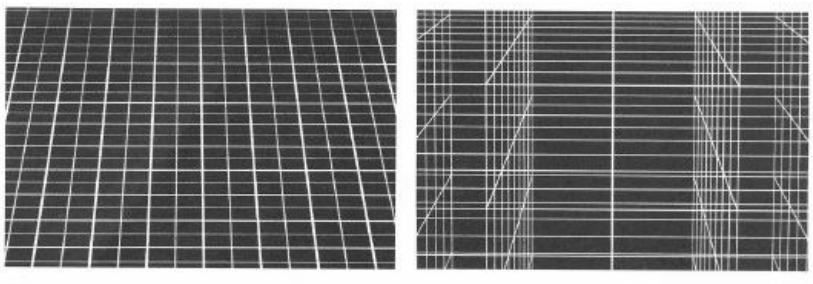


Figura 3.9. (*a*) *Espaço plano* (*versão bidimensional*). (*b*) *Espaço plano* (*versão tridimensional*).

Einstein imaginou então que a presença da matéria ou da energia gera sobre o espaço um efeito muito semelhante ao da enchente sobre o piso. A matéria e a energia, como o Sol, fazem com que o espaço e o espaço-tempo curve-se e deforme-se, como ilustram as figuras 3.10a e 3.10b (é mais fácil representar a deformação do espaço, mas também o tempo, por causa da sua íntima conexão com o espaço, sofre a deformação

causada pela matéria e pela energia. Assim como a deformação do espaço significa que ele se estica ou se comprime, como mostra a figura 3.10, a deformação do tempo significa que também ele se estica ou se comprime. Portanto, os relógios que experimentam atrações gravitacionais diferentes — como, por exemplo, um no Sol e outro no espaço profundo e vazio — marcam o tempo em ritmos diferentes. Na verdade, a deformação do espaço causada por corpos comuns, como a Terra e o Sol (mas não os buracos negros), é muito menos pronunciada do que a deformação que eles produzem sobre o tempo). Einstein demonstrou que, assim como uma bola de gude que rola sobre uma superfície irregular descreve uma trajetória curva, qualquer coisa que se mova através de um espaço deformado — como a Terra em sua translação ao redor do Sol — descreverá uma trajetória curva, como mostram as figuras 3.11a e 3.11b.

É como se a matéria e a energia produzissem uma rede de vales e depressões que determinam as trajetórias dos objetos, guiando as suas trajetórias com a mão invisível do tecido do espaço-tempo. Segundo Einstein, é assim que a gravidade exerce a sua influência. A mesma ideia também se aplica mais perto de nós. Agora mesmo, o seu corpo procura escorregar pelas depressões causadas pela presença da Terra no tecido do espaço-tempo, mas o seu movimento é bloqueado pela superfície em que você está apoiado. A resistência para cima que você sente praticamente em todos os momentos da sua vida — a partir da terra, do chão da sua casa, da sua poltrona favorita ou da sua cama — atua no sentido de impedir que você deslize por uma depressão do espaço-tempo. Por outro lado, se você mergulhar da plataforma mais alta para piscina, estará cedendo à gravidade, permitindo que o seu corpo se mova livremente ao longo de uma das depressões do espaço-tempo.

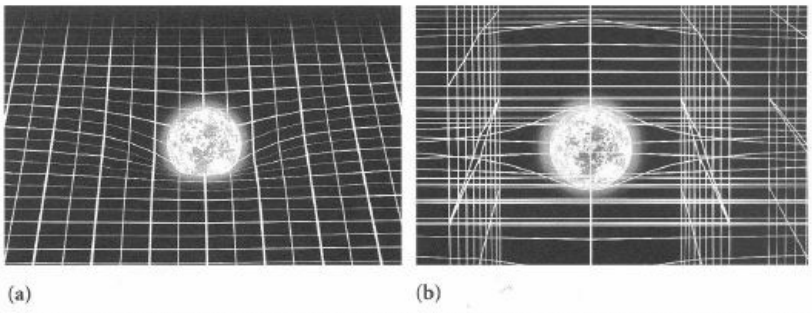
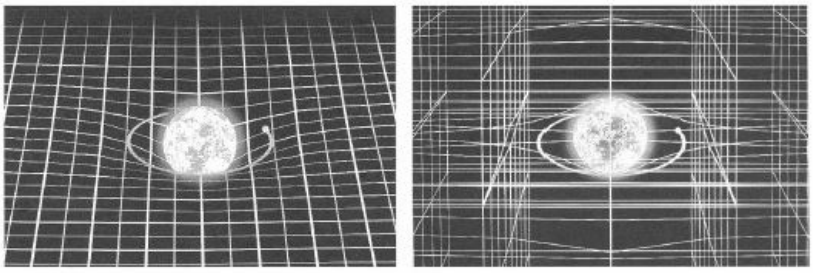


Figura 3.10. (*a*) *O Sol deforma o espaço* (*versão bidimensional*). (*b*) *O Sol deforma o espaço* (*versão tridimensional*).

As figuras 3.9, 3.10 e 3.11 ilustram esquematicamente a vitória de Einstein na sua luta de dez anos. Grande parte do seu trabalho durante esse período destinava-se a determinar com precisão a forma e o tamanho da deformação que seria causada por esta ou aquela quantidade de matéria ou energia. O resultado matemático obtido por ele inspira estas figuras e está presente no que denominamos *equações do campo de Einstein.*



(a) (b)

Figura 3.11. *A Terra mantém-se em órbita ao redor do Sol porque segue as curvas causadas no espaço-tempo pela presença do Sol. (a) Versão bidimensional. (b) Versão tridimensional.*

Como o nome indica, Einstein via a deformação do espaço-tempo como uma manifestação — a corporificação geométrica — de um campo gravitacional. Dando forma geométrica ao problema, Einstein pôde encontrar equações que fazem para a gravidade o que as equações de Maxwell fizeram para o eletromagnetismo.[16] Com base nessas equações, Einstein e muitos outros cientistas fizeram previsões a respeito das trajetórias que devem ser seguidas pelos diferentes planetas e até mesmo pela luz emitida por estrelas distantes que se movem através do espaço-tempo curvo. Essas previsões não só foram confirmadas com alto grau de precisão, mas, em comparação com as previsões da teoria de Newton, a teoria de Einstein consistentemente as supera, reproduzindo mais fielmente a realidade.

Igualmente importante, uma vez que a relatividade geral especifica o mecanismo de funcionamento da gravidade, a teoria propicia um esquema matemático para a determinação da velocidade com que as influências que ela exerce são transmitidas. A velocidade de transmissão leva à questão de saber com que rapidez a forma do espaço pode mudar com o tempo. Em outras palavras, com que rapidez as curvas e ondulações — como as que o lançamento de uma pedra formam na superfície de um lago — viajam de um lugar a outro através do espaço. Einstein logrou resolver o problema, e a resposta que ele obteve foi bastante gratificante. Ele comprovou que as curvas e ondulações — ou seja, a gravidade — não viajam instantaneamente de um lugar a outro, como nos cálculos de Newton a respeito da gravidade. *Elas viajam exatamente à velocidade da luz*, nem mais, nem menos, ou seja, em perfeita conformidade com o limite estabelecido pela relatividade especial. Se os extraterrestres roubassem a Lua, a maré baixaria pouco mais de um segundo depois, no mesmo momento em que testemunharíamos o desaparecimento da Lua. Onde a teoria de Newton falha, a de Einstein prevalece.

A RELATIVIDADE GERAL E O BALDE

Além de dar-nos uma teoria da gravidade matematicamente elegante, conceitualmente poderosa e, pela primeira vez, inteiramente consistente, a teoria da relatividade geral modificou por completo a nossa visão do espaço e do tempo. Tanto na concepção de Newton quanto na da relatividade especial, o espaço e o tempo constituíam um cenário imutável para os eventos do universo. Embora a divisão do cosmo em fatias de espaço a momentos sucessivos do tempo tenha propiciado, com a relatividade especial, uma flexibilidade impossível de alcançar na época de Newton, o espaço e o tempo não respondem aos acontecimentos do universo. O espaço-tempo — o pão, como o temos chamado — é tomado como axioma, e de uma vez por todas. Na relatividade geral, tudo isso muda. O espaço e o tempo tornam-se atores de um cosmo que evolui. Ganham vida. A matéria que está em um lugar faz o espaço deformar-se em outro, e isso faz a matéria mover-se mais adiante, o que faz o espaço deformar-se ainda mais em um outro lugar, e assim por diante. A relatividade geral proporciona a coreografia para uma dança cósmica em que se entrelaçam o espaço, o tempo, a matéria e a energia.

Este é um desenvolvimento fantástico. Mas agora temos de voltar ao nosso tema central: e o balde? A relatividade geral propicia a base física para as ideias relacionistas de Mach, como esperava Einstein?

Esta questão gerou grande controvérsia ao longo dos anos. A princípio, Einstein pensou que a relatividade geral incorporava completamente a perspectiva de Mach, ponto de vista que ele considerava tão importante que o denominou *princípio de Mach.* Com efeito, em 1913, quando Einstein trabalhava vigorosamente tentando terminar de montar o quebra-cabeça da relatividade geral, ele escreveu uma carta entusiasmada para Mach, na qual descrevia como a relatividade geral confirmaria a análise que Mach fizera a respeito do experimento de Newton com o balde.[17] E em 1918, quando Einstein escreveu um artigo enumerando as três ideias essenciais da relatividade geral, o terceiro ponto era o princípio de Mach. Mas a relatividade geral é sutil e tinha características que os físicos, inclusive o próprio Einstein, levaram muitos anos para entender por completo. À medida que aumentava esse conhecimento, foi ficando mais difícil para Einstein incorporar integralmente o princípio de Mach à sua teoria. Pouco a pouco ele foi se desiludindo com as ideias de Mach e nos últimos anos da sua vida abandonou-as.[18]

Com mais cinquenta anos de pesquisa, podemos reavaliar o grau de compatibilidade entre a relatividade geral e o raciocínio de Mach. Embora ainda persista alguma controvérsia, acho que o mais correto é dizer que, em alguns aspectos, a relatividade geral tem um sabor claramente machiano, mas não é

compatível com a perspectiva integralmente relacionista advogada por Mach. Eis por quê Mach argumentou[19] que, quando a superfície da água em rotação se torna côncava, ou quando você sente que os seus braços querem abrir-se, ou quando a corda amarrada entre as duas pedras se estica, essas coisas nada têm a ver com uma noção hipotética — e a seu ver totalmente descabida — de espaço absoluto (ou, na nossa compreensão atual, espaço-tempo absoluto). Em lugar disso, ele ponderou que aí estava a comprovação de que o movimento acelerado se define com relação a toda a matéria distribuída por todo o cosmo. Se não houvesse matéria, não haveria nenhuma noção de aceleração nem ocorreriam os efeitos físicos aqui enumerados (água côncava, braços abertos, corda esticada).

Que diz a relatividade geral?

De acordo com ela, a referência para todos os movimentos, e para o movimento acelerado em particular, são os observadores em queda livre — observadores que cederam por completo à gravidade e que não sofrem a influência de nenhuma outra força. Ora, um aspecto crucial é o de que a força gravitacional à qual o observador em queda livre cede deriva de toda a matéria (e de toda a energia) distribuída através do cosmo. A Terra, a Lua, os planetas distantes, as estrelas, as nuvens de gás, as galáxias e os quasares — tudo contribui para o campo gravitacional (em linguagem geométrica, para a curvatura do espaço-tempo) que existe aí mesmo onde você está sentado. As coisas que têm mais massa e que estão mais próximas exercem uma influência gravitacional maior, mas o campo gravitacional que você experimenta é formado pela influência combinada de toda a matéria.[20] O caminho que o seu corpo tomaria se cedesse por completo à gravidade e assumisse o movimento em queda livre — ou seja, a referência, que você passaria a ser, para julgar se algum outro objeto está em aceleração — *seria* influenciado por toda a matéria do cosmo — pelas estrelas do céu e pela casa do vizinho. Assim, na relatividade geral, quando se diz que um objeto está em aceleração, quer se dizer que esse objeto está em aceleração com relação a uma referência determinada pela matéria distribuída por todo o universo. Esta é uma conclusão que tem o sentido do que Mach advogava. Assim, neste aspecto, a relatividade geral incorpora algo do pensamento de Mach.

Mas a relatividade geral não confirma o raciocínio machiano por inteiro, e isso pode ser visto diretamente se considerarmos de novo o balde em rotação em um universo vazio. Em um universo vazio e imutável — sem estrelas, sem planetas, sem nada — não há gravidade.[21] E sem gravidade, o espaço não se curva — ele toma a forma simples e sem curvas que mostra a figura 3.9b — e isso significa que estamos de volta ao cenário mais simples da relatividade especial. (Lembre-se de que Einstein ignorou a gravidade ao desenvolver a relatividade especial. A relatividade geral compensou essa deficiência ao incorporar a gravidade, mas

com um universo vazio e imutável não há gravidade e, portanto, a relatividade geral se reduz à relatividade especial.) Se introduzirmos agora o balde nesse universo vazio, a sua massa será tão minúscula que a sua presença praticamente não afetará a forma do espaço como um todo. Desse modo, a discussão que tivemos anteriormente a respeito do balde e da relatividade especial aplica-se também à relatividade geral. Contrariamente ao que Mach teria previsto, a relatividade geral chega à mesma resposta da relatividade especial e proclama que, ainda que em um universo vazio, você se *sentirá* pressionado contra a parede interna de um balde em rotação; em um universo vazio os seus braços se *sentirão* compelidos a abrir-se se você começar a girar; em um universo vazio a corda amarrada entre duas pedras que giram *ficará* esticada. A conclusão a tirar é a de que, mesmo na relatividade geral, o espaço-tempo vazio proporciona a referência para o movimento acelerado.

Desse modo, embora a relatividade geral incorpore alguns elementos do pensamento de Mach, ela não subscreve o conceito de movimento que Mach advogava, que era integralmente relativo.[22] O princípio de Mach é um exemplo de uma ideia provocante que propicia inspiração para uma descoberta revolucionária, ainda que essa mesma descoberta por fim não venha a adotar por completo a ideia que a inspirou.

O ESPAÇO-TEMPO NO TERCEIRO MILÊNIO

O balde que gira teve uma longa atuação. Em toda a evolução, do espaço e do tempo absolutos de Newton aos conceitos relacionais de Leibniz e Mach, à constatação de Einstein, na relatividade especial, de que o espaço e o tempo são relativos, mas, em sua união, compõem um espaço-tempo absoluto, e até a sua descoberta subsequente, na relatividade geral, de que o espaço-tempo é um ator dinâmico em um cosmo em estado de mudança, o balde esteve sempre aí. Girando, no fundo das nossas mentes, ele nos proporcionou um teste simples e tranquilo para sabermos se o caráter indivisível, abstrato e intocável do espaço — e do espaço-tempo em geral — é suficientemente substancial para constituir a referência definitiva para o movimento. O veredito? Embora a questão ainda esteja em debate, como acabamos de ver, a leitura mais direta de Einstein e da relatividade geral é a de que o espaço-tempo, sim, pode proporcionar essa referência: *o espaço-tempo é um "algo"*.[23]

Note-se, contudo, que esta conclusão também é causa de celebrações entre os que apoiam uma visão relacionista definida de maneira mais ampla. Na opinião de Newton, assim como na perspectiva da relatividade especial, o espaço, e

depois o espaço-tempo, eram invocados como as entidades que proporcionam a referência para definir o movimento acelerado. E como, de acordo com estes pontos de vista, o espaço e o espaço-tempo são absolutamente imutáveis, esta noção de aceleração é absoluta. Na relatividade geral, no entanto, o caráter do espaço-tempo é completamente diferente. Nela, o espaço e o tempo são dinâmicos: são mutáveis; respondem à presença da massa e da energia; não são absolutos. O espaço-tempo, e em particular a maneira como ele se curva e se deforma, é uma manifestação física do campo gravitacional. Assim, na relatividade geral, a aceleração relativa ao espaço-tempo está longe de ser a concepção não-relacional, firme e absoluta, que as teorias anteriores invocavam. Ao contrário, como Einstein apontou eloquentemente poucos anos antes da sua morte,[24] a aceleração relativa ao espaço-tempo da relatividade geral é relacional. Não é uma aceleração relativa a objetos materiais, como uma pedra ou uma estrela, mas sim relativa a algo que é igualmente real, tangível e mutável: um campo — o campo gravitacional. (na relatividade especial — o caso especial da relatividade geral em que o campo gravitacional é igual a zero —, essa ideia se aplica sem modificações: um campo gravitacional igual a zero continua a ser um campo, que pode ser medido e modificado e que, por conseguinte, proporciona um "algo" com relação ao qual a aceleração pode ser definida)**.** Nesse sentido, o espaço-tempo — como encarnação da gravidade — é *tão* real na relatividade geral que a referência que ele proporciona pode ser aceita sem maiores discussões por muitos relacionistas.

O debate sobre estas questões prosseguirá, sem dúvida, enquanto estivermos empenhados em compreender o que o espaço, o tempo e o espaço-tempo são na realidade. Com o desenvolvimento da mecânica quântica, a coisa apenas se complica. Os conceitos de espaço vazio e de nada, da ausência total de tudo, tomam um sentido inteiramente novo quando a mecânica quântica entra em cena. Com efeito, desde 1905, quando Einstein acabou com o éter luminífero, a ideia de que o espaço seja permeado por substâncias invisíveis voltou vigorosamente ao primeiro plano. Como veremos em capítulos posteriores, alguns desenvolvimentos cruciais da física moderna restabeleceram diversas formas de entidades semelhantes ao éter, nenhuma das quais proporciona um padrão absoluto para o movimento, como o éter luminífero original, mas todas elas desafiam uma concepção ingênua do que significaria um espaço-tempo vazio. Além disso, como veremos a seguir, o papel mais *básico* que o espaço desempenha em uma concepção clássica do universo — como meio que separa um objeto dos demais, como a coisa interveniente que nos permite dizer com clareza que um objeto é diferente e independente de outro — é integralmente contestado pelas alucinantes conexões quânticas.

4. O espaço emaranhado

Que significa “separação” em um universo quântico?

Aceitar a relatividade especial e a relatividade geral é abandonar o espaço absoluto e o tempo absoluto de Newton. Não é fácil, mas você pode treinar a mente para fazê-lo. Imagine que, sempre que você se deslocar, o seu *agora* se separará dos *agoras* experimentados por todos os demais que não se estão deslocando com você. Quando você estiver dirigindo o seu carro na estrada, imagine que o seu relógio marca o tempo em um ritmo diferente em comparação com os ritmos dos relógios de todos os que estão nas casas pelas quais você passa. Quando você estiver no alto de uma montanha, imagine que, por causa do encurvamento do espaço-tempo, o tempo passa mais depressa para você do que para os que estão sujeitos à gravidade mais forte ao nível do mar. Digo “imagine” porque, nas circunstâncias normais como estas, os efeitos da relatividade são tão mínimos que passam completamente despercebidos. A experiência diária oculta, portanto, a maneira como o universo funciona realmente, e é por isso que, cem anos depois de Einstein, praticamente ninguém, nem mesmo os físicos profissionais, sentem a relatividade como algo natural. Isso não chega a surpreender. A pressão que nos leva a encontrar melhores condições de sobrevivência individual requer da nossa parte uma firme percepção da realidade. Mas as concepções imperfeitas de Newton a respeito do espaço e do tempo absolutos trabalham extraordinariamente bem nas condições de velocidade baixa e gravidade moderada que encontramos na vida diária e por isso os nossos sentidos não experimentam nenhuma pressão evolucionária para desenvolver uma acuidade especial com relação à relatividade geral. Para suprir as imperfeições dos nossos sentidos e alcançar a consciência profunda e o conhecimento verdadeiro, precisamos, portanto, usar diligentemente o nosso intelecto.

Enquanto a relatividade provocava este rompimento monumental com as ideias tradicionais a respeito do universo, entre 1900 e 1930, outra revolução também estava virando a física de cabeça para baixo. Ela começou na passagem para o século XX, com a publicação de dois documentos sobre as propriedades da radiação, um de Max Planck e o outro de Einstein. Depois de três décadas de trabalho intenso, essas ideias levaram à formulação da *mecânica quântica*. Assim como a relatividade, cujos efeitos só se tornam significativos sob

condições extremas de velocidade ou de gravidade, a nova física da mecânica quântica só se revela claramente em outra situação extrema: o domínio do que é extremamente pequeno. Mas há uma distinção aguda entre os impactos da relatividade e os da mecânica quântica. A estranheza da relatividade deriva de que a nossa experiência pessoal do espaço e do tempo difere das experiências dos demais. Ela nasce de uma comparação. Somos forçados a admitir que a nossa visão da realidade é apenas uma entre muitas — na verdade, um número infinito —, todas as quais se acomodam dentro do todo do espaço-tempo.
A mecânica quântica é diferente. A sua estranheza se torna evidente sem a necessidade de comparações. É mais difícil treinar a mente para desenvolver a intuição em termos de mecânica quântica porque ela abala a nossa própria concepção individual da realidade.

O MUNDO DE ACORDO COM O QUANTUM

Cada época desenvolve as suas histórias, ou as suas metáforas, a respeito da origem e da estrutura do universo. Segundo um antigo mito indiano da criação, o universo teve início quando os deuses desmembraram o gigante primevo, Purusa, cuja cabeça tornou-se o céu, os pés tornaram-se a Terra e o alento tornou-se o ar. Para Aristóteles, o universo era um conjunto de 25 esferas cristalinas e concêntricas, a última das quais era o céu, que circundava as esferas dos planetas, da Terra e dos seus elementos e, por fim, os sete círculos do inferno.[1] Com Newton e a sua formulação precisa, determinística e matemática do movimento, a descrição modificou-se novamente. O universo era como um relógio enorme e grandioso: uma vez colocado em seu estado inicial de funcionamento, ele passa de um momento para o outro com regularidade e previsibilidade absolutas.
A relatividade especial e a geral acrescentaram importantes sutilezas à metáfora do relógio: não existe um relógio preferencial, único e universal; não há consenso em torno do que constitua um momento, um *agora*. Mesmo assim, é possível continuar a pensar na história evolutiva do universo em termos de um relógio. O seu relógio. A sua história. Porém o universo evolui com a mesma regularidade e previsibilidade que caracterizavam o modelo newtoniano. Se, de algum modo, você conhecer o estado do universo exatamente agora — se você souber onde está *cada* partícula e com que velocidade e em que direção ela se move —, então, Newton e Einstein concordam, você pode, em princípio, utilizar as leis da natureza para prever todas as coisas a respeito do universo em qualquer momento do futuro e definir o estado em que se encontrava em qualquer momento do passado.[2]

A mecânica quântica quebra essa tradição. *Não é possível* conhecer a localização exata e a velocidade exata nem sequer de uma única partícula. *Não é possível* prever com certeza total sequer o resultado do mais simples dos experimentos — para não falar da evolução de todo o cosmo. A mecânica quântica revela que o máximo que podemos pretender é prever a *probabilidade* de que um experimento produza este ou aquele resultado. E como a mecânica quântica foi comprovada através de décadas de experimentos fantasticamente precisos, o relógio cósmico de Newton, mesmo com o acerto que lhe foi dado por Einstein, é uma metáfora insustentável. Sabemos com certeza que *não* é assim que o universo funciona.

Mas o rompimento com o passado é ainda mais completo. Embora as teorias de Newton e de Einstein difiram agudamente quanto à natureza do espaço e do tempo, elas concordam quanto a certos fatos básicos, certas verdades que parecem auto evidentes. Se existe espaço entre dois objetos — se há dois pássaros no céu é se um está bem à sua esquerda e o outro bem à sua direita —, podemos considerá-los e de fato os consideramos como objetos independentes, como entidades separadas e diferentes. O espaço, qualquer que seja a sua natureza fundamental, proporciona o meio que separa e diferencia um objeto do outro. Isso é o que o espaço faz. As coisas que ocupam diferentes lugares no espaço são coisas diferentes. Além disso, para que um objeto possa influenciar outro é preciso que ele aja, de alguma maneira, através do espaço que os separa. Um pássaro pode voar até o outro atravessando o espaço entre eles, é em seguida bicá-lo ou acariciá-lo. Uma pessoa pode influenciar outra atirando-lhe uma pedra através do espaço entre elas, ou gritando, o que causa um efeito dominó de moléculas de ar, que saltam e atropelam as moléculas que estão à sua frente, até que algumas delas chocam-se contra o tímpano de quem ouve o grito. Se quisermos ser mais sofisticados, podemos exercer influência sobre outra pessoa disparando um raio laser, o que causa uma onda eletromagnética — um raio de luz — que atravessa o espaço interveniente; ou, se formos mais ambiciosos (como o ladrão extraterrestre do último capítulo), podemos sacudir ou mover um corpo de grande massa (como a Lua) e enviar um distúrbio gravitacional de um lugar a outro. É certo que, se estamos aqui, podemos influenciar alguém que esteja ali adiante, mas, não importa a maneira como a façamos, o procedimento sempre requer que alguém ou algo viaje daqui para ali adiante, e só quando esse alguém ou esse algo chega lá é que a influência pode ser exercida.

Os físicos dão a essa característica do universo o nome de *localidade*, para significar que você só pode afetar diretamente coisas que estejam próximas a você, que serão locais. O vodu contraria a ideia de localidade porque implica que

algo feito em um lugar possa afetar algo que está em outro lugar sem que nada viaje de um lugar ao outro, porém a experiência acumulada nos leva a pensar que os experimentos verificáveis e repetíveis confirmam a localidade.[3] Na maioria dos casos, isso é verdade.

Mas uma série de experimentos realizados nas duas últimas décadas revela que algo que fazemos em um lugar (como medir certas propriedades de uma partícula) *pode* sutilmente emaranhar-se com algo que ocorre em outro lugar (como o resultado da medição de certas propriedades de outra partícula distante), *sem que* nada seja enviado de um lugar ao outro. Esse fenômeno, embora desafie a nossa intuição, é perfeitamente compatível com as leis da mecânica quântica e foi previsto por elas muito antes de que a tecnologia pudesse propiciar-nos a sua verificação por meio de experimentos. É como o vodu: Einstein, que esteve entre os primeiros a reconhecer — e a criticar acidamente — este possível aspecto da mecânica quântica, qualificou-o como "fantasmagórico". Mas, como veremos, estes vínculos de longa distância que os experimentos confirmam são extremamente delicados e, em sentido estrito, estão além da nossa capacidade de controle.

O que importa é que esses resultados, que provêm tanto de considerações teóricas quanto experimentais, dão decisivo apoio à conclusão de que o universo admite interconexões não-locais.[4] Algo que acontece em um lugar pode estar conectado com algo que acontece em outro lugar ainda que nada viaje de um lugar ao outro — e ainda que não haja tempo para que qualquer coisa, até mesmo a luz, possa viajar entre os eventos. Isso significa que o espaço não pode mais ser concebido como antes: o espaço interveniente, *independentemente da sua extensão,* não assegura que dois objetos sejam separados, uma vez que a mecânica quântica permite a existência de um emaranhamento, um tipo de conexão entre eles. Uma partícula, igual às incontáveis partículas que compõem o seu corpo e o meu, pode mover-se, mas não pode desaparecer. De acordo com a teoria quântica e com os múltiplos experimentos que confirmaram as suas previsões, a conexão quântica entre duas partículas pode persistir mesmo que elas estejam em lados opostos do universo. Do ponto de vista do seu emaranhamento, apesar dos trilhões de quilômetros de espaço que existem entre elas, é como se as partículas estivessem juntas.

A física moderna imprime golpes sucessivos e poderosos na nossa concepção da realidade. Encontraremos muitos deles nos capítulos que se seguem. Mas, dentre os que foram experimentalmente confirmados, nenhum é mais alucinante, na minha opinião, do que a noção de que o universo não é local.

O VERMELHO E O AZUL

Para apreender o conceito de não-localidade que provém da mecânica quântica, imagine que a agente Scully, que há muito tempo não tirava férias, foi descansar na propriedade de sua família na Provença. Antes mesmo de ter tempo para desfazer as malas, o agente Mulder telefona dos Estados Unidos.
“Achou a caixa — a que está embrulhada com papel vermelho e azul?”
Scully volta até a porta, dá uma olhada e vê o pacote. “Mulder, por favor, eu não vim aqui até Aix para receber outra pilha de documentos.”
“Não, não. Não fui eu quem mandou o pacote. Eu também recebi um. Dentro estão umas caixinhas de titânio, à prova de luz, numeradas de 1 a 1000, e uma carta que diz que você está recebendo um pacote igual.”
“Sim? E daí”, responde Scully, vagarosamente, já temendo que as caixinhas de titânio venham a encurtar as suas férias.
“Bem”, diz Mulder, “a carta diz que cada caixa de titânio contém uma esfera extraterrestre e uma luz vermelha ou azul vai brilhar no momento em que se abrir a tampa lateral.”
“Está bem, Mulder. Devo ficar impressionada?”
“Ainda não, mas escute. A carta diz que as esferas que estão dentro das caixas, qualquer caixa, mostram uma luz que ou é vermelha ou é azul, e que, mesmo *antes* de que as caixas sejam abertas, elas escolhem *aleatoriamente* entre as duas cores e mostram a cor escolhida no momento em que a tampa se abre. E aqui é que vem a parte estranha. A carta diz que, embora as suas caixas funcionem exatamente do mesmo modo que as minhas, e embora as esferas, dentro delas, escolham *aleatoriamente* entre o vermelho e o azul, as nossas caixas trabalham em conjunto. A carta diz que existe uma conexão misteriosa, segundo a qual se eu abrir a minha caixa de número um e aparecer uma luz azul, você também vai ver uma luz azul quando abrir a sua; e se eu vir uma luz vermelha quando eu abrir a caixa número dois, você também vai ver uma luz vermelha quando abrir a sua segunda caixa, e assim por diante.”
“Mulder, estou exausta. Vamos deixar os joguinhos para lá porque eu preciso descansar um pouco.”
“Por favor, Scully. Sei que você está de férias, mas não posso ficar sem saber se é verdade. São só uns minutinhos.”
Scully, relutante, percebe que é pior resistir e decide abrir as caixas. Comparando as cores que aparecem dentro de cada uma delas, Scully e Mulder confirmam a previsão da carta. Às vezes o brilho da esfera é vermelho, às vezes é azul, mas quando abrem as caixas que têm o mesmo número, os dois sempre veem brilhar

a mesma cor. Mulder fica cada vez mais excitado e agitado, mas Scully continua absolutamente *blasée*.

“Mulder”, diz ela, com voz de tédio, ao telefone, “você *também* está precisando de férias. Que bobagem! É claro que as esferas foram programadas para brilhar vermelho ou para brilhar azul quando a tampa da caixa se abre. E quem mandou essa besteira para nós programou as caixas de maneira idêntica para que eu e você vejamos a mesma cor quando abrimos as caixas que têm o mesmo número.”

“Não é isso não, Scully. A carta diz que cada esfera extraterrestre escolhe *aleatoriamente* entre a luz azul e a vermelha quando a tampa se abre e *não* que cada esfera tenha sido programada para escolher esta ou aquela cor.”

“Mulder”, Scully suspira, “a minha explicação faz pleno sentido e condiz com todos os dados. Que mais você quer? Olhe bem, Mulder, no final da carta, na parte com as letrinhas pequenas. É uma piada. Aqui diz que, se além de abrir a tampa nós tentarmos mexer na esfera para ver como ela funciona — por exemplo, se examinarmos a composição da cor ou dos elementos químicos antes de abrir a tampa —, a luz vai brilhar. Quer dizer que não podemos analisar o tal mecanismo de seleção aleatória entre o azul e o vermelho, porque se fizermos isso a nossa tentativa vai contaminar o próprio experimento que estamos fazendo. É como se eu dissesse que sou loura, mas o meu cabelo ficasse ruivo se alguém ou alguma coisa for analisá-lo. Quem poderia provar que eu menti? Os seus extraterrestres são espertinhos: fizeram as coisas de um jeito que não podem ser desmascarados. Vá brincar com as suas caixinhas e me deixe descansar um pouco.”

Aparentemente, Scully tem toda razão e a ciência está ao seu lado. Mas aí é que está o problema. Nos últimos oitenta anos, a mecânica quântica — com cientistas humanos, e não extraterrestres — vem fazendo previsões a respeito do funcionamento do universo que se assemelham muito às que são descritas na carta. A questão é que agora já temos claras comprovações de que o ponto de vista semelhante ao de Mulder — e não ao de Scully — é o que confere com os dados. De acordo com a mecânica quântica, por exemplo, uma partícula pode ficar em estado indefinido, entre ter ou não ter determinada propriedade — como uma esfera “extraterrestre”, que varia entre mostrar uma luz vermelha ou azul até que seja aberta a tampa da caixa onde ela está —, de modo que apenas quando a partícula é observada (medida) ela assume, aleatoriamente, uma possibilidade ou a outra. Como se isso não bastasse, a mecânica quântica também prevê que entre as partículas pode haver conexões similares às que a carta diz existir entre as esferas. Duas partículas podem estar tão emaranhadas pelos efeitos quânticos que a escolha aleatória que fazem entre um estado ou outro está correlacionada.

Como vimos, cada esfera escolhe aleatoriamente entre o vermelho e o azul, e, de algum modo, as escolhas feitas pelas esferas cujas caixas têm o mesmo número estão correlacionadas (as duas mostram ou a luz vermelha ou a azul). Do mesmo modo, as propriedades escolhidas aleatoriamente por duas partículas, mesmo que elas estejam amplamente separadas no espaço, podem estar perfeitamente alinhadas. Em poucas palavras, ainda que as partículas estejam muito distantes uma da outra, a mecânica quântica revela que o que uma faz a outra também fará.

Vamos a um exemplo concreto: se você estiver usando óculos escuros, a mecânica quântica mostra que há uma probabilidade de 50% de que determinado fóton — que chegue até você depois de ricochetear na superfície de um lago, ou no asfalto da rua — atravesse a lente polarizada que reduz a luminosidade. Quando o fóton alcança a lente, ele "escolhe" aleatoriamente se vai ricochetear ou atravessar a lente. O surpreendente é que esse fóton pode ter um parceiro que viaja na direção oposta, a quilômetros de distância e que, se for confrontado com a mesma probabilidade de 50% de atravessar uma outra lente de óculos escuros ou ricochetear na sua superfície, fará, de algum modo, exatamente o que o primeiro fóton fez. *Embora cada um dos resultados seja determinado aleatoriamente, e embora os fótons estejam amplamente separados no espaço, se um fóton atravessar alente, o outro também o fará.* Esse é o tipo de não-localidade previsto pela mecânica quântica.

Einstein, que nunca foi um grande admirador da mecânica quântica, relutava em aceitar que o universo funcionasse de acordo com essas regras bizarras. Ele preferia explicações mais convencionais, que dispensassem a noção de que as partículas escolhem aleatoriamente os seus atributos, propriedades ou estados e os resultados obtidos quando são objeto de medições. Em vez disso, Einstein argumentava que o fato de que observemos que duas partículas separadas compartilham certos atributos não comprova a existência de alguma misteriosa conexão quântica que correlacione instantaneamente as suas propriedades. Assim como Scully pensou com relação às esferas, Einstein pensava que as partículas não escolhem aleatoriamente entre assumir uma característica ou outra, mas são, na verdade, "programadas" para apresentar uma característica particular e definida quando adequadamente medidas. A correlação entre os comportamentos de fótons amplamente separados, dizia Einstein, é prova de que os fótons têm propriedades idênticas desde quando são emitidos, e não de que estejam sujeitos a um bizarro emaranhamento quântico a longa distância.

Por quase cinquenta anos ficamos sem saber quem estava certo, se Einstein, ou se a mecânica quântica, porque, como veremos, o debate tornou-se muito similar ao de Scully e Mulder: qualquer tentativa de refutar as estranhas conexões

apontadas pela mecânica quântica e deixar intacto o ponto de vista mais convencional de Einstein esbarrava na percepção de que os próprios experimentos contaminariam necessariamente as propriedades a serem estudadas. Tudo isso mudou na década de 1960. Com notável criatividade, o físico irlandês John Bell demonstrou que o problema poderia ser resolvido experimentalmente, o que de fato aconteceu na década de 1980. A leitura mais direta dos dados é que Einstein estava errado e que existem conexões estranhas, bizarras e "fantasmagóricas" entre coisas que estão em lugares distintos.[5]
O raciocínio que apoia esta conclusão é tão sutil que os físicos levaram mais de trinta anos para desenvolvê-lo por completo. Mas depois de conhecermos os aspectos principais da mecânica quântica, veremos que a essência do argumento se reduz a nada menos do que um simples quebra-cabeça.

FAZENDO ONDA

Busque um negativo negro de 35 milímetros, remova, com uma agulha, a emulsão para formar duas linhas extremamente finas e próximas uma da outra, ilumine o negativo com um raio laser e você verá a prova concreta de que a luz é uma onda. Se você nunca fez ou viu esse experimento, vale a pena tentar. A imagem que você verá quando o laser passar pelas ranhuras do negativo e encontrar uma tela consiste em faixas claras e escuras, como na figura 4.1, e a explicação para esse padrão advém de uma característica básica das ondas. As ondas de água são as mais fáceis de visualizar. Vamos, portanto, explicar o ponto essencial valendo-nos das ondas de um lago plácido e grande, para depois aplicar o raciocínio à luz.

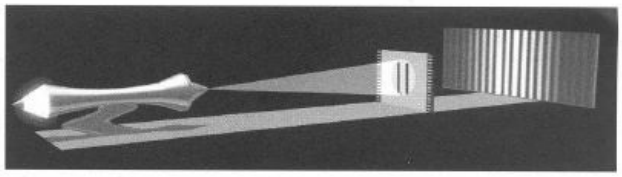
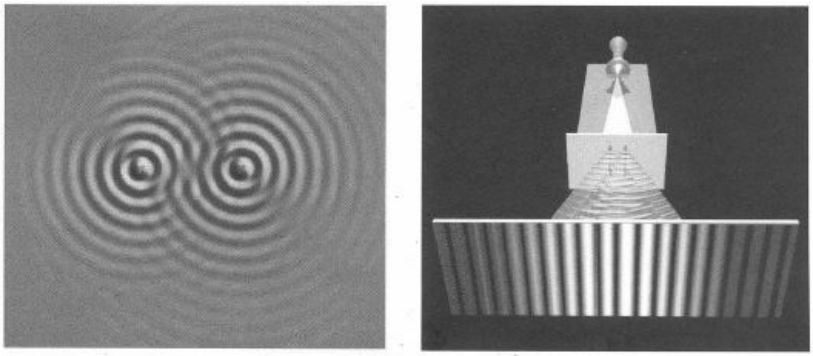


Figura 4.1. *A luz do laser passa através das duas fendas feitas na superfície de um negativo negro e produz um padrão de interferência na tela detectora, o que revela que a luz é uma onda.*

Uma onda de água afeta a superfície plana de um lago criando regiões em que o nível da água é mais alto do que o normal e outras em que ele é mais baixo do que o normal. A parte mais alta da onda denomina-se *crista* e a mais baixa, *vale.* Uma onda típica envolve uma sucessão periódica; uma crista se segue a um vale, que se segue a uma crista e assim por diante. Se duas ondas se dirigem uma à outra — se, por exemplo, eu e você jogarmos uma pedra cada um em lugares

próximos na superfície do lago, produzindo ondas que se expandem e se aproximam uma da outra —, quando elas se cruzam, acontece um importante efeito denominado *interferência*, ilustrado na figura 4.2a. Quando as cristas de duas ondas se cruzam, a altura da água é ainda maior, igual à soma da altura das duas cristas. Do mesmo modo, quando os vales de duas ondas se cruzam, a altura da água é ainda menor, igual à soma dos dois vales. E aqui está a combinação mais importante: quando a crista de uma onda se cruza com o vale de outra, eles tendem a cancelar-se, pois a crista trata de fazer a água subir e o vale de fazê-la baixar. Se a altura da crista de uma onda for igual à profundidade do vale da outra, haverá um cancelamento perfeito quando as ondas se cruzarem, de modo que a água nessa localização não se moverá.



(a) (b)

Figura 4.2. (*a*) *As ondas de água que se sobrepõem produzem um padrão de interferência.* (*b*) *As ondas de luz que se sobrepõem produzem um padrão de interferência.*

O mesmo princípio explica o padrão que a luz forma quando passa pelas duas ranhuras da figura 4.1. A luz é uma onda eletromagnética; ao passar pelas duas ranhuras, ela se divide em duas ondas que se dirigem à tela. Tal como as duas ondas de água que acabamos de discutir, as duas ondas de luz interferem uma com a outra. Ao incidir sobre diversos pontos da tela, por vezes ambas as ondas estão em suas cristas, o que faz a tela ficar clara; por vezes ambas as ondas estão em seus vales, o que também faz a tela ficar clara; e por vezes uma onda está na crista e a outra no vale e ambas se cancelam, o que faz com que aquele ponto da tela fique escuro. Isso está ilustrado na figura 4.2b.

Se fizermos uma análise matemática detalhada do movimento da onda, incluindo os casos de cancelamentos parciais nos vários estágios intermediários entre as cristas e os vales, verificaremos que os pontos claros e escuros compõem as faixas que aparecem na figura 4.1. As faixas claras e escuras são, portanto, um sinal de que a luz é uma onda, questão que motivou grandes debates desde que Newton afirmou que a luz não é uma onda, mas sim que é feita de um fluxo de partículas (logo voltaremos a isso). Além disso, essa análise se aplica igualmente

a *qualquer tipo* de onda (ondas de luz, de água, de som etc.) e, assim, os padrões de interferência proporcionam a metáfora que identifica as ondas: você sabe que se trata de uma onda se, quando ela for forçada a passar por duas ranhuras de tamanho apropriado (determinado pela distância entre as cristas e os vales da onda), o padrão de intensidade resultante for semelhante ao da figura 4.1 (onde as regiões claras representam altas intensidades e as regiões escuras representam baixas intensidades).

Em 1927, Clinton Davisson e Lester Germer dispararam um feixe de elétrons — entidades do tipo das partículas, sem nenhuma vinculação aparente com as ondas — contra uma peça de cristal de níquel. Os detalhes não nos interessam aqui, mas o que importa é que esse experimento equivale a disparar um feixe de elétrons contra uma barreira com duas ranhuras. Quando os pesquisadores fizeram com que os elétrons que passaram pelas ranhuras viajassem até uma tela de fósforo, onde o seu impacto ficava registrado por um ponto de luz (do mesmo tipo que compõe a imagem do seu televisor), o resultado foi incrível. Se você pensar nos elétrons como pequenas bolinhas, é natural esperar que as posições de impacto se alinhem com as duas ranhuras, como na figura 4.3a. Mas não foi isso o que Davisson e Germer encontraram. O experimento produziu os dados que estão esquematicamente representados na figura 4.3b: as posições de impacto dos elétrons conformaram um padrão de interferência que é característico das ondas. Davisson e Germer encontraram o sinal de identificação das ondas. *Eles demonstraram, inesperadamente, que o feixe de elétrons deve ser um tipo de onda.*

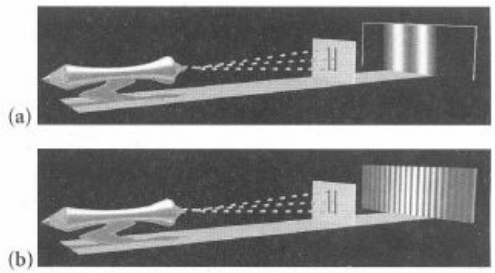


Figura 4.3. (*a*) *A física clássica prevê que os elétrons lançados contra uma barreira com duas fendas produzirão duas faixas brilhantes no detector.* (*b*) *A física quântica prevê, e os experimentos confirmam, que os elétrons produzirão um padrão de interferência que revela que eles possuem características ondulatórias.*

Você pode pensar que isso não chega a ser surpreendente. A água é feita de moléculas de H_2O e as ondas de água surgem quando muitas moléculas se movem em um padrão coordenado. Um grupo de moléculas de H_2O sobe em uma localização, enquanto outro grupo desce em uma outra localização próxima. Talvez os dados mostrados na figura 4.3 mostrem que os elétrons, assim como as

moléculas de **H_2O,** por vezes se movem harmoniosamente, criando um padrão de aparência ondulatória em seu movimento macroscópico global. À primeira vista, esta parece ser uma sugestão razoável, mas a história verdadeira é muito mais interessante.

Imaginemos primeiro que uma chuva de elétrons é continuamente disparada a partir do canhão de elétrons da figura 4.3. Mas é possível calibrar o canhão de maneira que ele dispare cada vez menos elétrons a cada segundo. Na verdade, podemos calibrá-lo de tal modo que ele dispare apenas um elétron a cada dez segundos. Munidos de suficiente paciência, podemos realizar o experimento por um longo período de tempo, de modo a registrar o impacto individual de cada elétron que passa através das ranhuras. As figuras 4.4a a 4.4c mostram o resultado cumulativo depois de uma hora, meio dia e um dia inteiro. Na década de 1920, imagens como estas abalaram profundamente os alicerces da física. *Vemos que mesmo os elétrons individuais que se movem de forma independente, separada, um a um, em direção à tela compõem o padrão de interferência característico das ondas.*

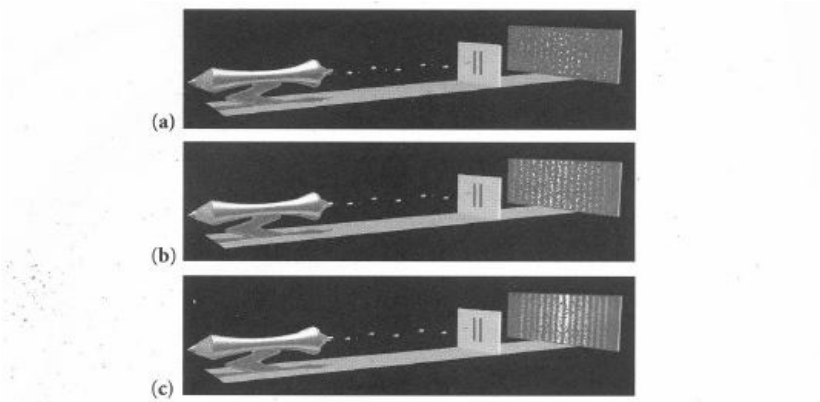


Figura 4.4. *Os elétrons lançados um a um contra as fendas compõem um padrão de interferência ponto por ponto. De (a) a (c) ilustramos como o padrão se forma ao longo do tempo.*

É como se as moléculas *individuais* de H_2O pudessem ainda incorporar características semelhantes às de uma onda de água. Como poderia ser isso? O movimento ondulatório parece ser uma propriedade coletiva que não tem sentido quando aplicada a componentes individualizados, como as partículas. Se cada espectador na arquibancada de um estádio se levantar individualmente e voltar a sentar-se, independentemente dos demais, o conjunto da torcida *não* formará uma onda. E mais ainda: a interferência das ondas parece requerer que uma onda que sai de *um lugar* se cruze com outra onda que sai de *outro lugar.* Como pode, então, a interferência aplicar-se a componentes individuais, separados e do tipo das partículas? Mas, de algum modo, como atestam os dados de interferência da

figura 4.4, ainda que os elétrons sejam partículas mínimas de matéria, cada um deles incorpora um caráter ondulatório.

AS PROBABILIDADES E AS LEIS DA FÍSICA

Se um elétron também é uma onda, o que é isso que está oscilando? Erwin Schrödinger deu o primeiro palpite: talvez o material de que são formados os elétrons esteja espalhado pelo espaço e seria essa difusa essência de elétrons o que oscila. Desse ponto de vista, a partícula do elétron seria uma ponta aguda sobressaindo de uma névoa eletrônica. Logo se viu, contudo, que essa sugestão não podia estar correta porque mesmo uma forma ondulatória fortemente aguda — como a onda gigantesca de uma tsunami — acaba por espalhar-se. E se a onda pontiaguda do elétron se espalhasse, seria de esperar que encontrássemos uma parte da carga elétrica de um elétron em um lugar ou uma parte da sua massa em outro, o que não acontece nunca. Quando se localiza um elétron, sempre se encontra toda a sua carga e toda a sua massa concentradas em uma única região, mínima como um ponto. Em 1927, Max Born propôs algo diferente, que acabou por tornar-se o passo decisivo que forçou a física a entrar em um mundo radicalmente novo. A onda, disse ele, não é um elétron espalhado nem nada que tenhamos encontrado antes na ciência. A onda, ele propôs, é uma *onda de probabilidade*.

Para compreender o que isso significa, imagine uma foto instantânea de uma onda de água que mostre regiões de alta intensidade (próximas às cristas e aos vales) e regiões de baixa intensidade (próximas às regiões planas, que fazem a transição entre as cristas e os vales). Quanto maior a intensidade, maior o potencial de força que a onda pode exercer sobre os navios e as estruturas navais. As ondas de probabilidade propostas por Born também têm regiões de intensidades alta e baixa, mas o significado que ele atribuiu a essas formas de ondas foi inesperado: *o tamanho de uma onda em dado ponto do espaço é proporcional à probabilidade de que o elétron esteja localizado nesse ponto do espaço.* Os lugares em que a onda de probabilidade é grande são as localizações em que é mais provável que o elétron esteja. Os lugares em que a onda de probabilidade é pequena são as localizações em que é pouco provável que o elétron esteja. E os lugares em que a onda de probabilidade é igual a zero são as localizações onde o elétron não será encontrado.

A figura 4.5 nos mostra um “instantâneo” de uma onda de probabilidade, em que se ressalta a interpretação probabilística de Born. Veja bem que, ao contrário das fotografias de ondas de água, esta imagem nunca poderia ser tomada por uma

câmera. Nunca ninguém viu diretamente uma onda de probabilidade, e o raciocínio convencional da mecânica quântica diz que nunca ninguém a verá. Usam-se, portanto, as equações matemáticas (desenvolvidas por Schrödinger, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Paul Dirac e outros) para calcular como seria uma onda de probabilidade em dada situação. A seguir, testam-se esses cálculos teóricos comparando-os com resultados experimentais, da seguinte maneira: depois de calcular a onda de probabilidade para o elétron em determinada experiência, fazem-se versões idênticas do experimento, muitas vezes registrando a cada vez, desde o começo, a medida da posição do elétron. *Ao contrário do que Newton poderia esperar*; *experimentos idênticos e idênticas condições iniciais não levam necessariamente a medições idênticas.* De fato, as medições apontam diversas localizações diferentes para o elétron. Às vezes o elétron está aqui, às vezes ali, muito de vez em quando *bem* mais para lá. Se a mecânica quântica estiver certa, o número de vezes que um elétron será encontrado em determinado ponto deve ser proporcional ao tamanho da onda de probabilidade calculada naquele ponto (na verdade, ao quadrado do tamanho). Oito décadas de experimentos revelaram que as previsões da mecânica quântica foram confirmadas com um nível de precisão espetacular.



Figura 4.5. *A onda de probabilidade de uma partícula, como um elétron, nos informa sobre as possibilidades de encontrarmos a partícula em uma ou outra localização.*

A figura 4.5 mostra apenas uma parte da onda de probabilidade de um elétron. De acordo com a mecânica quântica, cada onda de probabilidade se estende por todo o espaço e por todo o universo.[6] Em muitas circunstâncias, no entanto, a onda de probabilidade de uma partícula cai rapidamente a quase zero quando sai de uma pequena região, o que indica uma probabilidade esmagadora de que a partícula esteja dentro daquela região. Nesses casos, a parte da onda de probabilidade deixada fora da figura 4.5 (a parte que se estende por todo o resto do universo) assemelha-se muito às partes da figura que estão próximas aos limites: bastante planas e próximas do valor zero. Todavia, se a onda de probabilidade apresentar, em algum ponto da galáxia de Andrômeda, um valor

diferente de zero, por menor que ele seja, haverá sempre a possibilidade, mínima mas autêntica — diferente de zero —, de que o elétron esteja lá.

Desse modo, o êxito da mecânica quântica nos obriga a aceitar que o elétron, um componente da matéria que normalmente imaginamos ocupar uma área pontual e mínima do espaço, também tem uma descrição que envolve uma onda que, ao contrário, se espalha por todo o universo. Além disso, de acordo com a mecânica quântica, esta fusão partícula-onda aplica-se a todos os componentes da natureza, e não apenas aos elétrons: os prótons são tanto partículas quanto ondas; os nêutrons são tanto partículas quanto ondas; e experimentos feitos no início do século xx deixaram claro que mesmo a luz — que comprovadamente se comporta como onda, como se vê na figura 4.1 — também pode ser descrita em termos de partículas componentes, os pequenos "pontos de luz" denominados fótons e mencionados anteriormente.[7] As corriqueiras ondas eletromagnéticas emitidas por uma lâmpada de cem watts, por exemplo, podem ser descritas em termos de que a lâmpada emite cerca de 100 bilhões de bilhões de fótons por segundo. No mundo quântico aprende-se que tudo tem atributos de onda e de partícula.

Nos últimos oitenta anos, a utilidade e a ubiquidade das ondas de probabilidade da mecânica quântica para a previsão e a explicação de resultados experimentais foram comprovadas, acima de qualquer dúvida. Mas ainda não temos meios para estabelecer universalmente o que são, na verdade, as ondas de probabilidade quânticas. Ainda debatemos se a onda de probabilidade é o elétron, ou se ela é *associada ao* elétron, ou se é o *instrumento matemático* que descreve o movimento do elétron, ou se é *a incorporação do que podemos saber* sobre ele. O que é certo é que por meio das ondas de probabilidade a mecânica quântica introduz as probabilidades nas leis da física de uma maneira que ninguém antecipara. Os meteorologistas usam as probabilidades para prever as chances de chuva. Os cassinos as usam para prever as suas chances de que a banca venha a quebrar. Mas, nestes últimos exemplos, as probabilidades desempenham um papel decorrente do fato de que não dispomos do total das informações necessárias para fazer previsões definitivas. De acordo com Newton, se conhecêssemos o estado do ambiente em todos os detalhes (as posições e as velocidades de todas as partículas que o compõem), seríamos capazes de prever com certeza (se tivéssemos a capacidade de cálculo suficiente) se choverá amanhã às 16h07; se conhecêssemos todos os detalhes relevantes com relação a um jogo de dados (a forma precisa e a composição dos dados, a sua velocidade e orientação ao sair da mão do jogador, a composição da mesa e da sua superfície, e assim por diante), seríamos capazes de prever com certeza os números que sairiam. Como, na prática, não logramos reunir todas essas informações (e, ainda

que o lográssemos, não temos computadores com capacidade suficiente para realizar os cálculos requeridos para fazer tais previsões), reduzimos as expectativas e prevemos apenas as probabilidades de determinados resultados, seja na previsão do tempo, seja no cassino, e fazemos estimativas razoáveis a respeito dos dados de que não dispomos.

As probabilidades introduzidas pela mecânica quântica têm um caráter diferente e mais fundamental. Qualquer que seja o grau de aperfeiçoamento que alcancemos na coleta dos dados ou na capacidade de computação, o máximo que podemos alcançar, em todas as circunstâncias, de acordo com a mecânica quântica, é prever a probabilidade deste ou daquele resultado. O máximo a que podemos aspirar é prever a probabilidade de que um elétron, ou um fóton, ou um nêutron, ou qualquer outro componente da natureza seja encontrado neste ou naquele lugar. A probabilidade é a rainha absoluta do microcosmo.

Por exemplo: a explicação dada pela mecânica quântica para a composição progressiva do padrão de faixas claras e escuras feito pelos elétrons individuais, um por um, como aparece na figura 4.4, já está clara. Cada elétron é descrito como uma onda de probabilidade. Quando o elétron é disparado, a sua onda de probabilidade passa pelas duas ranhuras. E, assim como acontece com as ondas de luz e as de água, as ondas de probabilidade que emanam das ranhuras interferem entre si. Em alguns pontos da tela de detecção as duas ondas de probabilidade se reforçam e a intensidade resultante é alta. Em outros pontos, as ondas cancelam-se parcialmente e a intensidade é baixa. Em outros pontos ainda, as cristas e os vales das ondas de probabilidade se cancelam completamente e a intensidade resultante da onda é exatamente igual a zero. Assim, há pontos da tela em que é muito provável que um elétron aterrisse, pontos em que isso é muito menos provável e pontos em que não há nenhuma chance de que isso ocorra. Com o tempo acumulado, as posições de aterrissagem dos elétrons distribuem-se de acordo com esse perfil de probabilidades, razão por que obtemos algumas áreas claras, algumas com intensidades intermediárias e outras completamente escuras na tela. A análise detalhada revela que essas áreas claras e escuras terão exatamente a aparência que apresentam na figura 4.4.

EINSTEIN E A MECÂNICA QUÂNTICA

Graças à sua natureza intrinsecamente probabilística, a mecânica quântica difere essencialmente de qualquer descrição básica do universo feita anteriormente, tanto em termos qualitativos quanto quantitativos. Desde que ela foi apresentada no século passado, os físicos vêm lutando para unir este arcabouço inesperado e estranho com a nossa visão de mundo. A luta continua. O problema está em

compatibilizar a experiência macroscópica cotidiana com a realidade microscópica revelada pela mecânica quântica. Acostumamo-nos a viver em um mundo em que se, por um lado, nos submetemos às incertezas da política e da economia, por outro lado, confiamos na estabilidade das suas propriedades físicas. Não nos preocupamos com que os componentes atômicos do ar que respiramos desapareçam repentinamente, deixando-nos em estado de sufocamento, para manifestar o seu caráter ondulatório e quântico, rematerializando-se do outro lado da Lua. E estamos certos em não nos preocuparmos com essas hipóteses porque, de acordo com a mecânica quântica, a probabilidade de que isso aconteça, embora não seja zero, é absurdamente pequena. Mas o que é que a faz ser tão pequena?

De maneira geral, há duas razões. Em primeiro lugar, na escala dos átomos, a Lua está a uma distância enorme. E, como mencionado, em muitas circunstâncias (embora, com certeza, não em todas), as equações quânticas mostram que as ondas de probabilidade têm, tipicamente, valores apreciáveis apenas em uma pequena região do espaço, valores que caem rapidamente a quase zero à medida que se afastam dessa região (como na figura 4.5). Assim, a probabilidade de que mesmo um único elétron que você acredita estar na mesma sala em que você está — como um desses que acaba de sair com a sua respiração — venha a ser encontrado, em apenas mais um momento, no outro lado da Lua, conquanto não seja igual a zero, é extremamente pequena. Tão pequena que, em comparação, a probabilidade de que você venha a casar-se com Nicole Kidman ou Antônio Banderas torna-se enorme. Em segundo lugar, existe uma *grande* quantidade de elétrons, assim como de prótons e nêutrons, no ar da sua sala. A probabilidade de que *todas* essas partículas façam o que já é extremamente improvável mesmo para uma só é tão pequena que não chega a merecer que nos ocupemos dela: seria como casar com a sua estrela de cinema, com palpitações no coração, e em seguida ganhar todas as loterias todas as semanas durante um período de tempo que faria a história do universo parecer um piscar de olhos.

Isso pode dar-lhe uma ideia do porquê de não nos defrontarmos diretamente com os aspectos probabilísticos da mecânica quântica na nossa vida diária. Mas como os experimentos confirmam que a mecânica quântica descreve adequadamente a física fundamental, ela representa um golpe mortal na crença básica a respeito do que constitui a realidade. Einstein, em particular, ficou profundamente perturbado com o caráter probabilístico da teoria quântica. Ele insistia sem cessar em que a função da física é determinar com certeza o que aconteceu, o que acontece e o que acontecerá no mundo à nossa volta. Os físicos não são estatísticos, e a função da física não é calcular cotações de apostas. Mas Einstein não podia negar que a mecânica quântica tinha enorme êxito em explicar e

prever, ainda que por meio de um esquema estatístico, as observações experimentais do microcosmo. Portanto, em vez de tratar de mostrar que a mecânica quântica estava errada, tarefa que só um tolo se dedicaria a perseguir, tendo em vista os seus êxitos sem precedentes, Einstein dispendeu grande esforço tentando demonstrar que a mecânica quântica não tinha a palavra final a respeito da maneira como o universo funciona. Embora não dissesse qual seria ela, Einstein buscou convencer a todos de que tinha de haver uma descrição mais profunda e menos esdrúxula do universo, a qual ainda está por ser encontrada.

Ao cabo de muitos anos, Einstein montou toda uma série de desafios cada vez mais sofisticados com o fim de revelar falhas na estrutura da mecânica quântica. Um deles, apresentado em 1927 na Quinta Conferência de Física do Instituto Solvay,[8] refere-se ao fato de que, ainda que a onda de probabilidade de um elétron possa parecer como a da figura 4.5, sempre que medimos o paradeiro do elétron nós o encontramos em algum lugar definido. Desse modo, Einstein perguntou, será que isso não significa que a onda de probabilidade é simplesmente um sucedâneo temporário para uma descrição mais precisa — que ainda estaria por ser descoberta — capaz de prever a posição do elétron com certeza? Afinal, se o elétron é encontrado *em* X, será que isso não significa que, na realidade, ele estava em X ou *muito próximo a* X no momento exatamente anterior ao da medição? E se for assim, ponderava ele, a dependência da mecânica quântica com relação às ondas de probabilidade — ondas que, neste exemplo, dizem que existe alguma probabilidade de que o elétron esteja longe de X — não estaria refletindo apenas uma maneira inadequada de descrever a verdadeira realidade subjacente?

O ponto de vista de Einstein é simples e convincente. Que pode ser mais natural do que esperar que uma partícula esteja localizada no lugar onde foi encontrada um momento antes ou bem próxima a ele? Se esse é o caso, o entendimento mais profundo da física deveria propiciar essa informação e dispensar o esquema menos preciso das probabilidades. Mas o físico dinamarquês Niels Bohr e os seus seguidores que defendem a mecânica quântica não estavam de acordo. Esse raciocínio, segundo eles, baseia-se no pensamento convencional, de acordo com o qual cada elétron segue uma trajetória única e definida em seus caminhos pelo mundo. E esse pensamento é fortemente contestado pela figura 4.4, uma vez que, se todos os elétrons seguissem trajetórias únicas e definidas — semelhantes à imagem clássica de uma bala atirada por uma arma —, seria extremamente difícil explicar o padrão de interferência observado: o que estaria interferindo com o que mais? As balas comuns, atiradas uma a uma por uma arma, certamente não podem interferir umas com as outras, de maneira que se os

elétrons viajassem como as balas, como poderíamos explicar o padrão da figura 4.4?

Em vez disso, de acordo com Bohr e com a interpretação de Copenhague para a mecânica quântica, que ele defendia ardorosamente, *antes de medirmos a posição de um elétron, não há sequer sentido em perguntar onde ele está.* Ele não tem uma posição definida. A onda de probabilidade expõe as probabilidades de que o elétron, quando examinado adequadamente, seja encontrado neste ou naquele lugar, e isso é o *máximo* que se pode dizer a respeito da sua posição. E ponto final. O elétron só tem uma posição definida, no sentido usual e intuitivo, no momento em que o "olhamos" — no momento em que medimos a sua posição —, identificando com certeza a sua localização. Mas antes (e depois) de que o façamos, ele só tem posições potenciais, descritas por uma onda de probabilidade que, como toda onda, está sujeita aos efeitos de interferência. Não se trata de que o elétron tenha uma posição e de que nós não a conheçamos antes de medi-la. Ao contrário do que se poderia esperar, o elétron simplesmente *não tem* posição definida antes de a medição ser tomada.

Esta é uma realidade radicalmente estranha. Sendo assim, ao medirmos a posição do elétron, não estamos medindo um dado objetivo e preexistente da realidade. Em vez disso, o ato de medir está profundamente envolvido com a criação da própria realidade que está sendo medida. Trazendo o tema da escala dos elétrons para a da vida diária, Einstein ironizou: "Você acha mesmo que a Lua não está no céu a menos que a gente olhe para ela?". Os defensores da mecânica quântica responderam dizendo que, se ninguém estiver olhando para a Lua — "medindo a sua localização com o ato de olhar" —, não temos como saber se ela está no lugar esperado e, portanto, a pergunta não faz sentido. Para Einstein isso era profundamente insatisfatório, pois entrava em intenso conflito com a sua concepção de realidade. Ele acreditava firmemente que a Lua está no seu lugar, independente de que alguém a olhe. Mas os baluartes da mecânica quântica permaneciam resistentes.

O segundo desafio de Einstein, que surgiu na conferência de Solvay de 1930, seguiu de perto o primeiro. Ele descreveu um instrumento hipotético, que (por meio da astuta combinação de uma balança, um relógio e um disparador de máquina fotográfica) parecia deixar claro que uma partícula como um elétron tem de ter, *necessariamente*, aspectos definidos — antes de ser medida ou examinada — os quais, segundo a mecânica quântica, ela não poderia ter. Os detalhes não são relevantes aqui, mas a resolução é particularmente irônica. Quando Bohr tomou conhecimento do desafio de Einstein, ficou perplexo. A princípio não logrou descobrir nenhuma falha no seu raciocínio. Mas em poucos

dias recuperou-se e refutou plenamente a afirmação do grande cientista. O surpreendente é que a chave da resposta de Bohr estava na relatividade geral. O físico dinamarquês percebeu que Einstein não levara em conta a sua própria descoberta de que a gravidade encurva o tempo — de que o ritmo em que um relógio marca o tempo depende do campo gravitacional a que ele está exposto. Com a introdução desse elemento, Einstein viu-se forçado a admitir que as suas conclusões se alinhavam perfeitamente com a teoria quântica ortodoxa.

Mesmo com a derrota das suas objeções, Einstein permaneceu profundamente desconfiado com relação à mecânica quântica. Durante os anos seguintes, ele manteve Bohr e os seus colegas em alerta permanente, fazendo-lhes novos desafios, um após o outro. O ataque mais forte e audaz concentrou-se sobre o que ficou conhecido como o *princípio da incerteza*, que é uma consequência direta da mecânica quântica, enunciado em 1927 por Werner Heisenberg.

HEISENBERG E A INCERTEZA

O princípio da incerteza proporciona uma medida quantitativa acurada da profundidade do envolvimento das probabilidades no tecido de um universo quântico. Para compreender este ponto, pensemos em um restaurante chinês que oferece os seus pratos em um menu de preços preestabelecidos, que tem duas colunas, A e B, de modo que se você escolher a entrada na coluna A, não pode fazê-lo na coluna B, o mesmo acontecendo com o prato principal, a sobremesa etc. O restaurante estabelece, assim, um dualismo, uma complementaridade culinária (que o impede, por exemplo, de acumular os pratos mais caros): ou você come pato à pequinesa, ou lagosta à cantonesa, mas não os dois.

O princípio da incerteza de Heisenberg é similar. Ele diz, em termos gerais, que os aspectos físicos do reino microscópico (as posições das partículas, suas velocidades, energias, momentos angulares etc.) podem dividir-se em duas listas, A e B. Heisenberg descobriu que o conhecimento que você tenha de um dos aspectos da lista A compromete fundamentalmente a sua capacidade de conhecer o aspecto correspondente na lista B. Se você conhecer, por exemplo, a primeira ou a segunda característica da lista A, a sua capacidade de conhecer a primeira ou a segunda característica da lista B estará fundamentalmente comprometida. E assim por diante. Na verdade, você pode pedir uma combinação de pato com lagosta no mesmo prato, mas só se o preço total ficar dentro do limite preestabelecido no menu: se vier com mais pato, virá com menos lagosta, e vice-versa. Do mesmo modo, na mecânica quântica, quanto mais exato for o conhecimento que você tem de um aspecto que está em uma das listas, mais impreciso será o conhecimento que você pode ter a respeito do aspecto

correspondente que está na outra lista. Essa impossibilidade essencial de determinar simultaneamente todos os aspectos de ambas as listas — determinar com certeza todas essas características do reino microscópico — constitui a incerteza revelada pelo princípio da incerteza.

Por exemplo, quanto maior for a certeza com que você sabe onde uma partícula está, maior será a incerteza quanto à sua velocidade. Reciprocamente, quanto maior for a certeza com que você conhece a velocidade com que uma partícula está se movendo, menor será a sua possibilidade de saber onde ela está. A teoria quântica estabelece, assim, a sua própria dualidade: você pode determinar com precisão certos aspectos físicos do reino microscópico, mas, ao fazê-lo, elimina a possibilidade de determinar com precisão outros aspectos complementares.

Para explicar o porquê disso, sigamos uma aproximação descritiva desenvolvida pelo próprio Heisenberg. Ainda que incompleta, em certos pontos que discutiremos, ela nos propicia uma útil visão intuitiva. Quando medimos a posição de um objeto qualquer, em geral interagimos com ele de alguma maneira. Quando buscamos o interruptor de luz em um quarto escuro, sabemos que o encontramos quando o tocamos. Quando um morcego busca uma presa, ele dirige o seu sonar ao alvo e interpreta a onda refletida. A maneira mais comum de todas é a de localizar alguma coisa vendo-a — recebendo a luz que, uma vez refletida pelo objeto, alcança os nossos olhos. O que é importante observar aqui é que estas interações não só nos afetam, mas também afetam o objeto cuja posição está sendo determinada. Mesmo a luz, quando ricocheteia em um objeto, dá-lhe um pequeno empurrão. Quando se trata de objetos cotidianos, como o livro que você está lendo ou o relógio da parede, esse empurrãozinho dado pela luz não exerce nenhum efeito que se possa notar. Mas quando ele atinge uma partícula como um elétron, pode produzir um grande efeito: quando a luz ricocheteia em um elétron, ela modifica a velocidade dele, do mesmo modo como uma forte rajada de vento pode modificar a velocidade com que você anda. Com efeito, quanto maior for a precisão com que você queira identificar a posição de um elétron, maiores terão de ser a intensidade energética e a concentração do raio de luz que o atingirá, o que produzirá um efeito ainda maior sobre o movimento do elétron.

Isso significa que, se você medir a posição de um elétron com alta precisão, necessariamente contaminará o seu experimento: esse ato de medição precisa afetará a velocidade do elétron. Você pode, portanto, saber exatamente onde o elétron está, mas não poderá saber com precisão com que velocidade ele está se movendo naquele momento. Inversamente, você pode medir com precisão a velocidade de um elétron, mas, ao fazê-lo, contaminará a sua capacidade de determinar de forma precisa a sua posição. A natureza tem um limite implícito

para a precisão com que esses aspectos complementares podem ser determinados. E embora estejamos nos referindo aos elétrons, o princípio da incerteza é absolutamente geral: aplica-se a tudo.

Na nossa vida diária, falamos com total tranquilidade que um automóvel passou por um cruzamento (posição) a setenta quilômetros por hora (velocidade), especificando perfeitamente esses dois aspectos físicos. Na verdade, a mecânica quântica diz que essa afirmação não tem significado preciso, uma vez que nunca se pode medir simultaneamente uma posição definida e uma velocidade definida. A razão pela qual conseguimos conviver facilmente com essas descrições incorretas do mundo físico está em que, nas escalas cotidianas, o grau de incerteza envolvido é mínimo e em geral passa despercebido. O princípio de Heisenberg não só declara a incerteza, mas também especifica — com segurança absoluta — o *grau* mínimo de incerteza em cada situação. Se aplicarmos a sua fórmula à velocidade do carro que passa pelo cruzamento a setenta quilômetros por hora e cuja posição é conhecida com a precisão de um centímetro, a incerteza quanto à velocidade será um pouco menor do que um bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de um quilômetro por hora. Um guarda de trânsito estaria sendo inteiramente fiel às leis da física quântica se anotasse que o carro passou pelo cruzamento a uma velocidade compreendida entre 69,999999999999999999999999999999999 e 70,000000000000000000000000000000001 quilômetros por hora. Mas se, em vez de um automóvel, estivéssemos falando de um elétron cuja posição fosse conhecida com a precisão de um bilionésimo de metro, a incerteza quanto à sua velocidade estaria na faixa de 100 mil quilômetros por hora. A incerteza está sempre presente, mas se torna significativa apenas nas escalas microscópicas.

A explicação da incerteza como consequência dos distúrbios inevitáveis causados pelo processo de medição proporcionou aos físicos um útil guia intuitivo, assim como um poderoso esquema explicativo para determinadas situações. Mas ela também pode ser enganadora. Pode dar a impressão de que a incerteza surge apenas quando nós, cientistas desajeitados, nos metemos a examinar o microcosmo. Isso não é verdade. A incerteza faz parte da estrutura ondulatória da mecânica quântica e existe ainda que não façamos nenhuma medição. Veja, por exemplo, uma onda de probabilidade particularmente simples para uma partícula, análoga a uma onda de água que desliza suavemente pelo mar, como mostra a figura 4.6. Como todas as cristas se movem uniformemente para a direita, poder-se-ia supor que essa onda descreve uma partícula que se move com a mesma velocidade das suas cristas. Os experimentos confirmam essa suposição. Mas onde está a partícula? Como a onda está distribuída uniformemente por todo o espaço, não há como afirmar que o elétron esteja *em*

um ou em outro lugar. Quando o medimos, ele pode, literalmente, estar em qualquer parte. Portanto, se por um lado sabemos exatamente com que velocidade a partícula se move, existe uma enorme incerteza a respeito da sua posição. E, como se vê, essa conclusão não depende de afetarmos a partícula. Na verdade, nunca chegamos a tocá-la. Ao contrário, a conclusão decorre de uma característica básica das ondas: elas espalham-se.

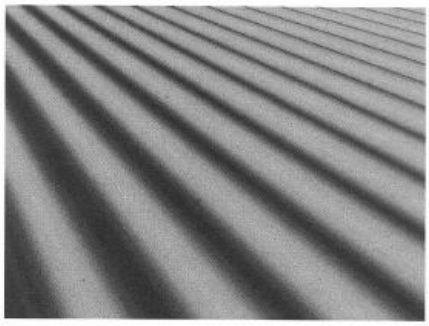


Figura 4.6. *Uma onda de probabilidade com uma sucessão uniforme de cristas e vales representa uma partícula com velocidade e direção definidas. Mas, como as cristas e vales distribuem-se de maneira uniforme no espaço, a posição da partícula fica completamente indeterminada. A probabilidade de que ela esteja em um lugar é a mesma que para qualquer outro lugar.*

Embora os detalhes sejam mais complicados, raciocínios semelhantes a este aplicam-se a todos os outros tipos de ondas, de modo que a lição geral é clara. Na mecânica quântica, a incerteza está sempre presente. Ela simplesmente existe.

EINSTEIN, A INCERTEZA E A QUESTÃO DA REALIDADE

Uma questão importante que já pode ter lhe ocorrido é a de saber se o princípio da incerteza é uma afirmação sobre o que podemos conhecer a respeito da realidade ou sobre a própria realidade. Será que os objetos que compõem o universo — uma pedra que atiramos, um homem exercitando-se na esteira, um girassol acompanhando o caminho da nossa estrela através do céu
— realmente têm uma posição e uma velocidade específicas, como nos indica a nossa imagem clássica a propósito de praticamente tudo, ainda que a incerteza quântica nos diga que essas características da realidade estarão sempre além da nossa capacidade de conhecer os dois elementos simultaneamente? Ou a incerteza quântica quebra por completo o modelo clássico e nos diz que a lista de atributos que a nossa intuição confere à realidade — lista que começa com as posições e as velocidades dos componentes do mundo — é falsa? Será que a

incerteza quântica nos diz mesmo que, a qualquer momento dado, as partículas simplesmente não têm uma posição e uma velocidade definidas?

Para Bohr, essa situação era comparável a um koan zen. A física só se ocupa das coisas que podemos medir. Do ponto de vista da física, isso é a realidade. Tentar utilizar a física para analisar uma realidade "mais profunda", que esteja além do que podemos conhecer por meio de medições, é como pedir que se analise o som de uma só mão batendo palmas. Mas em 1935, Einstein, juntamente com dois colegas, Boris Podolsky e Nathan Rosen, levantou o debate de maneira tão astuta e audaciosa que o que começara como o som das palmas de uma só mão reverberou por cinquenta anos, como um grande trovão que anunciava outra tempestade sobre a nossa compreensão da realidade, em uma intensidade bem maior do que a imaginada pelo próprio Einstein.

A intenção do artigo de Einstein-Podolsky-Rosen era mostrar que a mecânica quântica, apesar do seu inegável êxito em prever e explicar os dados, não poderia ser a palavra final na física do microcosmo. A sua estratégia era simples e baseava-se nas questões recém-levantadas aqui. Eles queriam demonstrar que toda partícula tem uma posição e uma velocidade definidas em qualquer instante do tempo, e queriam assim concluir que o que o princípio da incerteza revela é uma limitação fundamental do enfoque da mecânica quântica. Se todas as partículas têm uma posição e uma velocidade, mas a mecânica quântica não consegue operar com esses aspectos da realidade, é porque ela só proporciona uma descrição parcial do universo. A mecânica quântica seria, segundo eles, uma teoria incompleta da realidade física e, talvez, apenas um ponto de apoio na construção de um esquema mais profundo, ainda por ser descoberto. Na verdade, como veremos, eles criaram as bases para demonstrar algo ainda mais insólito: a não-localidade do mundo quântico.

Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) inspiraram-se em parte na explicação geral dada por Heisenberg para o princípio da incerteza: ao determinarmos, ou medirmos, o lugar em que algo se encontra, necessariamente perturbamos o objeto e contaminamos qualquer tentativa de determinar simultaneamente a sua velocidade. Embora a incerteza quântica seja, como já vimos, mais geral do que a explicação da "perturbação" indica, Einstein, Podolsky e Rosen inventaram o que parecia ser uma maneira inteligente e convincente de contornar *qualquer* fonte de incerteza. Eles perguntaram: e se efetuássemos uma medição indireta da posição e da velocidade de uma partícula de uma maneira que nunca nos colocasse em contato com a própria partícula? Para usar uma analogia clássica, imaginemos que Rod e Todd Flanders decidem dar uma caminhada solitária pelo recém-formado deserto nuclear de Springfield. Eles começam, um de costas para o outro, e resolvem andar em linha reta, em direções opostas, os dois na mesma

velocidade. Imagine também que, nove horas depois, o pai deles, Ned, de volta de uma escalada na montanha, avista Rod, corre até ele e pede desesperadamente notícias de Todd. A essa altura, Todd está muito longe, mas pela observação de Rod e pelas perguntas feitas a ele, Ned pode saber muitas coisas sobre Todd. Se Todd está exatamente 54 quilômetros a leste do ponto de partida, Todd deve estar exatamente 54 quilômetros a oeste desse mesmo ponto. Se Rod está andando a exatamente seis quilômetros por hora no rumo leste, Todd tem de estar andando a seis quilômetros por hora no rumo oeste. Portanto, ainda que Todd esteja a 108 quilômetros de distância, Ned pode determinar a sua posição e a sua velocidade de maneira indireta.

Einstein e os seus colegas aplicaram uma estratégia similar ao domínio quântico. Existem processos físicos bem conhecidos por meio dos quais duas partículas surgem de uma mesma localização com propriedades que se relacionam de modo similar ao que acontece com o deslocamento de Rod e Todd. Por exemplo, se uma partícula se desintegra em duas, de massa igual, que passam a viajar em direções opostas (como uma explosão que arremessa estilhaços em direções opostas), o que é uma experiência comum no domínio das partículas subatômicas, as velocidades dos dois componentes serão iguais e opostas. Além disso, as posições das novas partículas estarão intimamente associadas e, para simplificar, pode-se dizer que as partículas estarão sempre equidistantes da sua origem comum.

Uma diferença importante entre o exemplo clássico referente a Rod e Todd e a descrição quântica das duas partículas é que, embora se possa dizer com certeza que existe uma relação definida entre as velocidades e as direções do movimento das duas partículas — se se determinar que uma delas está se movendo para a esquerda a certa velocidade, então a outra estará necessariamente movendo-se para a direita a essa mesma velocidade —, não se pode prever o valor numérico da velocidade com que elas se deslocam. Ao contrário, o máximo que podemos fazer é empregar as leis da física quântica para prever a probabilidade de que elas atinjam qualquer velocidade particular. Da mesma maneira, embora se possa dizer com certeza que existe uma relação definida entre as posições das partículas — se se determinar que uma delas está em certa localização, então a outra estará necessariamente à mesma distância do ponto de origem, mas na direção oposta —, não se pode prever com certeza a localização real de nenhuma das duas partículas. Ao contrário, o máximo que podemos fazer é prever a probabilidade de que uma das partículas esteja em certa localização. Assim, embora a mecânica quântica não nos propicie respostas definidas a respeito das velocidades ou das posições das partículas, em determinadas situações ela nos

proporciona informações definitivas a respeito das relações entre as velocidades e as posições das partículas.

Einstein, Podolsky e Rosen buscaram explorar essas relações para mostrar que ambas as partículas têm, na verdade, posições e velocidades definidas em qualquer instante. Veja por quê: imagine que tenhamos medido a posição da partícula que se move para a direita e, por esse meio, tenhamos determinado indiretamente a posição da partícula que se move para a esquerda. Einstein, Podolsky e Rosen argumentaram que, como não se fez nada, absolutamente nada, com a partícula que se move para a esquerda, ela *tem de ter estado* necessariamente nessa posição, acrescentando que a única coisa que se fez foi determiná-la, ainda que de maneira indireta. A seguir assinalaram que poderíamos ter escolhido medir a velocidade da partícula que se move para a direita. Nesse caso, teríamos determinado indiretamente a velocidade da partícula que se move para a esquerda sem perturbá-la. Eles argumentaram que, como não se fez nada, absolutamente nada, com a partícula que se move para a esquerda, ela *tem de ter tido* necessariamente essa velocidade, acrescentando que a única coisa que se fez foi determiná-la. Colocando as duas medições em conjunto — a que foi feita e a que *poderia* ter sido feita —, Einstein, Podolsky e Rosen concluíram que a partícula que se move para a esquerda tem posição e velocidade definidas em qualquer momento determinado.

Vamos repetir, porque isso é sutil e crucial. Einstein, Podolsky e Rosen afirmam que, no ato de medir a partícula que se move para a direita, nada pode ter afetado a partícula que se move para a esquerda, porque elas são entidades separadas e distantes. A partícula que se move para a esquerda ignora completamente o que se fez, ou poderia fazer-se, com a partícula que se move para a direita. As partículas podem estar a metros, quilômetros ou anos-luz de distância uma da outra quando medimos a partícula que se move para a direita, de maneira que, em síntese, a partícula que se move para a esquerda não é de modo algum afetada pelos nossos atos. Assim, qualquer dado que se conheça, ou se possa, em princípio, conhecer a respeito da partícula que se move para a esquerda a partir do estudo feito sobre aquela que se move para a direita tem de ser um aspecto *real e definitivo* da partícula que se move para a esquerda, e totalmente independente das medições feitas. E se tivéssemos medido a posição da partícula que se move para a direita teríamos conhecido a posição da partícula que se move para a esquerda; e se tivéssemos medido a velocidade da partícula que se move para a direita teríamos conhecido a velocidade da partícula que se move para a esquerda; então, esta partícula tem de ter tanto posição quanto velocidade definidas. Evidentemente, essa discussão pode reproduzir-se intercambiando-se

os papéis das duas partículas (e, na verdade, antes de que se façam as medições não é possível sequer dizer qual partícula está se movendo para a esquerda e qual está se movendo para a direita). Isso leva à conclusão de que ambas as partículas têm posição e velocidade definidas.

Assim, Einstein, Podolsky e Rosen concluíram que a mecânica quântica é uma descrição incompleta da realidade. As partículas têm posições e velocidades definidas, mas o princípio da incerteza da mecânica quântica mostra que esses aspectos da realidade estão além dos limites do que a teoria é capaz de alcançar. Se você, em concordância com estes e com a maioria dos demais físicos, acredita que uma teoria completa da natureza deve descrever todos os atributos da realidade, a impossibilidade que a mecânica quântica tem para descrever simultaneamente as posições e as velocidades das partículas significa que alguns desses atributos ficam fora do seu alcance, o que mostra que ela não é uma teoria completa; que ela não é a palavra final. Isso é o que Einstein, Podolsky e Rosen afirmaram com convicção.

A RESPOSTA QUÂNTICA

Einstein, Podolsky e Rosen concluíram que toda partícula tem posição e velocidade definidas a cada momento dado, mas se você acompanhar bem os seus procedimentos verificará que eles não chegam a comprovar efetivamente essa afirmação. Dissemos acima que poderíamos ter escolhido medir a velocidade da partícula que se move para a direita. Se isso tivesse sido feito, a posição da partícula teria sido afetada; por outro lado, se tivéssemos escolhido medir a sua posição, a sua velocidade teria sido afetada. Se não dispomos desses dados sobre a partícula que se move para a direita, tampouco dispomos deles sobre a outra partícula. Portanto, *não há conflito com o princípio da incerteza:* Einstein e os seus colaboradores reconheceram plenamente que não podiam identificar ao mesmo tempo a posição e a velocidade de nenhuma partícula específica. Mas eis a chave: mesmo sem determinar nem a posição nem a velocidade de nenhuma das duas partículas, o raciocínio de Einstein, Podolsky e Rosen mostra que elas *têm* posição e velocidade definidas. Para eles, esta é uma questão de realidade. Para eles, uma teoria não pode proclamar-se completa se houver elementos da realidade que ela não pode descrever.

Depois de certo frenesi em consequência dessa observação inesperada, os defensores da mecânica quântica voltaram ao seu enfoque pragmático de sempre, o qual foi bem resumido pelo eminente físico Wolfgang Pauli: “O problema de saber se algo sobre o que nada sabemos existe na verdade merece o mesmo esforço mental que dedicaríamos hoje à antiga questão de saber quantos

anjos podem sentar-se na ponta de uma agulha”.[9] A física em geral e a mecânica quântica em particular só podem ocupar-se das propriedades mensuráveis do universo. Todas as outras coisas estão simplesmente fora do domínio da física. Se não se pode medir nem a posição nem a velocidade de uma partícula, a questão de saber se ela tem efetivamente posição e velocidade definidas não faz sentido.

Einstein, Podolsky e Rosen não estavam de acordo. Eles continuavam afirmando que a realidade não se limita à leitura dos detectores porque é maior do que a soma total das observações feitas em determinado momento. Quando não havia ninguém, absolutamente ninguém, nenhum aparelho, equipamento ou qualquer outra coisa para “observar” a Lua, acreditavam eles, a Lua já estava no seu lugar. De acordo com o seu ponto de vista, ela já fazia parte da realidade.

Em certo sentido, esse debate se assemelha ao que ocorreu entre Newton e Leibniz a respeito da realidade do espaço. Algo que não podemos tocar, nem ver, nem medir de algum modo pode ser considerado real? No capítulo 2, descrevi como Newton modificou o caráter do debate sobre o espaço, quando sugeriu, de maneira repentina, com o seu balde, que uma influência do espaço podia ser observada diretamente na concavidade da superfície da água que gira. Em 1964, com um único golpe, considerado por um comentarista como “a descoberta mais profunda da ciência”,[10] o físico irlandês John Bell fez o mesmo com relação ao debate sobre a realidade quântica.

Nas quatro seções que se seguem descreveremos a descoberta de Bell, evitando judiciosamente e ao máximo os aspectos técnicos. Ao mesmo tempo, ainda que a discussão só requeira raciocínios menos sofisticados do que a determinação das probabilidades de um jogo de dados, ela pressupõe alguns passos que temos de descrever aqui, para em seguida conectá-los. Dependendo do seu gosto particular pelos detalhes, pode haver um momento em que você simplesmente prefira chegar logo à conclusão. Se isso acontecer, sinta-se livre para saltar para a página 139, onde encontrará um resumo e uma discussão das conclusões que decorrem da descoberta de Bell.

BELL E O SPIN

John Bell fez com que a ideia central do artigo de Einstein, Podolsky e Rosen deixasse de ser uma especulação filosófica para converter-se em uma questão que podia ser resolvida por meio de medições experimentais concretas. Surpreendentemente, tudo de que ele precisou para confirmá-lo foi simplesmente considerar uma situação em que não houvesse apenas dois aspectos — como, por exemplo, a posição e a velocidade de uma partícula — que a incerteza

quântica nos impedisse de determinar simultaneamente. Ele demonstrou que se forem três ou mais os aspectos que caem simultaneamente sob o guarda-chuva da incerteza — três ou mais características com a propriedade de que ao medirmos uma contaminamos as outras e, em consequência, ficamos impossibilitados de determinar o que quer que seja a respeito delas —, *é possível* formular experimentos capazes de enfrentar a questão da realidade. O mais simples desses exemplos envolve algo conhecido como *spin.*

Desde a década de 1920 os físicos sabem que as partículas têm uma propriedade conhecida como *spin* — elas executam um movimento rotacional semelhante, em linhas gerais, ao de uma bola de futebol ao ser chutada com efeito. O *spin* quântico difere, contudo, dessa imagem clássica em alguns aspectos essenciais, entre os quais há dois que têm, para nós, uma importância capital. Primeiro, as partículas — por exemplo, os elétrons e os fótons — só podem fazer o *spin* no sentido horário ou no anti-horário e sempre a um ritmo imutável, em torno de qualquer eixo particular. O eixo de *spin* de uma partícula pode mudar de direção, mas o ritmo do *spin* não pode sofrer aceleração nem desaceleração. Segundo, a incerteza quântica aplicada ao *spin* revela que, assim como não é possível determinar simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula, tampouco se pode determinar simultaneamente o *spin* de uma partícula em torno de mais de um eixo. Por exemplo, se uma bola de futebol está girando em torno de um eixo que aponta para o nordeste, a sua rotação, o seu *spin*, pode se decompor entre o eixo que aponta para o norte e o que aponta para o leste, de modo que se pode obter uma medição adequada, determinando-se a fração do *spin* que se distribui por cada um desses eixos cardeais. Mas na medição do *spin* de um elétron em torno de qualquer eixo aleatoriamente escolhido nunca se podem obter as frações desse *spin.* Nunca. É como se o próprio ato de medir forçasse o elétron a concentrar a totalidade do *spin* e direcioná-lo ou no sentido horário ou no anti-horário em torno do eixo que se tenha aleatoriamente escolhido. Além disso, devido à influência da medição sobre o *spin* do elétron, perde-se a capacidade de determinar como era o seu *spin* com relação a um eixo horizontal, a um eixo transversal ou a qualquer eixo, nas situações anteriores à medição. Essas características do *spin* na mecânica quântica são difíceis de descrever por completo, dificuldade que põe em evidência as limitações das imagens clássicas para revelar a verdadeira natureza do mundo quântico. Mas a matemática da teoria quântica e as décadas de experimentos já realizados nos asseguram de que essas características do *spin* quântico estão fora de dúvida.

A razão pela qual introduzo o *spin* neste contexto é evitar que tenhamos de mergulhar nos aspectos mais intrincados da física das partículas. O exemplo do

spin das partículas poderá, em um momento, propiciar-nos um laboratório simples para extrair conclusões maravilhosas e inesperadas a respeito do problema da realidade. Assim, será que uma partícula *tem*, simultaneamente, um *spin* definido para cada eixo, embora só se possa conhecê-lo para um único eixo de cada vez, em razão da incerteza quântica? Ou o princípio da incerteza nos diz algo diferente? Será que ele nos diz, ao contrário de qualquer noção clássica da realidade, que uma partícula simplesmente não tem e não pode ter tais características simultaneamente? Será que ele nos diz que as partículas residem em um estado de limbo quântico, sem *spin* definido em torno de qualquer eixo dado, até que alguém ou algo o meça e o leve a assumir e atingir — com uma probabilidade determinada pela teoria quântica — um ou outro valor particular de *spin* (horário ou anti-horário) em torno do eixo escolhido? O estudo dessa questão, que é essencialmente a mesma que colocamos no caso das posições e das velocidades das partículas, permite-nos utilizar o *spin* para examinar a natureza da realidade quântica (e extrair respostas que transcendem amplamente o exemplo específico do *spin).* Vejamos.

Como foi explicitamente demonstrado pelo físico David Bohm,[11] o raciocínio de Einstein, Podolsky e Rosen pode ser facilmente estendido à questão de saber se as partículas têm ou não *spins* definidos com relação a qualquer eixo escolhido. Vejamos por quê. Suponhamos que haja dois detectores, um no lado esquerdo do laboratório, o outro no lado direito, capazes de medir o *spin* de um elétron que chega. Suponhamos também que dois elétrons emanem em direções opostas a partir de uma fonte que está a meio caminho entre os dois detectores, de tal modo que os seus *spins* — em vez das suas posições e velocidades, como no outro exemplo — estejam correlacionados. Os detalhes de como isso é feito não são importantes; o que é importante é que isso pode ser realizado e, aliás, facilmente. A correlação pode ser arranjada de modo que se os detectores da esquerda e da direita forem programados para medir os *spins* ao longo de eixos que apontem para a mesma direção, obter-se-á um mesmo resultado: se os detectores forem programados para medir o *spin* dos seus respectivos elétrons com relação a um eixo vertical e o detector da esquerda obtiver a leitura de que o *spin é* no sentido horário, o mesmo acontecerá com o detector da direita; se os detectores forem programados para medir o *spin* em torno de um eixo de sessenta graus no sentido horário a partir da vertical e o detector da esquerda medir um *spin* anti-horário, o mesmo acontecerá com o detector da direita; e assim por diante. Também neste caso, o máximo que a mecânica quântica nos permite prever é a probabilidade de que os detectores venham a medir um *spin* horário ou anti-horário, mas podemos prever com 100% de certeza que o que for

encontrado por um detector também será encontrado pelo outro. (para evitar complicações linguísticas, descrevo os ***spins*** dos elétrons como perfeitamente correlacionados, embora a descrição mais convencional seja a de que eles são perfeitamente anticorrelacionados: qualquer que seja o resultado obtido em um detector, o outro detector obterá o resultado oposto. Para ficarmos em paz com a descrição convencional, imagine que em um dos detectores os sentidos horário e anti-horário foram invertidos)

O refinamento dado por Bohm ao argumento de Einstein, Podolsky e Rosen, nesta circunstância, foi o mesmo que apresentamos na versão original, quando focalizamos as posições e velocidades. A correlação entre os *spins* das partículas nos permite medir indiretamente o *spin* da partícula que se move para a esquerda em torno de algum eixo por meio da medida do *spin* daquela que se move para a direita em torno do mesmo eixo. Como essa medição é feita na extremidade do lado direito do laboratório, ela não pode influenciar de modo algum a partícula que se move para a esquerda. Portanto, esta deve ter tido o tempo todo o valor de *spin* que será determinado. Tudo o que fizemos foi medi-lo, ainda que indiretamente. Além disso, como poderíamos ter escolhido realizar a medição em torno de *qualquer* eixo, a conclusão tem de ser válida para qualquer eixo: o elétron que se move para a esquerda tem de ter um *spin* definido com relação a todo e qualquer eixo, ainda que só possamos determiná-lo explicitamente com relação a um eixo de cada vez. Evidentemente, os papéis de esquerda e direita podem ser invertidos, o que leva à conclusão de que cada partícula tem um *spin* definido com relação a qualquer eixo.[12]

A esta altura, sem que se perceba nenhuma diferença óbvia com relação ao exemplo posição/velocidade, você poderá pensar em retomar o raciocínio de Pauli e ceder à tentação de dizer que não faz sentido continuar a pensar sobre essas coisas. Se não é possível medir o *spin* com relação a diferentes eixos, que proveito pode haver em preocupar-nos se a partícula pode ter um *spin* definido — horário ou anti-horário — com relação a cada um deles? A mecânica quântica, e a física em geral, só responde por aspectos da realidade que sejam mensuráveis. E nem Bohm, nem Einstein, Podolsky ou Rosen alegaram que essas medições pudessem ser feitas. O que eles disseram é que as partículas possuem propriedades que são proibidas pelo princípio da incerteza, muito embora não possamos jamais conhecer explicitamente os seus valores particulares. Essas propriedades passaram a ser conhecidas como *aspectos ocultos* ou, mais frequentemente, *variáveis ocultas.*

Foi nesse ponto que John Bell mudou tudo. Ele descobriu que, mesmo que não se possa determinar o *spin* de uma partícula com relação a mais de um eixo, se é verdade que ela *tem* um *spin* definido com relação a todos os eixos, então, de todo modo, haverá consequências observáveis e verificáveis desse *spin.*

O TESTE DA REALIDADE

Para bem apreciar o raciocínio de Bell, voltemos a Mulder e Scully e imaginemos que eles receberam outra remessa com caixas de titânio, desta vez com uma nova característica importante. Em vez de uma tampa, cada caixa tem três: uma em cima, outra no lado e a terceira na frente.[13] A carta que acompanha a remessa informa que a esfera que está dentro de cada caixa agora escolhe aleatoriamente entre mostrar uma luz vermelha e uma azul, assim que qualquer das tampas seja aberta. Se se abrem diferentes tampas de uma mesma caixa, a cor aleatoriamente escolhida pode mudar, mas uma vez que a tampa esteja aberta e a cor apareça, não há como determinar o que teria acontecido se outra tampa tivesse sido escolhida. (Aplicada à física, essa propriedade capta a incerteza quântica: uma vez que você meça um aspecto, não há como determinar o que quer que seja a respeito dos demais.) Por fim, a nova carta recebida também diz que existe uma conexão misteriosa, um estranho emaranhamento, entre os dois conjuntos de caixas de titânio. Embora todas as esferas escolham *aleatoriamente* a cor que brilhará quando uma das tampas for aberta, se tanto Scully quanto Mulder abrirem a *mesma* tampa das caixas que têm o *mesmo* número, a carta diz que a mesma cor brilhará. Se Mulder abrir a tampa de cima da caixa número 1 e a cor que brilhar for azul, então, se Scully abrir a tampa de cima da caixa número 1 que ela recebe, também aparecerá a luz azul. Se Mulder abrir a tampa lateral da caixa número 2 e vir a cor vermelha, então Scully também verá a cor vermelha quando abrir a tampa lateral da caixa número 2 que ela recebeu, e assim por diante. E, com efeito, ao abrirem algumas dezenas de caixas, Scully e Mulder — que combinaram pelo telefone a sequência de caixas e tampas que iriam abrindo — verificaram que as previsões da carta eram corretas.

Embora a situação enfrentada por Mulder e Scully seja agora algo mais complexa do que a anterior, à primeira vista pareceria que o raciocínio usado por Scully no outro exemplo também se aplica aqui.

“Mulder”, diz Scully, “isto é tão tolo quanto o da remessa de ontem. Não há mistério algum. As esferas dentro de cada caixa simplesmente foram programadas. Será que você não vê?”

“Mas agora são três tampas”, alerta Mulder, “portanto a esfera não pode ‘saber’ qual a tampa que nós escolhemos abrir, não é verdade?”

“Porém ela não precisa saber”, explica Scully. “Isso faz parte da programação. Vou dar um exemplo. Pegue a próxima caixa que ainda está fechada, a caixa 37, e eu vou fazer o mesmo. Imagine agora, só para efeito de raciocínio, que a esfera da minha caixa 37 esteja programada para que apareça a luz vermelha se eu abrir

a tampa de cima, a luz azul para a tampa lateral e a luz vermelha para a tampa da frente. Vamos chamar este programa de *vermelho, azul, vermelho.* Evidentemente, se a pessoa que nos mandou as caixas tiver programado a sua caixa 37 da mesma maneira e se nós dois abrirmos a mesma tampa, vamos ver a mesma luz. E isso explica a ‘conexão misteriosa: se as caixas que vieram para você e para mim foram programadas com as mesmas instruções, nós vamos ver sempre a mesma cor quando abrirmos a mesma tampa. *Onde* está o mistério?”

No entanto Mulder não acredita que as esferas estejam programadas. Ele acredita na carta. Crê que as esferas escolhem aleatoriamente entre o vermelho e o azul quando uma das tampas da caixa se abre e crê ardorosamente, portanto, que *existe* alguma conexão misteriosa entre as caixas que estão com ele e as que estão com Scully.

Quem tem razão? Como não há maneira de examinar as esferas antes ou durante a suposta seleção aleatória da cor (lembre-se de que qualquer tentativa nesse sentido levará a esfera a escolher instantânea e aleatoriamente entre o vermelho e o azul, o que afetará o esforço de investigar o seu funcionamento), parece impossível provar em caráter definitivo se Scully ou Mulder tem razão.

Mas, de repente, Mulder tem uma ideia e descobre que *existe* um modo de resolver o problema definitivamente. O raciocínio de Mulder é claro, porém requer um pouquinho mais de matemática do que o que temos usado até aqui. Sem dúvida vale a pena acompanhar os detalhes — que não são muitos —, mas não se preocupe se algum deles lhe escapar. Abaixo, há um resumo com a conclusão principal.

Mulder percebe que, até então, ele e Scully só consideraram o que acontece quando cada um deles abre a mesma tampa das caixas que têm o mesmo número. Ele então telefona, animado, para Scully e lhe diz que podem descobrir muito mais se não abrirem sempre a mesma tampa, e sim escolherem de maneira aleatória e independente a tampa a ser aberta em cada caixa.

“Por favor, Mulder, deixe eu aproveitar as minhas férias. O que é que podemos aprender com isso?”

“Ora, Scully, podemos descobrir se a sua explicação está certa ou errada.” “Está bem. Vamos ver. Mas ande depressa.”

“É simples”, continua Mulder. “Se você estiver certa, veja o que eu percebi. Se você e eu escolhermos as tampas que vamos abrindo em cada caixa de maneira separada e aleatória e anotarmos a cor que aparece, depois de fazermos isso com muitas caixas ficará provado que vamos ver a mesma cor em *mais* do que 50% dos casos. E se isso não acontecer, se nós não virmos a mesma cor mais de 50% das vezes, é porque você está errada.”

“Como assim?”, Scully parece ficar mais interessada.
“Bem”, prossegue Mulder. “Veja um exemplo. Vamos supor que você esteja certa e que as caixas obedeçam a uma programação. Para tornar as coisas mais concretas, imagine que o programa da esfera de determinada caixa seja *azul, azul, vermelho*. Como cada um de nós escolhe livremente entre três tampas, existe um total de nove possibilidades de combinações para as aberturas das tampas em cada caixa. Por exemplo, eu posso escolher a tampa de cima da minha caixa e você a tampa lateral da sua; ou eu posso escolher a tampa da frente e você a de cima, e assim por diante.”
“É claro”, Scully responde. “Vamos chamar a tampa de cima de número 1, a lateral de número 2 e a da frente de número 3. Então, as nove combinações possíveis são: (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2) e (3,3).” “Isso mesmo!”, Mulder continua. “Mas então repare que, dessas nove possibilidades, existem cinco que nos farão ver a mesma cor: (1,1), (2,2), (3,3), (1,2) e (2,1). As três primeiras combinações acontecem quando abrimos as mesmas tampas e, como já sabemos, isso *sempre* corresponde a uma mesma cor. As outras duas combinações — (1,2) e (2,1) — resultam na mesma cor porque o programa determina que as esferas emitirão a mesma cor — azul — tanto se abrirmos a tampa 1 quanto a 2. Ora, como 5 é mais do que a metade de 9, isso significa que em mais do que a metade, mais do que 50%, das combinações possíveis que nós podemos fazer as esferas mostrarão a mesma cor.”
“Espere aí!” protesta Scully. “Esse é só um exemplo de um dos programas possíveis: *azul, azul, vermelho.* Na minha explicação propus que as caixas com números diferentes podem ter, e em geral têm, programas diferentes.”
“Mas isso não importa. A conclusão continua válida para todos os programas possíveis. O meu raciocínio com o programa *azul, azul, vermelho* só se baseia no fato de que duas das cores são iguais. Portanto, a mesma conclusão se aplica a qualquer programa: *vermelho, vermelho, azul,* ou *vermelho, azul, vermelho,* e assim por diante. Todos os programas têm de ter pelo menos duas cores repetidas. Os únicos programas que são realmente diferentes são os que mostram a mesma cor para as três tampas: *vermelho, vermelho, vermelho* e *azul, azul, azul* Mas para as caixas que tenham esses programas, nós sempre veremos a mesma cor, de toda maneira, qualquer que seja a tampa que se abra, e portanto a porcentagem de concordância entre nós só poderá aumentar. Então, se a sua explicação estiver correta, se as caixas tiverem sido programadas — mesmo que os programas variem de uma caixa para a outra —, nós vamos concordar quanto à cor em mais de 50% das vezes.”

Essa é a essência do problema. A parte mais difícil já passou. O importante é que *existe* um teste capaz de determinar se Scully está certa e se cada esfera opera segundo um programa que estabelece definitivamente a cor que aparecerá para cada tampa que seja aberta. Se ela e Mulder escolherem, de maneira independente e aleatória, qual das três tampas será aberta em cada uma das caixas e compararem as cores que observarem, tampa por tampa e número por número, eles têm de estar de acordo em *mais* de 50% dos casos.
Dito na linguagem da física, como ocorrerá na próxima seção, a percepção de Mulder nada mais é do que a descoberta de John Bell.

ANJOS E ÂNGULOS

A tradução deste resultado em termos da física é clara. Imagine dois detectores, um do lado esquerdo do laboratório e outro do lado direito, capazes de medir o *spin* de uma partícula como um elétron, como no experimento que discutimos na penúltima seção. Os detectores requerem a escolha de um eixo (vertical, horizontal, frontal, ou qualquer outro dos inúmeros eixos que podem existir entre essas posições) em torno do qual o *spin* deve ser medido.
Por razões de simplicidade, imagine que os detectores foram comprados em uma liquidação e que só oferecem três escolhas para os eixos. Cada vez que o experimento é executado, descobre-se se o elétron tem um *spin* no sentido horário ou anti-horário em torno ao eixo selecionado.
De acordo com Einstein, Podolsky e Rosen, cada elétron que entra no detector fornece-lhe algo comparável a um programa. Dizem eles que cada elétron tem um *spin* definido — horário ou anti-horário — com relação a cada eixo possível, ainda que esse *spin* seja oculto e não possa ser medido. Por conseguinte, quando um elétron entra no detector, ele determina precisamente se a medição do seu *spin* será no sentido horário ou anti-horário com relação a qualquer eixo que seja escolhido. Por exemplo, um elétron que tenha o *spin* no sentido horário em torno a cada um dos três eixos fornece ao detector o programa *horário*, *horário*, *horário*; um elétron que tenha o *spin* no sentido horário em torno aos dois primeiros eixos e anti-horário em torno ao terceiro fornece o programa *horário*, *horário, anti-horário*, e assim por diante. Para explicar a correlação entre os elétrons que se movem para a esquerda e os que se movem para a direita, Einstein, Podolsky e Rosen simplesmente afirmam que tais elétrons têm *spins* idênticos e fornecem, portanto, programas idênticos aos detectores em que entram. Desse modo, se os mesmos eixos são escolhidos para os detectores da esquerda e da direita, os resultados obtidos serão idênticos.

Veja que esses detectores de *spin* reproduzirão exatamente tudo o que Scully e Mulder encontraram, por meio de simples substituições: em vez de escolhermos uma tampa em uma caixa de titânio, escolhemos um eixo; em vez de vermos uma luz vermelha ou azul, verificamos um *spin* horário ou anti-horário. Por conseguinte, assim como abrir as mesmas tampas em um par de caixas de titânio com o mesmo número produz a mesma cor, também escolher os mesmos eixos nos dois detectores resulta na medição da mesma direção do *spin.* Igualmente, assim como abrir uma das tampas da caixa de titânio torna impossível saber qual a cor que apareceria se tivéssemos escolhido outra tampa, também medir o *spin* do elétron em torno a um eixo torna impossível, graças à incerteza quântica, saber qual a direção do *spin* que teríamos encontrado se tivéssemos escolhido outro eixo.

Tudo isso significa que a análise de Mulder sobre quem está com a razão aplica-se a esta situação de maneira exatamente igual à que se aplicava ao caso das esferas extraterrestres. Se Einstein, Podolsky e Rosen estiverem certos e se cada elétron efetivamente tem um valor definido de *spin* em torno dos três eixos — ou seja, se cada elétron fornece um "programa" que determina de maneira definitiva o resultado de qualquer das três possíveis medições do *spin* —, então podemos fazer a seguinte previsão: a análise dos dados obtidos a partir da execução de múltiplos experimentos — experimentos em que o eixo para cada detector é escolhido de maneira aleatória e independente — revelará que *em mais do que a metade das vezes os* spins *dos dois elétrons concordarão, sendo ambos ou horários ou anti-horários.* Se os *spins* do elétron não forem iguais mais do que a metade das vezes é porque Einstein, Podolsky e Rosen estão errados.

Esta foi a descoberta de Bell. Ela mostra que, mesmo que não seja possível medir o *spin* de um elétron em torno de mais de um eixo — embora não se possa "ler" explicitamente o programa que ele alegadamente fornece ao detector em que entra —, isso *não* significa que as nossas tentativas de saber se o elétron, apesar de tudo, tem um *spin* definido em torno de mais de um eixo sejam o mesmo que contar os anjos que se sentam na ponta de uma agulha. Longe disso. Bell descobriu que existe uma consequência autêntica e verificável associada ao fato de a partícula ter valores definidos de *spin.* Por meio dos eixos situados em três ângulos diferentes, Bell inventou uma maneira de contar os anjos de Pauli.

FOGO SEM FUMAÇA

Caso algum detalhe lhe tenha escapado, vamos a um resumo do que já vimos. Em razão do princípio da incerteza de Heisenberg, a mecânica quântica afirma

que há certas características do mundo — como a posição e a velocidade de uma partícula, ou o *spin* de uma partícula em torno a diferentes eixos — que não podem ter valores definidos de maneira simultânea. *De acordo com a teoria quântica, uma partícula não pode ter uma posição e uma velocidade definidas; nem pode ter um* spin *definido (horário ou anti-horário) em torno a mais de um eixo; nem pode ter atributos definidos simultaneamente para aspectos que pertencem a lados opostos da clivagem ocasionada pelo princípio da incerteza.* Em vez disso, as partículas flutuam em um limbo quântico, em uma mistura probabilística, difusa e amorfa, de todas as possibilidades. A definição concreta só se torna real, entre as muitas possíveis, quando se faz uma medição. Evidentemente, esta é uma descrição da realidade que difere drasticamente da visão da física clássica.

Sempre cético com respeito à mecânica quântica, Einstein, com seus colegas Podolsky e Rosen, tentou usar essa afirmação da mecânica quântica como uma arma contra a própria teoria. Eles argumentaram que, embora a mecânica quântica não permita que aqueles aspectos sejam determinados simultaneamente, as partículas não deixam de ter valores definidos para a sua posição e a sua velocidade. Elas também teriam valores definidos de *spin* com relação a todos os eixos, assim como valores definidos para todas as coisas que são proibidas pela incerteza quântica. Einstein, Podolsky e Rosen argumentaram, enfim, que a mecânica quântica não consegue dar conta de todos os elementos da realidade física — não logra lidar com a posição e a velocidade de uma partícula; não logra lidar com o seu *spin* em torno de mais de um eixo — e, por conseguinte, é uma teoria incompleta.

Por muito tempo a questão de saber se Einstein, Podolsky e Rosen estavam certos parecia pertencer mais à metafísica do que à física. Como disse Pauli, se não se podem medir as características proibidas pela incerteza quântica, que diferença faz se elas efetivamente existem em alguma dobra oculta da realidade? Mas John Bell descobriu, de maneira notável, algo que escapara a Einstein, a Bohr e a todos os gigantes da física teórica do século xx: ele descobriu que a mera existência de certas coisas, mesmo que elas estejam além de uma determinação ou de uma medição explícitas, faz diferença e que essa diferença pode ser testada experimentalmente. Bell revelou que, se Einstein, Podolsky e Rosen estivessem certos, os resultados obtidos por dois detectores distantes um do outro e empregados para medir certas propriedades das partículas (o *spin* em torno de diferentes eixos escolhidos aleatoriamente, no exemplo que demos) teriam de coincidir em mais de 50% das vezes.

Bell percebeu isso em 1964, mas naquele tempo não havia uma tecnologia capaz de verificar essa hipótese. Isso aconteceu no início da década de 1970. Começando com Stuart Freedman e John Clauser, em Berkeley, continuando com Edward Fry e Randall Thompson, em Texas A&M**,** e culminando no início da década de 1980 com o trabalho de Alain Aspect e seus colaboradores na França, versões cada vez mais impressionantes e sofisticadas desses experimentos foram sendo realizadas. No caso de Aspect, por exemplo, os dois detectores foram colocados a uma distância de treze metros um do outro e um recipiente com átomos de cálcio energizados foi posto a meio caminho entre eles. A física bem estabelecida demonstra que cada átomo de cálcio, ao retornar ao seu estado normal, de menor energia, emite dois fótons que viajam em direções opostas e cujos *spins* são perfeitamente correlacionados, exatamente como no exemplo que discutimos. Com efeito, no experimento de Aspect, sempre que as configurações dos detectores são as mesmas, as medições dos fótons revelam que os seus *spins* são perfeitamente alinhados. Se os detectores de Aspect funcionassem com uma luz vermelha em resposta a um *spin* no sentido horário e uma luz azul em resposta a um *spin* anti-horário, os fótons emitidos fariam com que os detectores mostrassem a mesma cor.

Mas aqui está o ponto crucial: Aspect examinou os dados provenientes de um grande número de experimentos — nos quais a configuração dos detectores da esquerda e da direita, em vez de serem sempre as mesmas, variavam de maneira aleatória e independente — e verificou que *os detectores não concordavam em mais de 50% dos casos.*

Esse resultado é como um terremoto. Deveria tirar o seu fôlego. Mas caso você não tenha tido essa sensação, deixe-me explicar um pouco mais. Os resultados obtidos por Aspect revelam que Einstein, Podolsky e Rosen foram refutados experimentalmente — e não teoricamente; não pelo raciocínio abstrato, mas pela própria natureza. Isso significa que tem de haver algo errado com o raciocínio empregado por eles para concluir que as partículas têm valores definidos para características — como os valores do *spin* para diferentes eixos — com relação às quais a existência de valores definidos é vedada pelo princípio da incerteza.

Mas onde foi que eles erraram? Bem, lembre-se de que o argumento de Einstein, Podolsky e Rosen depende de uma premissa central: se, em dado momento, podemos determinar uma característica de um objeto por meio de um experimento praticado em outro objeto espacialmente distante, então o primeiro objeto deve ter tido essa característica todo o tempo. A base sobre a qual essa premissa foi construída é simples e inteiramente razoável. A medição se faz em *um lugar* e o objeto está em *outro lugar.* Os dois objetos estão espacialmente

separados e, portanto, não existe a possibilidade de que a medição realizada no segundo objeto possa ter exercido algum efeito sobre o primeiro. Mais precisamente ainda: se nada se move mais rápido do que a luz, então para que a medição que se pratica em um objeto pudesse, de algum modo, produzir uma modificação no outro — por exemplo, fazê-lo tomar um movimento de *spin* idêntico em torno de um eixo escolhido — necessariamente teria de haver um intervalo de tempo antes que tal modificação se concretizasse, pelo menos igual ao tempo que a luz demoraria para percorrer a distância entre os dois objetos. Mas, tanto no raciocínio abstrato quanto no experimento real, as duas partículas são examinadas pelos detectores *ao mesmo tempo*. Por conseguinte, o que quer que se aprenda a respeito da primeira partícula, ao medir-se a segunda tem de ser uma característica possuída pela primeira de maneira completamente independente de havermos ou não feito a medição na outra partícula. Em síntese, o cerne do argumento de Einstein, Podolsky e Rosen é que *um objeto que está em um lugar não tem nada a ver com o que se faça com outro objeto em outro lugar.*

Porém, como vimos, isso leva à previsão de que os detectores produzirão resultados iguais em mais de 50% dos casos, previsão essa que é refutada experimentalmente. Somos forçados a concluir que a premissa em que se basearam Einstein, Podolsky e Rosen, por mais razoável que pareça, não reflete a maneira pela qual o universo quântico funciona. Assim, por meio deste raciocínio indireto, mas cuidadosamente construído, os experimentos nos levam a concluir que *um objeto que está em um lugar tem a ver com o que se faça com outro objeto em outro lugar.*

A mecânica quântica nos mostra que as partículas adquirem esta ou aquela propriedade aleatoriamente quando medidas e nós aprendemos também que essa aleatoriedade pode estar conjugada através do espaço. Há pares de partículas preparadas apropriadamente — denominadas partículas *emaranhadas*— cujas propriedades, medidas por nós, não são adquiridas de maneira independente. São-como um par de dados mágicos, um jogado em uma cidade, outro em outra, que apresentam números aleatórios, mas que, de algum modo, são sempre os mesmos nos dois casos. As partículas emaranhadas atuam dessa maneira, mas não se trata de nenhuma mágica. *As partículas emaranhadas, embora espacialmente separadas, não operam autonomamente.*

Einstein, Podolsky e Rosen dedicaram-se a mostrar que a mecânica quântica dá uma descrição incompleta do universo. Cinquenta anos depois, as noções teóricas e os resultados experimentais inspirados pelo seu próprio trabalho obrigam-nos a virar de cabeça para baixo a análise que fizeram e concluir que a

parte mais básica, razoável, intuitiva, sensata e clássica do seu raciocínio está errada: o universo não é local. O resultado do que se faz em um lugar pode estar ligado ao que acontece em outro lugar, mesmo que nada viaje entre os dois locais e mesmo que não haja tempo para que qualquer coisa realize a viagem entre os dois locais. A sugestão intuitivamente confortável de Einstein, Podolsky e Rosen, de que essas correlações à distância ocorrem simplesmente porque as partículas têm propriedades definidas, correlacionadas e preexistentes, foi refutada pelos dados. É isso o que torna tão chocante essa conclusão.[14]

Em 1997, Nicolas Gisin e a sua equipe, na Universidade de Genebra, realizaram uma versão do experimento de Aspect na qual os dois detectores foram colocados a onze quilômetros de distância. Os resultados não se modificaram. Na escala microscópica dos comprimentos de ondas dos fótons, onze quilômetros é uma distância gigantesca. Na verdade, poderiam ser 11 milhões de quilômetros ou 11 bilhões de anos-luz. Não há nenhuma razão para duvidar de que a correlação entre os fótons persiste por maior que seja a distância que separa os detectores.

Isso parece totalmente bizarro. Mas hoje esse emaranhamento quântico está exaustivamente comprovado. Se dois fótons estão emaranhados, a determinação do *spin* de um deles em torno de um eixo "força[5] o outro a ter o mesmo *spin* em torno do mesmo eixo. O ato de "medir" um fóton "obriga" o outro a sair da névoa de probabilidades e tomar um valor definido de *spin* — valor que corresponde precisamente ao do seu companheiro distante. E isso é surpreendente. (muitos pesquisadores, inclusive eu próprio, acreditam que o argumento de Bell e a experiência de Aspect comprovam convincentemente que as correlações observadas entre partículas amplamente separadas não podem ser explicadas pelo raciocínio feito por Scully — que atribui as correlações apenas ao fato de as partículas possuírem propriedades definidas e correlacionadas desde quando estavam juntas, anteriormente. Outros buscam evitar ou minimizar esta conclusão surpreendente em favor da não-localidade a que fomos levados. Não compartilho o seu ceticismo, mas alguns livros de divulgação que discutem essas alternativas são mencionados na seção das notas.[15]).

EMARANHAMENTO E RELATIVIDADE ESPECIAL: A VISÃO ORTODOXA

Coloquei entre aspas as formas verbais "força" e "obriga" porque elas transmitem o sentimento pelo qual a nossa intuição clássica anseia e porque o seu significado preciso neste contexto é crucial para sabermos se estamos às vésperas de outro terremoto. Normalmente, essas palavras transmitem uma ideia de causalidade volitiva: escolhemos fazer algo em um lugar para causar ou forçar algum acontecimento em outro lugar. Se essa fosse a descrição correta da inter-relação entre os dois fótons, a relatividade especial sofreria um golpe

mortal. Os experimentos mostram que, do ponto de vista do pesquisador no laboratório, no exato instante em que o *spin* de um fóton é medido, o outro fóton toma imediatamente a mesma propriedade de *spin.* Se alguma coisa estivesse viajando do fóton da esquerda para o da direita, alertando o fóton da direita de que o *spin* do fóton da esquerda foi determinado por meio de um experimento, essa coisa teria de viajar entre os fótons instantaneamente, o que conflita com o limite de velocidade estabelecido pela relatividade especial.

Há consenso entre os físicos no sentido de que tais conflitos aparentes com a relatividade especial são ilusórios. A razão intuitiva é a de que, embora os dois fótons estejam espacialmente separados, a sua origem comum estabelece um vínculo fundamental entre eles. Embora eles estejam espacialmente separados, a sua história os fez gêmeos. Mesmo à distância, continuam sendo parte de um mesmo sistema físico. Assim, não é que a medição feita em um fóton force ou obrigue o outro fóton distante a tomar propriedades idênticas. Ao contrário, os dois fótons são tão intimamente ligados que é justo considerá-los — apesar da separação espacial — como integrantes de uma mesma entidade física. Nesse sentido, podemos dizer que uma medição efetuada nessa entidade — entidade que contém dois fótons — afeta-a como um todo; ou seja, afeta os dois fótons ao mesmo tempo.

Essa imagem pode tornar mais fácil aceitar a conexão entre os fótons, mas ela é vaga. Que significa dizer que duas coisas espacialmente separadas constituem uma mesma entidade? O argumento que se segue é mais preciso. Quando a relatividade especial diz que nada pode viajar mais rápido do que a luz, esse “nada” refere-se à matéria e à energia que nos são familiares. O caso em pauta, no entanto, é mais sutil porque aparentemente não há nenhuma matéria ou energia viajando entre os dois fótons, de modo que não há nada cuja velocidade se possa medir. Contudo, há uma maneira de saber se estamos ou não violando a relatividade especial. A matéria e a energia têm uma característica comum, que é a de que, ao viajar pelo espaço, elas podem transmitir informações. Os fótons que viajam da estação de rádio para o seu receptor transmitem informações. Os elétrons que viajam pelos cabos da internet para o seu computador transmitem informações. Portanto, em uma situação em que se supõe que algo — mesmo não identificado — tenha viajado a uma velocidade maior do que a da luz, o teste decisivo é o de perguntar se esse algo transmitiu, ou, pelo menos, poderia transmitir informações. Se a resposta for negativa, segundo o raciocínio normal, nada terá excedido a velocidade da luz e a relatividade especial permanece intocável. Na prática, esse é o teste ao qual os físicos recorrem com freqüência para determinar se algum processo sutil violou as leis da relatividade especial. (Nada, nunca, sobreviveu a esse teste.) Vamos aplicá-lo aqui.

Existe alguma maneira pela qual se possa enviar informações de um fóton a outro quando medimos o *spin* do fóton que se move para a esquerda e do que se move para a direita em torno de algum eixo dado? A resposta é não. Por quê? O resultado obtido tanto no detector da esquerda quanto no da direita é apenas uma sequência aleatória de dados horários e anti-horários, uma vez que em cada caso particular há uma probabilidade igual de verificarmos se o *spin* da partícula é horário ou anti-horário. Não podemos nunca controlar ou prever o resultado de nenhuma medição em particular. Portanto, não há mensagens, não há códigos ocultos nem há nenhuma informação em nenhuma das duas listas aleatórias. O único ponto de interesse com relação a essas listas é que elas são idênticas — mas isso não pode ser discernido até que ambas sejam postas em comparação por meio de algum modo convencional e menos rápido do que a luz (fax, e-mail, telefone etc.). O argumento-padrão conclui, por conseguinte, que, embora a medição do *spin* de um fóton pareça afetar imediatamente o outro, nenhuma informação é transmitida de um ao outro e o limite de velocidade da relatividade especial não é violado. Os físicos dizem que os resultados obtidos para o *spin* estão correlacionados — uma vez que as listas são idênticas —, mas não obedecem a uma relação tradicional de causa e efeito porque nada viajou entre as duas localizações distantes.

EMARANHAMENTO E RELATIVIDADE ESPECIAL: A VISÃO CONTRÁRIA

Será que é assim? O conflito potencial entre a não-localidade da mecânica quântica e a relatividade especial estará inteiramente resolvido? Bem, provavelmente sim. Com base nas considerações acima, a maioria dos físicos conclui que há uma coexistência harmoniosa entre a relatividade especial e o resultado de Aspect para as partículas emaranhadas. Em resumo, a relatividade especial sobrevive pela diferença mínima. Muitos físicos mostram-se satisfeitos com isso, mas outros ficam com a sensação de que há algo mais por explicar.
Intuitivamente, sempre optei pela visão da coexistência, mas não há como negar que se trata de uma questão delicada. Afinal de contas, por mais que se usem palavras holísticas ou por mais que se ressalte que não há transmissão de informações, duas partículas amplamente separadas, cada qual comandada pela aleatoriedade da mecânica quântica, de algum modo permanecem suficientemente “em contato” de maneira que o que uma faz a outra também faz, no mesmo instante. Isso parece indicar que algo mais rápido do que a luz está operando entre elas.

Que dizer? Não há uma resposta rigorosa e universalmente aceita. Alguns físicos e cientistas sugerem que reconheçamos que o foco da discussão até aqui está deslocado: a verdadeira essência da relatividade especial, como eles acertadamente observam, não está tanto no fato de que a luz estabelece um limite para as velocidades, mas sim em que a velocidade da luz é algo a respeito do que todos os observadores concordam, independentemente do seu próprio movimento.[16] A observação mais geral, segundo esse ponto de vista, é a de que o princípio central da relatividade especial é que nenhum ponto de vista observacional tem primazia sobre qualquer outro. Assim, esses pensadores propõem (e muitos concordam) que, se o tratamento igualitário dado a todos os observadores que têm velocidade constante pudesse ser confrontado com os resultados experimentais obtidos para as partículas emaranhadas, a tensão com a relatividade especial se resolvería.[17] Mas alcançar essa meta está longe de ser uma tarefa trivial. Para vermos esse ponto de maneira mais concreta, lembremo-nos de como os velhos livros-textos de mecânica quântica explicavam o experimento de Aspect.

De acordo com a mecânica quântica ortodoxa, quando procedemos a uma medição e encontramos uma partícula em determinado lugar, provocamos uma alteração na sua onda de probabilidade: a gama anterior de resultados potenciais reduz-se a um: o resultado obtido pela medição, como ilustra a figura 4.7.

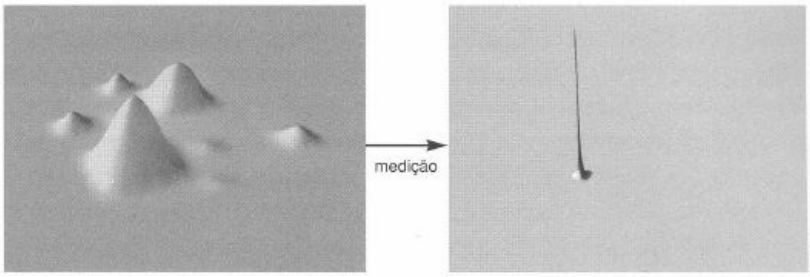


Figura 4.7. *Quando uma partícula é observada em uma localização, a probabilidade de encontrá-la em outra localização cai a zero, enquanto a probabilidade de que ela esteja na localização em que foi observada sobe a 100%.*

Os físicos dizem que a medição provoca o colapso da onda de probabilidade e acrescentam que quanto maior for a onda de probabilidade original em determinado lugar, maior será a chance de que o colapso da onda se dê naquele ponto — ou seja, maior será a chance de que a partícula seja encontrada naquele ponto. No enfoque ortodoxo, o colapso ocorre instantaneamente em todo o universo: no momento em que você encontra a partícula em um lugar, diz esse raciocínio, a probabilidade de que ela possa ser encontrada em qualquer outro lugar cai imediatamente a zero, e isso é o que está refletido no colapso da onda de probabilidade.

No experimento de Aspect, quando se mede o *spin* do fóton que se move para a esquerda e se verifica que ele é, digamos, horário com relação a algum eixo, isso acarreta o colapso da sua onda de probabilidade em todo o espaço, o que reduz instantaneamente a zero a parte anti-horária. Como esse colapso ocorre em todos os lugares, ocorre também na localização do fóton que se move para a direita. Por conseguinte, isso afeta a parte anti-horária da onda de probabilidade do fóton que se move para a direita e acarreta também o seu colapso ao nível zero. Assim, por maior que seja a distância entre o fóton que se move para a direita e o que se move para a esquerda, a sua onda de probabilidade é instantaneamente afetada pela alteração da onda de probabilidade do fóton que se move para a esquerda, o que assegura que ele tenha o mesmo *spin* que o do fóton que se move para a esquerda em torno do eixo escolhido. Na mecânica quântica ortodoxa, portanto, esta alteração instantânea nas ondas de probabilidade é responsável pela influência mais rápida do que a luz.

A matemática da mecânica quântica dá precisão a esta discussão qualitativa. E, com efeito, as influências de longa distância que derivam do colapso das ondas de probabilidade modificam a previsão da frequência com que os detectores da direita e da esquerda do exemplo de Aspect (quando os seus eixos são escolhidos de maneira aleatória e independente) devem obter resultados iguais. Precisaríamos de um cálculo matemático para chegar à resposta exata (veja a seção de notas,[18] se estiver interessado), mas quando isso é feito, a previsão é de que os detectores concordarão precisamente em 50% dos casos (em lugar da previsão de mais de 50% dos casos — resultado que, como vimos, obtém-se usando a hipótese de Einstein, Podolsky e Rosen de um universo local). Isso é exatamente o que Aspect encontrou em seu experimento: concordância em 50%. A mecânica quântica ortodoxa confirma os dados de maneira impressionante.

Esse é um êxito espetacular. Mas há um problema. Depois de mais de setenta anos, ninguém ainda sabe como ocorre o colapso de uma onda de probabilidade, se é que ele ocorre. Durante esse tempo, a premissa de que as ondas de probabilidade entram em colapso mostrou ser uma ligação eficaz entre as probabilidades previstas pela mecânica quântica e os resultados concretos revelados experimentalmente. Mas é uma premissa que tem os seus enigmas. Em primeiro lugar, o colapso não deriva da matemática da teoria quântica. A sua inserção tem de ser feita à mão e não há uma maneira consensual ou experimentalmente justificada para fazê-lo. Em segundo lugar, como é possível que o fato de encontrarmos um elétron em um detector de partículas em Nova York possa fazer com que a onda de probabilidade desse elétron caia instantaneamente a zero na galáxia de Andrômeda? Naturalmente, quando você encontra a partícula em Nova York, é claro que ela não será encontrada em

Andrômeda, mas que mecanismo desconhecido será esse, que torna essas coisas possíveis com uma eficiência tão espetacular? Em linguagem comum: como é que a parte da onda de probabilidade que está em Andrômeda, ou em qualquer outro lugar, "sabe" cair a zero instantaneamente?[19]

Vamos considerar este problema da medição na mecânica quântica no capítulo 7 (quando veremos que há outras propostas que evitam por completo a ideia do colapso das ondas de probabilidade), mas devemos notar aqui que, como vimos no capítulo 3, algo que é simultâneo de uma perspectiva não é simultâneo de uma outra perspectiva que se move. (Lembre-se de Itchy e Scratchy acertando os relógios no trem.) Portanto, se uma onda de probabilidade sofre um colapso simultâneo através do espaço segundo um observador, ela não estará sofrendo esse mesmo colapso simultâneo segundo outro observador que esteja em movimento. Na verdade, dependendo do seu próprio movimento, alguns observadores dirão que o fóton da esquerda foi medido primeiro, e outros observadores, igualmente confiáveis, dirão que o fóton da direita foi medido primeiro. Portanto, mesmo que a ideia do colapso das ondas de probabilidade seja correta, não haveria uma verdade objetiva que determinasse qual foi a medição — se a da esquerda ou a da direita — que afetou a outra. Assim, o colapso das ondas de probabilidade parece escolher um ponto de vista como especial — aquele segundo o qual o colapso é simultâneo através do espaço e segundo o qual as medições à esquerda ou à direita ocorrem no mesmo momento. Mas a escolha de uma perspectiva especial cria uma forte tensão com o princípio igualitário da relatividade especial. Existem propostas para resolver tal problema, porém prossegue o debate a respeito de qual delas está certa, se é que alguma delas está.[20]

Por conseguinte, embora na opinião da maioria haja uma coexistência harmônica, alguns físicos e alguns cientistas consideram que a questão do exato relacionamento entre a mecânica quântica, as partículas emaranhadas e a relatividade especial está em aberto. Certamente é possível, e a meu ver provável, que a opinião da maioria venha a prevalecer de maneira convincente e definitiva. Mas a história mostra que problemas sutis nos fundamentos são, por vezes, as sementes de futuras revoluções. O tempo dirá.

QUE FAZER COM TUDO ISTO?

O raciocínio de Bell e os experimentos de Aspect revelam que o tipo de universo imaginado por Einstein pode existir mentalmente, mas não na realidade. No universo de Einstein, o que se faz em um lugar tem relevância imediata apenas para as coisas que estão naquele lugar. A física, no seu entendimento, é

puramente local. Agora sabemos que os dados negam esse tipo de raciocínio. Os dados negam esse tipo de universo.

No universo de Einstein, os objetos possuem valores definidos para todos os atributos físicos possíveis. Os atributos não ficam flutuando no limbo, à espera de que a medição de um pesquisador lhes dê existência. A maioria dos físicos também concordará em dizer que Einstein estava errado neste ponto. As propriedades das partículas, segundo essa visão majoritária, passam a ser concretas quando as medições as forçam a fazê-lo — ideia que será examinada em mais detalhes no capítulo 7. Quando não estão sendo observadas e quando não estão interagindo com o ambiente, as propriedades das partículas têm uma existência nebulosa e difusa, caracterizada apenas pela probabilidade da sua realização potencial desta ou daquela maneira. Os que defendem ao extremo esse ponto de vista chegam a afirmar que quando nada e ninguém esteja "olhando" para a Lua ou interagindo com ela de algum modo, ela não está presente.

Quanto a esse ponto, o veredito ainda não foi dado. Einstein, Podolsky e Rosen argumentaram que a única maneira sensata de explicar como as medições podem revelar que partículas que estão amplamente separadas possuem propriedades idênticas é admitir que as partículas já possuíam essas propriedades o tempo todo (e em razão do seu passado comum, tais propriedades já eram correlacionadas). Décadas depois, a análise de Bell e os dados de Aspect comprovaram que esta sugestão, que satisfaz a nossa intuição e se baseia na premissa de que as partículas sempre têm propriedades definidas, não se sustenta para explicar correlações não-locais observadas experimentalmente. Mas a falta de explicação para os mistérios da não-localidade não significa necessariamente que a noção de que as partículas possuam sempre propriedades definidas esteja descartada. Os dados descartam o universo local, mas não que as partículas tenham essas propriedades ocultas.

Com efeito, na década de 1950, Bohm elaborou a sua própria versão da mecânica quântica, que incorporava *tanto* a não-localidade *quanto* as variáveis ocultas. Segundo o seu enfoque, as partículas sempre têm posição e velocidade definidas, ainda que nunca possamos medi-las simultaneamente. O enfoque de Bohm faz previsões que concordam inteiramente com as da mecânica quântica convencional, mas essa formulação introduz um elemento ainda mais forte de não-localidade, no qual as *forças* que agem sobre uma partícula em uma localização dependem instantaneamente de condições existentes em localizações distantes. Em certo sentido, portanto, a versão de Bohm sugeria uma maneira de recuperar algo das características intuitivamente sensatas da física clássica que haviam sido abandonadas pela revolução quântica — partículas que têm propriedades definidas —, como queria Einstein, mas revelava, ao mesmo

tempo, que havia um preço a pagar por isso — o de aceitar uma não-localidade ainda mais flagrante. Com um preço tão alto, Einstein dificilmente teria encontrado consolo nessa linha de pensamento.

A necessidade de abandonar a localidade é a lição mais extraordinária que se aprende com os trabalhos de Einstein, Podolsky, Rosen, Bohm, Bell, Aspect e tantos outros que desempenharam papéis importantes nessa linha de pesquisa. Em razão do seu passado, objetos que hoje estão em regiões vastamente diferentes do universo podem, fazer parte de um todo emaranhado, segundo a mecânica quântica. Ainda que amplamente separados, esses objetos comportam-se de uma maneira que é aleatória, mas também é obrigatoriamente coordenada.

Pensávamos que uma propriedade básica do espaço é a de separar os objetos e possibilitar que eles se distingam uns dos outros. Vemos agora que a mecânica quântica impõe um desafio radical a essa visão. Duas coisas podem estar amplamente separadas sem por isso ter existências inteiramente independentes. Elas são unidas por uma conexão quântica que faz com que as propriedades de uma sejam dependentes das propriedades da outra. O espaço não torna esses objetos emaranhados distinguíveis uns dos outros. O espaço não pode superar a sua interconexão. O espaço, mesmo uma enorme quantidade dele, não diminui a sua interdependência quântica.

Na interpretação de algumas pessoas, isso significa que “todas as coisas estão conectadas a todas as demais” ou que “a mecânica quântica nos emaranha a todos em uma única totalidade universal”. Afinal de contas, dizem elas, no Big-Bang todas as coisas estavam em um mesmo lugar, uma vez que acreditamos que todos os lugares que hoje estão separados estavam reunidos no começo de tudo. E já que tudo — como os dois fótons emitidos pelo mesmo átomo de cálcio — surgiu de uma mesma coisa no começo, todas as coisas devem mesmo estar, de acordo com as leis da mecânica quântica, emaranhadas com todas as demais.

Esses arrebatamentos, ainda que eu aprecie o sentimento por eles produzidos, são exagerados e insustentáveis. As conexões quânticas entre os dois fótons emitidos pelo átomo de cálcio certamente são reais, mas são extremamente tênues. Quando Aspect e outros realizam os seus experimentos, é fundamental que os fótons possam viajar sem nenhum distúrbio, da fonte até os detectores. Se eles forem afetados por outras partículas, ou se colidirem com outros objetos antes de alcançar os detectores, a identificação da conexão quântica entre eles torna-se monumentalmente mais difícil. Em vez de buscarmos correlações entre as propriedades dos dois fótons, teríamos de formular um padrão complexo de correlações que envolvem os fótons e tudo o mais com que eles tenham feito contato. E como cada uma dessas partículas tem os seus próprios caminhos, colidindo com outras partículas mais, o emaranhamento quântico se estenderia

tanto, em função dessas interações com o ambiente, que seria virtualmente impossível detectá-lo. Para todos os efeitos práticos, o emaranhamento original entre os fótons estaria superado.

Mas, de toda maneira, é espantoso que essas conexões existam e que possam ser observadas diretamente e a distâncias significativas nas condições privilegiadas do laboratório. Essencialmente, elas nos mostram que o espaço não é o que pensávamos que fosse.

E o tempo?

PARTE II

O tempo e a experiência

5. O rio gelado

O tempo passa?

O tempo está entre os conceitos mais familiares e menos compreendidos que a humanidade conhece. Dizemos que ele voa, dizemos que ele é dinheiro, tentamos ganhá-lo, ficamos irritados quando o perdemos, mas o que é o tempo? Parafraseando santo Agostinho e o juiz Potter Stewart, “sabemos quando o vemos”, mas é claro que, neste começo do terceiro milênio, o nosso entendimento do tempo deveria ser mais profundo. De certo modo já é; mas por outro lado ainda não. Através de séculos de perplexidades e reflexões, chegamos a compreender alguns dos mistérios do tempo, mas muitos outros permanecem. De onde vem o tempo? Que significaria um universo sem tempo? Poderia haver mais de uma dimensão temporal, assim como há mais de uma dimensão espacial? Podemos “viajar” ao passado? Se isso fosse possível, seria também possível modificar o desdobramento subsequente dos fatos? Existe uma unidade mínima e absoluta do tempo? O tempo será um componente verdadeiramente essencial na arquitetura do cosmo ou simplesmente um artifício, útil para organizar as nossas percepções, mas que não está inscrito no código que contém as leis mais fundamentais do universo? Poderia ele ser uma noção derivada, resultante de algum conceito mais básico ainda por descobrir?
Encontrar respostas completas e plenamente convincentes para essas perguntas está entre as metas mais ambiciosas da ciência moderna. Mas essas grandes perguntas não são, de modo algum, as únicas. Até a própria experiência diária do tempo nos faz esbarrar em alguns dos mais difíceis enigmas do universo.

O TEMPO E A EXPERIÊNCIA

A relatividade geral e a especial despedaçaram a universalidade e a unicidade do tempo. Ambas as teorias mostram que cada um de nós detém um pedaço do velho tempo universal de Newton e o carrega consigo. Ele se torna o nosso próprio relógio, o nosso próprio guia, que nos leva de um momento ao seguinte. Ficamos chocados com as teorias da relatividade, com o universo tal como ele é, porque o nosso relógio pessoal parece marcar o tempo de maneira uniforme e consoante com o nosso senso intuitivo do tempo, mas se ele for comparado aos

outros relógios aparecerão as diferenças. O tempo para você pode não ser o mesmo que para mim.

Aceitemos essa lição como um dado. Qual é, então, a verdadeira natureza do tempo *para mim*? Qual o caráter do tempo, tal como experimentado e concebido pelo indivíduo, sem colocarmos o foco em comparações com as experiências alheias? Tais experiências refletem acuradamente a verdadeira natureza do tempo? E que nos dizem elas sobre a natureza da realidade?

As nossas experiências nos ensinam, e de maneira avassaladora, que o passado é diferente do futuro. O futuro parece apresentar uma pletora de possibilidades, enquanto o passado limita-se a uma coisa só, ao fato acontecido. Sentimos que podemos afetar e modelar o futuro, de uma maneira ou de outra, mas o passado parece imutável. E entre o *passado* e o *futuro* está o conceito escorregadio do *agora*, um ponto de sustentação temporal que se reinventa a cada instante, como os quadros de um filme que passam pela luz intensa do projetor e se transformam no presente momentâneo. O tempo parece passar em um ritmo perfeitamente uniforme e sem fim, chegando sempre ao tênue destino do *agora* a cada marcação do compasso.

As nossas experiências também nos ensinam que há uma aparente unilateralidade no desenvolvimento das coisas através do tempo. Não adianta chorar pelo leite derramado, porque não há como desderramá-lo: nunca vemos o leite voltar a reunir-se, subir a partir do chão e voltar para o copo na mesa da cozinha. O nosso mundo parece aderir perfeitamente a uma seta temporal que nunca se desvia da estipulação fixa de que as coisas podem começar de *um* jeito e terminar de *outro*, mas *nunca ao contrário.*

Portanto, as nossas experiências nos ensinam duas coisas importantes a respeito do tempo. Em primeiro lugar, *o tempo parece fluir.* É como se estivéssemos na margem do rio do tempo e observássemos a corrente passar, trazendo o futuro até nós, tornando-se o *agora*, no momento em que nos encontra, e continuando a fluir, mergulhando corrente abaixo no passado. Se isso for demasiado passivo para o seu gosto, inverta a metáfora: acompanhamos o rio do tempo em seu avanço incessante, que nos leva de um agora ao próximo, à medida que o passado se esvai com o cenário que passa e o futuro nos aguarda para sempre, corrente abaixo. (As nossas experiências também nos ensinam que o tempo pode inspirar as metáforas mais piegas.) Em segundo lugar, *o tempo parece ter uma seta.* O fluxo do tempo parece ter uma direção única, no sentido em que as coisas acontecem em uma sequência temporal única. Se alguém lhe entrega uma caixa com um pequeno filme de um copo de leite sendo derramado, mas com os quadros todos separados e misturados, você não terá problemas em reconstituir a

sequência do filme, sem nenhuma instrução por parte de quem tenha feito a filmagem. O tempo parece ter uma direção intrínseca, que aponta a partir daquilo que denominamos passado para aquilo que denominamos futuro, e as coisas parecem mudar — o leite se derrama, o ovo se quebra, a vela se queima, as pessoas envelhecem — em um alinhamento universal com essa direção.

Essas características aparentemente simples do tempo geram alguns dos seus enigmas mais torturantes. O tempo realmente passa? Se for assim, o que é que fica passando? E com que velocidade passa essa coisa temporal? O tempo realmente tem uma seta? O espaço, por exemplo, não parece ter uma seta intrínseca — para um astronauta na negritude do cosmo, para a esquerda, para a direita, para o alto e para baixo, é sempre igual. De onde, então, proviria a seta do tempo? Se a seta do tempo existir, será que ela é absoluta? Ou existirão coisas que podem evoluir em uma direção oposta àquela para a qual a seta parece apontar?

Vamos concluir que, em nossa época, temos dessas questões, começando por colocá-las no contexto da física clássica. Assim, no que resta deste capítulo e no próximo (em que discutiremos, respectivamente, o passar do tempo e a seta do tempo), ignoraremos as probabilidades quânticas e a incerteza quântica. Grande parte do que veremos, contudo, traduz-se diretamente para o domínio quântico e no capítulo 7 assumiremos a perspectiva quântica.

O TEMPO PASSA?

Do ponto de vista dos seres sensíveis, a resposta parece óbvia. Ao escrever estas palavras, eu claramente *sinto* o passar do tempo. A cada letra que escrevo, cada *agora* abre caminho para o próximo. Ao ler estas palavras, não há dúvida de que você também sente o passar do tempo, à medida que os seus olhos percorrem a página, palavra por palavra. No entanto, por mais que os físicos tenham tentado, nunca ninguém encontrou nas leis da física o que quer que seja que comprove essa sensação intuitiva de que o tempo passa. Na verdade, um reexame de certas ideias de Einstein sobre o campo da relatividade especial proporciona evidências de que o tempo não passa.

Para bem compreender esse ponto, voltemos ao pão de fôrma com o qual descrevemos o espaço-tempo no capítulo 3. Lembre-se de que as fatias em que se divide o pão são os agoras de determinado observador. Cada fatia representa o espaço em um momento do tempo, a partir da perspectiva desse observador. A união que se obtém colocando-se uma fatia ao lado da outra, na ordem segundo a qual o observador as experimenta, compõe uma região do espaço-tempo. Se levarmos essa perspectiva ao extremo da lógica e imaginarmos que cada fatia

representa *todo o* espaço em dado momento do tempo, de acordo com o ponto de vista de um observador, e se incluirmos todas as fatias possíveis, desde o passado remoto até o futuro distante, o pão compreenderá todo o universo durante todo o tempo — o conjunto do espaço-tempo. Todas as ocorrências, independentemente de quando e de onde, estão representadas em algum ponto do pão.

A figura 5.1 ilustra esquematicamente a situação descrita no parágrafo anterior, mas a perspectiva talvez lhe faça coçar a cabeça. A perspectiva "externa" da figura, através da qual vemos todo o universo, todo o espaço em todos os momentos do tempo, é um ponto de vista fictício, que nunca nenhum de nós pode ter. Todos estamos *dentro* do espaço-tempo. Qualquer experiência que você ou eu tenhamos ocorre sempre em alguma localização do espaço e em algum momento do tempo. E como a figura 5.1 destina-se a representar a totalidade do espaço-tempo, ela compreende a totalidade dessas experiências — as suas, as minhas, as de todos os demais. Se fosse possível fazer um zoom e examinar de perto tudo o que acontece no planeta Terra, você poderia ver Alexandre, o Grande, tomando aulas com Aristóteles, Leonardo da Vinci dando a última pincelada na *Mona Lisa* e dom Pedro i às margens do Ipiranga. Se você continuasse a examinar a imagem da esquerda para a direita, poderia ver a sua avó brincando quando era criancinha, a festa de aniversário de dez anos do seu pai e o primeiro dia em que você foi à escola. Mais à direita ainda, apresentaria você lendo este livro, o nascimento da sua tataraneta e, um pouco mais adiante, o dia em que ela toma posse como presidente. Como a resolução da figura 5.1 é baixa, você não pode ver estes momentos, mas pode ver a história esquemática do Sol e do planeta Terra, desde o seu nascimento como uma nuvem de gás até a destruição da Terra com a transformação do Sol em uma gigante vermelha. Está tudo aí.

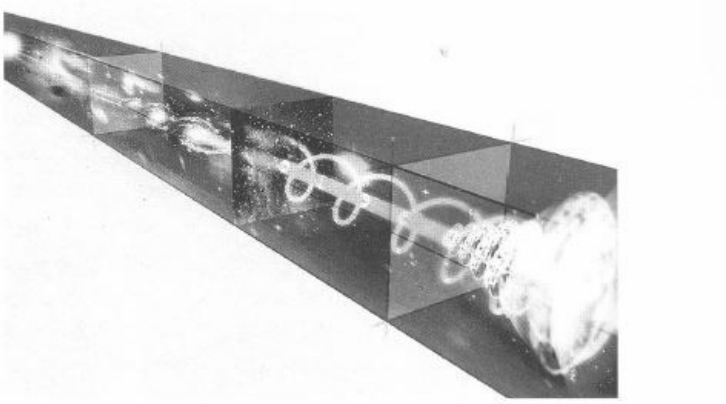


Figura 5.1. *Representação esquemática de todo o espaço durante todo o tempo (que contém aqui, naturalmente, apenas parte do espaço e parte do tempo). A figura mostra a formação de algumas galáxias primitivas, a formação do Sol e da Terra e a morte do nosso planeta, quando o Sol se transformará em uma gigante vermelha, algo que acontecerá no que hoje consideramos futuro distante.*

Sem dúvida, a figura 5.1 usa uma perspectiva imaginária. Ela vem de fora do espaço e do tempo. É uma visão proveniente de um lugar onde não há espaço nem tempo. Mesmo assim — ainda que não possamos sair dos limites do espaço-tempo para ver o conjunto do universo — a descrição esquemática da figura 5.1 nos fornece um instrumento capaz de analisar e esclarecer propriedades básicas do espaço e do tempo. Para início de conversa, o senso intuitivo da passagem do tempo fica vividamente retratado neste esquema, por meio de uma variante da metáfora do projetor de cinema. Podemos imaginar uma luz que ilumina as fatias do tempo, uma após a outra, fazendo com que cada fatia ganhe vida momentaneamente no presente — tornando-a um *agora* momentâneo — para logo em seguida voltar à escuridão, à medida que a luz passa para a fatia seguinte. Agora mesmo, neste modo intuitivo de pensar o tempo, a luz está iluminando a fatia em que você, no planeta Terra, está lendo *esta* palavra, e agora ela já está iluminando a fatia em que você está lendo *esta outra* palavra. Mas lembre-se de que, ainda que esta imagem pareça casar-se com a experiência, os cientistas nunca conseguiram encontrar nada na física que dê realidade a essa luz peregrina. Nunca encontraram nenhum mecanismo físico que singularize cada momento e lhe dê realidade — a realidade de um *agora* momentâneo — à medida que o mecanismo segue impávido rumo ao futuro.

Muito pelo contrário. Embora a *perspectiva* da figura 5.1 certamente seja imaginária, existem evidências convincentes de que o pão do espaço-tempo — a totalidade do espaço-tempo, e não a sua visão fatia por fatia — é real. Uma implicação não muito apreciada da obra de Einstein é a de que a realidade da relatividade especial trata todos os tempos em pé de igualdade. Embora a noção de *agora* tenha um papel fundamental na nossa visão de mundo, a relatividade

subverte a nossa intuição uma vez mais e declara que o universo é igualitário e que nele cada momento é tão real quanto qualquer outro. Afloramos esta ideia no capítulo 3, quando refletíamos sobre o balde giratório no contexto da relatividade especial. Por meio de um raciocínio indireto análogo ao de Newton, chegamos à conclusão de que o espaço-tempo é um "algo" que nos proporciona a referência para o movimento acelerado. Aqui, retomamos o tema a partir de uma nova perspectiva e avançamos um pouco mais. Argumentamos que todos os pontos do pão do espaço-tempo da figura 5.1 existem em pé de igualdade, sugerindo, como acreditava Einstein, que a realidade abarca o passado, o presente e o futuro *por igual* e que o fluxo que imaginemos, em que cada quadro é iluminado à medida que os outros se escurecem, é ilusório.

A PERSISTENTE ILUSÃO DE PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Para compreender a perspectiva de Einstein, necessitamos de uma definição operacional da realidade, um algoritmo, por assim dizer, para determinar que coisas existem em dado momento. Aqui está um enfoque comum. Quando contemplamos a realidade — o que existe *neste* momento — imaginamos mentalmente um tipo de instantâneo, uma imagem mental congelada do universo como um todo *agora*. No momento em que digito estas palavras, o meu senso do que existe *agora*, o meu senso da realidade, equivale a uma lista de todas as coisas — o relógio da cozinha que marca meia-noite; o meu gato que se estica no ar, saltando do chão para a janela; o primeiro raio de sol que ilumina Dublin; o tumulto na bolsa de valores de Tóquio; a fusão de dois átomos de hidrogênio no Sol; a emissão de um fóton pela nebulosa de Orion; o último momento de uma estrela moribunda antes do seu colapso para formar um buraco negro — que estão, neste momento, na minha imagem mental congelada. Essas são as coisas que estão acontecendo *agora* e são, portanto, as coisas que declaro que existem *agora*. Carlos Magno existe agora? Não. Nero existe agora? Não. Dom Pedro n existe agora? Não. Elis Regina existe agora? Não. Nenhum deles está na minha lista atual de "agoras". Alguém nascido no ano 2300, ou 3500, ou 57000 existe agora? Não. Novamente, nenhum deles está na minha imagem mental congelada; nenhum deles está na minha fatia de tempo atual; e, portanto, nenhum deles está na minha lista atual de "agoras". Por conseguinte, digo sem hesitar que eles não existem agora. É assim que defino a realidade em qualquer momento dado. É um enfoque intuitivo usado pela maioria de nós, quando pensamos sobre a existência.

A seguir farei uso dessa concepção, mas fique alerta quanto a um ponto traiçoeiro. Uma lista de agoras — a realidade, segundo esta maneira de pensar — é uma coisa engraçada. Nada do que você está vendo *agora* pertence à sua lista de agoras, porque a luz leva tempo para chegar aos seus olhos. Tudo o que você está vendo *agora* já aconteceu. Você não está vendo as palavras desta página como elas estão agora; o livro está a uns dois palmos dos seus olhos e você vê as palavras como elas eram um bilionésimo de segundo antes. Se olhar à volta da sala, ou do quarto, verá as coisas como elas eram a uns 10 ou 20 bilionésimos de segundo antes; se olhar para o outro lado das cataratas do Iguaçu, verá o outro lado como ele era cerca de um milionésimo de segundo antes; se olhar para a Lua, você a verá como era pouco mais de um segundo antes; o Sol, você o verá como era a uns oito minutos antes; as estrelas visíveis a olho nu, você as verá como eram desde alguns anos-luz antes até uns 10 mil anos-luz antes. Curiosamente, portanto, embora a ideia da imagem mental congelada capte o nosso senso da realidade, ou seja, a nossa percepção intuitiva do que "está aí", ela consiste em eventos que não podemos experimentar, nem afetar, nem mesmo registrar agora. Ao contrário, uma verdadeira lista de agoras só pode ser compilada depois dos fatos. Se você souber a que distância está uma coisa, pode determinar quando ela emitiu a luz que você vê *agora* e pode então determinar a que fatia do seu tempo ela pertence, ou seja, em qual das listas de agoras já ultrapassados ela deve ser registrada. Todavia, e este é o ponto principal, quando usamos essas informações para compilar a lista de agoras para qualquer momento dado, atualizando-a continuamente ao recebermos luz de fontes cada vez mais distantes, as coisas que estão listadas são as coisas que acreditamos intuitivamente que existem naquele momento.

É notável que essa maneira aparentemente direta de pensar leva a um conceito inesperadamente expansivo da realidade. Veja que, de acordo com o espaço e o tempo absolutos de Newton, as imagens congeladas de todos a respeito do universo em dado momento contêm exatamente os mesmos eventos. O *agora* de todos é o mesmo *agora* e, portanto, a lista de agoras de todos para determinado momento é sempre a mesma. Se alguém ou algo está na sua lista de agoras relativa a determinado momento, também estará necessariamente na minha lista de agoras relativa a esse mesmo momento. A intuição da maioria das pessoas ainda se prende a esse tipo de pensamento, mas a história que a relatividade especial nos conta é muito diferente. Veja de novo a figura 3.4. Dois observadores em movimento relativo têm *agoras*— momentos individuais do tempo, a partir da perspectiva de cada um — que são diferentes entre si: os seus agoras cortam o tempo em fatias que têm diferentes ângulos. E *agoras* diferentes

implicam listas de agoras diferentes. Os *observadores que estão em movimento relativo entre si têm concepções diferentes a respeito do que existe em um momento dado e, por conseguinte, têm concepções diferentes da realidade.*
Para as velocidades comuns, o ângulo entre as fatias de agora de dois observadores é minúsculo e por isso nunca percebemos, na vida cotidiana, discrepâncias entre a nossa definição de *agora* e a de qualquer outra pessoa. Por essa razão, a maior parte da discussão sobre a relatividade especial tem por foco o que aconteceria se viajássemos a velocidades enormes — próximas à velocidade da luz — porque a essas velocidades o movimento magnifica tremendamente os efeitos. Mas há outro modo de magnificar a distinção entre dois conceitos de *agora* de dois observadores diferentes, que, na minha opinião, nos dá um enfoque particularmente esclarecedor para a questão da realidade. Tem por base um fato simples: se fatiarmos um pão comum em ângulos ligeiramente diferentes, o efeito produzido sobre as fatias será mínimo. Mas se o pão for *enorme*, a conclusão é diferente. Se abrirmos as lâminas de uma tesoura em um ângulo bem pequeno e se a tesoura for enorme, a separação entre as pontas das duas lâminas será também enorme. Da mesma forma, se cortarmos um pão enorme em ângulos ligeiramente diferentes, o desvio entre as fatias, em um ponto do pão que seja bem distante daquele em que elas se cruzam, também será enorme. Observe a figura 5.2.

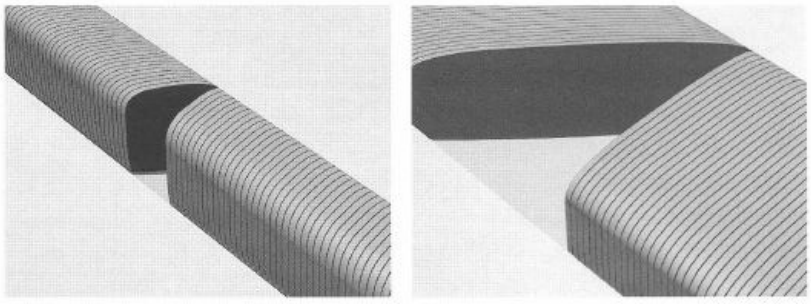
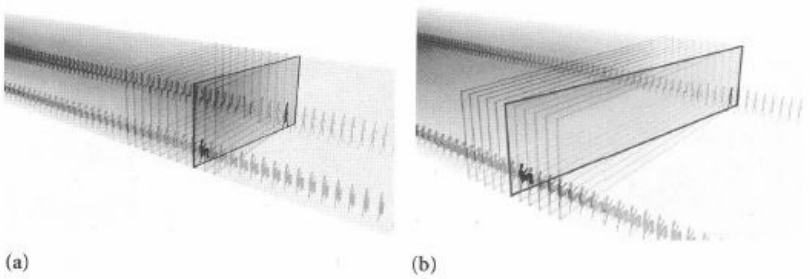


Figura 5.2. (*a*) *Em um pão comum, fatias cortadas em ângulos ligeiramente diferentes não se separam de maneira significativa.* (*b*) *Mas em um pão maior, o mesmo ângulo provoca uma separação maior.*

O mesmo ocorre com relação ao espaço-tempo. Nas velocidades comuns, a orientação das fatias que representam o *agora* para dois observadores em movimento relativo divergem em ângulos muito pequenos e, se os dois observadores estiverem próximos, praticamente não haverá nenhum efeito. Mas, tal como no caso do pão, mesmo os ângulos mínimos geram grandes separações entre as fatias, quando examinamos o seu impacto sobre grandes distâncias. Como no caso das fatias de tempo, um desvio grande entre as fatias significa um

desacordo significativo quanto aos eventos que os observadores consideram simultâneos. Isso é o que ilustram as figuras 5.3 e 5.4, o que implica que os indivíduos que se movem uns com relação aos outros, mesmo em velocidades comuns, têm conceitos cada vez mais diferentes de *agora*, à medida que se afastam um do outro cada vez mais no espaço.

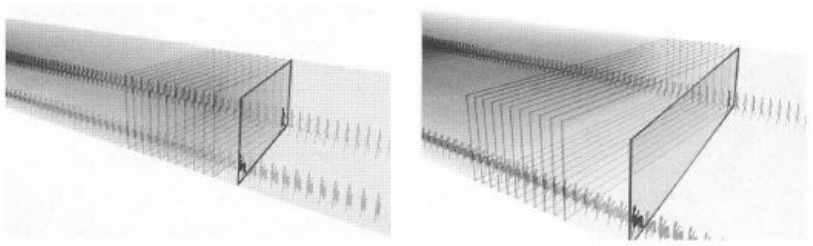


(a) (b)

Figura 5.3. (*a*) *Dois indivíduos que estejam em repouso um com relação ao outro têm conceitos idênticos de* agora *e, por conseguinte, fatias de tempo idênticas. Se um dos observadores se afasta com relação ao outro, as suas fatias de tempo — o que cada observador considera como* agora *— fazem uma rotação entre si. Como se vê na ilustração, a fatia de* agora *do observador em movimento, que aparece escurecida, sofre uma rotação que a leva ao passado do observador estacionário.* (*b*) *Uma separação maior entre os observadores produz um desvio maior entre as fatias — um desvio maior entre os seus conceitos de* agora.

Para vermos um exemplo concreto, imagine que Chewie está em um planeta em uma galáxia muito distante — a 10 bilhões de anos-luz da Terra — sentado e quieto na sala de estar. Imagine também que você (sentado e quieto, lendo estas palavras) e Chewie não estejam em movimento relativo um com relação ao outro (para simplificar, ignoremos os movimentos dos planetas, a expansão do universo, os efeitos gravitacionais, e assim por diante). Como você e Chewie estão em repouso, um com relação ao outro, concordam plenamente quanto às questões do espaço e do tempo: vocês dois cortam as fatias do tempo da mesma maneira e as suas listas de agoras coincidem exatamente. Logo a seguir, Chewie se levanta e sai para uma caminhada tranquila na direção diretamente oposta à sua. A mudança do estado de movimento de Chewie significa que o seu conceito de agora, a maneira como ele corta em fatias o espaço-tempo, sofrerá uma ligeira rotação (veja a figura 5.3). Essa mínima alteração angular não produz nenhum efeito perceptível nas vizinhanças de Chewie: a diferença entre o seu novo agora e o de qualquer outra pessoa que esteja sentada na sua sala é minúscula. Mas para a distância enorme de 10 bilhões de anos-luz, esta mudança mínima no movimento de Chewie amplifica-se (como na passagem da figura 5.3a para a 5.3b) porque a enorme distância que separa os dois protagonistas acentua significativamente a divergência entre os seus agoras. O *seu agora e o agora de Chewie, que eram iguais quando ele estava sentado, passam a divergir amplamente por causa do modesto movimento de Chewie*.

As figuras 5.3 e 5.4 ilustram esquematicamente a ideia-chave, mas o uso de equações da relatividade especial permite-nos calcular a nova diferença entre os seus *agoras.*[1] Se Chewie se afasta de você a pouco mais que dez quilômetros por hora (ele tem um passo bem largo), os eventos aqui na Terra que pertencem à nova lista de agoras de Chewie aconteceram, de acordo com a percepção que você próprio tem, há uns cem anos! De acordo com a concepção de *agora* de Chewie — que é tão válida quanto a sua própria e que pouco tempo antes coincidia plenamente com a sua —, você ainda não nasceu. Se ele se movesse em direção a você à mesma velocidade, a variação angular seria a oposta, como mostra esquematicamente a figura 5.4, e o novo *agora* de Chewie coincidiria com o que para você seria o futuro daqui a cem anos! De acordo com o *agora* de agora de Chewie, você já nem sequer faz parte deste mundo. E se, em vez de apenas caminhar, Chewie entrasse na sua espaçonave e viajasse a uns mil quilômetros por hora (menos que a velocidade do som), o agora dele incluiria eventos terrestres que, na sua perspectiva daqui, teriam ocorrido 10 mil anos antes ou 10 mil anos no futuro, na medida em que o seu voo se aproximasse ou se afastasse de você. Dependendo das diferentes possibilidades de combinações de velocidades e direções, Elis Regina, ou Nero, ou Carlos Magno, ou dom Pedro I, ou algum habitante da Terra que nasça no que você chama futuro estará na nova lista de agoras de Chewie.



(a) (b)

Figura 5.4. (*a*) *Tal como na figura 5.3a, salvo para expressar que, quando um observador se move na direção de outro, a sua fatia de* agora *sofre uma rotação para o futuro e não para o passado do outro observador.* (*b*) *Tal como na figura 5.3b. uma separação maior produz um desvio maior nos conceitos de* agora, *para a mesma velocidade relativa — e a rotação se faz para o futuro e não para o passado.*

Isso pode parecer surpreendente, mas não causa contradições ou paradoxos porque, como explicamos, quanto mais distante esteja um objeto, mais tempo leva até que a luz por ele emitida possa chegar para que se determine a que lista de agoras ele pertence. Por exemplo, ainda que o dia em que o *Titanic* iniciou a sua viagem inaugural esteja na nova lista de agoras de Chewie, se ele se levantar e andar na direção oposta à da Terra a pouco menos de dez quilômetros por hora,[2] não poderá fazer nada para salvar o navio. A essa grande distância, as

mensagens levam um tempo enorme para ser enviadas e recebidas, de modo que só os descendentes de Chewie, daqui a bilhões de anos, receberão a luz emitida da Terra no dia do acidente fatal. O que importa é que, quando os descendentes de Chewie usarem esta informação para atualizar a sua vasta coleção de listas de agoras do passado, verificarão que o naufrágio do *Titanic* pertence à mesma lista de agoras que contém o momento em que Chewie se levantou e andou na direção contrária à da Terra. E eles verão também que um momento antes de Chewie se levantar, a sua lista de agoras continha, entre tantas outras coisas, você, na Terra, no século XXI, sentado quieto, lendo estas palavras.[3]

Do mesmo modo, há coisas relativas ao nosso futuro, como quem vencerá as eleições de 2100, que parecem estar completamente em aberto: muito provavelmente os candidatos àquela eleição ainda nem nasceram, nem decidiram concorrê-la. Mas se Chewie se levantar da cadeira e andar a cerca de 10,2 quilômetros por hora em direção à Terra, a sua fatia de agora — o seu conceito do que existe, o seu conceito do que aconteceu — *incluirá* a escolha do primeiro presidente do século XXII**.** Algo que para nós parece estar ainda completamente indefinido, para ele já terá acontecido. Veja que Chewie não saberá o resultado da eleição por bilhões de anos, pois esse é o tempo que os nossos sinais de televisão levam para chegar até ele. Mas quando a notícia dos resultados eleitorais chegar aos descendentes de Chewie e eles a usarem para atualizar a coleção de listas de agoras do passado de Chewie, verificarão que os resultados eleitorais pertencem à mesma lista de agoras em que ele se levantou e começou a andar na direção da Terra — uma lista de agoras que ocorre, como os descendentes de Chewie observarão, um momento depois de outra que contém você, no início do século XXI da Terra, terminando de ler este parágrafo.

Este exemplo apoia dois pontos importantes. Primeiro, embora tenhamos usado a ideia de que os efeitos relativísticos tornam-se nítidos a velocidades próximas à da luz, mesmo a velocidades baixas os efeitos relativísticos podem ser fortemente amplificados quando considerados a grandes distâncias no espaço. Segundo, o evento nos abre uma perspectiva sobre a questão de se o espaço-tempo (o pão) é realmente uma entidade ou apenas um conceito abstrato, uma união abstrata entre o espaço *agora* e a sua história e o seu futuro presumível.

Veja que o conceito de realidade de Chewie — a sua imagem mental congelada, o seu conceito do que existe *agora* — é tão real para ele quanto o nosso conceito da realidade o é para nós. Portanto, ao avaliarmos o que constitui a realidade, só se tivéssemos uma mentalidade muito estreita deixaríamos de incluir também a sua perspectiva. Para Newton, esse enfoque igualitário não faria a menor diferença porque, em um universo com espaço e tempo absolutos, as fatias de

agora de todos coincidem. Mas, em um universo relativístico como é o nosso, a diferença é grande. Se bem que o conceito familiar do que existe agora corresponda a uma única fatia de agora — usualmente vemos o passado como algo que já ocorreu e o futuro como algo ainda por vir —, temos de ampliar esta imagem para incluir a fatia de agora de Chewie, uma fatia de agora que, como a nossa discussão revelou, pode ser substancialmente diferente da nossa. Além disso, como a localização inicial de Chewie e a velocidade com que ele se move são arbitrárias, temos de incluir as fatias de agoras associadas a todas as possibilidades. Estas fatias de agoras, como na nossa discussão acima, estariam centradas na localização espacial inicial de Chewie — ou de qualquer outro observador real ou hipotético — e sofreria uma rotação a um ângulo que depende da velocidade escolhida. (A única restrição deriva do limite de velocidade estabelecido pela luz, que, como explicado nas notas, corresponde, nas representações gráficas que usamos, a um ângulo rotacional máximo de 45 graus, seja no sentido horário, seja no anti-horário.) Como se vê na figura 5.5, a coleção de todas essas fatias de agoras preenche uma região substancial do pão do espaço-tempo. Na verdade, se o espaço for infinito — se as fatias de agoras se estenderem infinitamente —, as fatias de agoras em rotação podem ter centro em qualquer lugar e a sua união abrange *todos os pontos* do pão do espaço-tempo. (considere qualquer ponto do pão. Marque uma fatia que inclua esse ponto e que faça uma interseção com a nossa fatia de agora atual a um ângulo inferior a 45 graus. Essa fatia representará a fatia de agora — a *realidade* — de um observador distante que inicialmente estava em repouso com relação a nós, como Chewie, mas que agora está se movimentando com relação a nós a uma velocidade menor do que a da luz. No desenho, esta fatia inclui o ponto (arbitrário) do pão que você escolheu[4]).

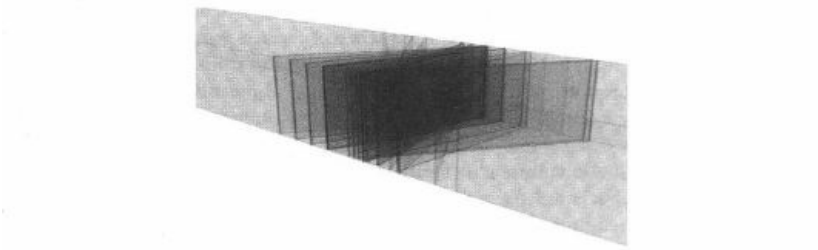


Figura 5.5. *Amostra de fatias de agoras relativas a diversos observadores (reais ou hipotéticos) situados a diversas distâncias da Terra e movendo-se em velocidades diferentes.*

Portanto: *Se você aceita a noção de que a realidade consiste nas coisas que estão agora na sua imagem mental congelada e se concorda que o seu agora não tem validade superior ao agora de outra pessoa que esteja muito distante no espaço e que possa mover-se livremente, então a realidade compreende todos os eventos do espaço-tempo.* O pão total existe. Assim como podemos conceber a totalidade do espaço como algo que *realmente* está presente, que realmente

existe, também deveríamos conceber a totalidade do tempo como algo que realmente está presente, que *realmente* existe. O presente, o passado e o futuro parecem ser de fato entidades distintas. Mas, como uma vez disse Einstein, "Para nós, físicos convictos, a distinção entre o passado, o presente e o futuro é apenas uma ilusão, ainda que persistente".[5] A única coisa real é a totalidade do espaço-tempo.

A EXPERIÊNCIA E O FLUXO DO TEMPO

Segundo essa maneira de pensar, os eventos, independentemente de quando ocorram com relação a qualquer perspectiva particular, simplesmente *existem.* Todos eles existem. Eles ocupam para sempre o seu ponto particular no espaço-tempo. Não há fluxo. Se você estava se divertindo a valer à meia-noite do ano-novo de 1999, você ainda está, pois esta é uma das localizações imutáveis do espaço-tempo. É difícil aceitar esta descrição porque a nossa visão de mundo faz uma distinção marcada entre o passado, o presente e o futuro. Mas se observarmos com atenção esse esquema temporal que nos é familiar e o confrontarmos com os frios fatos da física moderna, o único lugar em que ele pode existir parece ser a mente humana.

Inegavelmente, a nossa experiência consciente parece abarcar todas as fatias. É como se a nossa mente fornecesse a luz do projetor a que nos referimos antes, para que os momentos do tempo ganhem vida quando iluminados pelo poder da consciência. A sensação do fluxo que vai de um momento para o próximo deriva do nosso reconhecimento consciente de que os nossos pensamentos, sentimentos e percepções mudam. E a sequência da mudança parece ter um movimento contínuo; parece desdobrar-se em uma história coerente. Mas, sem nenhuma pretensão de precisão psicológica ou neurobiológica, podemos imaginar como vivenciaríamos o fluxo do tempo mesmo que ele não existisse na verdade. Para compreender o sentido dessa observação, imagine ver *E o vento levou* em um DVD com defeito, que passa de um trecho a outro do filme aleatoriamente, de maneira que as cenas se sucedem fora de ordem. Ao assistir a essa versão desconjuntada do filme, você dificilmente entenderá o que está acontecendo. Mas Scarlett e Rhett não teriam problemas: em cada cena eles fazem o que sempre fizeram. Se você pudesse parar o DVD em uma cena qualquer e lhes perguntasse sobre o que pensam ou do que se lembram, eles dariam as mesmas respostas de sempre. Se você lhes perguntasse se foi muito difícil passar pela guerra civil com as cenas fora de ordem, eles o olhariam sem compreender e achariam que você talvez tivesse tomado umas e outras. Em qualquer cena, eles

expressariam os pensamentos e as memórias que sempre tiveram — e, em particular, esses pensamentos e memórias lhes dariam a sensação de que o tempo passa de maneira coerente em direção ao futuro, como sempre.

Do mesmo modo, cada momento do espaço-tempo — cada fatia de tempo — é como um dos quadros do filme, que existe ainda que a luz do projetor não o esteja iluminando. Para Scarlett e Rhett, para a pessoa que esteja presente nesse momento, ele *é o agora*, o momento que se vivência *naquele* instante. E será sempre assim. Além disso, em cada fatia os seus pensamentos e memórias são suficientemente ricos para propiciar a sensação de que o tempo fluiu de forma contínua até aquela hora. Este sentimento, esta sensação de que o tempo passa, não requer momentos anteriores — quadros anteriores — para ser "sequencialmente iluminado".[6]

Se você pensar mais um pouco a esse respeito, verá que é muito bom que seja assim, porque a ideia de um projetor de luz que dê vida e sequência aos momentos é muito problemática por uma razão ainda mais básica. Se a luz do projetor fizesse o seu trabalho e iluminasse determinado momento — digamos à meia-noite da passagem do ano de 1999 —, que significaria o fato de esse momento mergulhar em seguida na escuridão? Se o momento fosse iluminado, então a iluminação seria uma característica do momento, tão eterna e imutável como tudo o mais que acontecia naquela hora. Experimentar a iluminação — vir à "vida", ser o presente, ser o *agora* — e em seguida experimentar a escuridão — estar "dormindo", ser o passado, ser o que já foi — é experimentar a mudança. *Mas o conceito de mudança não tem significado com respeito a um momento único do tempo.* A mudança teria de ocorrer através do tempo; ela marcaria a passagem do tempo, mas que noção de tempo seria essa? Por definição, os momentos *não incluem* a passagem do tempo — pelo menos no caso do tempo que conhecemos — porque os momentos simplesmente existem; eles são a matéria-prima do tempo; eles *não mudam.* Um momento particular não pode mudar no tempo, assim como uma localização particular não pode mudar no espaço: se a localização mudasse de lugar, seria uma outra localização. Se o momento mudasse, também seria outro momento. A ideia intuitiva do projetor que traz à vida cada novo *agora* não resiste a um exame cuidadoso. Todos os momentos são iluminados e todos os momentos permanecem iluminados. Todos os momentos *existem.* Diante do nosso exame, a corrente fluvial do tempo mais parece um gigantesco bloco de gelo em que todos os momentos estão para sempre congelados em seus lugares.[7]

Este conceito do tempo é significativamente diferente do que está internalizado na maioria de nós. Ainda que seja uma derivação das próprias ideias de Einstein,

o grande cientista nunca se reconciliou com a dificuldade de absorver por inteiro uma mudança tão profunda de perspectiva. Rudolf Carnap[8] relatou uma maravilhosa conversa que teve com Einstein sobre esse assunto: “Einstein disse que o problema do agora o preocupava seriamente. Explicou que a experiência do agora significa algo especial para os homens, algo essencialmente diferente do passado e do futuro, mas que essa importante diferenciação não ocorre e não pode ocorrer na física. O fato de que essa experiência não possa ser assimilada pela ciência provocava nele uma penosa e inevitável sensação de resignação”.

Tal resignação deixa uma questão vital em aberto: será que a ciência não é capaz de lidar com uma qualidade fundamental do tempo que a mente humana assimila com a mesma facilidade com que os nossos pulmões respiram o ar? Ou será que a mente humana impõe ao tempo uma qualidade artificial, criada por ela própria e, portanto, inexistente nas leis da física? Se você me fizesse essa pergunta durante um dia de trabalho, eu ficaria com a última perspectiva, mas à noite, quando os pensamentos críticos se suavizam com a rotina da vida, é difícil manter uma atitude de resistência ao primeiro ponto de vista. O tempo é um tema sutil e nós estamos longe de entendê-lo por completo. É possível que, algum dia, uma pessoa genial venha a produzir um novo modo de ver o tempo e a revelar uma base física bem construída para um tempo que flua. Nesse caso, como em outros que *já* vimos, a nossa discussão, baseada na lógica e na relatividade, não estará completa. O sentimento de que o tempo passa está, contudo, profundamente entranhado na nossa experiência e permeia todo o nosso pensamento e a nossa linguagem. Tanto é assim que caímos e continuaremos a cair em descrições habituais e coloquiais que se referem ao tempo como algo que passa. Mas não confundamos linguagem e realidade. A linguagem humana é muito mais capaz de captar as nossas experiências do que de expressar a profundidade das leis da física.

6. O acaso e a seta

O tempo tem uma direção?

Mesmo que o tempo não passe, continua sendo válido perguntar se ele tem uma seta — se existe, na maneira como as coisas se desdobram *no* tempo, uma direção que possa ser discernida pelas leis da física. Trata-se da questão de saber se existe uma ordem intrínseca na maneira como os eventos se distribuem ao longo do espaço-tempo e se existe uma diferença científica essencial entre o ordenamento dos eventos e o ordenamento reverso. Como todos sabemos, parece claríssima a existência desse tipo de distinção. É o que dá esperança à vida e pungência à experiência. Contudo, como veremos, explicar a distinção entre o passado e o futuro é mais difícil do que pode parecer. O mais interessante é que a resposta a que chegaremos está intimamente ligada às condições precisas que vigiam na origem do universo.

O QUEBRA-CABEÇA

Mil vezes por dia, as nossas experiências revelam uma distinção entre o desdobramento das coisas em um sentido no tempo e o seu reverso. A pizza sempre esfria um pouco no caminho da pizzaria até a sua casa e nunca chega mais quente do que estava quando saiu do forno. O óleo de oliva se espalha pela salada e nunca o vemos voltar para o frasco e deixar a salada sem tempero. Os ovos se quebram e se espatifam e nunca vemos os ovos e as cascas se reaglutinarem e voltarem a formar um ovo inteiro. O dióxido de carbono comprimido em uma garrafa de refrigerante escapa quando a abrimos e nunca o vemos voltar a reunir-se e comprimir-se dentro da garrafa. Os cubos de gelo se derretem quando trazidos para a sala e nunca os vemos voltar a congelar-se na temperatura ambiente. Estas sequências corriqueiras de eventos, assim como inumeráveis outras, acontecem em uma única ordem temporal. Nunca acontecem na ordem reversa, e com isso nos fornecem uma noção de antes e depois. Elas nos dão um conceito consistente e aparentemente universal de passado e futuro. Tais observações nos convencem de que, se examinássemos a totalidade do espaço-tempo a partir de uma perspectiva externa (como na figura 5.1), encontraríamos uma assimetria significativa ao longo do eixo do tempo. Os ovos quebrados de todo o mundo estariam do lado posterior — o lado que

convencionalmente chamamos de futuro — com relação aos ovos inteiros e não espatifados.

Talvez o melhor exemplo de todos seja o de que as nossas mentes parecem ter acesso a um conjunto de eventos que denominamos passado — as nossas recordações —, mas ninguém parece capaz de recordar o conjunto de eventos que denominamos futuro. Parece óbvio, portanto, que há uma grande diferença entre passado e futuro. Parece haver uma orientação manifesta na maneira como a enorme variedade das coisas se desdobra no tempo. Parece haver uma distinção manifesta entre as coisas que podemos recordar (o passado) e as que não podemos recordar (o futuro). Isso é o que queremos dizer ao falar que o tempo tem uma orientação, uma direção ou uma seta.[1]

A física e a ciência em geral baseiam-se em regularidades. Os cientistas estudam a natureza, encontram padrões e os codificam em leis naturais. Pode-se pensar, portanto, que a enorme riqueza de regularidade que nos leva a perceber uma aparente seta do tempo seja a comprovação de uma lei fundamental da natureza. Uma maneira grosseira de formular essa lei aparece na lei do leite derramado, que diz que os copos de leite se derramam, mas não se desderramam, ou a lei dos ovos quebrados, que diz que os ovos se quebram e se espatifam, mas não se desespatifam nem se desquebram. Porém esse tipo de lei não nos leva a lugar algum: é meramente descritivo e não oferece nenhuma explicação, além da simples observação do que acontece. O que esperamos é que em algum lugar, nas profundezas da física, exista uma lei menos tola que descreva o movimento e as propriedades das partículas que constituem a pizza, o leite, os ovos, o café, as pessoas e as estrelas — os componentes fundamentais de todas as coisas — e mostre por que tudo se desdobra através de determinada sequência de etapas, e nunca no sentido inverso. Essa lei daria uma explicação fundamental para a seta do tempo.

O que é incrível é que ninguém até agora tenha descoberto essa lei. E ainda por cima, as leis da física, articuladas pela ciência, de Newton a Maxwell, de Einstein até hoje revelam uma *completa simetria entre passado e futuro.*(há uma exceção a esta afirmação, que tem a ver com uma certa classe de partículas exóticas. No que se refere às questões discutidas neste capítulo, considero que ela provavelmente tenha pouca relevância e, portanto, não voltarei a mencioná-la. Se você tiver interesse, veja a nota 2, onde ela é brevemente discutida). Nessas leis não se encontra nenhuma estipulação segundo a qual elas se aplicariam no tempo em um sentido e não no outro. Em nenhum lugar existe qualquer distinção na aparência ou no comportamento das leis conforme elas sejam aplicadas em uma ou na outra direção do tempo. As leis tratam o que denominamos passado e futuro em absoluto pé de igualdade. Ainda que a experiência revele

continuamente que os eventos se desdobram no tempo segundo uma seta, essa seta nunca foi encontrada nas leis fundamentais da física.

O PASSADO, O FUTURO E AS LEIS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA

Como é que pode? As leis da física não dão nenhum apoio que nos permita distinguir entre passado e futuro? Como pode ser que não exista nenhuma lei da física que explique que os eventos fluem *nesta* ordem, e não na ordem contrária? A situação é ainda mais enigmática. As leis da física que conhecemos na verdade declaram — ao contrário das nossas experiências de vida — que a salada pode separar-se em verduras e óleo de oliva; que o ovo quebrado e a sua casca espatifada podem reunir-se novamente e formar um ovo inteiro e perfeito; que o gelo derretido em um copo a temperatura ambiente pode congelar-se novamente e formar cubos; que o gás que escapa quando abrimos a garrafa de refrigerante pode voltar para o seu interior. Todas as leis da física que tanto estimamos dão total apoio ao que denominamos *simetria de inversão temporal*. Trata-se da afirmação de que se uma sequência de eventos pode desdobrar-se em determinada ordem temporal (o óleo e as verduras se misturam, os ovos se quebram, o gás escapa da garrafa), pode também desdobrar-se no sentido inverso (as verduras e o óleo se separam, os ovos se desquebram, o gás volta para a garrafa). Em breve veremos mais sobre este ponto, mas o resumo final é que não só as leis conhecidas não nos dizem por que os eventos se desdobram em uma ordem única, mas também nos dizem que, teoricamente, os eventos podem desdobrar-se na ordem inversa.(veja que a simetria de inversão temporal não se refere a que o próprio tempo se inverta e passe a andar para trás. Ao contrário, como temos indicado, a simetria de inversão temporal preocupa-se em determinar se os eventos que acontecem no tempo, em uma ordem temporal particular, podem também acontecer na ordem inversa. Uma formulação mais apropriada seria inversão de eventos, ou inversão de processos, ou ainda inversão da ordem dos eventos, mas ficaremos com o termo convencional).

O que se pergunta é: por que nunca vemos essas coisas? Acho que podemos apostar que ninguém nunca foi testemunha de que um ovo espatifado se tenha desespatifado. Mas se as leis da física o permitem e se, além disso, essas leis tratam o espatifar-se e o desespatifar-se em pé de igualdade, por que um acontece sempre e o outro nunca?

SIMETRIA DE INVERSÃO TEMPORAL

Como passo inicial para resolver este desafio, precisamos compreender em termos mais concretos o que significa dizer que as leis da física, como as conhecemos, são simétricas com relação à inversão do tempo. Imagine, para

isso, que estamos no século XXV e que você está jogando tênis no novo torneio interplanetário com o seu amigo Coolstroke Williams. Coolstroke, que não está acostumado à gravidade reduzida de Vênus, dá um poderoso golpe que manda a bola às profundezas do espaço exterior. Uma nave espacial filma o lance e o envia à CNN (Celestial News NetWork). Eis a questão: se os técnicos da CNN cometessem um erro e divulgassem o filme da bola de tênis ao contrário, haveria como identificar o erro? Naturalmente, se se conhecessem a posição e a orientação da câmera durante a filmagem isso poderia ser feito.

Mas seria possível fazê-lo apenas vendo-se o filme, sem nenhuma informação adicional? A resposta é não. Se na direção correta do tempo (para a frente) o filme mostrasse a bola flutuando da esquerda para a direita, então, no sentido oposto, a bola apareceria flutuando da direita para a esquerda. E as leis da física certamente permitem que as bolas de tênis se movam, seja para a direita, seja para a esquerda. Portanto, o movimento que se vê, tanto quando o filme é rodado para a frente quanto para trás, é perfeitamente consistente com as leis da física.

Até aqui imaginamos que nenhuma força esteja atuando sobre a bola de tênis, a qual, assim, se desloca a velocidade constante. Consideremos agora a situação mais geral, que inclui as forças. De acordo com Newton, o efeito de uma força é o de modificar a velocidade de um objeto: as forças produzem acelerações. Imagine então que, depois de flutuar algum tempo pelo espaço, a bola seja capturada pelo campo gravitacional de Júpiter, o que faz com que ela se mova com velocidade crescente em um arco que descreve uma trajetória para baixo e para a direita, em direção à superfície de Júpiter, como se vê nas figuras 6.1a e 6.1b. Se mostrarmos um filme desse movimento em sentido inverso, a bola de tênis aparecerá descrevendo um arco para cima e para a esquerda, afastando-se da superfície de Júpiter, como na figura 6.1c. Eis a nova questão: o movimento descrito pelo filme exibido no sentido inverso — a inversão no tempo do que foi efetivamente filmado — é permitido pelas leis da física? Trata-se de um movimento que poderia ocorrer no mundo real? À primeira vista a resposta parece ser obviamente sim: as bolas de tênis podem descrever arcos para cima ou para baixo, para a esquerda ou para a direita, ou de qualquer outra maneira. Qual é, então, a dificuldade? Embora a resposta seja efetivamente “sim”, este raciocínio é capcioso e não capta o sentido real da indagação.

Ao passar o filme em sentido contrário, vê-se a bola de tênis saltar da superfície de Júpiter, movendo-se para cima e para a esquerda, exatamente com a mesma velocidade (mas exatamente na direção oposta) que tinha quando atingiu o planeta. Esta parte inicial do filme com certeza é consistente com as leis da física: podemos imaginar, por exemplo, que alguém tenha lançado a bola a partir da superfície de Júpiter precisamente com essa velocidade. A questão essencial é

saber se *o resto* do filme invertido também é consistente com as leis da física. Uma bola lançada com essa velocidade inicial — e sujeita à atração gravitacional de Júpiter — mover-se-ia segundo a trajetória descrita durante o restante do filme invertido? Ela reproduziria exatamente a trajetória descendente original, mas ao inverso?

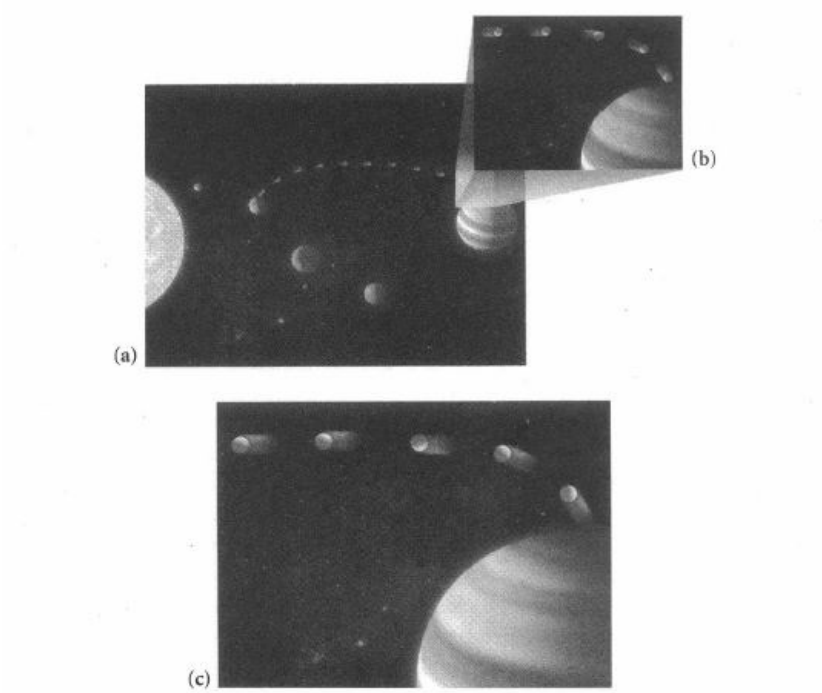


Figura 6.1. (*a*) *Uma bola de tênis voa de Vênus para Júpiter.* (*b*) *Visão mais aproximada desse movimento.* (*c*) *Movimento da bola com inversão da velocidade e da direção antes que ela alcance Júpiter.*

A resposta para esta pergunta mais sofisticada é *sim.* Para evitar confusões, vamos explicar. Na figura 6.1a, antes de que a gravidade de Júpiter pudesse exercer qualquer efeito significativo, a bola ia somente para a direita. A seguir, na figura 6.1b, a poderosa força gravitacional de Júpiter domina a bola e a atrai em direção ao centro do planeta — trazendo-a sobretudo para baixo, mas também, como se vê na figura, um pouco para a direita. Isso significa que à medida que a bola se aproxima da superfície de Júpiter, a sua velocidade para a direita aumenta um pouco, mas a sua velocidade para baixo aumenta intensamente. No filme invertido, portanto, a trajetória do lançamento da bola a partir da superfície de Júpiter se dirigiria um tanto *para a esquerda* e predominantemente *para cima*, como na figura 6.1c. A partir dessa velocidade inicial, a gravidade de Júpiter exerceria um impacto maior sobre a velocidade ascendente da bola, fazendo-a desacelerar-se progressivamente, ao mesmo tempo que causaria também uma desaceleração da velocidade da bola para a

esquerda, mas com menor intensidade. Com a rápida diminuição da velocidade ascendente da bola, o seu movimento passaria a estar cada vez mais dominado pela sua velocidade em direção à esquerda, com o que ela passaria a seguir uma trajetória em arco para cima e para a esquerda. Próximo ao final desse arco, a gravidade já teria anulado todo o movimento ascendente, assim como a velocidade adicional para a direita que a gravidade de Júpiter transferira à bola quando da sua descida, fazendo com que ela se movesse exclusivamente para a esquerda, exatamente com a mesma velocidade que tinha na sua aproximação inicial.

Tudo isso pode ser posto em forma quantitativa, mas o que importa é observar que esta trajetória é exatamente o inverso do movimento original da bola. Basta trocar o movimento da bola, como na figura 6.1c — atribuindo-lhe a mesma velocidade, mas no sentido oposto — para que ela reproduza por completo a trajetória original, porém no sentido inverso. Trazendo o filme de volta à discussão, vemos que a trajetória que forma o arco ascendente e para a esquerda — trajetória a que chegamos com base nas leis do movimento de Newton — é exatamente o que veríamos passando o filme do fim para o começo. Portanto, o movimento inverso da bola, registrado no filme que passa do fim para o começo, concorda com as leis da física tão exatamente quanto o movimento original, do começo para o fim. O movimento que veríamos no filme inverso é aquele que ocorreria *de verdade* no mundo real.

Embora haja algumas sutilezas que releguei para as notas ao final do livro, esta conclusão tem validade geral.[2] Todas as leis conhecidas e aceitas para o movimento — da mecânica newtoniana que acabamos de discutir à teoria eletromagnética de Maxwell e às teorias da relatividade especial e geral de Einstein (lembre-se de que estamos deixando a mecânica quântica para o próximo capítulo) — incorporam a simetria de inversão temporal: o movimento que pode ocorrer na direção normal do tempo também pode ocorrer na direção inversa. Como a terminologia pode trazer alguma confusão, permita-me salientar que não estamos invertendo o tempo. Ele faz o que faz sempre. A nossa conclusão é a de que *podemos fazer com que um objeto trace a sua trajetória ao contrário simplesmente invertendo a sua velocidade e direção em qualquer ponto do caminho.* Do mesmo modo, idêntico procedimento — a inversão da velocidade e da direção do objeto em um ponto qualquer do caminho — faria com que o objeto executasse o movimento que vimos no filme passado do fim para o começo.

BOLAS DE TÊNIS E OVOS ESPATIFADOS

Olhar a trajetória de uma bola de tênis entre Vênus e Júpiter — em qualquer direção — não chega a ser muito interessante. Mas como a conclusão a que chegamos tem ampla aplicação, vamos a um lugar mais atraente: a cozinha. Coloque um ovo sobre a mesa e faça-o rolar até a beira; deixe-o cair e espatifar-se. Há muitos movimentos nesta sequência de eventos. O ovo cai. A casca se quebra. A clara e a gema se espalham. O chão vibra. Rodamoinhos se formam no ar circundante. A fricção gera calor, o que faz com que os átomos e moléculas do ovo, do chão e do ar se agitem com maior rapidez. Mas assim como as leis da física nos mostram de que forma podemos fazer a bola de tênis traçar precisamente o seu caminho no sentido inverso, as mesmas leis nos mostram como podemos fazer também com que cada pedaço da casca do ovo, cada gota da clara e da gema, cada ponto do chão e cada região do ar trace precisamente o seu caminho no sentido inverso. “Tudo” o que é necessário é inverter a velocidade e a direção de todos os componentes do experimento. Mais exatamente, o raciocínio usado com a bola de tênis implica que se, hipoteticamente, fôssemos capazes de inverter simultaneamente a velocidade e a direção de *todos* os átomos e moléculas direta ou indiretamente envolvidos com o ovo espatifado, *todos* os movimentos do experimento ocorreriam de trás para a frente.

De novo, como no caso da bola de tênis, se lográssemos inverter todas essas velocidades e direções, o que veríamos pareceria um filme passado de trás para a frente. Mas, ao contrário do caso da bola de tênis, a inversão do movimento do ovo espatifado seria extremamente impressionante. Uma onda de moléculas de ar agitadas e de vibrações do chão convergiria no local da colisão a partir de todas as partes da cozinha, fazendo com que todos os pedaços da casca do ovo e todas as gotas da clara e da gema retornassem ao ponto do impacto. Cada componente se moveria exatamente com a mesma velocidade que tinha no início do experimento, mas agora no sentido oposto. As gotas do ovo voariam de volta para reunir-se em um glóbulo, e os pedaços da casca voltariam a alinhar-se perfeitamente e fundir-se de novo para conter o ovo inteiro. As vibrações do ar e do chão conspirariam com o movimento confluente de todas as gotas e pedaços de casca para dar ao ovo recém-reformado o impulso exatamente necessário para que ele saltasse do chão e retornasse à mesa da cozinha, tocando-a com suavidade bem na beirada e com um movimento rotacional precisamente suficiente para rolar alguns centímetros e atingir o estado de repouso. Isso é o que *aconteceria* se conseguíssemos executar a tarefa de inverter a velocidade e a direção de todas as coisas envolvidas.[3]

Assim, seja para um evento simples, como a trajetória de uma bola de tênis, seja

para algo mais complexo, como um ovo que se espatifa, as leis da física demonstram que o que sucede em uma direção temporal pode, pelo menos em princípio, suceder também no sentido inverso.

PRINCÍPIO E PRÁTICA

As histórias da bola de tênis e do ovo não servem apenas para ilustrar a simetria de inversão temporal nas leis da natureza. Elas também sugerem o porquê de vermos, no mundo das experiências reais, que muitas coisas acontecem de uma maneira, mas nunca no sentido inverso. Fazer a bola de tênis reverter a sua trajetória não foi tão difícil. Nós a tomamos e a lançamos de volta com a mesma velocidade, mas no sentido contrário. E pronto. Mas reunir todos os detritos caóticos do ovo e reverter o seu caminho seria monumentalmente mais difícil. Seria necessário recolher cada um dos pedacinhos derramados e espalhados e mandá-los simultaneamente de volta, com a mesma velocidade, mas no sentido contrário. Isso está claramente além do que nós (e todos os cientistas do mundo) somos capazes de fazer.

Então encontramos a resposta que procurávamos? A razão pela qual os ovos se espatifam mas não se desespatifam, embora ambas as ações sejam permitidas pelas listas de agoras, será de ordem prática? A resposta será simplesmente que é fácil fazer um ovo espatifar-se — cair da mesa —, mas extraordinariamente difícil fazê-lo desespatifar-se?

Bem, se fosse essa a resposta, acredite que eu não teria perdido tanto tempo com essa pergunta. O problema da facilidade *versus* a dificuldade é uma parte *essencial* da resposta, porém o quadro completo em que ela se insere é muito mais sutil e surpreendente. Logo chegaremos lá, mas primeiro temos que tornar esta discussão um pouco mais precisa e isso nos leva ao conceito de entropia.

ENTROPIA

Gravado em uma lápide no Zentralfriedhof, em Viena, próximo aos túmulos de Beethoven, Brahms, Schubert e Strauss, aparece a equação $S = k \log W$, que expressa a formulação matemática de um poderoso conceito conhecido como *entropia*. A lápide leva o nome de Ludwig Boltzmann, um dos físicos mais conceituados que trabalharam na virada do século anterior. Em 1906, com a saúde abalada e sofrendo de depressão, Boltzmann suicidou-se quando estava de férias com a mulher e a filha, na Itália. Ironicamente, poucos meses depois os

experimentos começaram a mostrar que as ideias que Boltzmann passara a vida defendendo com paixão estavam corretas.

A noção de entropia foi desenvolvida inicialmente durante a Revolução Industrial por cientistas que se preocupavam com a operação de fornos e máquinas a vapor e que ajudaram a desenvolver o campo da termodinâmica. As ideias básicas foram sendo refinadas durante muitos anos em um processo que culminou com a teoria de Boltzmann. A sua versão da entropia, expressa de maneira concisa na equação que aparece no seu túmulo, emprega o raciocínio estatístico para estabelecer um vínculo entre o enorme número de componentes individuais que integram um sistema físico e as propriedades globais desse sistema.[4]

Para ter uma ideia, imagine que você desencaderna um exemplar de *Guerra e paz*, joga bem alto e para cima as suas 693 folhas e volta a reuni-las em uma pilha, depois que elas se espalham pelo chão.[5] O exame da pilha mostrará que é esmagadoramente mais provável que as páginas estejam fora de ordem. A razão é óbvia. Há múltiplas maneiras em que as folhas podem desordenar-se, mas uma só em que a ordem esteja correta. Evidentemente, para que as páginas estejam em ordem, é necessário que se sucedam precisamente: 1, 2; 3, 4; 5, 6; até 1385; 1386. Qualquer outro arranjo estará fora de ordem. É simples mas essencial frisar que, na ausência de outras variáveis, quanto mais maneiras existirem para que uma coisa possa acontecer, mais provável será que ela aconteça. E se uma coisa pode acontecer em um número *enormemente* maior de maneiras, como é o caso de que as páginas se agrupem fora da ordem numérica, é *enormemente* mais provável que isso aconteça. Isso nós sabemos intuitivamente. Se você comprar um bilhete de loteria, há apenas um modo de ganhar o prêmio. Se comprar 1 milhão de bilhetes de números diferentes, haverá 1 milhão de maneiras em que você pode ganhar e as suas chances serão 1 milhão de vezes maiores.

A entropia é um conceito que dá precisão a esta ideia, contando-se o número de maneiras, de modo consistente com as leis da física, em que determinada situação física pode realizar-se. *Alta entropia significa que há muitas maneiras; baixa entropia significa que há poucas maneiras.* Se as páginas de *Guerra e Paz* caírem na ordem numérica correta, teremos uma configuração de baixa entropia, porque há um único ordenamento que satisfaz esse critério. Se as páginas caírem fora da ordem numérica, teremos uma situação de alta entropia, porque basta um pequeno cálculo para determinarmos que há:

12455219845377834336600293537049882916336110124638904513688769126
69769269249467383642278227334577671807331624043363695277118367410

— cerca de 10^{1878} — maneiras em que as páginas caem fora de ordem.[6] Se você

jogar as folhas para cima e reuni-las em uma pilha é praticamente certo que elas estarão fora da ordem numérica porque essas configurações têm uma entropia enormemente maior — há muitíssimas maneiras em que ocorre o resultado fora de ordem — do que o único ordenamento em que elas cairiam na ordem numérica correta.

Em princípio, poderíamos usar as leis da física clássica para calcular exatamente em que lugar cada folha pousaria depois de terem todas sido arremessadas ao ar. Também em princípio, poderíamos prever precisamente o arranjo resultante de todas as páginas[7] e assim (mas não segundo a mecânica quântica, que estaremos ignorando até o próximo capítulo) pareceria não haver necessidade de recorrer a noções probabilísticas, como saber que resultado é mais ou menos provável que outro. No entanto o raciocínio estatístico é poderoso e útil. Se *Guerra e paz* fosse um panfleto de umas poucas páginas, poderíamos lograr completar os cálculos necessários, mas fazer isso com o verdadeiro *Guerra e paz* seria impossível.[8] Seguir o movimento de cada uma das 693 folhas flexíveis de papel no processo de serem colhidas pelas suaves correntes do ar, roçarem, escorregarem e baterem umas com as outras seria uma tarefa absolutamente monumental, muito além da capacidade dos mais poderosos supercomputadores.

Além disso — e este é um ponto crítico —, a resposta nem sequer teria grande utilidade. Quando se examina a pilha de folhas resultante, pouco interesse há em conhecer os detalhes da posição relativa de cada folha, pois o que importa é a questão geral de se elas estão ou não na ordem certa. Se assim estiverem, ótimo. Você pode sentar-se e continuar lendo sobre Ana Pavlovna e Nicolai Ilitch Rostov, normalmente. Mas se as páginas não estiverem na ordem correta, os detalhes do desarranjo provavelmente não chamarão a sua atenção. Todas as formas do desarranjo mais ou menos se equivalem. A menos que, por algum estranho motivo, preste grande atenção nas minúcias referentes à posição final de cada página, você nem ficaria sabendo se uma outra pessoa chegasse e embaralhasse ainda mais a pilha. Tanto nesse caso quanto no original haveria simplesmente uma pilha desarranjada. O raciocínio estatístico não só é muitíssimo mais fácil de efetuar, mas também o resultado por ele produzido — ordem *versus* desordem — é mais relevante para o seu interesse real, para o tipo de coisa em que normalmente prestamos atenção.

Esse tipo de pensamento sobre a questão como um todo é essencial para a base estatística do raciocínio entrópico. Cada bilhete de loteria tem a mesma chance de ganhar, igual à de qualquer outro. Se você jogar para o alto as folhas de *Guerra e Paz*, todos os resultados finais para o arranjo das páginas terão a mesma probabilidade. O que dá agilidade ao raciocínio estatístico é a nossa

declaração de que há duas *classes interessantes* de configuração das páginas: em ordem ou fora de ordem. A primeira classe tem um integrante (a ordem correta: 1,2; 3,4; e assim por diante) e a outra tem um enorme número de integrantes (todos os outros ordenamentos possíveis). Essas duas classes compõem um conjunto adequado para o nosso uso, uma vez que, como acima, elas captam a avaliação global e genérica que você faz ao folhear a pilha resultante.

Mesmo assim, pode-se pensar em fazer distinções mais delimitadas entre essas duas classes, tais como arranjos apenas com algumas folhas fora de ordem, apenas com folhas do primeiro capítulo fora de ordem, e assim por diante. Com efeito, por vezes pode haver utilidade em considerarmos essas classes intermediárias. Mas o número de arranjos possíveis em cada uma dessas subclasses é ainda extremamente pequeno em comparação com o número de arranjos da classe totalmente fora de ordem. Por exemplo, o número total de arranjos fora de ordem que envolvem apenas páginas da Parte Um de *Guerra e Paz é* uma fração igual a 10^{178} de 1% do número total de arranjos fora de ordem que envolvem todas as páginas. Portanto, embora nos lançamentos iniciais do livro desfolhado os arranjos resultantes provavelmente pertencerão a uma das classes intermediárias (não inteiramente desordenadas), é quase certo que, se você repetir os lançamentos muitas vezes, a ordem das páginas acabará por não apresentar nenhum padrão evidente. O arranjo das páginas evolui em direção à classe totalmente desordenada, visto que há um número enorme de arranjos que se enquadram nessa categoria.

O exemplo de *Guerra e Paz* salienta dois aspectos essenciais da entropia. Primeiro, *a entropia é a medida da desordem em um sistema físico.* Alta entropia significa que muitos rearranjos dos componentes que integram o sistema passariam despercebidos, ou seja, que o sistema é altamente desordenado (quando as folhas de *Guerra e Paz* estão todas misturadas, qualquer embaralhamento adicional passará despercebido porque simplesmente faz com que as folhas permaneçam misturadas). Entropia baixa significa que muito poucos rearranjos passariam despercebidos, o que, por sua vez, quer dizer que o sistema é altamente ordenado (quando as páginas de *Guerra e Paz* começam na ordem apropriada, pode-se detectar com facilidade praticamente qualquer rearranjo). Segundo, em sistemas físicos com muitos componentes (por exemplo, livros com muitas páginas lançados ao ar), há uma evolução natural em direção a uma desordem maior, uma vez que a desordem pode ser alcançada de um número muito maior de maneiras do que a ordem. Na linguagem da entropia, esta afirmação significa que *os sistemas físicos tendem a evoluir em direção a estados de entropia mais alta*.

Evidentemente, a definição da física, para tornar concreto e universal o conceito de entropia, não envolve ter de contar o número dos rearranjos das páginas de um livro que o deixam na mesma situação, seja de ordem ou de desordem. Ao contrário, a definição da física conta o número de rearranjos de componentes fundamentais — átomos, partículas subatômicas etc. — que deixam sem modificação as propriedades globais e genéricas de um sistema físico visto como um todo. Como no exemplo de *Guerra e Paz*, baixa entropia significa que bem poucos rearranjos passariam despercebidos e, portanto, o sistema é altamente ordenado, enquanto alta entropia significa que muitos rearranjos passariam despercebidos, o que quer dizer que o sistema é muito desordenado. (a entropia é um outro exemplo em que a terminologia complica as ideias. Não se preocupe se você tiver que ficar repetindo mentalmente que *baixa* entropia significa *alta* ordem e que *alta* entropia significa *baixa* ordem [o que equivale a alta desordem]. Eu mesmo tenho que fazê-lo muitas vezes).

Para lançarmos mão de um bom exemplo de física, que logo se revelará bem conveniente, vamos pensar de novo na garrafa de refrigerante a que me referi antes. Quando um gás, como o dióxido de carbono que inicialmente estava dentro da garrafa, distribui-se por igual em uma sala, há *muitos* rearranjos moleculares que passarão despercebidos, sem exercer nenhum efeito visível. Se você mexer os braços, por exemplo, as moléculas de dióxido de carbono se moverão para um lado e para o outro e mudarão as suas posições e velocidades. Mas não haverá efeitos qualitativos para o arranjo como um todo. As moléculas estavam distribuídas uniformemente antes que você mexesse os braços e continuam distribuídas uniformemente depois. A distribuição uniforme do gás é insensível a um número enorme de rearranjos dos seus componentes moleculares e, portanto, está em um estado de alta entropia. Em contraste, se o gás estivesse distribuído em um espaço menor, como o interior da garrafa, ou confinado por barreiras a uma região da sala, ele teria entropia significativamente menor. A razão é simples. Assim como as páginas dos livros mais finos têm menos rearranjos possíveis, os espaços menores também propiciam menos lugares para a localização das moléculas e, por conseguinte, menos arranjos possíveis.

Porém, quando você tira a tampa da garrafa ou quando remove a barreira, abre-se todo um novo universo para as moléculas de gás, que saem, chocando-se e empurrando umas às outras, para dispersar-se e explorá-lo. Por quê? Trata-se do mesmo raciocínio estatístico de *Guerra e Paz.* Sem dúvida, os próprios choques e empurrões farão com que algumas moléculas permaneçam no núcleo inicial do gás e com que outras que saíram até regressem em direção a essa nuvem inicial e mais densa do gás. Mas, como o volume da sala excede o da nuvem inicial de gás, os arranjos que estão disponíveis para que as moléculas se dispersem são em número *muito maior* do que os que resultam em que as moléculas permaneçam

dentro da nuvem inicial. Em média, portanto, as moléculas de gás se difundirão a partir da nuvem inicial e pouco a pouco se aproximarão do estado em que estarão uniformemente distribuídas por toda a sala. Assim, a configuração inicial de baixa entropia, com o gás todo comprimido em uma pequena região, evolui naturalmente rumo a uma configuração de alta entropia, com o gás distribuindo-se uniformemente por todo o espaço maior. E uma vez alcançada essa uniformidade, o gás tenderá a conservar esse estado de alta entropia: choques e empurrões continuarão a movimentar as moléculas para cá e para lá, provocando a formação de sucessivos rearranjos, mas a maioria esmagadora desses rearranjos não afetará a aparência geral do gás. Isso é o que significa ter alta entropia.[9]

Em princípio, como com as páginas de *Guerra e Paz*, poderíamos usar as leis da física clássica para determinar precisamente onde estará cada molécula de dióxido de carbono em determinado momento do tempo. Mas como o número dessas moléculas — cerca de 10^{24} em uma garrafa de refrigerante — é enorme, realizar esses cálculos é praticamente impossível. E ainda que pudéssemos fazê-lo, compondo uma lista de 1 milhão de bilhões de bilhões de posições e velocidades das partículas, isso mal nos ajudaria a compreender melhor a distribuição das moléculas. Pensar nos aspectos globais e genéricos da situação como um todo — o gás está espalhado ou concentrado? Tem alta ou baixa entropia? — é muito mais esclarecedor.

A ENTROPIA, A SEGUNDA LEI E A SETA DO TEMPO

A tendência dos sistemas físicos a evoluir em direção a estados de mais alta entropia é conhecida como a *segunda lei da termodinâmica*. (A primeira é a lei da conservação da energia.) Tal como vimos acima, a base da lei é um simples raciocínio estatístico: há mais maneiras para que um sistema tenha mais alta entropia, e “mais maneiras” significa que é mais provável que um sistema evolua para uma dessas configurações de alta entropia. Note, no entanto, que esta não é uma lei no sentido convencional. Embora isso seja raro e improvável, algo *pode* evoluir de um estado de alta entropia para outro de mais baixa entropia. Quando você lança para cima todas as páginas de um livro e em seguida as recolhe em uma pilha, é *possível* que elas apareçam em perfeita ordem numérica. Você não apostaria nessa possibilidade, mas ela existe. Também é possível que os choques e empurrões façam com que as moléculas dispersas de dióxido de carbono se movimentem em concerto e penetrem justamente de volta na garrafa de refrigerante. Não espere por isso, tampouco, mas *pode* acontecer.[10]

O grande número de páginas de *Guerra e paz* e o grande número de moléculas na sala são responsáveis pela diferença tão assombrosa de entropia entre os arranjos ordenados e os desordenados, assim como pelo fato de os resulta dos de baixa entropia serem tão terrivelmente improváveis. Se você jogasse para cima apenas duas folhas (quatro páginas) por diversas vezes, verificaria que elas apareceriam na ordem correta cerca de 12,5% das vezes. Com três folhas, a probabilidade cai para cerca de 2% dos casos; com quatro folhas, cerca de 0,3%; com cinco folhas, cerca de 0,03%; com seis folhas, cerca de 0,002%; com dez folhas, cerca de 0,000000027% e com 693 folhas a porcentagem de lançamentos que produziriam a ordem correta é tão pequena — envolve tantos zeros nas casas decimais — que o editor deste livro me convenceu a não usar outra página inteira para escrevê-lo por extenso. Da mesma maneira, se você colocar apenas duas moléculas de gás em uma garrafa de refrigerante vazia, verificará que, à temperatura ambiente, o seu movimento aleatório voltaria a reuni-las (a menos de um milímetro uma da outra) em média a cada poucos segundos. Mas para um grupo de três moléculas, você teria que esperar dias; para quatro moléculas, anos, e para um conjunto denso de 1 milhão de bilhões de bilhões de moléculas o tempo necessário para que elas voltassem a compor um grupo pequeno e ordenado seria bem maior do que a idade atual do universo. Você pode contar como mais certo do que a morte que os sistemas que têm muitos componentes evoluem em direção à desordem.

Ainda que isso não seja facilmente reconhecível, chegamos a um ponto curioso. A segunda lei da termodinâmica parece ter nos dado uma seta do tempo, *que surge quando os sistemas físicos têm um grande número de componentes.* Se você assistisse a um filme de duas moléculas de dióxido de carbono colocadas juntas em uma caixa pequena (com um monitor que mostrasse os seus movimentos), teria dificuldade em dizer se o filme estaria passando na ordem normal ou de trás para a frente. As duas moléculas se moveriam para um lado e para o outro, às vezes aproximando-se, às vezes afastando-se uma da outra, mas sem mostrar um comportamento que permitisse distinguir entre uma direção no tempo e a direção oposta. Mas se você assistisse a um filme de 10^{24} moléculas de dióxido de carbono colocadas juntas na caixa (digamos, como uma nuvem pequena e densa de moléculas), seria fácil determinar se o filme estaria passando na ordem normal ou de trás para a frente. Seria esmagadora a probabilidade de que a ordem normal seja aquela em que as moléculas de gás distribuem-se de maneira cada vez mais uniforme, *alcançando uma entropia cada vez mais alta.* Se, ao contrário, o filme mostrasse moléculas de gás uniformemente distribuídas

no sentido de agrupar-se em uma nuvem densa, você reconheceria de imediato que está vendo o filme de trás para a frente.

Em princípio, esse mesmo raciocínio é válido para todas as coisas que encontramos na vida diária — ou seja, coisas que têm um grande número de componentes: a seta do tempo que avança aponta na direção da entropia crescente. Se você assistisse a um filme de um copo de água gelada colocado em um bar, poderia determinar qual é a direção para adiante no tempo verificando que o gelo se derrete — as moléculas de H_2O se dispersariam por todo o copo, alcançando, assim, mais alta entropia. Se você assistisse a um filme de um ovo que se espatifa, poderia determinar qual é a direção para adiante no tempo verificando que os componentes do ovo ficam cada vez mais desordenados — que o ovo se espatifa, em vez de se desespatifar, com o que alcançam também mais alta entropia.

Como se vê, o conceito de entropia proporciona uma versão precisa da conclusão "fácil *versus* difícil" que vimos antes. É fácil que as páginas de *Guerra e paz* desordenem-se ao caírem porque os arranjos desordenados são *muitíssimos.* É difícil que as páginas caiam em perfeita ordem porque centenas de folhas teriam que se mover de uma maneira exata e única para cair na sequência certa determinada por Tolstoi. É fácil que um ovo se espatife porque há *muitíssimas* maneiras de espatifar-se. É difícil que ele se desespatife porque um número enorme de componentes teria que se mover em perfeita coordenação para produzir o resultado exato e único de recolocar o ovo, inteiro, sobre a mesa. Para as coisas que têm muitos componentes, é fácil ir da baixa entropia para a alta entropia — da ordem para a desordem — e é isso o que acontece todo o tempo. Ir da alta entropia para a baixa entropia — da desordem para a ordem — é mais difícil, portanto isso acontece mais raramente, na melhor das hipóteses.

Note também que essa seta entrópica não é completamente rígida; não se pode afirmar que essa definição da direção do tempo seja cem por cento certa. Ao contrário, o enfoque tem suficiente flexibilidade para permitir que esse e outros processos aconteçam também no sentido inverso. Como a segunda lei proclama que o aumento da entropia é apenas uma probabilidade estatística, e não um fato inviolável da natureza, não é impossível que aconteçam as raras possibilidades de que as páginas caiam na ordem numérica perfeita, que as moléculas de gás se reúnam e retornem à garrafa e que os ovos se desespatifem. Usando a linguagem matemática da entropia, a segunda lei expressa precisamente a improbabilidade estatística de tais eventos (lembre-se de que o número enorme das páginas 182-3 reflete quão mais provável é o desfecho em que as páginas caiam fora de ordem), mas reconhece que eles podem acontecer.

A história parece convincente. O raciocínio estatístico e probabilístico nos deu a segunda lei da termodinâmica. Ela, por sua vez, nos proporcionou uma distinção intuitiva entre o que denominamos passado e o que denominamos futuro. Deu-nos uma explicação prática das razões por que as coisas da vida cotidiana, coisas que tipicamente são compostas por um enorme número de componentes, começam de *uma* maneira e terminam de *outra* e por que nunca as vemos fazer o caminho no sentido inverso. Mas ao longo de muitos anos — e graças às importantes contribuições de físicos como lorde Kelvin, Josef Loschsmidt, Henri Poincaré, S. H. Burbury, Ernst Zermelo e Willard Gibbs — Ludwig Boltzmann chegou à conclusão de que a questão da seta do tempo é ainda mais surpreendente. Boltzmann percebeu que, embora a entropia houvesse iluminado aspectos cruciais do quebra-cabeça, ela não respondera a questão de por que o passado e o futuro parecem tão diferentes. A entropia, ao contrário, havia redefinido essa questão de um modo significativo, que leva a um desfecho inesperado.

ENTROPIA: PASSADO E FUTURO

Mais acima, apresentamos o dilema passado *versus* futuro, comparando as nossas observações cotidianas com as propriedades das leis newtonianas da física clássica. Ressaltamos que temos a experiência contínua de uma óbvia direcionalidade na maneira como as coisas se desdobram no tempo, mas as leis propriamente ditas tratam exatamente em pé de igualdade o que percebemos como as direções do tempo para a frente e para trás. Como não existe, nas leis da física, nenhuma seta que atribua uma direção ao tempo, nenhum ponteiro que declare “use estas leis nesta orientação temporal, e não na orientação oposta”, tínhamos de perguntar: se as leis que comandam a experiência tratam ambas as direções temporais de maneira simétrica, por que as próprias experiências são tão unidirecionais no tempo, acontecendo sempre em uma mesma orientação e não na outra? De onde vem a direcionalidade que observamos e experimentamos no tempo?

Na última seção parecemos fazer algum progresso por meio da segunda lei da termodinâmica, que aparentemente assinala o futuro como a direção em que a entropia aumenta. Mas as coisas não são assim tão simples. Note que na discussão sobre a entropia e a segunda lei não modificamos de nenhuma maneira as leis da física clássica. Tudo o que fizemos foi empregá-las no quadro geral de um esquema estatístico: ignoramos os detalhes menores (a ordem específica em que caem as páginas de *Guerra e paz*, as posições e as velocidades específicas

dos componentes do ovo e das moléculas de dióxido de carbono na garrafa de refrigerante) e, em vez disso, concentramos a nossa atenção nos aspectos globais e genéricos (páginas ordenadas *versus* desordenadas, ovo espatifado *versus* não espatifado, moléculas de gás espalhadas *versus* não espalhadas). Verificamos que, quando os sistemas físicos são suficientemente complexos (livros com muitas páginas, objetos frágeis que podem romper-se em muitos fragmentos, gases com muitas moléculas), há uma enorme diferença de entropia entre as configurações ordenadas e as desordenadas. Isso significa que há uma enorme probabilidade de que os sistemas evoluam de baixa entropia para alta entropia, o que corresponde, em linhas gerais, ao enunciado da segunda lei da termodinâmica. Mas o que importa observar é que a segunda lei é *derivativa*: mera consequência de um raciocínio probabilístico aplicado às leis do movimento de Newton.

Isso nos leva a um ponto simples, mas estarrecedor: *como as leis da física de Newton não têm uma orientação temporal própria, o raciocínio que utilizamos até aqui para argumentar que os sistemas evoluem de entropias mais baixas para entropias mais altas em direção ao futuro funciona integralmente também quando aplicado em direção ao passado.* Novamente, como as leis pertinentes da física são simétricas quanto à inversão temporal, não há nenhuma maneira pela qual elas possam sequer distinguir entre o que denominamos passado e o que denominamos futuro. Assim como na escuridão do espaço vazio não há nenhum sinal para declarar qual direção é para cima e qual é para baixo, também não há nada nas leis da física clássica que diga qual direção é o futuro do tempo e qual direção é o passado. As leis não oferecem nenhuma orientação temporal; essa é uma distinção diante da qual elas são completamente insensíveis. E como as leis do movimento são responsáveis pela maneira como as coisas se modificam — tanto em direção ao que denominamos futuro quanto em direção ao que denominamos passado —, o raciocínio estatístico/probabilístico que inspira a segunda lei da termodinâmica aplica-se igualmente bem em ambas as direções temporais. Assim, *não só existe uma probabilidade esmagadora de que a entropia de um sistema físico será maior no que denominamos futuro, mas também existe essa mesma probabilidade esmagadora de que a entropia tenha sido maior no que denominamos passado.* É o que a figura 6.2 ilustra.

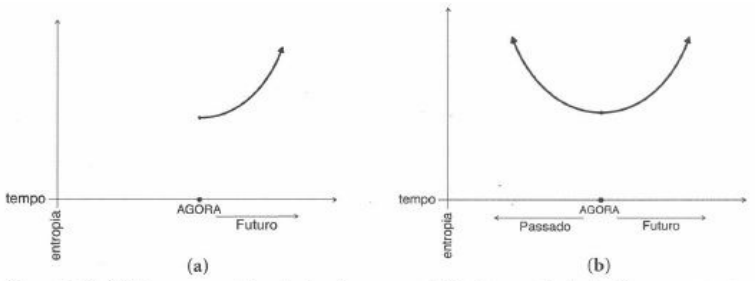


Figura 6.2. (*a*) *Tal como normalmente descrita, a segunda lei da termodinâmica diz que a entropia cresce em direção ao futuro de qualquer momento dado.* (*b*) *Como as leis conhecidas da natureza tratam de forma idêntica as direções temporais para a frente e para trás, a segunda lei, na verdade, diz que a entropia aumenta tanto em direção ao futuro quanto em direção ao passado, de qualquer momento dado.*

Este é o ponto-chave para tudo o que se segue, mas é sutil e requer uma análise cuidadosa. Um conceito errado e frequente a esse respeito é o de que se a entropia cresce em direção ao futuro, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, então ela necessariamente *decresce* em direção ao passado. Aí entra a sutileza. Na verdade, a segunda lei diz que se, em qualquer momento dado, um sistema físico não possui a máxima entropia possível, é extraordinariamente provável que esse sistema venha depois a ter *e que* previamente tenha tido mais entropia. Esse é o conteúdo da figura 6.2b. Com leis que são cegas quanto à distinção entre passado e futuro, essa simetria temporal é inevitável.

Essa é a lição essencial. Ela nos diz que a seta entrópica do tempo *tem duas pontas.* A partir de qualquer momento especificado, a seta do aumento da entropia aponta *tanto* para o futuro *quanto* para o passado. E isso torna decididamente inadequada a proposição de que a entropia seja a explicação para a *unilateralidade* da seta do tempo que vivenciamos.

Pense nas implicações da seta entrópica de duas pontas em termos concretos. Se, em um dia quente, você vê cubos de gelo parcialmente derretidos em um copo de água, tem plena confiança de que em meia hora os cubos estarão mais derretidos, uma vez que, quanto mais derretidos, terão mais entropia.[11] Mas você deveria ter exatamente a *mesma* confiança de que meia hora antes eles também estavam mais derretidos, porque exatamente o *mesmo* raciocínio estatístico implica que a entropia deveria crescer também em direção ao passado. E idêntica conclusão se aplica a incontáveis exemplos que encontramos todos os dias. A segurança de que a entropia aumenta em direção ao futuro — fruto da dispersão progressiva das moléculas de gás e do embaralhamento progressivo das folhas de um livro atiradas ao ar — deveria ter como correspondente exatamente a *mesma* segurança de que a entropia também era mais alta no passado.

O problema é que 50% dessas conclusões parecem estar redondamente erradas. O raciocínio entrópico produz conclusões precisas e sensatas quando aplicado em uma direção temporal, aquela que denominamos futuro, mas produz conclusões aparentemente imprecisas e ridículas quando aplicado em direção ao que denominamos passado. Os copos de água com cubos de gelo parcialmente derretidos não costumam começar como copos de água sem cubos de gelo, nos quais as moléculas de água se reúnem e se resfriam para formar cubos de gelo, para em seguida voltar a derreter-se. As páginas soltas de *Guerra e Paz* em geral não começam totalmente fora de ordem para irem se ordenando progressivamente à medida que vão sendo atiradas para o ar e em seguida voltar a desordenar-se progressivamente. E voltando à cozinha, os ovos normalmente não começam espatifados para reintegrar-se em um ovo inteiro e em seguida espatifar-se de novo.
Ou será que sim?

SIGAMOS A MATEMÁTICA

Séculos de pesquisas científicas revelaram que a matemática propicia uma linguagem efetiva e incisiva para analisar o universo. Com efeito, a história da ciência moderna está repleta de exemplos em que a matemática fez previsões que pareciam contrariar a intuição e a experiência (que o universo contém buracos negros, que o universo tem antimatéria, que partículas distantes podem estar emaranhadas etc.) e que foram depois confirmadas por experimentos e observações. Esses desenvolvimentos deixaram uma marca profunda na cultura da física teórica. Os físicos chegaram à conclusão de que a matemática, quando usada com o devido cuidado, é um caminho certo para a verdade.
Assim, quando uma análise matemática das leis da natureza indica que a entropia deveria ser mais alta na direção do futuro e *também* na direção do passado, com relação a qualquer momento dado, os físicos não a descartam sem maiores considerações. Ao contrário, algo que se assemelha a um juramento de Hipócrates para os físicos leva os pesquisadores a conservar um ceticismo sadio e profundo com relação às verdades aparentes da experiência humana e a seguir diligentemente a matemática, mantendo a mesma atitude cética, para ver aonde ela os leva. Só então podemos avaliar e interpretar de maneira adequada quaisquer diferenças que persistam entre as leis da física e o bom senso.
Com este fim em mente, imagine que são 22h30 e que você passou a última meia hora olhando para um copo de água com gelo (há muito pouca gente no bar), observando como os cubos vão pouco a pouco derretendo-se e perdendo a forma original. Você não tem dúvida alguma de que meia hora antes o garçom colocou

cubos bem formados de gelo no copo; não tem dúvida porque confia na sua memória. E se, por acaso, a sua confiança com relação ao que aconteceu na última meia hora estivesse abalada, você poderia perguntar ao rapaz sentado ali perto e que também está olhando os cubos de gelo derreter-se (o bar está *realmente* desanimado), ou talvez verificar no vídeo filmado pela câmera de segurança. Ambos confirmariam que a sua memória está boa. Se a essa altura você se perguntasse o que se pode esperar que aconteça com os cubos de gelo na próxima meia hora, provavelmente concluiria que eles continuarão a derreter-se. E se já tiver ganho a familiaridade suficiente com o conceito de entropia, explicará a sua previsão recorrendo à probabilidade esmagadora de que a entropia aumentará, na direção do futuro, com relação ao que você está vendo agora, às 22h30. Tudo isso faz o maior sentido para a nossa intuição e para a nossa experiência.

Mas, como vimos, esse raciocínio entrópico — que se limita a dizer que as coisas tendem a desordenar-se, uma vez que há mais maneiras para desordenar-se, e que é visivelmente satisfatório para explicar como as coisas se desdobram em direção ao futuro — proclama que a probabilidade é a mesma de que a entropia também fosse mais alta no passado. Isso significaria que os cubos de gelo parcialmente derretidos que você está vendo às 22h30 teriam estado ainda *mais* derretidos no tempo passado. Significaria que, às 22 horas, eles não teriam começado como cubos sólidos de gelo, mas sim que se teriam solidificado, pouco a pouco, a partir da água à temperatura ambiente, até as 22h30, com a mesma segurança com que você sabe que eles voltarão a derreter-se e retornar à temperatura ambiente, até as 23 horas.

Isso, sem dúvida, soa estranho — ou louco. Nesse caso, não só as moléculas de H_2O dentro de um copo à temperatura ambiente teriam de congelar-se espontaneamente para formar os cubos de gelo, mas também os bits digitais da câmera de segurança, assim como os neurônios do seu cérebro, e do rapaz sentado ali perto, todos teriam que se arranjar espontaneamente para atestarem, às 22h30, que existira um grupo de cubos de gelo inteiros e bem formados que se derreteram, embora nunca tenha havido. E, no entanto, esta conclusão bizarra é aquela que nos leva à aplicação fiel do raciocínio entrópico — o mesmo que você abraçou sem reservas para explicar por que os cubos parcialmente derretidos que você vê às 22h30 continuam a derreter-se, até às 23 horas — quando utilizado de maneira simétrica com relação ao tempo, como mandam as leis da física. Esse é o problema decorrente de que as leis fundamentais do movimento não fazem distinção entre passado e futuro e de que a matemática

contida nessas leis trata o futuro e o passado, com relação a qualquer momento dado, exatamente da mesma maneira.[12]

Fique tranquilo, porque logo encontraremos uma saída para a estranha situação a que nos levou o uso igualitário do raciocínio entrópico. Não vou tentar convencê-lo de que a sua memória e os registros existentes referem-se a um passado que nunca ocorreu (com pedidos de desculpas aos fãs de *Matrix).* Mas será muito útil para nós estabelecer com precisão o ponto em que se separam a intuição e as leis da matemática. Vamos, assim, continuar na trilha.

UM ATOLEIRO

A sua intuição se choca com a ideia de uma alta entropia no passado porque, vista a partir da perspectiva normal do desdobramento dos eventos em direção ao futuro, ela requereria um aumento espontâneo da ordem: moléculas de água que se congelam espontaneamente, cérebros que adquirem espontaneamente memórias de coisas que nunca aconteceram, câmeras de vídeo que produzem espontaneamente imagens de coisas inexistentes e assim por diante, o que seria completamente improvável — uma proposta de explicação do passado da qual até Oliver Stone zombaria. Nesse ponto, as leis da física e a matemática da entropia concordam com a sua intuição. Essa sequência de eventos, quando vista na direção do futuro, das 22 horas às 22h30, contraria a essência da segunda lei da termodinâmica — pois resulta em uma diminuição da entropia — e, por conseguinte, ainda que isso não seja impossível, é *sumamente* improvável.

Em contraste, a sua intuição e a sua experiência indicam que uma sequência de eventos muito mais provável é que os cubos de gelo formaram-se plenamente às 22 horas e derreteram-se de forma paulatina no seu copo, até agora, às 22h30. Mas neste ponto o acordo entre as leis da física e a matemática da entropia e a sua expectativa é apenas parcial. A matemática e a intuição estão de acordo em que, se efetivamente havia cubos de gelo bem formados às 22 horas, então a sequência de eventos mais provável seria a de que eles se derretessem parcialmente, como você os vê às 22h30: o aumento resultante da entropia está de acordo com a segunda lei da termodinâmica e com a experiência. Mas a matemática e a intuição se separam porque a intuição, ao contrário da matemática, não leva em conta a probabilidade, ou a falta de probabilidade, de que houvesse cubos de gelo bem formados às 22 horas, *dado que a única observação que tomamos como inatacável e inteiramente confiável é a de que agora, às 22h30, você está vendo cubos degelo parcialmente derretidos.*

Esse é o ponto-chave. Deixe-me, portanto, explicar. A principal lição da segunda lei da termodinâmica é a de que os sistemas físicos têm uma tendência irresistível a estar em configurações de alta entropia porque são múltiplas as maneiras pelas quais esse estado pode ser atingido. E, uma vez nesses estados de alta entropia, os sistemas físicos têm uma tendência irresistível a permanecer neles. A alta entropia é o estado natural das coisas. Você nunca deve deixar-se surpreender por esse fato, nem mesmo buscar explicações para ele. Esses estados são a regra. Ao contrário, o que requer explicação é quando algum sistema físico está em estado de ordem, em estado de baixa entropia. Esses estados não são a regra. Por certo eles podem acontecer, mas do ponto de vista da entropia, esses estados ordenados são raras aberrações que clamam por explicações. Portanto, o único fato do episódio que estamos tomando como inquestionavelmente verdadeiro — a sua observação de que às 22h30 os cubos de gelo estavam em um estado de entropia relativamente baixa — precisa de uma explicação.

Do ponto de vista da probabilidade, é absurdo explicar esse estado de baixa entropia por meio do recurso a um estado *ainda menos provável*, de entropia *ainda mais baixa*, em que os cubos de gelo estavam, às 22 horas, *ainda mais ordenados e ainda mais bem formados*, em um ambiente também *mais ordenado*. É muitíssimo mais provável que as coisas tenham começado em um estado totalmente normal e corriqueiro de alta entropia: um copo de água líquida e uniforme sem nenhum gelo. Então, por meio de uma flutuação estatística improvável, mas perfeitamente possível, o copo de água contrariou a essência da segunda lei da termodinâmica e evoluiu para um estado de mais baixa entropia em que apareceram os cubos de gelo parcialmente formados. Essa evolução, embora requeira processos raros e não familiares, evita por completo o estado de entropia ainda menor, ainda menos provável e ainda mais raro, de que houvesse cubos de gelo *completamente* formados. A cada momento, entre as 22 horas e as 22h30, essa estranha evolução tem uma entropia *mais alta* do que o cenário normal do gelo que se derrete, como se vê na figura 6.3, e desse modo ela é compatível com a observação das 22h30, aceita por nós, de um modo que é mais provável — muitíssimo *mais provável* — do que o cenário em que os cubos de gelo completamente formados se derretem.[13] Esse é o xis do problema. (**L**embre-se de que**,** nas páginas 182-3 mostramos a enorme diferença entre o número de configurações ordenadas e desordenadas para uma simples pilha de 693 páginas de papel. Agora estamos discutindo o comportamento de cerca de 1024 moléculas de H_2O, de modo que a diferença entre o número de configurações ordenadas e desordenadas é incomensuravelmente gigantesco. Além disso, o mesmo raciocínio aplica-se a todos os outros átomos e moléculas que estão no seu corpo e no meio ambiente [cérebros, câmeras de segurança, moléculas de ar e assim por diante]. Portanto, de acordo com a explicação-padrão, segundo a qual você pode confiar na sua memória, não só os cubos de gelo parcialmente derretidos teriam começado, às 22 horas, em um estado mais ordenado — e menos provável —, mas tudo o mais também: quando uma câmera

de vídeo filma uma sequência de eventos, há um aumento líquido na entropia [proveniente do calor e do ruído emitidos pelo processo de gravação]; do mesmo modo, quando o cérebro registra uma memória, embora não conheçamos com tanta precisão os detalhes microscópicos deste processo, há um aumento líquido na entropia [o cérebro pode ganhar em ordenamento, mas como acontece com todo processo de produção de ordem, se levarmos em conta o calor gerado, há um aumento líquido na entropia]. Assim, se compararmos os dois cenários do bar entre 22 horas e 22h30 — aquele em que você confia na sua memória e o outro, em que as coisas se arranjam espontaneamente a partir de um estado inicial de desordem para chegarem a ser consistentes com o que você vê, agora, às 22h30 —, existe uma enorme diferença de entropia. O último cenário tem, em cada ponto do caminho, *muitíssimo* mais entropia do que o primeiro e, portanto, do ponto de vista estatístico, é muitíssimo mais provável**).**

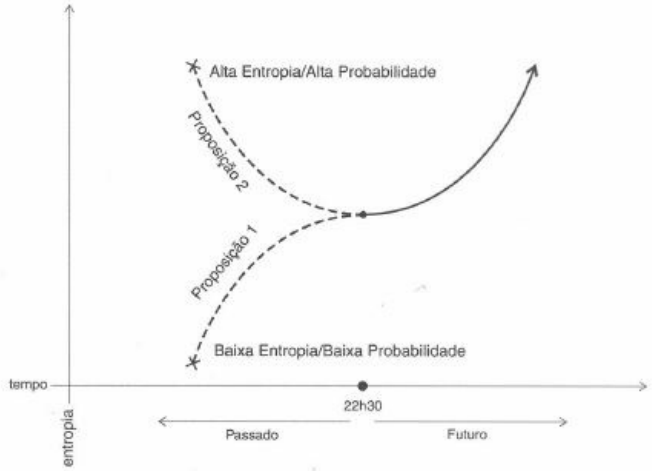


Figura 6.3. *Comparação entre duas proposições para explicar como os cubos de gelo alcançaram o estado parcialmente derretido, neste momento, 22h30. A proposição 1 está de acordo com as experiências que acumulamos de ver que o gelo se derrete, mas requer um ponto de partida com entropia relativamente baixa às 22 horas. A proposição 2 desafia a sua memória ao descrever o gelo parcialmente derretido que você vê às 22h30 como se ele se tivesse formado sozinho no interior de um copo de água, mas tem início com uma configuração de alta entropia e alta probabilidade de desordem, às 22 horas. Em todos os passos que levam ao instante das 22h30, a proposição 2 envolve estados que são mais prováveis do que os da proposição 1 — porque, como se vê no gráfico, eles têm nível de entropia mais alto — e, por conseguinte, a proposição 2 é estatisticamente mais provável.*

Não foi preciso muito esforço para que Boltzmann percebesse que o universo como um todo está sujeito à mesma análise. Olhando para o universo agora mesmo, o que você vê reflete uma boa dose de organização biológica, de estrutura química e de ordenamento físico. Embora o universo pudesse ser uma massa totalmente desorganizada, não é isso o que acontece. E por quê? De onde proveio a ordem? Tal como no caso dos cubos de gelo, do ponto de vista estatístico, é extremamente improvável que o universo que vemos tenha evoluído a partir de um estado ainda mais ordenado — e ainda menos provável — no passado distante para tomar, pouco a pouco, a sua forma atual. Ao contrário, como o cosmo tem tantos componentes, as escalas de ordem *versus* desordem magnificaram-se intensamente. Desse modo, o que era verdade no bar também é verdade para o universo como um todo e ainda com mais razão: é *muito* mais provável — incomensuravelmente mais provável — que o universo que agora vemos tenha surgido como uma flutuação rara, do ponto de vista

estatístico, a partir de uma configuração completamente desordenada, normal, banal e bastante entrópica.

Tente pensar desta maneira: se você jogar um punhado de moedas na mesa várias vezes, mais cedo ou mais tarde acontecerá que todas mostrarão a mesma face. Se você tiver a paciência de jogar para o ar ininterruptamente as páginas embaralhadas de *Guerra e Paz*¸ mais cedo ou mais tarde elas cairão na ordem numérica correta. Se você esperar com a sua garrafa de refrigerante aberta, mais cedo ou mais tarde os movimentos aleatórios das moléculas de dióxido de carbono farão com que elas retornem à garrafa. E, para a excitação de Boltzmann, se o universo esperar o tempo suficiente — uma quase-eternidade, talvez —, o seu estado usual, altamente entrópico, bastante provável e totalmente desordenado, mais cedo ou mais tarde dará lugar, por meio da própria agitação que nele reina, com empurrões, colisões e fluxos aleatórios de partículas e de radiação, a uma configuração como a que vemos agora. Os nossos corpos e cérebros emergiriam do caos já completamente formados — já plenamente dotados de memória, conhecimento e habilidade —, ainda que o passado que eles parecem refletir não tenha ocorrido nunca. Tudo o que sabemos, tudo o que estimamos não seria nada além de uma flutuação estatística rara, mas perfeitamente possível, que interrompe de forma momentânea a quase-eternidade da desordem. Observe a figura 6.4.

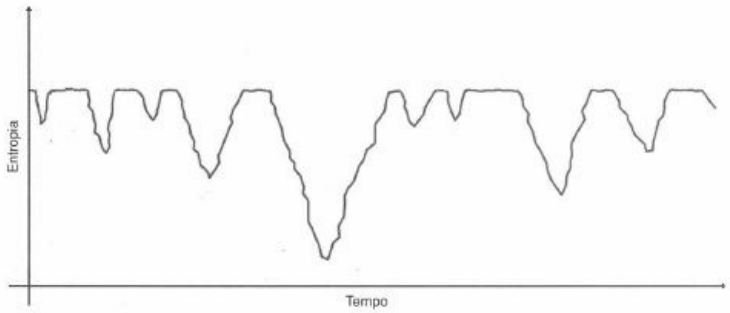


Figura 6.4. *Gráfico esquemático da entropia total do universo através do tempo. O gráfico mostra que o universo passaria a maior parte do tempo em um estado de desordem total — um estado de alta entropia — e experimentaria flutuações ocasionais para estados com diferentes graus de ordem, diferentes estados de entropia mais baixa. Quanto mais pronunciada a queda da entropia, mais improvável a flutuação. Quedas significativas da entropia, para o tipo de ordem que existe no universo hoje, seriam extremamente improváveis e muito raras.*

UM PASSO ATRÁS

Quando me deparei com essa ideia pela primeira vez, há muitos anos, foi como um choque para mim. Até então, eu pensava que compreendia bem o conceito de entropia, mas a verdade é que, seguindo o enfoque dos livros-textos em que estudava, eu só havia considerado as implicações da entropia para o futuro. E,

como acabamos de ver, enquanto a aplicação da entropia para o futuro confirma a nossa intuição e a nossa experiência, quando aplicada para o passado, ela as contradiz por completo. A experiência não é tão ruim quanto saber que você foi traído pelo melhor amigo, mas para mim foi quase isso.

Às vezes é bom não concluir depressa demais, e essa aparente incapacidade que tem a entropia de corresponder às nossas expectativas é um bom exemplo. Você deve estar pensando que a ideia de que tudo o que nos é familiar tenha começado a existir apenas agora é fascinante, mas difícil de engolir. E não é "meramente" porque essa explicação do universo desafia a veracidade de tudo o que consideramos real e importante. É porque ela também deixa sem resposta questões essenciais. Por exemplo, quanto mais ordenado for o universo hoje — quanto mais profundo for o mergulho no gráfico da figura 6.4 —, mais surpreendente e improvável é a aberração estatística requerida para trazê-lo à existência. Com efeito, se o universo pudesse "poupar esforços" e fazer com que as coisas fossem mais ou menos como as vemos agora, usando apenas a quantidade mínima necessária de ordem, o raciocínio probabilístico nos leva a acreditar que assim teria ocorrido. Mas quando examinamos o universo, não parece ter sido isso o que aconteceu, pois existem muitas coisas que estão mais ordenadas do que aquele mínimo necessário. Se fosse verdade que Michael Jackson nunca gravou *Thriller* e que os milhões de exemplares que foram distribuídos por todo o mundo chegaram onde estão por fazerem parte de uma flutuação aberrante em direção a uma entropia mais baixa, a aberração teria sido bem menos extrema se os álbuns fossem apenas 1 milhão, ou meio milhão, ou mesmo uns poucos exemplares. Se fosse verdade que a evolução nunca ocorreu e nós, seres humanos, estamos aqui em decorrência de um salto aberrante em direção a uma entropia mais baixa, a aberração teria sido bem menos extrema se não houvesse um registro tão consistente e ordenado de fósseis que indicam a ocorrência da evolução. Se fosse verdade que o Big-Bang nunca aconteceu e os mais de 100 bilhões de galáxias que hoje vemos são consequência de um salto aberrante em direção a uma entropia mais baixa, a aberração teria sido bem menos extrema se as galáxias fossem 50 bilhões, ou 5 mil, ou apenas um punhado, ou mesmo somente uma. Desse modo, se a ideia de que o nosso universo é uma flutuação estatística — um acidente feliz — tem alguma validade, seria preciso responder como e por que o universo cometeu tantos excessos e alcançou um estado *tão baixo* de entropia.

O que é ainda mais angustiante é que se não pudéssemos confiar na nossa memória e nos nossos registros, tampouco poderíamos confiar nas leis da física. A sua validade depende de inúmeros experimentos cujos resultados são ratificados exatamente pela nossa memória e pelos nossos registros. Portanto,

todo o raciocínio baseado em que as leis da física são simétricas com relação ao tempo iria por água abaixo, o que nos impediria de compreender a entropia e comprometeria toda a base da discussão. Se adotássemos a conclusão de que o universo conhecido é uma flutuação estatística, rara mas perfeitamente possível, a partir de uma configuração de desordem total, rapidamente chegaríamos a um atoleiro em que perderíamos todo conhecimento, inclusive a própria linha de raciocínio que nos levou a considerar essa estranha explicação. (uma observação correlata é a de que, se nos convencêssemos de que o mundo que vemos acaba de materializar-se a partir da desordem total, esse mesmo raciocínio — se invocado em qualquer momento posterior — nos obrigaria a abandonar essa crença e atribuir, outra vez, o ordenamento do mundo a uma outra flutuação ainda mais recente. Assim, segundo essa maneira de pensar, cada novo momento invalida as premissas sustentadas no momento anterior, o que é uma maneira claramente inadequada de explicar o cosmo).

Assim, aceitando o desafio e seguindo diligentemente as leis da física e a matemática da entropia — conceitos que, quando combinados, nos dizem ser esmagadoramente mais provável que a desordem cresça *tanto* em direção ao futuro quanto em direção ao passado a partir de qualquer momento dado —, encontramo-nos atolados em areia movediça até o pescoço. Isso pode não parecer agradável, mas é bom por dois motivos. Primeiro, porque mostra com precisão por que a desconfiança com relação à memória e aos registros — que intuitivamente recusamos — não faz sentido. Segundo, porque tendo chegado a um ponto em que todo o nosso arcabouço analítico fica à beira do colapso, percebemos, forçosamente, que alguma coisa crucial foi *excluída* do nosso raciocínio.

Desse modo, para evitar o abismo nas explicações, devemos perguntar: que outro conceito ou ideia nova, além da entropia e da simetria temporal das leis da natureza, pode restaurar a confiança na nossa memória e nos registros — confiança em que os cubos de gelo derretem-se e não se desderretem e em que os ovos se espatifam e não se desespatifam? Em síntese, onde chegaremos se tentarmos explicar um desdobramento assimétrico dos eventos no espaço-tempo com a entropia mais alta no nosso futuro mas com a entropia *mais baixa* no nosso passado? Será possível?

Sim. Mas só se, no início, as coisas fossem muito especiais.[14]

O OVO, A GALINHA E O BIG-BANG

Examinemos a questão tomando como exemplo um ovo inteiro, bem formado e com baixa entropia. Como foi que esse sistema físico de baixa entropia chegou a existir? Bem, se restaurarmos a confiança na memória e nos registros, todos sabemos qual é a resposta. O ovo veio da galinha. E a galinha veio de um ovo, que veio de uma galinha, que veio de um ovo, e assim por diante. Mas, como

ressaltou o matemático inglês Roger Penrose,[15] a história do ovo e da galinha nos proporciona um ensinamento profundo e nos leva a um lugar claro.

Uma galinha, assim como qualquer ser vivo, naturalmente, é um sistema físico com um grau de ordem espantosamente alto. De onde vem essa organização e como ela se sustenta? A galinha permanece viva, e por um tempo suficiente para produzir ovos, comendo e respirando. Os alimentos e o oxigênio proveem os materiais dos quais os seres vivos extraem a energia de que necessitam. Mas se quisermos entender realmente o que acontece, há um aspecto crítico dessa energia que precisa ser sublinhado. No transcurso da sua vida, uma galinha sadia tanto absorve energia sob a forma de alimento quanto a libera para o ambiente, principalmente sob a forma de calor e dejetos gerados pelos seus processos metabólicos e atividades diárias. Se não houvesse esse equilíbrio entre a energia que entra e a energia que sai, a galinha ficaria cada vez mais corpulenta.

O ponto essencial, contudo, é o de que nem todas as formas de energia são iguais. A energia que a galinha libera para o ambiente sob a forma de calor é altamente desordenada — e em geral resulta em que algumas moléculas de ar se agitem um pouco mais. Essa energia tem alta entropia — é difusa e se mescla com o ambiente — e não pode, por isso, ser facilmente armazenada para propósitos úteis. Ao contrário, a energia que a galinha absorve sob a forma de alimento tem baixa entropia e é prontamente aproveitada para importantes atividades de sustentação da vida. Assim, a galinha, assim como todas as formas de vida, é um conduto para a absorção de energia de baixa entropia e para a liberação de energia de alta entropia.

Essa percepção leva a questão da origem da baixa entropia do ovo um passo para trás. Por que a fonte de energia da galinha, a comida, tem uma entropia tão baixa? Como explicar esta aberrante fonte de ordem? Se o alimento é de origem animal, isso apenas nos leva de volta à questão inicial de por que os animais têm uma entropia tão baixa. Mas se seguirmos a cadeia alimentícia, em última análise, chegamos a animais (como eu) que só comem plantas. Como as plantas e a sua produção de frutas e legumes mantêm a baixa entropia? Por meio da fotossíntese, as plantas usam a luz do Sol para transformar o dióxido de carbono existente no ambiente em oxigênio, que é devolvido ao ambiente, e carbono, que a planta usa para crescer e florescer. Portanto, podemos vincular as fontes de energia não animais e de baixa entropia ao Sol.

Isso leva a questão de explicar a baixa entropia outro passo para trás: de onde veio o Sol, com o seu alto ordenamento? O Sol formou-se cerca de 5 bilhões de anos atrás, a partir de uma nuvem de gás inicialmente difusa que começou a girar e a tornar-se mais compacta sob o efeito da atração gravitacional dos seus próprios componentes. À medida que a nuvem ganhava em densidade, essa

atração gravitacional recíproca tornava-se mais forte, fazendo com que a nuvem se contraísse ainda mais sobre si mesma. E à medida que a gravidade comprimia a nuvem cada vez mais, ela ganhava em calor. Em última análise, ela atingiu a temperatura suficiente para iniciar processos nucleares que geraram uma emissão de radiação suficiente para impedir o prosseguimento da contração gravitacional do gás. Nasceu assim uma estrela quente, estável e brilhante.
De onde veio, então, a nuvem difusa de gás? Provavelmente ela se formou a partir dos resíduos de estrelas mais antigas, que chegaram ao fim das suas vidas, transformaram-se em supernovas e espalharam os seus átomos pelo espaço. E de onde veio o gás difuso, responsável por essas estrelas mais antigas? Acreditamos .que o gás formou-se como consequência do Big-Bang. As nossas mais refinadas teorias sobre a origem do universo — as nossas mais refinadas teorias *cosmológicas* — nos dizem que, quando o universo tinha cerca de dois minutos de vida, era composto de um gás *quente e praticamente uniforme*, que apresentava aproximadamente 75% de hidrogênio, 23% de hélio e pequenas quantidades de deutério e lítio. O ponto essencial é que esse gás que permeava o universo tinha entropia *extraordinariamente baixa.* O Big-Bang deu início ao universo em um estado de baixa entropia, e esse estado parece ser a fonte da ordem que hoje vemos. Em outras palavras, *a ordem atual é uma relíquia cosmológica.* Discutamos essa importante percepção com um pouco mais de detalhe.

ENTROPIA E GRAVIDADE

Como a teoria e as observações mostram que poucos minutos após o Big-Bang o gás primordial estava uniformemente distribuído por todo o universo nascente, poder-se-ia pensar que, tendo em vista a nossa discussão anterior sobre a garrafa de refrigerante e as moléculas de dióxido de carbono, o gás primordial estivesse em um estado desordenado, de alta entropia. Mas não é assim. A discussão anterior da entropia ignorou por completo a gravidade, o que fazia sentido, porque a gravidade praticamente não desempenha nenhum papel no comportamento da quantidade mínima de gás que sai da garrafa de refrigerante. E com essa premissa vimos que o gás uniformemente disperso tem alta entropia. Mas, quando a gravidade importa, a história é diferente. A gravidade é uma força de atração universal. Portanto, se existe uma massa de gás suficientemente grande, todas as regiões do gás se atrairão mutuamente, o que levará o gás a fragmentar-se em diversos aglomerados, assim como a tensão superficial da água sobre uma superfície impermeável a leva a fragmentar-se em gotas. Quando a

gravidade importa, como era o caso no universo primitivo de alta densidade, a aglomeração — e não a uniformidade — é a norma. É o estado para o qual o gás tende a evoluir, como ilustra a figura 6.5.

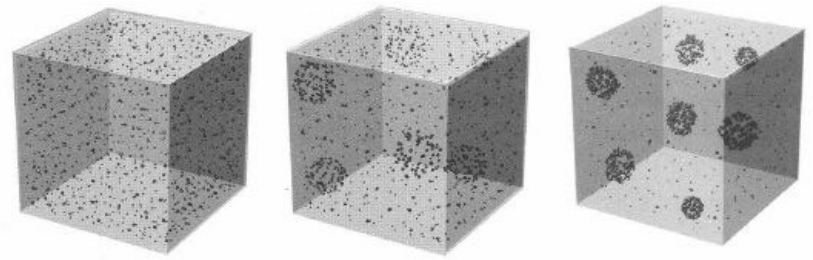


Figura 6.5. *Para grandes volumes de gás, quando a gravidade é relevante, os átomos e as moléculas evoluem de uma configuração regular e uniformemente distribuída para outra, que envolve a formação de aglomerados maiores e mais densos.*

Ainda que os aglomerados pareçam mais ordenados do que o gás inicialmente difuso — assim como um quarto de brinquedos bem-arrumado, com todos os objetos agrupados e guardados em caixas e arcas, é mais ordenado do que outro, em que os brinquedos estejam uniformemente espalhados por toda parte —, para calcular a entropia é preciso levar em conta as contribuições de *todas* as fontes. Com relação ao quarto de brinquedos, a queda na entropia resultante da passagem da situação de objetos completamente desordenados para a outra em que os brinquedos estão agrupados e guardados, “comprimidos” em caixas e arcas, é mais do que compensada pelo aumento da entropia decorrente da queima de gorduras e do calor gerado pelos pais, que passaram horas limpando e ajeitando tudo. Assim também, com relação à nuvem de gás inicialmente difusa, vê-se que a queda na entropia resultante da formação de aglomerados ordenados é mais do que compensada pelo calor gerado pela compressão do gás e, em última análise, pela enorme quantidade de calor e luz liberados quando os processos nucleares começam a ocorrer.

Este é um ponto importante que por vezes deixa de ser levado em conta. A tendência incontrastável em direção à desordem não significa que estruturas ordenadas como estrelas e planetas, ou formas ordenadas de vida, como as plantas e os animais, não possam formar-se. Tanto isso é verdade que elas existem. O que a segunda lei da termodinâmica diz é que na formação da ordem geralmente ocorre uma geração de desordem que mais do que a compensa. A conta total da entropia continua a crescer, embora certos componentes tornem-se mais ordenados. E dentre as forças fundamentais da natureza, a gravidade é a que explora ao máximo esse aspecto da entropia. Como a gravidade opera a grandes distâncias e é uma força de atração universal, ela instiga a formação dos

aglomerados ordenados — as estrelas —, que emitem a luz que vemos nas noites de céu limpo, e tudo isso ocorre com um aumento líquido global da entropia.

Quanto mais comprimidos e densos forem os aglomerados de gás e quanto mais massa tiverem, maior será a entropia global. Os buracos negros, a forma mais extrema de aglomeração e compressão gravitacionais do universo, levam esse fato ao limite. A atração gravitacional dos buracos negros é tão forte que nada, nem mesmo a luz, logra escapar dela, o que explica por que os buracos negros são negros. Assim, ao contrário das estrelas comuns, os buracos negros teimosamente retêm toda a entropia que produzem: nada pode escapar da sua intensidade gravitacional.[16] Com efeito, como veremos no capítulo 16, nada no universo contém mais desordem — mais entropia — do que os buracos negros. (assim, um buraco negro de determinado tamanho contém mais entropia do que *qualquer* outra coisa do mesmo tamanho). Isso agrada a nossa intuição: alta entropia significa que múltiplos rearranjos dos componentes de um objeto passam despercebidos. Como não podemos ver o interior de um buraco negro, nos é impossível detectar *qualquer* rearranjo dos seus componentes — o que quer que eles sejam — e por isso os buracos negros têm a entropia máxima. Quando a gravidade atua até o seu limite, torna-se o mais eficiente gerador de entropia do universo conhecido.

Chegou a hora do acerto de contas. *A fonte última da ordem¸ da baixa entropia, tem de ser o próprio Big-Bang.* Por alguma razão, em vez de estar repleto de quantidades assustadoras de entropia, como acontece com os buracos negros e como seria de esperar com base em considerações probabilísticas, em seus momentos iniciais o universo estava permeado por uma mescla gasosa quente e uniforme de hidrogênio e hélio. Embora esse tipo de configuração tenha alta entropia quando as densidades são tão baixas que podemos ignorar a gravidade, a situação é outra quando a gravidade não pode ser ignorada. Nessas condições, um gás uniforme tem entropia extremamente baixa. Em comparação com os buracos negros, o gás difuso e praticamente uniforme estava em um estado de entropia extraordinariamente baixa. Desde então, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, a entropia global do universo e a quantidade líquida de desordem vêm se elevando gradualmente. Depois de mais ou menos 1 bilhão de anos, a gravidade fez com que o gás primordial formasse aglomerados, os quais vieram a formar as estrelas, as galáxias e, com alguns aglomerados menores, os planetas. Pelo menos um desses planetas tinha uma estrela próxima que lhe propiciava uma fonte de energia de entropia relativamente baixa que permitiu o surgimento e a evolução de formas de vida de baixa entropia, entre as quais, com o tempo, apareceu uma galinha que pôs um ovo que foi parar na mesa de uma cozinha e, para nossa tristeza, deu prosseguimento à incessante trajetória em

direção a entropias mais altas, caindo da mesa e espatifando-se no chão. O ovo se espatifa, em vez de desespatifar-se, porque segue o rumo em direção à alta entropia que teve início com o estado de entropia extraordinariamente baixa no qual o universo começou a existir. Uma ordem incrível no começo foi o que deu origem a tudo, e nós vivemos o desdobramento gradual em direção ao aumento da desordem desde então.

Este é o espantoso vínculo que estamos examinando ao longo deste capítulo. *Um ovo que se espatifa nos diz algo profundo a respeito do Big-Bang*. Diz-nos que o Big-Bang deu lugar a um cosmo nascente extraordinariamente ordenado.

A mesma ideia se aplica a todos os outros exemplos. A razão pela qual jogar para cima as páginas soltas de *Guerra e Paz* resulta em um estado de mais alta entropia é que elas começam em uma forma altamente ordenada e de baixa entropia. Essa forma ordenada inicial preparou-as para o aumento na entropia. Em contraste, se as páginas estivessem já no início totalmente fora de ordem numérica, jogá-las para cima quase não faria diferença alguma do ponto de vista da entropia. Assim, de novo a pergunta é: como elas ficaram tão ordenadas? Bem, Tolstoi escreveu-as para que fossem apresentadas nessa ordem, e os editores seguiram as suas instruções. E as mentes e os corpos altamente ordenados de Tolstoi e dos editores do livro, que permitiram a criação de um volume tão altamente ordenado, podem ser explicados pela mesma linha de raciocínio que seguimos para o ovo, a qual nos leva, mais uma vez, para o Big-Bang. E os cubos de gelo parcialmente derretidos que vimos às 22h30? Agora que estamos confiando na memória e nos registros, você se lembrará de que, logo antes das 22 horas, o garçom pôs os cubos bem formados no seu copo. Ele obteve os cubos de gelo no congelador, que foi planejado por um engenheiro competente e fabricado por operários eficientes, todos os quais são capazes de criar coisas tão bem ordenadas porque eles próprios são formas de vida altamente ordenadas. E também aqui podemos fazer remontar essa ordem ao estado altamente ordenado do universo em sua origem.

O INGREDIENTE CRÍTICO

A revelação a que chegamos é a de que podemos confiar na nossa memória de um passado com entropia mais baixa, e não mais alta, apenas se o Big-Bang — o processo, evento ou acontecimento que trouxe o universo à existência — fez com que o universo começasse em um estado extraordinariamente especial, bastante ordenado e de baixa entropia. Sem esse ingrediente crítico, a nossa percepção anterior, de que a entropia deveria crescer tanto em direção ao futuro

quanto ao passado a partir de qualquer momento dado, nos levaria a concluir que toda a ordem que hoje vemos surgiu de uma flutuação aleatória, a partir de um estado entropicamente desordenado de alta entropia, conclusão que, como vimos, solapa o próprio raciocínio em que se baseia. Mas com a inclusão na nossa análise de um improvável estado de baixa entropia como ponto de partida do universo, vemos agora que a conclusão correta é a de que a entropia aumenta em direção ao futuro, uma vez que o raciocínio probabilístico opera totalmente e sem restrições nessa direção; mas ela não aumenta em direção ao passado, uma vez que esse uso das probabilidades entraria em choque com o requisito de que o universo começou em um estado de entropia baixa, e não alta.[17] Dessa maneira, as condições existentes no início do universo são críticas para a direcionalidade da seta do tempo. *O futuro é, efetivamente, a direção em que a entropia aumenta. A seta do tempo — o fato de que as coisas começam de uma maneira e terminam de outra e nunca ao contrário — começou a voar no estado altamente ordenado e de baixa entropia em que o universo se encontrava ao começar a existir.*[18]

O ÚLTIMO QUEBRA-CABEÇA

O universo primitivo determinou a direção da seta do tempo, e essa é uma conclusão maravilhosa e satisfatória. Mas não terminamos ainda. Permanece um grande quebra-cabeça. Como é que o universo começou com essa configuração tão altamente ordenada e colocou as coisas em movimento de tal maneira que, nos bilhões de anos que se seguiram, todas as coisas puderam evoluir vagarosa e progressivamente, passando, através de configurações cada vez menos ordenadas, a níveis cada vez mais altos de entropia? Não perca de vista quão notável é esta ocorrência. Como já ressaltamos, do ponto de vista estatístico, é muito mais alta a probabilidade de que os cubos de gelo parcialmente derretidos que você viu às 22h30 estivessem lá em decorrência de uma aberração estatística do que em consequência de terem se originado de um estado ainda mais improvável em que eram cubos de gelo inteiros e bem formados. E o que é verdade para os cubos de gelo também é verdade para um zilhão de instâncias em todo o universo. Falando em termos probabilísticos, é assombrosamente mais provável que tudo o que agora existe no universo tenha surgido de uma aberração estatística rara mas perfeitamente possível, a partir de uma desordem total, do que de uma lenta evolução a partir de um evento ainda mais improvável: o ponto de partida incrivelmente mais ordenado e espantosamente baixo em entropia requerido pelo Big-Bang.[19]

Mas quando buscamos a probabilidade mais alta e imaginamos que todas as coisas passaram a existir por causa de um acidente estatístico, logo nos encontramos em um atoleiro: esse enfoque punha em questão as próprias leis da física. Assim, nos inclinamos por contrariar a estatística e escolher o Big-Bang de baixa entropia como explicação para a seta do tempo. O quebra-cabeça passa a ser, então, o de explicar como o universo começou com uma configuração tão altamente ordenada e improvável. Essa é a questão para a qual a seta do tempo aponta. Tudo depende da cosmologia.[20]

Retomaremos a discussão detalhada da cosmologia nos capítulos 8 a 11, mas veja bem que a nossa discussão sobre o tempo sofre ainda de uma severa deficiência: tudo o que dissemos até aqui baseou-se puramente na física clássica. Consideremos agora como a mecânica quântica afeta o nosso entendimento do tempo e a busca da sua seta.

7. O tempo e o quantum

Percepções a respeito da natureza do tempo a partir do reino quântico

Quando pensamos em algo como o tempo, algo em que estamos imersos, que está totalmente integrado na nossa existência diária e que é tão onipresente e impossível de dissociar — ainda que por um breve momento — da linguagem corrente, o nosso raciocínio é formado pela preponderância das nossas experiências. Essas experiências cotidianas são clássicas e seguem, com alto grau de precisão, as leis da física estabelecidas por Newton há mais de três séculos. Mas, entre todas as descobertas da física nos últimos cem anos, a mais estarrecedora é a mecânica quântica, porque ela afeta todo o esquema conceituai da física clássica.
Vale a pena, pois, refletir um pouco mais sobre as nossas experiências clássicas, considerando alguns experimentos que revelam aspectos espantosos do desenvolvimento dos processos quânticos no tempo. Nesse contexto mais amplo, daremos prosseguimento à discussão do capítulo anterior e perguntaremos se na descrição da natureza pela mecânica quântica existe uma seta do tempo. Chegaremos a uma resposta, mas ela ainda é controvertida, mesmo entre os físicos. E novamente seremos levados à origem do universo.

O PASSADO SEGUNDO O QUANTUM

As probabilidades desempenharam um papel proeminente no último capítulo, mas, como já ressaltei algumas vezes, elas entraram em cena apenas por razões de conveniência prática e pela utilidade das informações que propiciam. Seguir o movimento das 1024 moléculas de $\mathbf{H_2O}$ em um copo de água está bem além da nossa capacidade de cálculo; e mesmo que isso fosse possível, que faríamos com a montanha de dados que daí resultassem? Determinar, a partir da lista de 10^{24} posições e velocidades, a existência de cubos de gelo no copo seria uma tarefa hercúlea. Voltamo-nos, então, para o raciocínio probabilístico, que é computacionalmente factível e, além disso, lida com as propriedades macroscópicas — ordem *versus* desordem; por exemplo, gelo *versus* água — onde, em geral, concentra-se o nosso interesse. Lembre-se, porém, de que as probabilidades não estão de modo algum embutidas no arcabouço da física clássica. Em princípio, se soubéssemos com precisão como as coisas são agora

— se conhecêssemos as posições e as velocidades de todas as partículas que compõem o universo —, a física clássica nos diz que poderíamos usar tais informações para prever como essas mesmas coisas serão em qualquer momento do futuro e como elas eram em qualquer momento do passado. Ainda que não acompanhemos os desdobramentos das coisas a cada momento, a física clássica nos diz que podemos, em princípio, falar sobre o passado e o futuro com a mesma confiança e precisão que falamos sobre o presente.[1]

As probabilidades também desempenharão um papel crucial neste capítulo. Mas como elas são um elemento *inescapável* da mecânica quântica, acabam por alterar fundamentalmente o conceito de passado e futuro. Já vimos que a incerteza quântica impede o conhecimento simultâneo e exato das posições e das velocidades. Vimos também que a física quântica prevê apenas a probabilidade de que esta ou aquela evolução futura venha a acontecer. Confiamos nessas probabilidades, mas como elas são apenas probabilidades, aprendemos que há um elemento *inevitável* de acaso quando se trata de prever o futuro.

Quando se trata de descrever o passado, existe também uma diferença crítica entre a física clássica e a quântica. Na física clássica, em decorrência do tratamento igualitário que ela dá a todos os momentos do tempo, os eventos que levam a algo que observemos são descritos usando-se exatamente a mesma linguagem e empregando-se exatamente os mesmos atributos de que lançamos mão para descrever a própria observação. Se virmos um meteoro incandescente no céu, falaremos da sua posição e da sua velocidade; se reconstruirmos a sua trajetória, também falaremos de uma sucessão específica de posições e velocidades que terão trazido o meteoro até a Terra. Na física quântica, contudo, ao observarmos uma coisa, entramos no campo rarefeito em que sabemos de algo com 100% de certeza (se ignorarmos, por exemplo, questões relativas à precisão do equipamento). Mas o passado — com o que nos referimos ao passado “não observado”, o tempo em que nem nós, nem ninguém, nem nenhuma outra coisa fizemos observações — permanece no domínio usual da incerteza quântica, das probabilidades. Mesmo que consigamos determinar que um elétron está aqui e agora, um momento atrás, tudo o que há são probabilidades de que ele tenha estado aqui, ou logo ali, ou muito mais adiante.

E, como vimos, não se trata de que o elétron (ou qualquer outra partícula) esteja efetivamente localizado em uma dessas posições possíveis e que simplesmente não saibamos identificá-la.[2] Ao contrário, em certo sentido, o elétron está em todas as posições porque todas as possibilidades — todas as histórias possíveis — contribuem para o que observamos. Lembre-se de que encontramos comprovação disso no experimento descrito no capítulo 4, em que os elétrons foram forçados a passar por duas fendas. A física clássica, baseada na crença

usual de que os acontecimentos têm histórias singulares e convencionais, diria que todos os elétrons que chegaram à tela do detector *ou* passaram pela fenda da direita ou da esquerda. Mas essa visão do passado não nos leva a lugar algum: levaria apenas à previsão dos resultados ilustrados na figura 4.3a, que não estão em sintonia com o que realmente acontece, como ilustrado na figura 4.3b. O padrão de interferência observado só pode ser explicado por uma superposição devida a algo que passa por *ambas* as fendas.

A física quântica propicia uma explicação, mas, ao fazê-lo, modifica drasticamente as nossas histórias do passado — as nossas descrições de como aconteceram as coisas específicas que observamos. De acordo com a mecânica quântica, as ondas de probabilidade de todos os elétrons passam por *ambas* as fendas. E como as partes das ondas que emergem de cada fenda se mesclam, o perfil de probabilidade resultante manifesta um padrão de interferência, razão por que as posições de chegada do elétron também exibem esse perfil.

Em comparação com a experiência cotidiana, essa descrição do passado do elétron, em termos de ondas de probabilidade que se entrecruzam, é totalmente estranha. Mas se abandonarmos a cautela por um momento, poderíamos sugerir levar essa descrição da mecânica quântica um passo mais adiante, o que, por sua vez, leva a uma possibilidade ainda mais estranha. Talvez cada elétron efetivamente passe por ambas as fendas a caminho da tela do detector e os dados sejam o resultado de uma interferência entre as duas classes de histórias. Portanto, existe a tentação de pensar que as ondas que emergem das duas fendas representem duas histórias possíveis de um dado elétron — que atravessa a fenda da esquerda ou da direita —, e como ambas as ondas contribuem para o que observamos na tela, talvez a mecânica quântica esteja nos dizendo que ambas as histórias potenciais do elétron efetivamente contribuem.

Surpreendentemente, esta ideia estranha e maravilhosa — criação do ganhador do Prêmio Nobel Richard Feynman, um dos físicos mais criativos do século XX — nos fornece uma maneira perfeitamente viável de pensar a respeito da mecânica quântica. De acordo com Feynman, se houver maneiras alternativas para que se produza determinado resultado — por exemplo, um elétron que atinge um ponto na tela do detector tendo atravessado a fenda da esquerda, ou que atinge o mesmo ponto da tela tendo atravessado a fenda da direita —, então existe uma interpretação em que todas as histórias alternativas acontecem, e simultaneamente. Feynman mostrou que cada uma dessas histórias contribuiria para a probabilidade de que o seu resultado conjunto se materializasse, e se essas contribuições fossem corretamente somadas, o resultado concordaria com a probabilidade total prevista pela mecânica quântica.

Feynman deu a essa abordagem da mecânica quântica o nome de *soma sobre as histórias.* Essa abordagem revela que uma onda de probabilidade incorpora todos os passados possíveis que podem ter precedido determinada observação e ilustra bem o fato de que para ter êxito onde a física clássica fracassou, a mecânica quântica tinha que ampliar substancialmente o arcabouço da história.[3]

RUMO A OZ

Há uma variação do experimento das duas fendas em que a interferência entre histórias alternativas torna-se ainda mais evidente porque as duas vias de acesso à tela do detector estão mais separadas. É um pouco mais fácil descrever este experimento usando fótons no lugar dos elétrons. Começamos, então, com uma fonte de fótons — um laser — e o disparamos em direção a algo conhecido como *divisor de feixes.* Esse instrumento tem por base um espelho com 50% de reflexão, semelhante aos que se usam para fins de segurança, que refletem metade da luz incidente e deixam passar a outra metade. O feixe de luz inicial é, assim, dividido em dois, o esquerdo e o direito, em processo similar ao que acontece com o feixe de luz que incide sobre as duas fendas no experimento que descrevemos anteriormente. Com o uso de espelhos com 100% de reflexão cuidadosamente posicionados, como na figura 7.1, os dois feixes são novamente reunidos mais adiante, onde está localizado o detector. Tratando a luz como onda, conforme a descrição de Maxwell, esperamos encontrar — e de fato encontramos — um padrão de interferência na tela. A distância da viagem para todos os pontos da tela, com a exceção do ponto central, varia ligeiramente, tanto para a esquerda quanto para a direita, de modo que, quando o feixe da esquerda encontra, por exemplo, uma crista, em determinado ponto da tela do detector, o feixe da direita poderia encontrar também uma crista, ou um vale, ou algo intermediário. O detector registra a altura combinada das duas ondas e forma, por conseguinte, a figura de interferência característica.

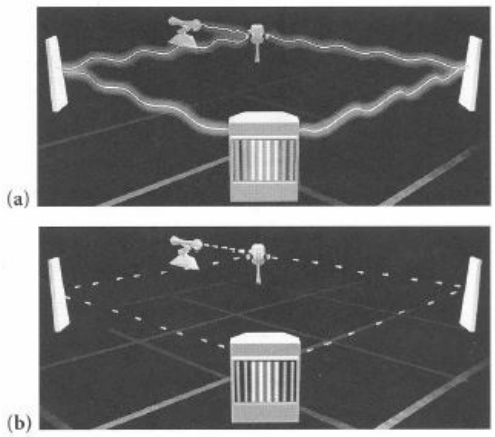


Figura 7.1. (*a*) *No experimento do divisor de feixes, a luz do laser é dividida em dois feixes que viajam por dois caminhos diferentes até a tela do detector.* (*b*) *A intensidade do laser pode ser diminuída de modo a emitir um fóton de cada vez. Com o tempo, os impactos sucessivos dos fótons sobre a tela formam um padrão de interferência.*

A distinção entre o clássico e o quântico torna-se clara ao diminuirmos drasticamente a intensidade do laser, até que ele passe a emitir os fótons um por um, digamos, um a cada poucos segundos. Quando determinado fóton atinge o divisor de feixes, a intuição clássica nos diz que ou ele passará pelo espelho ou será refletido. O raciocínio clássico não permite sequer supor algum tipo de interferência, uma vez que não há nada com que interferir: trata-se apenas de fótons, partículas individuais e separadas, que passam da fonte para o detector, um a um, pela esquerda ou pela direita. Mas pouco a pouco, até o final do experimento, os fótons registrados individualmente, de maneira semelhante à que acontece na figura 4.4, *produzem* um padrão de interferência, como na figura 7.1b. De acordo com a física quântica, a razão está em que cada fóton detectado poderia ter chegado ao detector pela fenda da esquerda ou da direita. Assim, somos obrigados a combinar essas duas histórias possíveis para determinar a probabilidade de que um fóton atinja este ou aquele ponto da tela. Quando juntamos as ondas de probabilidade da esquerda e da direita para cada fóton, elas produzem o padrão ondulatório de probabilidades da interferência das ondas. Desse modo, ao contrário de Dorothy, que fica perplexa quando o espantalho aponta tanto para a esquerda quanto para a direita para indicar-lhe a direção de Oz, os dados encontram sua explicação perfeita quando imaginamos que cada fóton toma tanto o rumo da esquerda quanto o da direita em seu caminho para o detector.

O DIREITO DE ESCOLHER

Descrevemos aqui a junção das histórias possíveis no contexto de uns poucos exemplos específicos, mas essa maneira de pensar a respeito da mecânica quântica tem caráter geral. Enquanto a física clássica descreve o presente como resultado de um passado único, as ondas de probabilidade da mecânica quântica ampliam a arena da história. Na formulação de Feynman, o presente que observamos representa um amálgama — um tipo particular de *média* — de todos os passados possíveis que sejam compatíveis com o que vemos agora.

No caso dos experimentos com as duas fendas e com o divisor de feixes, há duas maneiras para que um elétron, ou um fóton, chegue da fonte à tela do detector — pela esquerda ou pela direita — e só combinando as histórias possíveis encontramos uma explicação para o que observamos. Se a barreira tivesse três fendas, teríamos que levar em conta três classes de histórias; com trezentas fendas, precisaríamos incluir as contribuições de toda a rede resultante de histórias possíveis. Levando a situação ao limite, se imaginarmos um número enorme de fendas — tantas que a própria barreira acabe desaparecendo —, a física quântica diz que cada elétron atravessaria então *todas* as trajetórias possíveis a caminho de um ponto particular da tela, e somente com a combinação das probabilidades associadas com cada uma dessas histórias poderíamos explicar os dados resultantes. Isso pode parecer estranho. (É estranho.) Mas é esse tratamento bizarro dos tempos passados que permite explicar os dados da figura 4.4, da figura 7.1b e de todos os demais experimentos que lidam com o microcosmo.

Até que ponto, você pode estar pensando, a descrição preconizada pela soma das histórias deve ser tomada literalmente. O elétron que atinge a tela do detector *realmente* viaja por todas as trajetórias possíveis, ou a explicação de Feynman é apenas um artifício matemático astuto que propicia a resposta correta? Esta é uma das questões básicas para que avaliemos a verdadeira natureza da realidade quântica, e por isso eu gostaria muito de ter uma resposta definitiva para ela. Mas não tenho. Os físicos normalmente consideram extremamente útil dispor de um vasto conjunto de histórias que se combinam. Nas minhas pesquisas, uso essa imagem tantas vezes que ela efetivamente parece real. Porém isso não quer dizer que ela seja real. O fato é que os cálculos quânticos nos indicam sem nenhuma ambiguidade a probabilidade de que um elétron atinja este ou aquele ponto da tela e essas previsões concordam plenamente com os dados. Quanto à verificabilidade e à utilidade das previsões da teoria, o relato que fizemos a respeito de como o elétron viaja até a tela tem pouca relevância.

Entretanto, você certamente pode continuar perguntando se não poderíamos determinar o que efetivamente acontece modificando a configuração do experimento para que possamos focalizar também a suposta mescla de passados

possíveis que se fundem no presente que observamos. É uma boa sugestão, mas já sabemos que tem de haver um senão. No capítulo 4, vimos que as ondas de probabilidade não podem ser observadas diretamente. Como as histórias convergentes de Feynman são apenas uma maneira particular de pensarmos em ondas de probabilidade, elas também escapam à observação direta. As observações não logram desemaranhar as histórias. Elas refletem *a média* de todas as histórias possíveis. Assim, se se modificar a configuração para observar os elétrons durante as suas trajetórias, o que se verá é que cada elétron passa ou por um lugar ou por outro. Não se verá nenhuma nuvem de histórias múltiplas. Quando se usa a mecânica quântica para explicar *por que* o elétron foi visto em um lugar ou em outro, a resposta está na média de todas as histórias possíveis que podem ter levado àquela observação intermediária. Mas a própria observação só tem acesso às histórias que já se fundiram. Ao observarmos o elétron em sua viagem, apenas fazemos retroceder o conceito do que entendemos por história. A mecânica quântica é implacavelmente eficiente: explica o que se vê, mas impede que se veja a explicação.

Você pode perguntar ainda: então por que a física clássica — a física do bom senso —, que descreve o movimento em termos de histórias e trajetórias únicas, tem significado no universo? Por que ela funciona tão bem para explicar e prever o movimento de todas as coisas, desde pedras lançadas ao ar a planetas e cometas? Como pode ser que na nossa vida diária não encontremos nunca provas da maneira estranha em que aparentemente o passado se desdobra no presente? A razão, que discutimos brevemente no capítulo 4 e que será vista com mais detalhes logo a seguir, está em que as pedras, os planetas e os cometas são comparativamente grandes, pelo menos em proporção com as partículas, como os elétrons. E na mecânica quântica, quanto maior for uma coisa, mais definido é o processo de obtenção da média. Todas as trajetórias possíveis *contribuem* para o movimento de uma pedra lançada, mas o caminho normal — o caminho único que as leis de Newton preveem — contribui *muito mais* do que todos os outros caminhos juntos. Quanto aos objetos grandes, acontece que os caminhos clássicos constituem, em uma proporção enorme, a contribuição dominante para o processo de obtenção da média e por isso eles nos são familiares. Porém, quando os objetos são pequenos, como os elétrons, os quarks e os fótons, muitas histórias diferentes contribuem com uma probabilidade mais ou menos igual e, por conseguinte, todas desempenham papéis importantes no processo de obtenção da média.

Você pode perguntar, por fim: e o que há de tão especial no ato de observar ou de medir, que lhe dá o poder de obrigar todas as histórias a somar-se, a fundir-se e a

produzir um resultado único? Como é que o nosso ato de observar informa a partícula de que ela tem de compor todas as histórias, tirar-lhes a média e comprometer-se com um resultado definido? Por que os seres humanos e os equipamentos que produzimos têm esse poder especial? E será que ele é especial? Ou será que o ato humano de observar pertence a um esquema mais amplo de influências ambientais que mostram, do ponto de vista da mecânica quântica, que não somos assim tão especiais? Trataremos dessas questões insólitas e controversas na parte final deste capítulo, porque elas são cruciais para que entendamos a natureza da realidade quântica e também porque elas proporcionam um importante esquema para pensarmos sobre a mecânica quântica e a seta do tempo.

O cálculo das médias na mecânica quântica requer treinamento técnico considerável. E a compreensão total de como, quando e onde as médias são computadas requer conceitos que os físicos ainda estão trabalhando duramente para formular. Mas há uma lição que pode ser enunciada com simplicidade: a mecânica quântica é francamente a favor do direito de escolher: todas as "escolhas" que um objeto possa fazer para ir de um lugar a outro estão incluídas nas probabilidades atribuídas pela mecânica quântica aos diferentes resultados possíveis.

A física clássica e a física quântica tratam o passado de maneiras bem distintas.

A PODA DA HISTÓRIA

É totalmente contrário à nossa formação clássica imaginar que um objeto indivisível — um elétron ou um fóton — desloque-se por mais de uma trajetória ao mesmo tempo. Mesmo aqueles dentre nós que alcançaram o máximo autocontrole teriam grande dificuldade em resistir à tentação de dar uma olhada: por que não fazer uma rápida verificação quando o elétron ou o fóton passam pela tela com as duas fendas ou pelo divisor de feixes e determinar qual o caminho que ele *realmente* segue para chegar ao detector? Por que não colocar, no experimento das duas fendas, pequenos detectores na frente de cada fenda para sabermos se o elétron passou por uma, pela outra ou pelas duas (e deixar que o elétron prossiga em seu rumo até o detector principal)? Por que não colocar, no experimento do divisor de feixes, em cada um dos caminhos que saem do divisor, um pequeno detector que nos diga se o fóton tomou o caminho da esquerda, o da direita, ou ambos (deixando também que o fóton prossiga rumo ao detector)?

A resposta é que é perfeitamente *possível* colocar os detectores adicionais, mas, ao fazê-lo, encontraremos duas coisas. Primeiro, observaremos que cada elétron,

ou cada fóton, passará por apenas um dos detectores. Logo, é possível determinar o caminho que o elétron, ou o fóton, segue, e o resultado encontrado será sempre o de que ele se define por um ou por outro caminho, mas nunca por ambos. Segundo, verifica-se que os dados registrados nos detectores principais se modificam. Em vez de obterem-se os padrões de interferência das figuras 4.3b e 7.1b, obtêm-se os resultados previstos pela física clássica, como na figura 4.3a. Ao introduzirmos novos elementos — os novos detectores —, inadvertidamente modificamos os experimentos. E a modificação é tal que o paradoxo que estava *aponto* de ser revelado — se soubermos qual o caminho tomado por cada partícula, como, então, poderia haver a possibilidade de uma interferência com outro caminho que a partícula comprovadamente não tomou? — se desfaz. A razão decorre diretamente da última seção. A nova observação singulariza as histórias que poderiam ter precedido o resultado produzido pela observação, qualquer que seja ele. E como essa observação determinou que caminho o fóton tomou, *consideramos apenas as histórias que passam por esse caminho, eliminando, pois, a possibilidade da interferência.*

Niels Bohr gostava de resumir essas coisas usando o seu *princípio da complementaridade.* Todo elétron, todo fóton, todas as coisas, na verdade, têm aspectos de onda e de partícula. Essas são características complementares. Pensar nas partículas apenas no esquema convencional — no qual elas se movem em trajetórias únicas e próprias — é insuficiente porque dessa maneira desprezamos os aspectos ondulatórios demonstrados pelos padrões de interferência (embora a soma das histórias de Feynman pareça dar preferência aos aspectos de partícula, o método é apenas uma interpretação particular das *ondas* de probabilidade (uma vez que envolve múltiplas histórias para uma única partícula, cada uma das quais contempla a sua própria contribuição probabilística) e está, portanto, subordinado ao lado ondulatório da complementaridade. Quando dizemos que algo se comporta como uma partícula, referimo-nos sempre a uma partícula convencional que viaja em uma trajetória única e própria). Pensar nas partículas apenas no esquema ondulatório é insuficiente porque dessa maneira desprezamos os aspectos relativos às partículas, demonstrados por medições que encontram partículas localizadas, que podem, por exemplo, ser registradas como um ponto em uma tela (veja a figura 4.4). O quadro completo requer que ambos os aspectos complementares sejam levados em conta. Em qualquer situação dada é possível salientar um dos dois aspectos em virtude da maneira escolhida para a nossa interação. Se for possível os elétrons viajarem da fonte para a tela sem serem observados, as suas propriedades ondulatórias podem emergir e produzir a interferência. Mas se os elétrons são observados no caminho, fica-se conhecendo a sua trajetória, o que impossibilita a explicação da interferência. A realidade vem em nosso auxílio. A observação poda os galhos da história quântica. Força o elétron a comportar-se

como partícula. E como as partículas podem mover-se para um lado *ou* para o outro, não se forma um padrão de interferência. Portanto, não há nada a explicar. A natureza faz coisas estranhas. Ela vive perigosamente, mas toma o cuidado de esquivar-se do golpe fatal do paradoxo lógico.

A CONTINGÊNCIA DA HISTÓRIA

Esses experimentos são notáveis. Eles nos proporcionam uma prova simples e eficaz de que o mundo é comandado pelas leis quânticas descobertas pelos físicos no século XX, e não pelas leis clássicas descobertas por Newton, Maxwell e Einstein — leis que hoje reconhecemos como aproximações perceptivas e úteis para descrever os eventos que ocorrem nas escalas maiores. Já vimos que as leis quânticas desafiam as noções convencionais sobre o que aconteceu no passado — os eventos não observados que são responsáveis pelo que vemos hoje. Algumas variações simples desses experimentos levam a um grau ainda maior e mais surpreendente esse desafio à nossa noção intuitiva de como as coisas se desdobram no tempo.

A primeira variação é o experimento denominado *escolha retardada*, sugerido em 1980 pelo eminente físico John Wheeler. Ele toca uma questão insólita e inquietante: o passado depende do futuro? Veja bem que isso não é o mesmo que perguntar se podemos voltar ao passado e modificá-lo (tema que consideraremos no capítulo 15). Ao contrário, o experimento de Wheeler, que já foi executado e analisado com amplo nível de detalhes, expõe um jogo provocante entre eventos que imaginamos ter ocorrido no passado, e mesmo no passado distante, e os que vemos ocorrerem neste momento.

Para ter uma ideia do exemplo, imagine que você é um colecionador de arte e que o dr. Smithers, presidente da nova Associação de Arte e Beleza de Springfield, vem visitá-lo para ver várias obras que você colocou à venda. Você sabe, no entanto, que o verdadeiro interesse do visitante é *Thefull Monty*, um quadro da sua coleção que sempre o incomodou um pouco, mas que lhe foi deixado pelo seu adorado tio-avô Monty Burns, o que faz com que a decisão de vendê-lo ou não perpasse por razões emocionais. Após a chegada do dr. Smithers, vocês conversam sobre a sua coleção, sobre os leilões recentes, a exposição do momento no museu e você descobre, para sua surpresa, que Smithers foi, há muitos anos, o principal auxiliar do seu tio-avô. Já no final da conversa, você toma consciência de que aceita bem a perspectiva de separar-se do quadro. São muitas as obras de que você gosta e é necessário ter cautela e

contenção para que a sua coleção não perca o foco. No mundo das coleções de arte, como você próprio sempre diz, mais pode significar menos.

Em retrospecto, pensando sobre a decisão tomada, você fica com a impressão de que já se havia resolvido pela venda antes mesmo de que o dr. Smithers chegasse. Apesar de certo carinho que tinha por *The full Monty*, você sentia também um desconforto por ter reunido uma coleção demasiado ampla — além do fato de que o realismo erótico-nuclear é uma área difícil, mesmo para os colecionadores mais experientes. Você se lembra de que, antes da chegada do visitante, não se sentia seguro a respeito do que fazer, mas, a partir da sua visão da questão nesse momento, é como se já estivesse preparado. Não é que os eventos futuros tenham afetado o passado, mas o seu encontro agradável com o dr. Smithers e a sua própria declaração subsequente de que estava disposto a vender o quadro iluminaram o passado de maneira a tornar definidas certas coisas particulares que pareciam não estar ainda decididas naquele momento. É como se o encontro e a sua declaração o ajudassem a aceitar uma decisão que já estava tomada e que apenas esperava para se realizar. O futuro o auxiliou a ter uma visão mais completa do que estava ocorrendo no passado.

Evidentemente, nesse exemplo os eventos futuros afetam apenas a sua percepção ou a sua interpretação do passado, de modo que eles não são nem intrigantes nem surpreendentes. Mas o experimento de escolha retardada de Wheeler transporta essa interação psicológica entre o futuro e o passado para o domínio quântico, onde ela se torna precisa e espantosa. Começamos com o experimento da figura 7.1a, modificado com a redução da frequência do laser, que passa a disparar um fóton de cada vez, como na figura 7.1b, e também com a colocação de um novo detector de fótons próximo ao divisor de feixes. Se o novo detector estiver desligado (veja a figura 7.2b), estaremos de volta à configuração original do experimento e os fótons gerarão um padrão de interferência na tela fotográfica. Mas se o novo detector estiver ligado (figura 7.2a), ele nos mostrará o caminho seguido por cada fóton: se ele detectar um fóton, então é porque o fóton tomou aquele caminho; se ele não detectar um fóton, então é porque o fóton tomou o outro caminho. Essa “informação de escolha”, como é chamada, obriga o fóton a agir como partícula e, portanto, o padrão de interferência ondulatório já não é gerado.

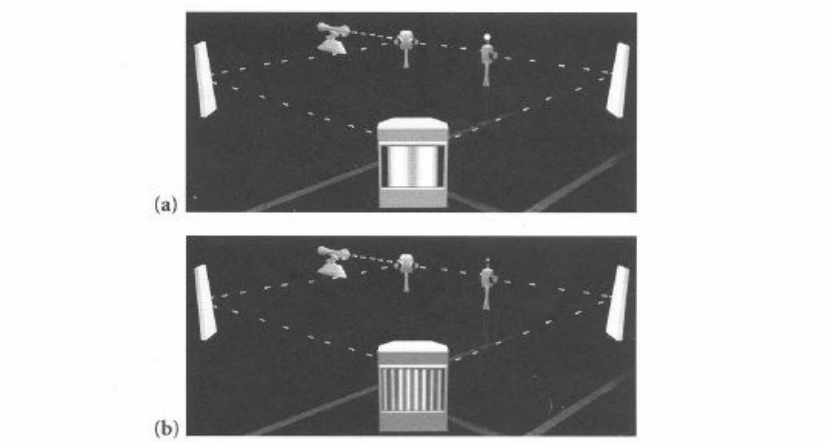


Figura 7.2. (*a*) *Ao acionar os detectores de "informação de escolha", o padrão de interferência já não aparece.* (*b*) *Quando os novos detectores são desligados, voltamos à situação da figura 7.1 e o padrão de interferência se restabelece.*

Agora, vamos mudar as coisas à la Wheeler, deslocando o novo detector de fótons mais para longe em um dos caminhos. Em princípio, os caminhos podem ser tão longos quanto se queira, de modo que o novo detector pode estar a uma distância considerável do divisor de feixes. Também aqui, se o novo detector de fótons estiver desligado, estaremos na situação normal e os fótons comporão um padrão de interferência na tela. Se ele estiver ligado, fornecerá informações de escolha, o que impedirá a existência do padrão de interferência.

A nova estranheza provém do fato de que o recebimento da informação de escolha ocorre muito tempo *depois* de que o fóton tenha tido que "decidir", no divisor de feixes, se atuará como onda e viajará pelos dois caminhos ou se atuará como partícula e viajará apenas por um deles. Quando o fóton passa pelo divisor de feixes, ele não pode "saber" se o novo detector estará ligado ou desligado — na verdade, o experimento pode ser realizado de maneira que o interruptor do detector só seja acionado *depois* que o fóton tenha passado pelo divisor de feixes. Para estar preparada para a possibilidade de que o detector esteja desligado, a onda quântica do fóton deve dividir-se e viajar por ambos os caminhos, de modo que um amálgama dos dois possa gerar o padrão de interferência observado. Mas, se acontecer que o novo detector esteja ligado — ainda que depois que o fóton já tenha deixado o divisor de feixes —, isso poderia causar uma crise de identidade para o fóton: ao passar pelo divisor de feixes, ele já se teria comprometido com o caráter ondulatório viajando pelos dois caminhos, mas agora, algum tempo depois de ter feito essa escolha, ele "percebe" que precisa passar a ser uma partícula, que viaja por um único caminho.

De algum modo, contudo, o fóton acerta sempre. Toda vez que o detector está ligado — mesmo que o ato de ligá-lo ocorra bem depois de determinado fóton

ter passado pelo divisor de feixes —, o fóton atua inteiramente como partícula. Ele será encontrado apenas em um dos caminhos para a tela (se colocássemos detectores de fótons mais abaixo, nas trajetórias, cada fóton emitido pelo laser seria detectado por um detector ou pelo outro, mas nunca pelos dois); os dados resultantes não mostram o padrão de interferência. Toda vez que o novo detector está desligado — mesmo que a decisão seja tomada depois que cada fóton tenha passado pelo divisor de feixes —, os fótons atuam inteiramente como ondas, produzindo o famoso padrão de interferência que indica que eles viajaram por ambas as trajetórias. É como se ajustassem o seu comportamento no passado de acordo com a escolha futura, segundo esteja o detector ligado ou desligado. É como se tivessem uma "premonição" da situação experimental que encontrariam mais adiante e já atuariam de acordo com ela. É como se uma história coerente e definida se tornasse manifesta apenas depois de que o futuro ao qual ela leva estivesse totalmente estabelecido.[4]

Há uma semelhança entre isso e a sua experiência na decisão de vender *The full Monty.* Antes de encontrar o dr. Smithers, você estava em um estado ambíguo e indeciso, difuso e confuso, desejando ao mesmo tempo vender e não vender o quadro. Mas a conversa sobre o mundo da arte e o conhecimento do afeto que Smithers tinha pelo seu tio-avô fez com que você aceitasse cada vez melhor a ideia da venda. A conversa levou a uma decisão firme, que, por sua vez, permitiu que uma história específica se cristalizasse a partir da incerteza anterior. Em retrospecto, é como se a decisão já tivesse sido tomada o tempo todo. Porém se você não se tivesse dado tão bem com o dr. Smithers, se ele não lhe tivesse garantido que *The full Monty* estaria em boas mãos, você poderia perfeitamente ter decidido não vender. E a história do passado que, nessa situação, você sentiria como verdadeira, facilmente poderia envolver o reconhecimento de que você, na verdade, já estava há muito tempo decidido a *não* vender — de que, por mais que fizesse sentido vender o quadro, no fundo você já sabia que o seu vínculo sentimental com a pintura era demasiado forte para que você a vendesse. O passado real, evidentemente, não se modificou em nada. Mas diferentes experiências posteriores poderiam levar você a descrever diferentes histórias.

No cenário psicológico, reescrever ou reinterpretar o passado é um lugar comum. A história do nosso passado muitas vezes é informada pelas nossas experiências do presente. No entanto, no cenário da física — que normalmente consideramos ser objetivo e imutável —, dizer que a história passada possa depender do futuro é algo que incomoda. Para aumentar ainda mais essa sensação, Wheeler imagina uma versão cósmica do experimento da escolha retardada, em que a fonte de luz não é um laser de laboratório, e sim um intenso

quasar no espaço profundo. O divisor de feixes não é um aparelho de laboratório, mas sim uma galáxia no meio do caminho, cujo campo gravitacional pode funcionar como uma lente que dá o foco aos fótons que passam e os dirige à Terra, como na figura 7.3. Embora esse experimento ainda não tenha sido realizado, em princípio, se pudermos coletar um número suficiente de fótons do quasar, eles deveriam compor um padrão de interferência em uma placa fotográfica de longa exposição, tal como no experimento do divisor de feixes de laboratório. Mas se colocássemos outro detector de fótons próximo ao fim de qualquer um dos diferentes caminhos, ele nos propiciaria a informação de escolha com relação aos fótons e destruiria o padrão de interferência.

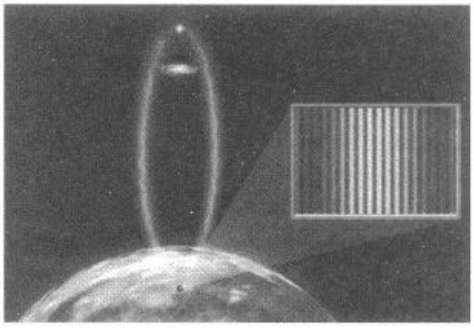


Figura 7.3. *A luz proveniente de um quasar distante, dividida e posta em foco por uma galáxia no meio do caminho, produzirá, em princípio, um padrão de interferência. Se ligarmos um detector adicional, que permita a determinação do caminho tomado por cada fóton, os fótons que chegarem a partir de então já não formarão o padrão de interferência.*

O que é mais notável nesta versão é que, da nossa perspectiva, os fótons podem estar viajando há bilhões de anos. A decisão de contornar a galáxia por um dos lados, como uma partícula, ou por ambos os lados, como uma onda, parece ter sido tomada por eles muitíssimo antes de que o detector, nós mesmos ou a própria Terra existíssemos. Contudo, bilhões de anos depois, quando ocorre a construção do detector, a sua instalação em um dos caminhos que os fótons tomam para chegar à Terra e o seu funcionamento, esses atos fazem com que os fótons em consideração ajam como partículas. Eles agem como se estivessem viajando por uma única trajetória — e não pela outra — até a Terra. Mas se desligarmos o detector, alguns minutos depois, os fótons que chegam à placa fotográfica a partir de então começam a compor o padrão de interferência, o que indica que há bilhões de anos eles vinham viajando em conjunto com os seus parceiros-fantasmas, tomando os dois caminhos que contornam a galáxia.

O ato de ligar ou desligar o interruptor do detector no século XXI terá tido um efeito sobre o movimento dos fótons alguns bilhões de anos antes? Claro que não. A mecânica quântica não nega que o passado tenha acontecido, e acontecido por completo. A tensão surge simplesmente porque o conceito quântico de

passado é diferente do conceito de *passado* de acordo com a intuição clássica. A nossa criação clássica nos faz desejar dizer que determinado fóton fez *isto* ou *aquilo*. Mas no mundo quântico, no nosso mundo, esse raciocínio impõe ao fóton uma realidade demasiado restritiva. Como vimos, na mecânica quântica a norma é uma realidade indeterminada, difusa, híbrida, que consiste em múltiplos ramos e que só se cristaliza em uma realidade mais familiar e definida quando se faz uma observação adequada. Não é que o fóton tenha decidido bilhões de anos atrás contornar a galáxia por um lado ou pelo outro. Durante esses bilhões de anos ele se manteve dentro da norma quântica — um híbrido de todas as possibilidades.

O ato de observar reúne a incomum realidade quântica à experiência clássica cotidiana. As observações que fazemos hoje levam um dos ramos da história quântica a ganhar proeminência no relato do passado. Nesse sentido, então, embora a evolução quântica do passado até então não seja afetada por nada que agora façamos, a visão que temos do passado pode sofrer a influência das ações de hoje. Se colocarmos detectores de fóton nos dois caminhos que a luz toma para chegar à tela, a nossa visão do passado incluirá a descrição do caminho que cada fóton tomou; ao colocarmos os detectores de fóton, fazemos com que a informação de escolha seja um elemento essencial e definitivo da história. Mas se não colocarmos os detectores de fótons, a história do passado será necessariamente diferente. Sem eles, não podemos relatar nada a respeito dos caminhos que os fótons tomaram; sem eles, a informação de escolha será fundamentalmente inexistente. Ambas as histórias são válidas. Ambas as histórias são interessantes. Elas apenas descrevem situações diferentes.

Uma observação feita hoje pode, portanto, ajudar a completar a história que relatamos, de um processo que teve início ontem, ou no dia anterior, ou talvez há 1 bilhão de anos. Uma observação feita hoje pode delinear os detalhes que podemos e devemos incluir no nosso relato do passado.

O PASSADO APAGADO

É essencial ressaltar que, nesses experimentos, o passado não é de modo algum alterado pelas ações de hoje, e nenhuma modificação que façamos no experimento pode alcançar esse fim. Isso leva à seguinte pergunta: se não se pode modificar algo que já aconteceu, pode-se fazer a coisa mais próxima a isso — apagar o *impacto* desse fato sobre o presente? Em determinados graus, por vezes essa fantasia pode ser realizada. Um goleiro que comete um pênalti desnecessário aos 44 minutos do segundo tempo em um jogo que está empatado

pode desfazer o impacto desse erro fazendo uma defesa espetacular na cobrança do pênalti. E esse exemplo, naturalmente, não tem nada de misterioso. Só quando um evento do passado parece impedir definitivamente a ocorrência de um evento futuro (assim como a defesa do pênalti impede a vitória do time adversário), poderíamos pensar que algo errado teria acontecido se nos dissessem em seguida que o evento evitado teria realmente acontecido. O *apagador quântico*, originalmente concebido em 1982 por Marlan Scully e Kai Drühl, sugere esse tipo de estranheza na mecânica quântica.

Uma versão simples do apagador quântico usa a configuração do experimento das duas fendas, modificado da seguinte maneira. Coloca-se um marcador em frente a cada fenda, para identificar qualquer fóton que passe, de maneira que, quando ele seja examinado posteriormente, possa-se dizer por qual fenda ele passou. A questão de saber como se pode identificar um fóton — como colocar o equivalente a uma etiqueta “D” no fóton que passa pela fenda da direita e “E” no que passa pela da esquerda — é interessante, mas não é particularmente importante aqui. Em termos gerais, o processo consiste em empregar um instrumento que permita ao fóton passar livremente por uma fenda, forçando, no entanto, o seu eixo de *spin* a apontar para uma direção particular. Se os instrumentos colocados em frente das fendas da direita e da esquerda manipularem os *spins* dos fótons de maneiras específicas e distintas, então a tela de um detector mais sofisticado, que, além de registrar a localização do ponto de impacto do fóton, também registre a orientação do seu *spin*, revelará por qual fenda determinado fóton terá passado a caminho do detector.

Nessa versão do experimento das duas fendas com identificação, os fótons não compõem um padrão de interferência, como na figura 7.4a. Você já deve estar familiarizado com a explicação: os novos instrumentos de identificação permitem compilar as informações de escolha, as quais singularizam as histórias. Os dados revelam que qualquer fóton determinado terá passado ou pela fenda da esquerda ou pela da direita. E sem a combinação entre as trajetórias da esquerda e da direita, não existem ondas de probabilidade que se sobreponham e não se gera o padrão de interferência.

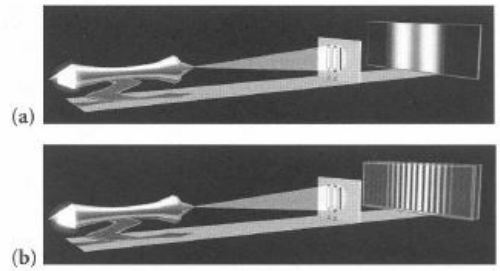


Figura 7.4. *No experimento do apagador quântico, um equipamento colocado em frente às duas fendas marca os fótons de modo que um exame posterior possa revelar por qual fenda cada fóton terá passado. Em (a) vemos que esta informação de escolha destrói o padrão de interferência. Em (b) insere-se um instrumento que apaga a marca dos fótons, colocado logo à frente da tela do detector. Como a informação de escolha é eliminada, o padrão de interferência reaparece.*

Eis a ideia de Scully e Drühl. Que tal se, logo antes de que o fóton alcance a tela do detector, eliminarmos a possibilidade de determinar por qual fenda ele passou, apagando a marca posta pelo instrumento de identificação? Sem que tenhamos os meios de extrair, ainda que em princípio, a informação de escolha do fóton detectado, será que as duas classes de histórias voltarão à cena, restaurando o padrão de interferência? Veja que esta maneira de "desfazer" o passado fica muito mais próxima da categoria chocante do que na do goleiro que defende um pênalti aos 44 minutos do segundo tempo de um jogo empatado. Quando os instrumentos de identificação são ligados, imaginamos que o fóton, obedientemente, atue como partícula e passe ou pela fenda da esquerda ou da direita. Se apagarmos a marca da informação de escolha de que o fóton é portador logo antes que ele alcance a tela, pareceria ser demasiado tarde para que se forme o padrão de interferência. Para que haja interferência é preciso que o fóton atue como onda. É preciso que passe por ambas as fendas para poder refundir-se com ele mesmo a caminho da tela do detector. Mas como fizemos inicialmente a identificação do fóton, pareceria claro que ele atua como partícula e viaja ou pela fenda da direita ou pela da esquerda, o que impede a ocorrência do padrão de interferência.

Em um experimento realizado por Raymond Chiao, Paul Kwiat e Aephraim Steinberg, a configuração era, esquematicamente, a que aparece na figura 7.4, com a inserção de um novo instrumento apagador logo à frente da tela do detector. Também aqui os detalhes não têm importância para nós, mas, em resumo, o apagador funciona fazendo com que o fóton, quer seja proveniente da fenda da esquerda, quer da fenda da direita, tenha o seu *spin* manipulado de modo que aponte sempre para a mesma direção. Assim, o exame posterior do *spin* não proporcionará nenhuma informação a respeito da fenda pela qual o fóton tenha passado, com o que a informação de escolha fica apagada. Por incrível que pareça, os fótons detectados pela tela depois da operação de

apagamento produzem *sim* um padrão de interferência. O apagador colocado logo à frente da tela do detector desfaz — apaga — o efeito da identificação dos fótons, feita bem antes, quando eles se aproximavam das fendas. Tal como no experimento da escolha retardada, esse tipo de apagamento poderia, em princípio, ocorrer bilhões de anos depois da influência que ele está anulando, o que, efetivamente, desfaz o passado e mesmo o passado longínquo.

Como dar sentido a isso? Lembre-se de que os dados se ajustam perfeitamente às previsões teóricas da mecânica quântica. Scully e Drühl propuseram esse experimento porque os cálculos de mecânica quântica que haviam feito já os tinham convencido de que surtiria efeito. E surtiu. Assim, como costuma acontecer com a mecânica quântica, o quebra-cabeça não contrapõe a teoria ao experimento, mas sim a teoria, confirmada pelo experimento, à nossa noção intuitiva do tempo e da realidade. Para diminuir a tensão, observe que, se você colocasse um *detector* de fótons à frente de cada fenda, a leitura do detector determinaria com certeza se o fóton passou pela fenda da esquerda ou da direita, e não haveria maneira de apagar essa informação definitiva — não haveria maneira de recuperar o padrão de interferência. Mas os instrumentos de identificação são diferentes porque propiciam apenas o potencial para determinar a informação de escolha — e as potencialidades são justamente o tipo de coisa que pode ser apagado. O instrumento de identificação modifica o fóton que passa de tal modo que, em termos gerais, ele ainda viaja por ambos os caminhos, mas a parte da esquerda da sua onda de probabilidade fica apagável com relação à da direita, ou vice-versa, a parte da direita fica apagável com relação à da esquerda. Por sua vez, a sequência ordenada de cristas e vales que normalmente surgiria em cada fenda — como na figura 4.2b — também fica apagada, de modo que não se forma um padrão de interferência na tela do detector. A percepção crucial, contudo, é a de que tanto a onda da esquerda quanto a da direita ainda estão presentes. O apagador funciona porque recoloca em foco as ondas. Atuando como óculos, ele compensa o apagamento, põe ambas as ondas novamente em foco e permite que elas se combinem de novo em um padrão de interferência. É como se, depois que os instrumentos de identificação cumprem a sua tarefa, o padrão de interferência desaparecesse da nossa visão, mas ficasse pacientemente esperando que algo ou alguém o ressuscitasse.

Essa explicação pode tornar o apagador quântico um pouco menos misterioso, mas eis o último ato — uma assombrosa variação do experimento do apagador quântico que desafia ainda mais profundamente as noções convencionais do espaço e do tempo.

O PASSADO CONFORMADO

(se você encontrar dificuldade na leitura desta seção, pode tranquilamente passar para a próxima sem perder a continuidade. Mas eu o incentivo a tentar lê-la porque os resultados são realmente estupendos**).**

Este experimento, o *apagador quântico de escolha retardada*, também foi proposto por Scully e Drühl. Ele tem início com o experimento do divisor de feixes da figura 7.1, modificado pela inserção de dois conversores-descendentes, um em cada caminho. Os conversores-descendentes são instrumentos que tomam um fóton como entrada e produzem dois fótons como resultado, cada qual com a metade da energia (convertida e reduzida) do original. Um dos dois fótons (denominado fóton-*sinal)* é orientado para tomar o caminho que o fóton original teria percorrido em direção à tela do detector. O outro fóton produzido pelo conversor-descendente (denominado fóton-*complementar) é* enviado em uma direção totalmente diferente, como na figura 7.5a. Cada vez que o experimento é realizado, podemos determinar qual o caminho tomado pelo fóton-sinal em direção à tela observando qual dos conversores-descendentes emite o parceiro espectador. Neste caso, mais uma vez a capacidade de compilar as informações de escolha a respeito dos fótons-sinais — ainda que totalmente indireta, uma vez que não estamos interagindo com nenhum fóton-sinal — tem o efeito de prevenir a formação de um padrão de interferência.

Agora vamos à parte estranha. E se manipularmos o experimento para que se torne impossível determinar de qual conversor-descendente determinado fóton-complementar surge? Ou seja: e se apagarmos a informação de escolha que os fótons-*complementares* contêm? Acontece algo assombroso: ainda que não tenhamos feito nada diretamente com os fótons-sinais, ao apagarmos as informações de escolha contidas nos parceiros espectadores podemos recuperar o padrão de interferência a partir dos fótons-sinais. Vamos ver como isso funciona, porque é verdadeiramente fantástico.

Observe a figura 7.5b, que reúne todas as ideias essenciais, mas não se deixe intimidar. É mais simples do que parece e vamos avançar com passos seguros. A configuração que aparece na figura 7.5b difere da que aparece na figura 7.5a quanto ao modo de detectar os fótons-espectadores depois da emissão. Na figura 7.5a, a detecção é imediata, de forma que podemos determinar instantaneamente qual conversor-descendente os produziu — ou seja, qual o caminho tomado por determinado fóton-sinal. No novo experimento, cada fóton-*complementar* é enviado a um labirinto, que compromete a nossa capacidade de fazer essa determinação. Imagine, por exemplo, que um fóton-complementar é emitido pelo conversor-descendente que tem a etiqueta “L”. Em vez de entrar imediatamente em um detector (como na figura 7.5a), esse fóton é enviado a um

divisor de feixes (com a etiqueta “a”) e tem, portanto, 50% de possibilidade de seguir em frente pelo caminho “A” e 50% de possibilidade de seguir em frente pelo caminho “B”. Se ele seguir pelo caminho “A”, entrará em um detector de fótons (etiqueta “1”) e a sua chegada será devidamente registrada. Mas se o fóton-complementar seguir pelo caminho “B”, estará sujeito a mais andanças. Ele se dirigirá a outro divisor de feixes (etiqueta “c”) e terá, portanto, 50% de possibilidade de seguir em frente pelo caminho “E” para o detector “2” e 50% de possibilidade de seguir em frente pelo caminho “F” para o detector “3”. Agora — mantenha-se atento porque tudo isto vai fazer sentido — este mesmo raciocínio, quando aplicado a um fóton-*complementar* emitido pelo outro conversor-descendente, com a etiqueta “R”, nos indica que se o fóton-*complementar* seguir pelo caminho “D”, ele será registrado pelo detector “4”, mas se seguir pelo caminho “C”, será detectado ou pelo detector “3” ou pelo detector “2”, dependendo do caminho que tomar depois de passar pelo divisor de feixes “b”.

Por que acrescentamos todas essas complicações? Note que se um fóton-*complementar* for detectado pelo detector “1”, ficamos sabendo que o fóton-sinal correspondente tomou o caminho da esquerda, uma vez que um fóton-*complementar* que tenha sido emitido pelo conversor-descendente “R” não tem como chegar a este detector. Do mesmo modo, se um fóton-*complementar* for detectado pelo detector “4”, ficamos sabendo que o fóton-sinal correspondente tomou o caminho da direita. Mas se um fóton-complementar acabar no detector “2”, não teremos nenhuma ideia quanto ao caminho tomado pelo seu parceiro-sinal, pois há possibilidades iguais de que ele tenha sido emitido pelo conversor-descendente “L” e seguido o caminho B—E, ou de que tenha sido emitido pelo conversor-descendente [a]R” e tomado o caminho C—E. Do mesmo modo, se um fóton-complementar for detectado pelo detector [ÍC]3”, ele poderá ter sido emitido pelo conversor-descendente L” e viajado pelo caminho B—F, ou pelo conversor-descendente “R” e viajado pelo caminho C—F. Assim, *para os fótons-sinais cujos fótons-complementares forem detectados pelos detectores “ 1” ou “4”, teremos informações de escolha, mas para aqueles cujos fótons-complementares forem detectados pelos detectores “2” ou “3” as informações de escolha são apagadas.*

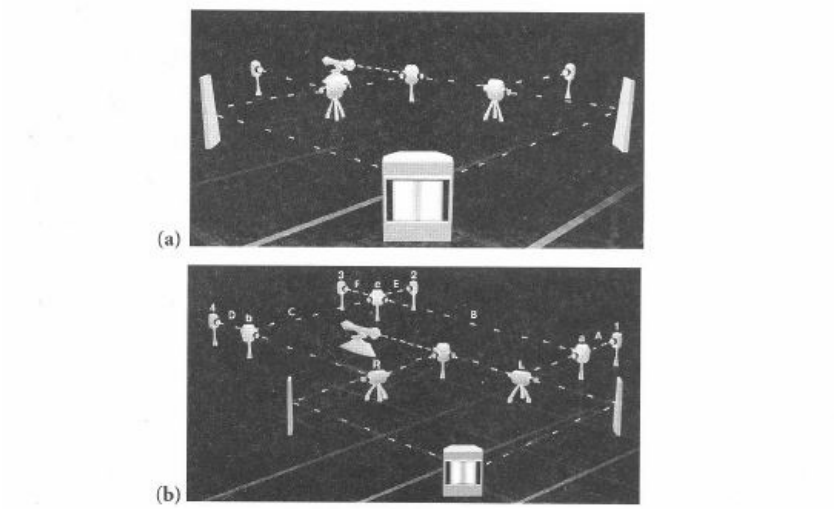


Figura 7.5. (*a*) *Um experimento de divisor de feixes, a que se somam conversores-descendentes, não produz um padrão de interferência, uma vez que os fótons-complementares produzem informações de escolha.* (*b*) *Se os fótons-complementares não forem detectados diretamente, mas sim enviados para o labirinto aqui descrito, então poder-se-á extrair um padrão de interferência a partir dos dados. Os fótons-complementares que forem detectados pelos detectores 2 ou 3 não produzirão informações de escolha e, desse modo, os seus parceiros fótons-sinais comporão um padrão de interferência.*

Este apagamento de algumas das informações de escolha — embora não tenhamos feito *nada diretamente* com os fótons-sinais — significa a recuperação dos efeitos da interferência? Sim senhor — mas apenas para os fótons-*sinais* cujos fótons-*complementares* chegam aos detectores “2” ou “3”. O conjunto total das posições de impacto dos fótons-sinais sobre a tela aparecerá como os dados da figura 7.5a, *sem mostrar nenhum indício de padrão de interferência*, como é característica dos fótons que viajam por um caminho ou pelo outro. Mas, se nos concentrarmos apenas em um *subconjunto* dos pontos registrados — por exemplo, os fótons-sinais cujos fótons-complementares entraram no detector “2” —, esse subconjunto *comporá* um padrão de interferência! Esses fótons-sinais — cujos fótons-espectadores, por razões simplesmente aleatórias, não propiciaram informações de escolha — atuam como se tivessem viajado por ambos os caminhos! Se a tela do detector mostrasse um ponto vermelho para a posição de cada fóton-sinal cujo parceiro espectador tenha sido detectado pelo detector “2”, e um ponto verde para todos os outros, uma pessoa daltônica não veria o padrão de interferência, mas todos os demais veriam que os pontos vermelhos se apresentariam com faixas claras e escuras — um padrão de interferência. O mesmo quadro se revelaria se usarmos o detector “3” no lugar do detector “2”. Porém não haveria nenhum padrão de interferência se nos concentrássemos apenas nos fótons-sinais cujos parceiros complementares chegaram aos detectores “1” ou “4”, uma vez que esses são os fótons-

complementares que propiciam as informações de escolha a respeito dos seus parceiros.

Esses resultados — confirmados em experimentos[5] — são extraordinários: ao incluirmos os conversores-descendentes que têm o potencial de propiciar informações de escolha, perdemos o padrão de interferência, como na figura 7.5a. E sem a interferência, concluiríamos, naturalmente, que cada fóton viajou seja pelo caminho da esquerda, seja pelo da direita. Vemos agora que essa conclusão seria precipitada. Eliminando cuidadosamente as informações de escolha potenciais, trazidas por alguns dos fótons-complementares, podemos induzir a formação de um padrão de interferência que indica que alguns dos fótons tomaram, na verdade, ambos os caminhos.

Note também o que talvez seja o resultado mais espantoso de todos: os três divisores de feixes e os quatro detectores de fótons-complementares que foram acrescentados podem estar no outro lado do laboratório, ou mesmo no outro lado do universo, uma vez que nada na nossa discussão depende de que eles recebam determinado fóton-complementar antes ou depois de que o fóton-*sinal* que é seu parceiro atinja a tela. Imagine, então, que esses instrumentos estão bem longe, a dez anos-luz de distância, por exemplo, e pense no que isso significa. Fazemos o experimento da figura 7.5b hoje, registrando uma após a outra as posições de impacto de um grande número de fótons-*sinais* e observamos que eles não mostram indícios de interferência. Se nos pedirem que expliquemos os dados, poderíamos sentir-nos tentados a dizer que, por causa dos fótons-complementares, dispomos das informações de escolha e, portanto, cada fóton-sinal terá passado seja pelo caminho da esquerda, seja pelo da direita, o que elimina toda possibilidade de interferência. Mas, tal como acima, essa seria uma conclusão precipitada a respeito do que de fato aconteceu. Seria uma descrição totalmente prematura do passado.

Dez anos depois, os quatro detectores de fótons receberão um após o outro os fótons-complementares. Se formos subsequentemente informados sobre quais foram os fótons-complementares que terminaram, digamos, no detector “2” (por exemplo, o primeiro, o sétimo, o oitavo, o décimo segundo... por ordem de chegada), e se voltarmos aos dados que colhemos dez anos antes para identificarmos os pontos de localização na tela dos fótons-sinais correspondentes (o primeiro, o sétimo, o oitavo, o décimo segundo... por ordem de chegada), verificaremos que os pontos assinalados compõem um padrão de interferência, o que revela que é correta a descrição de que esses fótons-sinais viajaram por ambos os caminhos. Alternativamente, se nove anos e 364 dias depois de coletarmos os dados dos fótons-sinais, um brincalhão decidisse sabotar o experimento retirando os divisores de feixes “a” e “b” — com o que, ao

chegarem no dia seguinte, os fótons-complementares iriam todos ou para o detector “1” ou para o “4”, preservando assim *todas* as informações de escolha —, então, ao recebermos essas informações, concluiríamos que *todos* os fótons-sinais viajaram ou pelo caminho da esquerda, ou pelo da direita, e não haveria nenhum padrão de interferência a extrair a partir dos dados dos fótons-sinais. Assim, o que esta discussão mostra com vigor é que a história que contamos para explicar os dados dos fótons-sinais depende significativamente de medições feitas dez anos depois do momento em que esses dados foram reunidos.

Permita-me ressaltar novamente que as medições feitas no futuro não alteram nada com relação às coisas que aconteceram no experimento realizado hoje. As medições futuras não alteram de modo algum os dados coletados hoje. Mas as medições futuras influenciam, sim, os detalhes que podem ser invocados na descrição subsequente do que aconteceu hoje. Antes de conhecer os resultados das medições dos fótons-complementares, não se pode dizer nada a respeito da história dos caminhos de qualquer fóton-sinal. Mas, uma vez que se conheçam os resultados, podemos afirmar conclusivamente que os fótons-sinais cujos parceiros espectadores foram empregados para a utilização das informações de escolha viajaram, *sim* — anos antes —, ou pela esquerda, ou pela direita. Podemos concluir também que *não se pode* afirmar que os fótons-sinais cujos parceiros espectadores tiveram apagadas as informações de escolha que continham tenham viajado — anos antes — por um caminho ou pelo outro (conclusão que se pode confirmar convincentemente usando-se os dados recém-adquiridos dos fótons-complementares para expor os padrões de interferência previamente ocultos dentro desta última classe de fótons-sinais). Vemos, assim, que o futuro ajuda a conformar a história que contamos sobre o passado.

Esses experimentos são uma tremenda afronta às nossas noções convencionais a respeito do espaço e do tempo. Algo que acontece muito depois e a grande distância de um evento é, no entanto, vital para que possamos descrever esse evento. Do ponto de vista clássico — do ponto de vista do bom senso — isso é uma loucura. Aí está a coisa: o ponto de vista clássico é o ponto de vista errado para considerar um universo quântico. Aprendemos com a discussão de Einstein, Podolsky e Rosen que a física quântica não segue a localidade no espaço. Se você aprendeu bem a lição — lição bem difícil de aceitar à primeira vista —, esses experimentos, que envolvem um tipo de emaranhamento através do espaço e do tempo, podem não parecer tão insólitos. Mas segundo a nossa experiência diária, eles certamente o são.

MECÂNICA QUÂNTICA E EXPERIÊNCIA

Lembro-me de que ao ser informado a respeito desses experimentos fiquei empolgado por alguns dias. Senti como se tivéssemos a oportunidade de observar um lado velado da realidade. A experiência comum — as atividades normais, corriqueiras e diárias — repentinamente parecia fazer parte de um quebra-cabeça clássico, que escondia a verdadeira natureza do nosso mundo quântico. O mundo cotidiano subitamente aparecia como um número de mágica ao contrário, que levava a plateia a acreditar nos conceitos usuais e familiares do espaço e do tempo, enquanto a verdade assombrosa da realidade quântica ficava cuidadosamente guardada por um ato de prestidigitação da natureza.

Nos anos recentes, os físicos dedicaram grande empenho em buscar explicações para essa astúcia da natureza — em determinar com precisão como as leis fundamentais da física quântica podem combinar-se com as leis clássicas que explicam tão satisfatoriamente a experiência comum —; em síntese, para compreender como a estranheza mágica do mundo atômico e subatômico se comporta de modo a possibilitar a formação de objetos macroscópicos. As pesquisas continuam, mas muito já se aprendeu. Vejamos alguns aspectos de relevância particular para a questão da seta do tempo, agora do ponto de vista da mecânica quântica.

A mecânica clássica baseia-se nas equações que Newton descobriu no final do século XVII. O eletromagnetismo baseia-se nas equações que Maxwell descobriu no final do século XIX. A relatividade especial baseia-se nas equações que Einstein descobriu em 1905, e a relatividade geral baseia-se nas equações por ele descobertas em 1915. O que todas essas equações têm em comum, e que é básico para o dilema da seta do tempo (tal como explicamos no capítulo anterior), é o tratamento completamente simétrico que elas dão ao passado e ao futuro. Em ponto algum essas equações contêm o que quer que seja que estabeleça alguma diferença entre o tempo “para a frente” e “para trás”. O passado e o futuro são tratados em pé de igualdade.

A mecânica quântica baseia-se em uma equação que Erwin Schrödinger descobriu em 1926.[6] A única coisa que é necessário saber a respeito é que ela toma como dado inicial a forma de uma onda de probabilidade em determinado momento do tempo, como o que aparece na figura 4.5, e permite que determinemos a forma dessa onda em qualquer outro momento do passado ou do futuro. Se a onda de probabilidade estiver associada a uma partícula, como um elétron, ela pode ser usada para prever a probabilidade de que, em qualquer instante especificado, o elétron seja experimentalmente encontrado em qualquer posição especificada. Assim como as leis clássicas de Newton, Maxwell e Einstein, a lei quântica de Schrödinger confere um tratamento igualitário ao

futuro e ao passado do tempo. Um “filme” que mostrasse uma onda de probabilidade que começa de *uma* maneira e termina de outra pode ser passado do fim para o começo — e mostrar uma onda de probabilidade que começa da *outra* maneira e termina da maneira que antes era *a inicial* — sem que haja meios de determinar que uma das evoluções seria a correta e a outra a errada. Ambas as soluções seriam igualmente válidas para a equação de Schrödinger. Ambas representariam maneiras igualmente sensatas em que as coisas poderiam evoluir.[7]

Evidentemente, o “filme” a que nos referimos acima é bem diferente dos que usamos para analisar o movimento das bolas, pedras e ovos que se espatifam, no capítulo anterior. As ondas de probabilidade não são coisas que se possam ver diretamente. Não há câmeras que possam captá-las em filmes. Só podemos descrevê-las por meio de equações matemáticas e, com a nossa imaginação abstrata, pensar que as ondas mais simples tenham formas como as que aparecem nas figuras 4.5 e 4.6. Mas os únicos acessos que temos às ondas de probabilidade são indiretos, por meio dos processos de medição.

Como vimos no capítulo 4 e novamente nos experimentos analisados acima, a formulação-padrão da mecânica quântica descreve o desdobramento dos fenômenos usando dois estágios bem distintos. No estágio um, a onda de probabilidade — ou, no linguajar mais preciso dos especialistas, a *função de onda* — de um objeto como um elétron evolui de acordo com a equação descoberta por Schrödinger. Essa equação mostra que a forma da função de onda modifica-se suave e gradualmente, de modo semelhante ao que acontece com as ondas de água que atravessam um lago de um lado ao outro. (a mecânica quântica tem, e com razão, a reputação de ser tudo, menos suave e gradual. Ao contrário, como veremos nos próximos capítulos, ela revela um microcosmo turbulento e agitado. A origem dessa agitação é a natureza probabilística da função de onda — ainda que as coisas possam apresentar-se de uma maneira em determinado momento, há uma probabilidade de que elas estejam de outra maneira, significativamente diferente, no momento seguinte —, e não uma propriedade de agitação permanente da própria função de onda). Na descrição-padrão do segundo estágio, tomamos contato com a realidade observável pela medição da posição do elétron e, ao fazê-lo, provocamos uma mudança forte e abrupta na forma da função de onda. A função de onda do elétron não é igual aos exemplos mais familiares das ondas de água e de som: ao medirmos a posição do elétron, a sua função de onda dá um salto, ou, como se vê na figura 4.7, entra em colapso, caindo a zero em todos os lugares onde a partícula não está e alcançando a probabilidade de 100% no lugar específico em que a partícula é encontrada por meio da medição.

O estágio um — a evolução das funções de onda de acordo com a equação de Schrödinger — é matematicamente rigoroso, totalmente isento de ambiguidades e inteiramente aceito pela comunidade dos físicos. O estágio dois — o colapso

de uma função de onda em consequência da medição — é, ao contrário, algo que, ao longo dos últimos oitenta anos, tem mantido os físicos em certo estado de perplexidade e colocado problemas, enigmas e paradoxos potenciais que puseram fim a várias carreiras. A dificuldade, como mencionamos ao final do capítulo 4, está em que, segundo a equação de Schrödinger, as funções de onda *não* entram em colapso. O colapso é um aditivo, introduzido depois que Schrödinger descobriu a equação, com o fim de levar em conta o que os pesquisadores observam na realidade. Se, por um lado, uma função de onda pura e sem colapsos incorpora a estranha ideia de que uma partícula está em diferentes lugares, por outro lado, os pesquisadores nunca observam esse fato: sempre encontram a partícula em um lugar definido; nunca a vê em parcialmente em um lugar e parcialmente em outro; a agulha do seu instrumento de medição nunca fica flutuando em uma mescla difusa de diferentes valores possíveis.
Isso também é válido, evidentemente, para as nossas observações costumeiras do mundo à nossa volta. Nunca vemos que uma cadeira esteja em dois lugares ao mesmo tempo; nunca observamos a Lua em dois lugares simultâneos; nunca vemos um gato que esteja vivo e morto em um mesmo momento. A noção do colapso de uma função de onda está de acordo com a nossa experiência postulando que o ato de medir induz a função de onda a abandonar o limbo quântico e trazer para a realidade uma das múltiplas potencialidades.

O ENIGMA QUÂNTICO DA MEDIÇÃO

Mas como pode ser que a medição feita por um pesquisador provoque o colapso de uma função de onda? Na verdade, será que o colapso da função de onda realmente ocorre? E se ocorrer, o que é que realmente acontece no nível microscópico? Toda e qualquer medição causa o colapso? Quando ocorre o colapso e quanto tempo ele dura? Uma vez que as funções de onda, segundo a equação de Schrödinger, não entram em colapso, qual é a equação que passa a vigorar no segundo estágio da evolução quântica, e como essa nova equação derruba a de Schrödinger, usurpando o seu poder normalmente absoluto sobre os processos quânticos? E há outro ponto que tem importância para a nossa preocupação atual com a seta do tempo. Enquanto a equação de Schrödinger, a equação que comanda o primeiro estágio, não faz nenhuma distinção entre ir para a frente ou ir para trás no tempo, será que a equação para o segundo estágio introduz uma assimetria fundamental entre o tempo anterior e o tempo posterior à medição? Em outras palavras, será que a mecânica quântica, *inclusive a sua interface com o mundo cotidiano, por meio das medições e das observações*,

introduz uma seta do tempo nas leis básicas da física? Afinal, discutimos antes como o tratamento quântico do passado difere do que lhe é dado pela física clássica, e entendemos por *passado* o que é anterior à uma medição ou de uma observação particular. Então, será que as medições, tal como incorporadas pelo colapso da função de onda no estágio dois, estabelecem uma assimetria entre o passado e o futuro, entre o antes e o depois de uma medição?

Essas questões têm resistido teimosamente a uma solução definitiva e permanecem controvertidas. Mas através das décadas a capacidade da teoria quântica de fazer previsões praticamente não sofreu abalos. A formulação estágio um/estágio dois da teoria quântica, ainda que o estágio dois permaneça envolto em mistério, prevê as probabilidades para a medição de um resultado ou de outro. E essas previsões têm sido confirmadas pela repetição exaustiva de determinados experimentos e pelo exame da frequência com que cada um deles se verifica. O fantástico êxito experimental desse enfoque foi muito mais do que compensador com relação ao desconforto de não dispormos de uma articulação precisa a respeito do que efetivamente acontece no estágio dois.

No entanto, o desconforto sempre esteve presente. E não é simplesmente porque certos detalhes do colapso das funções de onda não foram ainda bem solucionados. *O problema quântico da medição*, como é chamado, é uma questão que se relaciona com os limites da mecânica quântica e também com a sua universalidade. É fácil ver isso. O enfoque do estágio um/estágio dois introduz uma divisão entre o que está sendo observado (um elétron, um fóton, ou um átomo, por exemplo) e o pesquisador que faz a observação. Antes que o pesquisador entre em cena, as funções de onda evoluem, dóceis e felizes, de acordo com a equação de Schrödinger. Mas quando ele se intromete nas coisas para fazer uma medição, as regras do jogo mudam de repente. A equação de Schrödinger é posta de lado e o colapso característico do segundo estágio toma o seu lugar. Contudo, como não há diferença entre os átomos, os prótons e os elétrons que constituem o pesquisador e o equipamento que ele usa e os átomos, prótons e elétrons que ele estuda, por que motivo haveria uma diferença na maneira pela qual a mecânica quântica os trata? Se a mecânica quântica é uma teoria universal, que se aplica a *tudo*, sem limitações, o observador e o objeto observado deveriam ser tratados exatamente da mesma maneira.

Niels Bohr não estava de acordo. Ele afirmava que os pesquisadores e os seus equipamentos *são* diferentes das partículas elementares. Eles são feitos das mesmas partículas, porém são “grandes” aglomerações de partículas elementares e por isso são comandados pelas leis da física clássica. Em algum ponto, entre o mundo mínimo dos átomos e das partículas subatômicas e o mundo usual das

pessoas e dos equipamentos, as regras mudam porque os tamanhos também mudam. A motivação para afirmar essa divisão é clara: uma partícula ínfima, de acordo com a mecânica quântica, pode localizar-se em uma mescla difusa de diferentes lugares e, contudo, não vemos esse comportamento ocorrer no mundo das coisas grandes e cotidianas. Mas onde fica exatamente a fronteira? E o que é de importância vital: como os dois conjuntos de regras interagem quando o mundo grande e cotidiano confronta o mundo minúsculo dos átomos, como no caso das medições? Bohr declarava com vigor que essas questões estão fora dos limites, significando com isso que, verdade seja dita, elas estão além do que ele ou qualquer outra pessoa possa responder. E como a teoria faz previsões fantasticamente precisas mesmo sem resolver essas questões, elas ficaram durante um longo tempo no fim da lista das prioridades dos físicos.

Contudo, para termos uma compreensão completa da mecânica quântica, para determinar por inteiro o que ela diz da realidade e para estabelecer que papel ela poderia desempenhar na questão da direção da seta do tempo, temos de considerar o problema da medição.

Nas duas próximas seções descreveremos algumas das tentativas mais proeminentes e promissoras de fazê-lo. Se você quiser saltar logo para a frente, até a última seção, que focaliza a mecânica quântica e a seta do tempo, o resultado final é que os trabalhos engenhosos feitos até aqui têm ocasionado progressos significativos, mas uma solução que seja aceitável para todos ainda está fora do nosso alcance. Muitos veem neste problema a falha mais importante na formulação das leis quânticas.

A REALIDADE E O PROBLEMA QUÂNTICO DA MEDIÇÃO

Ao longo dos anos, houve muitas propostas de solução para o problema quântico da medição. Ironicamente, embora elas impliquem concepções diferentes da realidade — e algumas drasticamente diferentes —, quando chegamos às previsões do que o pesquisador medirá, em quase todos os experimentos, todas elas concordam e funcionam de forma admirável. Cada proposição oferece o mesmo espetáculo, embora, nos bastidores, se possa ver que os seus *modi operandi* diferem substancialmente entre si.

Quando se trata de espetáculos, normalmente não há demasiada preocupação com os acontecimentos secundários, e o foco se concentra apenas na produção. Mas quando se trata de compreender o universo, há uma necessidade insaciável de levantar todas as cortinas, de abrir todas as portas e de expor completamente os mecanismos internos do funcionamento da realidade. Bohr achava que esse

impulso é desnecessário e desorientador. Para ele, a realidade é o desempenho. Como um solilóquio de Spalding Gray, a pura e simples medição do pesquisador *é* o espetáculo. Não há nada mais. De acordo com Bohr, não há bastidores. Não adianta ficar analisando como, quando e por que uma função de onda quântica abandona todas as possibilidades menos uma e produz um número definido e único no instrumento de medida. O próprio número é a única coisa que merece atenção.

Essa perspectiva prevaleceu por várias décadas. Apesar do seu efeito calmante sobre as mentes que labutam com a teoria quântica, não se pode deixar de sentir que o fantástico poder de previsão da mecânica quântica significa que ela *está* efetivamente incursionando em uma realidade que opera de maneira subjacente ao funcionamento do universo. Não conseguimos evitar o desejo de nos aprofundarmos e entendermos como a mecânica quântica interage com a experiência comum — como ela supera o hiato entre a função de onda e a observação e qual é a realidade subjacente à observação. Durante esse tempo, muitos pesquisadores dedicaram-se a esse desafio, e aqui estão algumas das proposições que eles desenvolveram.

Um enfoque, cujas raízes históricas remontam a Heisenberg, é abandonar a visão de que as funções de onda são características objetivas da realidade quântica e vê-las, simplesmente, como uma representação do que conhecemos sobre a realidade. Antes de fazermos uma medição, não sabemos onde está o elétron e, segundo este ponto de vista, a nossa ignorância quanto à sua localização fica refletida na função de onda do elétron, que descreve as diversas posições em que ele pode estar. No momento em que medimos a sua posição, no entanto, o conhecimento do seu paradeiro modifica-se repentinamente: Agora conhecemos, em princípio, a sua posição com precisão total. (Pelo princípio da incerteza, se conhecermos de forma precisa a sua localização, necessariamente ignoraremos por completo a sua velocidade, mas isso não é relevante para a discussão atual.) Essa mudança súbita de visão, de acordo com esta perspectiva, reflete-se em uma mudança súbita na função de onda do elétron: ela entra repentinamente em colapso e toma a forma pontiaguda da figura 4.7, que indica termos o conhecimento definido da posição do elétron. Então, segundo esse enfoque, o colapso abrupto da função de onda não oferece nenhuma surpresa: ele corresponde a nada mais do que à abrupta mudança de conhecimento que experimentamos quando aprendemos algo novo.

Um segundo enfoque, iniciado em 1957 por Hugh Everett, aluno de Wheeler, nega que as funções de onda entrem em colapso. Ao contrário, todo e qualquer resultado potencial incorporado à função de onda vê a luz do dia. A luz do dia que cada um deles vê, no entanto, ocorre em seus respectivos universos

separados. Segundo este enfoque, a *Interpretação de muitos mundos*, o conceito do "universo" sofre uma ampliação e passa a incluir inumeráveis "universos paralelos" — inumeráveis versões do nosso universo — de modo que tudo o que a mecânica quântica prevê que *possa* ocorrer, mesmo que com probabilidades mínimas, *efetivamente* ocorre ao menos em um dos exemplares do universo. Se uma função de onda diz que um elétron pode estar aqui, ali, ou mais adiante, há um universo em que uma versão da sua pessoa verá que ele está aqui; há um outro universo em que outra versão da sua pessoa verá que ele está ali; e um terceiro universo em que uma terceira versão de você próprio verá que o elétron está mais adiante. A sequência de observações que todos fazemos a cada instante reflete, assim, a realidade que transcorre apenas em uma parte de uma rede colossal, infinita, de universos, cada qual povoado por cópias de você e de mim e de todos os demais seres que ainda estão vivos em um universo em que certas observações produziram certos resultados. Em um desses universos, você está agora lendo estas palavras; em outro você deu uma parada para ver a internet; em um terceiro você está ansioso, esperando que as cortinas se abram para que comece a ópera. É como se não existisse apenas um bloco de espaço-tempo, como o que aparece na figura 5.1, mas sim um número infinito deles, cada um dos quais realiza uma das sequências possíveis dos eventos. Na teoria dos muitos mundos, então, nenhum resultado potencial permanece apenas potencial. As funções de onda não entram em colapso. Todos os resultados potenciais se realizam nos diferentes universos paralelos.

Uma terceira proposição, desenvolvida na década de 1950 por David Bohm — o mesmo físico que mencionamos no capítulo 4 ao discutir o paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen —, segue um caminho completamente diferente.[8] Bohm argumentou que as partículas, como os elétrons, *têm* posições e velocidades definidas, como na física clássica e como esperava Einstein. Mas, por causa do princípio da incerteza, essas características ficam ocultas. São exemplos das *variáveis ocultas* mencionadas no capítulo 4. Não se pode determinar ambas simultaneamente. Para Bohm, essa incerteza representava um limite para o que podemos conhecer, mas não significava nada com relação aos atributos das próprias partículas. Essa hipótese não viola os resultados de Bell porque, como vimos ao final do capítulo 4, ter propriedades definidas que são proibidas pela incerteza quântica *não é* proibido. Só a localidade é proibida, e o enfoque de Bohm não é local.[9] Ao contrário, Bohm imaginava que a função de onda de uma partícula é um *elemento separado da realidade*, que existe *além da própria partícula*. Não se trata de partículas ou ondas, como na filosofia da complementaridade de Bohr. De acordo com Bohm, trata-se de partículas e

ondas. Além disso, Bohm postulava que a função de onda de uma partícula interage com a própria partícula — "guiando-a" ou "empurrando-a" — de um modo que determina o seu movimento subsequente. Esse enfoque concorda plenamente com as previsões comprovadas da mecânica quântica convencional, e Bohm apontou que mudanças ocorridas em uma função de onda em uma localização podem empurrar imediatamente uma partícula para uma localização distante, descoberta que revela de forma explícita a não-localidade do seu enfoque. No experimento das duas fendas, por exemplo, cada partícula passa ou por uma fenda, ou pela outra, enquanto a sua função de onda passa por ambas e sofre interferência. Como a função de onda guia o movimento da partícula, não deveria ser tão surpreendente que as equações mostrem a probabilidade maior de que a partícula apareça onde o valor da função de onda é alto e a probabilidade menor de que ela apareça onde o valor da onda é baixo, o que explica os dados da figura 4.4. Segundo Bohm, não há um estágio separado de colapso da função de onda, uma vez que, se medirmos a posição de uma partícula e a encontrarmos *em um lugar*, esse é o lugar onde ela verdadeiramente se encontrava um momento antes de que a medição fosse feita.

Um quarto enfoque, desenvolvido pelos físicos italianos Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber, toma a corajosa iniciativa de modificar a equação de Schrödinger de uma maneira astuta, que praticamente não produz efeitos sobre a evolução das funções de onda das partículas individuais, mas exerce um impacto extraordinário sobre a evolução quântica, quando aplicada a objetos "grandes" e cotidianos. A modificação proposta vê as funções de onda como intrinsecamente instáveis. Mesmo sem nenhuma intromissão, dizem esses pesquisadores, mais cedo ou mais tarde todas as funções de onda entram em colapso, por suas próprias razões, e tomam a forma de uma agulha. Para uma partícula individual, Ghirardi, Rimini e Weber postulam que o colapso da função de onda ocorre de modo espontâneo e aleatório, em média uma vez a cada bilhão de anos aproximadamente.[10] Essa é uma frequência tão baixa que as modificações que traz para o tratamento das partículas individuais pela mecânica quântica é quase insignificante, o que é bom, uma vez que a descrição por ela dada ao microcosmo é extremamente precisa. Mas para objetos grandes, como os pesquisadores e os seus equipamentos, compostos por bilhões e bilhões de partículas, existe uma chance alta de que, em uma mínima fração de um segundo qualquer, ocorrerá um colapso espontâneo pelo menos para alguma das partículas componentes, que levará ao colapso da sua função de onda. Como argumentaram Ghirardi, Rimini, Weber e outros, a natureza emaranhada de todas as funções de onda em um objeto grande faz com que esse colapso inicie uma espécie de efeito dominó quântico que leva ao colapso das funções de onda de

todas as partículas componentes. Como isso acontece em uma breve fração de um segundo, a modificação proposta faz com que os objetos grandes tenham sempre uma configuração essencialmente definida: os ponteiros do equipamento de medição sempre apontam para um mesmo valor. A Lua está sempre em um mesmo lugar definido no céu; os cérebros dos cientistas vivenciam sempre uma experiência definida; e os gatos estão sempre ou vivos, ou mortos.

Todos esses enfoques, assim como diversos outros que não discutiremos, têm os seus defensores e detratores. O enfoque que vê a "função de onda como conhecimento" evita a questão do colapso, negando qualquer realidade à função de onda, considerada simplesmente uma descrição do que sabemos. Mas os detratores perguntam por que a física fundamental tem de estar tão intimamente associada à consciência humana. Se não estivéssemos aqui para observar o mundo, as funções de onda nunca entrariam em colapso? Ou talvez nem o próprio conceito de função de onda sequer existisse? Será que o universo era um lugar tão diferente antes que a consciência humana evoluísse no planeta Terra? E se, em vez de pesquisadores humanos, os observadores fossem apenas os ratos, as amebas ou os computadores? A mudança do seu "conhecimento" seria adequada para associar-se com o colapso da função de onda?[11]

Por outro lado, a interpretação dos muitos mundos evita a questão do colapso da função de onda, que, segundo ela, não ocorre. O preço a pagar, no entanto, é uma enorme proliferação de universos, que muitos detratores consideram intoleravelmente exorbitante.[12] O enfoque de Bohm também evita o colapso da função de onda; mas, na opinião dos detratores, ao conferir realidades independentes tanto às partículas quanto às ondas, essa teoria peca por falta de economicidade. Além disso, como corretamente argumentam os detratores, na formulação de Bohm a função de onda pode exercer influências mais rápidas do que a luz sobre as partículas que ela controla. Já os defensores observam que a primeira restrição é, na melhor das hipóteses, subjetiva, e que o segundo ponto está de acordo com a não-localidade, que Bell provou ser inevitável, razão por que nenhuma das duas críticas é convincente. Contudo, e talvez injustificadamente, o enfoque de Bohm nunca ganhou apoio amplo.[13] A abordagem de Ghirardi, Rimini e Weber trata o colapso da função de onda de maneira direta, modificando as equações para incorporar um novo mecanismo de colapso espontâneo. Mas os detratores assinalam que não existe ainda sequer um traço de comprovação experimental em apoio da modificação proposta à equação de Schrödinger.

Sem dúvida, as pesquisas que se fazem em busca de uma conexão sólida e plenamente transparente entre o formalismo da mecânica quântica e a experiência da vida cotidiana continuarão ainda por algum tempo, e é difícil

indicar qual dos enfoques já conhecidos ganhará o consenso, se é que algum o fará. Se hoje fizéssemos uma pesquisa de opinião entre os físicos, não creio que surgisse nenhum favorito claro. Infelizmente, a ajuda experimental é muito limitada. A proposição de Ghirardi, Rimini e Weber faz previsões que, em certas situações, diferem das que são feitas pela mecânica quântica padrão do tipo estágio um/estágio dois, mas as diferenças são demasiado pequenas para que possam ser testadas com a tecnologia atual. A situação quanto às outras três proposições é pior, porque a comprovação experimental é ainda mais difícil. Elas concordam plenamente com o enfoque-padrão e fazem as mesmas previsões para as coisas que podem ser observadas e medidas. Diferem dele apenas no que toca ao que acontece nos bastidores, por assim dizer. Portanto, diferem apenas no que concerne às implicações da mecânica quântica para com a natureza última da realidade.

Embora o problema quântico da medição permaneça insolúvel, durante as últimas décadas vem-se desenvolvendo um esquema que, ainda que incompleto, é visto por amplos segmentos como um provável integrante da solução a que se chegará. Denomina-se *descoerência.*

DESCOERÊNCIA E REALIDADE QUÂNTICA

Quando nos defrontamos pela primeira vez com o aspecto probabilístico da mecânica quântica, a nossa reação natural é pensar que a sua natureza é similar à do que ocorre quando jogamos cara ou coroa, ou roleta. Mas quando aprendemos a respeito da interferência quântica, vemos que as probabilidades têm para a mecânica quântica uma importância muito mais essencial. Nos exemplos cotidianos, atribuem-se probabilidades a vários resultados — cara ou coroa, vermelho ou negro, um número da loteria ou outro —, sabendo-se que algum deles fatalmente ocorrerá e que cada resultado é o produto final de uma história independente e definida. Quando jogamos cara ou coroa, às vezes o movimento da moeda é exatamente o necessário para que o resultado seja “cara” e às vezes é exatamente o necessário para que o resultado seja “coroa”. A probabilidade de 50% que atribuímos a cada resultado refere-se não só à ocorrência final — cara ou coroa —, mas também às histórias que levam a cada resultado. Metade das diferentes maneiras de manipular a moeda produz “cara” e a outra metade produz “coroa”. As histórias, no entanto, são, elas próprias, alternativas totalmente separadas e isoladas. Os diferentes movimentos da moeda, quaisquer que sejam eles, não exercem influência sobre os outros lançamentos, nem aumentando, nem diminuindo a probabilidade de cada resultado. Todos eles são independentes.

Entretanto na mecânica quântica as coisas são diferentes. Os caminhos alternativos que um elétron pode seguir das fendas para o detector não são histórias separadas e isoladas. As histórias possíveis mesclam-se para produzir o resultado observado. Alguns caminhos reforçam-se mutuamente enquanto outros mutuamente se cancelam. Essa interferência quântica entre as várias histórias possíveis é responsável pelo padrão de faixas claras e escuras que aparece na tela do detector. *Assim, a diferença significativa entre a noção de probabilidade da física clássica e a da mecânica quântica é que a última é sujeita à interferência e a primeira não é.*

A descoerência é um fenômeno generalizado que estabelece uma ponte entre a física quântica do microcosmo e a física clássica dos objetos maiores ao suprimir a interferência quântica — ou seja, ao diminuir acentuadamente a diferença essencial entre as probabilidades clássicas e as quânticas. A importância da descoerência foi percebida logo nos primeiros dias da teoria quântica, mas a sua cristalização moderna provém de um trabalho seminal do físico alemão Dieter Zeh, em 1970,[14] o qual foi posteriormente desenvolvido por muitos pesquisadores, inclusive Erich Joos, também alemão, e Wojciech Zurek, do Laboratório Nacional de Los Alamos, no Novo México.

A ideia é a seguinte: quando se aplica a equação de Schrödinger a uma situação simples, como a passagem de fótons individuais e separados por uma barreira com duas fendas, isso dá lugar ao famoso padrão de interferência. Mas há duas características muito especiais desse exemplo de laboratório que não são típicas dos acontecimentos da realidade que vivemos. Em primeiro lugar, as coisas que encontramos no nosso dia-a-dia são maiores e mais complexas do que um fóton. Em segundo lugar, as coisas que encontramos na vida diária não são isoladas. Elas interagem conosco e com o ambiente. O livro que está nas suas mãos é acessível ao contato humano e é continuamente atingido por fótons e moléculas de ar. Além disso, como o próprio livro é composto por muitíssimos átomos e moléculas, a agitação constante desses componentes faz com que eles também se choquem permanentemente uns com os outros. O mesmo acontece com os ponteiros dos instrumentos de medição, com os gatos, com os cérebros humanos e com praticamente tudo o que encontramos na nossa vida diária. Nas escalas astrofísicas, a Terra, a Lua, os asteroides e os outros planetas são continuamente bombardeados pelos fótons provenientes do Sol. Até mesmo um simples grão de poeira que flutua no espaço exterior está sujeito a impactos contínuos por parte de fótons de micro-ondas de baixa energia, que andam pelo espaço desde os momentos posteriores ao Big-Bang. Desse modo, para compreendermos o que a mecânica quântica diz a respeito dos acontecimentos da vida real — em

contraste com os experimentos de laboratório —, deveríamos aplicar a equação de Schrödinger a essas situações mais complexas e confusas.

Em essência, isso é o que salientava Zeh em seu trabalho que, juntamente com o de muitos outros que o seguiram, revelou algo realmente maravilhoso. Embora os fótons e as moléculas de ar sejam demasiado pequenos para exercer qualquer efeito significativo sobre o movimento de objetos grandes como este livro, ou um gato, eles fazem uma outra coisa: "cutucam" continuamente a função de onda do objeto grande, ou, nos termos da física, afetam a sua coerência: confundem a sequência ordenada em que a uma crista segue-se um vale e depois outra crista. Isso é crucial porque o ordenamento da função de onda é fundamental para a geração dos efeitos de interferência (veja a figura 4.2). Dessa maneira, assim como a adição de marcadores ao experimento das duas fendas torna difusa a função de onda resultante e com isso dilui os efeitos da interferência, o bombardeio constante dos objetos pelos componentes do ambiente em que estão também dilui a possibilidade de fenômenos de interferência. Por sua vez, já não sendo possível a interferência quântica, as probabilidades inerentes à mecânica quântica passam a ser, para todos os efeitos práticos, similares às probabilidades inerentes ao cara e coroa e à roleta. Uma vez que a descoerência ambiental torne difusa uma função de onda, a natureza exótica das probabilidades quânticas funde-se com as probabilidades mais familiares da vida cotidiana.[15] Isso aponta para uma resolução do problema quântico da medição, a qual, se alcançada, corresponderia ao máximo a que poderíamos aspirar. Farei uma descrição inicial deste aspecto a partir da óptica mais positiva e depois assinalarei o que ainda está por ser feito.

Se a função de onda de um elétron isolado mostra que ele tem, digamos, uma chance de 50% de estar em determinado lugar, e de 50% de estar em outro determinado lugar, devemos interpretar essas probabilidades usando integralmente a estranheza da mecânica quântica. Como ambas as alternativas podem revelar-se conjugando-se e gerando um padrão de interferência, devemos supor que elas são igualmente reais. Em linguagem comum, pode-se dizer que o elétron está em ambos os lugares. Que acontece se medirmos a posição do elétron com um instrumento de laboratório não isolado e de tamanho normal? Em consonância com a ambiguidade do paradeiro do elétron, o ponteiro do instrumento tem 50% de probabilidade de indicar o primeiro valor e 50% de indicar o segundo. Mas por causa da descoerência, o ponteiro *não* ficará em um estado difuso, marcando os dois valores ao mesmo tempo. Por causa da descoerência, podemos interpretar essas probabilidades no sentido clássico, normal e cotidiano. Assim como uma moeda tem 50% de probabilidade de marcar cara e 50% de marcar coroa, mas sempre marca *ou* cara, *ou* coroa, o

ponteiro também tem 50% de probabilidade de apontar para um valor e 50% de apontar para o outro, porém ele terá que apontar *ou* para um, *ou* para o outro.

Raciocínio similar aplica-se para todos os demais objetos complexos e não isolados. Se um cálculo quântico revela que um gato que esteja dentro de uma caixa fechada tem 50% de probabilidade de estar vivo e 50% de estar morto — porque há uma probabilidade de 50% de que um elétron atinja uma armadilha que libera um veneno e mate o gato e 50% de que não a atinja —, a descoerência indica que o gato *não* estará em um absurdo estado misto de vida e morte ao mesmo tempo. A despeito de várias décadas de intensos debates dedicados a estas questões — "O que significa o gato estar morto e vivo ao mesmo tempo?", "Como o ato de abrir a caixa e observar o gato força a escolha de um estado definido — vivo ou morto?" —, a descoerência sugere que, muito antes de abrirmos a caixa, o ambiente já fez bilhões de observações que, de maneira praticamente instantânea, convertem todas as misteriosas probabilidades quânticas nas suas corriqueiras correspondentes clássicas. Muito antes que observemos o gato, o ambiente já terá obrigado o gato a estar em uma condição única e definida. A descoerência faz com que grande parte da estranheza da física quântica "vaze" e saia, pouco a pouco, dos objetos grandes, levada pelas inumeráveis partículas provenientes do meio ambiente.

É difícil imaginar uma solução mais satisfatória para o problema quântico da medição. Sendo mais realista e abandonando a premissa simplificadora que ignora o ambiente — simplificação que foi crucial para que pudéssemos progredir nos primeiros tempos do desenvolvimento do campo —, verificamos que os mecanismos quânticos têm uma solução incorporada neles próprios. A consciência humana, os pesquisadores humanos e as observações humanas já não necessitam desempenhar um papel especial, pois são (somos!) simples elementos do ambiente, como as moléculas de ar e os fótons, que podem interagir com os sistemas físicos. Também já não haveria uma divisão do tipo estágio um/estágio dois entre a evolução dos objetos e o pesquisador que os mede. Tudo — observado e observador — estaria em pé de igualdade. Tudo — observado e observador — estaria sujeito precisamente às mesmas regras da mecânica quântica, como previsto pela equação de Schrödinger. O ato de medir já não seria especial. Seria simplesmente um exemplo específico de contato com o meio ambiente.

Será que é assim? Será que a descoerência resolve o problema quântico da medição? Será que é responsável pelo fato de que as funções de onda abrem as portas para apenas um entre todos os resultados possíveis e as fecham para todos os demais? Alguns cientistas acham que sim. Pesquisadores como Robert Griffiths, de Carnegie Mellon; Roland Omnès, de Orsay; o ganhador do Prêmio

Nobel Murray Gell-Mann, do Santa Fé Institute; e Jim Hartle, da Universidade da Califórnia em Santa Barbara, já fizeram grandes progressos e afirmam ter desenvolvido a descoerência, transformando-a em um esquema completo (denominado *histórias descoerentes*) que resolve o problema da medição. Outros, como eu próprio, estamos intrigados, mas ainda não plenamente convencidos. O poder da descoerência está em que ela remove com êxito a barreira artificial erguida por Bohr entre os sistemas físicos grandes e pequenos, submetendo tudo às mesmas fórmulas da mecânica quântica. Este é um progresso importante, e creio que Bohr se sentiria gratificado com ele. Embora o problema quântico da medição não tenha nunca diminuído a nossa capacidade de compatibilizar os cálculos teóricos com os dados experimentais, ele levou Bohr e seus colegas a articular um esquema de mecânica quântica que tinha algumas características claramente canhestras. Muitos consideram irritante que o esquema tenha tido a necessidade de recorrer a palavras obscuras para referir-se ao colapso das funções de onda, assim como à noção imprecisa de que os sistemas "grandes" pertencem ao domínio da física clássica. Em grande medida, ao levar em conta a descoerência, os pesquisadores tornaram desnecessárias estas ideias vagas.

Contudo, uma questão-chave que evitei na descrição que acabo de fazer está em que, embora a descoerência suprima a interferência quântica e com isso induza as probabilidades quânticas a se assemelharem às correspondentes clássicas familiares, *cada um dos resultados potenciais incorporados em uma função de onda continua a lutar por sua realização.* E, assim, continuamos a refletir sobre como um dos resultados "triunfa" e para onde "vão" as múltiplas outras possibilidades, quando a realidade se define. Quando a moeda cai, a física clássica dá uma resposta à questão análoga. Ela diz que, se examinarmos com a precisão adequada a maneira como a moeda foi posta em movimento, poderemos, em princípio, *prever* se ela mostrará cara ou coroa. Em última análise, portanto, o resultado final está determinado precisamente pelos detalhes que a princípio ignoramos. O mesmo não pode ser dito com relação à física quântica. A descoerência permite que as probabilidades quânticas sejam interpretadas como as clássicas, mas não propicia detalhes mais precisos que selecionem a realização de um dentre os múltiplos resultados possíveis.

À semelhança de Bohr, alguns físicos creem que é errado buscar explicações sobre como ocorre a seleção de um resultado único e específico. Eles argumentam que a mecânica quântica, atualizada com a inclusão da descoerência, é uma teoria formulada com agudeza, cujas previsões são consistentes com o comportamento dos instrumentos de medição dos

laboratórios. E de acordo com tal ponto de vista, esse é o objetivo da ciência. Buscar explicações para *o que realmente está acontecendo*, buscar o entendimento de *como determinado resultado vem a acontecer*, buscar *um nível de realidade que esteja além do que mostram os detectores e as conclusões dos computadores* revela uma ambição intelectual insensata.

Muitos outros, eu próprio incluído, têm uma perspectiva diferente. Explicar os dados é do que a ciência trata. Mas muitos físicos creem que a ciência trata também de desenvolver as teorias confirmadas pelos dados, empregando-as para obter o máximo de compreensão a respeito da natureza da realidade. Suspeito fortemente de que a nossa percepção pode ganhar muito se prosseguirmos na busca de uma solução definitiva para o problema quântico da medição.

Assim, embora haja um amplo consenso no sentido de que a descoerência induzida pelo ambiente é uma parte crucial da estrutura que medeia o dilema clássico-quântico, e ainda que muitos tenham grandes esperanças de que essas considerações venham um dia a compor uma conexão completa e conclusiva entre os dois campos, ainda estamos longe de poder dizer que essa ponte já esteja construída.

A MECÂNICA QUÂNTICA E A SETA DO TEMPO

Onde ficamos, então, com relação ao problema quântico da medição e qual o seu significado para a seta do tempo? Em termos gerais, há dois tipos de proposições para vincular a experiência comum à realidade quântica. No primeiro tipo (por exemplo, a função de onda vista como conhecimento; os muitos mundos; a descoerência), a equação de Schrödinger é o começo, o meio e o fim da história. As proposições simplesmente proporcionam diferentes maneiras de interpretar o significado da equação para a realidade física. No segundo tipo (por exemplo, Bohm; Ghirardi, Rimini e Weber), a equação de Schrödinger tem de ser suplementada com outras equações (no caso de Bohm, uma equação que mostra como uma função de onda empurra a partícula em suas andanças) ou tem de ser modificada (no caso de Ghirardi, Rimini e Weber, para incorporar um mecanismo de colapso novo e explícito). Uma questão-chave para a determinação do impacto sobre a seta do tempo é se essas proposições introduzem uma assimetria fundamental entre uma direção do tempo e a outra. Lembre-se de que a equação de Schrödinger — assim como as de Newton, Maxwell e Einstein — trata em absoluto pé de igualdade ambas as direções do tempo. Ela não proporciona uma seta para a evolução temporal. Será que alguma das proposições modifica esse cenário?

No primeiro tipo de proposições, o esquema de Schrödinger não é modificado, de modo que a simetria temporal mantém-se. No segundo tipo, a simetria temporal pode sobreviver ou não, dependendo dos detalhes. Por exemplo, no enfoque de Bohm, a nova equação proposta trata o tempo futuro e o passado em pé de igualdade e não introduz nenhuma assimetria. Mas a proposição de Ghirardi, Rimini e Weber introduz um mecanismo de colapso que, *sim*, tem uma seta do tempo — uma função de onda que não entre em colapso, que evolua de uma forma pontiaguda para uma achatada, não seria compatível com as equações modificadas. Assim, dependendo da proposição, a mecânica quântica, juntamente com a solução para o problema quântico da medição, pode continuar ou não a tratar as duas direções do tempo igualmente. Consideremos as implicações de cada possibilidade.

Se a simetria do tempo persistir (o que suspeito que acontecerá), todo o raciocínio e todas as conclusões do último capítulo podem ser levados adiante com pouco impacto sobre os domínios quânticos. A parte essencial da física que entrou na nossa discussão sobre a seta do tempo foi a simetria da inversão temporal da física clássica. Embora a linguagem e o esquema básico da física quântica difiram dos empregados pela física clássica — funções de onda em vez de posições e velocidades; a equação de Schrödinger em vez das leis de Newton —, a simetria da inversão temporal de todas as equações quânticas faria com que o tratamento de seta do tempo permanecesse sem modificações. A entropia pode ser definida no mundo quântico de maneira similar a como é definida na física clássica, desde que as partículas sejam descritas em termos das suas funções de onda. E a conclusão de que a entropia deve aumentar sempre — tanto em direção ao que denominamos futuro, quanto em direção ao que denominamos passado — permaneceria também.

Voltaríamos, assim, ao mesmo quebra-cabeça que encontramos no capítulo 6. Se tomarmos as observações que neste momento fazemos do mundo como dados, como indubitavelmente reais, e se a entropia crescer tanto em direção ao futuro quanto ao passado, de que forma explicaremos a evolução do mundo até agora e a sua evolução subsequente? E as mesmas duas possibilidades se apresentariam: ou tudo o que vemos começou a existir em consequência de um acidente estatístico passível de ocorrer de vez em quando em um universo eterno que passa a maior parte do tempo em estado de desordem total, ou, por alguma razão, a entropia era extraordinariamente baixa após o Big-Bang e as coisas vêm se desenrolando vagarosamente nos últimos 14 bilhões de anos e continuarão a fazê-lo em direção ao futuro. Tal como no capítulo 6, para evitar o atoleiro de não podermos confiar na memória, nos registros e nas leis da física, concentramo-nos na segunda opção — um Big-Bang com baixa entropia — e

buscamos uma explicação para o fato de as coisas terem começado nesse estado tão especial.

Por outro lado, se a simetria temporal se perder — se a resolução do problema da medição que vier um dia a ser aceita revelar um tratamento assimétrico fundamental entre o futuro e o passado na mecânica quântica —, poderíamos ter a explicação mais clara da seta do tempo. Tal explicação poderia revelar, por exemplo, que os ovos se espatifam e não se desespatifam porque, ao contrário do que se vê quando se empregam as leis da física clássica, o ato de espatifar-se resolve plenamente as equações quânticas, mas o ato de desespatifar-se não o faz. Um filme de um ovo que se espatifa, passado do fim para o começo, apresentaria um movimento que não pode ocorrer no mundo real, o que explicaria por que nunca o vemos acontecer. E isso poria fim à controvérsia.

Possivelmente. Mas ainda que isso pareça proporcionar uma diferença importante na explicação da seta do tempo, na verdade essa diferença pode não ser tão grande. Como ressaltamos no capítulo 6, para que as páginas de *Guerra e paz* fiquem cada vez mais desordenadas, é preciso que elas comecem em ordem; para que um ovo se desordene ao espatifar-se, é preciso que ele comece como um ovo inteiro e ordenado; para que a entropia aumente em direção ao futuro, ela deve ser baixa no passado, de modo que as coisas tenham o potencial para desordenar-se. Contudo, o simples fato de que uma lei trate o passado e o futuro de maneira distinta não significa que tal lei possa ditar um passado com entropia menor. A lei poderia implicar ainda uma entropia mais alta em direção ao passado (talvez a entropia cresça de maneira assimétrica em direção ao passado e ao futuro), e pode ser possível até que uma lei de assimetria temporal não logre dizer nada com relação ao passado. Isso é o que acontece com a proposição de Ghirardi, Rimini e Weber, que é uma das abordagens temporalmente assimétricas substantivas que existem hoje. Uma vez que o mecanismo de colapso entra em ação, não há maneira de detê-lo — não há maneira de começar com o colapso da função de onda e voltar à sua forma espalhada. Os detalhes da forma da função de onda perdem-se com o colapso — ela se torna pontiaguda —, e é, portanto, impossível retroceder a como eram as coisas em qualquer tempo anterior à ocorrência do colapso.

Assim, mesmo que uma lei assimétrica com relação ao tempo propiciasse uma explicação parcial para o fato de que as coisas evoluem em uma ordem temporal mas nunca na ordem inversa, seria perfeitamente possível que ela carecesse do mesmo suplemento crucial requerido pelas leis temporalmente simétricas: a explicação de por que a entropia era baixa no passado distante. Isso é verdadeiro com relação às modificações temporalmente assimétricas até agora propostas para a mecânica quântica. Assim, a menos que alguma descoberta futura revele

dois aspectos, ambos improváveis, na minha opinião — uma solução temporalmente assimétrica para o problema quântico da medição que, adicionalmente, indique que a entropia decresce em direção ao passado — o nosso esforço para explicar a seta do tempo nos leva novamente à origem do universo, que é o tema da próxima parte deste livro.

Como esses capítulos deixarão claro, as considerações cosmológicas abrem caminho através de muitos mistérios que estão no âmago do espaço, do tempo e da matéria. Desse modo, na nossa viagem rumo às percepções da cosmologia moderna sobre a seta do tempo, vale a pena não passar com demasiada pressa pela paisagem, e sim fazer um passeio tranquilo e ponderado pela história cósmica.

PARTE III

O espaço-tempo e a cosmologia

8. Os flocos de neve e o espaço-tempo

A simetria e a evolução do cosmo

Richard Feynman disse uma vez que se tivesse que resumir em uma máxima a conclusão mais importante da ciência moderna diria: “O mundo é composto por átomos”. Quando refletimos sobre o quanto da nossa compreensão do universo baseia-se nas propriedades e nas interações dos átomos — desde a razão do brilho das estrelas e da cor do céu até a explicação de por que você sente o livro que está nas suas mãos e vê estas palavras com os seus olhos —, vemos o mérito da escolha de Feynman para o resumo do nosso legado científico. Muitos dos principais cientistas de hoje concordam que poderiam também escolher uma segunda máxima: “A simetria está presente nas leis do universo”. Nos últimos séculos houve muitas revoluções na ciência, mas as descobertas mais duradouras têm uma característica em comum: elas identificam aspectos do mundo natural que permanecem imutáveis mesmo quando submetidos a uma grande variedade de manipulações. Esses atributos imutáveis refletem o que os físicos denominam simetria, que vem desempenhando um papel cada vez mais vital em muitos dos avanços mais significativos. Existe ampla evidência de que a simetria — em todas as suas formas misteriosas e sutis — é uma luz potente que ilumina a escuridão onde a verdade aguarda até ser descoberta.

Com efeito, veremos que a história do universo é, em grande medida, a história da simetria. Os momentos mais cruciais da evolução do universo são aqueles em que o equilíbrio e a ordem sofrem mudanças bruscas e geram cenários cósmicos qualitativamente diferentes dos que existiam antes. A teoria atual sustenta que o universo passou por diversas dessas transições durante os seus primeiros momentos e que tudo o que vemos e conhecemos são remanescentes tangíveis de uma época cósmica mais simétrica no passado. Mas em um sentido ainda mais amplo, em um meta-sentido, a simetria está no coração da evolução do cosmo. O próprio tempo está intimamente ligado à simetria. Como veremos, a conotação prática do tempo como medida de mudança, assim como a própria existência de uma espécie de tempo cósmico que nos permite falar de coisas como “a idade e a evolução do universo como um todo”, depende sensivelmente de certas características da simetria. E para os cientistas que examinam essa evolução e olham para os primórdios em busca da verdadeira natureza do espaço e do tempo, a simetria consolidou-se como o mais seguro dos guias, proporcionando

percepções e respostas que, de outra maneira, permaneceriam completamente fora do nosso alcance.

A SIMETRIA E AS LEIS DA FÍSICA

A simetria é abundante. Tome uma bola de bilhar em sua mão e faça-a girar: qualquer que seja o modo, qualquer que seja o eixo de rotação, ela parecerá sempre igual. Ponha um prato sem desenhos sobre a mesa e gire-o e a sua aparência não se modificará. Recolha com cuidado um floco de neve recém-caído e gire-o até que a ponta seguinte passe a ocupar o lugar onde estava a ponta anterior e você não notará nenhuma alteração. Considere a letra “A”, gire-a com relação ao eixo vertical, passando pelo seu ápice, e você verá uma réplica perfeita do original.
Esses exemplos deixam claro que as simetrias de um objeto são as manipulações, reais ou imaginárias, às quais ele pode ser submetido sem que se produzam efeitos sobre a sua aparência. Quanto mais manipulações um objeto possa suportar sem efeitos discerníveis, mais simétrico ele é. Uma esfera perfeita é altamente simétrica, uma vez que qualquer rotação em torno do seu centro — seja com relação ao eixo vertical, ao esquerda — direita ou qualquer outro — a deixa com o mesmíssimo aspecto. Um cubo é menos simétrico, uma vez que somente as rotações em unidades de noventa graus com relação aos eixos que passam pelos centros das suas faces (e suas combinações) mantêm constante a sua aparência. Evidentemente, se se executarem quaisquer outras rotações, como as da figura 8.1c, o cubo, obviamente, ainda poderá ser reconhecido, mas também se poderá ver que alguém alterou a sua posição. As simetrias, ao contrário, são como o mais hábil dos ladrões: são manipulações que não deixam nenhuma pista.

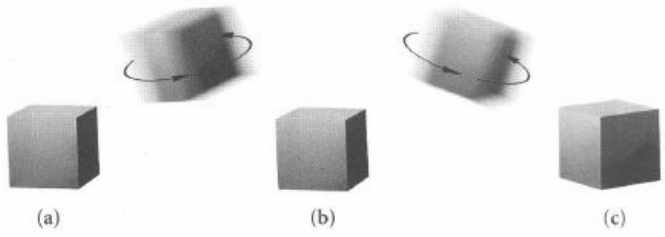


Figura 8.1. *Se um cubo, como em (a), sofrer uma rotação de noventa graus, ou de múltiplos desse número, com relação aos eixos que passam por quaisquer das suas faces, a sua aparência não se modificará, como em (b). Mas quaisquer outras rotações podem ser detectadas, como em (c).*

Todos esses são exemplos de simetrias de objetos no espaço. As simetrias que estão presentes nas leis da física que conhecemos relacionam-se de forma estreita com elas, mas são particularmente importantes para uma questão mais

abstrata: que manipulações — de novo reais ou imaginárias — podem ser praticadas sobre você ou sobre o ambiente sem exercer absolutamente nenhum efeito sobre as *leis* que explicam os fenômenos físicos que observamos? Note que, para ser uma simetria, uma manipulação desse tipo não necessita deixar imutáveis as observações. O que nos preocupa, ao contrário, é que as leis que comandam essas observações — as leis que explicam o que vemos antes e o que vemos depois de uma manipulação — não sofrem modificações. Como essa é uma ideia fundamental, vejamos como ela funciona em alguns exemplos.

Imagine que você é um ginasta olímpico que está treinando ativamente há quatro anos no clube da cidade, em Connecticut. Graças a um treinamento árduo, você já consegue executar os movimentos de diversos números com perfeição — conhece a força exata com que tem de tocar no cavalo para dar o salto final; até que altura deve saltar no exercício de solo para fazer uma pirueta dupla; com que velocidade deve girar nas barras paralelas para um duplo mortal de encerramento. Com efeito, o seu corpo conhece intimamente as leis de Newton, que comandam os seus movimentos. Quando por fim chega a hora de se apresentar para o estádio repleto em Nova York, sede das olimpíadas, você confia que as mesmas leis se aplicarão, porque pretende atuar exatamente como fez nos treinamentos. Tudo o que sabemos a respeito das leis de Newton dá credibilidade à sua estratégia. Tais leis não são específicas para um lugar ou outro, e o seu funcionamento não é diferente em Connecticut e em Nova York. Na verdade, acreditamos que as leis de Newton funcionem exatamente da mesma maneira onde quer que você esteja. Mesmo que você mude de lugar, as leis que comandam os movimentos do seu corpo permanecem tão inalteradas quanto a aparência de uma bola de bilhar que sofreu uma rotação.

Esta simetria é conhecida como *simetria de translação* ou *invariância de translação* e se aplica não só às leis de Newton, mas também às de Maxwell para o magnetismo, às de Einstein para a relatividade especial e a relatividade geral, à mecânica quântica e a praticamente qualquer proposta séria que se faça na física moderna.

Há, contudo, uma coisa importante. Os detalhes das observações e experiências podem, por vezes, variar de um lugar para outro. Se você fosse se apresentar na Lua, veria que a trajetória do seu corpo em resposta ao impulso vertical das suas pernas seria bem diferente. Mas entendemos perfeitamente essa variação particular, que está integrada nas próprias leis. A Lua tem massa menor do que a da Terra e exerce, portanto, menor atração gravitacional. Em consequência, o seu corpo viaja por trajetórias diferentes. E esse fato — de que a atração gravitacional de um corpo depende da sua massa — faz parte *integral* da lei da

gravidade de Newton (assim como da formulação mais refinada da relatividade geral de Einstein). A diferença entre as suas experiências na Terra e na Lua não implica que a lei da gravidade se modifique de um lugar para outro. Reflete apenas uma diferença ambiental que já é levada em conta pela própria lei. Assim, quando dizemos que as leis da física aplicam-se de maneira igual em Connecticut e em Nova York — ou, como poderíamos dizer, na Terra e na Lua —, isso é verdade, porém devemos ter em mente que pode ser necessário especificar as diferenças ambientais das quais as leis dependem. Mas aqui está a conclusão-chave: o esquema explicativo proporcionado pelas leis não se modifica de modo algum em razão de mudanças de lugar. Essas mudanças não requerem que os físicos voltem ao quadro-negro para descobrir novas leis.

As leis da física não têm de operar necessariamente dessa maneira. Podemos imaginar um universo em que as leis da física sejam tão variáveis quanto as dos governos municipais ou nacionais; podemos imaginar um universo em que as leis da física com que temos familiaridade não nos digam nada a respeito das leis da física na Lua, ou na galáxia de Andrômeda, ou na nebulosa Caranguejo, ou no outro lado do universo. Com efeito, não sabemos com certeza absoluta que as leis que operam aqui são as mesmas que operam nos recantos mais longínquos do cosmo. Mas sabemos, sim, que se as leis forem diferentes em outro lugar, esse lugar tem de ser *muito* distante, porque as nossas observações astronômicas cada vez mais precisas nos proporcionam comprovações cada vez mais convincentes de que as leis são uniformes por todo o espaço, pelo menos por todo o espaço que podemos ver. Isso acentua o surpreendente poder da simetria. Estamos vinculados ao planeta Terra e à sua vizinhança. Contudo, por causa da simetria translacional, podemos aprender a respeito das leis fundamentais que operam em todo o universo sem sairmos de casa, uma vez que são as *mesmas* leis que descobrimos aqui.

A *simetria rotacional* ou *invariância rotacional é* prima próxima da invariância translacional e baseia-se na ideia de que todas as direções espaciais estão em pé de igualdade entre si. A visão que temos a partir da Terra certamente não nos leva a essa conclusão. Quando olhamos para cima, vemos coisas que são diferentes das que estão abaixo. Mas também aqui isso reflete apenas os detalhes do ambiente, e não as características das próprias leis. Se você deixar a Terra e flutuar pelo espaço profundo, longe de quaisquer estrelas, galáxias ou outros corpos celestes, a simetria torna-se evidente: não há nada que faça com que uma direção seja distinta de qualquer outra na escuridão do vazio. Todas são iguais. Ninguém se importaria nem um pouco com a orientação a dar a um laboratório espacial enviado para pesquisar as propriedades da matéria e das forças, porque

as leis que aí operam não são afetadas por essa escolha. Se alguma vez um trapalhão viesse a modificar a programação do giroscópio do laboratório, fazendo-o girar alguns graus em torno de algum eixo, não seria de esperar que isso produzisse qualquer consequência para as leis da física de que o experimento se ocupa. Todas as medidas tomadas confirmam essa expectativa. Por essa razão, acreditamos que as leis que regem os experimentos que fazemos e que explicam os resultados que obtemos são independentes tanto do lugar onde estamos — a simetria translacional — quanto da orientação espacial — a simetria rotacional.[1]

Como discutimos no capítulo 3, Galileu e outros tinham plena consciência de uma outra simetria que as leis da física devem respeitar. Se o nosso laboratório espacial estiver se movendo em velocidade constante — seja a cinco quilômetros por hora, seja a 100 mil quilômetros por hora, neste ou naquele sentido —, o movimento não deve produzir nenhum efeito sobre as leis que explicam as nossas observações, pois teríamos tanto direito quanto qualquer outra pessoa para afirmar que estamos em repouso e tudo o mais está em movimento. Einstein, como vimos, deu a essa simetria um alcance totalmente inesperado, ao incluir a velocidade da luz entre as observações que não são afetadas nem pela nossa própria velocidade nem pela velocidade da fonte de luz. Esse desenvolvimento foi particularmente surpreendente porque em geral colocamos os dados relativos à velocidade de um objeto entre os detalhes ambientais, reconhecendo que a velocidade observada quase sempre depende do movimento do observador. Mas Einstein, que percebeu que a simetria da luz passava por entre as rachaduras da fachada newtoniana da natureza, elevou a velocidade da luz à condição de lei natural inviolável, declarando que ela não sofre os efeitos do movimento, assim como uma bola de bilhar não sofre os efeitos da rotação.

A relatividade geral, a outra grande descoberta de Einstein que se seguiu à relatividade especial, enquadra-se perfeitamente nessa linha de pensamento, através da qual as teorias apresentam simetrias cada vez maiores. Assim como se pode dizer que a relatividade especial estabelece uma simetria entre todos os observadores que se movem a velocidades constantes, uns com relação aos outros, pode-se também dizer que a relatividade geral avança mais um passo e estabelece uma simetria também entre todos os pontos de vista que estão em aceleração. Isso é extraordinário porque, como já ressaltamos, embora não se possa sentir o movimento a velocidade constante, o movimento acelerado *pode* ser sentido. Pareceria, portanto, que as leis da física que descrevem as nossas observações devessem claramente ser diferentes quando se está em aceleração, para levar em conta a força adicional que é experimentada. *Assim é* no enfoque de Newton. As suas leis, que aparecem em todos os livros-textos do primeiro

ano de física, têm de ser modificadas para ser utilizadas por um observador que sofre aceleração. Mas, por meio do princípio da equivalência, que discutimos no capítulo 3, Einstein percebeu que a força que sentimos com a aceleração é indistinguível daquela que sentimos em um campo gravitacional de intensidade adequada (quanto maior a aceleração, maior o campo gravitacional). Assim, de acordo com a percepção mais refinada de Einstein, as leis da física *não* se modificam quando há uma aceleração, desde que incluamos um campo gravitacional adequado na nossa descrição do meio ambiente. A relatividade geral trata todos os observadores, mesmo os que se movem a velocidades arbitrárias e não constantes, em pé de igualdade — eles obedecem a uma simetria completa —, uma vez que qualquer um deles pode proclamar-se em repouso e atribuir as diferentes forças que experimenta aos efeitos de diferentes campos gravitacionais. As diferenças entre as observações feitas por dois observadores, ambos os quais estejam acelerados, já não são, portanto, surpreendentes e não dão nenhum testemunho de uma modificação nas leis da natureza, assim como acontece com as diferenças entre o seu desempenho como ginasta na Terra ou na Lua.[2]

Esses exemplos dão uma ideia de por que muitos consideram — e acho que Feynman concordaria — que as abundantes simetrias que estão presentes nas leis da natureza bem merecem o segundo lugar, logo após a hipótese atômica, como representante das nossas percepções científicas mais profundas. Porém ainda há mais. Nas últimas décadas, os físicos elevaram os princípios da simetria ao nível mais alto da cadeia das explicações. Quando encontramos uma proposta de uma nova lei da natureza, tendemos sempre a perguntar: por que esta lei? Por que a relatividade especial? Por que a relatividade geral? Por que a teoria eletromagnética de Maxwell? Por que as teorias de Yang-Mills para as forças nucleares forte e fraca (das quais logo falaremos)? Um aspecto importante é que essas teorias fazem previsões que foram repetidamente confirmadas por experimentos de precisão. Esse é, por certo, um fator essencial para a confiança que os físicos depositam nas teorias, mas deixa de fora algo significativo.

Os físicos também creem que essas teorias estão no caminho correto porque, embora não seja fácil expressá-lo em palavras, elas dão a *sensação* de serem corretas, e as ideias relativas à simetria são essenciais para essa sensação. A noção de que nenhum lugar do universo é especial quando comparado a qualquer outro parece estar correta; assim, os cientistas acreditam que a simetria translacional esteja entre as simetrias das leis da natureza. A noção de que nenhum movimento particular em velocidade constante é especial quando comparado a qualquer outro parece estar correta e, desta forma, os cientistas acreditam que a relatividade especial, que incorpora sem reservas a simetria

entre todos os observadores a velocidade constante, é uma parte essencial das leis da natureza. Também a noção de que *todos os* pontos de vista observacionais — independentemente da possibilidade de envolvimento de algum movimento acelerado — estão em pé de igualdade parece estar correta; assim, os cientistas acreditam que a relatividade geral, a teoria mais simples que incorpora essa simetria, está entre as verdades profundas que regem os fenômenos naturais. E, como logo veremos, as teorias das três outras forças além da gravidade — o eletromagnetismo e as forças nucleares forte e fraca — baseiam-se em outros princípios de simetria, algo mais abstratos, mas igualmente convincentes. Desse modo, as simetrias da natureza não são meras consequências das leis naturais. A partir da nossa perspectiva moderna, as simetrias estão na base sobre a qual as leis estão constituídas.

SIMETRIA E TEMPO

Além do papel que desempenham na formulação das leis que governam as forças da natureza, as ideias de simetria são vitais para o próprio conceito de tempo. Ninguém descobriu ainda a definição final e fundamental do tempo, mas, sem dúvida, parte do papel do tempo na composição do cosmo é o de anotador das mudanças. Reconhecemos a passagem do tempo ao notar que as coisas são diferentes em um momento com relação a como eram antes. Os ponteiros dos relógios apontam para números diferentes, o Sol está em outro lugar do céu, as páginas soltas de *Guerra e paz* estão mais desordenadas, o dióxido de carbono que escapou da garrafa de refrigerante espalhou-se mais, e tudo isso deixa claro que as coisas mudaram e o tempo é o que proporciona o potencial para que essa mudança se realize. Parafraseando John Wheeler, o tempo é o recurso da natureza para impedir que tudo — todas as mudanças — aconteça simultaneamente.

A existência do tempo depende, pois, da *ausência* de uma simetria particular: as coisas do universo têm de mudar, de um momento para o outro, para que possamos definir uma noção de *um momento para o outro*, que seja compatível com o nosso conceito intuitivo. Se houvesse uma simetria perfeita entre como as coisas são agora e como eram antes, se as mudanças de um momento para o outro não produzissem nenhuma consequência além das que decorrem da rotação de uma bola de bilhar, o tempo, como o concebemos normalmente, não existiría.[3] Isso não significa que a expansão do universo, ilustrada esquematicamente na figura 5.1, não existiria. Ela poderia existir. Porém como tudo seria absolutamente uniforme ao longo do eixo do tempo, não poderíamos

ter o sentido de mudança ou de evolução do universo. O tempo seria um aspecto abstrato do cenário dessa realidade — a quarta dimensão do contínuo do espaço-tempo — mas, a não ser por isso, não teríamos como reconhecê-lo.

No entanto, para que a existência do tempo coincida com a falta de uma simetria particular, a sua aplicação em escalas cósmicas requer que o universo respeite rigorosamente uma outra simetria. A ideia é simples e responde a uma pergunta que talvez lhe tenha ocorrido na leitura do capítulo 3. Se a relatividade nos ensina que a passagem do tempo depende da velocidade com que as coisas se movem e do campo gravitacional em que estejam imersas, que devemos concluir quando os astrônomos e os físicos dizem que o universo como um todo tem uma idade particular e definida — idade que, nos nossos dias, considera-se ser de cerca de 14 bilhões de anos? Catorze bilhões de anos de acordo com quem? Em que relógio? Os seres que vivem na longínqua galáxia Girino *(Tadpole galaxy)* também concluiriam que o universo tem 14 bilhões de anos? E se for assim, o que nos levaria a crer que o ritmo dos seus relógios esteja sincronizado com o dos nossos? A resposta está na simetria — a simetria no espaço.

Se os nossos olhos pudessem ver a luz cujo comprimento de onda é muito maior do que o do alaranjado ou do vermelho, não só poderíamos ver a atividade que ocorre no interior dos fornos de micro-ondas, como também veríamos um brilho tênue e praticamente uniforme distribuído por todo o espaço que vemos como o céu noturno. Mais de quarenta anos atrás, os cientistas descobriram que o universo está inundado por uma radiação de micro-ondas — luz com comprimento de ondas longo — que é uma relíquia das extraordinárias condições imediatamente posteriores ao Big-Bang.[4] Essa *radiação cósmica de fundo em micro-ondas é* de todo inofensiva. Há muito tempo, era incrivelmente quente, mas com a evolução e a expansão do universo, a radiação diluiu-se de forma progressiva e se resfriou. Hoje, a sua temperatura é de apenas cerca de 2,7 graus acima do zero absoluto, e o grande efeito que ela provoca é uma pequena contribuição para o mar de pontos que você vê na tela da televisão quando o cabo está desligado e não há transmissão no canal.

Porém essa tênue estática dá aos astrônomos o que os ossos de tiranossauro dão aos paleontólogos: uma janela aberta para épocas anteriores, que é crucial para a reconstrução do que aconteceu no passado distante. Uma propriedade essencial da radiação, revelada por medições precisas feitas por satélites na última década, é a sua extrema uniformidade. A temperatura da radiação em uma parte do céu difere da que ocorre em outra parte em menos de um milésimo de grau. Na Terra, uma simetria assim retiraria todo o interesse que temos na previsão do tempo. Se em Jacarta a temperatura fosse de trinta graus Celsius, já saberíamos que em Adelaide, Xangai, Paris, Manaus e todos os demais lugares a

temperatura estaria entre 29,999 e 30,001 graus. Em contraste, na escala cósmica, a uniformidade da temperatura da radiação é *fantasticamente* interessante porque ela proporciona duas percepções cruciais.

Em primeiro lugar, ela nos dá comprovações observacionais de que o universo, nos seus primórdios, não era povoado por aglomerações de matéria desordenadas, grandes e com alta entropia, como são os buracos negros, visto que um ambiente heterogêneo como esse teria deixado uma marca também heterogênea na radiação. Ao contrário, a uniformidade da temperatura da radiação atesta a homogeneidade do universo primitivo. E, como vimos no capítulo 6, quando a gravidade importa — como era o caso no universo denso dos tempos iniciais —, a homogeneidade implica baixa entropia. Isso é bom, porque a nossa discussão da seta do tempo dependia fortemente de que o universo tivesse começado com baixa entropia. Um dos nossos objetivos nesta parte do livro é avançar o máximo possível na explicação dessa observação — desejamos entender como o ambiente tão improvável, homogêneo e com baixa entropia, que prevaleceu no início do universo, chegou a acontecer. Isso nos levaria a aproximar-nos significativamente do conhecimento real da origem da seta do tempo.

Em segundo lugar, embora o universo tenha estado em evolução desde o Big-Bang, em média, essa evolução deve ter sido praticamente idêntica em todo o cosmo. Para que as temperaturas aqui, assim como na galáxia do Rodamoinho, no aglomerado Coma e em qualquer outra parte, sejam idênticas até a quarta casa decimal, as condições físicas em todas as regiões do espaço devem ter evoluído essencialmente da mesma maneira desde o Big-Bang. Essa é uma dedução importante e que tem de ser interpretada de maneira apropriada. Quando olhamos para o céu noturno, vemos um cosmo variado: planetas e estrelas de diversos tipos, salpicados por todo o espaço. A questão importante, contudo, é que ao analisarmos a evolução do universo como um todo, tomamos uma perspectiva macro que dilui as variações de “pequena” escala e faz com que a grande escala pareça quase completamente uniforme. Pense em um copo de água. Na escala das moléculas, a água é extremamente heterogênea: uma molécula de $\mathbf{H_2O}$ por aqui, uma extensão de espaço vazio, outra molécula de $\mathbf{H_2O}$ e assim por diante. Mas se ampliarmos o enfoque e examinarmos a água na “grande” escala da nossa vida cotidiana, a descontinuidade no nível molecular desaparece e, como os nossos olhos podem apreciar, a água parece perfeitamente uniforme. A não-uniformidade que vemos quando olhamos para o céu é como a visão microscópica a partir de uma única molécula de $\mathbf{H_2O}$**.** Mas, tal como acontece com o copo de água, quando o universo é examinado em escalas

suficientemente grandes — escalas da ordem de centenas de milhões de anos-luz —, a sua aparência é extraordinariamente homogênea. A uniformidade da radiação é, portanto, um testemunho fossilizado da uniformidade tanto das leis da física quanto dos detalhamentos do ambiente através do cosmo.

Essa conclusão tem grande importância porque a uniformidade do universo é o que nos permite definir um conceito de tempo aplicável ao universo como um todo. Se tomamos a medida da mudança como a definição operacional da passagem do tempo, a uniformidade das condições por todo o espaço é um elemento que ajuda a comprovar a uniformidade da mudança por todo o cosmo, o que implica também a uniformidade do tempo transcorrido. Assim como a uniformidade da estrutura geológica da Terra permite que os geólogos concordem, nas Américas, na Ásia e na África, a respeito da história e da idade da Terra, a uniformidade da evolução cósmica por todo o espaço permite que os físicos concordem, na Via Láctea, na galáxia de Andrômeda e na galáxia Girino, a respeito da história e da idade do *universo.* Concretamente, a evolução homogênea do universo significa que um relógio aqui, um relógio na galáxia de Andrômeda e outro na galáxia Girino trabalham sob condições físicas quase idênticas e, por conseguinte, marcam o tempo praticamente da mesma maneira. A homogeneidade do espaço propicia, assim, a sincronia universal.

Desconsiderei, até agora, detalhes importantes (como a expansão do espaço, que veremos na próxima seção), mas a discussão focalizou o cerne da questão: o tempo fica na encruzilhada da simetria. Se o universo tivesse uma simetria temporal perfeita — se ele fosse completamente imutável —, seria difícil definir até mesmo qual o significado do tempo. Por outro lado, se o universo não tivesse simetria no espaço — se, por exemplo, a radiação cósmica de fundo fosse totalmente aleatória, com temperaturas que variassem fortemente de região para região —, o tempo, no sentido cosmológico, teria pouco significado. Os relógios marcariam o tempo em ritmos diferentes, em regiões diferentes, e se perguntássemos como eram as coisas quando o universo tinha 3 bilhões de anos, a resposta dependeria do relógio que seria tomado como referência para a marcação desses 3 bilhões de anos. *Isso* seria muito complicado. Felizmente, o universo não tem tanta simetria a ponto de tirar o significado do tempo, mas tem suficiente simetria para que possamos evitar essas complexidades e falar sobre a sua idade e sobre a sua evolução global através do tempo.

Vamos, então, voltar a nossa atenção para essa evolução e considerar a história do universo.

O TECIDO ESTICADO

A história do universo parece ser um assunto complicadíssimo, mas, em resumo, é surpreendentemente simples e depende, em grande medida, de um fato essencial: o universo está em expansão. Como esse é o elemento básico do desenvolvimento da história do cosmo e, com certeza, uma das descobertas mais profundas da humanidade, examinemos brevemente como chegamos a perceber essa situação.

Em 1929, Edwin Hubble, utilizando o telescópio de dois metros e meio de diâmetro de monte Wilson, em Pasadena, Califórnia, descobriu que as vinte e poucas galáxias que ele podia detectar estavam todas distanciando-se umas das outras.[5] Hubble descobriu também que, quanto mais distante uma galáxia, mais rápido é o seu afastamento. Para que tenhamos um senso de escala, versões mais refinadas das observações originais de Hubble (por meio do estudo de milhares de galáxias, inclusive graças ao telescópio espacial Hubble) revelam que as galáxias que estão a 100 milhões de anos-luz da nossa localização afastam-se de nós a quase 9 milhões de quilômetros por hora, e que as que estão a 200 milhões de anos-luz afastam-se duas vezes mais depressa, a quase 18 milhões de quilômetros por hora; as que estão a 300 milhões de anos luz de distância afastam-se três vezes mais rápido, a mais de 26 milhões de quilômetros por hora, e assim por diante. A descoberta de Hubble foi estarrecedora porque a posição científica e filosófica que prevalecia até então sustentava que o universo, em sua escala máxima, era estático, eterno, fixo e imutável. De um golpe, no entanto, Hubble despedaçou essa visão preconcebida. E a relatividade geral de Einstein, em uma maravilhosa convergência entre teoria e experimento, proporcionou uma bela explicação para a descoberta de Hubble.

Na verdade você pode pensar que encontrar uma explicação não seria assim tão difícil. Afinal, se você passar por uma fábrica e vir todo tipo de material voando com violência em todas as direções, provavelmente pensará que houve uma explosão. E se reconstruísse de volta as trajetórias dos estilhaços de metal e dos pedaços de concreto, veria que elas convergem para um lugar original que é o provável local da explosão. Com o mesmo raciocínio, uma vez que a visão a partir da Terra — confirmada por Hubble e pelas observações subsequentes — mostra que as galáxias se afastam umas das outras, você poderia pensar que a nossa posição no espaço foi o local da explosão inicial que espalhou uniformemente todo o material que compõe as estrelas e as galáxias. O problema dessa teoria, contudo, é que ela singulariza uma região do espaço — a nossa — como o berço do universo. Se fosse esse o caso, teríamos uma assimetria profunda: as condições físicas nas regiões mais distantes da explosão primordial — mais distantes de nós — seriam muito diferentes das que nos são próximas. Como não há evidências para essa assimetria nos dados astronômicos, e como,

além disso, temos sempre grandes suspeitas contra explicações antropocêntricas vinculadas ao pensamento anterior a Copérnico, torna-se necessária uma interpretação mais sofisticada da descoberta de Hubble, na qual o local que ocupamos não tenha um papel tão relevante no ordenamento cósmico.

A relatividade geral proporciona essa interpretação. Com a relatividade geral, Einstein verificou que o espaço e o tempo são flexíveis, e não fixos; elásticos, e não rígidos. E proporcionou equações que nos indicam com precisão como o espaço e o tempo respondem à presença da matéria e da energia. Na década de 1920, o matemático e meteorologista russo Alexander Friedmann e o padre e astrônomo belga Georges Lemaítre analisaram independentemente a aplicação das equações de Einstein ao universo como um todo e encontraram algo notável. Assim como a atração gravitacional da Terra implica que uma pedra lançada para o alto ou estará subindo ainda mais, ou estará descendo, mas não poderá estar parada (exceto no exato momento em que ela alcança o ponto de altura máxima), Friedmann e Lemaítre perceberam que a atração gravitacional da matéria e da radiação espalhadas por todo o cosmo implica que o tecido do espaço ou tem de estar expandindo-se, ou contraindo-se, mas não pode estar parado, sempre com o mesmo tamanho. Com efeito, este é um raro exemplo em que a metáfora não só capta a essência da física, mas também o seu conteúdo matemático, já que, em última análise, as equações que comandam o movimento da pedra lançada para o alto são praticamente idênticas às equações de Einstein que comandam o tamanho do universo.[6]

A flexibilidade do espaço na relatividade geral nos fornece uma maneira profunda de interpretar a descoberta de Hubble. Em vez de explicar o movimento centrífugo das galáxias por meio de uma versão cósmica da explosão da fábrica, a relatividade geral diz que, durante bilhões de anos, o espaço está se expandindo. Ao fazê-lo, ele leva as galáxias a separar-se umas das outras, tal como as sementes de gergelim colocadas no pão se afastam umas das outras quando ele vai ao forno e cresce. Assim, a origem do movimento centrífugo *não é* uma explosão que aconteceu no espaço. Ao contrário, deriva da expansão incessante do próprio espaço.

A ideia da expansão do universo também pode ser captada pelo modelo do balão de gás, extraordinariamente útil e tantas vezes usado pelos físicos (e que remonta, pelo menos, a uma caricatura reproduzida nas notas deste livro, originalmente publicada em um jornal holandês, em 1930, após uma entrevista com Willem de Sitter, cientista que fez contribuições substanciais à cosmologia).[7] Essa analogia compara o espaço tridimensional à superfície bidimensional, mais fácil de visualizar, de um balão esférico que se infla, como aparece na figura 8.2a. As galáxias são representadas por inúmeras moedas

aplicadas a intervalos regulares à superfície do balão. Note que, à medida que o balão se infla, todas as moedas se afastam umas das outras, o que nos proporciona uma analogia simples para o afastamento entre as galáxias propiciado pela expansão do espaço.
Uma característica importante deste modelo é que existe uma simetria total entre as moedas, pois o ponto de vista de cada uma delas é igual aos de todas as demais. Imagine-se bem pequenino, colocado sobre uma das moedas e olhando em todas as direções através da superfície do balão (lembre-se de que, nesta analogia, a superfície do balão representa o espaço como um todo e, portanto, não faz sentido olhar para fora da superfície). O que observará? Verá que as moedas se afastam de você em todas as direções, em virtude da expansão do balão. E se você estiver em uma outra moeda, que observará? A simetria garante que você verá a mesma coisa: as moedas se afastam em todas as direções. Essa imagem tangível capta bem a nossa crença — que se apoia também em medições astronômicas cada vez mais precisas — de que um observador que esteja em qualquer uma das mais de 100 bilhões de galáxias, olhando para o céu noturno com um bom telescópio verá, em média, uma imagem similar à que vemos: as galáxias circunstantes se afastam em todas as direções.

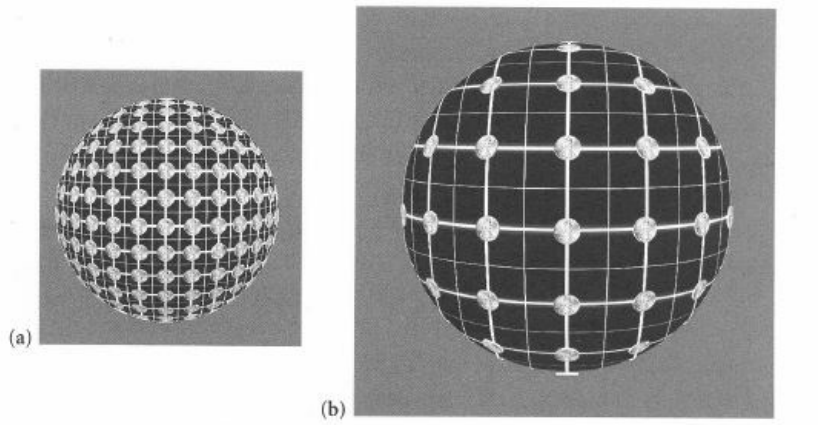


Figura 8.2. (*a*) *Se aplicarmos moedas regularmente distribuídas pela superfície de uma esfera, a visão a partir de cada uma delas será idêntica à de todas as demais. Isso se ajusta à crença em que a visão a partir de qualquer galáxia do universo é, em média, idêntica à que se tem a partir de todas as demais.* (*b*) *Se a esfera se expandir, a distância entre as moedas aumentará. Além disso, quanto mais afastadas estiverem as moedas em 8.2a, maior será a separação que elas experimentarão em 8.2b. Isso se ajusta bem às medições que revelam que quanto mais afastada uma galáxia estiver de determinado ponto, mais rapidamente ela se afasta dele. Note que nenhuma moeda é singularizada como especial, o que também se ajusta à nossa noção de que nenhuma galáxia do universo é especial, nem representa o centro da expansão do espaço.*

Assim, ao contrário de uma explosão em uma fábrica, que ocorre dentro de um espaço preexistente e fixo, uma vez que o movimento centrífugo ocorre porque o próprio espaço está se expandindo, não há necessidade de nenhum ponto especial — nenhuma moeda especial, nenhuma galáxia especial — que seja o

centro do movimento centrífugo. Todos os pontos — todas as moedas, todas as galáxias — estão em absoluto pé de igualdade. A visão a partir de qualquer localização *parece* ser a visão a partir do centro da explosão: os observadores de cada moeda veem todos os que estão nas demais moedas afastando-se; os observadores de cada galáxia, como nós, vêem todas as demais galáxias se afastando. E como isso é verdadeiro para todas as localizações, não há nenhum lugar especial ou singular que seja o *centro* a partir do qual emana o movimento para fora.

Essa explicação não só dá uma resposta qualitativa para o movimento de expansão das galáxias de uma maneira espacialmente homogênea, mas também dá uma resposta quantitativa aos detalhes encontrados por Hubble e confirmados com maior precisão pelas observações subsequentes. Como mostra a figura 8.2b, se o balão se infla durante certo período de tempo, dobrando de tamanho, por exemplo, todas as separações espaciais dobrarão de tamanho também: as moedas que estavam a um centímetro uma da outra estarão a dois centímetros de distância, as que estavam a dois centímetros estarão a quatro centímetros, as que estavam a três centímetros estarão separadas por seis centímetros, e assim por diante. Portanto, em qualquer determinado período de tempo, o aumento da separação entre duas moedas é proporcional à distância inicial entre elas. E como um maior aumento na separação durante determinado intervalo de tempo significa uma velocidade maior, as moedas que estão mais afastadas umas das outras separaram-se com maior rapidez. Resumindo, quanto mais distante uma moeda está com relação a outra, maior será a superfície do balão entre elas; assim, quanto mais o balão for inflado, mais rapidamente as moedas se separarão. Se aplicarmos exatamente o mesmo raciocínio ao espaço em expansão e às galáxias que ele contém, teremos a explicação para as observações de Hubble. Quanto mais distante uma galáxia está de outra, mais espaço haverá entre elas e, assim, quanto mais o espaço se expande, mais rapidamente as galáxias se separarão.

Ao atribuir o movimento observado nas galáxias à expansão do espaço, a relatividade geral proporciona uma explicação que não só trata de maneira simétrica todas as localizações do espaço, mas também se ajusta, de um só golpe, a todos os dados de Hubble. Esse é o tipo de explicação que se impõe com tal elegância e dá tanto sentido às observações, com precisão quantitativa e com a beleza da simetria, que os físicos dizem ser bela demais para estar errada. Essencialmente há um consenso universal a respeito do fato de que o tecido do espaço está se esticando.

O TEMPO NO UNIVERSO EM EXPANSÃO

Usando uma ligeira variação do modelo do balão, podemos agora entender de forma mais precisa como a simetria no espaço produz, apesar de o espaço estar se expandindo, uma noção de tempo que pode ser aplicada uniformemente por todo o cosmo.

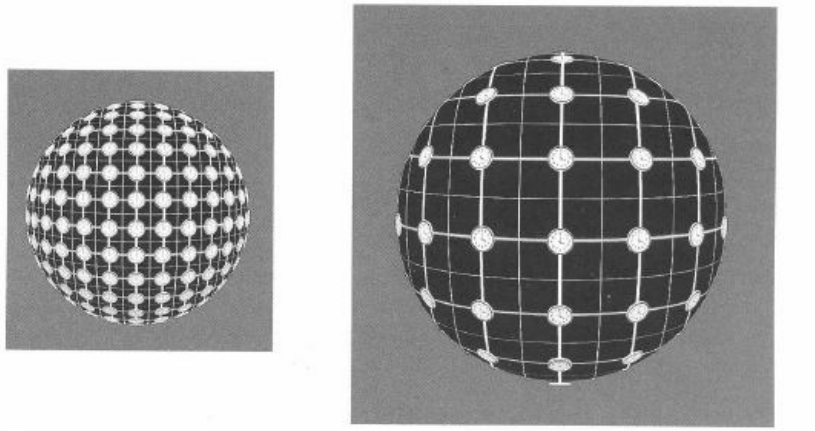


Figura 8.3. *Os relógios que se movem juntamente com as galáxias — cujo movimento, em média, decorre da expansão do espaço — proporcionam uma medida universal do tempo. Eles mantêm-se sincronizados mesmo separando-se cada vez mais uns dos outros, porque se movem com o espaço, e não através do espaço.*

Agora substitua as moedas por relógios idênticos, como na figura 8.3. Sabemos, pela relatividade, que, ainda que idênticos, os relógios marcam o tempo em ritmos diferentes sempre que estejam sujeitos a diferentes influências físicas — diferentes movimentos ou diferentes campos gravitacionais. Mas a observação simples e crucial é a de que a simetria total entre todas as moedas que estão no balão que está sendo inflado traduz-se em uma simetria total entre todos os relógios. Todos os relógios experimentam condições físicas idênticas e, portanto, marcarão o tempo exatamente no mesmo ritmo e registrarão resultados idênticos para o tempo transcorrido. Do mesmo modo, em um universo em expansão, com alto grau de simetria entre todas as galáxias, *os relógios que se movem em consonância com uma ou outra galáxia também marcarão o tempo no mesmo ritmo e registrarão, portanto, resultados idênticos para o tempo transcorrido.* Como poderia ser de outra maneira? Cada relógio está equiparado a todos os demais, por experimentar, em média, condições físicas praticamente idênticas. Isso mostra, mais uma vez, o tremendo poder da simetria. Sem nenhum cálculo ou análise detalhada, percebemos que a uniformidade do ambiente físico, evidenciada pela uniformidade da radiação cósmica de fundo em micro-ondas e pela distribuição uniforme das galáxias no espaço,[8] permite-nos inferir a uniformidade no tempo.

Embora este raciocínio seja claro, a conclusão pode, contudo, causar confusão. Como as galáxias estão todas afastando-se umas das outras com a expansão do espaço, os relógios que possam nelas existir também se afastam uns dos outros. Mais ainda, eles se movem uns com relação aos outros com uma enorme variedade de velocidades, a qual é determinada pela enorme variedade das distâncias entre elas. Esse movimento não fará com que os relógios percam a sincronização, como Einstein nos ensinou com a relatividade especial? Por diversas razões, a resposta é não. Vejamos uma maneira particularmente útil de pensar sobre isso.

Lembre-se do capítulo 3, quando dizíamos que Einstein descobrira que os relógios que se movem através do espaço de diferentes maneiras marcam o tempo em diferentes ritmos (porque transformam diferentes parcelas do seu movimento através do tempo em movimento *através* do espaço. Lembre-se da analogia com Bart e o skate, que primeiro dirigia-se para o norte e em seguida desviava parte do seu movimento para o leste). Mas os relógios que estamos discutindo agora *não* estão se movendo *através* do espaço. Assim como cada moeda está afixada a um ponto da superfície do balão e só se move com relação às outras moedas porque a superfície do balão é que se infla, também cada galáxia ocupa uma região do espaço e, como regra geral, só se move com relação às outras galáxias por causa da expansão do espaço. Isso significa, com respeito ao próprio espaço, que todos os relógios estão estacionários e, portanto, marcam o tempo de maneira idêntica. São precisamente esses relógios — *relógios cujo único movimento deriva da expansão do espaço* — que propiciam a sincronização cósmica que empregamos para medir a idade do universo.

É claro que você pode perfeitamente pegar o seu relógio, entrar em um foguete e partir a enormes velocidades para um lugar ou outro do espaço, passando por movimentos que excedem significativamente o fluxo cósmico da expansão do espaço. Se fizer isso, o seu relógio marcará o tempo em ritmo *diferente* e a sua contagem do tempo transcorrido também será *diferente.* Esse é um ponto de vista perfeitamente válido, mas é completamente individualista: a medida do tempo transcorrido vincula-se à história do seu próprio paradeiro e do seu estado de movimento. No entanto, quando os astrônomos falam da idade do universo, buscam algo que seja universal — buscam uma medida que tenha o mesmo significado em todos os lugares. A uniformidade da mudança por todo o espaço nos propicia uma maneira de fazê-lo.[9]

Com efeito, a uniformidade da radiação cósmica de fundo em micro-ondas nos permite testar imediatamente se estamos ou não nos movendo com o fluxo cósmico do espaço. Embora a radiação em micro-ondas seja homogênea em todo

o espaço, se você realizar um movimento adicional ao do fluxo cósmico da expansão do espaço, já não observará a radiação como homogênea. Assim como o tom da sirene do carro de polícia que passa por você é mais alto ao aproximar-se e mais baixo ao afastar-se, se você estiver voando pelo espaço, as cristas e os vales das micro-ondas que vêm de encontro à proa da sua espaçonave chegarão em uma frequência mais alta em comparação com as que chegam pelo caminho oposto e encontram a popa da nave. As micro-ondas de frequência mais alta traduzem-se em uma temperatura mais alta, e você medirá uma radiação mais quente provindo do espaço ao qual se dirige e mais fria provindo do espaço que você deixa para trás. Na verdade, aqui, na nossa nave espacial Terra, os astrônomos *efetivamente* obtêm valores para a temperatura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas que são um pouco mais altos em uma direção do que na direção oposta. A razão está em que a Terra se move ao redor do Sol, o Sol se move em torno do centro da galáxia e a Via Láctea como um todo desloca-se, adicionando um pouco mais de velocidade ao fluxo da expansão cósmica, na direção da constelação Hidra. Só quando os astrônomos descontam os efeitos relativamente débeis desses movimentos adicionais sobre as micro-ondas que recebemos é que a radiação exibe a uniformidade peculiar de temperatura entre as diferentes partes do céu. É essa uniformidade, essa simetria global entre uma localização e qualquer outra, que nos permite falar sensatamente do tempo, quando descrevemos o universo como um todo.

CARACTERÍSTICAS SUTIS DE UM UNIVERSO EM EXPANSÃO

Devemos ressaltar alguns pontos sutis na explicação da expansão do cosmo. Em primeiro lugar, lembre-se de que na metáfora do balão apenas a *superfície* dele é relevante (superfície bidimensional, em que cada localização pode ser especificada por dois números análogos aos da latitude e de longitude na Terra), enquanto o espaço que vemos à nossa volta tem três dimensões. Utilizamos este modelo bidimensional porque ele retém os conceitos essenciais que compõem a verdadeira história tridimensional e é muito mais fácil de visualizar. É importante conservar isso em mente, sobretudo se você já se sentiu tentado a dizer que existe um ponto *especial* no modelo do balão: o ponto central do interior do balão, ponto do qual toda a superfície do balão se afasta. Essa observação é verdadeira, mas é irrelevante para a analogia porque nenhum ponto que esteja fora da superfície do balão desempenha papel algum. A superfície do balão representa *todo o* espaço. Os pontos que não estão na superfície são simples subprodutos irrelevantes da analogia e não correspondem a nenhuma

localização no universo. (transcender o modelo bidimensional da superfície do balão e passar para um modelo tridimensional esférico é matematicamente fácil, mas muito difícil de visualizar, mesmo para físicos e matemáticos profissionais. Você pode tentar pensar em uma bola sólida e tridimensional, como uma bola de boliche sem os furos para os dedos. Mas essa forma não é aceitável. Queremos que todos os pontos do modelo estejam em absoluto pé de igualdade, uma vez que acreditamos que todos os pontos do universo sejam [em média] semelhantes entre si. Mas a bola de boliche tem muitos tipos diferentes de pontos: alguns estão na superfície externa, outros dentro da massa interior, um deles está bem no centro. Por outro lado, assim como a superfície bidimensional de um balão circunda uma região esférica tridimensional [que contém o ar do balão], uma forma redonda, tridimensional e aceitável teria que circundar uma região esférica quadridimensional. Portanto, a superfície esférica tridimensional de um balão em um espaço quadridimensional é uma forma aceitável. Mas se isso ainda nos deixa ansiando por uma imagem, faça o mesmo que praticamente todos os profissionais: fique com as analogias com menos dimensões, que são mais fáceis de visualizar. Elas captam quase todos os aspectos fundamentais. Um pouco mais adiante consideraremos o espaço plano tridimensional, em contraste com a forma redonda de uma esfera, e esse espaço plano pode ser visualizado**).**

Em segundo lugar, se a velocidade de recessão é tanto mais elevada quanto mais afastada esteja a galáxia, será que isso não significa que aquelas que estão a uma distância suficientemente grande se afastarão de nós a uma velocidade superior à da luz? A resposta é um sim claro e definitivo. Mas não há conflito com a relatividade especial. E por quê? A razão está intimamente associada ao motivo pelo qual os relógios que se afastam uns dos outros por causa do fluxo cósmico do tempo mantêm-se em sincronia. Como ressaltamos no capítulo 3, Einstein mostrou que nada pode mover-se *através* do espaço com maior rapidez do que a luz. Mas as galáxias, em média, muito pouco se movem através do espaço. O seu movimento se deve quase que integralmente à *própria expansão do espaço.* E a teoria de Einstein não proíbe o espaço de expandir-se de maneira tal que leve dois pontos — duas galáxias — a afastar-se a uma velocidade superior à da luz. A limitação aplica-se às velocidades depois de descontado o movimento derivado da expansão do espaço, ou seja, aplica-se aos movimentos que são adicionais ao que decorre da expansão do espaço. As observações confirmam que, para as galáxias típicas que viajam com o fluxo cósmico, esse movimento adicional é mínimo e se mantém em pleno acordo com a relatividade especial, ainda que os seus movimentos relativos devidos à expansão do espaço possam exceder a velocidade da luz. (na dependência de estar o ritmo da expansão do universo acelerando-se ou retardando-se com o passar do tempo, a luz emitida por essas galáxias pode ter de travar uma batalha que deixaria Zenão orgulhoso: a luz viajaria em nossa direção à sua velocidade habitual, e a expansão do espaço faria com que ela tivesse que percorrer uma distância cada vez maior para alcançarnos, de tal modo que isso nunca aconteceria. Para os detalhes, veja a seção de notas ao final do livro.[10]). A Em terceiro lugar, se o espaço está se expandindo, será que isso não significaria que, além de as galáxias estarem se afastando umas das outras, esse esticamento também levaria todas as estrelas de uma galáxia a se afastarem umas das outras, e a expansão do espaço dentro de cada estrela e dentro de cada planeta e dentro de mim e de você e de todas as coisas levaria todos os átomos componentes a se afastarem uns dos outros, e esse mesmo esticamento dentro de cada átomo

levaria todos os componentes subatômicos a se afastarem mutuamente? Em síntese, será que o tecido esticado faria com que tudo crescesse em tamanho, inclusive os nossos padrões de medida, tornando impossível saber se na verdade teria ocorrido alguma expansão? A resposta é não. Pense de novo no modelo do balão com as moedas. Quando a superfície do balão se infla, as moedas se afastam umas das outras, mas elas próprias não aumentam de tamanho. Evidentemente, se representássemos as galáxias por meio de pequenos círculos desenhados no balão, com certeza então os círculos também cresceriam junto com o balão. Mas as moedas aplicadas, ao contrário dos círculos desenhados, captam o que acontece na realidade. Cada moeda conserva o seu tamanho porque as forças que mantêm juntos os átomos que a formam são muito mais potentes do que as que fazem expandir o balão no qual elas estão aplicadas. Do mesmo modo, a força nuclear, que mantém os átomos unidos, a força eletromagnética, responsável pela coesão dos seus ossos e da sua pele, e a força gravitacional, que mantém os planetas e as estrelas coesos e reunidos em galáxias, são mais potentes do que o esticamento do espaço, razão pela qual nenhum desses objetos se expande. Só nas escalas máximas, muito maiores do que as das galáxias individuais, o esticamento do espaço encontra pouca ou nenhuma resistência (a atração gravitacional entre galáxias amplamente separadas é comparativamente pequena, em decorrência das grandes distâncias envolvidas), de maneira que só no nível supragalático a expansão do espaço afasta os objetos uns dos outros.

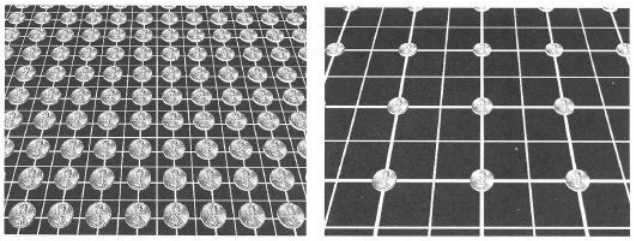
COSMOLOGIA, SIMETRIA E A FORMA DO ESPAÇO

Se alguém o acordasse no meio da noite, tirando-o de um sono profundo, e o obrigasse a dizer-lhe qual é a forma do universo — a forma global do espaço —, pode ser que você tivesse dificuldades em responder. Mesmo tonto de sono, você sabe que Einstein revelou que o espaço é uma espécie de plástico maleável, que pode, em princípio, tomar praticamente qualquer forma. Como responder, então, à pergunta? Vivemos em um pequeno planeta que órbita uma estrela comum nos confins de uma galáxia, entre as centenas de bilhões que estão espalhadas pelo espaço. Como é que você pode, então, saber o que quer que seja a respeito da forma do universo como um todo? Mas à medida que a névoa do sono se desfaz, você gradualmente percebe que o poder da simetria vem mais uma vez em seu auxílio.

Se você levar em conta que a grande maioria dos cientistas acredita que, nas médias das grandes escalas, todas as posições e todas as direções do universo relacionam-se de forma simétrica umas com as outras, terá encontrado o

caminho para a resposta. A razão está em que quase todas as formas não são capazes de satisfazer o critério da simetria, porque algumas partes ou regiões diferem fundamentalmente umas das outras. A pêra é mais estreita próximo ao talo; o ovo é mais pleno no meio e mais pontudo em um extremo. Essas formas, embora exibam algum grau de simetria, não são completamente simétricas. Eliminando tais formas e limitando-se apenas àquelas em que cada região ou direção é semelhante a qualquer outra, você pode diminuir fantasticamente o número de possibilidades.

Já deparamos com uma forma que satisfaz as condições. A forma esférica do balão foi o componente essencial para estabelecer a simetria entre as moedas que estão sobre a sua superfície e, assim, a versão tridimensional desta forma, denominada *tri-esfera*, é uma candidata para a forma do espaço. Mas essa não é a única forma que produz uma simetria completa. Continuando a raciocinar com os modelos bidimensionais, de mais fácil visualização, imagine uma superfície de borracha *infinitamente* larga e *infinitamente* comprida — e completamente sem curvas —, com moedas nela aplicadas a intervalos regulares. Com a expansão da superfície como um todo haverá novamente simetria espacial completa e consistência completa com a descoberta de Elubble: cada moeda verá as outras moedas afastarem-se com uma velocidade proporcional à sua distância, como na figura 8.4.



(a) (b)

Figura 8.4. (*a*) *A visão a partir de cada moeda em um plano infinito é idêntica à de qualquer outra moeda.* (*b*) *Quanto mais afastadas estiverem as moedas em 8.4a, maior será o aumento da separação experimentada com a expansão do plano.*

Assim, uma versão tridimensional dessa forma, como um cubo de borracha transparente que se expande infinitamente, com galáxias salpicadas de maneira regular por todo o seu volume, é uma outra forma possível para o espaço. (Se você preferir metáforas culinárias, pense em uma versão infinitamente grande do pão com gergelim que mencionamos antes, com a forma de um cubo infinito, onde as sementes de gergelim fazem o papel das galáxias. O calor do forno faz com que a massa do pão se expanda, com o que as sementes se afastam umas das outras.) Essa forma denomina-se *espaço plano* porque, ao contrário do exemplo esférico, não tem curvatura. (Este é um sentido da palavra “plano” muito usado

por matemáticos e físicos, mas que difere do sentido coloquial da palavra, que se refere à forma de uma panqueca.)[11]

Um aspecto positivo dessas formas infinitas, tanto a esférica quanto a plana, é que elas podem ser percorridas infindavelmente sem que se encontrem bordas ou limites. Isso é positivo porque nos permite evitar questões espinhosas: o que estaria além da borda do espaço? Que aconteceria se você chegasse ao limite do espaço? Se o espaço não tem bordas nem limites, essas perguntas não têm sentido. Mas note que as duas formas concretizam este interessante aspecto de maneiras diferentes. Se você andar sempre em frente em um espaço de forma esférica, verá, como Magalhães, que, mais cedo ou mais tarde, estará de volta ao ponto inicial, sem nunca ter encontrado uma borda. Em contraste, se andar sempre em frente em um espaço plano infinito, verá, como o coelhinho da propaganda de pilhas, que pode continuar andando sempre, sem nunca encontrar bordas ou limites, mas também sem nunca voltar ao ponto inicial da viagem. Isso pode parecer uma diferença fundamental entre a geometria dos espaços curvos e planos, mas há uma variação simples do espaço plano que se assemelha notavelmente à esfera sob esse ponto de vista.

Para imaginá-lo, pense em um desses jogos de vídeo em que a tela parece ter bordas, mas na realidade não as tem, porque não se pode sair da tela: se o personagem se move até a borda da direita, reaparece pela borda da esquerda; se se move até a borda de cima, reaparece pela borda de baixo. A tela “dá a volta”, identificando a borda de cima com a de baixo e a da direita com a da esquerda e, dessa maneira, a forma é plana (sem curvas) e tem tamanho *finito,* mas não tem bordas. Matematicamente, esta forma toma o nome de *toro bidimensional,* que está ilustrada na figura 8.5a.[12] A versão tridimensional dessa forma — um toro tridimensional — proporciona outra forma possível para o tecido do espaço. Você pode imaginá-lo como um cubo enorme que dá a volta ao longo de todos os três eixos: se você chegar ao topo, reaparecerá embaixo; se chegar ao fundo, reaparecerá na frente, e se chegar à esquerda, reaparecerá na direita, como na figura 8.5b. Essa forma é plana — também aqui no sentido de uma ausência de curvas, e não no sentido de parecer uma panqueca —, tridimensional e finita em todas as direções, mas não tem bordas nem limites.

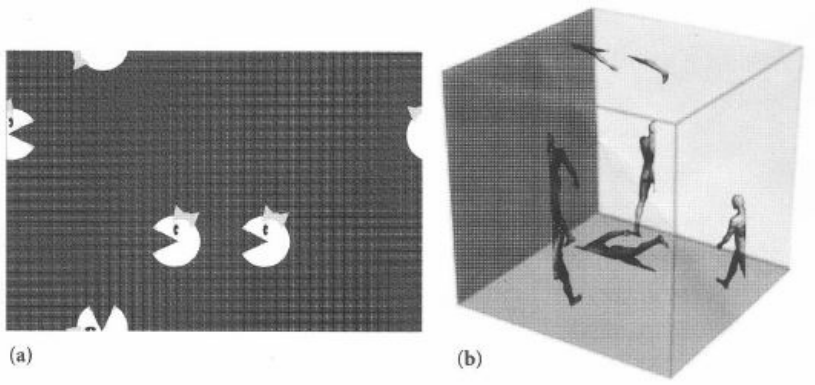


Figura 8.5. (*a*) *A tela de um jogo de vídeo é plana* (*no sentido de que não tem curvas*) *e tem tamanho finito, mas não tem bordas nem limites, pois ela "dá a volta". Matematicamente, essa forma denomina-se toro bidimensional.* (*b*) *Uma versão tridimensional da mesma forma, denominada toro tridimensional, também é plana* (*sem curvas*), *tem volume finito e não tem bordas ou limites, pois ela também dá a volta. Se você sair por uma face, entrará na face oposta.*

Além dessas possibilidades, há ainda outra forma que é consistente com a explicação dada para a descoberta de Hubble em termos de um espaço simétrico e em expansão. Ela é difícil de caracterizar em três dimensões, mas, tal como no exemplo da esfera, há um bom substituto bidimensional para ela: uma versão infinita de uma rodela de batata frita, dessas que vêm em latas, com uma curva suave. Essa forma, comumente denominada *sela*, é como o inverso da esfera. Enquanto a esfera se expande simetricamente para fora, a sela se recolhe simetricamente para dentro, como ilustra a figura 8.6. Recorrendo à terminologia matemática, dizemos que a esfera tem *curvatura positiva* (expande-se para fora), a sela tem *curvatura negativa* (recolhe-se para dentro) e o espaço plano — seja finito ou infinito — *não tem curvatura*, nem se expande nem se encolhe. (assim como a tela de um jogo de vídeo proporciona uma versão finita de um espaço plano sem bordas ou limites, existem versões finitas da forma da sela, também sem bordas ou limites. Não as discutiremos aqui, salvo para observar que isso implica que todas as três curvaturas possíveis (positiva, nula e negativa) podem ser reproduzidas por formas finitas sem bordas ou limites. (Em princípio, portanto, um Fernão de Magalhães espacial poderia realizar a versão cósmica da viagem de circunavegação em um universo cuja curvatura seja dada por qualquer das três possibilidades**).**

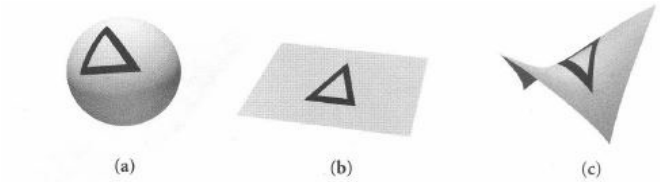


Figura 8.6. *Empregando a analogia bidimensional para o espaço, há três tipos de curvaturas que são completamente simétricas — ou seja, curvaturas em que a visão a partir de qualquer posição é idêntica à de qualquer outra. São elas:* (*a*) *a curvatura positiva, que se infla uniformemente, como no caso de uma esfera;* (*b*) *a curvatura zero, que não se infla, como no caso de um plano infinito, ou de uma tela finita de jogo de vídeo, e* (*c*) *a curvatura negativa, que se recolhe para dentro, como no caso de uma sela.*

Os pesquisadores comprovaram que esta lista — uniformemente positiva, nula ou uniformemente negativa — esgota as curvaturas possíveis do espaço que

sejam consistentes com o requisito da simetria entre todas as posições e em todas as direções. E isso é realmente assombroso. Estamos falando da forma do *universo como um todo,* algo para o que existem infindáveis possibilidades. Mas graças ao imenso poder da simetria, os pesquisadores podem estreitar fortemente a gama de alternativas. Assim, deixando que a simetria guie a sua resposta, e se o seu interrogador noturno lhe permitir testar um pequeno número de hipóteses, você será capaz de responder ao desafio.[13]

De qualquer maneira, você pode estar se perguntando por que chegamos a várias formas possíveis para o tecido do espaço. Habitamos um único universo; por que, então, não podemos especificar uma única forma? Bem, as formas que enumeramos são as únicas consistentes com a crença em que todos os observadores, independentemente do ponto em que estejam localizados no universo, devem ver, na escala máxima, um cosmo idêntico. Mas essas considerações de simetria, apesar de serem altamente seletivas, não são suficientes para que possamos encontrar uma resposta única. Para isso, precisamos das equações de Einstein para a relatividade geral.

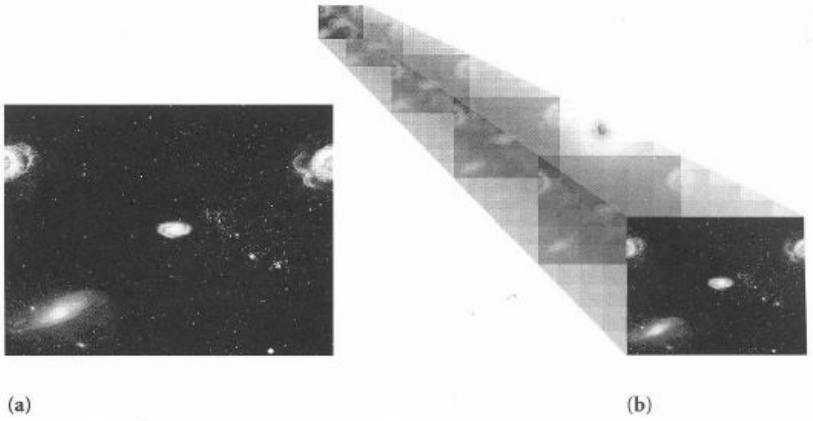
Essas equações tomam como dado inicial a quantidade de matéria e energia do universo (supondo, de novo por considerações de simetria, que elas sejam distribuídas uniformemente) e como resultado dão a curvatura do espaço. A dificuldade está em que, por muitas décadas, os astrônomos não puderam concordar sobre a quantidade real de matéria e energia. Se toda a matéria e a energia do universo fosse distribuída uniformemente por todo o espaço e se, assim sendo, houvesse uma densidade superior à chamada *densidade crítica,* que é de cerca de 0,000000000000000000001 (10^{-23}) gramas por metro cúbico (hoje há mais matéria do que radiação no universo, e, portanto, convém expressar a densidade crítica nas unidades mais relevantes para a massa — gramas por metro cúbico. Note também que, embora 10^{-23} gramas por metro cúbico não pareça muito, há *muitos* metros cúbicos no cosmo. Além disso, quanto mais para trás olharmos no tempo, menor é o espaço em que a massa/energia está contida e maior se torna a densidade do universo**)** — cerca de cinco átomos de hidrogênio por metro cúbico —, as equações de Einstein dariam uma curvatura positiva para o espaço. Se a densidade fosse menor do que a crítica, as equações implicariam uma curvatura negativa. E se ela fosse exatamente igual à densidade crítica, as equações nos diriam que o espaço não tem curvatura global. Esta questão ainda não foi resolvida definitivamente, mas os dados mais sofisticados de que dispomos fazem pender a balança no sentido da ausência de curvatura — a forma plana. (Entretanto, a questão de se o coelhinho da bateria andaria para sempre em uma mesma direção e desapareceria no vazio ou se um dia completaria uma volta e reapareceria no ponto de partida — se o espaço se estende infinitamente ou se dá

uma volta sobre si próprio, como na tela do jogo de vídeo — ainda está completamente em aberto).[14]
Mesmo sem uma resposta final para a forma do tecido cósmico, o que está demasiadamente claro é que a simetria é a consideração *essencial* que nos permite compreender o espaço e o tempo quando aplicada ao universo como um todo. Sem invocar o poder da simetria, estaríamos na estaca zero.

A COSMOLOGIA E O ESPAÇO-TEMPO

Podemos agora ilustrar a história cósmica combinando o conceito do espaço em expansão com a descrição do espaço-tempo em termos de um pão de fôrma, que vimos no capítulo 3. Lembre-se de que na visualização do pão de fôrma, cada fatia — embora bidimensional — representa a totalidade do espaço tridimensional em determinado momento do tempo, a partir da perspectiva de um observador particular. Observadores diferentes cortam o pão em ângulos diferentes, dependendo dos detalhes do seu movimento relativo.
Nos exemplos que antes encontramos, não levamos em conta a expansão do espaço e, em vez disso, imaginamos que o tecido do cosmo era fixo e imutável no tempo. Podemos agora refinar esses exemplos incluindo a evolução cosmológica.
Para fazê-lo, tomaremos a perspectiva dos observadores que estão em repouso com relação ao espaço — ou seja, observadores cujo único movimento deriva da expansão cósmica, tal como acontece com as moedas aplicadas no balão. Portanto, ainda que esses observadores se movam uns com relação aos outros, existe simetria entre eles — todos os seus relógios estão de acordo — e, assim, eles fatiam o pão do espaço-tempo exatamente da mesma maneira. Só os movimentos relativos adicionais ao que deriva da expansão do espaço, só os movimentos relativos *através* do espaço, e não *a partir* da expansão do espaço, resultariam na perda de sincronia entre os seus relógios e em que as suas fatias do pão do espaço-tempo sejam cortadas em ângulos diferentes. Também precisaremos especificar a forma do espaço e, para fins de comparação, consideraremos algumas das possibilidades discutidas acima.
O primeiro exemplo é o da forma plana e finita, a forma do jogo de vídeo. Na figura 8.7a mostramos uma fatia desse universo, uma imagem esquemática destinada a representar todo o espaço neste exato instante. Para simplificar, imagine que a nossa galáxia, a Via Láctea, esteja no centro da figura, mas tenha em mente que nenhuma localização é especial quando comparada a alguma outra em qualquer sentido. Mesmo as bordas são ilusórias. A borda superior não é um

lugar onde o espaço termine, uma vez que você pode transpô-la e reaparecer pela borda inferior. Do mesmo modo, a borda esquerda não é um lugar onde o espaço termine, uma vez que você pode transpô-la e reaparecer pela borda da direita. Para que haja compatibilidade com as observações astronômicas, cada lado deve estender-se por pelo menos 14 bilhões de anos-luz (cerca de 136 bilhões de trilhões de quilômetros) a partir do ponto médio, mas pode ser muito mais longo. Note que neste momento não podemos ver literalmente as estrelas e as galáxias como desenhadas nesta fatia de *agora,* pois, como vimos no capítulo 5, a luz emitida por qualquer objeto agora toma tempo para chegar até nós. A luz que vemos quando olhamos o céu em uma noite clara foi emitida há muito tempo — milhões e até bilhões de anos atrás — e só agora está completando a longa viagem até a Terra, entrando no nosso telescópio e fazendo com que nos maravilhemos com as belezas do espaço profundo. Como o espaço está se expandindo, quando essa luz foi emitida, o universo era bem menor. Isso está ilustrado na figura 8.7b, em que temos a nossa atual fatia de agora no lado direito do pão e incluímos uma seqüência de fatias à esquerda que representam o universo em momentos cada vez mais primordiais do tempo. Como se pode ver, o tamanho global do espaço e as separações entre as galáxias diminuem à medida que vemos o universo cada vez mais jovem.



(a) (b)

Figura 8.7. (*a*) *Esquema que representa a totalidade do espaço neste exato instante, supondo que o espaço seja pleno e de extensão finita, ou seja, com a forma de uma tela de jogo de vídeo. Note que a galáxia no canto superior direito dá a volta e reaparece pela esquerda.* (*b*) *Esquema que representa a totalidade do espaço em sua evolução através do tempo, com algumas fatias de tempo em destaque, por razões de clareza. Note que o tamanho global do espaço e a separação entre as galáxias diminuem à medida que olhamos mais para trás no tempo.*

Na figura 8.8, pode-se ver também a história da luz, emitida por uma galáxia distante, talvez 1 bilhão de anos atrás, em sua viagem na nossa direção, na Via Láctea. Na fatia inicial da figura 8.8a, a luz é emitida e nas fatias subseqüentes pode-se vê-la aproximando-se cada vez mais, mesmo enquanto o universo vai se tornando cada vez maior. Finalmente, pode-se vê-la chegar a nós, na última fatia

da direita. Na figura 8.8b, conectando as localizações pelas quais a luz passa em cada fatia durante a sua viagem, vemos a trajetória da luz através do espaço-tempo. Como recebemos luz a partir de inúmeras direções, a figura 8.8c mostra exemplos de trajetórias descritas por vários feixes de luz para chegar até nós agora através do espaço e do tempo.

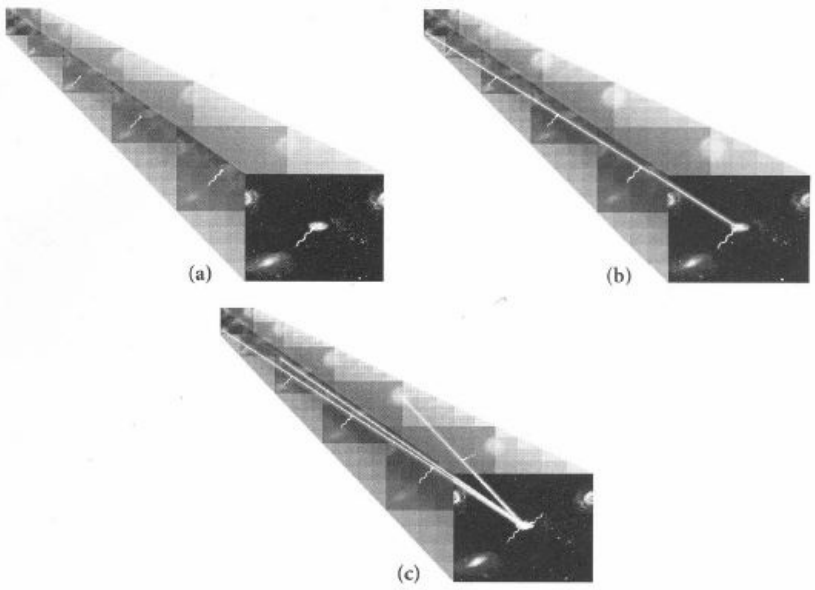


Figura 8.8. *(a) A luz emitida há muito tempo por uma galáxia distante aproxima-se progressivamente da Via Láctea nas fatias de tempo subseqüentes. (b) Quando finalmente vemos a imagem da galáxia distante que nos chega, nós a vemos através do espaço e do tempo, uma vez que a sua luz foi emitida no passado remoto. A trajetória seguida pela luz através do espaço-tempo está em destaque. (c) Trajetórias através do espaço-tempo tomadas pela luz emitida por vários corpos celestes que vemos hoje.*

As figuras mostram enfaticamente de que forma a luz do espaço pode ser usada como uma cápsula cósmica do tempo. Quando olhamos para a galáxia de Andrômeda, a luz que recebemos foi emitida cerca de 3 milhões de anos atrás, de modo que o que vemos é Andrômeda em um passado distante. Quando olhamos para o aglomerado Coma, recebemos a luz que foi emitida há cerca de 300 milhões de anos e, portanto, o que vemos é o aglomerado em um passado ainda mais distante. Se exatamente neste momento todas as estrelas de todas as galáxias desse aglomerado se tornassem supernovas, continuaríamos vendo a imagem normal do aglomerado Coma por mais 300 milhões de anos. Só então a luz emitida pelas estrelas em explosão teriam tido o tempo para chegar até nós. Do mesmo modo, se um astrônomo que estivesse no aglomerado Coma e que pertencesse à nossa fatia de tempo atual posicionasse o seu poderoso telescópio na direção da Terra, veria uma abundância de samambaias, artrópodes e répteis primitivos, mas só poderia ver a Muralha da China e a Torre Eiffel daqui a uns 300 milhões de anos. Evidentemente, esse astrônomo, bem treinado em questões

de cosmologia básica, perceberia que está vendo a luz que foi emitida no passado distante da Terra e, ao ordenar o seu próprio pão do espaço-tempo, colocaria os répteis, os artrópodes e as samambaias na sua época apropriada, ou seja, nas suas fatias de tempo apropriadas.

Tudo isso supõe que tanto nós quanto o astrônomo do aglomerado Coma nos movemos apenas seguindo o fluxo cósmico da expansão do espaço, pois isso assegura que o fatiamento do pão do espaço-tempo que fazemos aqui e lá é coincidente — e que as suas listas de *agoras* concordam com as nossas. Mas se ele se mover através do espaço a velocidades substancialmente adicionais ao fluxo cósmico, as suas fatias vão se inclinar com relação às nossas, tal qual na figura 8.9. Nesse caso, como vimos com relação a Chewie, no capítulo 5, o *agora* do astrônomo coincidirá com o que consideramos ser o nosso futuro, ou o nosso passado (dependendo de se o movimento adicional se dá na nossa direção ou na direção oposta). Note, contudo, que as suas fatias já não serão espacialmente homogêneas. Cada fatia inclinada da figura 8.9 faz interseção com o universo em várias épocas diferentes, razão por que as fatias distam muito de serem uniformes. Isso complica significativamente a descrição da história do cosmo e, por isso mesmo, os astrônomos em geral não contemplam essas perspectivas. Ao contrário, eles costumam considerar somente a perspectiva dos observadores que se movem apenas com o fluxo cósmico, uma vez que esse procedimento produz fatias homogêneas. Mas sempre é bom lembrar que, basicamente, todos os pontos de vista têm a mesma virtualidade.

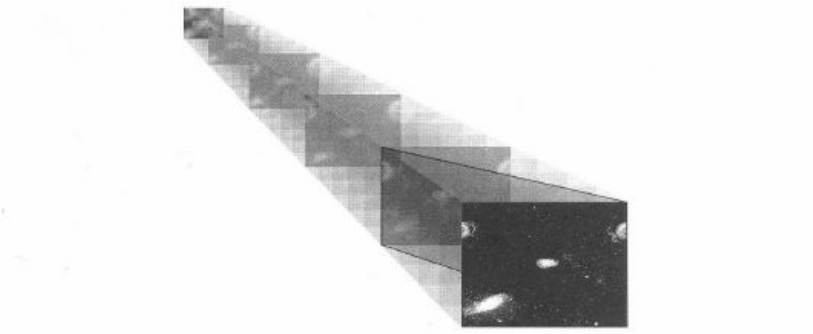


Figura 8.9. *Fatia de tempo de um observador que se move de maneira significativamente adicional ao fluxo da expansão do espaço.*

Se olharmos mais para a esquerda do pão cósmico do espaço-tempo, o universo vai ficando cada vez menor e mais denso. E, assim como um pneu de bicicleta vai ficando cada vez mais aquecido à medida que colocamos mais ar comprimido no seu interior, o universo vai se tornando cada vez mais quente à medida que a matéria e a radiação vão ficando cada vez mais comprimidas em um espaço cada vez menor. Se chegarmos a apenas dez milionésimos de

segundo do começo, o universo atinge tal densidade e tal temperatura que a matéria normal se dissolve em um plasma primordial formado pelos componentes elementares da natureza. E se prosseguirmos a viagem até a última vizinhança do próprio tempo zero — o instante do Big-Bang —, todo o universo estará comprimido em um tamanho que faz o ponto final desta sentença parecer absolutamente gigantesco. As densidades nessa época inicial eram tão grandes e as condições tão extremas que as teorias físicas mais sofisticadas de que dispomos hoje não são capazes de jogar nenhuma luz a respeito do que aconteceu. Por razões que se tornarão progressivamente claras, as leis da física tão bem desenvolvidas no século xx perdem sentido nessas condições intensas e nos deixam sem rumo na nossa busca de compreender o início dos tempos. Logo veremos que alguns desenvolvimentos recentes nos propiciam um farol de esperança, mas por agora precisamos reconhecer que temos um entendimento incompleto do que aconteceu no começo e por isso recorremos a imagens difusas no extremo esquerdo do pão cósmico do espaço-tempo — a nossa versão da "terra incógnita" dos mapas medievais. Com estes toques finais, apresentamos a figura 8.10 como ilustração ampla da história cósmica.

FORMAS ALTERNATIVAS

Até aqui supusemos que o espaço tem a forma de uma tela de jogo de vídeo, mas a história mantém muitas das suas características também nas outras possibilidades. Se os dados terminarem por nos mostrar que a forma do espaço é esférica, por exemplo, ao recuarmos no tempo o tamanho da esfera vai se reduzindo, o universo vai se tornando cada vez mais quente e mais denso e, no tempo zero, encontraremos um começo com algum tipo de Big-Bang.

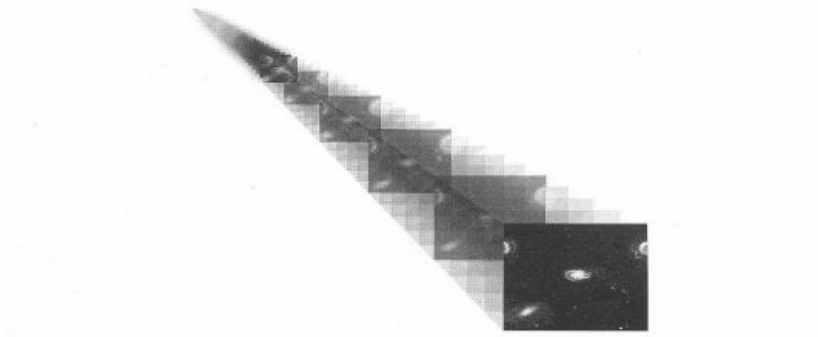


Figura 8.10. *História cósmica — o "pão" do espaço-tempo — de um universo plano e de extensão espacial finita. O aspecto difuso dos quadros superiores denota a nossa falta de conhecimento a respeito do período próximo ao início do universo.*

É difícil mostrar uma ilustração análoga à da figura 8.10 porque as esferas não se agrupam nitidamente umas sobre as outras (pode-se imaginar, por exemplo, um

“pão esférico” em que cada fatia é uma esfera que envolve a anterior), mas, apesar das complicações gráficas, a física é basicamente a mesma.

Os casos do espaço plano infinito e do espaço infinito em forma de sela também compartilham muitas características com as duas formas já discutidas, porém apresentam uma diferença essencial. Veja a figura 8.11, em que as fatias representam um espaço plano que prossegue indefinidamente (do qual, é evidente, só podemos mostrar uma seção). Quando olhamos para os tempos cada vez mais primitivos, o espaço se encolhe. As galáxias se aproximam de maneira gradual, à medida que olhamos para os quadros superiores da figura 8.11b. Mas o tamanho global do espaço permanece o mesmo. Por quê? Porque a infinitude é algo peculiar. Se o espaço é infinito e se reduzimos todas as distâncias à metade, o tamanho do espaço será meio infinito, o que continua a ser infinito. Assim, embora todas as coisas se aproximem umas das outras e as densidades se tornem cada vez mais altas à medida que prosseguimos rumo ao passado, o tamanho global do universo permanece infinito. As coisas vão ficando mais densas em toda a extensão infinita do espaço, o que produz uma imagem bem diferente do Big-Bang.

Normalmente imaginamos que o universo começou como um ponto, basicamente como na figura 8.10, em que não há nem espaço nem tempo exterior. Então, por causa de algum tipo de erupção, o espaço e o tempo desdobraram-se a partir da sua forma compacta e o universo expandiu-se. Mas se o universo for espacialmente infinito, *já haveria um espaço infinito no momento do Big-Bang.* Nesse momento inicial, a densidade da energia foi ao máximo e a temperatura alcançou um nível incomparavelmente alto, no entanto essas condições extremas existiriam *em todos os lugares,* e não apenas em um ponto. Nesse cenário, o Big-Bang não aconteceu em um único ponto, mas sim em todos os lugares de uma extensão infinita. Comparando-se este quadro ao começo convencional em um ponto, é como se tivesse havido muitos Big-Bangs, um em cada ponto de uma extensão espacial infinita. Depois disso o espaço inflou-se, mas o seu tamanho global não aumentou, uma vez que algo que já é infinito não pode ser ainda maior. O que aumentou foi a separação entre os objetos como as galáxias (depois que se formaram), conforme se vê ao olhar da esquerda para a direita na figura 8.11b. Um observador, como eu e você, olhando a partir de uma ou outra galáxia, veria as demais galáxias afastando-se, tal como Hubble descobriu.

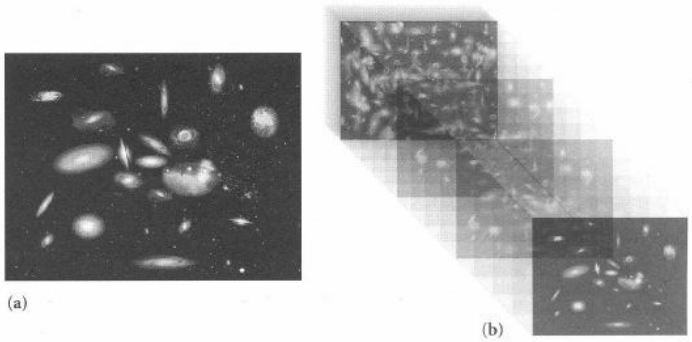


Figura 8.11. (*a*) *Esquema de um espaço infinito, salpicado de galáxias.* (*b*) *O espaço se encolhe cada vez mais, ao olharmos para trás no tempo — e, portanto, as galáxias estão mais próximas e ocupam mais densamente o espaço nos tempos mais antigos —, mas o tamanho global do espaço infinito permanece infinito. A nossa ignorância sobre o que aconteceu nos primeiríssimos tempos fica novamente denotada pelos quadros difusos acima, mas neste caso o aspecto difuso se estende por toda a extensão infinita do espaço.*

Tenha em mente que este exemplo de um espaço plano infinito é bem mais do que apenas acadêmico. Veremos que há evidências crescentes de que a forma global do espaço não é curva, e como até agora não temos indicações de que o espaço tenha a forma de uma tela de jogo de vídeo, a forma plana e infinitamente grande para o espaço é a candidata número um para a estrutura em grande escala do espaço-tempo.

COSMOLOGIA E SIMETRIA

As considerações a respeito da simetria mostraram-se claramente indispensáveis no desenvolvimento da teoria cosmológica moderna. O significado do tempo, sua aplicação ao universo como um todo, a forma global do espaço e até mesmo a visão global da relatividade geral têm por base o conceito de simetria. Mesmo assim, existe ainda uma outra maneira pela qual as ideias de simetria nos informam a respeito do cosmo em evolução. Ao longo de sua história, a temperatura do universo sofreu uma enorme variação, desde os momentos ferozmente tórridos logo após o Big-Bang até os poucos graus acima do zero absoluto que encontramos hoje ao medirmos a temperatura do espaço profundo. E já que existe uma interdependência crucial entre o calor e a simetria, como explicarei no próximo capítulo, o que vemos hoje é provavelmente uma fria relíquia de uma simetria muito mais rica que moldou o universo primordial e determinou alguns dos aspectos mais familiares e essenciais do cosmo.

9. A vaporização do vácuo

O calor, o nada e a unificação

Durante 95% do tempo transcorrido desde o Big-Bang, um repórter que estivesse encarregado de acompanhar a evolução global da forma do universo teria relatado mais ou menos a mesma história: *Universo continua a expandirse. Matéria continua a espalhar-se por causa da expansão. Densidade do universo continua a diminuir. Temperatura continua a baixar. Universo mantém aparência simétrica e homogênea na escala máxima.* Mas nem sempre foi assim tão fácil relatar a evolução do cosmo. Os primeiros estágios teriam requerido uma atividade frenética para manter a reportagem em dia, porque nesses momentos iniciais o universo passou por mudanças rápidas. E agora sabemos que o que aconteceu então tem uma importância decisiva para o que experimentamos hoje.

Neste capítulo focalizaremos alguns momentos críticos que se situaram na primeira fração de segundo após o Big-Bang, quando se acredita que a quantidade de simetria contida no universo modificou-se de forma abrupta, com a ocorrência de sucessivas mudanças, cada uma das quais deu início a épocas profundamente diferentes da história cósmica. Se hoje o nosso repórter poderia mandar tranquilamente o mesmo fax de poucas linhas a cada bilhão de anos, naqueles primeiros momentos, quando a simetria mudava de maneira tão radical, o trabalho teria sido bem mais desafiante, porque a estrutura básica da matéria e das forças responsáveis pelo seu comportamento teria sido totalmente estranha. A razão está associada a uma interação entre o *calor* e a *simetria* e requer que repensemos por completo o que queremos dizer com as noções de *espaço vazio* e de *nada*. Como veremos, esse repensar não só enriquece substancialmente a compreensão dos primeiros momentos do universo, mas também nos leva a dar um passo adiante na realização de um sonho que vem desde a época de Newton, Maxwell e, em particular, Einstein — o sonho da *unificação.* Igualmente importante é o fato de que esses desenvolvimentos prepararam o cenário para o mais moderno dos esquemas cosmológicos, a *cosmologia inflacionária,* enfoque que prenuncia respostas para algumas das mais renitentes perguntas e alguns dos mais espinhosos enigmas, a respeito dos quais o modelo-padrão do Big-Bang permanece silencioso.

CALOR E SIMETRIA

Quando as coisas ficam muito quentes, ou muito frias, elas podem mudar. E às vezes a mudança é tão profunda que não se consegue nem reconhecê-las como eram antes. A compreensão dos efeitos dessa mudança de temperatura é crucial para que possamos lidar com a história do universo primordial, pois as condições logo após o Big-Bang eram tórridas e porque, à medida que o espaço se expandia e se resfriava, houve uma queda rápida da temperatura. Mas vamos começar de uma maneira simples. Vamos começar com o gelo.

Se você esquentar um pedaço de gelo bem frio, no começo não acontece quase nada. Embora a temperatura suba, a aparência do gelo permanece mais ou menos igual. Mas se a temperatura subir até zero grau Celsius, e você mantiver o aquecedor ligado, de repente acontece algo dramático. O gelo sólido começa a derreter-se e se transforma em água líquida. Não deixe que a familiaridade desta transformação tire a graça do espetáculo. Se você não tivesse nenhuma experiência com a água e o gelo, seria um tremendo desafio conceber a relação íntima que existe entre eles. Um é sólido, como uma pedra, e o outro é um líquido viscoso. A observação simples não revela nenhuma evidência direta de que a sua composição molecular, $\mathbf{H_2O}$**,** seja idêntica. Se você nunca tivesse visto o gelo, ou a água, e recebesse dois recipientes, um com água, outro com gelo, certamente pensaria que os dois conteúdos não têm relação entre si. Mas, quando um deles cruza a marca de zero grau Celsius, você assiste a uma alquimia maravilhosa na qual um se transforma no outro, em uma verdadeira transmutação.

Se continuar a aquecer a água líquida, novamente verá que durante certo tempo não acontece nada de extraordinário, além do aumento do calor. Mas, quando a temperatura chega a cem graus Celsius, ocorre uma outra mudança brusca: a água líquida começa a ferver e a transformar-se em vapor, um gás quente que tampouco apresenta alguma conexão óbvia com a água líquida ou com o gelo sólido. Mas, como sabemos bem, os três têm a mesma composição molecular. As mudanças de sólido para líquido e de líquido para gasoso são conhecidas como *transições de fase.* A maioria das substâncias passa por sequências de mudanças similares se a sua temperatura variar o suficiente.[1]

A simetria desempenha um papel fundamental nas transições de fase. Em quase todos os casos a transição de fase acarreta alterações significativas na quantidade de simetria de um objeto ou substância. Na escala molecular, por exemplo, o gelo tem uma forma cristalina, em que as moléculas de $\mathbf{H_2O}$ ficam dispostas ordenadamente em um arranjo hexagonal. Como nas simetrias do cubo da figura

8.1, o padrão global das moléculas de água só permanece invariável no caso de certas manipulações especiais, como rotações de sessenta graus em torno de eixos particulares do arranjo hexagonal. Em contraste, quando aquecemos o gelo, o arranjo cristalino funde-se em um agrupamento uniforme de moléculas — a água líquida — que se mantém invariável diante de rotações em qualquer ângulo e em torno de qualquer eixo. Assim, ao aquecermos o gelo e o fazermos passar pela transição de fase sólido — líquido, aumentamos a sua simetria. (Lembre-se de que, embora a sua intuição lhe indique que algo mais organizado, como o gelo, deva ser mais simétrico, a verdade é o oposto: algo é mais simétrico quando pode ser submetido a mais transformações, como as rotações, sem que a sua aparência sofra mudanças.)

Do mesmo modo, se aquecermos a água líquida e a convertermos em vapor, a transição de fase também resultará em um aumento da simetria. Na água líquida, as moléculas de $\mathbf{H_2O}$ organizam-se, em geral, com o hidrogênio de uma molécula próximo ao oxigênio da molécula vizinha. Se girássemos uma ou outra molécula do grupo, notaríamos que o padrão molecular seria afetado. Mas quando a água ferve e se transforma em vapor, as moléculas agitamse livremente, pois já não há um padrão de orientação para elas e, por conseguinte, se girarmos uma molécula, ou um grupo delas, o gás permanecerá igual. Portanto, assim como a transição gelo—água resulta em um aumento da simetria, a transição água—vapor também o faz. A maioria das substâncias (mas não todas)[2] comporta-se dessa maneira, experimentando um aumento na simetria ao passar pelas transições de fase sólido—líquido e líquido—gasoso.

A história é a mesma quando resfriamos a água, ou quase todas as demais substâncias; só que o que acontece é o inverso. Por exemplo, quando resfriamos o vapor d’água, no começo não acontece nada de notável, mas quando a temperatura cai para cem graus Celsius, o vapor, de repente, começa a condensar-se em água líquida. Quando resfriamos a água líquida, não acontece muita coisa até que a temperatura chega a zero grau Celsius, quando então a água começa a congelar-se em forma sólida. Seguindo o mesmo raciocínio a respeito das simetrias — mas no sentido inverso —, concluímos que ambas as transições de fase são acompanhadas por uma *diminuição* da simetria. (embora a diminuição da simetria signifique que será menor o número de manipulações que passará despercebido, o calor irradiado para o ambiente durante essas transformações deixa claro que a entropia total — que inclui a do ambiente — aumenta**).**

Chega de gelo, água, vapor e das suas simetrias. O que é que tudo isso tem a ver com a cosmologia? Bem, na década de 1970, os físicos perceberam que não só os objetos que *estão no* universo podem passar por transições de fase, mas que isso pode acontecer também com *o cosmo como um todo.* Durante os últimos 14

bilhões de anos, o universo tem se expandido e descomprimido de forma contínua. E assim como um pneu se resfria ao descomprimir-se, a temperatura do universo em expansão também caiu continuamente. Durante a maior parte desse processo de queda, não aconteceu nada de extraordinário. Mas temos razões para crer que, quando o universo passou por determinadas temperaturas críticas — como as de zero e de cem graus Celsius para a água —, sofreu mudanças radicais e experimentou drásticas reduções de simetria. Muitos físicos acreditam que hoje estamos vivendo numa fase "condensada", ou "congelada", do universo, profundamente diferente das épocas anteriores. As transições de fase cosmológicas não envolveram necessariamente condensações, como a do vapor em água, ou congelamentos, como o da água em gelo, embora haja muitas similaridades qualitativas com esses exemplos mais familiares. Em vez disso, a "substância" condensada ou congelada quando o universo, ao resfriar-se, passou pelas temperaturas críticas, foi um campo — mais precisamente um *campo de Higgs.* Vejamos o que isso significa.

FORÇAS, MATÉRIA E OS CAMPOS DE HIGGS

Os campos constituem uma grande parte do arcabouço da física moderna. O campo eletromagnético, discutido no capítulo 3, é talvez o mais simples e conhecido entre os campos da natureza. Vivendo em meio a emissões de rádio, televisão e telefones celulares e recebendo o calor e a luz do Sol, estamos constantemente imersos em um mar de campos eletromagnéticos. Os fótons são os componentes elementares dos campos eletromagnéticos e podem ser considerados transmissores microscópicos da força eletromagnética. Quando você vê alguma coisa, pode dizer que está vendo um campo eletromagnético ondulatório — ou uma série de fótons — que entra pelos seus olhos e estimula a sua retina. Por isso, o fóton é por vezes descrito como a *partícula mensageira* da força eletromagnética.

O campo gravitacional também nos é familiar, por estar constante e consistentemente ancorando-nos à superfície da Terra, juntamente com tudo mais à nossa volta. Tal como sucede com relação aos campos eletromagnéticos, estamos todos imersos em um mar de campos gravitacionais. O da Terra é dominante, mas também podemos sentir os campos gravitacionais do Sol, da Lua e dos outros planetas. Assim como os fótons são as partículas que constituem o campo eletromagnético, os físicos acreditam que os *grávitons* são as partículas que constituem o campo gravitacional. O gráviton ainda não foi descoberto experimentalmente, mas isso não chega a surpreender. A gravidade é,

de longe, a mais fraca de todas as forças (por exemplo, um mero ímã de porta de geladeira consegue reter um pedaço de papel, superando, assim, a atração gravitacional de *toda* a Terra) e é, portanto, compreensível que os pesquisadores ainda não tenham conseguido detectar os componentes mínimos da força mais débil. Mas mesmo sem a confirmação experimental, a maior parte dos físicos crê que, assim como os fótons transmitem a força eletromagnética (eles são as partículas mensageiras da força eletromagnética), os grávitons transmitem a força gravitacional (e são as partículas mensageiras dessa força). Quando você derruba um copo, pode pensar no evento em termos de que o campo gravitacional da Terra atraiu o copo, ou, usando a descrição geométrica mais sofisticada de Einstein, pode pensar em termos de que o copo se desloca ao longo de uma endentação que a presença da Terra causa no tecido do espaço-tempo, ou — se é que os grávitons existem de verdade — também pode pensar em termos de que os grávitons, agindo entre a Terra e o copo, comunicam uma "mensagem" gravitacional que "diz" ao copo que caia em direção à Terra.

Além desses campos de força bem conhecidos, há duas outras forças da natureza, a *força nuclear forte* e a *força nuclear fraca*, que também exercem influência através de campos. As forças nucleares são menos familiares do que o eletromagnetismo e a gravidade porque operam apenas nas escalas atômica e subatômica. Mesmo assim, o seu impacto sobre a vida cotidiana, por meio da fusão nuclear, que faz o Sol brilhar, da fissão nuclear, nos reatores atômicos, e da desintegração radioativa de elementos como o urânio e o plutônio, não é menos significativo. Os campos das forças nucleares forte e fraca são denominados *campos de Yang-Mills*, em razão dos trabalhos teóricos de C. N. Yang e Robert Mills, na década de 1950. E assim como os campos eletromagnéticos são compostos por fótons e os campos gravitacionais por grávitons, segundo se crê, os campos forte e fraco também têm partículas componentes. As partículas da força forte denominam-se *glúons* e as da força fraca são as partículas W e Z. A existência dessas partículas de força foi confirmada por experimentos com aceleradores de partículas realizados na Alemanha e na Suíça, no final da década de 1970 e no início da de 1980.

O esquema dos campos também se aplica à matéria. Em linhas gerais, as ondas de probabilidade da mecânica quântica podem ser consideradas campos que preenchem o espaço e fornecem a probabilidade de que esta ou aquela partícula de matéria esteja neste ou naquele lugar. Um elétron, por exemplo, pode ser visto como uma partícula — que pode deixar a marca de um ponto em uma tela fosfórica, como na figura 4.4 —, mas também pode — e deve — ser visto em termos de um campo ondulatório, o qual é capaz de contribuir para um padrão de

interferência em uma tela fosfórica, como na figura 4.3b.[3] Com efeito, embora não entremos aqui em grandes detalhes a esse respeito,[4] a onda de probabilidade de um elétron é intimamente associada a algo que se denomina *campo do elétron* — um campo similar, em muitas maneiras, ao campo eletromagnético, mas no qual o elétron desempenha o papel análogo ao do fóton, por ser o elétron o componente mínimo e fundamental do campo. Este mesmo tipo de descrição em termos de campo aplica-se a todas as outras espécies de partículas de matéria.

Depois desta discussão sobre campos de matéria e campos de força, pode parecer que *já* cobrimos o tema. Mas existe um consenso geral quanto a que a história contada até aqui não está propriamente completa. Muitos físicos crêem de forma convicta que há um terceiro tipo de campo, que nunca foi detectado experimentalmente, mas que desempenhou um papel crucial, nas duas últimas décadas, tanto no moderno pensamento cosmológico quanto na física das partículas elementares. Ele se denomina *campo de Higgs*, em homenagem ao físico escocês Peter Higgs.[5] E, se as ideias da próxima seção estiverem corretas, todo o universo está imerso em um oceano de campo de Higgs — uma fria relíquia do Big-Bang —, responsável por muitas das propriedades das partículas que compõem o seu corpo, o meu e tudo mais que podemos perceber.

OS CAMPOS E O RESFRIAMENTO DO UNIVERSO

Os campos respondem à temperatura, assim como a matéria comum. Quanto mais alta a temperatura, maior a ferocidade com que o valor de um campo oscilará para cima ou para baixo, como a superfície de uma panela de água fervente. Nas frias temperaturas que caracterizam o espaço profundo de hoje (2,7 graus acima do zero absoluto, ou 2,7 graus Kelvin, como normalmente se diz), e mesmo nas temperaturas mais tépidas aqui da Terra, as ondulações dos campos são minúsculas. Porém as temperaturas que se seguiram ao Big-Bang eram tão gigantescas — 10^{43} segundos depois do Big-Bang acredita-se que a temperatura fosse de cerca de 10^{32} graus Kelvin — que todos os campos agitavam-se violentamente.

Com a expansão e o resfriamento do universo, as densidades inicialmente enormes da matéria e da radiação caíram em escala progressiva, as vastas extensões do universo foram se tornando cada vez mais vazias e as ondulações dos campos foram se suavizando. Para a maioria dos campos, isso significou que os seus valores chegaram, em média, próximos a zero. Em algum momento, o valor de um campo particular pode agitar-se ligeiramente acima de zero (uma crista) e no momento seguinte ficar ligeiramente abaixo de zero (um vale), mas

em média o valor da maior parte dos campos converge para zero — o valor que de forma intuitiva associamos com a ausência ou o vazio.
É aqui que o campo de Higgs entra em cena. Trata-se de um tipo de campo que, segundo os pesquisadores, tinha propriedades semelhantes às dos outros campos na vigência das temperaturas avassaladoras que se seguiram ao Big-Bang: ele também flutuou imprevisivelmente para cima e para baixo. Mas os pesquisadores acreditam que (assim como o vapor condensa-se em água líquida com a queda da temperatura), quando a temperatura do universo caiu o suficiente, o campo de Higgs condensou-se em determinado valor *diferente de zero* por todo o espaço. Os físicos referem-se a isso como a formação de um *valor esperado no vácuo diferente de zero para o campo de Higgs* — mas para não abusar do jargão técnico, eu me referirei à formação de um *oceano de Higgs.*
É o tipo de coisa que aconteceria se uma rã caísse, como na figura 9.1a, em uma bacia de metal quente com uma porção de minhocas bem no centro. Inicialmente, a rã saltaria de um lado para o outro — para cima, para baixo, para a esquerda, para a direita —, em tentativas desesperadas de evitar queimar as pernas, e possivelmente ficaria longe das minhocas, ou nem saberia que elas estão ali. Mas à medida que a bacia se esfriasse, a rã iria se acalmando, já quase não pularia e deslizaria suavemente para o lugar que requer o menor esforço, no fundo da bacia. Lá, tendo chegado ao centro da bacia, ela por fim se encontraria com o seu jantar, como na figura 9.1b.

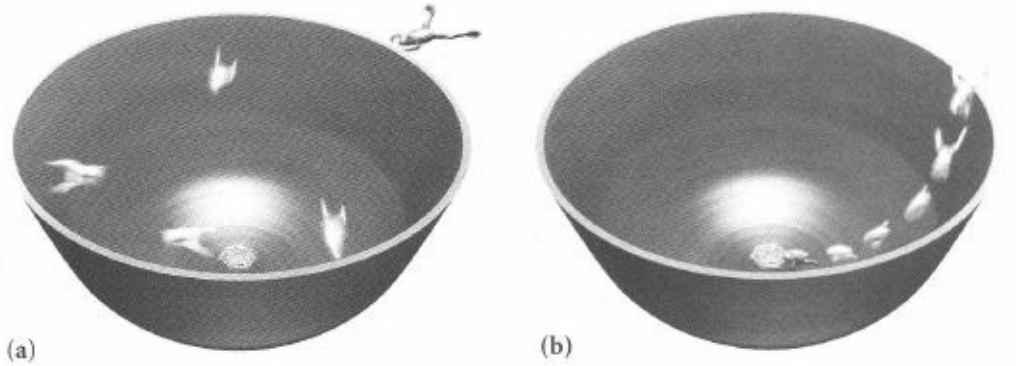


Figura 9.1. (*a*) *Uma rã que caia em uma bacia de metal quente saltará incessantemente para todos os lados.* (*b*) *Quando a bacia se esfria, a rã acalma-se, salta muito menos e desliza em direção ao centro da bacia.*

Mas se a bacia tivesse um formato diferente, como na figura 9.1c, as coisas se passariam de outra maneira. Imagine que, no começo, a bacia esteja novamente bem quente e que a porção de minhocas também continue no centro dela, só que, agora, sobre uma superfície mais alta. Se a rã caísse de novo na bacia, recomeçaria a saltar para um lado e para o outro, sem prestar atenção nos

petiscos colocados na superfície mais alta central. Em seguida, à medida que a bacia fosse se resfriando, a rã mais uma vez iria acalmar-se, reduzir os saltos e escorregar pelos lados côncavos e lisos da bacia. Mas o novo formato impediria que a rã chegasse ao centro. Ela deslizaria até o ponto mais fundo e aí ficaria, a certa distância das minhocas, como na figura 9.1 d.

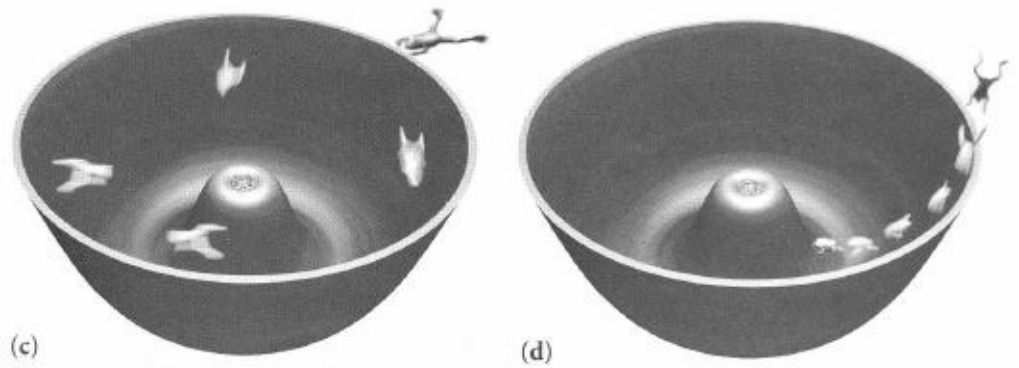


Figura 9.1. (*c*) *Tal como em* (*a*), *mas com uma bacia quente de formato diferente.* (*d*) *Tal como em* (*b*), *mas agora, quando a bacia se resfria, a rã desliza para o fundo, que fica a alguma distância do centro da bacia* (*onde estão as minhocas*).

Se imaginarmos que a distância entre a rã e a porção de minhocas representa o valor de um campo — quanto mais longe a rã esteja das minhocas, mais alto será o valor do campo — e que a altura em que está a rã representa a energia contida nesse valor do campo — quanto mais alto o lugar onde a rã esteja, tanto mais energia estará contida no campo —, o nosso exemplo captará bem o comportamento dos campos à medida que o universo se resfria. Quando o universo está quente, os campos saltam desbaratadamente de um valor para outro, assim como a rã salta de um lado para outro na bacia. Com o resfriamento do universo, os campos se "acalmam", saltam com menor frequência e intensidade e os seus valores deslizam para baixo, buscando os níveis menores de energia.

E aí está a coisa, tal como no exemplo da rã, existe a possibilidade de duas ocorrências qualitativamente diferentes. Se o formato da bacia de energia do campo — denominada *energia potencial* — for similar à da figura 9.1a, o valor do campo deslizará continuamente, por todo o espaço, até zero, o centro da bacia, assim como a rã desliza até a porção de minhocas. Mas se a energia potencial do campo assemelhar-se ao que aparece na figura 9.1c, o valor do campo não poderá chegar a zero, ao centro da bacia de energia. Tal como aconteceu com a rã, que deslizou até o ponto mais fundo — que está a uma distância diferente de zero da porção de minhocas —, também o valor do campo deslizará para o fundo — a uma distância *diferente de zero* do centro da bacia

—, o que significa que o campo terá um valor *diferente de zero.*[6] Este comportamento é característico dos campos de Higgs. Ao resfriar-se o universo, o valor do Higgs fica preso ao fundo de um vale e nunca alcança o zero. E como o que estamos descrevendo aconteceria de modo uniforme por todo o espaço, o universo estaria permeado de um campo de Higgs uniforme e diferente de zero — um oceano de Higgs.

A razão pela qual isso acontece esclarece uma peculiaridade fundamental dos campos de Higgs. À medida que uma região do espaço vai se tornando mais fria e vazia — uma vez que a matéria e a radiação vão ficando mais esparsas —, a energia nessa região vai ficando cada vez mais baixa. Levando essa situação ao limite, vê-se que o máximo de vacuidade de uma região é alcançado quando a sua energia está no nível mais baixo possível. Para os campos comuns que permeiam uma região do espaço, a sua contribuição energética é a menor possível quando o seu valor tenha deslizado até o centro da bacia, como na figura 9.1b. A sua energia cai a zero quando o seu valor é zero. Isso faz sentido, do ponto de vista intuitivo, uma vez que associamos o esvaziamento de uma região com o fato de todas as coisas estarem no nível zero, inclusive os valores dos campos.

Contudo as coisas são diferentes para os campos de Higgs. Na figura 9.1c, a rã só pode chegar à superfície mais alta central, e estar a uma distância *zero* da porção de minhocas, se tiver energia suficiente para saltar a partir do fundo do vale que o circunda. Assim também, um campo de Higgs só pode alcançar o centro da bacia e ter *valor zero* se tiver energia suficiente para alcançar a superfície mais alta central da bacia. Se, ao contrário, a rã tiver pouca ou nenhuma energia, ela deslizará para o fundo, como na figura 9.1 d — a uma distância *diferente de zero* da porção de minhocas. Da mesma forma, um campo de Higgs com pouca ou nenhuma energia também deslizará para o fundo — a uma distância diferente de zero do centro da bacia — e terá, portanto, valor *diferente de zero.*

Para forçar um campo de Higgs a ter valor zero — o valor que pareceria ser o mais próximo possível da remoção completa do campo naquela região, o mais próximo possível de um vazio total —, seria necessário *aumentar* a sua energia e, do ponto de vista energético, a região do espaço não estaria no nível mais baixo possível de vacuidade. Ainda que pareça contraditório, a remoção do campo de Higgs — ou seja, a redução do seu valor a zero — leva a que se acrescente energia à região. Em uma analogia simples, pense em um desses fones de escuta com redução de ruídos, que produzem ondas de som que cancelam as outras ondas que provêm do ambiente em direção aos seus ouvidos.

Se os fones funcionarem perfeitamente, você escutará o silêncio quando eles produzirem sons e escutará os ruídos do ambiente quando eles estiverem desligados. Os pesquisadores chegaram à conclusão de que, assim como se ouve menos quando os fones de ouvido estão inundados pelos sons que estão programados para produzir, também o espaço frio e vazio contém o menor nível possível de energia — o estado mais vazio possível — quando inundado por um oceano de campos de Higgs. Os cientistas referem-se a esse estado de máxima vacuidade possível do espaço como o *vácuo*, e dessa forma aprendemos que o vácuo pode estar, na verdade, permeado por um campo de Higgs uniforme.

O processo pelo qual o campo de Higgs assume um valor diferente de zero em todo o espaço — formando um oceano de Higgs — denomina-se *quebra espontânea da simetria* , (a terminologia não é particularmente importante, mas, resumidamente, eis a sua origem. O vale que aparece nas figuras 9.1c e 9.ld tem uma forma simétrica — circular — em que cada ponto está em igualdade com todos os demais (cada ponto denota um valor do campo de Higgs para o menor nível possível de energia). Contudo, quando o valor do campo de Higgs desliza para o fundo da fôrma, ele termina por estabelecer-se em *um ponto* particular do vale circular e, ao fazê-lo, seleciona "espontaneamente" uma localização do vale como especial. Assim, os pontos do vale já não estão em pé de igualdade, uma vez que só um deles foi escolhido e por isso o campo de Higgs "quebra" a simetria que existia entre os diferentes pontos. Em síntese, portanto, o processo pelo qual o campo de Higgs desliza para determinado valor diferente de zero no fundo do vale é chamado *quebra espontânea da simetria.* Mais adiante descreveremos aspectos mais tangíveis da redução da simetria associada à formação de um oceano de Higgs.[7]) uma das ideias mais importantes surgidas na física teórica nas últimas décadas do século XX. Vejamos por quê.

O OCEANO DE HIGGS E A ORIGEM DA MASSA

Se um campo de Higgs tiver um valor diferente de zero — se estivermos todos imersos em um oceano de campos de Higgs —, será que não deveríamos senti-lo, ou vê-lo, ou de algum modo ter consciência da sua existência? Claro que sim. E a teoria moderna afirma que é isso o que acontece. Mexa o seu braço para a frente e para trás. Você sente os seus músculos trabalhando e levando a massa do seu braço para um lado e para o outro e de volta à posição inicial. Se você pegar uma bola de boliche, os seus músculos terão mais trabalho, porque quanto maior for a massa a ser movida, maior será o esforço a ser feito. Neste sentido, a massa de um objeto representa a resistência que ele oferece ao movimento. Para sermos mais exatos, a massa representa a resistência de um objeto às mudanças no seu estado de movimento — às acelerações —, tais como ir para a frente, depois para trás e depois para a frente de novo. Mas de onde vem essa resistência às acelerações? Ou então, na língua dos físicos, a que se deve a inércia dos objetos?

Nos capítulos 2 e 3, encontramos diversas proposições que Newton, Mach e Einstein formularam como respostas *parciais* a esta questão. Aqueles cientistas

tentaram especificar um padrão de repouso com relação ao qual as acelerações, como as que aparecem no experimento do balde, pudessem ser definidas. Para Newton, esse padrão era o espaço absoluto; para Mach, eram as estrelas distantes; e para Einstein, inicialmente era o espaço-tempo absoluto (na relatividade especial) e depois o campo gravitacional (na relatividade geral). Mas depois de delinear um padrão de repouso e, em particular, depois de especificar uma referência para a definição das acelerações, nenhum deles deu o passo seguinte, no sentido de explicar *por que* os objetos resistem às acelerações. Assim, nenhum deles especificou um mecanismo pelo qual o objeto adquire a sua massa — a sua inércia —, atributo que luta contra a aceleração. Com o campo de Higgs, os cientistas têm agora a sugestão de uma resposta.

Os átomos que constituem o seu braço e a bola de boliche que você pegou são todos feitos de prótons, nêutrons e elétrons. No final da década de 1960, os pesquisadores revelaram que os prótons e os nêutrons são compostos por três partículas menores, conhecidas como quarks. Assim, quando você balança o braço para a frente e para trás, está balançando todos os quarks e elétrons que o constituem para a frente e para trás, e isso é o que nos dá a ideia que nos importa aqui. O oceano de Higgs em que a teoria moderna afirma estarmos imersos *interage* com os quarks e elétrons: resiste às suas acelerações, assim como um pote de melado resiste ao movimento ascendente de uma bola de pingue-pongue colocada no fundo. Essa resistência ao movimento das partículas componentes contribui para o que você percebe como a massa do seu braço e da bola de boliche que você joga, ou como a massa de um objeto que você esteja lançando, ou como a massa de todo o seu corpo, quando você acelera em direção à linha de chegada em uma corrida de cem metros rasos. Portanto, nós *sentimos* o oceano de Higgs. As forças que acionamos milhares de vezes por dia com o fim de modificar a velocidade de um ou outro objeto — imprimir-lhe uma aceleração — são forças que lutam contra a resistência do oceano de Higgs.[8]

A metáfora do melado capta bem alguns aspectos do oceano de Higgs. Para acelerar uma bola de pingue-pongue submersa em um pote de melado, seria necessário empurrá-la com *muito* mais força do que quando se está em um jogo de pingue-pongue — ela resistirá às tentativas de modificar a sua velocidade mais intensamente do que o faria se não estivesse mergulhada no melado, portanto se comporta como se a submersão no pote de melado aumentasse a sua massa. Do mesmo modo, em consequência das suas interações com o onipresente oceano de Higgs, as partículas elementares resistem às tentativas de modificar as suas velocidades — elas adquirem massa. Mas a metáfora do melado tem três aspectos inadequados que é preciso considerar.

Em primeiro lugar, é sempre possível retirar a bola de pingue-pongue de dentro do melado e ver como a sua resistência à aceleração diminui. Isso não acontece com as partículas. Acreditamos que o oceano de Higgs preenche hoje a totalidade do espaço, não havendo, portanto, como retirar as partículas da sua influência. Todas as partículas têm as massas que têm independentemente de onde estejam. Em segundo lugar, o melado resiste a qualquer movimento, enquanto o campo de Higgs resiste apenas ao movimento acelerado. Ao contrário de uma bola de pingue-pongue que se move dentro do melado, uma partícula que se move através do espaço exterior a velocidade constante não seria retardada pela "fricção" com o oceano de Higgs e o seu movimento continuaria inalterado. É só quando tentamos aumentar ou diminuir a velocidade da partícula que o oceano de Higgs faz sentir a sua presença, em razão da força que temos de exercer. Em terceiro lugar, quando se trata da matéria comum, composta de conglomerados de partículas fundamentais, há uma outra fonte importante de massa. Os quarks que constituem os prótons e os nêutrons são mantidos juntos pela força nuclear forte: partículas de glúons (as partículas mensageiras da força forte) circulam entre os quarks, mantendo-os "colados" para formar um conjunto. Experimentos mostram que esses glúons têm alta energia e como $E = mc^2$ nos diz que a energia (E) pode manifestar-se como massa (m), vemos que os glúons no interior dos prótons e nêutrons contribuem com uma fração significativa da massa total dessas partículas. Assim, uma imagem mais precisa nos leva a pensar que a força de retardamento do oceano de Higgs, comparável à resistência oferecida pelo melado, dá origem à massa das partículas *fundamentais*, como os elétrons e os quarks, mas quando essas partículas se combinam para formar partículas compostas, como os prótons, os nêutrons e os átomos, outras fontes de massa (bem compreendidas) também entram em ação.

Os físicos supõem que o grau de resistência do oceano de Higgs à aceleração das partículas varia segundo o tipo de partícula. Isso é essencial, porque todos os tipos conhecidos de partículas fundamentais têm massas diferentes. Os prótons e os nêutrons, por exemplo, são compostos por dois tipos de quarks (denominados *quark up* e *quark down.* Um próton é formado por dois *ups* e um *down;* um nêutron é formado por dois *downs* e um *up),* mas os pesquisadores descobriram, usando aceleradores de partículas ao longo dos anos, quatro outros tipos de quarks, cujas massas apresentam grandes variações, de 0,0047 a 189 vezes a massa do próton. Os físicos creem que a explicação para essa variedade de massas está em que os diferentes tipos de partícula interagem com o oceano de Higgs em diferentes intensidades. Se uma partícula se move suavemente através

do oceano de Higgs com pouca ou nenhuma interação, haverá pouca ou nenhuma resistência e a partícula terá pouca ou nenhuma massa. O fóton é um bom exemplo. Os fótons passam pelo oceano de Higgs sem encontrar resistência e por isso não têm massa. Se, ao contrário, uma partícula interagir significativamente com o oceano de Higgs, ela terá massa mais alta. O quark mais pesado (denominado “quark top”), que tem massa 350 mil maior do que a do elétron, interage com o oceano de Higgs em uma intensidade 350 mil vezes maior do que a do elétron. Ele tem maior dificuldade para acelerar no oceano de Higgs e é por isso que a sua massa é maior. Se compararmos a massa de uma partícula à fama de uma pessoa, o oceano de Higgs será como os *paparazzi:* os desconhecidos passam facilmente pelo enxame dos fotógrafos, mas as estrelas de cinema e os políticos famosos têm de esforçar-se muito mais para chegar aos seus destinos.[9]

Isso nos dá um bom esquema para pensarmos por que as partículas têm massas diferentes umas das outras, mas, até hoje, ainda não temos uma explicação fundamental para a maneira exata pela qual cada uma das partículas conhecidas interage com o oceano de Higgs. Em consequência, não há uma explicação fundamental para as massas específicas que cada uma delas revela nos experimentos realizados. No entanto, a maior parte dos cientistas acredita que, se não fosse pelo oceano de Higgs, *todas as partículas fundamentais seriam como o fóton e não teriam massa alguma.* Com efeito, como já veremos, talvez as coisas tenham sido assim nos primeiros momentos do universo.

A UNIFICAÇÃO E O RESFRIAMENTO DO UNIVERSO

Enquanto o vapor se condensa em água líquida a cem graus Celsius e a água líquida se congela a zero grau Celsius, estudos teóricos revelaram que o campo de Higgs se condensa, em um valor diferente de zero, a 1 milhão de bilhões (10^{15}) de graus. Essa temperatura é quase 100 milhões de vezes mais alta do que a do interior do Sol e é a temperatura para a qual se acredita o universo tenha baixado um centésimo de bilionésimo (10^{-11}) de segundo depois do Big-Bang. Antes de 10^{11} segundos depois do Big-Bang, o campo de Higgs flutuava para cima e para baixo, mas tinha o valor médio de zero. Como acontece com a água a temperaturas superiores a cem graus Celsius, o oceano de Higgs não podia formar-se naquelas temperaturas porque elas eram demasiado elevadas. O oceano se evaporaria imediatamente. E sem um oceano de Higgs não havia resistência às partículas que sofressem aceleração (os *paparazzi*

desapareceriam), o que implica que todas as partículas conhecidas (elétrons, quarks up, quarks down e as demais) teriam a mesma massa: zero.

Essa observação explica em parte por que a formação do oceano de Higgs é descrita como uma transição de fase cosmológica. Nas transições de fase do vapor para a água e da água para o gelo acontecem duas coisas essenciais. Há uma significativa mudança qualitativa de aparência e a transição de fase é acompanhada por uma redução da simetria. As mesmas duas características são observadas na formação do oceano de Higgs. Primeiro, houve uma significativa mudança qualitativa: os tipos de partículas que não tinham massa repentinamente adquiriram massas diferentes de zero — as massas que esses tipos de partículas têm na realidade. Segundo, essa mudança foi acompanhada por uma redução da simetria: antes da formação do oceano de Higgs, todas as partículas tinham a mesma massa — zero — em um estado de coisas altamente simétrico. Se se trocassem as massas de uma partícula com outra não se notaria a diferença, uma vez que todas as massas eram iguais. Mas depois da condensação do campo de Higgs, as massas das partículas se transmutaram em valores distintos e diferentes de zero, com o que a simetria entre as massas se perdeu.

Na verdade, a redução da simetria que decorre da formação do oceano de Higgs é ainda mais extensa. Acima de 10^{15} graus, quando o campo de Higgs ainda não se havia condensado, não só as partículas de matéria de todos os tipos não tinham massa, mas também, em razão da ausência da resistência causada pelo oceano de Higgs, as partículas de força de todos os tipos tampouco tinham massa. (Hoje, as partículas mensageiras W e Z, da força nuclear fraca, têm massas que são de 86 a 97 vezes maiores do que a do próton.) E como foi originalmente descoberto, na década de 1960, por Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Abdus Saiam, a ausência de massa de todas as partículas de força estava acompanhada por outra simetria fantasticamente bela.

No final do século XIX, Maxwell percebeu que a eletricidade e o magnetismo, apesar de terem sido considerados forças completamente separadas, são na realidade facetas diferentes de uma mesma força — a força eletromagnética (veja o capítulo 3). A sua obra demonstrou que a eletricidade e o magnetismo completam-se mutuamente; são o *yin* e o *yang* de um todo mais simétrico e mais unificado. Glashow, Saiam e Weinberg descobriram o capítulo seguinte dessa história de unificação. Não só perceberam que, antes da formação do oceano de Higgs, todas as partículas de força tinham a mesma massa — zero —, mas também que os fótons e as partículas W e Z eram essencialmente idênticas em todos os demais aspectos.[10] Assim como um floco de neve não é afetado pelas rotações que trocam as posições das suas pontas, os processos físicos, na ausência do oceano de Higgs, não seriam afetados por uma troca entre as

partículas das forças eletromagnética e nuclear fraca — trocas entre fótons e partículas W e Z. E da mesma forma como essa insensibilidade do floco de neve às rotações reflete uma simetria (a simetria rotacional), a insensibilidade dessas partículas de força à troca reflete também uma simetria, que, por razões técnicas, denomina-se *simetria de calibre.* Isso tem implicações profundas. Como essas partículas transmitem as suas respectivas forças — são as mensageiras das suas forças —, a simetria existente entre elas significa a existência de uma simetria entre as próprias forças. Portanto, a temperaturas suficientemente altas, temperaturas que vaporizariam o vácuo do campo de Higgs de hoje, não há distinção entre a força nuclear fraca e a força eletromagnética. Isso quer dizer que a temperaturas suficientemente altas, o oceano de Higgs se evapora, e quando isso acontece, a distinção entre a força nuclear fraca e a força eletromagnética evapora-se também.

Glashow, Weinberg e Saiam ampliaram a descoberta secular de Maxwell mostrando que a força eletromagnética e a força nuclear fraca são, na verdade, parte de uma mesma força. Eles *unificaram* a descrição dessas duas forças no que hoje é conhecido como *a força eletrofraca.*

A simetria entre essas duas forças não é visível hoje porque, com o resfriamento do universo, formou-se o oceano de Higgs e — o que é vital — os fótons e as partículas W e Z interagem com o campo de Higgs condensado de maneiras diferentes. Os fótons passam pelo oceano de Higgs com a mesma facilidade com que desconhecidos aspirantes ao estrelato passam pelos *paparazzi* e permanecem sem massa. As partículas W e Z, contudo, têm a sua passagem retardada, como Bill Clinton e Madonna, e adquirem massas que são respectivamente 86 e 97 vezes maiores do que a do próton. (Nota: esta metáfora não tem correspondência de escala.) Essa é a razão por que as forças eletromagnética e nuclear fraca parecem tão diferentes no mundo em que vivemos. A simetria que havia entre eles “quebrou-se” e ficou obscurecida pelo oceano de Higgs.

Esse resultado é verdadeiramente assombroso. Duas forças que parecem muito diferentes nas temperaturas atuais — a força eletromagnética, responsável pela luz, pela eletricidade e pela atração magnética, e a força nuclear fraca, responsável pela desintegração radioativa — são partes fundamentais de uma mesma força e só parecem ser diferentes porque o campo de Higgs diferente de zero obscurece a simetria entre elas. Assim, o que normalmente consideramos como espaço vazio — o vácuo, o nada — desempenha um papel central na determinação da aparência atual das coisas. Só com a vaporização do vácuo, com a elevação da temperatura a níveis tão altos que o campo de Higgs se

evapora — ou seja, assume um valor médio igual a zero em todo o espaço — é que a simetria completa das leis da natureza se torna perceptível.
Quando Glashow, Weinberg e Saiam estavam desenvolvendo essas ideias, as partículas W e Z ainda não haviam sido descobertas experimentalmente. Foi a profunda fé que aqueles cientistas depositavam no poder da teoria e na beleza da simetria que lhes deu confiança para seguir adiante. A sua coragem mostrou-se bem fundamentada. Com o tempo, as partículas W e Z foram descobertas e a teoria eletrofraca foi confirmada experimentalmente. Glashow, Weinberg e Saiam buscaram ver além das aparências superficiais e enfrentaram a névoa escura do nada para poder revelar uma simetria profunda e sutil que liga duas das quatro forças da natureza. E ganharam o Prêmio Nobel de 1979 por ter logrado a unificação da força nuclear fraca e do eletromagnetismo.

A GRANDE UNIFICAÇÃO

No meu primeiro ano na universidade, eu ia muitas vezes conversar com o meu orientador, o físico Howard Georgi. Eu nunca tinha muito a dizer, mas isso não importava. Sempre havia algo que Georgi estava interessado em compartilhar com os seus alunos. Em uma ocasião particular, Georgi estava especialmente ativo e falou durante uma hora, enquanto enchia sucessivas vezes o quadro-negro com símbolos e equações. Eu balançava a cabeça o tempo todo, com entusiasmo, mas, francamente, não entendi quase nada. Anos depois percebi que Georgi estava relatando para mim os seus planos para testar uma descoberta que ele fizera e que se chamava *a grande unificação.*
A grande unificação enfrenta uma questão que se segue naturalmente ao sucesso da unificação eletrofraca: se duas das forças da natureza faziam parte de um todo unificado no universo primordial, não poderia ser que, a temperaturas ainda mais altas, em tempos ainda mais próximos ao zero da origem, as distinções entre três, ou mesmo entre as quatro forças, também se evaporassem, produzindo uma simetria ainda maior? Isso traz a interessante possibilidade de que poderia haver uma única força fundamental da natureza, a qual, através de uma série de transições de fase cosmológicas, cristalizou-se nas quatro forças aparentemente diferentes que conhecemos hoje. Em 1974, Georgi e Glashow expuseram a primeira teoria que avançou no rumo desse objetivo da unidade total. A *teoria da grande unificação*, ao lado de ensinamentos posteriores de Georgi, Helen Quinn e Weinberg, sugeria que três das quatro forças — a forte, a fraca e a eletromagnética — faziam parte de uma única força unificada quando a temperatura estava acima de 10 bilhões de bilhões de bilhões (10^{28}) de graus —

uns mil bilhões de bilhões de vezes mais alta do que a que existe no centro do Sol — condições extremas, que vigoravam antes de 10^{-35} segundos depois do Big-Bang. Aqueles cientistas sugeriam que os fótons, os glúons da força forte e as partículas W e Z poderiam ser livremente trocadas umas com as outras — em uma simetria de calibre mais robusta do que a da teoria eletrofraca — sem nenhuma consequência observável. Georgi e Glashow sugeriam, assim, que naqueles níveis altos de temperatura e energia havia simetria completa entre as três partículas de força não gravitacionais e, portanto, simetria completa entre as três forças não gravitacionais."

A teoria da grande unificação de Glashow e Georgi explicava que não vemos essa simetria no mundo à nossa volta — a força nuclear forte, que mantém os prótons e os nêutrons estreitamente unidos nos átomos, parece ser completamente separada da força fraca e da eletromagnética — porque, quando a temperatura caiu abaixo de 10^{28} graus, uma outra espécie de campo de Higgs entrou em cena. Esse campo de Higgs denomina-se *Higgs da grande unificação.* (Sempre que necessário, para evitar confusões, o campo de Higgs envolvido na unificação eletrofraca denomina-se *Higgs eletrofraco.)* Assim como o seu primo eletrofraco, o Higgs da grande unificação flutuava freneticamente acima de 10^{28} graus, mas os cálculos sugerem que ele se condensou em um valor diferente de zero quando a temperatura do universo caiu abaixo daquele nível. E, também como no caso do Higgs eletrofraco, quando se formou esse oceano de Higgs da grande unificação, o universo passou por uma transição de fase, com a respectiva redução da simetria. Neste caso, como o oceano de Higgs da grande unificação produz sobre os glúons um efeito diferente daquele que gera sobre as outras partículas de força, a força forte separou-se da eletrofraca, dando lugar a duas forças não gravitacionais diferentes onde antes havia apenas uma. Uma fração de segundo e uma queda de bilhões e bilhões de graus depois, o Higgs eletrofraco condensou-se, levando as forças fraca e eletromagnética a separar-se também.

Apesar de ser uma bela ideia, a grande unificação (ao contrário da unificação eletrofraca) ainda não foi confirmada por experimentos. Inversamente, a proposição original de Georgi e Glashow previa que um traço, uma implicação residual da simetria inicial do universo, deveria ser observável hoje, permitindo que os prótons, ocasionalmente, se transmutassem em outros tipos de partículas (como antielétrons e partículas conhecidas como píons). Mas depois de anos de pesquisas exaustivas em busca dessa *desintegração do próton*, em sofisticados experimentos subterrâneos — o experimento que Georgi me descrevera excitadamente no encontro que mencionei —, ela nunca foi documentada. Isso excluiu de considerações à proposição de Georgi e Glashow. Desde então, contudo, os físicos desenvolveram variações daquele modelo original que não

estão excluídas pelos experimentos realizados. Mas nenhuma dessas alternativas tampouco foi confirmada.

Há consenso entre os cientistas de que a grande unificação é uma das excelentes ideias ainda não realizadas da física das partículas. Como a unificação e as transições de fase cosmológicas mostraram enorme vigor nos casos do eletromagnetismo e da força nuclear fraca, muitos creem que apenas uma questão de tempo nos separa de reunir as outras forças a esse esquema unificado. Como veremos no capítulo 12, avanços significativos nesse sentido foram feitos recentemente por meio de um enfoque diferente — a *teoria das supercordas*—, o qual colocou *todas* as forças, inclusive a gravidade, pela primeira vez, em uma teoria unificada, embora seja necessário assinalar que ela ainda se encontra, neste momento, em estado de pleno e vigoroso desenvolvimento. O que já está claro, no entanto, mesmo considerando somente a teoria eletrofraca, é que o universo que vemos hoje exibe apenas vestígios da resplandecente simetria do universo primordial.

O RETORNO DO ÉTER

O conceito de quebra de simetria e a sua realização por meio do campo de Higgs eletrofraco desempenham claramente um papel fundamental na física das partículas e na cosmologia. Mas a discussão pode ter deixado você pensando o seguinte: se o oceano de Higgs é algo invisível que permeia o que normalmente denominamos espaço vazio, não será ele uma nova encarnação da velha e desacreditada noção do éter? A resposta é: sim e não. E a explicação é: sim, de fato, em certo sentido, o oceano de Higgs tem um cheiro de éter.

Como o éter, ele permeia o espaço, envolve todas as coisas, infiltra-se em todos os lugares e, como característica inalienável do espaço vazio (a menos que consigamos reaquecer o universo a uma temperatura superior a 10^{15} graus, algo que não nos é possível fazer), redefine o conceito que temos do nada. Mas, ao contrário do éter original, que foi apresentado como um meio invisível que transporta as ondas de luz, por analogia ao modo pelo qual o ar transporta ondas de som, o oceano de Higgs não tem nada a ver com o movimento da luz. Não afeta, de modo algum, a velocidade da luz e, por conseguinte, os experimentos que cem anos atrás refutaram a existência do éter por meio do estudo do movimento da luz não têm nenhuma implicação para com o oceano de Higgs.

Além disso, como o oceano de Higgs não produz efeito algum sobre o que quer que se mova a velocidade constante, ele não seleciona nenhum ponto de vista observacional como especial, como o éter fazia. Em vez disso, mesmo com o oceano de Higgs, todos os observadores que estejam em velocidade constante

mantêm-se em completo pé de igualdade, razão por que o oceano de Higgs não conflita com a relatividade especial. Evidentemente, essas observações não provam a existência do oceano de Higgs. Mostram, sim, que, apesar de certas similaridades com o éter, os campos de Higgs não estão em conflito com nenhuma teoria e nenhum experimento.

Mas se for verdade que existe um oceano de campo de Higgs, ele deveria produzir outras consequências que possam ser testadas experimentalmente nos próximos anos. Como um primeiro exemplo, assim como os campos eletromagnéticos são compostos por fótons, os campos de Higgs são também compostos por partículas denominadas *partículas de Higgs*, o que não chega a ser uma originalidade. Cálculos teóricos demonstraram que, se existir um oceano de Higgs que permeia o espaço, as partículas de Higgs deveríam estar entre os produtos das colisões a altas energias que acontecerão no Grande Colisor de Hadrons (Large Hadron Collider), um gigantesco acelerador de partículas em construção no CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaires), em Genebra, na Suíça, que deverá entrar em funcionamento em 2007. Em linhas gerais, as colisões frontais entre prótons a energias altíssimas poderão deslocar uma partícula de Higgs do oceano de Higgs, assim como colisões submarinas a alta energia podem expelir moléculas de H_2O do Atlântico. No devido tempo, esses experimentos poderão ajudar-nos a determinar se essa forma moderna de éter existe realmente ou se terá o mesmo destino da sua antecessora. Essa é uma questão crucial a ser esclarecida, porque, como vimos, os campos de Higgs condensados desempenham um papel essencial na nossa formulação atual da física fundamental.

Se o oceano de Higgs não for encontrado, isso tornará necessária uma revisão substancial de um esquema teórico que tem estado em vigor por mais de trinta anos. Mas se ele for encontrado, esse evento será um triunfo para a física teórica: ele confirmará o poder que tem a simetria para dar a forma correta ao nosso raciocínio matemático nas nossas incursões em terreno desconhecido. Além disso, a confirmação da existência do oceano de Higgs teria ainda duas outras implicações. Em primeiro lugar, proporcionaria uma comprovação direta de uma era antiga em que diversos aspectos do universo atual que nos parecem distintos um do outro faziam parte de uma mesma totalidade simétrica. Em segundo lugar, deixaria claro que a nossa noção intuitiva de espaço vazio — o que fica se removermos tudo o que pudermos remover de uma região, de modo que a sua energia e a sua temperatura alcancem o nível mais baixo possível — tem cometido o pecado da ingenuidade por muito tempo. Nem o mais vazio dos espaços tem por que envolver um estado de ausência absoluta de tudo. Sem invocarmos as coisas espirituais, portanto, bem poderemos renovar o

pensamento de Henry More (capítulo 2), na busca científica da compreensão do espaço e do tempo. Para More, o conceito usual de espaço vazio não tinha sentido porque o espaço está sempre repleto do espírito divino. Para nós, o conceito usual de espaço vazio pode ser igualmente esquivo, uma vez que o espaço vazio ao qual estamos acostumados pode estar sempre repleto de um oceano de campo de Higgs.

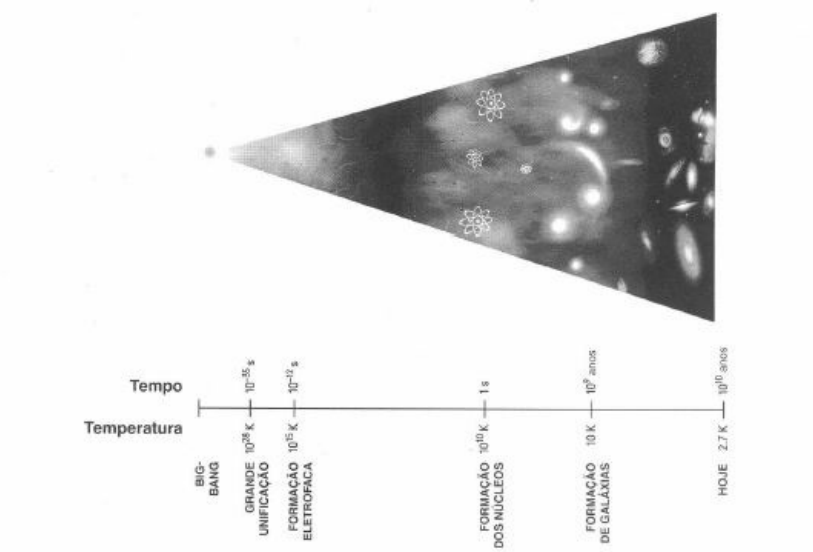


Figura 9.2. *Linha de tempo que ilustra esquematicamente o modelo cosmológico padrão do Big-Bang.*

A ENTROPIA E O TEMPO

A linha de tempo da figura 9.2 coloca as transições de fase que discutimos em um contexto histórico e nos proporciona, assim, um melhor enfoque para a sequência de eventos pelos quais o universo passou desde o Big-Bang até o ovo que caiu da mesa da sua cozinha. Mas há informações cruciais que ainda estão escondidas na parte difusa da figura. Lembre-se de que saber como as coisas começaram — a ordem das páginas de *Guerra e paz*, as moléculas pressurizadas de dióxido de carbono na garrafa de refrigerante, o estado do universo quando do Big-Bang — é essencial para a compreensão da sua evolução. A entropia só pode aumentar se houver lugar para esse aumento. A entropia só pode aumentar se for inicialmente baixa. Se as páginas de *Guerra e Paz* estiverem totalmente embaralhadas no começo, atirá-las para cima apenas as conservará embaralhadas. Se o universo tivesse começado em um estado totalmente desordenado e com entropia alta, a evolução cósmica posterior apenas manteria a desordem.

A história ilustrada na figura 9.2 não é, evidentemente, a crônica de uma desordem contínua e imutável. Ainda que algumas simetrias tenham se perdido nas transições de fase cósmicas, a entropia global do universo aumentou de forma progressiva. No começo, portanto, o universo deve ter sido altamente ordenado. Isso nos permite associar a direção do tempo “para a frente” com a direção da entropia crescente, mas ainda precisamos encontrar uma explicação para a entropia incrivelmente baixa — ou seja, para o estado de uniformidade incrivelmente alto — do universo recém-nascido. Isso requer que recuemos ainda mais no tempo, para buscar compreender melhor o que aconteceu no início — durante a parte difusa da figura 9.2 —, tarefa à qual nos dedicaremos agora.

10. A desconstrução do Big-Bang

O que foi que explodiu?

É um erro comum pensar que o Big-Bang é uma teoria sobre as origens cósmicas. Não é verdade. É uma teoria que foi parcialmente descrita nos dois capítulos anteriores e que delineia a evolução cósmica a partir de uma fração mínima de segundo depois do acontecimento que pôs o universo em existência. Mas ela *não diz absolutamente nada sobre o tempo zero propriamente dito.* E como, de acordo com a teoria do Big-Bang, o que se supõe ser a ocorrência inicial é uma explosão, o Big-Bang deixa de fora o *bang.* Não nos diz nada sobre o que foi que explodiu, por que explodiu, como explodiu, nem francamente se chegou a haver mesmo uma explosão.[1] Pensando bem, o Big-Bang nos oferece, na verdade, um tremendo quebra-cabeça. Nas condições de enorme densidade de matéria e de energia que caracterizam os primeiros momentos do universo, a gravidade era claramente a força dominante. Mas a gravidade é uma força *atrativa.* Ela impele os objetos a aproximar-se mutuamente. O que, então, terá sido responsável pela força *centrífuga* que levou o espaço a expandir-se? Aparentemente, uma força repulsiva muito poderosa deve ter desempenhado um papel essencial no momento do *bang*, mas que força é essa, dentre as que existem na natureza?

Por muitas décadas essa pergunta, a mais básica de todas, ficou sem resposta. Então, em 1980, uma velha observação de Einstein reapareceu com nova roupagem e deu lugar ao que conhecemos como cosmologia inflacionária. E com essa descoberta finalmente pôde-se dar o crédito à força que o merece: *a gravidade*. Não sem surpresa, os físicos perceberam que, em determinadas condições ambientais, a gravidade pode ser repulsiva e, segundo a teoria, essas condições propícias prevaleceram durante os primeiros momentos da história cósmica. Em um intervalo de tempo que faria um nanossegundo parecer uma eternidade, o universo primitivo proporcionou um ambiente em que a gravidade exerceu o seu lado repulsivo com enorme vigor, afastando todas as regiões do espaço umas das outras com extrema ferocidade. A força repulsiva da gravidade foi tão poderosa que a explosão não só se revelou, mas mostrou ter tido uma intensidade muito maior do que qualquer um de nós havia antes imaginado. Na cosmologia inflacionária, o universo primitivo expandiu-se com um fator incrivelmente gigantesco, em comparação com o que previa a teoria-padrão do

Big-Bang, e isso ampliou a nossa visão cosmológica de tal maneira que empalideceu a própria constatação, a que chegamos no século passado, de que a nossa galáxia é apenas uma entre centenas de bilhões de outras.[2]
Neste capítulo e no próximo, discutiremos a cosmologia inflacionária. Veremos que ela propicia uma "saída" para o modelo-padrão do Big-Bang, oferecendo modificações essenciais para as assertivas da teoria-padrão a respeito dos eventos que ocorreram nos primeiros momentos do universo. Ao fazê-lo, a cosmologia inflacionária resolveu questões cruciais, que ficavam fora do alcance da teoria-padrão, fez uma série de previsões que estão sendo e que continuarão a ser testadas experimentalmente no futuro próximo e, o que talvez seja mais interessante ainda, revelou como os processos quânticos puderam, por meio da expansão cosmológica, imprimir pequeníssimas rugas no tecido do espaço que deixaram uma marca que ainda é visível no céu das nossas noites. Além de tudo isso, a cosmologia inflacionária nos permite um avanço significativo na compreensão da maneira pela qual o universo adquiriu uma entropia tão baixa, o que nos aproxima mais do que nunca de uma explicação para a seta do tempo.

EINSTEIN E A GRAVIDADE REPULSIVA

Depois de dar os toques finais na relatividade geral em 1915, Einstein aplicou as suas novas equações para a gravidade aos mais diversos problemas.
Um deles era o velho quebra-cabeça que as equações de Newton não conseguiam explicar — a chamada precessão do periélio da órbita de Mercúrio, ou seja, o fato observado de que aquele planeta não percorre sempre o mesmo caminho cada vez que gira ao redor do Sol. Em vez disso, cada órbita subsequente apresenta uma pequena modificação com relação à anterior. Quando Einstein refez os cálculos orbitais com as suas novas equações, logrou calcular de maneira precisa a precessão observada para o periélio — e achou o resultado tão sensacional que teve palpitações cardíacas.[3] Ele também aplicou a relatividade geral à questão de determinar o desvio sofrido pela luz emitida por uma estrela distante em razão da curvatura do espaço-tempo que afeta o raio de luz quando ele passa próximo ao Sol no seu caminho em direção à Terra. Em 1919, duas equipes de astrônomos — uma acampada na ilha do Príncipe, na costa ocidental da África, e a outra no Brasil — testaram a sua previsão durante um eclipse solar, observando a luz proveniente de uma estrela que, em seu caminho para a Terra, tangenciava o Sol (esses são os raios de luz mais afetados pela presença do Sol e é só durante um eclipse que se tornam visíveis) e comparando essas observações com fotografias tomadas previamente, quando, devido ao movimento da Terra em sua órbita, a estrela estava em outra posição

com relação ao Sol, o que elimina praticamente o impacto da gravidade solar sobre a trajetória do raio de luz. A comparação revelou um ângulo de encurvamento que confirmou novamente os cálculos de Einstein. Quando a imprensa repercutiu o fato, Einstein tornou-se uma celebridade mundial da noite para o dia. Com a relatividade geral, diga-se logo, Einstein estava na crista da onda.

Apesar dos crescentes êxitos da relatividade geral, mesmo anos depois de ter empregado a sua teoria para resolver o maior de todos os desafios — entender o universo como um todo —, Einstein continuava a recusar-se, com determinação, a aceitar a resposta que surgia da matemática. Antes mesmo do trabalho de Friedmann e Lemaítre, discutido no capítulo 8, o próprio Einstein percebera que as equações da relatividade geral mostravam que o universo não podia ser estático, pois o tecido do espaço poderia esticar-se ou encolher, mas não poderia manter um tamanho fixo. Isso sugeria que o universo poderia ter tido um começo específico, quando o tecido estaria em um estado de compressão máxima, e poderia também ter um fim específico. Teimosamente, Einstein empacou diante dessa consequência da relatividade geral porque ele, assim como todos os demais, "sabia" que o universo era eterno, fixo e imutável na escala máxima. Assim, apesar da beleza e do sucesso da relatividade geral, Einstein reabriu o caderno e buscou uma modificação das equações para compatibilizá-las com a ideia de um universo que se comportasse de acordo com o preconceito vigente. Não precisou de muito tempo. Em 1917, ele alcançou o objetivo e introduziu um novo termo nas equações da relatividade geral: a *constante cosmológica*.[4]

A estratégia que levou Einstein a introduzir essa modificação não é difícil de compreender. A força gravitacional entre dois objetos, sejam eles bolas de tênis, planetas, estrelas, cometas ou qualquer outra coisa, é atrativa e, por conseguinte, a gravidade age constantemente no sentido de aproximar os objetos uns dos outros. A atração gravitacional entre a Terra e um dançarino que dá um salto no ar diminui a velocidade do movimento do dançarino, que alcança uma altura máxima e em seguida começa a cair. Se o coreógrafo quiser que o dançarino flutue no ar em uma configuração estática, será necessário que haja uma força repulsiva entre o dançarino e a Terra que contrabalance exatamente a atração gravitacional: a configuração estática só pode ocorrer se a atração e a repulsão se cancelarem perfeitamente. Einstein percebeu que o mesmo raciocínio se aplica com precisão ao universo como um todo. Da mesma maneira como a ação atrativa da gravidade diminui a velocidade do salto do dançarino, diminui também a da expansão do espaço. E assim como o dançarino não consegue alcançar a estase — não é capaz de sustentar-se em uma altura constante — sem que uma força repulsiva contrabalance a ação normal da gravidade, também o

espaço não pode ser estático — não pode sustentar-se em um tamanho constante — sem a ação de uma força repulsiva que contrabalance o impulso da expansão. Einstein introduziu a constante cosmológica porque pensou que, com a inclusão desse novo termo nas equações, a gravidade poderia proporcionar essa força repulsiva.

Mas que ente físico representa esse termo matemático? O que é a constante cosmológica, de que é feita e como consegue opor-se à ação normal da gravidade e exercer a ação centrífuga de repulsão? A leitura moderna da obra de Einstein — que se origina com Lemaitre — interpreta a constante cosmológica como uma forma exótica de energia que preenche todo o espaço de maneira uniforme e homogênea. Uso a palavra "exótica" porque a análise de Einstein não especificou de onde essa energia poderia provir e também porque, como veremos em breve, a descrição matemática a que ele recorreu implica que tal energia não pode ser formada por elementos familiares como prótons, nêutrons, elétrons ou fótons. Os físicos de hoje empregam expressões como "energia do próprio espaço", ou "energia escura", quando discutem o sentido da constante cosmológica de Einstein, porque se ela existisse o espaço estaria repleto de uma presença transparente e amorfa, que não se pode ver diretamente. O espaço preenchido pela constante cosmológica continuaria a ser escuro. (O que faz lembrar a velha noção do éter e a noção mais nova de um campo de Higgs que tenha adquirido um valor diferente de zero em todo o espaço. Esta última similaridade é mais do que mera coincidência, pois existe uma vinculação importante entre a ideia da constante cosmológica e os campos de Higgs, como logo veremos.) Mas mesmo sem especificar a origem e a identidade da constante cosmológica, Einstein estabeleceu as suas implicações gravitacionais, e a resposta por ele obtida foi notável.

Para compreendê-la, é preciso levar em conta uma característica da relatividade geral que ainda não discutimos. No enfoque dado por Newton à gravidade, a força de atração entre dois objetos depende apenas de duas coisas: a sua massa e a distância entre eles. Quanto maior for a massa dos objetos e quanto mais próximos estiverem um do outro, maior será a atração gravitacional entre eles. Na relatividade geral, a situação é basicamente a mesma, salvo pelo fato de que as equações de Einstein mostram que o foco dado por Newton à massa era demasiado limitado. De acordo com a relatividade geral, não é apenas a massa dos objetos (e a separação entre eles) que contribui para a intensidade do campo gravitacional. A *energia* e a *pressão* também são pertinentes. Esse é um ponto de grande importância e, portanto, vale a pena nos alongarmos um pouco em sua análise.

Imagine que estamos no século XXV e que você está detido no Centro de Agudeza Mental, o mais recente experimento do Departamento de Correção, que emprega uma avaliação meritocrática para disciplinar os contraventores de nível superior. Cada réu recebe a missão de resolver um problema, e essa é a única maneira de recuperar a liberdade. O seu vizinho de cela tem de explicar por que as reprises de *A ilha da fantasia* de repente voltaram a fazer sucesso no século xxn e nunca mais saíram de cartaz, o que significa que o coitado ainda vai ficar morando no Centro por um bom tempo. O problema dado a você é mais simples. Você tem dois cubos idênticos de ouro sólido — do mesmo tamanho e formados precisamente pela mesma quantidade de ouro. O seu desafio é o de encontrar um meio de fazer com que os cubos registrem pesos diferentes quando colocados suavemente sobre uma balança fixa e de exatidão finíssima, com uma estipulação: é proibido alterar o montante de matéria de cada cubo, de modo que você não pode cortar, raspar, tirar lascas, polir ou fazer nenhuma outra operação desse gênero com os cubos. Se esse problema fosse proposto a Newton, ele declararia imediatamente que não há solução. De acordo com as leis de Newton, quantidades idênticas de ouro traduzem-se em massas idênticas. E como os cubos estarão em uma mesma balança, fixa, a gravidade terrestre os atrairá de maneira igual. Newton concluiria que os dois cubos necessariamente registrarão o mesmo peso, sem dúvidas ou ressalvas.

Você, no entanto, que vive no século XXV e estudou relatividade geral, descobre uma saída. A relatividade geral mostra que a intensidade da atração gravitacional entre dois objetos depende não apenas das suas massas[5] (e da separação entre eles), mas também de toda e qualquer contribuição adicional que afete a *energia* total de cada objeto. E até aqui nada dissemos sobre a temperatura dos cubos de ouro. A temperatura dá a medida da rapidez, em média, do movimento dos átomos de ouro que compõem os cubos — dá a medida da energia dos átomos (reflete a sua energia cinética). Você percebe, assim, que se aquecer um dos cubos, os seus átomos ganharão energia e, portanto, pesarão um pouquinho mais do que os átomos do cubo mais frio. Newton não tinha consciência desse fato (um aumento de dez graus Celsius provocará um aumento de um bilionésimo de milionésimo de grama para cada grama de ouro do cubo, de modo que o efeito é minúsculo), e graças a ele você poderá sair do Centro.

Ainda não. Como o crime que você cometeu foi particularmente grave, na última hora o Conselho de Direção do Centro decide que você tem de resolver um segundo problema. Você recebe dois bonecos de mola idênticos, daqueles que pulam da caixa quando se levanta a tampa, e o novo desafio é o de encontrar uma maneira de fazer com que eles também registrem pesos diferentes. Mas neste caso não só é proibido alterar a massa dos bonecos, mas também alterar a

sua temperatura. Igualmente aqui, se o problema fosse dado a Newton, ele de imediato se resignaria a passar o resto da vida no Centro. Como os bonecos têm massas idênticas, ele concluiria que os seus pesos são idênticos e, portanto, o problema seria insolúvel. Mas de novo a relatividade geral vem em seu auxílio: você comprime a mola de um dos bonecos e o deixa bem apertado, com a tampa fechada, e deixa o outro com a tampa aberta e a mola solta. Por quê? Porque uma mola comprimida tem mais energia do que uma mola solta. É preciso usar energia para comprimir a mola, e a prova disso está em que a mola comprimida exerce pressão, o que faz com que o boneco salte quando a tampa se abre. Mais uma vez, de acordo com Einstein, *qualquer* energia adicional afeta a gravidade, o que resulta em um peso adicional. Assim, o boneco fechado, cuja mola comprimida exerce pressão sobre a tampa da lata, pesa um sopro a mais do que o boneco cuja lata está aberta e cuja mola está solta. Essa é a percepção que teria escapado a Newton e que vale a recuperação da sua liberdade.

A solução do segundo problema se deve à característica sutil, mas crucial, da relatividade geral que estou buscando ressaltar. No texto em que apresentou a relatividade geral, Einstein demonstrou matematicamente que a força gravitacional depende não apenas da massa, não apenas da energia (como o calor), mas também de quaisquer *pressões* que venham a ser exercidas. E este é o ponto essencial da física que temos de levar em conta para poder compreender a constante cosmológica. Vejamos por quê. Uma pressão que se exerce de dentro para fora, como a de uma mola comprimida, denomina-se *pressão positiva.* Como é natural, a pressão positiva contribui positivamente para a gravidade. Mas eis o ponto crítico: existem situações em que, ao contrário da massa e da energia total, a pressão em uma região pode ser *negativa*, no sentido de que a sua ação puxa para dentro em vez de empurrar para fora. Embora isso não chegue a parecer propriamente exótico, na verdade a pressão negativa pode resultar em algo extraordinário do ponto de vista da relatividade geral: *enquanto a pressão positiva contribui para a gravidade atrativa normal a pressão negativa contribui para a gravidade ᵘ negativa, ou seja, para a gravidade repulsiva!*[6]

Com essa percepção estonteante, a relatividade geral einsteiniana abriu uma fenda na crença de mais de duzentos anos de que a gravidade é sempre uma força atrativa. Os planetas, as estrelas e as galáxias com certeza exercem, como Newton corretamente demonstrou, uma atração gravitacional. Mas quando a pressão se torna importante (nas condições normais, e com relação à matéria que nos é familiar, a contribuição da pressão para a gravidade é desprezível) e, em particular, quando ela é negativa (para a matéria conhecida, formada por prótons e elétrons, a pressão é sempre positiva, razão por que a constante cosmológica

não pode ser composta por nada que nos seja familiar) ocorre uma contribuição para a gravidade que teria chocado Newton. *Ela é repulsiva.*

A consequência desse fator para o que vamos ver a seguir é fundamental e pode ser facilmente mal compreendida, de modo que devemos sublinhar um aspecto essencial. A gravidade e a pressão são dois personagens correlatos mas diferentes nesta história. As pressões, ou melhor, as diferenças de pressão, podem exercer as suas próprias forças não gravitacionais. Quando você mergulha, os seus tímpanos sentem a diferença de pressão entre a água, que os comprime de fora para dentro, e o ar, que os empurra de dentro para fora. Tudo isso é verdade. Mas o que estamos querendo dizer em matéria de pressão e gravidade é algo completamente diferente. De acordo com a relatividade geral, a pressão pode exercer indiretamente uma outra força — uma força gravitacional —, uma vez que ela contribui para o campo gravitacional. A pressão, assim como a massa e a energia, é fonte de gravidade. O que é mais notável é que, se a pressão em uma região for negativa, a sua contribuição para o campo gravitacional que permeia a região será um *empurrão*, em vez de uma atração gravitacional.

Isso significa que, quando a pressão é negativa, há uma competição entre a gravidade atrativa normal, produzida pela matéria e pela energia normais, e a gravidade repulsiva exótica, produzida pela pressão negativa. Se a pressão negativa em uma região for suficientemente forte, a gravidade repulsiva predominará. A gravidade afastará as coisas umas das outras, em vez de atraí-las e aproximá-las. É neste ponto que a constante cosmológica entra na história. O termo cosmológico adicionado por Einstein às equações da relatividade geral significaria que o espaço é permeado uniformemente com energia, mas, o que é crucial, as equações indicam que essa energia tem uma pressão negativa uniforme. Mais ainda, a repulsão gravitacional da pressão negativa da constante cosmológica supera a atração gravitacional proveniente da energia positiva, de modo que a gravidade repulsiva ganha a competição: *a constante cosmológica exerce uma força gravitacional repulsiva global.*[7]

Para Einstein, essa parecia ser a solução que ele buscava. A matéria e a radiação comuns, espalhadas por todo o universo, exercem uma força gravitacional atrativa que leva todas as regiões do espaço a *se aproximarem* umas das outras. O novo termo cosmológico, que ele imaginou estar também distribuído uniformemente por todo o universo, exerce uma força gravitacional repulsiva, que leva todas as regiões do espaço a *se afastarem* umas das outras. Com uma escolha cuidadosa do valor do novo termo, Einstein verificou que poderia

equilibrar com precisão a força gravitacional atrativa normal com a recém descoberta força gravitacional repulsiva, produzindo assim um universo estático.
Além disso, como a força gravitacional repulsiva provém da energia e da pressão do próprio espaço, Einstein descobriu que a sua força é cumulativa. Ela se torna mais forte quanto maiores forem as separações espaciais, uma vez que a uma maior quantidade de espaço corresponderá uma maior intensidade da repulsão. Einstein demonstrou que, na escala de grandeza da Terra, ou do sistema solar como um todo, essa força gravitacional repulsiva é incomensuravelmente pequena. Ela só se torna importante nas grandes extensões cosmológicas, preservando, assim, o êxito da teoria newtoniana e da própria relatividade geral quando aplicadas a distâncias menores. Em síntese, Einstein descobriu que podia comer o bolo e guardá-lo ao mesmo tempo: conservar todas as realizações experimentalmente comprovadas da relatividade geral e conquistar a serenidade eterna de um cosmo imutável, que nem se expande nem se contrai.
Por certo, Einstein suspirou aliviado com esse resultado. Quão devastadora teria sido para ele a constatação de que os dez incansáveis anos de dificílimas pesquisas dedicadas à formulação da relatividade geral teriam resultado em uma teoria incompatível com o universo estático que era evidente para qualquer pessoa que olhasse para o céu em uma noite estrelada. Mas, como vimos, doze anos depois a história subitamente mudou de rumo. Em 1929, Hubble demonstrou que as românticas olhadas para o céu noturno podem ser enganadoras. As suas observações sistemáticas revelaram que o universo *não* é estático. Que ele, sim, está se expandindo. Se Einstein tivesse confiado nas equações originais da relatividade geral, teria previsto a expansão do universo mais de uma década antes da sua descoberta a partir de observações. Essa teria sido, com certeza, uma das maiores descobertas de toda a história — talvez a *maior* de todas. Ao tomar conhecimento dos resultados obtidos por Hubble, Einstein maldisse o dia em que concebeu a constante cosmológica e eliminou-a, cuidadosamente, das equações da relatividade geral. Ele queria que todos esquecessem o ingrato episódio, e a verdade é que por muitas décadas foi isso o que ocorreu.
Na década de 1980, contudo, a constante cosmológica ressurgiu em grande estilo e com nova roupagem, causando uma das mais impressionantes surpresas no pensamento cosmológico desde que a nossa espécie começou a interessar-se pelo cosmo.

O PULO DA RÃ E O SUPER-RESFRIAMENTO

Se você olhar uma pedra sendo arremessada ao ar, poderá usar a teoria de

Newton sobre a gravidade (ou as equações mais sofisticadas de Einstein) para prever toda a sua trajetória subsequente. E se você fizer os cálculos necessários, terá um conhecimento preciso do movimento da pedra. Mas uma pergunta permaneceria sem resposta: quem foi que jogou a pedra, para começo de conversa? Como foi que a pedra adquiriu o movimento ascendente inicial, cujos desdobramentos posteriores você calculou matematicamente? Neste exemplo, bastaria pesquisar um pouco mais para encontrar a resposta (naturalmente, a menos que quem jogou a pedra perceba que ela está em rota de colisão com o para-brisa de uma Mercedes estacionada). Mas uma versão mais complexa de um problema semelhante desafia a explicação da relatividade geral para a expansão do universo.

Tal como originalmente demonstrado por Einstein, pelo físico holandês Willem de Sitter e, depois, por Friedmann e Lemaitre, as equações da relatividade geral são compatíveis com um universo em expansão. Mas, da mesma forma que equações de Newton não nos dizem nada a respeito de como teve início a viagem aérea da pedra, as equações de Einstein tampouco nos dizem nada a respeito de como teve início a expansão do universo. Por muitos anos os estudiosos do cosmo tomaram a expansão inicial do espaço como um fato inexplicado e limitaram-se a desenvolver as equações a partir daí. Isso é o que eu quis dizer quando me referi a que o *bang* do Big-Bang provocou um silêncio.

Assim estavam as coisas até que uma noite, em dezembro de 1979, Alan Guth, pesquisador de pós-doutorado em física que trabalhava no Centro do Acelerador Linear de Stanford (e que hoje é professor do MIT), demonstrou que é possível saber mais. Muito mais. Embora persistam ainda hoje, mais de vinte anos depois, alguns detalhes que ainda não foram esclarecidos por completo, Guth fez uma descoberta que finalmente quebrou o silêncio cosmológico e fez ouvir o bang — e com um estrépito maior do que se esperava.

A formação de Guth não era a de um cosmólogo. Ele era um especialista em física das partículas e estava estudando no fim da década de 1970, juntamente com Henry Tye, da Universidade de Cornell, vários aspectos dos campos de Higgs no contexto das teorias de grande unificação. Lembre-se de que, quando discutimos a quebra espontânea da simetria, no último capítulo, vimos que os campos de Higgs contribuem com a mínima energia possível para uma região do espaço quando o seu valor se estabiliza em um número específico diferente de zero (número que depende do formato específico da sua bacia de energia potencial). No universo primitivo, quando a temperatura era extraordinariamente alta, vimos que o valor de um campo de Higgs oscilaria amplamente de um número a outro, saltando como a rã cujas pernas se chamuscavam na forma

quente, e que, à medida que o universo se resfriava, o campo de Higgs se estabilizaria no fundo da fôrma, com o valor que minimizaria a sua energia.
Guth e Tye estudaram as razões pelas quais o campo de Higgs poderia demorar-se em alcançar a configuração de energia mínima (o fundo da fôrma na figura 9.1c). Se aplicarmos a analogia da rã à pergunta feita por Guth e Tye, teremos o seguinte: e se a rã, em um dos seus primeiros saltos, quando a fôrma começava a resfriar-se, aterrissasse na superfície mais alta do meio da fôrma? E se a rã continuasse na superfície central (comodamente comendo as minhocas) enquanto a fôrma continuava a resfriar-se, em vez de saltar de novo para o fundo dela? Ou então, agora em termos de física, e se o valor flutuante do campo de Higgs aterrissasse na superfície mais alta central da fôrma de energia e aí permanecesse à medida que o universo se resfriasse? Nesse o caso, os físicos dizem que o campo de Higgs teria sofrido um *super-resfriamento,* o que indica que, mesmo que a temperatura do universo caia a um ponto em que normalmente o valor de Higgs já estaria próximo do vale de baixa energia, ele permanece preso na configuração de energia mais alta. (Isso é análogo ao caso da água altamente purificada, que pode ser resfriada e permanecer líquida abaixo de zero grau Celsius, temperatura na qual normalmente se converte em gelo, porque a formação do gelo requer pequenas impurezas para que os cristais possam agrupar-se em torno delas).
Guth e Tye estavam interessados nessa possibilidade porque os seus cálculos sugeriam que ela poderia ser relevante para um problema (o problema do *monopolo* magnético)[8] com que muitos pesquisadores haviam se confrontado em seus estudos sobre a grande unificação. Mas eles perceberam que poderia haver uma outra implicação e, afinal, esse foi o motivo pelo qual o seu trabalho tornou-se tão importante. Eles suspeitaram que a energia associada a um campo de Higgs super-resfriado — lembre-se de que a altura do campo representa a sua energia, de modo que o campo só tem energia igual a zero se o seu valor permanecer no fundo da fôrma — poderia ter um efeito sobre a expansão do universo. Guth seguiu sua intuição e, no começo de dezembro de 1979, veja o que ele descobriu.
Um campo de Higgs que fique preso em uma superfície mais alta não só difunde energia pelo espaço, mas também, o que tem importância crucial, produz uma *pressão negativa* uniforme. Com efeito, ele verificou que, do ponto de vista da energia e da pressão, um campo de Higgs que fique preso em um lugar mais alto tem as mesmas propriedades de uma constante cosmológica: ele difunde energia e pressão negativa pelo espaço, exatamente nas mesmas proporções de uma constante cosmológica. Guth descobriu, assim, que um campo de Higgs super-resfriado exerce um efeito importante sobre a expansão do espaço: tal como uma

constante cosmológica, ele exerce uma força gravitacional repulsiva que leva o espaço a expandir-se.[9]

A esta altura, você, que já está se acostumando com a pressão negativa e a gravidade repulsiva, deve estar pensando: tudo bem, que bom que o senhor Guth tenha encontrado um mecanismo específico que traz para o mundo físico a constante cosmológica de Einstein, mas e daí? Onde está o grande avanço? O conceito da constante cosmológica fora abandonado. A sua própria introdução fora um constrangimento para Einstein. Por que o interesse em redescobrir algo que está desacreditado há mais de sessenta anos?

INFLAÇAO

Vou explicar por quê. Embora o campo de Higgs super-resfriado tenha certas características em comum com a constante cosmológica, Guth percebeu que ambos não são completamente idênticos. Há duas diferenças fundamentais — diferenças que fazem toda a diferença.

Em primeiro lugar, enquanto a constante cosmológica é constante — não varia com o tempo e produz, assim, uma expansão permanente e imutável —, o campo de Higgs super-resfriado não tem por que ser constante. Imagine uma rã que foi parar no topo da superfície mais alta da fôrma, como se vê na figura 10.1a. Ela pode ficar lá por algum tempo, mas, mais cedo ou mais tarde, um salto aleatório em qualquer direção — salto que é dado não porque a fôrma esteja quente (já não está), mas simplesmente porque o animal se agita — impelirá a rã para fora do topo e a levará a descer para o ponto mais baixo da fôrma, como na figura 10.1b. Um campo de Higgs pode comportar-se de maneira similar. O seu valor, através de todo o espaço, pode ficar preso no topo da superfície mais alta central da fôrma de energia enquanto a temperatura desce a um ponto que já não provoca agitação térmica significativa. Mas os processos quânticos provocarão saltos aleatórios no valor do campo de Higgs e um salto mais longo o impelirá para fora do topo, o que permitirá que a sua energia e a sua pressão caiam a zero e se estabilizem.[10] Os cálculos de Guth revelaram que, dependendo do formato específico do topo da fôrma, esse salto pode ter acontecido em um tempo muito rápido, talvez apenas 0,00000000000000000000000000000000001 (10^{-35}) segundos. Logo depois, Andrei Linde, que então trabalhava no Instituto Lebedev de Física em Moscou, e Paul Steinhardt, que na época trabalhava com o seu aluno Andreas Albrecht na Universidade de Pennsylvania, descobriram uma maneira pela qual o relaxamento do campo de Higgs até o nível zero de energia e pressão por todo o espaço acontecia de modo mais eficiente e significativamente mais uniforme (com o que se corrigiam alguns problemas técnicos inerentes à

proposta original de Guth).[11] Eles demonstraram que se a superfície mais alta da bacia de energia potencial fosse mais suave e tivesse uma encosta mais gradual, como na figura 10.2, não seriam necessários saltos quânticos: o valor do campo de Higgs rapidamente desceria para o vale, como uma bola rolando pela encosta. A implicação era a de que se um campo de Higgs funcionasse como uma constante cosmológica, isso só poderia acontecer por um tempo muito breve.

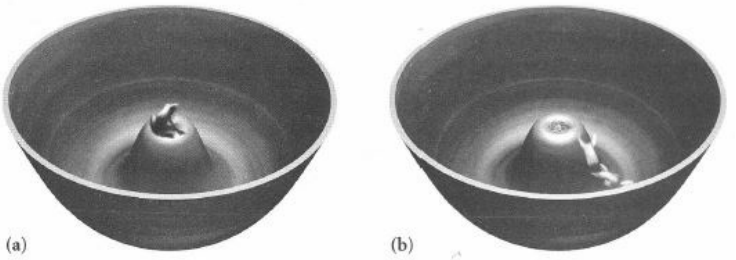


Figura 10.1. (*a*) *Um campo de Higgs super-resfriado é aquele cujo valor fica preso na parte mais alta da bacia de energia, como a rã que está no topo do ressalto.* (*b*) *Tipicamente, um campo de Higgs super-resfriado logo encontrará o caminho para descer da superfície mais elevada para um nível mais baixo de energia, como a rã que salta para baixo a partir do topo.*

A segunda diferença está em que, enquanto Einstein escolheu de maneira cuidadosa e arbitrária o valor da constante cosmológica — o montante de energia e de pressão negativa que ela aportaria em cada volume de espaço — para que a sua força repulsiva contrabalançasse precisamente a força atrativa proveniente da matéria e da radiação normais do cosmo, Guth obteve uma estimativa da energia e da pressão negativa aportadas pelo campo de Higgs que ele e Tye vinham estudando. E a resposta encontrada foi mais de 10^{100} vezes o valor que Einstein escolhera. Esse valor é obviamente enorme e, por conseguinte, a força de expansão proporcionada pela gravidade repulsiva do campo de Higgs é *monumental* em comparação com o que Einstein havia imaginado originalmente para a constante cosmológica.



Figura 10.2. *Uma superfície alta mais suave e com encostas menos íngremes permite que o valor do campo de Higgs desça ao vale de nível zero de energia de maneira mais fácil e uniforme por todo o espaço.*

Se combinarmos essas duas observações — a de que o campo de Higgs permanecerá na superfície mais alta e no estado de energia alta e de pressão negativa, ainda que pelo mais breve dos instantes, e a de que, enquanto ele

estiver lá em cima, a força repulsiva que ele gera será enorme — qual será a situação? Como Guth percebeu, teremos uma explosão expansiva fenomenal e de curta duração. Em outras palavras, teremos exatamente o que faltava à teoria do Big-Bang: o *bang*— um tremendo *bang.* É por isso que a descoberta de Guth causou tanto rebuliço.[12]

O quadro cosmológico que resulta do trabalho de Guth é o seguinte. Há muito tempo, quando o universo era incrivelmente denso, a sua energia era transportada por um campo de Higgs que se encontrava em um valor bem distante do ponto mínimo da sua bacia de energia potencial. Para distinguir este campo de Higgs em particular dos outros (como o campo de Higgs eletrofraco, responsável pelas massas das espécies de partículas que nos são familiares, ou o campo de Higgs que surge nas teorias de grande unificação),[13] normalmente dá-se a esse campo o nome de *inflaton.* Por ter pressão negativa, o campo do inflaton gerou uma gigantesca repulsão gravitacional que levou todas as regiões do espaço a separar-se umas das outras. Nas palavras de Guth, o inflaton levou o universo a *inflar-se*. A inflação durou apenas 10^{-35} segundos, mas foi tão poderosa que, mesmo por esse brevíssimo instante, o universo expandiu-se em enormes proporções. Dependendo de detalhes como a forma específica da energia potencial do campo do inflaton, o universo pode ter se expandido facilmente por um fator de 10^{30}, 10^{50}, 10^{100}, ou mais.

Esses números são sufocantes. Um fator de expansão de 10^{30} — estimativa conservadora — significa levar uma molécula de DNA ao tamanho da Via Láctea e em um intervalo de tempo muito inferior a um bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de um piscar de olhos. Comparativamente, mesmo este fator de expansão conservador é bilhões e bilhões de vezes maior do que a expansão que teria ocorrido durante o mesmo intervalo de tempo de acordo com a teoria-padrão do Big-Bang e é superior a toda a expansão que ocorreu no universo nos 14 bilhões de anos subsequentes! Nos diversos modelos de inflação em que o fator de expansão é bastante superior a 10^{30}, a expansão espacial resultante é tão gigantesca que a região do universo que podemos ver, mesmo com o mais poderoso dos telescópios, é uma fração mínima do cosmo como um todo. De acordo com esses modelos, a luz emitida pela vasta maioria das regiões do universo ainda não chegou até nós, e uma grande parte dela não chegará até muito tempo depois de que a Terra e o Sol estejam extintos. Nesses casos, se considerássemos que o universo tem o tamanho da Terra, a parte dele que nos é acessível teria o tamanho de um grão de areia.

Cerca de 10^{-35} segundos depois do começo dessa expansão violenta, o campo do inflaton desceu da superfície mais elevada de alta energia e o seu valor, em todo

o espaço, caiu para o fundo da fôrma, pondo fim ao surto repulsivo. Com a queda do valor do inflaton, a energia que ele continha foi liberada e produziu as partículas normais de matéria e radiação — como o nevoeiro que se assenta sob a forma de orvalho — que brotaram uniformemente por todo o espaço em expansão.[14] A partir desse ponto, a história é fundamentalmente igual à da teoria-padrão do Big-Bang: o espaço continuou a expandir-se e a resfriar-se após o surto, o que permitiu que as partículas de matéria se agrupassem e formassem estruturas como as galáxias, as estrelas e os planetas, que lentamente se distribuíram pelo universo e tomaram a configuração que hoje vemos e que está ilustrada na figura 10.3.

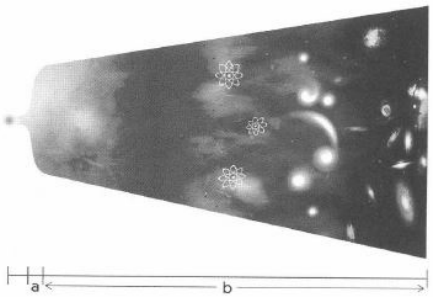


Figura 10.3. (*a*) *A cosmologia inflacionária introduz um surto rápido e enorme de expansão espacial na história do universo.* (*b*) *Após o surto, a evolução do universo identifica-se com as previsões teóricas do modelo-padrão do Big-Bang.*

A descoberta de Guth — denominada *cosmologia inflacionária* —, juntamente com importantes melhoramentos introduzidos por Linde e por Albrecht e Steinhardt, propiciou uma explicação para o que provocou a expansão do espaço, para começo de conversa. Um campo de Higgs que permaneça acima do valor zero de energia pode gerar uma explosão que leva o espaço a inflar-se. Guth deu ao Big-Bang o seu *bang.*

O ARCABOUÇO INFLACIONÁRIO

A descoberta de Guth foi rapidamente saudada como um avanço de grande importância e tornou-se uma referência dominante na pesquisa cosmológica. Porém duas coisas devem ser ressaltadas. Em primeiro lugar, no modelo padrão do Big-Bang, o *bang* supostamente ocorreu no tempo zero, no próprio início do universo, e é visto, desse modo, como o ato da criação. Mas assim como uma banana de dinamite só explode se tiver a ignição correta, na cosmologia inflacionária o Big-Bang só ocorreu quando as condições foram apropriadas — quando se produziu um campo do inflaton cujo valor propiciou a energia e a pressão negativa que alimentaram o surto expansivo de gravidade repulsiva — e isso pode não ter coincidido com a “criação” do universo. Por essa razão, o *bang*

inflacionário é visto de forma apropriada como um evento que o universo preexistente experimentou, mas não necessariamente como o evento que criou o universo. É o que mostra a figura 10.3, que conserva algo da área difusa que aparece na figura 9.2 para indicar a nossa persistente ignorância a respeito da origem fundamental, ou seja, a nossa ignorância, se a cosmologia inflacionária estiver certa, sobre por que existe um campo do inflaton, por que a sua bacia de energia potencial tem o formato apropriado para que ocorresse a inflação, por que existem o espaço e o tempo nos quais ocorre toda essa discussão e por que, na expressão mais grandiosa de Leibniz, existem as coisas em vez do nada.

Uma segunda observação correlata é a de que a cosmologia inflacionária não é uma teoria única e isolada. Ao contrário, é um arcabouço cosmológico construído em torno do conceito de que a gravidade pode ser repulsiva e pode, assim, produzir a dilatação do espaço. Os detalhes específicos do surto expansivo — quando ele ocorreu, quanto tempo durou, qual a sua intensidade, o fator pelo qual o universo expandiu-se durante o surto, a quantidade de energia convertida pelo inflaton em matéria comum ao final do surto e assim por diante — dependem de detalhes, como o tamanho e o formato da energia potencial do campo do inflaton, que hoje estão além da nossa capacidade de determinar, com base apenas em considerações teóricas. Assim, por muitos anos os cientistas estudaram todos os tipos de possibilidades — vários formatos para a energia potencial, vários números de campos do inflaton que operam em conjunto e assim por diante — e determinaram as escolhas que produzem teorias consistentes com as observações astronômicas. O importante é que existem aspectos das teorias de cosmologia inflacionária que independem dos detalhes e por isso são comuns a todas elas. O próprio surto expansivo é, por definição, um desses aspectos e, por essa razão, todos os modelos inflacionários apresentam um *bang.* Mas existem numerosos outros aspectos inerentes aos modelos inflacionários que são vitais na resolução de importantes problemas que têm afetado a cosmologia-padrão do Big-Bang.

A INFLAÇAO E O PROBLEMA DO HORIZONTE

Um desses problemas é o *problema do horizonte,* que se relaciona com a uniformidade da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, que vimos anteriormente. Lembre-se de que a temperatura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, que chega até nós a partir de qualquer direção do espaço, é, com fantástica precisão, virtualmente a mesma, qualquer que seja a sua procedência (com diferenças inferiores a um milésimo de grau). Esse dado observacional é crucial, porque confirma a homogeneidade do espaço como um

todo, o que permite enormes simplificações nos modelos teóricos do cosmo. Nos capítulos anteriores, usamos essa homogeneidade para reduzir drasticamente as formas possíveis que o espaço pode ter e argumentar em favor de um tempo cósmico uniforme. O problema está em explicar *como* o universo tornou-se tão uniforme. Como pode ser que regiões tão distantes do universo tenham temperaturas praticamente idênticas?

Se voltarmos a nossa atenção ao que foi dito no capítulo 4, existe a possibilidade de que, assim como os emaranhamentos quânticos não locais podem correlacionar os *spins* de duas partículas extremamente distantes uma da outra, também poderiam correlacionar as temperaturas de duas regiões espaciais extremamente distantes uma da outra. Embora esta seja uma sugestão interessante, a tremenda diluição do emaranhamento em todos os ambientes que não estejam submetidos ao mais rígido dos controles, como vimos no final daquele capítulo, contribui essencialmente para descartá-la. Talvez haja uma explicação mais simples. Talvez, há muito tempo, quando todas as regiões do espaço estavam mais próximas umas das outras, as suas temperaturas tivessem se igualado pelo próprio contato, assim como as temperaturas da cozinha e da sala de uma casa acabam por igualar-se quando a porta entre elas fica aberta por algum tempo. Mas essa explicação tampouco se sustenta na teoria-padrão do Big-Bang. Vejamos uma maneira de pensar a esse respeito.

Imagine um filme que conte todo o desenrolar da evolução cósmica desde o início até agora. Interrompa o filme em um momento qualquer e pergunte: seria possível que duas regiões do espaço, como a cozinha e a sala, influenciassem reciprocamente as suas temperaturas? Seria possível o intercâmbio de luz e calor entre elas? A resposta depende de dois fatores: a distância entre as regiões e o tempo decorrido desde o Big-Bang. Se a separação entre elas for menor do que a distância que a luz teria percorrido nesse mesmo tempo, as duas regiões podem ter se influenciado mutuamente; caso contrário, não. Você poderia pensar que *todas* as regiões do universo observável podem ter interagido umas com as outras, perto do início dos tempos, porque quanto mais retrocedemos o filme, mais próximas as regiões estariam umas das outras e mais fácil seria a interação entre elas. Mas esse é um raciocínio apressado, pois não leva em conta o fato de que, se por um lado as regiões do espaço estavam mais próximas, também havia menos tempo para que elas se comunicassem entre si.

Para que a análise seja correta, imagine passar o filme do futuro para o passado, focalizando duas regiões que hoje ocupam lugares opostos no universo observável — regiões tão distantes que atualmente estão fora das suas respectivas esferas de influência. Se para reduzir à metade a distância entre elas tivermos de retroceder mais da metade do filme, ainda que essas regiões do

espaço estivessem mais próximas, a comunicação entre elas ainda seria impossível: a separação seria 50% menor, mas o tempo transcorrido a partir do Big-Bang teria sido *menor* do que 50% do tempo atual; a luz, portanto, teria viajado uma distância *menor* do que a metade da distância atual. Do mesmo modo, se a partir desse ponto do filme tivermos que retroceder mais do que a metade do tempo até o início para novamente reduzir à metade a distância entre as regiões, a comunicação se torna ainda mais difícil. Com esse tipo de evolução cósmica, ainda que as regiões estivessem mais próximas no passado, torna-se mais enigmático — e não menos — que as suas temperaturas sejam iguais. Com relação à distância que a luz pode percorrer, as regiões se tornam cada vez mais isoladas umas das outras quando as examinamos cada vez mais perto da origem dos tempos.

É exatamente isso o que acontece na teoria-padrão do Big-Bang. Nela, a gravidade age apenas como força atrativa e, desse modo, tem agido desde o início no sentido de retardar a expansão do espaço. Assim, se alguma coisa está diminuindo a velocidade, será necessário mais tempo para cobrir determinada distância. Por exemplo, imagine que a égua Tirolesa começou a correr a um ritmo bem forte e completou a primeira metade do percurso de uma corrida em dois minutos, mas, como não estava na sua melhor forma, atrasou-se consideravelmente na segunda metade e levou três minutos para percorrê-la. Se virmos o filme da corrida do fim para o começo, teríamos que retroceder mais do que a metade do filme para ver a Tirolesa passar pela marca da metade do percurso (teríamos que retroceder três dos cinco minutos do filme). Assim também, como na teoria-padrão do Big-Bang a gravidade retarda a expansão do espaço, qualquer que seja o ponto do filme cósmico em que estejamos, teríamos que retroceder mais do que a metade no tempo para reduzir à metade a separação entre duas regiões do espaço. Tal como antes, ainda que as regiões do espaço estivessem mais próximas umas das outras nos primeiros tempos, era mais — e não menos — difícil que elas pudessem influenciar-se e, portanto, mais — e não menos — enigmático que elas tivessem uma mesma temperatura.

Os cientistas definem o *horizonte cósmico* (ou simplesmente horizonte) de uma região como as áreas mais remotas do espaço que são suficientemente próximas daquela região para que tenha sido possível o intercâmbio de sinais de luz entre elas no tempo transcorrido desde o Big-Bang. O nome faz analogia com as coisas mais distantes que podemos observar na superfície da Terra a partir de qualquer ponto de vista específico.[15] O problema do horizonte é, por conseguinte, o enigma, inerente às observações de que regiões cujos horizontes sempre estiveram separados — regiões que nunca puderam interagir, ou

comunicar-se, ou exercer qualquer influência umas sobre as outras — tenham temperaturas praticamente idênticas.

O problema do horizonte não significa que a teoria-padrão do Big-Bang esteja errada, mas é verdade que ele clama por uma explicação. E a cosmologia inflacionária a dá.

Segundo a cosmologia inflacionária, houve um breve instante durante o qual a gravidade foi repulsiva, o que levou o espaço a expandir-se a um ritmo incrivelmente rápido. Durante essa parte do filme cosmológico você teria que retrocedê-lo menos do que a metade da sua extensão para alcançar a metade da distância entre duas regiões. Imagine uma corrida em que a égua Tirolesa corre a primeira metade do percurso em dois minutos e, como está no auge da sua forma, acelera e completa a segunda metade em apenas um minuto. Bastaria que você retrocedesse um minuto do filme de três minutos — menos do que a metade, portanto — para vê-la passar pela marca da metade do percurso. Do mesmo modo, a separação cada vez mais rápida de duas regiões quaisquer do espaço durante a expansão inflacionária implica que para reduzir à metade a distância entre elas seria necessário retroceder o filme menos — *muito menos* — do que a metade do seu comprimento até o início. Quanto mais recuamos no tempo, portanto, *mais fácil* se torna que duas regiões quaisquer do espaço possam exercer influência uma sobre a outra, porque, em termos proporcionais, há mais tempo para que elas se comuniquem entre si. Os cálculos indicam que, se a fase da expansão inflacionária levou o espaço a expandir-se em um fator de pelo menos 10^{30}, fator facilmente alcançável nas simulações da expansão inflacionária, todas as regiões do espaço que hoje vemos — todas as regiões do espaço cuja temperatura hoje medimos — podiam comunicar-se com a mesma facilidade com que o fazem o ar da cozinha e o da sala, atingindo, assim, de maneira eficaz, uma temperatura comum nos primeiros momentos do universo.[16]

Em síntese, nos momentos iniciais, o espaço se expande com lentidão suficiente para que se estabeleça uma temperatura uniforme por toda parte e, em seguida, em um intenso surto de expansão cada vez mais rápida, o universo compensa a lentidão inicial e dispersa com enorme velocidade as regiões que antes eram próximas.

Essa é a explicação da cosmologia inflacionária para a até então misteriosa uniformidade da radiação cósmica de fundo em micro-ondas que permeia o espaço.

A INFLAÇAO E O PROBLEMA DA PLANURA

Um segundo problema enfrentado pela cosmologia inflacionária relaciona-se

com a forma do espaço. No capítulo 8, impusemos o critério da simetria espacial uniforme e encontramos três maneiras pelas quais o tecido do espaço pode curvar-se. Recorrendo às nossas visualizações bidimensionais, vimos que as possibilidades eram a curvatura positiva (como a superfície de uma bola), a curvatura negativa (como a de uma sela) e a curvatura zero (como uma tampa de mesa infinita ou uma tela finita de jogo eletrônico). Desde os primeiros dias da relatividade geral, os físicos perceberam que o total de massa e energia em determinado volume de espaço — a *densidade de matéria/energia* — determina a curvatura do espaço. Se essa densidade for alta, o espaço se contrairá sobre si mesmo, na forma de uma esfera; ou seja, haverá uma curvatura positiva. Se a densidade for baixa, o espaço se abrirá para o exterior, como uma sela de cavalo; ou seja, haverá uma curvatura negativa. Ou, como foi mencionado no último capítulo, para um valor muito especial da densidade de matéria/energia — a densidade crítica, igual à massa de cerca de cinco átomos de hidrogênio (cerca de 10^{-23} gramas) por metro cúbico — o espaço ficará justamente entre esses dois **ex**tremos e será perfeitamente plano; portanto, não haverá curvatura.

Vamos agora ao problema.

As equações da relatividade geral, que orientam o modelo-padrão do Big-Bang, revelam que, se a densidade de matéria/energia original fosse *exatamente* igual à densidade crítica, ela permaneceria igual à densidade crítica durante a expansão do espaço.[17] Mas, se ela fosse superior, ou inferior, ainda que de forma mínima, à densidade crítica, a expansão subsequente a levaria a afastar-se enormemente dessa densidade. Para que se tenha uma ideia das proporções, se um segundo após o Big-Bang o universo tivesse 99,99 por cento da densidade crítica, os cálculos demonstram que hoje a sua densidade teria caído ao nível de 0,00000000001 da densidade crítica. É uma situação comparável à de um montanhista que anda por uma crista fina como uma navalha, com encostas terrivelmente íngremes dos dois lados. Se ele acertar todos os passos com precisão, poderá fazer a travessia; se não, o mínimo erro, um pouquinho à esquerda ou à direita, se amplificará de tal maneira que o resultado será completamente diferente. (E, ainda que correndo o risco de exagerar nas analogias, esse aspecto do modelo-padrão do Big-Bang me faz lembrar também do chuveiro do dormitório na minha universidade: se você conseguisse manter a torneira aberta na posição perfeita, tomava um banho confortável. Mas bastava errar minimamente para a esquerda ou para a direita para que a água ficasse gelada ou escaldante. Alguns alunos simplesmente deixaram de tomar banho.)

Os cientistas vêm tentando medir a densidade de matéria/energia do universo há várias décadas. Já na década de 1980, embora as medições estivessem ainda muito incompletas, uma coisa era certa: a densidade de matéria/energia do

universo não é milhares e milhares de vezes maior ou menor do que a densidade crítica. Do mesmo modo, o espaço tampouco é substancialmente recurvado, seja positiva, seja negativamente. Essa conclusão dá um ar de estranheza ao modelo-padrão do Big-Bang. Ela implica que, para que o modelo seja coerente com as observações, algum mecanismo — que ninguém conhece nem pode explicar — terá regulado a densidade de matéria/energia do universo primitivo a um nível *extraordinariamente* próximo ao da densidade crítica. Os cálculos mostravam, por exemplo, que um segundo após o Big-Bang, a densidade de matéria/energia do universo não poderia diferir da densidade crítica por mais do que um *milionésimo de milionésimo de um por cento;* se o desvio fosse maior ou menor do que isso, o modelo-padrão do Big-Bang prevê que a densidade de matéria/energia seria hoje vastamente diferente daquela que observamos. Assim, de acordo com o modelo-padrão do Big-Bang, o universo primitivo, tal como o nosso montanhista, andava por uma crista extremamente fina. O menor dos desvios nas condições vigentes bilhões de anos atrás teria levado a um universo que hoje seria muito diferente daquele que as nossas medidas astronômicas revelam. Esse é o *problema da planura*.

Embora tenhamos coberto a essência da ideia, é importante compreender em que sentido o problema da planura constitui um problema. Ele não significa, de modo algum, que o modelo-padrão do Big-Bang esteja errado. A reação típica de quem acredita firmemente no modelo é levantar os ombros e dizer: “Ora, foi assim que as coisas aconteceram naquele tempo”, e considerar como um dado da natureza, ainda que não explicado, essa regulação praticamente perfeita da densidade de matéria/energia do universo primitivo, a qual é requerida pelo modelo-padrão do Big-Bang para produzir previsões compatíveis com as nossas observações. Mas esse tipo de resposta não agrada à maioria dos cientistas. Eles consideram que uma teoria cujo êxito depende de regulações extremamente precisas de dados para os quais não temos explicações essenciais não é de modo algum natural. Sem que se esclareça a razão para que a densidade de matéria/energia do universo primitivo se ajuste tão perfeitamente a um valor aceitável, muitos físicos acham o modelo-padrão do Big-Bang bastante artificial. O problema da planura revela, assim, a extrema sensibilidade do modelo-padrão do Big-Bang com relação a condições do passado remoto sobre as quais conhecemos muito pouco. Revela o quanto a teoria é dependente de explicações do tipo “foi assim que as coisas aconteceram” para poder funcionar.

Os físicos gostam de teorias cujas previsões não dependam de números desconhecidos com relação ao estado das coisas há muito tempo. Tais teorias parecem robustas e naturais por não serem sensíveis a detalhes cuja determinação direta é muito difícil ou talvez impossível de obter. Esse é o tipo

de teoria a que pertence a cosmologia inflacionária, e a solução oferecida para o problema da planura mostra por quê.

A observação essencial é a de que, enquanto a gravidade atrativa amplifica quaisquer desvios com relação à densidade de matéria/energia, a gravidade repulsiva da teoria inflacionária faz o oposto: ela *reduz* os desvios com relação à densidade crítica. Para termos uma boa ideia de por que é assim, o mais fácil é aplicar um raciocínio geométrico a uma íntima relação entre a densidade de matéria/energia do universo e a sua curvatura. Note, em particular, que mesmo que a forma do universo fosse acentuadamente recurvada nos primeiros tempos, depois da expansão inflacionária pelo menos uma seção do espaço suficientemente grande para acomodar a totalidade do universo hoje observável parece praticamente plana. Essa é uma característica geométrica com a qual estamos todos bem familiarizados. A superfície de uma bola é obviamente curva, mas foram necessários muito tempo e muita coragem para que a humanidade chegasse a convencer-se de que a superfície da Terra também é curva. A razão está em que, como regra geral, quanto maior o tamanho de um objeto, mais suave será o seu encurvamento e mais plana parecerá determinada área da sua superfície. Se o estado norte-americano de Nebraska estivesse em uma esfera que tivesse apenas algumas centenas de quilômetros de diâmetro, como na figura 10.4a, ele pareceria curvo, mas na superfície da Terra, como sabem todos os habitantes de Nebraska, ele parecerá plano. Se Nebraska aparecesse em uma esfera 1 bilhão de vezes maior do que a Terra, pareceria mais plano ainda. Na cosmologia inflacionária, o espaço esticou-se em um fator tão colossal que o universo observável, a parte dele que podemos ver, é apenas uma pequena região de um cosmo gigantesco. E assim, tal como Nebraska apareceria em uma esfera enorme como a da figura 10.4d, mesmo que o universo como um todo seja curvo, o universo *observável* parecerá praticamente plano.[18]

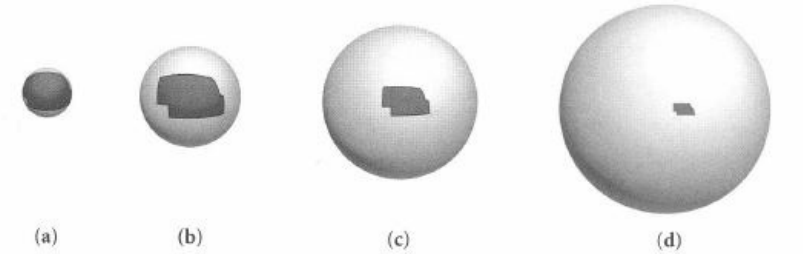


Figura 10.4. *Uma forma de tamanho fixo, como a do estado de Nebraska, nos EUA, parece cada vez mais plana quanto maior for a esfera sobre a qual ela seja aplicada. Nesta analogia, a esfera representa o universo como um todo e Nebraska representa o universo* observável *— a parte que está dentro do nosso horizonte cósmico.*

É como se houvesse potentes ímãs implantados nas botas do nosso montanhista e na montanha por onde ele passa. Mesmo que ele errasse o passo, a atração entre

os ímãs asseguraria que a bota se fixasse bem na crista. De forma análoga, mesmo que o universo primitivo se desviasse significativamente da densidade de matéria/energia, e, portanto, não fosse plano, a expansão inflacionária asseguraria que a parte do espaço à qual temos acesso se encaminhasse rumo à forma plana e que a densidade de matéria/energia à qual temos acesso se encaminhasse ao valor crítico.

PROGRESSO E PREVISÃO

As noções da cosmologia inflacionária quanto ao problema do horizonte e ao problema da planura representam um tremendo progresso. Para que a evolução cosmológica produzisse um universo homogêneo cuja densidade de matéria/energia fosse, ainda que remotamente, próxima à que hoje observamos, o modelo-padrão do Big-Bang requereria uma regulação precisa, inexplicada e quase sobrenatural das condições primitivas. Pode-se tomar essa regulação como algo apenas natural, que não exige explicações, mas a falta delas faz com que a teoria pareça artificial. Ao contrário, independentemente das propriedades específicas da densidade de matéria/energia do universo primitivo, a evolução da cosmologia inflacionária *prevê* que a parte do universo que podemos ver seja praticamente plana; ou seja, *prevê* que a densidade de matéria/energia que observamos seja praticamente igual à densidade crítica.

A independência com relação às propriedades específicas do universo primitivo é um aspecto maravilhoso da teoria inflacionária, porque permite que se façam previsões claras apesar da ignorância a respeito das condições vigentes há tanto tempo. Mas, então, temos que perguntar: como se comportam essas previsões com relação às nossas observações precisas e detalhadas? Os dados observacionais dão apoio à previsão da cosmologia inflacionária de que deveríamos observar um universo plano que contenha a densidade crítica de matéria/energia?

Por muitos anos a resposta parecia ser “não é bem assim”. Inúmeros estudos astronômicos mediram cuidadosamente o montante de matéria/energia que pode ser visto no cosmo, e a resposta encontrada era de 5% da densidade crítica. Esse valor dista muito das densidades enormes ou minúsculas a que o modelo-padrão do Big-Bang leva naturalmente — sem a regulação artificial — e corresponde àquilo a que havia aludido quando disse que as observações estabelecem que a densidade de matéria/energia do universo não é milhares e milhares de vezes maior ou menor do que o valor crítico. Mesmo assim, 5% é bem menos do que os cem previstos pela inflação. Mas já há algum tempo os cientistas vêm alertando para a necessidade de sermos cautelosos ao avaliar esses dados. Os

estudos astronômicos que dão o valor de 5% levaram em conta apenas a matéria e a energia que produzem luz e que podiam, portanto, ser vistas pelos telescópios. E desde algumas décadas antes da descoberta da cosmologia inflacionária existem crescentes indícios de que o universo tem um lado escuro.

PREVISÃO DE ESCURIDÃO

Na década de 1930, Fritz Zwicky, professor de astronomia do Instituto de Tecnologia da Califórnia (um cientista particularmente cáustico, cujo gosto pela simetria levou-o a qualificar os seus colegas como idiotas esféricos, porque, segundo ele, eram idiotas qualquer que fosse o ângulo de observação),[19] percebeu que as galáxias do aglomerado Coma, um conjunto de milhares de galáxias, a uns 370 milhões de anos-luz da Terra, estavam se movendo tão rapidamente que a sua matéria visível não tinha força gravitacional suficiente para mantê-las coesas no aglomerado. As análises mostravam, ao contrário, que muitas dessas galáxias deveriam estar sendo arremessadas para fora do aglomerado, como o que acontece com as gotas de água que saem dos pneus de uma bicicleta em movimento. E no entanto isso não estava acontecendo. Zwicky conjecturou que o aglomerado deveria conter matéria adicional que não emitisse luz, mas que fornecesse a atração gravitacional necessária para que o conjunto não se dispersasse. Os cálculos mostravam que, se essa explicação fosse correta, a grande maioria da massa do aglomerado deveria ser formada por esse material não luminoso. Em 1936, Sinclair Smith, do observatório de Monte Wilson, que estava estudando o aglomerado da constelação Virgo, chegou à mesma conclusão com base em dados similares. Mas como as observações de ambos, assim como de diversos outros que se seguiram a eles, continham várias incertezas, grande parte dos demais cientistas não ficou convencida da existência de uma volumosa proporção de matéria invisível cuja atração gravitacional mantinha coesos os grupos galácticos.

Durante os trinta anos seguintes continuaram a surgir comprovações observacionais da existência de matéria não luminosa,[20] mas foi o trabalho da astrônoma Vera Rubin, da Carnegie Institution, de Washington, em associação com Kent Ford e outros, que de fato resolveu a questão. Rubin e seus colaboradores estudaram o movimento das estrelas em várias galáxias de rotação alta e concluíram que, se o que existe é o que se vê, muitas das estrelas dessas galáxias deveriam estar sendo expelidas. As observações eram conclusivas no sentido de indicar que a matéria galáctica visível não era suficiente para exercer uma atração gravitacional sequer próxima à que seria necessária para impedir que as estrelas mais rápidas escapassem do aglomerado. As análises

demonstraram ainda que as estrelas *permaneceriam* em coesão gravitacional se as galáxias onde elas se encontram estivessem imersas em uma gigantesca esfera de matéria não luminosa (como na figura 10.5), cuja massa total ultrapassasse em muito a do material luminoso da galáxia. E assim, como uma plateia que infere a presença de uma pessoa vestida de negro, embora veja apenas um par de luvas brancas adejando pelo palco escuro, também os astrônomos concluíram que o universo tem de estar repleto de matéria escura — matéria que não se aglomera em estrelas, e portanto não emite luz, e que exerce atração gravitacional sem se fazer visível. Os componentes luminosos do universo — as estrelas — revelaram ser apenas boias de luz em um gigantesco oceano de matéria escura.

Mas se a matéria escura tem de existir para que se produzam os movimentos que se observam nas estrelas e galáxias, de que ela é feita? Até agora, ninguém sabe. A identidade da matéria escura continua a ser um mistério grande e persistente, embora astrônomos e físicos tenham sugerido muitas possibilidades, desde tipos diversos de partículas exóticas a um banho cósmico de miniburacos negros. Mas mesmo sem determinar a sua composição, os astrônomos conseguiram, por meio da análise cuidadosa dos seus efeitos gravitacionais, determinar com significativa precisão a quantidade de matéria escura que está distribuída pelo universo. E a resposta encontrada alcança cerca de 25 por cento da densidade crítica.[21] Desse modo, somada aos 5% fornecidos pela matéria visível, a matéria escura traz a nossa conta para 30% do montante previsto pela cosmologia inflacionária.

É um progresso inegável, mas os cientistas ficaram um longo tempo coçando a cabeça, sem saber onde encontrar os outros 70% do universo, que, caso a cosmologia inflacionária esteja correta, aparentemente desaparecera sem dar explicações. Até que, em 1998, dois grupos de astrônomos chegaram à mesma conclusão chocante, que fecha o círculo dessa história e revela novamente a antevisão de Albert Einstein.

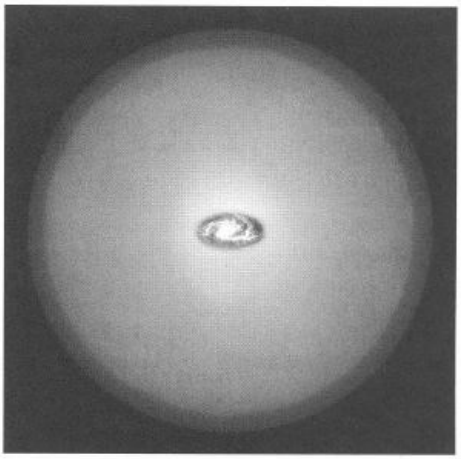


Figura 10.5. *Uma galáxia imersa em uma esfera de matéria escura (em que a matéria escura aparece artificialmente iluminada para tornar-se visível na ilustração).*

O UNIVERSO FUGIDIO

Assim como você às vezes busca a opinião de um outro médico para confirmar um diagnóstico, os físicos também buscam confirmação quando deparam com dados ou teorias que apresentam resultados estranhos. E a confirmação é particularmente convincente quando se chega à mesma conclusão a partir de pontos de vista bem diferentes dos que inspiraram a primeira análise. Quando explicações provenientes de ângulos diferentes convergem, é muito provável que elas tenham acertado o alvo. Era natural, portanto, que os físicos tenham buscado confirmação quando a cosmologia inflacionária produziu, e com firmeza, a estranha indicação de que 70% da massa/energia do universo ainda não tinha sido medida nem identificada. E já havia, fazia algum tempo, a percepção de que a medição do *parâmetro de desaceleração* poderia dar essa confirmação.

A partir do fim do surto inflacionário inicial, a gravidade atrativa normal vem retardando a expansão do espaço. O ritmo em que isso ocorre é o parâmetro de desaceleração. A medição precisa desse parâmetro propiciaria uma avaliação independente da quantidade total da matéria do universo: quanto maior a quantidade de matéria, luminosa ou escura, maior a atração gravitacional e, por conseguinte, mais pronunciada a desaceleração espacial.

Os astrônomos vêm tentando medir a desaceleração do universo há muitas décadas; embora isso pareça ser algo relativamente simples, na prática é um grande desafio. Quando observamos corpos celestes distantes, como galáxias e quasares, vemos a imagem que tinham muito tempo antes: quanto mais longe estejam eles, mais antiga é a imagem que vemos. Assim, se conseguíssemos medir a velocidade com que se afastam de nós, teríamos também uma medida da

velocidade com que o universo se expandia no passado distante. E se conseguíssemos tomar essas medidas com relação a objetos astronômicos situados a diferentes distâncias, teríamos também uma medida da taxa de expansão do universo em diferentes momentos do passado. Comparando essas taxas de expansão, poderíamos determinar como a expansão do espaço se desacelera com o tempo e determinar, assim, o parâmetro de desaceleração.

A execução dessa estratégia de medição requer duas coisas: um meio para determinar a distância de determinado objeto astronômico (para que saibamos a que época do passado a sua imagem corresponde) e um meio para determinar a velocidade com que o objeto se afasta de nós (para que saibamos qual a taxa de expansão espacial naquele momento do passado). Esse último dado é de mais fácil obtenção. Assim como o tom da sirene de um carro de bombeiros diminui quando ele passa por nós e segue o seu caminho, também a frequência de vibração da luz emitida por uma fonte astronômica diminui quando o objeto emissor se afasta. E como a luz emitida pelos átomos de hidrogênio, hélio e oxigênio — que estão entre os elementos que constituem as estrelas, os quasares e as galáxias — já foi cuidadosamente estudada nos laboratórios, a velocidade do objeto pode ser precisamente medida ao se examinarem as diferenças entre a luz recebida e a que vemos nos laboratórios.

Entretanto, o primeiro dado, um método para a determinação precisa da distância a que se encontra um objeto, tem se revelado uma dor de cabeça para os astrônomos. Quanto mais distante um objeto, mais tênue a sua imagem será, mas transformar essa constatação banal em medida quantitativa é difícil. Para calcular a distância de um objeto a partir do seu brilho aparente é preciso conhecer o seu brilho intrínseco — o brilho que ele teria se estivesse ao lado do observador. E é difícil determinar o brilho intrínseco de um objeto que esteja a bilhões de anos-luz de distância. A estratégia normal é buscar um tipo de corpo celeste que, por razões fundamentais da astrofísica, apresenta uma luminosidade-padrão, confiável e constante. Se o espaço estivesse pontilhado de lâmpadas de cem watts, o problema estaria resolvido, porque seria fácil determinar a distância de qualquer lâmpada em função de quão tênue fosse a sua imagem aparente (embora se deva admitir que não seria nada fácil ver uma lâmpada de cem watts a distâncias cósmicas). Como o espaço não tem essa propriedade, que tipo de objeto poderia substituir as lâmpadas de luminosidade-padrão, ou, na linguagem adequada para a astronomia, o que poderia fazer o papel de *velas-padrão* ? Por muitos anos os astrônomos estudaram diversas possibilidades, das quais a mais promissora é uma classe particular de explosões de supernovas.

Quando as estrelas esgotam o seu combustível nuclear, a pressão para fora decorrente das fusões nucleares que ocorriam no seu interior arrefece e a estrela

começa a implodir sob a ação do seu próprio peso. Quando os átomos da estrela colidem uns com os outros, a temperatura sobe rapidamente, disso resultando, por vezes, uma enorme explosão que expele as camadas exteriores da estrela em uma fulgurante demonstração de fogos de artifício celestes.

Essa explosão tem o nome de supernova. Durante algumas semanas, a estrela em explosão pode brilhar como 1 bilhão de sóis. É estonteante: uma única estrela que brilha quase tanto quanto uma galáxia inteira! Diferentes tipos de estrelas — com diferentes tamanhos, diferentes proporções atômicas e assim por diante — dão lugar a diferentes tipos de explosões de supernovas, mas os astrônomos observaram ao longo de muitos anos que certas explosões de supernovas sempre parecem apresentar o mesmo brilho intrínseco. Essas são as explosões de supernovas de *tipo Ia*.

Nesse tipo de explosão, uma estrela anã branca — estrela que esgotou o suprimento de combustível nuclear, mas não tem massa suficiente para produzir uma explosão de supernova por conta própria — suga o material da superfície de outra estrela que a acompanha. Quando a massa da estrela anã alcança determinado valor crítico, cerca de 1,4 vez a massa do Sol, ela sofre uma reação nuclear desenfreada que a transforma em supernova. Como essa explosão ocorre quando a estrela anã alcança a massa crítica, que é sempre a mesma, as características da explosão, inclusive o seu brilho intrínseco, são basicamente as mesmas em todos os casos. Além disso, como as supernovas são fantasticamente poderosas, ao contrário das lâmpadas de cem watts, não só a sua luminosidade é padronizada e confiável, como também pode ser vista claramente através do universo. Por isso elas são as melhores candidatas a velas-padrão.[22]

Na década de 1990, dois grupos de astrônomos, um chefiado por Saul Perlmutter, no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, e o outro por Brian Schmidt, na Universidade Nacional da Austrália, dedicaram-se a determinar a desaceleração do universo — e, com isso, a sua massa/energia total — por meio da medição das velocidades de recessão das supernovas do tipo Ia. A identificação de uma supernova como sendo do tipo Ia é bastante simples porque a luz gerada pela sua explosão segue um padrão característico de forte crescimento seguido de uma redução gradual da intensidade. Mas pegar uma supernova Ia em flagrante está longe de ser simples, porque esse tipo de explosão ocorre em média apenas uma vez em várias centenas de anos em uma galáxia comum. Contudo, graças à técnica inovadora que permite a observação simultânea de milhares de galáxias com o uso de telescópios de grande abertura, as equipes conseguiram encontrar quase cinquenta supernovas do tipo Ia a diferentes distâncias da Terra. Depois de examinar pacientemente as distâncias e as velocidades de recessão de cada uma delas, ambos os grupos chegaram a uma

conclusão totalmente inesperada: desde que o universo tinha cerca de 7 bilhões de anos, a sua taxa de expansão não vem sofrendo desaceleração. Ao contrário, ela está se tornando *mais rápida.*

Os grupos concluíram que a expansão do universo sofreu desaceleração nos primeiros 7 bilhões de anos após o surto inicial, assim como um automóvel diminui a velocidade ao aproximar-se da área de cobrança de pedágio. Isso era o que se esperava. Mas os dados revelaram que, da mesma forma como o motorista que passa pelo pedágio pela via rápida volta a pisar no acelerador, também a expansão do universo vem se acelerando desde então. A taxa de expansão do espaço aos 7 bilhões de anos depois do Big-Bang era *menor* do que a taxa de expansão aos 8 bilhões de anos depois do Big-Bang, a qual era *menor* do que a taxa de expansão aos 9 bilhões de anos depois do Big-Bang e assim por diante, de modo que todas essas taxas eram inferiores à taxa de expansão atual. A desaceleração esperada revelou-se uma aceleração inesperada da expansão espacial.

Como pode ser isso? A resposta constitui a confirmação que se buscava para os 70% que faltavam para compor a massa-energia do universo.

OS 70 POR CENTO QUE FALTAM

Se você voltar sua atenção para 1917, quando Einstein introduziu a constante cosmológica, terá informação suficiente para conjecturar sobre o porquê de o universo estar se acelerando. A matéria e a energia normais dão lugar à gravidade atrativa normal, que desacelera a expansão espacial. Mas, à medida que o universo se expande e as coisas se dispersam, esse impulso de contração gravitacional, ainda que continue atuando no sentido de frear a expansão, vai se enfraquecendo. E isso nos prepara para uma outra decorrência: se o universo realmente tiver uma constante cosmológica — e se a sua magnitude realmente tiver o valor exato —, até 7 bilhões de anos depois do Big-Bang a repulsão gravitacional terá tido intensidade menor do que a da atração gravitacional normal produzida pela matéria comum, causando, assim, uma desaceleração líquida da expansão, o que estaria de acordo com os dados. Mas com o prosseguimento da expansão da matéria comum e a consequente diminuição da sua atração gravitacional, o efeito repulsivo da constante cosmológica (cuja intensidade não se altera com a expansão da matéria) gradualmente vai se tornando maior e *a era da expansão espacial desacelerada terá dado lugar a uma nova era de expansão acelerada.*

Ao final da década de 1990, esse raciocínio e a análise aprofundada dos dados revelados levaram tanto o grupo de Perlmutter quanto o de Schmidt a sugerir que Einstein não cometera um erro, cerca de oito décadas antes, ao introduzir a constante cosmológica nas equações gravitacionais. Nessa linha de pensamento, o universo *efetivamente tem* uma constante cosmológica.[23] A sua ordem de grandeza não é a que Einstein propusera, uma vez que ele estava buscando um universo estático em que a atração e a repulsão gravitacionais se contrabalançassem perfeitamente, enquanto os pesquisadores concluíram que a repulsão predominara durante bilhões de anos. Apesar disso, se a descoberta dos dois grupos continuar a sustentar-se diante dos novos exames e estudos que ora se realizam, veremos que Einstein terá sido capaz de perceber outra característica fundamental do universo, que levou oitenta anos para ser confirmada experimentalmente.

A velocidade de recessão de uma supernova depende da diferença entre a atração gravitacional da matéria comum e a repulsão gravitacional da "energia escura" gerada pela constante cosmológica. Supondo que a quantidade de matéria, tanto a visível quanto a escura, corresponda a cerca de 30% da densidade crítica, os pesquisadores das supernovas concluíram que a expansão acelerada que eles observaram requeria uma força de repulsão produzida por uma constante cosmológica cuja energia escura representaria cerca de 70% da densidade crítica. *Este é um número notável.* Se ele estiver correto, então não só a matéria comum — prótons, nêutrons, elétrons — constitui a ínfima porcentagem de 5% da massa/energia do universo, e não só uma forma ainda não identificada de matéria escura constitui um total pelo menos *cinco vezes maior*, mas, além disso, a *maior parte da* massa/energia total do universo é constituída por uma forma totalmente diferente e misteriosa de energia escura, distribuída por todo o espaço. Se essas ideias estiverem corretas, elas darão um prosseguimento sensacional à revolução de Copérnico. Não só não somos o centro do universo, mas a própria matéria de que somos feitos é apenas uma migalha no oceano cósmico. Se os prótons, nêutrons e elétrons tivessem ficado de fora do projeto inicial, a massa/energia total do universo pouco teria diminuído.

Porém existe uma outra razão igualmente importante para que se diga que 70% é um número notável. O dado de 70% que a constante cosmológica traz para a densidade crítica, somado aos 30% gerados pela matéria comum e pela matéria escura, leva a massa/energia total do universo aos 100% previstos pela cosmologia inflacionária! Assim, a explicação para a repulsão revelada pelos dados das supernovas leva exatamente a um montante de energia escura que explica, por sua vez, os fugidios 70% do universo que a cosmologia inflacionária

procurava incessantemente. As medições das supernovas e a cosmologia inflacionária complementam-se de forma maravilhosa e se confirmam mutuamente.[24]

A combinação dos resultados observacionais das supernovas e as descobertas da cosmologia inflacionária permitem-nos chegar por fim ao seguinte esboço de evolução cósmica, resumido na figura 10.6. No princípio, o campo do inflaton, que estava acima do seu estado de energia mínima, era o portador da energia do universo. Em consequência da sua pressão negativa, o campo do inflaton produziu um enorme surto de expansão inflacionária. Cerca de 10^{-35} segundos depois, quando o valor do campo do inflaton desceu para o fundo da sua bacia de energia potencial, o surto de expansão chegou ao fim e o inflaton liberou a energia que continha produzindo a matéria e a energia comuns. Por muitos bilhões de anos, estes componentes usuais do universo exerceram uma atração gravitacional normal que desacelerou a expansão do espaço. Mas, à medida que o universo crescia e sua densidade se reduzia, a atração gravitacional diminuía. Cerca de 7 bilhões de anos atrás, a atração gravitacional normal tornou-se mais fraca do que a repulsão gravitacional da constante cosmológica, que passou a predominar, e desde então a taxa da expansão espacial tem crescido continuamente.

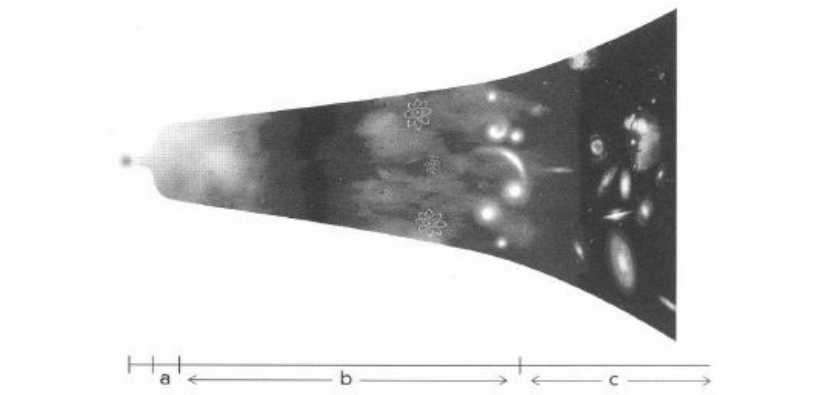


Figura 10.6. *Linha de tempo da evolução cósmica. (a) Surto inflacionário. (b) Evolução do modelo-padrão do Big-Bang. (c) Era de expansão acelerada.*

Daqui a uns 100 bilhões de anos, praticamente todas as galáxias, salvo as mais próximas, serão arremessadas no espaço cada vez mais profundo, a velocidades superiores à da luz, tornando-se, assim, invisíveis mesmo para os mais poderosos telescópios que possamos produzir. Se essas ideias estão corretas, no futuro o universo será um lugar enorme, vazio e solitário.

QUEBRA-CABEÇA E PROGRESSOS

Com essas descobertas, parecia claro que estávamos conseguindo colocar no lugar as peças do quebra-cabeça cosmológico. As perguntas que o modelo-padrão do Big-Bang não conseguira responder — O que deu início à expansão do espaço? Por que a temperatura da radiação cósmica de fundo em microondas é tão uniforme? Por que o espaço parece ter uma forma plana? — foram explicadas pela teoria inflacionária. Mesmo assim, perguntas espinhosas relativas às últimas origens continuam a surgir de forma crescente: existiu uma era anterior ao surto inflacionário? Como era? O que levou um campo do inflaton que estava acima do seu estado de energia mínima a dar início à expansão inflacionária? E a mais nova de todas as perguntas: por que o universo é composto por uma aparente mixórdia de componentes — 5% de matéria comum, 25% de matéria escura e 70% de energia escura? Apesar do fato absolutamente auspicioso de que essa receita cósmica concorda com a previsão da cosmologia inflacionária de que a densidade do universo deve corresponder à densidade crítica, e ainda que ela explique simultaneamente a aceleração da expansão detectada pelos estudos das supernovas, muitos físicos veem com suspeita uma composição tão insólita para o universo. Muitos perguntam por que a composição do universo seria tão complexa. Por que temos um conjunto de ingredientes díspares e em proporções aparentemente aleatórias? Existirá algum modelo ainda não deduzido pelos nossos estudos teóricos que possa dar sentido a essas coisas?

Essas perguntas ainda não tiveram respostas convincentes e estão entre os problemas mais prementes das pesquisas cosmológicas atuais. São lembretes que nos fazem pensar sobre os problemas que ainda temos que resolver para que finalmente possamos dizer que conseguimos desvendar os mistérios da origem do universo. Apesar dos importantes desafios que persistem, a teoria inflacionária é, sem sombra de dúvida, a mais promissora do campo da cosmologia. É certo que a fé que os cientistas depositam na inflação baseia-se nas conquistas que temos discutido. Mas a confiança na cosmologia inflacionária também tem raízes mais profundas. Como veremos no próximo capítulo, diversas outras considerações — derivadas de descobertas observacionais e teóricas — convenceram muitos físicos que trabalham neste campo de que o esquema inflacionário é a contribuição mais importante e duradoura da nossa geração para a ciência cosmológica.

11. Diamantes quânticos no céu

Inflação, agitação quântica e a seta do tempo

A descoberta do esquema inflacionário inaugurou uma nova era nas pesquisas cosmológicas, e milhares de artigos foram escritos a esse respeito nas décadas que se seguiram. Os cientistas exploraram todos os ângulos e todas as brechas possíveis e imagináveis da teoria. Muitos desses trabalhos concentraram-se em detalhes de importância técnica, mas outros lograram fazer novos progressos e revelaram como a inflação não só resolve problemas cosmológicos específicos que estão fora do alcance do modelo-padrão do Big-Bang, mas também propicia novas maneiras de examinar problemas antigos. Nesse contexto, destaco três aspectos — a formação de estruturas aglomeradas como as galáxias; a quantidade de energia necessária para gerar o universo que vemos; e a origem da seta do tempo (de importância primordial para a nossa história) — em que a inflação trouxe um progresso substancial e, segundo alguns, espetacular.
Vejamos.

A ESCRITA QUÂNTICA DO CÉU

A solução dada pela cosmologia inflacionária aos problemas da planura e do horizonte foi, e aliás com justiça, a sua porta de entrada para a fama.
Como vimos, essas foram grandes conquistas. Mas ao longo dos anos, muitos estudiosos passaram a incluir outro dos avanços da inflação no alto da lista das contribuições mais importantes da teoria.
A concepção inovadora a que nos referimos relaciona-se a um ponto sobre o qual, até aqui, preferi que você não pensasse: a que se deve a existência de galáxias, estrelas, planetas e outras aglomerações de matéria no universo? Nos últimos três capítulos, pedi a você que mantivesse o foco nas grandes escalas astronômicas — escalas em que o universo aparece como algo homogêneo, escalas tão amplas que uma galáxia pode ser vista como se fosse uma molécula de H_2O, dentro do copo de água que seria o universo. Entretanto, mais cedo ou mais tarde, a cosmologia tem de considerar o fato de que, quando se examina o universo em escalas mais “finas”, encontram-se estruturas aglomeradas, como as galáxias. E novamente temos um quebra-cabeça.
Se o universo é de fato uniforme, regular e homogêneo nas escalas maiores — o que está de acordo com as observações e constitui dado essencial de todas as

análises cosmológicas —, de onde provêm as aglomerações que aparecem nas escalas menores? O fiel seguidor do modelo-padrão do Big-Bang pode, aqui também, desviar a pergunta recorrendo à existência de condições altamente favoráveis e misteriosamente calibradas no universo primitivo. A formulação desse pensamento poderia ser a seguinte: “Perto do começo de tudo, as coisas eram basicamente regulares e uniformes, mas não *perfeitamente* uniformes. Não sei como as condições se criaram dessa maneira, porém foi assim que aconteceram. Com o tempo, essas pequenas imperfeições, pequenas aglomerações de matéria, cresceram, uma vez que os aglomerados são mais densos do que as regiões que os circundam, exercem maior atração gravitacional e desse modo capturam a matéria que exista em suas proximidades, aumentando com isso o seu tamanho. Ao longo desse processo, os aglomerados adquiriram o tamanho suficiente para formar estrelas e galáxias”. Essa história seria convincente se não fosse por duas razões: a total falta de explicações tanto para a homogeneidade global do momento inicial quanto para as pequenas e tão importantes variações nessa homogeneidade. É aí que a cosmologia inflacionária oferece uma ajuda compensadora. Já vimos que a inflação proporciona uma explicação para a uniformidade em escala global e agora veremos que o poder explicativo da teoria vai ainda mais adiante. De acordo com a cosmologia inflacionária, as variações na uniformidade inicial, que em última análise levaram à formação das estrelas e das galáxias, provêm da *mecânica quântica*.

Essa ideia magnífica resulta da interação de duas áreas aparentemente desconexas da física: a expansão inflacionária do espaço e o princípio da incerteza, da mecânica quântica. O princípio da incerteza nos diz que a precisão com que podem ser determinados certos aspectos físicos do cosmo que são de natureza complementar é afetada por mecanismos compensatórios. O exemplo mais comum (veja o capítulo 4) relaciona-se com a matéria: quanto maior for a precisão com que determinamos a posição de uma partícula, menor será a precisão com que poderemos determinar a sua velocidade. Mas o princípio da incerteza também se aplica aos campos. Por meio do mesmo raciocínio que aplicamos às partículas, o princípio da incerteza implica que, quanto maior for a precisão com que determinemos o valor de um campo em um local do espaço, menor será a precisão com que poderemos determinar a sua taxa de variação naquele local. (A posição de uma partícula e a taxa de variação da sua posição — a sua velocidade — têm, na mecânica quântica, um papel análogo ao do valor de um campo e a taxa de variação desse valor em um dado local do espaço.)

Gosto de resumir o princípio da incerteza dizendo que, em linhas gerais, a mecânica quântica mostra a agitação e a turbulência das coisas. Se a velocidade de uma partícula não puder ser delineada com precisão total, tampouco

poderemos delinear com precisão total onde a partícula estará uma fração de segundo depois, uma vez que a velocidade *agora* determina a posição *depois.* Em certo sentido, a partícula tem liberdade para tomar esta ou aquela velocidade, ou, mais precisamente, para assumir uma mescla de muitas velocidades diferentes, de modo que ela se agitará frenética e aleatoriamente e poderá ir para qualquer lugar. Com relação aos campos, a situação é similar. Se não é possível delinear com precisão total a taxa de variação de um campo, tampouco é possível delinear com precisão total o valor desse campo, em qualquer local específico, mesmo uma fração de segundo depois. Em certo sentido, o campo ondulará, subindo e descendo, tomando esta ou aquela velocidade, ou, mais precisamente, assumirá uma estranha mescla de muitas taxas de variação diferentes, o que faz com que o seu valor sofra uma agitação frenética, difusa e aleatória.

Na nossa vida diária não percebemos essa agitação, seja quanto às partículas, seja quanto aos campos, porque elas ocorrem nas escalas subatômicas. É aqui que a inflação produz o seu grande impacto. O súbito surto da expansão inflacionária esticou o espaço em um fator tão colossal que o que antes era microscópico passou a ser macroscópico. Em um exemplo clássico, os pioneiros[1] da cosmologia inflacionária perceberam que as diferenças aleatórias entre as agitações quânticas que ocorriam em diferentes locais do espaço gerariam pequenas alterações da homogeneidade no domínio microscópico. Em consequência da agitação quântica indiscriminada, as quantidades de energia nesses respectivos lugares seriam ligeiramente diferentes. Com o subsequente surto inflacionário do espaço, essas variações mínimas foram magnificadas a escalas muito maiores do que a do domínio quântico, produzindo, assim, certa proporção de aglomerações, do mesmo modo como pequenas marcas de tinta feitas em um balão de borracha transformam-se em manchas na superfície do balão quando ele é inflado. Os físicos creem ser essa a origem das aglomerações de matéria sobre as quais o fiel seguidor do modelo-padrão do Big-Bang simplesmente limita-se a dizer, sem justificativa, que “foi assim que aconteceu”. A cosmologia inflacionária explica o fato por meio do esticamento enorme das inevitáveis flutuações quânticas: a expansão inflacionária amplia as agitações quânticas, de modo que as variações mínimas que elas geraram na homogeneidade são projetadas por todo o espaço.

Alguns bilhões de anos depois da breve fase inflacionária, essas pequenas aglomerações continuaram a crescer pela ação da gravidade. Tal como na concepção do modelo-padrão do Big-Bang, a atração gravitacional causada pelas aglomerações é maior do que nas áreas circundantes e por isso elas continuam a crescer. Com o tempo, as aglomerações tornaram-se suficientemente grandes

para acumular a matéria que forma as galáxias e as estrelas que as compõem. Por certo, são *muitos* os passos que levam de uma mínima aglomeração a uma galáxia, e muitos desses passos ainda requerem elucidação, mas o esquema global é claro: no mundo quântico, nada é perfeitamente uniforme, por causa da agitação inerente ao princípio da incerteza. E em um mundo quântico que passou por uma expansão inflacionária, essas alterações na uniformidade podem ampliar-se do nível microscópico para escalas imensamente maiores, transformando-se nas sementes de grandes corpos astrofísicos como as galáxias.

Essa é a ideia básica, de modo que, se você quiser, pode saltar o próximo parágrafo. Mas, para os que estão interessados, eu gostaria de dar um pouco mais de precisão ao debate. Lembre-se de que a expansão inflacionária chegou ao fim quando o valor do campo do inflaton caiu para o fundo da bacia de energia potencial e o campo liberou toda a energia e a pressão negativa que continha. Dissemos que isso ocorreu de maneira uniforme por todo o espaço — o valor do inflaton sofreu a mesma evolução em todos os lugares. Isso é o que emerge naturalmente das equações pertinentes. No entanto, isso só é estritamente certo se ignorarmos os efeitos da mecânica quântica. *Em média*, o valor do inflaton realmente caiu para o fundo da fôrma, como se pode esperar de um objeto clássico, como uma bola de gude que desce por uma superfície inclinada. Mas assim como uma rã que desce pela fôrma salta naturalmente de um lado para o outro, à mecânica quântica nos diz que o campo do inflaton também passa por agitações e estremecimentos. No caminho em direção ao fundo da fôrma, esse valor pode, de repente, saltar para cima, aqui, ou para baixo, ali adiante. E por causa dessa agitação, o inflaton alcançou o seu valor de energia mínima em momentos ligeiramente diferentes em cada lugar. Do mesmo modo, a expansão inflacionária terminou em tempos ligeiramente diferentes nos diferentes lugares do espaço, de maneira que a quantidade de expansão espacial variou ligeiramente de um lugar para outro, o que deu origem a alterações na homogeneidade — rugas — em um processo semelhante ao que você vê quando um pizzaiolo abre a massa um pouco mais em um lugar do que em outro, criando irregularidades. A intuição normal indicaria que as agitações decorrentes da mecânica quântica seriam demasiado pequenas para serem relevantes nas escalas astrofísicas. Entretanto, com o surto inflacionário, o espaço expandiu-se a uma taxa tão colossal, dobrando de tamanho a cada 10^{-37} segundos, que mesmo uma diferença mínima na duração da inflação em locais próximos resultou na formação de rugas significativas. Com efeito, os cálculos realizados quanto a modelos específicos da expansão inflacionária revelaram que as desigualdades produzidas dessa forma têm uma tendência a ser grandes demais. Muitas vezes os pesquisadores tiveram de ajustar os detalhes dos modelos inflacionários com

que operavam (o formato preciso da bacia de energia potencial do campo do inflaton) para que as agitações quânticas não produzissem um universo com *demasiadas* aglomerações. Assim, a cosmologia inflacionária proporciona um mecanismo direto que nos permite compreender como, em um universo que na escala máxima parece totalmente homogêneo, surgiram as variações de pequena escala na uniformidade, que se tornaram responsáveis por estruturas aglomeradas como as estrelas e as galáxias.

Segundo a inflação, as mais de 100 bilhões de galáxias que brilham por todo o espaço como diamantes celestes são apenas a escrita da mecânica quântica na enormidade do céu. Para mim, esta ideia é uma das grandes maravilhas da era científica moderna.

A IDADE DE OURO DA COSMOLOGIA

Essas ideias foram comprovadas de maneira espetacular mediante o uso de satélites que realizam observações meticulosas da temperatura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas. Já ressaltei em diversas ocasiões que a temperatura dessa radiação concorda, com notável precisão e em um lugar qualquer do espaço, com a temperatura que apresenta em qualquer outra parte do cosmo. O que ainda não mencionei é que, a partir da quarta casa decimal, as temperaturas nos diferentes lugares começam a divergir. As medições de grande precisão realizadas inicialmente pelo Cobe (Cosmic Background Explorer Satellite), em 1992, e depois pelo WMAP (Wilson Microwave Anisotropy Probe), determinaram que a temperatura pode ser de 2,7249 graus Kelvin em determinado lugar do espaço, de 2,7250 graus Kelvin em outro e ainda de 2,7251 graus Kelvin em um terceiro local.

O mais extraordinário é que essas variações incrivelmente pequenas na temperatura seguem um padrão que pode ser explicado pela ação do mesmo mecanismo que consideramos responsável pela semeadura da formação das galáxias: flutuações quânticas ampliadas pela inflação. A ideia básica é a de que, quando as agitações quânticas mínimas do espaço pré-inflacionário são magnificadas pelo surto expansivo, produzem aquelas pequenas variações de temperatura (os fótons recebidos de uma região de densidade ligeiramente maior gastam mais energia para superar o campo gravitacional ligeiramente mais intenso, resultando daí que a sua energia e a sua temperatura sejam ligeiramente menores do que as dos fótons recebidos de regiões menos densas). Os físicos efetuaram cálculos precisos com base nessa hipótese e elaboraram previsões sobre o comportamento da temperatura da radiação de micro-ondas em diferentes lugares do espaço, como mostra a figura 11.1a. (Os detalhes não são

essenciais, mas o eixo horizontal relaciona-se com a separação angular de dois pontos do espaço e o eixo vertical relaciona-se com a diferença de temperatura entre eles.) A figura 11.1b compara essas previsões com observações de satélites, representadas por pequenos losangos, e, como se pode ver, há um *acordo extraordinário.*

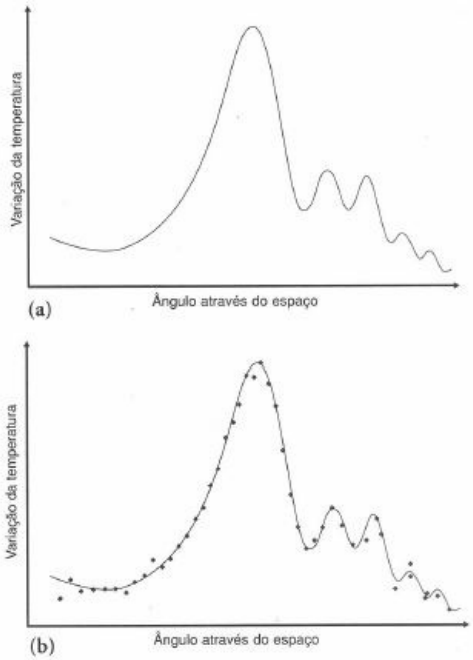


Figura 11.1. (*a*) *Previsão da cosmologia inflacionária para as variações de temperatura da radiação cósmica de fundo em microondas em diferentes pontos do espaço.* (*b*) *Comparação dessas previsões com observações feitas por satélites.*

Espero que você esteja absolutamente surpreso com essa concordância entre a teoria e as observações, porque do contrário isso significa que eu não consegui transmitir a maravilha que é esse resultado. Deixe-me, então, sublinhar mais uma vez o que estamos vendo aqui: os telescópios instalados em satélites mediram recentemente a temperatura dos fótons da radiação de micro-ondas, que chegaram até nós em sua viagem ininterrupta de cerca de 14 bilhões de anos. Verificaram que os fótons provenientes de diferentes direções do espaço têm temperaturas praticamente idênticas, que diferem apenas em décimos de milésimos de grau. Além disso, as observações revelaram que essas diferenças mínimas de temperatura configuram um padrão particular no céu, demonstrado pela progressão ordenada dos losangos na figura 11.1b. Maravilha das maravilhas: os cálculos feitos hoje, usando o esquema inflacionário, conseguem *explicar* o padrão dessas minúsculas variações de temperatura — variações que ocorreram há cerca de 14 bilhões de anos — e, ainda mais, a chave para essa explicação está nas agitações provindas da incerteza quântica. Nossa!

Esse êxito convenceu muitos cientistas a respeito da validade da teoria inflacionária. Também é importante observar que esta e outras medições astronômicas de precisão, que só recentemente se tornaram possíveis, permitiram um amadurecimento da cosmologia, que deixou de ser um campo baseado em especulações e conjecturas e passou a apoiar-se firmemente em observações — a conquista de uma maioridade que levou muitos estudiosos a referir-se à nossa era como a Idade de Ouro da cosmologia.

A CRIAÇAO DE UM UNIVERSO

Diante de tais progressos, os físicos ficaram motivados para investigar até onde a cosmologia inflacionária pode chegar. Será que é capaz, por exemplo, de resolver o último dos mistérios, encapsulado na pergunta de Leibniz sobre o porquê da própria existência do universo? Bem, pelo menos no que diz respeito ao que é possível saber hoje, isso é pedir demais. Mesmo que uma teoria cosmológica conseguisse avançar na resposta a essa pergunta, teríamos que perguntar o porquê da relevância dessa teoria em particular — suas premissas, dados e equações —, com o que estaríamos simplesmente empurrando a pergunta um passo mais para trás. Se a lógica pura pudesse explicar-nos por que existe o universo e por que ele é comandado pelo conjunto singular de leis que conhecemos e constituído pelos componentes específicos que observamos, talvez tivéssemos uma história convincente. Mas até agora isso é um sonho.

Uma pergunta correlata e algo menos ambiciosa, e que também tem sido formulada das mais variadas maneiras através dos tempos, é: de onde provém toda a massa/energia que forma o universo? Neste caso, embora a cosmologia inflacionária não propicie uma resposta completa, pelo menos ela coloca a pergunta sob um novo ângulo.

Para melhor compreender, pense em uma caixa enorme e flexível, cheia de milhares de crianças que pulam e correm sem parar. Imagine que a caixa é completamente impermeável, de modo que nenhum calor e nenhuma energia podem escapar, mas que, como é flexível, as paredes podem esticar-se. Como as crianças estão permanentemente chocando-se contra as paredes — centenas a cada momento e centenas mais no momento seguinte —, a caixa se expande de forma progressiva. Ora, como as paredes são impermeáveis, você poderia esperar que a energia total representada pelas crianças em constante agitação permaneça integralmente no interior da caixa. Afinal, para onde mais poderia ela ir? Bem, embora essa seja uma proposição razoável, não é totalmente verdadeira. *Existe* um lugar para onde ela pode ir. As crianças gastam energia cada vez que se chocam com as paredes e uma boa parte dessa energia é transferida para o

movimento das paredes. A própria expansão da caixa absorve e portanto drena a energia das crianças.

Imagine agora que algumas das crianças tenham decidido mudar um pouco as coisas. Elas amarram uns elásticos enormes entre as paredes com que se defrontam, de modo que exerçam sobre as paredes uma pressão negativa, para dentro, a qual exerce um efeito igual e de sentido contrário ao da pressão positiva, para fora, provocada pelo movimento das próprias crianças. Em vez de transferir energia para a expansão da caixa, a pressão negativa dos elásticos retira energia dessa expansão. A expansão da caixa faz com que os elásticos fiquem cada vez mais tensos, o que significa que são *eles* que retêm níveis crescentes de energia.

É claro que não estamos interessados na expansão da caixa, e sim na expansão do universo. E as nossas teorias nos informam que o espaço não está cheio de crianças agitadas e de elásticos, mas sim, dependendo da época cosmológica, permeado por um oceano uniforme de campo do inflaton, ou por um conjunto de partículas comuns (elétrons, fótons, prótons etc.). Contudo, uma simples observação nos permite transportar para a cosmologia as conclusões que tiramos com relação à caixa. Assim como o movimento rápido das crianças trabalha contra a resistência exercida pelas paredes em expansão, também o movimento rápido das partículas do universo trabalha contra uma força centrípeta à medida que o universo se expande: a força da gravidade. Isso sugere (e a matemática confirma) que existe uma analogia entre o universo e a caixa, colocando-se a força da gravidade no papel desempenhado pelas paredes.

Portanto, do mesmo modo que a energia total incorporada pelas crianças diminui porque é continuamente transferida para as paredes da caixa à medida que ela se expande, também a energia total transportada pelas partículas de matéria comum e pela radiação diminui porque é continuamente *transferida para a gravidade* à medida que o universo se expande. Por outro lado, vimos que, assim como os elásticos exercem uma pressão negativa dentro da caixa que se expande, também o campo do inflaton uniforme exerce uma pressão negativa dentro do universo que se expande. Logo, assim como a energia total incorporada nos elásticos aumenta com a expansão da caixa porque eles extraem energia das paredes, também a energia total incorporada pelo campo do inflaton aumenta com a expansão do universo, porque ele *ganha energia a partir da gravidade.* Em resumo: *à medida que o universo se expande, a matéria e a radiação perdem energia para a gravidade, enquanto um campo do inflaton ganha energia a partir da gravidade.*(embora útil, a analogia dos elásticos não é perfeita. A pressão negativa e centrípeta exercida pelos elásticos impede a expansão da caixa, enquanto a pressão negativa do inflaton estimula a expansão do espaço. Essa diferença fundamental ilustra o esclarecimento a que dei ênfase na

página 324: na cosmologia não é verdade que uma pressão negativa uniforme promova a expansão (só as diferenças de pressão resultam em forças, de maneira que a pressão uniforme, positiva ou negativa, *não* exerce nenhuma força). Ao contrário, a pressão, como a massa, dá origem à força gravitacional. E a pressão negativa dá origem à força gravitacional repulsiva que promove a expansão. Isso não afeta as nossas conclusões. À medida que o universo se expande, a perda de energia dos fótons pode ser observada diretamente porque o seu comprimento de onda se amplia — sofre um *desvio para o vermelho* —, e quanto maior for o comprimento de onda de um fóton, menos energia ele terá. Os fótons da radiação cósmica de fundo em micro-ondas sofreram esse desvio para o vermelho por cerca de 14 bilhões de anos, o que explica o seu comprimento de onda longo — micro-onda — e a sua temperatura baixa. A matéria sofre uma perda similar da sua energia cinética (energia proveniente do movimento das partículas), mas a energia total acumulada na massa das partículas (a *energia de repouso*, que é equivalente à sua massa, quando em repouso) permanece constante).

A importância crucial dessas observações torna-se clara quando tratamos de explicar a origem da matéria e da radiação que compõem as galáxias, as estrelas e tudo o mais que existe no cosmo. No modelo-padrão do Big-Bang, a massa/energia transportada pela matéria e pela radiação decresce gradualmente com a expansão do universo, de modo que a massa/energia do universo primitivo era muito maior do que a que vemos hoje. Assim, em vez de oferecer uma explicação para a origem de toda a massa/energia atualmente existente, o modelo-padrão do Big-Bang perde-se em uma batalha infindável: quanto mais se recua no tempo, mais massa/energia haverá, aguardando explicações.

Na cosmologia inflacionária, contudo, o oposto é a regra. Lembre-se de que a teoria inflacionária argumenta que a matéria e a radiação foram produzidas ao final da fase inflacionária, quando a energia acumulada pelo campo do inflaton foi liberada em consequência de ele ter caído da superfície mais alta para o fundo da bacia de energia potencial. A questão que se coloca, portanto, é a de saber se a teoria é capaz de explicar como o campo do inflaton acumulou a quantidade *estupenda* de massa/energia necessária para produzir a matéria e a energia que hoje existem.

A resposta é que a inflação pode fazê-lo, e sem nenhum esforço. Como acabamos de explicar, o campo do inflaton é um parasita gravitacional — que se alimenta da gravidade — e, portanto, a energia total transportada por ele aumenta com a expansão do espaço. Para falar de maneira mais precisa, a análise matemática revela que a *densidade* de energia permaneceu constante durante toda a fase inflacionária de expansão rápida, o que significa que a energia total nele incorporada cresceu na proporção direta do volume do espaço por ele preenchido. No capítulo anterior vimos que o tamanho do universo multiplicou-se por um fator de pelo menos 10^{30} durante a inflação, o que significa que o volume do universo multiplicou-se por um fator de pelo menos $(10^{30})^3 = 10^{90}$. Em consequência, a energia acumulada no campo do inflaton multiplicou-se por esse mesmo fator enorme: no fim da fase inflacionária, cerca de apenas 10^{-35}

segundos depois de ter começado, a energia como campo do inflaton cresceu em um fator de pelo menos 10^{90}. *Isso significa que, ao iniciar-se a inflação, o campo do inflaton não precisava ter muita energia, uma vez que a enorme expansão que ele estava a ponto de gerar amplificaria deforma incrível a energia por ele transportada.* Cálculos simples revelam que uma quantidade mínima de matéria, com um diâmetro da ordem de 10^{-26} centímetros, permeado por um campo do inflaton uniforme — e com um peso de apenas *dez quilos* —, seria suficiente para adquirir, na fase inflacionária que se seguiria, toda a quantidade de energia que vemos no universo de hoje.[2]

Assim, ao contrário do que diz o modelo-padrão do Big-Bang, segundo o qual a massa/energia total do universo primitivo seria maior do que o que se pode expressar com as palavras, a cosmologia inflacionária, ao "garimpar" a própria gravidade, pode produzir toda a matéria e toda a energia normais do universo a partir de um mínimo grão de dez quilos de espaço permeado de inflaton. Evidentemente, isso não dá uma resposta à pergunta de Leibniz, sobre por que, afinal, existem as coisas, em vez do nada, já que ainda não explicamos por que existe o inflaton e mesmo o espaço que ele ocupa. Mas a "coisa" que precisa ser explicada tem a massa bem menor do que o meu cachorro, e este é, sem dúvida, um ponto de partida bem diferente do que o proposto pelo modelo-padrão do Big-Bang (alguns pesquisadores, inclusive Alan Guth e Eddie Farhi, investigaram hipoteticamente a possibilidade de se criar um novo universo em laboratório, sintetizando-se um grão de campo do inflaton. Além do fato de que não dispomos ainda de verificação experimental da existência do campo do inflaton, deve-se também observar que os dez quilos de campo do inflaton teriam de estar compactados em um espaço mínimo, de cerca de 10^{26} centímetros de diâmetro, cuja densidade seria, portanto, enorme — algo como 10^{67} vezes maior do que a densidade de um núcleo atômico — o que é muito superior ao que podemos produzir, seja hoje, seja, talvez, em qualquer época).

INFLAÇAO, REGULARIDADE E A SETA DO TEMPO

Talvez o meu entusiasmo tenha denunciado a minha inclinação, mas dentre todos os progressos alcançados pela ciência na nossa era, os avanços da cosmologia são os que mais me enchem de admiração e humildade. Acho que nunca perdi o vivo interesse com que li pela primeira vez, anos atrás, a literatura básica sobre a relatividade geral e percebi que deste nosso cantinho no espaço-tempo podemos aplicar a teoria de Einstein e conhecer a evolução de todo o cosmo. Agora, algumas décadas depois, o progresso tecnológico está possibilitando submeter essas propostas, antes abstratas, a respeito do comportamento do universo nos seus primeiros momentos ao teste da verificação observacional e as teorias *funcionam de verdade.*

Lembre-se, contudo, de que, além da relevância global da cosmologia para a história do espaço e do tempo, os capítulos 6 e 7 nos levaram ao estudo do início do universo com um propósito específico: conhecer a origem da seta do tempo. Lembre-se de que naqueles capítulos vimos que o único esquema convincente de que dispomos para explicar a seta do tempo é o de que o universo primitivo tivesse um grau de ordem extremamente alto, ou seja, um grau de entropia extremamente baixo, o que possibilitou um futuro com entropia crescente. Assim como as páginas soltas de *Guerra e paz* não poderiam desordenar-se cada vez mais se não tivessem estado ordenadas inicialmente, também o universo não teria a possibilidade de desordenar-se cada vez mais — como o leite que se derrama, os ovos que se quebram e as pessoas que envelhecem —, a menos que tivesse tido uma configuração altamente ordenada no início. O quebra-cabeça, neste caso, é explicar como se formou esse ponto de partida com ordem alta e entropia baixa.

A cosmologia inflacionária nos oferece um progresso substancial, mas permita-me recordar o quebra-cabeça com uma precisão um pouco maior, para ajudar a sua memória.

Há fortes indícios e pouca dúvida de que no início da história do universo a matéria estava distribuída de maneira uniforme pelo espaço. Normalmente, isso seria caracterizado como uma configuração de alta entropia — como quando as moléculas de dióxido de carbono de uma lata de Coca-Cola se distribuem de maneira uniforme por toda a sala —, o que seria um fato comum, que até dispensaria explicações específicas. Mas quando a gravidade impera, como é o caso quando se considera o universo como um todo, a distribuição uniforme da matéria é algo raro, constituindo uma configuração de baixa entropia e de alto ordenamento, porque a gravidade leva a matéria a formar aglomerados. Do mesmo modo, uma curvatura espacial regular e uniforme também tem graus muito baixos de entropia e é altamente ordenada, em comparação com uma curvatura espacial imprevisivelmente irregular. (Assim como há múltiplas maneiras em que as páginas de *Guerra e paz* se desordenam, mas uma única em que elas se ordenam, também há *muitas* maneiras em que o espaço pode ter uma forma desordenada e não-uniforme e muito poucas em que ele se apresenta de maneira totalmente ordenada, regular e uniforme.) Ficamos, assim, com o enigma: por que o universo tinha uma distribuição uniforme e pouco entrópica (altamente ordenada) de matéria em vez de ter uma distribuição aglomerada e muito entrópica (altamente desordenada), como no caso de uma população diversificada de buracos negros? E por que a curvatura do espaço era regular, ordenada e uniforme, com altíssimo grau de precisão, em vez de estar infestada

com uma pluralidade de deformações e curvas extremas, como as que são geradas por buracos negros?
Paul Davies e Don Page[3] foram os primeiros a discutir os importantes avanços propiciados pela cosmologia inflacionária na análise dessas questões. Para acompanhar a discussão, lembre-se de que uma premissa essencial do quebra-cabeça é a de que, uma vez formado um aglomerado, em um lugar qualquer, a sua maior ação gravitacional atrai ainda mais matéria, com o que o aglomerado cresce. De modo similar, uma vez formada uma ruga no espaço, em um lugar qualquer, a sua maior ação gravitacional tende a torná-la mais pronunciada, o que leva a uma curvatura espacial irregular e altamente não-uniforme. Quando a gravidade impera, as configurações normais, ordinárias e com alta entropia são aglomeradas e irregulares.

Mas observe o seguinte: esse raciocínio depende inteiramente da natureza *atrativa* da gravidade comum. As irregularidades e os aglomerados crescem porque eles exercem uma forte *atração* sobre o material circundante, incorporando-o ao aglomerado. Durante a breve fase inflacionária, contudo, a gravidade foi *repulsiva*, e isso modifica completamente o quadro. Veja a forma do espaço. A enorme ação expansiva da gravidade repulsiva levou o espaço a inflar-se tão rapidamente que quaisquer curvas e irregularidades iniciais desapareceram com a expansão, assim como as rugas e dobras de um balão vazio desaparecem quando ele é inflado (não confunda: o esticamento inflacionário das agitações quânticas que discutimos na última seção produziu uma não-uniformidade minúscula e inevitável, de uma quantidade de cerca de 1/100 000. Mas essa não-uniformidade mínima manifestou-se em um universo globalmente regular. O que estamos descrevendo agora é o surgimento da uniformidade global). E mais: como o volume do espaço incrementou-se em um fator colossal durante o breve período inflacionário, a densidade de qualquer aglomerado de matéria ficou completamente diluída nesse processo, do mesmo modo como a densidade de peixes do seu aquário também se diluiria se, de repente, o volume do aquário se tornasse igual ao de uma piscina olímpica. Assim, embora a gravidade atrativa faça crescer os aglomerados de matéria e as rugas do espaço, a gravidade repulsiva produz o efeito oposto: ela os faz diminuir, o que leva a um resultado cada vez mais regular e uniforme.
Desse modo, ao final do surto inflacionário, o tamanho do universo tinha aumentado fantasticamente, as irregularidades da curvatura do espaço tinham ficado distribuídas na imensidão do crescimento, e quaisquer aglomerados iniciais haviam sofrido tal diluição que se tornaram irrelevantes. Além disso, ao descer para o fundo da bacia de energia potencial, o que pôs fim ao surto inflacionário, o campo do inflaton converteu a energia que continha em um

banho praticamente uniforme de partículas de matéria comum por todo o espaço (uniforme até o nível mínimo, mas crucial, das alterações na homogeneidade produzidas pelas agitações quânticas). Em conjunto, tudo isso soa como um grande progresso. O resultado alcançado graças à inflação — *uma expansão espacial regular e uniforme povoada por uma distribuição de matéria quase uniforme* — coincidiu exatamente com o que buscávamos explicar. Corresponde exatamente à configuração de baixa entropia de que necessitamos para explicar a seta do tempo.

ENTROPIA E INFLAÇAO

O progresso é realmente significativo. Mas há duas questões que permanecem.
Em primeiro lugar, estamos aparentemente concluindo que o surto inflacionário homogeneíza as coisas e, portanto, reduz a entropia total, incorporando um mecanismo físico — e não apenas uma aberração estatística — que parece violar a segunda lei da termodinâmica. Se fosse esse o caso, ou a nossa interpretação da segunda lei ou o nosso raciocínio atual teriam de estar errados. Na verdade, contudo, não temos de enfrentar nenhum desses problemas porque a entropia total não diminui em consequência da inflação. O que acontece durante o surto inflacionário é que a entropia total aumenta, mas *muito menos do que poderia ter aumentado.* Ao final da fase inflacionária, o espaço tinha se expandido de forma homogênea e, assim, a contribuição gravitacional para a entropia — a entropia associada com a possível forma irregular, desordenada e não uniforme do espaço — foi mínima. No entanto, quando o campo do inflaton caiu para o fundo da fôrma e liberou a energia que nele estava acumulada, estima-se que tenha produzido cerca de 10^{80} partículas de matéria e radiação. Esse número enorme de partículas, como um livro com um número enorme de páginas, contém uma quantidade enorme de entropia. Assim, ainda que a entropia gravitacional tenha caído, o aumento da entropia proveniente da produção de todas essas partículas mais do que compensou aquela queda. A entropia total do universo aumentou, tal como se podia esperar em razão da segunda lei.
Mas eis o ponto importante: ao tornar o espaço regular e ao proporcionar um aglomerado homogêneo, uniforme e com baixa entropia, o surto inflacionário criou uma enorme *diferença* entre o que foi a contribuição da entropia a partir da gravidade e o que ela *poderia* ter sido. A entropia global cresceu durante a inflação, porém em uma proporção diminuta quanto ao que ela poderia ter crescido. É nesse sentido que a inflação gerou um universo com baixa entropia: ao findar a inflação, a entropia havia crescido, mas em um fator que de modo

algum pode ser comparado ao fator multiplicador da expansão espacial. Se assemelharmos a entropia a um imposto territorial, por exemplo, seria como se a cidade de Nova York adquirisse o deserto do Saara. O total da arrecadação do imposto territorial aumentaria, contudo em uma proporção ínfima, se comparada ao aumento da superfície territorial.

Desde o fim da expansão inflacionária, a gravidade vem buscando compensar a diferença na entropia. Todo aglomerado — seja galáxia, estrela, planeta ou buraco negro — que a gravidade tenha conseguido subtrair da uniformidade (a partir das alterações mínimas na uniformidade produzidas pelas agitações quânticas) contribui para aumentar a entropia e para que a gravidade se aproxime um pouco mais da realização do seu potencial de entropia. Nesse sentido, a inflação é um mecanismo que produziu um grande universo com um grau relativamente baixo de entropia, preparando assim o cenário para a formação dos aglomerados gravitacionais que, nos bilhões de anos que se seguiram, deram origem ao que hoje contemplamos. Dessa maneira, a cosmologia inflacionária dá direção à seta do tempo, ao gerar um passado com um grau sumamente baixo de entropia gravitacional. O futuro é a direção em que essa entropia cresce.[4] A segunda questão fica clara ao prosseguirmos no caminho pelo qual a seta do tempo nos conduziu, no capítulo 6. Do ovo à galinha, da galinha ao que ela comeu, daí ao reino vegetal, ao calor e à luz do Sol e assim por diante, até o Big-Bang e o seu gás primordial de distribuição uniforme. Seguimos a evolução do universo, aprofundando-nos em um passado que se apresenta cada vez mais ordenado à medida que nos aproximamos do início, o que faz com que o quebra-cabeça da baixa entropia recue também cada vez mais nessa direção. Agora percebemos que um estágio ainda anterior da expansão inflacionária pode explicar de maneira natural a regularidade e a uniformidade do resultado da explosão inicial. Mas que se pode dizer da própria inflação? Podemos explicar o elo inicial da cadeia que seguimos? Podemos explicar por que se deram as condições apropriadas para que ocorresse o surto inflacionário?

Essa é uma questão de importância singular. Por mais que a cosmologia inflacionária resolva, em teoria, uma quantidade de quebra-cabeças, esses avanços conceituais seriam irrelevantes se a era da expansão inflacionária nunca tivesse ocorrido. Além disso, como não podemos regressar ao universo primitivo e comprovar diretamente se a inflação ocorreu ou não, só podemos avaliar se efetivamente fizemos progresso na identificação da seta do tempo se determinarmos a *verossimilhança* da ocorrência das condições necessárias para o surto inflacionário. Os cientistas se inquietam com o fato de que o modelo-padrão do Big-Bang depende de condições iniciais homogêneas de regulação muito difícil, as quais, embora motivadas pelas observações, carecem de

explicação teórica. O estado de baixa entropia do universo primitivo tem de ser apenas suposto, e isso é sumamente insatisfatório, assim como é insatisfatório que a seta do tempo tenha de ser imposta ao universo, sem explicações. À primeira vista, a inflação nos oferece um avanço ao mostrar que aquilo que no modelo-padrão do Big-Bang era uma premissa não explicada é, de fato, uma consequência natural da evolução inflacionária. Mas se o desencadeamento da inflação também requer condições altamente especiais de entropia extremamente baixa, estaríamos, na verdade, no mesmo lugar. Teríamos só trocado as condições especiais do Big-Bang pelas condições especiais necessárias para desencadear a inflação, e o quebra-cabeça da seta do tempo continuará a ser um quebra-cabeça.

Quais são as condições necessárias para a inflação? Vimos que a expansão inflacionária é o resultado inevitável da permanência do valor do campo do inflaton, ainda que por um momento e em uma região mínima, em um ressalto de alta energia da sua bacia de energia potencial. Nossa tarefa é, portanto, determinar o grau de probabilidade de que essa configuração necessária para o desencadeamento da inflação tenha efetivamente ocorrido. Se essa probabilidade for alta, estaremos bem. Mas se a obtenção das condições necessárias for extraordinariamente improvável, teremos apenas transferido para outro lugar a questão da seta do tempo — encontrar uma explicação para a configuração de baixa entropia do campo do inflaton que deu início ao jogo.

Primeiramente descreverei o pensamento atual sobre essa questão da maneira mais otimista. Em seguida voltarei aos elementos essenciais da história que permanecem sombrios.

BOLTZMANN REVISITADO

Como mencionamos no capítulo anterior, a melhor maneira de compreender o surto inflacionário é concebê-lo como um evento que tem lugar em um universo preexistente, e não como a própria criação do universo. Embora não saibamos com certeza como era o universo durante essa era pré-inflacionária, vejamos quanto poderemos avançar se supusermos que as coisas estavam em um estado absolutamente comum de alta entropia. Especificamente, imaginemos que o espaço pré-inflacionário primordial estivesse cheio de dobras e irregularidades e que o campo do inflaton também estivesse altamente desordenado, com o seu valor saltando de um lado para o outro, como a rã na fôrma quente.

Assim como, munido de paciência, você pode esperar que a máquina caça-níqueis em que você está jogando mais cedo ou mais tarde apresente a configuração de três ouros, também podemos esperar que, mais cedo ou mais

tarde, uma flutuação aleatória nesta arena turbulenta e de alta energia que era o universo primitivo leve o valor do campo do inflaton a saltar, em um recanto qualquer do espaço, para o nível correto e uniforme que dá início a um surto inflacionário expansivo. Como explicamos na seção anterior, os cálculos indicam que esse recanto de espaço não precisa ser grande — basta ter 10^{26} centímetros de diâmetro — para que a subsequente expansão cosmológica (a expansão inflacionária seguida da expansão do modelo-padrão do Big-Bang) o amplie até ocupar um volume maior do que o do universo que hoje vemos. Assim, em vez de supor, ou simplesmente declarar, que as condições do universo primitivo eram adequadas para que ocorresse a expansão inflacionária, segundo essa maneira de ver as coisas, uma mera flutuação ultramicroscópica com o peso de apenas dez quilos e que tenha ocorrido em um ambiente comum e corrente de desordem deu lugar às condições necessárias.

E assim como a máquina caça-níqueis também gerará uma grande variedade de resultados sem prêmios, outros tipos de flutuação do inflaton terão também ocorrido em outras regiões do espaço primordial. Na maior parte dos casos, as flutuações não terão alcançado o valor correto, ou não terão sido suficientemente uniformes para que ocorresse a expansão inflacionária. (Mesmo em uma região cujo diâmetro é de apenas 10^{26} centímetros, o valor de um campo pode variar fortemente.) A única coisa que nos interessa é que houve um grão que produziu o surto inflacionário que homogeneizou o espaço e propiciou o primeiro elo da cadeia de baixa entropia que, em última análise, gerou o cosmo que conhecemos. Já que o único universo que conhecemos é o nosso, só precisamos de que a máquina caça-níqueis acerte uma vez.[5]

Como estamos recuando na história do universo até uma flutuação estatística no caos primordial, esta explicação para a seta do tempo compartilha alguns aspectos que aparecem na proposta original de Boltzmann. Lembre-se do capítulo 6, em que Boltzmann sugere que tudo o que agora vemos é consequência de uma flutuação rara, mas muito possível, a partir da desordem total. O problema da formulação original de Boltzmann, contudo, está em que ela não explica por que a flutuação aleatória chegou a projetar-se tanto e a produzir um universo enormemente mais ordenado do que seria necessário, até mesmo para gerar a vida como a conhecemos. Por que o universo é tão vasto, com bilhões e bilhões de galáxias, cada uma das quais com bilhões e bilhões de estrelas, quando ele poderia ter sido drasticamente mais modesto, tendo apenas algumas galáxias, ou mesmo uma só?

Do ponto de vista estatístico, uma flutuação mais modesta, que produzisse alguma ordem, mas não tanta quanto a que hoje vemos, teria *muito* mais possibilidades de ocorrer. Além disso, como na média a entropia sempre

aumenta, o raciocínio de Boltzmann sugere que seria muito mais “provável” que todas as coisas que vemos hoje tivessem surgido a partir de um raro salto estatístico para uma quantia menor de entropia que houvesse ocorrido *agora mesmo.* Lembre-se do porquê: quanto mais longe no passado a flutuação tenha ocorrido, menor tem de ser a quantia de entropia que ela teria de atingir. (A entropia começa a subir após qualquer queda a um nível inferior, como na figura 6.4, de maneira que, se a flutuação tivesse ocorrido ontem, ela teria de alcançar o nível de entropia de ontem; e se tivesse ocorrido há 1 bilhão de anos, teria de alcançar o nível de entropia ainda mais baixo que vigia naquela época.) Portanto, quanto mais longe no passado, mais drástica e improvável teria de ser a flutuação requerida. Assim, seria muito mais “provável” que o salto tivesse ocorrido recentemente. Mas, se aceitássemos essa conclusão, não poderíamos confiar nas nossas memórias, nos nossos registros, nem mesmo nas leis da física que sustentam esta própria discussão — uma posição completamente intolerável.

A tremenda vantagem da versão inflacionária da ideia de Boltzmann é que uma *pequena* flutuação no princípio — um discreto salto para as condições favoráveis, em um grão *mínimo* do espaço — leva inevitavelmente ao universo enorme e ordenado que conhecemos. Uma vez estabelecida a expansão inflacionária, o pequeno grão crescerá *inexoravelmente* a escalas pelo menos tão grandes quanto o universo que hoje vemos e, portanto, não há mistério no fato de que o universo não seja mais “modesto”, e sim vasto e repleto de um enorme número de galáxias. Desde o início, a inflação proporcionou ao universo um grande negócio. Um salto para uma entropia menor em um grãozinho de espaço foi transformado pela expansão inflacionária na vastidão atual do cosmo. E, o que é mais importante, a expansão inflacionária não nos produziu um universo enorme qualquer, mas sim o nosso enorme universo: a inflação explica a forma do espaço, a uniformidade em grande escala e até mesmo as irregularidades nas escalas “menores”, como as galáxias, e as variações na temperatura da radiação cósmica de fundo. A inflação concentra em uma única flutuação que gera baixa entropia uma abundância de explicações e previsões.

De modo que, afinal, pode ser que Boltzmann tivesse razão. Tudo o que vemos pode ser o resultado de uma flutuação casual a partir de um estado altamente desordenado de caos primordial. Com a vantagem de que, com esta interpretação das suas ideias, podemos confiar nos nossos registros e memórias: a flutuação não ocorreu agora mesmo. O passado aconteceu de verdade. Nossos registros se referem a coisas que realmente ocorreram. A expansão inflacionária magnificou um grão mínimo de ordem no universo primitivo — levou o universo a uma fantástica expansão com entropia gravitacional mínima — de modo que os 14

bilhões de anos posteriores de aglomeração de matéria, que formaram galáxias, estrelas e planetas, não representam nenhum quebra-cabeça.
Com efeito, essa teoria ainda nos informa de algo mais. Assim como é possível ganhar o grande prêmio em mais de uma das máquinas caça-níqueis de um cassino, também, no estado primordial de alta entropia e caos global, não há nenhuma razão para que as condições necessárias à expansão inflacionária ocorressem apenas em um único grãozinho do espaço. Ao contrário, como Andrei Linde sugeriu, pode ter havido muitos grãozinhos, espalhados em distintos lugares, que tenham sofrido uma expansão inflacionária capaz de tornar o espaço regular. Se assim tiver sido, o nosso universo seria apenas um entre muitos, que brotaram — e talvez continuem a brotar — quando as flutuações ocasionais criaram as condições adequadas para um surto inflacionário, como ilustra a figura 11.2. Como esses outros universos estariam, ao que tudo indica, para sempre separados de nós, é difícil imaginar como se poderia demonstrar a veracidade dessa visão de um "multiverso". Mas como esquema conceituai, ele é rico e sedutor. Entre outras coisas, ele sugere uma possível mudança na nossa maneira de ver a cosmologia. No capítulo 10, descrevi a inflação como uma "saída" para a teoria-padrão do Big-Bang, na qual o *bang* se identifica com um surto virtualmente instantâneo de expansão rápida. Mas se pensarmos na germinação inflacionária de cada um dos universos da figura 11.2 como um outro Big-Bang, então a inflação pode ser vista como o esquema cosmológico geral dentro do qual as evoluções do tipo do Big-Bang ocorrem, bolha por bolha. Assim, em vez de incorporarmos a inflação à teoria-padrão do Big-Bang, esta teoria é que seria incorporada à inflação.

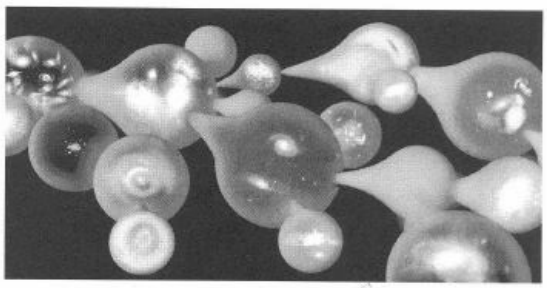


Figura 11.2. *A inflação pode ocorrer repetidamente, germinando novos universos a partir dos mais antigos.*

A INFLAÇAO E O OVO

Então, por que vemos um ovo espatifar-se, mas não o vemos desespatifar-se? De onde vem a seta do tempo que todos conhecemos por experiência? Vejamos o que nos diz o nosso enfoque. Por meio de uma flutuação casual, mas que poderia

ser esperada, que ocorreu em um estado primordial sem particularidades e com alta entropia, um mínimo grão de espaço, pesando dez quilos, alcançou as condições que o levaram a um breve surto de expansão inflacionária. O tremendo aumento de volume resultou em que o espaço expandiu-se demais, o que o tornou extremamente regular. Quando o surto concluiu-se, o campo do inflaton liberou a sua energia colossalmente magnificada, enchendo o espaço, de maneira quase uniforme, com matéria e radiação. À medida que a gravidade repulsiva do inflaton diminuía, a gravidade atrativa normal foi se tornando dominante. E, como vimos, a gravidade atrativa explora as irregularidades mínimas causadas pelas agitações quânticas para formar aglomerados, que dão origem às galáxias e às estrelas, o que leva à formação do Sol, da Terra, do resto do sistema solar e das outras características do universo que observamos. (Como já foi discutido, uns 7 bilhões de anos depois do Big-Bang, a gravidade repulsiva voltou a tornar-se dominante, mas isso só é relevante para as escalas cósmicas máximas e não exerce nenhum impacto sobre entidades menores, como as galáxias, ou o nosso sistema solar, onde a gravidade atrativa ainda reina.) A energia do Sol, que é relativamente baixa em entropia, foi usada por formas de vida de entropia baixa na Terra para produzir outras formas de vida de entropia baixa, enquanto a entropia total aumentava, pouco a pouco, por meio do calor e dos detritos. Em última análise, essa cadeia produziu uma galinha, que produziu um ovo — e você sabe o resto da história: o ovo rolou do balcão e espatifou-se no chão, como parte do incessante caminho do universo rumo à alta entropia. A natureza regular, uniforme, com alta ordem e baixa entropia do tecido espacial produzido pela expansão inflacionária é o análogo do estado das páginas de *Guerra e paz* em plena ordem numérica. Foi esse estado primitivo de ordem — a ausência de ondulações fortes, de rugas fundas e de buracos negros gigantescos — que preparou o universo para a evolução subsequente a níveis crescentes de entropia e que nos propiciou a seta do tempo que todos experimentamos. Pelo que podemos conhecer hoje, esta é a explicação mais completa de que dispomos para ela.

A MOSCA NA POMADA?

Para mim, a história da cosmologia inflacionária e da seta do tempo é encantadora. Do caos primitivo, feroz e energético, surgiu uma flutuação ultramicroscópica de campo do inflaton uniforme que pesava menos do que uma mala de mão. Isso deu início à expansão inflacionária, que determinou a direção da seta do tempo, e tudo o mais decorre daí.

Mas, ao contar a história, partimos de uma premissa crucial que ainda não foi justificada. Para avaliar a probabilidade da ocorrência da inflação tivemos de especificar as características do domínio pré-inflacionário no qual supostamente originou-se a expansão inflacionária. O domínio que imaginamos — caótico, feroz e energético — parece razoável, porém delinear essa descrição intuitiva com precisão matemática constitui um grande desafio. Na verdade, é apenas um palpite. No fundo, não sabemos que condições prevaleciam nesse suposto domínio pré-inflacionário, representado pela porção difusa da figura 10.3, e sem essa informação não podemos avaliar de maneira convincente a probabilidade da ocorrência da inflação. O cálculo dessa probabilidade depende sensivelmente das premissas que adotamos.[6]

Com esse buraco no nosso conhecimento, o resumo mais sensato que podemos fazer é o de que a inflação oferece um poderoso esquema explicativo, que é capaz de conciliar problemas aparentemente desconexos — o problema do horizonte, o da planura, o da origem da estrutura, o da baixa entropia do universo primitivo — e oferece uma solução única para todos eles. Isso parece bom. Mas, para darmos o próximo passo, precisamos de uma teoria que esteja à altura das condições extremas que caracterizam a porção difusa — calores extremos e densidades colossais — para que tenhamos a possibilidade de desenvolver uma percepção definida e sem ambiguidades dos primeiros momentos do cosmo.

Como veremos no próximo capítulo, isso requer uma teoria que possa superar o que talvez seja o maior obstáculo que a física teórica enfrentou nos últimos oitenta anos: a cisão fundamental entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Muitos pesquisadores creem que uma técnica relativamente nova denominada teoria das supercordas pode ser a resposta que buscamos, mas se ela estiver correta, o tecido do cosmo é muito mais estranho do que qualquer um de nós possa ter imaginado.

PARTE IV

Origens e unificação

12. O mundo em uma corda

O tecido segundo a teoria das cordas

Imagine um universo em que, para podermos compreender o que quer que seja, tivéssemos que compreender tudo. Um universo em que, para podermos fazer qualquer comentário sobre o porquê de um planeta girar ao redor de uma estrela, ou sobre o porquê de uma pedra arremessada seguir uma trajetória determinada, ou sobre como funciona um ímã, ou uma bateria, ou como a luz e a gravidade se propagam — um universo em que para dizer o que quer que seja sobre o que quer que seja —, tivéssemos de recorrer às leis mais fundamentais e determinar como elas operam sobre os mínimos componentes da matéria. Felizmente, esse não é o nosso universo.

Se fosse, seria difícil imaginar como a ciência poderia ter feito qualquer progresso. A razão pela qual conseguimos avançar através dos séculos é que pudemos trabalhar ponto por ponto: pudemos esclarecer mistérios, um por um, aprofundando, com cada nova descoberta, os nossos conhecimentos com relação às anteriores. Newton não precisou saber nada sobre os átomos para avançar tanto na compreensão do movimento como na da gravidade. Maxwell não precisou saber nada sobre os elétrons e as outras partículas dotadas de cargas elétricas para desenvolver uma excelente teoria do eletromagnetismo. Einstein não precisou saber nada sobre a formação primordial do espaço e do tempo para formular uma teoria sobre como eles se curvam em função da força gravitacional. Ao contrário, cada uma dessas descobertas, como tantas outras que contribuíram para a formação do que sabemos hoje a respeito do cosmo, deu-se em um contexto limitado que, sem pejo algum, deixou sem resposta muitas questões básicas. Cada descoberta acrescentou uma peça para formar o quebra-cabeça, embora ninguém soubesse — e ainda não saiba — como é a figura que aparecerá quando o quebra-cabeça estiver plenamente montado.

Outra observação correlata é a de que, embora a ciência de hoje seja completamente distinta da que fazíamos há apenas cinquenta anos, por exemplo, seria simplista resumir o progresso científico a uma sucessão de superações de uma teoria por outra. Seria mais correto dizer que cada nova teoria é um refinamento da antecessora, incorporando a ela um novo arcabouço, mais preciso e mais amplo. A teoria da gravidade de Newton foi superada pela relatividade geral de Einstein, mas seria ingênuo dizer que a teoria de Newton estava errada. No domínio dos objetos que não se movem a velocidades nem sequer próximas à

da luz e não produzem campos gravitacionais próximos à intensidade dos de um buraco negro, a teoria de Newton é fantasticamente precisa. Tampouco isso significa que a teoria de Einstein seja uma simples variante menor com relação à de Newton. No processo de aperfeiçoar as ideias de Newton sobre a gravidade, Einstein invocou um esquema conceituai completamente novo, que alterou de forma radical a nossa compreensão do espaço e do tempo. Mas o poder da descoberta de Newton, nos domínios aos quais ele a destinara (o movimento planetário, os movimentos terrestres normais e assim por diante), é inatacável.

Acreditamos que cada teoria nova nos aproxima mais e mais do objetivo fugidio da verdade. Porém se existe uma teoria definitiva — que não poderia sofrer refinamentos por já ter conseguido revelar os mecanismos do universo no nível mais profundo possível —, ninguém sabe. Mesmo assim, o modelo que se foi formando com as descobertas dos últimos trezentos anos deixa clara a possibilidade de que essa teoria venha a ser desenvolvida. Em linhas gerais, cada salto teórico nos leva a um nível mais amplo de fenômenos físicos, com um número menor de esquemas teóricos diferentes. As descobertas de Newton mostraram que as forças que comandam o movimento dos planetas são as mesmas que comandam o movimento dos objetos que caem aqui na Terra. As descobertas de Maxwell mostraram que a eletricidade e o magnetismo são dois lados da mesma moeda. As descobertas de Einstein mostraram que o espaço e o tempo são tão inseparáveis quanto o toque de Midas e o ouro. As descobertas de uma mesma geração de físicos, no começo do século xx, demonstraram que miríades de mistérios da microfísica são explicados com precisão pela mecânica quântica. Mais recentemente, as descobertas de Glashow, Saiam e Weinberg mostraram que o eletromagnetismo e a força nuclear fraca são duas manifestações de uma única força — a força eletrofraca —, e existem até mesmo indicações tentativas e circunstanciais de que a força nuclear forte pode somar-se à força eletrofraca, formando uma síntese ainda maior.[1] Levando tudo isso em conta, vemos um padrão que vai do complexo ao simples, da diversidade à unidade. As setas das explicações parecem convergir rumo a um esquema novo, ainda por descobrir, e que seria suficientemente poderoso para unificar todas as forças e toda a matéria da natureza em uma teoria única, capaz de descrever todos os fenômenos físicos.

Albert Einstein, que tentou por mais de trinta anos reunir o eletromagnetismo e a relatividade geral em uma teoria única, merece o crédito de ter iniciado a busca da teoria unificada nos tempos modernos. Em longas etapas dessas três décadas, ele foi o único pesquisador dessa teoria unificada, e a sua busca, apaixonada e solitária, alienou-o das correntes principais da comunidade dos físicos. Nos últimos vinte anos, no entanto, houve uma expressiva retomada da busca de uma

teoria unificada. O sonho solitário de Einstein transformou-se na força motriz que impulsionou toda uma geração de cientistas. Porém as descobertas posteriores à época de Einstein proporcionaram uma mudança de enfoque. Embora não disponhamos ainda de uma teoria que combine completamente a força nuclear forte e a força eletrofraca, as três forças (eletromagnética, forte e fraca) são descritas por uma linguagem única e uniforme, baseada na mecânica quântica. Mas a relatividade geral, a nossa teoria mais sofisticada para a quarta força, não entra nesse esquema. A relatividade geral é uma teoria clássica, que não incorpora nenhum dos conceitos probabilísticos da mecânica quântica. Portanto, combinar a relatividade geral e a mecânica quântica e descrever as quatro forças com um único esquema conceituai quântico é um dos principais objetivos dos programas modernos de unificação. E esse problema revela-se como um dos mais difíceis que a física teórica já encontrou.
Vejamos por quê.

AS AGITAÇÕES QUÂNTICAS E O ESPAÇO VAZIO

Se eu tivesse que escolher o aspecto mais expressivo da mecânica quântica, escolheria o princípio da incerteza. As probabilidades e as funções de onda certamente nos propiciam esquemas radicalmente novos, mas é o princípio da incerteza que simboliza a ruptura com a física clássica. Lembre-se de que, nos séculos XVIII e XIX, os cientistas acreditavam que a descrição completa da realidade física consistia simplesmente em especificar as posições e as velocidades de cada componente do conteúdo material do cosmo. Com o advento do conceito de campo, no século xix, e com a sua aplicação subsequente às forças eletromagnética e gravitacional, esse enfoque foi ampliado para incluir o valor de cada campo — ou seja, a força de cada campo — e a taxa de alteração do valor de cada campo, em todas as posições do espaço. Mas, na década de 1930, o princípio da incerteza desmantelou esse conceito da realidade ao mostrar que nunca será possível conhecer ao mesmo tempo a posição e a velocidade de uma partícula. Nunca será possível conhecer ao mesmo tempo o valor de um campo em alguma posição do espaço e a sua taxa de variação. A incerteza quântica proíbe.
Como vimos no capítulo anterior, essa incerteza quântica faz com que o microcosmo seja um mundo turbulento e agitado. Anteriormente, focalizamos as agitações quânticas induzidas pela incerteza no campo do inflaton, mas a incerteza quântica aplica-se a todos os campos. O campo eletromagnético, os campos das forças nucleares forte e fraca e o campo gravitacional estão todos sujeitos a frenéticas agitações quânticas nas escalas microscópicas. Com efeito,

essas agitações dos campos existem até mesmo no espaço que normalmente consideramos como vazio, espaço que supostamente não conteria nem matéria nem nenhum campo. Essa ideia tem uma importância essencial, mas se você ainda não a conhece, é natural que esteja intrigado. Se uma região do espaço não contém nada — se for um vácuo —, isso então não significa que não há nada que possa agitar-se? Bem, já vimos que o conceito de "nada" é sutil. Pense no oceano de Higgs que, segundo acredita a teoria moderna, permeia o espaço como um todo. As agitações quânticas a que me refiro agora apenas tornam a noção de "nada" ainda mais sutil. Veja por quê.

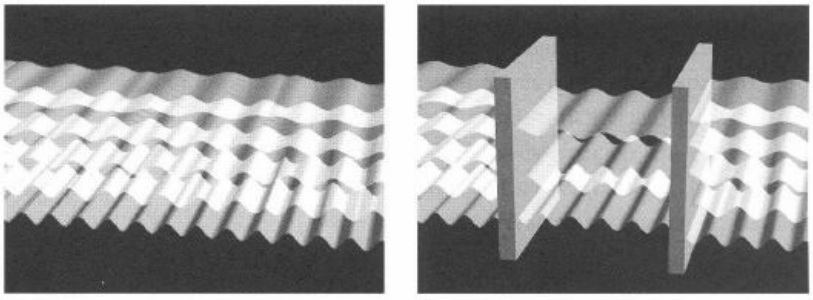
Na física pré-quântica (e pré-Higgs), diríamos que uma região do espaço está completamente vazia quando não contém nenhuma partícula e o valor de todos os campos é sempre zero (para facilitar, consideraremos apenas campos que alcançam o estado de energia mínima quando o seu valor é zero. A discussão para outros campos — campos de Higgs — é idêntica, exceto quanto a que as agitações flutuam ao redor de um nível mínimo de energia do campo que é *diferente de zero.* Se você se sentir tentado a dizer que uma região do espaço está vazia apenas quando não haja presença de matéria e todos os campos estejam *ausentes*, e não porque simplesmente tenham valor zero, veja a seção de notas.[2]). Pensemos agora nessa noção clássica de vazio à luz do princípio da incerteza quântica. Se um campo tivesse e mantivesse um valor mínimo, saberíamos o seu valor — zero — e também a sua taxa de variação — zero também. Mas, de acordo com o princípio da incerteza, é impossível que ambas essas propriedades sejam definidas ao mesmo tempo. Se um campo tiver um valor definido em algum momento — zero, neste caso —, o princípio da incerteza nos diz que a sua taxa de variação será completamente aleatória. E uma taxa de variação aleatória significa que a qualquer momento o valor do campo poderá agitar-se aleatoriamente para cima e para baixo, mesmo nos lugares que em geral consideramos como espaço completamente vazio. Assim, a noção intuitiva de vazio, na qual todos os campos têm e mantêm valor zero, é incompatível com a mecânica quântica. O *valor de um campo pode agitar-se ao redor de zero, mas não pode ser uniformemente igual a zero em toda uma região por mais do que um breve momento*.[3] Em linguagem técnica, a física diz que os campos sofrem flutuações no vácuo.

A natureza aleatória das flutuações de campo no vácuo faz com que, em todas as regiões, exceto as mais microscópicas, as agitações "para cima" sejam tão frequentes quanto as agitações "para baixo", com o que a sua média será zero, o que resulta em um espaço que parece, à observação normal, perfeitamente regular, como a superfície de um mármore polido, ainda que um microscópio eletrônico revele as suas irregularidades nas escalas diminutas. De qualquer maneira, mesmo que não possamos vê-las de forma direta, a existência das

agitações quânticas de campo está conclusivamente demonstrada também para o espaço vazio há mais de cinquenta anos, o que se deve a uma descoberta simples, porém profunda.

Em 1948, o físico holandês Hendrik Casimir inventou um modo de detectar experimentalmente as flutuações do campo eletromagnético no vácuo. A teoria quântica diz que as agitações do campo eletromagnético no espaço vazio podem tomar diversas formas, como ilustra a figura 12.1a. A descoberta de Casimir consistiu em perceber que colocando duas placas comuns de metal em uma região vazia, como na figura 12.1b, poderia induzir uma modificação sutil nessas alterações de campo no vácuo. Especificamente, as equações quânticas mostram que na região entre as placas haverá menos flutuações (apenas ocorrem aquelas flutuações do campo eletromagnético cujos valores se anulam no ponto em que encontram cada placa). Casimir analisou as implicações dessa redução nas agitações de campo e verificou algo extraordinário. Assim como uma redução na quantidade de ar em uma região cria um desequilíbrio na pressão (por exemplo, em altitudes elevadas podemos sentir que o ar rarefeito exerce menos pressão de fora para dentro sobre os nossos tímpanos), também a redução das agitações quânticas de campo entre as placas produz um desequilíbrio de pressão: as agitações quânticas de campo entre as placas tornam-se ligeiramente mais fracas do que as que ocorrem fora do âmbito das placas, e esse desequilíbrio *empurra as placas uma em direção à outra.*

Reflita um pouco sobre a estranheza desse fato. Você coloca duas placas absolutamente comuns e sem carga elétrica frente a frente em uma região vazia do espaço. Como as suas massas são muito pequenas, a atração gravitacional entre elas pode ser completamente ignorada. Uma vez que não há nada mais à volta, você conclui naturalmente que as placas ficarão onde estão. Mas *não* é isso o que os cálculos de Casimir previram que aconteceria. Ele concluiu que as placas seriam suavemente guiadas pelas flutuações quânticas no vácuo, uma em direção à outra.



(a) (b)

Figura 12.1. (*a*) *Flutuações do campo eletromagnético no vácuo.* (*b*) *Flutuações no vácuo entre duas placas de metal e fora das placas.*

Quando Casimir anunciou esse resultado teórico, não havia equipamentos com capacidade suficiente para testar as suas previsões. Mas cerca de uma década depois, outro físico holandês, Marcus Spaarnay, pôde realizar os primeiros testes rudimentares para a detecção dessa *força de Casimir* e, desde então, têm sido executados experimentos cada vez mais precisos. Em 1997, por exemplo, Steve Lamoreaux, então na Universidade de Washington, confirmou as previsões de Casimir com uma precisão de 5%.[4] (Para duas placas do tamanho aproximado de cartas de baralho, colocadas a um décimo de milésimo de centímetro uma da outra, a força entre elas é aproximadamente igual ao peso de uma lágrima, o que dá uma ideia da dificuldade de medir a força de Casimir.) Hoje, pouca dúvida resta de que a noção intuitiva do espaço vazio como um local estático, calmo e sem eventos é totalmente carente de base. Graças à incerteza quântica, o espaço vazio pulula com atividades quânticas.

Os cientistas levaram a maior parte do século XX para aperfeiçoar os instrumentos matemáticos capazes de descrever essa atividade quântica das forças eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca. O esforço valeu a pena: os cálculos que empregam esse esquema matemático concordam com os resultados experimentais com uma precisão sem precedentes (por exemplo, os cálculos relativos ao efeito das flutuações no vácuo sobre as propriedades magnéticas dos elétrons concordam com os resultados experimentais até a nona casa decimal).[5]

Contudo, a despeito de todo esse êxito, os cientistas percebem, há muitas décadas, que as agitações quânticas semeiam a discórdia no reino das leis da física.

AGITAÇÃO E DISCÓRDIA[6]

Até aqui, discutimos somente as agitações quânticas para os campos que existem *dentro* do espaço. E quanto às agitações quânticas do próprio espaço? Embora isso possa parecer misterioso, é apenas um outro exemplo de agitações quânticas de campo — exemplo que se revela, no entanto, particularmente complexo. Na teoria da relatividade geral, Einstein comprovou que a força gravitacional pode ser descrita por meio de curvas e ondulações no tecido do espaço e que os campos gravitacionais podem manifestar-se por meio da forma ou da geometria do espaço (e do espaço-tempo, de maneira mais geral).

Ora, o campo gravitacional é tão sujeito às agitações quânticas como qualquer outro campo: o princípio da incerteza faz com que, nas menores escalas de distância, a força gravitacional oscile para cima e para baixo. E como o campo gravitacional é sinônimo da forma do espaço, essas agitações quânticas

significam que a forma do espaço oscila aleatoriamente. Tal como vimos nos exemplos de incerteza quântica, nas escalas normais de distância, as agitações são demasiado pequenas para que as percebamos diretamente, e o ambiente à sua volta parece regular, plácido e previsível. Mas, quanto menor a escala de observação, maiores a incerteza e o tumulto decorrentes das agitações quânticas. Isso está ilustrado na figura 12.2, em que magnificamos sequencialmente o tecido do espaço para revelar a sua estrutura a distâncias cada vez menores. O nível inferior da figura revela as ondulações quânticas do espaço nas escalas familiares a nós e, como se pode observar, não há muito o que ver — as ondulações são tão pequenas que não são visíveis e, portanto, o espaço parece calmo e plano. Mas à medida que avançamos na sequência de magnificações da região, vemos que as ondulações do espaço tornam-se progressivamente intensas. No nível mais alto da figura, que mostra o tecido do espaço em uma escala inferior à da *distancia de Planck* — um milionésimo de bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo (10^{-33}) de centímetro —, o espaço se converte em um caldeirão fervilhante de flutuações frenéticas. A ilustração deixa claro que as noções usuais de esquerda/direita, frente/trás e acima/abaixo ficam tão embaralhadas no tumulto microscópico que perdem qualquer sentido. Até mesmo a noção comum de antes/depois, que ilustramos por meio das fatias sequenciais do pão do espaço-tempo, perde o significado em razão das flutuações quânticas nas escalas de tempo menores do que o *tempo de Planck*, cerca de um décimo milionésimo de trilionésimo de trilionésimo de trilionésimo (10^{-43}) de segundo (que corresponde ao tempo que a luz leva para atravessar a distância de Planck). Como em uma fotografia fora de foco, as ondulações da figura 12.2 tornam impossível distinguir sem ambiguidades uma fatia de tempo da outra quando o intervalo de tempo entre elas torna-se menor do que o tempo de Planck. A consequência é que nas escalas menores do que a distância de Planck e o tempo de Planck, a incerteza quântica torna o tecido do cosmo tão retorcido e distorcido que os nossos conceitos usuais de espaço e tempo não mais podem ser aplicados.

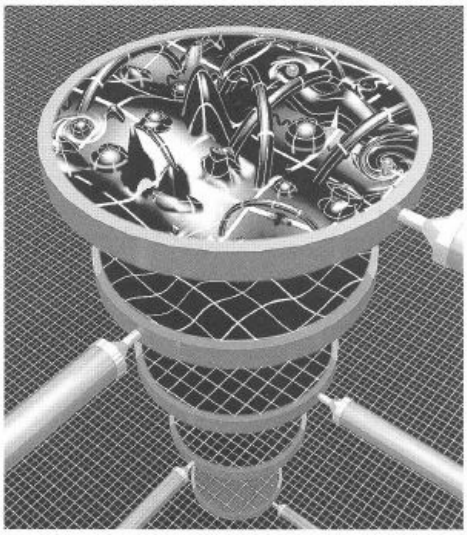


Figura 12.2. *Magnificações sucessivas revelam que abaixo da distância de Planck o espaço torna-se tumultuado e irreconhecível, por causa das agitações quânticas. (As imagens são representações de lentes de aumento imaginárias, que ampliam de 10 milhões a 100 milhões de vezes a imagem imediatamente anterior.)*

Os detalhes da lição dada pela figura 12.2 são exóticos, mas os seus aspectos gerais nos são familiares: os conceitos e as conclusões aplicáveis em uma escala podem não sê-lo em outras. Este é um princípio-chave da física, que encontramos repetidamente, inclusive em contextos bem mais prosaicos. Considere um copo d'água, por exemplo. Descrever a água como um líquido regular e uniforme é útil e pertinente nas escalas cotidianas, mas a validade dessa descrição desaparece quando analisamos a água com precisão submicroscópica. Nas escalas mínimas, a imagem regular dá lugar a um esquema bastante diferente, com moléculas e átomos amplamente separados uns dos outros. Do mesmo modo, a figura 12.2 mostra que o conceito de Einstein, de que a geometria do espaço e do tempo é regular e um pouco curvada, é preciso e eficaz para descrever o universo nas escalas maiores, mas dissolve-se quando analisamos o universo nas escalas de distância e de tempo extremamente curtas. Os físicos acreditam que, tal como acontece com a água, a imagem regular do espaço e do tempo é uma aproximação que dá lugar a um outro esquema mais fundamental quando vista nas escalas ultramicroscópicas. Em que consiste esse esquema — o que constitui as "moléculas" e os "átomos" do espaço e do tempo — é uma questão que está sendo pesquisada com grande vigor nos nossos dias e que ainda está para ser resolvida.

Mesmo assim, o que fica absolutamente claro com a figura 12.2 é que nas escalas mínimas o caráter regular do espaço e do tempo concebido pela relatividade geral não é compatível com o caráter agitado e frenético da mecânica quântica. O princípio essencial da relatividade geral de Einstein, de

que o espaço e o tempo compõem uma forma geométrica suavemente recurvada, choca-se de maneira frontal com o princípio essencial da mecânica quântica, o princípio da incerteza, que implica a existência de um ambiente turbulento e tumultuado nas escalas mínimas. O choque violento entre as ideias principais da relatividade geral e da mecânica quântica faz com que a articulação das duas teorias seja um dos desafios mais difíceis encontrado pelos físicos nos últimos oitenta anos.

QUE IMPORTA?

Na prática, a incompatibilidade entre a relatividade geral e a mecânica quântica traduz-se de forma bem específica. Quando combinamos as equações da relatividade geral e da mecânica quântica, quase sempre elas dão um só resultado: infinito. E esse é o problema: não faz sentido. Os pesquisadores nunca medem uma quantidade infinita do que quer que seja. Os ponteiros nunca apontam para o infinito. Os medidores nunca alcançam o infinito. As calculadoras nunca registram o infinito. Quase sempre uma resposta infinita é despropositada. Tudo o que ela nos diz é que as equações da relatividade geral e da mecânica quântica perdem sentido quando combinadas.

Veja que essa situação é bem diferente da tensão entre a relatividade *especial* e a mecânica quântica, que vimos na discussão sobre a não-localidade quântica, no capítulo 4. Verificamos então que a compatibilização dos postulados da relatividade especial (em particular, a simetria entre todos os observadores que estão em velocidade constante) com o comportamento das partículas emaranhadas requer um entendimento do problema quântico da medição mais completo do que aquele que alcançamos até aqui (veja páginas 145-9). Mas o fato de essa questão não estar completamente resolvida não resulta em inconsistências matemáticas nem em equações que produzem respostas sem sentido. Ao contrário, a combinação entre as equações da relatividade especial e as da mecânica quântica tem propiciado os resultados mais precisos que já foram obtidos e confirmados em toda a história da ciência. A suave tensão entre a relatividade especial e a mecânica quântica aponta para uma área que requer um maior desenvolvimento teórico, mas isso praticamente não afeta o poder de previsão das duas teorias combinadas. Não é isso, contudo, o que acontece com a união explosiva entre a relatividade geral e a mecânica quântica, na qual o poder de previsão é totalmente perdido.

Mas você pode perfeitamente perguntar se a incompatibilidade entre a relatividade geral e a mecânica quântica é de fato importante. É verdade que a combinação das equações resulta em respostas sem sentido, mas, afinal, quando

é que realmente se torna necessário usá-las em conjunto? Anos e anos de observações astronômicas mostram que a relatividade geral descreve o mundo macro das estrelas, das galáxias e mesmo a totalidade da extensão do cosmo com maravilhosa precisão. Décadas e décadas de experimentos confirmam que a mecânica quântica produz os mesmos excelentes resultados com relação ao mundo micro das moléculas, dos átomos e das partículas subatômicas. Como ambas as teorias operam extraordinariamente bem nos seus próprios domínios, por que deveríamos nos preocupar com os problemas de combinação entre elas? Por que não mantê-las separadas? Por que não usar a relatividade geral para as coisas de tamanho grande e massa grande e a mecânica quântica para as coisas pequenas e leves e celebrar a notável capacidade humana de compreender essa variedade tão grande de fenômenos físicos?

Na verdade, é *isso* o que a maior parte dos físicos tem feito desde as primeiras décadas do século xx, e não há como negar que esse enfoque tem sido claramente frutífero. O progresso da ciência, operando com esse esquema desconjuntado, é impressionante. Contudo, persistem razões para que o antagonismo entre a relatividade geral e a mecânica quântica deva ser superado. Aqui estão duas delas.

Em primeiro lugar, intuitivamente, é difícil admitir que o nosso entendimento mais profundo do universo consista em uma união precária entre dois esquemas teóricos eficazes, mas mutuamente incompatíveis. O universo com certeza não foi concebido com uma linha divisória que separa as coisas que são adequadamente descritas pela mecânica quântica das que são adequadamente descritas pela relatividade geral. Essa divisão do universo em dois domínios separados parece artificial e incomum. Muitos veem nisso uma evidência de que tem de existir uma verdade mais profunda e unificada, que supere o hiato entre a relatividade geral e a mecânica quântica e possa ser aplicada a *todas as coisas.* O universo é um só e, portanto, no entender de muitos cientistas, deve existir uma só teoria.

Em segundo lugar, embora em sua maioria as coisas ou sejam grandes e pesadas, ou pequenas e leves, razões por que, em termos práticos, elas podem ser descritas adequadamente, *seja* pela relatividade geral, *seja* pela mecânica quântica, isso não é verdade para todas as coisas. Os buracos negros são um bom exemplo. De acordo com a relatividade geral, toda a matéria que compõe um buraco negro está comprimida em um ponto minúsculo no centro do buraco.[7] Isso faz com que o centro do buraco negro seja ao mesmo tempo dotado de massa enorme e de tamanho mínimo. Por conseguinte, ele pertence a ambos os lados da pretensa divisão. Temos de usar a relatividade geral porque a grande massa cria um campo gravitacional substancial e também temos de usar a

mecânica quântica porque toda essa massa está confinada em um ponto mínimo. Mas as equações, quando combinadas, perdem sentido, e por isso ninguém ainda foi capaz de determinar o que acontece no centro de um buraco negro.

O exemplo é bom, mas se você for realmente um cético, pode ainda estar pensando se isso é algo para tirar o seu sono. Como não podemos ver o interior de um buraco negro a menos que caiamos nele, e como, além disso, se caíssemos nele não poderíamos relatar depois as nossas observações para o mundo exterior, as deficiências do que sabemos a respeito do interior dos buracos negros podem não lhe parecer algo assim tão inquietante. Para os cientistas, no entanto, a existência de um domínio em que as leis conhecidas da física perdem o sentido — por mais esotérico que seja esse domínio — é um sinal de alarme. O simples fato de que as leis conhecidas da física possam dissolver-se, qualquer que seja a circunstância, é um sinal claro de que ainda não chegamos ao entendimento mais profundo possível. Afinal de contas, o universo funciona. Tanto quanto podemos saber, ele não se dissolve. A teoria correta do universo deveria pelo menos igualar esse padrão.

Isso parece muito razoável. Mas aposto que a verdadeira importância do conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica só fica realmente clara com um outro exemplo. Veja de novo a figura 10.6. Como se observa, demos grandes passos na concatenação de uma história coerente e previsível da evolução cósmica, mas o quadro permanece incompleto por causa do trecho difuso próximo à criação do universo. E dentro da névoa espessa desses primeiros momentos está o mais fascinante de todos os mistérios: a origem e a essência da natureza do espaço e do tempo. E o que nos impede de penetrarmos nessa névoa? A culpa é claramente do conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica. O antagonismo entre as leis do que é grande e as do que é pequeno é a razão pela qual o trecho difuso permanece obscuro e não sabemos exatamente o que aconteceu no início do universo.

Para entender, imagine, como no capítulo 10, que estamos vendo o filme da expansão do universo do fim para o começo, em direção ao Big-Bang. Nesse sentido, tudo o que agora está se afastando, aproxima-se, de modo que, à medida que vemos o filme, o universo vai ficando cada vez menor, mais quente e mais denso. À medida que nos aproximamos do tempo zero, a *totalidade* do universo observável cabe em uma região do tamanho do Sol, da Terra, de uma bola de boliche, de um amendoim, de um grão de areia — cada vez menor, com o filme chegando aos instantes iniciais. Alcançamos um momento, nesse filme visto ao contrário, em que todo o universo conhecido tem um tamanho próximo ao da distância de Planck — a extensão de um milionésimo de bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de centímetro, em que a relatividade geral e a

mecânica quântica entram em conflito. Nesse momento, toda a massa e toda a energia responsável pela geração do universo observável está contida em um ponto 100 bilhões de bilhões de vezes menor do que um átomo.[8]

Portanto, assim como no caso do centro de um buraco negro, o universo primitivo fica dos dois lados da divisão: a sua densidade enorme requer o uso da relatividade geral; o seu tamanho mínimo requer o uso da mecânica quântica. E aqui também, quando combinadas, as leis se dissolvem. O projetor enguiça, o filme se queima e nós perdemos o acesso aos momentos verdadeiramente iniciais. Por causa do conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica, continuamos ignorando o que aconteceu no começo e somos forçados a aceitar o trecho difuso da figura 10.6.

Se é que temos a esperança de compreender a origem do universo — uma das questões mais profundas de toda a ciência —, o conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica *tem* de ser resolvido. Temos de acertar as contas entre as leis do grande e as do pequeno e reuni-las em uma teoria única e harmoniosa.

O IMPROVÁVEL CAMINHO DE UMA SOLUÇÃO

(deste ponto até o final do capítulo há um relato da descoberta da teoria das supercordas e a discussão de suas ideias essenciais quanto à unificação e à estrutura do espaço-tempo. Os leitores de O *universo elegante* (especialmente os capítulos de 6 a 8) estão familiarizados com boa parte desse material e podem sentir-se livres para saltar para o próximo capítulo).

As obras de Newton e de Einstein são exemplos de descobertas científicas que provêm, pura e simplesmente, do gênio maravilhoso de um único cientista. Mas isso é raro. Com muito maior frequência, os grandes avanços refletem o esforço coletivo de muitos cientistas, cada um dos quais aperfeiçoa as intuições de outros para alcançar o que nenhum indivíduo poderia obter isoladamente. Um cientista apresenta uma ideia, que desperta o pensamento de um colega, que provoca uma observação, que revela uma inesperada relação, que inspira uma importante conclusão, que abre um novo ciclo de descobertas. Conhecimentos amplos, bons equipamentos, flexibilidade de pensamento, abertura para conexões não previstas, imersão no fluxo das ideias mundiais, trabalho intenso e muita sorte são componentes essenciais dos descobrimentos da ciência. Atualmente, talvez não haja melhor exemplo desse tipo de avanço do que o desenvolvimento da *teoria das supercordas.*

A teoria das supercordas é uma hipótese segundo a qual muitos cientistas consideram ter conseguido combinar a relatividade geral e a mecânica quântica. E, como veremos, há motivo para que esperemos ainda mais. Hoje, ela ainda é,

em grande parte, uma obra em andamento, mas a teoria das supercordas bem pode vir a ser uma teoria totalmente unificada, válida para todas as forças e para toda a matéria, que realizará o sonho de Einstein e irá além — uma teoria que, segundo o meu ponto de vista e o de muitos outros físicos, está desbravando o começo de um caminho que, um dia, nos levará às leis mais profundas do universo. A verdade, porém, é que a teoria das supercordas não foi concebida com o propósito de atingir os objetivos nobres e permanentes a que me referi. A sua história nos conta, ao contrário, que ela é fruto de uma série de descobertas acidentais, rebates falsos, oportunidades perdidas e carreiras quase arruinadas. E é também, em um sentido estrito, a história da descoberta da solução certa para o problema errado.

Em 1968, Gabriele Veneziano, jovem pesquisador pós-doutorado que trabalhava no CERN era um entre os muitos cientistas que buscavam entender a força nuclear forte por meio do estudo de colisões entre partículas a altas energias, produzidas em aceleradores de partículas em diversos lugares do mundo. Depois de meses analisando padrões e regularidades nos dados, Veneziano reconheceu uma conexão surpreendente e inesperada com uma área esotérica da matemática. Ele percebeu que uma fórmula descoberta duzentos anos antes pelo famoso matemático suíço Leonhard Euler (a *função beta de Euler)* parecia coincidir precisamente com os dados da força nuclear forte. Isso não chegava a ser particularmente incomum — a física teórica lida o tempo todo com fórmulas tradicionais —, mas era um caso notável em que o carro estava quilômetros à frente dos bois. O mais frequente é que os físicos primeiro trabalhem a sua própria intuição, formem um quadro mental, uma noção ampla dos princípios físicos que orientam o objeto dos seus estudos e só depois busquem as equações necessárias para amarrar a intuição em terreno rigorosamente matemático. Veneziano, ao contrário, foi logo para a equação. O seu brilho foi o de reconhecer padrões insólitos nos dados e construir o vínculo não previsto com uma fórmula concebida séculos antes com interesse puramente matemático.

Embora Veneziano tivesse a fórmula em suas mãos, não tinha como explicar *por que* ela funcionava. Faltava-lhe visualizar o motivo pelo qual a função beta de Euler seria relevante para partículas que se influenciam mutuamente por meio da força nuclear forte. Em dois anos a situação mudou por completo. Em 1970, trabalhos publicados por Leonard Susskind, de Stanford, Holger Nielsen, do Instituto Niels Bohr, e Yoichiro Nambu, da Universidade de Chicago, revelaram as dimensões físicas da descoberta de Veneziano. Esses cientistas demonstraram que se a força forte entre duas partículas se devesse a um fio extremamente diminuto e fino, quase como um elástico, que conectasse as partículas, então os processos quânticos que Veneziano e outros haviam examinado teriam uma

descrição matemática por meio da fórmula de Euler. Os pequenos fios elásticos foram denominados *cordas*, os bois foram colocados à frente do carro e a teoria das cordas nasceu oficialmente.

Mas não se anime demais. Para os que estavam envolvidos na pesquisa, foi ótimo saber da origem física da descoberta de Veneziano, porque isso significava que os físicos estavam fazendo progresso no sentido de decifrar a força nuclear forte. Porém a descoberta não foi recebida com entusiasmo universal. Muito ao contrário. O trabalho de Susskind foi devolvido pela revista à qual fora apresentado, com o comentário de que ele apresentava interesse mínimo. Susskind lembra-se bem dessa avaliação: "Fiquei perplexo. Caí da cadeira. Fiquei deprimido. Fui para casa e tomei um porre".[9] O trabalho foi publicado depois, assim como os outros que também anunciavam o conceito das cordas, mas a seguir a teoria sofreu dois outros reveses devastadores. O exame mais aprofundado dos novos dados relativos à força nuclear forte, obtidos no começo da década de 1970, revelava que o enfoque das cordas não descrevia o quadro com precisão. Além disso, uma nova proposição, denominada *cromodinâmica quântica*., profundamente enraizada nos conceitos tradicionais da física das partículas e dos campos — sem corda alguma —*foi capaz* de descrever convincentemente todos os dados. Em 1974, a teoria das cordas parecia ter ido a nocaute.

John Schwarz foi um dos primeiros entusiastas da teoria das cordas. Ele me disse uma vez que, desde o primeiro instante, teve a intuição de que a teoria era profunda e importante. Schwarz passou anos analisando os vários aspectos matemáticos da teoria, o que, entre outras coisas, levou à descoberta da teoria das supercordas — que, como veremos, é um refinamento importante da proposição original. Mas com a acolhida da cromodinâmica quântica e com o insucesso do esquema das cordas na descrição da força nuclear forte, as justificativas para prosseguir com as pesquisas sobre a teoria das cordas enfraqueceram-se muito. Havia, porém, um desencontro particular entre a teoria das cordas e a força nuclear forte que Schwarz não conseguia esquecer. As equações da teoria das cordas, segundo a mecânica quântica, previam que as colisões a altas energias que ocorriam nos aceleradores de partículas deveriam resultar em uma copiosa produção de uma partícula bastante incomum, que teria massa zero, como o fóton, e *spin* 2, o que significa, por assim dizer, um *spin* duas vezes mais rápido do que o do fóton. Nenhum experimento jamais produzira tal partícula, de modo que essa parecia ser mais uma previsão errada da teoria das cordas.

Schwarz e seu colaborador Joël Scherk debruçaram-se sobre esse problema da partícula que não aparecia, até que, de forma surpreendente, fizeram uma conexão com um problema totalmente diferente. Se bem que nunca ninguém conseguira combinar a relatividade geral e a mecânica quântica, os físicos já haviam determinado alguns aspectos que teriam de estar presentes quando essa combinação tivesse efeito. Um desses aspectos, como vimos no capítulo 9, é o de que, assim como a força eletromagnética é transmitida microscopicamente pelos fótons, a força gravitacional deveria ser transmitida microscopicamente por um outro tipo de partícula, o gráviton (a unidade mínima — o quantum — da gravidade). Embora os grávitons ainda não tenham sido detectados em experiências, todas as análises teóricas concordam em que eles têm de ter duas propriedades: massa zero e *spin 2.* Para Schwarz e Scherk isso soou como um sino de igreja — essas eram justamente as propriedades da partícula inencontrável que a teoria das cordas previra — e os incentivou a dar um passo corajoso, que transformou um fracasso da teoria das cordas em um sucesso fenomenal.

Eles propuseram que a teoria das cordas não deveria ser vista como uma teoria da mecânica quântica para a força nuclear forte. Argumentaram que, embora ela tivesse sido descoberta como uma tentativa de compreender a força forte, era, na verdade, a solução para outro problema. Era, com efeito, a primeiríssima teoria da mecânica quântica para a força *gravitacional.* Afirmaram que a partícula de massa zero e *spin 2* prevista pela teoria das cordas era o gráviton e que as equações da teoria das cordas incorporavam necessariamente uma descrição da gravidade pela mecânica quântica.

Schwarz e Scherk publicaram a sua proposição em 1974 e esperavam uma forte reação por parte da comunidade física. Em vez disso, o seu trabalho foi ignorado. Da nossa perspectiva atual, não é difícil compreender por quê. Muitos achavam que a noção das cordas passara a ser uma teoria à procura de emprego. Depois do fracasso da tentativa de usar a teoria das cordas para explicar a força nuclear forte, parecia que os seus proponentes, em vez de aceitar a derrota, insistiam em proclamar a validade da teoria para outros propósitos. Esse ponto de vista reforçou-se quando ficou claro que Schwarz e Scherk precisaram modificar radicalmente o tamanho das cordas na teoria para que a força transmitida pelo candidato a gráviton tivesse a mesma intensidade da força da gravidade. Como a gravidade é uma força extremamente fraca (lembre-se de que, como notamos no capítulo 9, mesmo um simples ímã pode sobrepujar a atração de toda a Terra e suspender um grampo de ferro. Numericamente, a força gravitacional é 10^{-42} vezes mais fraca do que a força eletromagnética). e como eles perceberam que, quanto mais longa fosse a corda, *maior* seria a intensidade da força transmitida, Schwarz e Scherk viram que as

cordas teriam que ser extremamente minúsculas para transmitir uma força de intensidade tão reduzida como a gravidade. As cordas tinham que ser aproximadamente do tamanho da distância de Planck: 100 bilhões de bilhões de vezes menor do que a estimativa anterior. Tão pequenas, lembraram os opositores, que nenhum equipamento seria capaz de vê-las e que, portanto, a teoria não poderia ser comprovada experimentalmente.[10]

Ainda por cima, na década de 1970 ocorreram sucessivos êxitos para as teorias mais convencionais, baseadas não em cordas, mas em partículas pontuais e campos. Tanto os teóricos quanto os pesquisadores tinham a cabeça e as mãos totalmente envolvidas em ideias concretas para investigar e previsões para testar. Para que, então, voltar os olhos para a teoria das cordas, quando havia tantos trabalhos interessantes para fazer dentro de um esquema conhecido e confiável? Com esse mesmo espírito, embora bem lá no fundo os físicos soubessem que o problema de reunir a gravidade e a mecânica quântica permanecia sem solução com o uso dos métodos convencionais, a questão continuou sem receber atenção. Praticamente todos reconheciam que se tratava de um ponto importante, que algum dia teria de ser resolvido, mas com a existência de uma enorme quantidade de trabalho ainda por desenvolver no domínio das forças não gravitacionais, o problema da quantização da gravidade foi colocado na estufa e com o fogo bem baixo. Além disso, na segunda parte da década de 1970, a teoria das cordas estava longe de ser uma teoria bem elaborada. Ter um candidato a gráviton era um êxito, mas muitas questões conceituais e técnicas ainda estavam por resolver-se. Parecia inteiramente plausível que a teoria não seria capaz de resolver uma ou mais dessas questões, de modo que continuar no desenvolvimento da teoria das cordas era um empreendimento de risco considerável. A teoria poderia estar morta em poucos anos.

Schwarz manteve-se resoluto. Ele acreditava que a descoberta da teoria das cordas, o primeiro enfoque plausível para descrever a gravidade na linguagem da mecânica quântica, era um importante salto de conhecimento. Se ninguém queria ouvir, tudo bem. Ele continuaria a desenvolver a teoria até que, quando as pessoas estivessem em condições de prestar atenção, ela *já* estaria muito mais adiantada. A sua determinação revelou-se valiosa.

No final da década de 1970 e no início da de 1980, Schwarz colaborou com Michael Green, então no Queen Mary College, em Londres, no estudo de algumas dificuldades técnicas relativas à teoria. A principal delas era o problema das *anomalias.* Os detalhes não importam aqui, mas, de modo geral, a anomalia é um defeito quântico pernicioso que prenuncia o desastre para uma teoria por implicar que ela viola certos princípios sagrados, como o da conservação da energia. Para ser viável, uma teoria tem de estar livre de anomalias. As pesquisas

iniciais haviam revelado que a teoria das cordas estava infestada de anomalias, e essa foi uma das maiores razões pelas quais ela não despertou grande entusiasmo. As anomalias significavam que, embora a teoria das cordas parecesse levar a uma teoria quântica da gravidade, por conter o gráviton, um exame mais detalhado mostrava que ela sofria de inconsistências matemáticas sutis.

Schwarz percebeu, contudo, que não se tratava de uma situação clara e definida. Havia uma possibilidade — bastante improvável — de que a realização completa dos cálculos viesse a revelar que os vários aspectos quânticos responsáveis pelas anomalias que afetavam a teoria das cordas cancelar-se-iam mutuamente quando combinados da maneira correta. Junto com Green, Schwarz dedicou-se à árdua tarefa de calcular essas anomalias e, no verão de 1984, os dois chegaram ao resultado positivo. Em uma noite de tempestade, quando trabalhavam no Aspen Center for Physics, no Colorado, EUA, eles completaram um dos cálculos mais importantes feitos no campo — cálculo que provava que todas as anomalias potenciais *cancelavam-se mutuamente*, de modo quase miraculoso. Eles puderam revelar que a teoria das cordas estava livre de anomalias e não sofria, portanto, de inconsistências matemáticas. E demonstraram convincentemente a viabilidade da teoria das cordas do ponto de vista da mecânica quântica.

Dessa vez os físicos prestaram atenção. Estávamos em meados da década de 1980, e o clima entre os físicos havia mudado consideravelmente. Muitos dos aspectos essenciais das três forças não gravitacionais já haviam sido equacionados na teoria e comprovados com experiências. Embora faltasse resolver certos detalhes importantes — situação que ainda perdura —, a comunidade estava pronta para enfrentar o grande desafio seguinte: a combinação entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Então, saídos de um recanto pouco conhecido da física, Green e Schwarz entraram em cena com uma proposição definida, matematicamente consistente e esteticamente agradável para o prosseguimento dos estudos. Da noite para o dia, o número de pesquisadores que trabalhavam com a teoria das cordas saltou de dois para mais de mil. Havia começado a primeira revolução da teoria das cordas.

A PRIMEIRA REVOLUÇÃO

Comecei o meu curso de doutorado na Universidade de Oxford no segundo semestre de 1984, e poucos meses depois, nos corredores, só se falava de uma revolução na física. Como a internet ainda estava em seus primórdios, o boca-a-boca era o canal principal para a disseminação das informações e todos os dias

circulavam notícias de novos avanços. Por toda parte, os pesquisadores comentavam que a atmosfera estava carregada como nunca estivera desde os primeiros tempos da mecânica quântica. Falava-se seriamente que o fim da física teórica estava ao nosso alcance.

A teoria das cordas era uma novidade para quase todo o mundo, de modo que os seus detalhes não eram bem conhecidos naqueles dias. Em Oxford estávamos com sorte: Michael Green tinha ido recentemente à universidade para dar uma conferência sobre a teoria das cordas e por isso muitos dentre nós nos familiarizamos com as ideias básicas e os propósitos principais da teoria. As perspectivas eram impressionantes. Em resumo, isto é o que a teoria dizia:

Considere uma porção qualquer de matéria — um pedaço de gelo, uma pedra, uma placa de ferro — e imagine cortá-la pela metade e em seguida cortar pela metade uma das partes, e assim por diante. Imagine cortar o material sucessivamente, obtendo pedaços cada vez menores. Uns 2500 anos atrás os gregos antigos já haviam colocado o problema de determinar o componente mínimo e indivisível, que seria o produto final desse procedimento. Na nossa era, aprendemos que mais cedo ou mais tarde chega-se aos átomos, mas os átomos não são a resposta à pergunta grega, pois podem ser divididos em componentes ainda menores. Os átomos são desintegráveis. Sabemos que são formados por elétrons que circulam em enxames à volta de um núcleo central, composto, por sua vez, por partículas denominadas prótons e nêutrons. E no final da década de 1960, experimentos realizados no Acelerador Linear de Stanford revelaram que até mesmo os nêutrons e prótons são formados por componentes ainda mais fundamentais: cada próton e cada nêutron consiste em três partículas conhecidas como quarks, como mencionamos no capítulo 9 e na figura 12.3a.

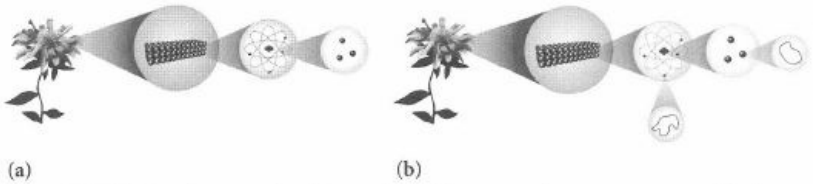


Figura 12.3. (*a*) *A teoria convencional tem por base elétrons e quarks como componentes fundamentais da matéria.* (*b*) *A teoria de cordas sugere que cada partícula é, na verdade, uma corda vibrante.*

A teoria convencional, apoiada nos experimentos mais avançados, considera os elétrons e os quarks como pontos sem nenhuma extensão espacial. Nesse sentido, portanto, eles marcam o fim da linha da composição microscópica da matéria — a última *matrioshka* (alusão às bonecas russas tradicionais, normalmente feitas de madeira, apresentadas umas dentro das outras, todas as quais, com exceção da última, podem ser abertas para exibir a de tamanho imediatamente inferior - N. T.) da natureza. É aqui que a teoria das

cordas entra em cena. Ela reformula a imagem convencional ao propor que os elétrons e os quarks *não são* partículas de tamanho zero. Segundo ela, o modelo convencional da partícula pontual é uma aproximação de um quadro mais refinado, em que cada partícula é, na verdade, um filamento mínimo e vibrante de energia, denominado *corda*, como se pode ver na figura 12.3b. Esses fios de energia vibratória não teriam espessura, e sim apenas comprimento, de maneira que as cordas são entidades unidimensionais. Contudo, como elas são tão pequenas, cerca de 100 bilhões de bilhões de vezes menor do que um único núcleo atômico (10^{33} centímetros), parecem ser pontos mesmo quando examinadas com os mais avançados aceleradores de partículas.

Uma vez que o nosso conhecimento da teoria das cordas ainda está longe de ser completo, ninguém sabe ao certo se a história termina realmente aqui — se, supondo que a teoria seja correta, as cordas são realmente a última *matrioshka* ou se até elas seriam feitas de componentes ainda menores. Mais tarde voltaremos a essa questão, mas por ora vamos seguir o desenvolvimento histórico do tema e imaginar que as cordas são efetivamente o fim da linha. Imaginaremos que as cordas são os componentes *mais elementares* do universo.

A TEORIA DAS CORDAS E A UNIFICAÇÃO

Isso é a teoria das cordas em poucas palavras, mas, para dar uma ideia do alcance desse novo enfoque, é preciso descrever a física das partículas convencionais com um pouco mais de detalhe. Nos últimos cem anos, os físicos perfuraram, esmagaram e pulverizaram a matéria em busca dos componentes elementares do universo. E, com efeito, verificaram que, em praticamente tudo o que se encontrou até aqui, os componentes fundamentais são os elétrons e os quarks, que acabamos de mencionar — para sermos precisos, como no capítulo 9: os elétrons e dois tipos de quarks, os quarks up e os quarks down, que diferem um do outro quanto à massa e à carga elétrica. Mas os experimentos revelaram também que o universo tem outros tipos de partícula, mais exóticas, que não aparecem com a matéria ordinária. Além dos quarks up e down, foram identificados quatro outros tipos de quark (os quarks *charm, strange, bottom* e *top)* e dois outros tipos de partículas muito semelhantes ao elétron, porém mais pesadas (*múons* e *taus).* É provável que essas partículas fossem abundantes logo após o Big-Bang, contudo hoje elas são produzidas apenas como efêmeros estilhaços resultantes de colisões a alta energia entre os tipos de partículas mais conhecidos. Finalmente, os cientistas descobriram também três tipos de partículas-fantasmas, denominadas *neutrinos (neutrino do elétron, neutrino do*

múon e *neutrino do tau)*$_y$ que podem atravessar trilhões de quilômetros de chumbo com a mesma facilidade com que atravessamos o ar. Essas partículas — o elétron e os seus dois primos mais pesados, os seis tipos de quarks e os três tipos de neutrinos — constituem a resposta do físico de partículas dos nossos dias à antiga pergunta grega sobre a constituição da matéria.[11]

O rol dos tipos de partículas pode ser organizado em três "famílias", ou "gerações" de partículas, como na tabela 12.1. Cada família tem dois tipos de quark, um de neutrino e um entre as partículas comparáveis ao elétron. A única diferença entre as partículas correspondentes em cada família é a massa, que aumenta em cada família sucessiva. A divisão em famílias sugere claramente a existência de um padrão, mas a variedade de tipos de partículas pode facilmente fazer rodar a cabeça ou turvar a visão. Fique atento, por favor, porque uma das coisas mais bonitas da teoria das cordas é que ela nos dá um meio de domar essa aparente complexidade.

De acordo com a teoria das cordas, só há *um* componente fundamental — a corda —, e a pletora dos tipos de partículas simplesmente reflete os diferentes padrões vibratórios que uma corda pode executar. É o mesmo que acontece com as cordas que nos são mais familiares, como as de um violino ou de um violoncelo. A corda de um instrumento pode vibrar de muitas maneiras, e nós percebemos cada padrão como uma nota musical diferente. Por isso a corda de um instrumento pode produzir uma variedade de sons diferentes. As cordas da teoria das cordas comportam-se do mesmo modo: elas também podem vibrar em diferentes padrões. Mas, em vez de produzir diferentes tons musicais, *os diferentes padrões vibratórios na teoria das cordas correspondem a diferentes tipos de partículas.* O conceito-chave é o de que o padrão vibratório executado por uma corda produz uma massa específica, uma carga elétrica específica, um *spin* específico e assim por diante — ou seja, a lista específica das propriedades que distinguem um tipo de partícula dos demais. Se a corda vibrar em determinado padrão, poderá ter as propriedades de um elétron; outra, que vibre em um padrão diferente, poderá ter as propriedades de um quark up ou de um quark down, ou de qualquer outro tipo de partícula da tabela 12.1.

Não existe uma "corda de elétron" que produza um elétron, ou uma "corda de quark up" que produza um quark up, ou uma "corda de quark down" que produza um quark down. Existe *um único* tipo de corda, do qual deriva uma grande variedade de partículas, porque a corda pode executar uma grande variedade de padrões vibratórios.

FAMÍLIA 1		FAMÍLIA 2		FAMÍLIA 3	
PARTÍCULA	MASSA	PARTÍCULA	MASSA	PARTÍCULA	MASSA
Elétron	0,00054	Múon	0,11	Tau	1,9
Neutrino do elétron	$<10^{-9}$	Neutrino do múon	$<10^{-4}$	Neutrino do tau	$<10^{-1}$
Quark up	0,0047	Quark charm	1,6	Quark top	189
Quark down	0,0074	Quark strange	0,16	Quark bottom	5,2

Tabela 12.1. *As três famílias de partículas fundamentais e as suas massas (em múltiplos da massa do próton). Sabe-se que os valores das massas dos neutrinos são diferentes de zero, mas a sua determinação exata ainda não pôde ser obtida experimentalmente.*

Como se pode ver, isso representa um passo potencialmente gigantesco rumo à unificação. Se a teoria das cordas estiver correta, a lista de partículas da tabela 12.1, que faz a cabeça rodar e turva a visão, é a manifestação do repertório de vibrações de um único componente fundamental. Metaforicamente, as diferentes notas que podem ser tocadas por um mesmo tipo de corda instrumental correspondem a todas as diferentes partículas que já foram detectadas. No nível ultramicroscópico, o universo seria comparável a uma sinfonia de cordas que faz a matéria vibrar e existir.

Esse é um esquema deliciosamente elegante para explicar as partículas da tabela 12.1, mas a unificação proposta pela teoria das cordas vai ainda além. No capítulo 9 e na nossa discussão acima, vimos como as forças da natureza são transmitidas no nível quântico por outras partículas, as partículas mensageiras, cujo resumo está na tabela 12.2. A teoria das cordas explica as partículas mensageiras do mesmo modo como explica as partículas de matéria. Assim, cada partícula mensageira é uma corda que executa um padrão vibratório particular. Um fóton é uma corda que vibra em determinado padrão; uma partícula W é uma corda que vibra em um padrão diferente; um glúon é uma corda que vibra em um terceiro padrão.

Nesse contexto, o que tem importância fundamental é que Schwarz e Scherk demonstraram em 1974 que existe um padrão vibratório particular que tem todas as propriedades de um gráviton, o que significa que a força gravitacional está incluída no esquema da teoria das cordas, que se insere na mecânica quântica. Assim, não só as partículas de matéria, mas também as partículas mensageiras — e até mesmo a partícula mensageira da gravidade — derivam das cordas vibrantes.

FORÇA	PARTÍCULA DE FORÇA	MASSA
Forte	Glúon	0
Eletromagnética	Fóton	0
Fraca	W, Z	86, 97
Gravidade	Gráviton	0

Tabela 12.2. *As quatro forças da natureza, juntamente com as partículas de força a elas associadas e as suas massas, expressas em múltiplos da massa do próton. (Na verdade, existem duas partículas W — uma com carga +1 e outra com carga -1 —, e ambas têm a mesma massa. Para simplificar, ignoramos esse detalhe e nos referimos a ambas como partícula W.)*

Desse modo, além de proporcionar a primeira teoria bem-sucedida para a união entre a gravidade e a mecânica quântica, a teoria das cordas revelou ter a capacidade de alcançar uma descrição unificada de toda a matéria e de todas as forças. Foi essa perspectiva que fez milhares de físicos caírem da cadeira em meados da década de 1980. Muitos, ao se levantarem e sacudirem a poeira, já estavam convertidos.

POR QUE A TEORIA DAS CORDAS FUNCIONA?

Antes do desenvolvimento da teoria das cordas, o percurso do progresso científico exibia uma série de tentativas fracassadas de unir a gravidade e a mecânica quântica. O que tem, então, a teoria das cordas que a tornou capaz de ter o êxito que até aqui tem mostrado? Já descrevemos como Schwarz e Scherk perceberam, para a sua própria surpresa, que determinado padrão vibratório das cordas tinha exatamente as propriedades da partícula gráviton e como eles concluíram que a teoria das cordas proporcionava um esquema para a fusão das duas teorias. Historicamente, essa foi a maneira fortuita pela qual a força promissora da teoria das cordas revelou-se. Mas isso não basta para explicar por que a teoria das cordas teve êxito onde todas as demais tentativas falharam. A figura 12.2 mostra a essência do conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica — nas escalas ultracurtas de espaço (e de tempo), o frenesi da incerteza quântica torna-se tão violento que o modelo geométrico suave do espaço-tempo que está presente na relatividade geral fica destruído. Portanto, a pergunta é: como a teoria das cordas resolve o problema? Como a teoria das cordas acalma o tumulto das oscilações do espaço-tempo nas distâncias ultramicroscópicas?
A principal característica inovadora da teoria das cordas é que o seu componente básico não é uma partícula pontual — um ponto de tamanho zero —, mas sim um objeto com extensão espacial. Essa diferença é essencial para o êxito da teoria das cordas na combinação entre a gravidade e a mecânica quântica.

O frenesi ilustrado na figura 12.2 deriva da aplicação do princípio da incerteza ao campo gravitacional. Em escalas cada vez menores, o princípio da incerteza implica oscilações cada vez maiores no campo gravitacional. Nessas escalas de distância extremamente curtas, contudo, devemos descrever o campo gravitacional em termos dos seus componentes fundamentais, os grávitons, assim como nas escalas moleculares devemos descrever a água em termos das suas moléculas de **H_2O.** Nessa linguagem, as ondulações frenéticas do campo gravitacional devem ser vistas como um grande número de grávitons que se movem desordenadamente para um lado e para o outro, como grãos de poeira apanhados em um ciclone feroz. Se os grávitons fossem partículas pontuais (como se supunha em todos os esquemas anteriores, que não conseguiram unificar a relatividade geral e a mecânica quântica), a figura 12.2 seria uma descrição correta do seu comportamento coletivo: quanto menores as escalas de distância, maior a agitação. Mas a teoria das cordas altera essa conclusão.

Na teoria das cordas, cada gráviton é uma corda vibrante — que não é um ponto e que tem um comprimento aproximadamente igual à distância de Planck (10^{-33} centímetros).[12] E como os grávitons são os componentes mais elementares do campo gravitacional, não faz sentido falarmos do comportamento dos campos gravitacionais em escalas menores do que a de Planck. Assim como o grau de resolução de uma tela de televisão tem por limite mínimo o pixel, a resolução dos campos gravitacionais, na teoria das cordas, tem por limite mínimo o tamanho dos grávitons. Dessa maneira, o tamanho — diferente de zero — dos grávitons — e de tudo o mais — estabelece um limite, na teoria das cordas, aproximadamente igual ao tamanho da distância de Planck, para o grau de resolução do campo gravitacional.

Esse é um conceito essencial. As flutuações quânticas incontroláveis ilustradas na figura 12.2 surgem apenas quando consideramos a incerteza quântica em escalas de distância arbitrariamente pequenas — menores do que a distância de Planck. Em uma teoria baseada em partículas pontuais de tamanho igual a zero, essa aplicação do princípio da incerteza é correta e, como vemos na figura, isso nos leva a um terreno insólito, que fica fora do alcance da relatividade geral de Einstein. Por outro lado, uma teoria baseada em cordas tem um anteparo natural. Nela, as cordas são o componente mínimo, e por isso a nossa viagem ao domínio do ultramicroscópico chega ao fim quando alcançamos a escala de Planck — o tamanho das próprias cordas. Na figura 12.2, a escala de Planck está representada pelo segundo nível mais alto. Como se vê, nessas escalas ainda há ondulações no tecido espacial porque o campo gravitacional ainda está sujeito a agitações quânticas. Porém as agitações são suficientemente suaves para evitar conflitos irreparáveis com a relatividade geral. A estrutura matemática da

relatividade geral tem de ser modificada para incorporar essas ondulações quânticas, mas isso é factível e a matemática permanece confiável.
Assim, colocando um limite mínimo abaixo do qual não existe a possibilidade de prosseguir, a teoria das cordas coloca também um limite à violência das agitações do campo gravitacional — e esse limite tem o tamanho exato para evitar o choque catastrófico entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Desse modo, a teoria das cordas vence o antagonismo entre os dois esquemas e consegue, pela primeira vez, unificá-los.

O TECIDO CÓSMICO E O DOMÍNIO DO PEQUENO

O que significa isso, de maneira geral, para a estrutura ultramicroscópica do espaço e do espaço-tempo? Em primeiro lugar, a noção convencional de que o tecido do espaço e do tempo é contínuo — de que é possível dividir a distância entre um lugar e outro e a duração do tempo entre um momento e outro indefinidamente, em unidades cada vez menores — é frontalmente rebatida. Em vez disso, quando chegamos à distância de Planck (o comprimento de uma corda) e ao tempo de Planck (o tempo que a luz tomaria para atravessar o comprimento de uma corda), já não podemos continuar a dividir o espaço e o tempo. O conceito de unidades "cada vez menores" deixa de ter sentido quando alcançamos o tamanho dos componentes *mínimos* do cosmo. Se trabalharmos com o conceito de partículas pontuais, não haverá esse limite mínimo, mas como as cordas têm um tamanho, o limite se impõe. Se a teoria das cordas estiver correta, os conceitos normais de espaço e tempo, o esquema no qual ocorrem todas as nossas experiências diárias e simples, não se aplicam às escalas menores do que a escala de Planck — que é a das próprias cordas.
Ainda não existe consenso quanto aos conceitos que se imporão nessa redefinição. Uma possibilidade que concorda com a explicação acima, sobre como a teoria das cordas combina a relatividade geral e a mecânica quântica, é a de que o tecido do espaço, na escala de Planck, assemelha-se a uma malha *ou uma tela, na qual o "espaço" entre um fio da malha e o seguinte fica fora* dos limites da realidade física. Assim como uma formiga microscópica que estivesse andando em um tecido comum teria de saltar de um fio para o próximo, talvez o movimento através do espaço nas escalas ultramicroscópicas requeira também saltos de um "fio" do espaço para o próximo. O tempo também poderia ter uma estrutura granular, na qual os momentos específicos estariam muito próximos uns dos outros, mas não formariam um todo contínuo. Segundo essa maneira de pensar, os conceitos de intervalos de espaço e de tempo cada vez menores

chegariam a um fim claramente estabelecido na escala de Planck. Assim como não existe uma moeda que valha menos do que um centavo, se o espaço-tempo ultramicroscópico tiver uma estrutura semelhante a uma malha, não haverá distâncias menores do que a de Planck nem durações menores do que o tempo de Planck.

Outra possibilidade é a de que o espaço e o tempo não deixem abruptamente de ter sentido nas escalas extremamente pequenas, mas sim se transformem de maneira gradual em outros conceitos mais fundamentais. Um tamanho menor do que a escala de Planck estaria excluído não porque tivéssemos encontrado uma malha fundamental, mas porque os conceitos de espaço e de tempo se diluem em noções nas quais "diminuir de tamanho" faria tão pouco sentido quanto perguntarmos se o número nove é feliz. Portanto, podemos admitir que a transformação gradual do espaço e do tempo macroscópicos familiares em um espaço e um tempo ultramicroscópicos estranhos implica que muitas das suas propriedades normais — como comprimento e duração — tornam-se irrelevantes ou carentes de sentido. É como estudar a temperatura e a viscosidade da água líquida — conceitos que se aplicam às propriedades macroscópicas de um fluido; quando chegamos à escala das moléculas individuais de H_2O, esses conceitos deixam de ter significado. Assim também, embora possamos dividir regiões do espaço e durações do tempo sucessivamente pela metade nas escalas cotidianas, ao transpormos a escala de Planck, talvez elas passem por uma transformação que torna essa divisão sem sentido.

Muitos teóricos das cordas, inclusive eu, suspeitamos fortemente de que algo assim acontece na realidade, mas para continuar avançando precisamos imaginar quais seriam os conceitos mais fundamentais em que o espaço e o tempo se transformam (devo notar que os proponentes de um outro enfoque para a união entre a relatividade geral e a mecânica quântica, a *gravidade quântica de laço,* que discutiremos brevemente no capítulo 16, têm um ponto de vista mais próximo do da primeira conjectura — a de que o espaço-tempo tem uma estrutura descontínua nas escalas mínimas). Essa é uma pergunta que ainda hoje está sem resposta, mas as pesquisas mais avançadas (que descreveremos no capítulo final) sugerem algumas possibilidades que têm implicações de grande alcance.

OS PONTOS MAIS SUTIS

Com a descrição dada até aqui, pode parecer estranho que algum físico tenha resistido à atração exercida pela teoria das cordas. Eis, afinal, uma teoria que

promete realizar o sonho de Einstein e ainda mais; uma teoria que pode desfazer a hostilidade entre a relatividade geral e a mecânica quântica; uma teoria com a capacidade de unificar toda a matéria e todas as forças, descrevendo tudo em termos de cordas vibrantes; uma teoria que sugere a existência de um reino ultramicroscópico em que os conceitos familiares do espaço e do tempo podem parecer tão superados quanto o telefone de disco; uma teoria, em síntese, que promete levar o nosso conhecimento do universo a um nível inteiramente novo. Mas tenha em mente que nunca ninguém viu uma corda e, a não ser por conta de algumas ideias extravagantes que discutiremos no próximo capítulo, é possível que, mesmo que a teoria das cordas esteja correta, nunca ninguém jamais as veja. As cordas são tão pequenas que uma observação direta seria tão difícil quanto ler este livro de uma distância de cem anos-luz: requereria um poder de resolução quase 1 bilhão de bilhões de vezes mais potente do que o que a nossa tecnologia atual nos proporciona. Alguns cientistas vociferam que uma teoria tão afastada da comprovação empírica direta pertence ao reino da filosofia, ou da teologia, mas não ao da física.

Acho que essa é uma visão míope ou pelo menos prematura. Se bem que seja verdade que talvez nunca tenhamos uma tecnologia capaz de ver as cordas diretamente, a história da ciência está cheia de teorias que foram testadas experimentalmente por meios indiretos.[13] A teoria das cordas não é modesta, e os seus objetivos e promessas são grandes. Isso é animador e útil, porque se uma teoria propõe-se ser *a teoria* para o universo, ela tem de ter uma correspondência com o mundo real não só no nível das grandes pinceladas, que estamos discutindo até aqui, mas também nos detalhes diminutos. E, como veremos, aí existem testes potenciais.

Durante as décadas de 1960 e 1970, os físicos de partículas avançaram muito na compreensão da estrutura quântica da matéria e das forças não gravitacionais que comandam o seu comportamento. O esquema conceituai ao qual, em última análise, eles foram levados pelos dados experimentais e pelas formulações teóricas denomina-se modelo-padrão da física das partículas. Ele tem por base a mecânica quântica, as partículas de matéria listadas na tabela 12.1 e as partículas de força listadas na tabela 12.2 (ignorando o gráviton, uma vez que o *modelo-padrão* não incorpora a gravidade, e incluindo a partícula de Higgs, que não aparece listada nas tabelas), todas vistas como partículas pontuais. O modelo-padrão é capaz de explicar essencialmente todos os dados produzidos pelos aceleradores de partículas do mundo, e os seus inventores têm sido louvados ao longo dos anos com os mais altos reconhecimentos. Mesmo assim, o modelo-padrão tem limitações significativas. Já vimos que ele, assim como todos os

demais enfoques anteriores à teoria das cordas, não consegue unificar a gravidade e a mecânica quântica. E existem ainda outros inconvenientes.

O modelo-padrão não consegue explicar *por que* as forças são transmitidas pela lista específica das partículas da tabela 12.2 e *por que* a matéria é composta pela lista específica das partículas da tabela 12.1. Por que há três famílias de partículas de matéria e por que cada família tem as partículas que tem? Por que não duas famílias ou uma só? Por que o elétron tem uma carga elétrica três vezes maior do que a do quark down? Por que o múon pesa 23,4 vezes mais do que o quark up e por que o quark top pesa cerca de 350 mil vezes mais do que o elétron? Por que o universo é construído com essa sequência de números aparentemente aleatórios? O modelo-padrão toma as partículas das tabelas 12.1 e 12.2 como *dados iniciais* (de novo ignorando o gráviton) e com eles faz previsões que impressionam pela precisão sobre como as partículas interagem e influenciam-se mutuamente. Mas o modelo-padrão não explica o dado — as partículas e as suas propriedades —, assim como a sua calculadora não explica os números que você digita.

A preocupação com as propriedades dessas partículas não é uma questão acadêmica. Não se trata apenas de saber por que certos detalhes esotéricos acontecem desta ou daquela maneira. No último século os cientistas perceberam que o universo só tem as características que nos são familiares porque as partículas das tabelas 12.1 e 12.2 têm exatamente as propriedades requeridas para isso. Mesmo pequenas alterações nos valores das massas, ou das cargas elétricas de algumas das partículas, impossibilitariam, por exemplo, que elas participassem dos processos nucleares que dão luz às estrelas. E sem as estrelas, o universo seria um lugar completamente diferente. Assim, as características específicas das partículas elementares relacionam-se com o que muitos creem ser a pergunta mais profunda de toda a ciência: *por que as partículas elementares têm exatamente as propriedades necessárias para que aconteçam os processos nucleares, brilhem as estrelas, formem-se planetas à sua volta e* e_y *em pelo menos um deles, exista a vida?*

O modelo-padrão não nos oferece nenhuma perspectiva sobre essa questão, uma vez que as propriedades das partículas fazem parte dos seus dados iniciais. A teoria só funciona e produz resultados por causa da especificação prévia das propriedades das partículas. Com a teoria das cordas é diferente. Nela, as propriedades das partículas são *determinadas* pelos padrões vibratórios das cordas, o que permite à teoria sustentar a promessa de dar uma explicação.

AS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS NA TEORIA DAS CORDAS

Para compreender o novo esquema explicativo da teoria das cordas, temos de formar a ideia de como as vibrações das cordas produzem as propriedades das partículas. Consideremos, então, a mais simples das propriedades das partículas: a massa.

A partir de $E = rac^2$, sabemos que a massa e a energia são intercambiáveis. Como o dólar e o euro, elas são valores conversíveis (mas, ao contrário das moedas, elas têm uma taxa de câmbio fixa, determinada pelo quadrado da velocidade da luz, c^2). A nossa sobrevivência depende da equação de Einstein, uma vez que o calor e a luz do Sol, que nos sustentam a vida, são gerados pela conversão de 4,3 milhões de toneladas de matéria em energia a cada segundo. Um dia, os reatores nucleares aqui na Terra poderão emular o Sol, usando, com segurança, a equação de Einstein para proporcionar à humanidade um suprimento de energia essencialmente inesgotável.

Nesses exemplos, a energia é produzida a partir da massa. Mas a equação de Einstein funciona perfeitamente no sentido inverso — o sentido da produção de massa a partir da energia —, e esse é o sentido em que a teoria das cordas usa a equação. A *massa* de uma partícula, na teoria das cordas, não é nada mais do que a *energia* da sua corda vibrante. A explicação oferecida pela teoria das cordas para as diferenças de peso entre as partículas, por exemplo, está em que a corda que constitui a partícula mais pesada vibra mais rápida e mais furiosamente do que a corda que constitui a partícula mais leve. Uma vibração mais rápida e mais furiosa significa mais energia, e mais energia traduz-se, de acordo com a equação de Einstein, em mais massa. Reciprocamente, quanto mais leve for a partícula, mais vagarosa e menos frenética será a vibração correspondente da corda. Uma partícula sem massa, como o fóton, ou o gráviton, corresponde a uma corda que executa o padrão vibratório mais plácido e suave que for possível/[14]

Outras propriedades das partículas, como a carga elétrica e o *spin*, estão codificadas em características mais sutis das vibrações de cordas. Em comparação com a massa, é mais difícil descrever essas características de maneira não matemática, mas elas seguem a mesma ideia básica: o padrão vibratório é a impressão digital da partícula. Todas as propriedades a que recorremos para distinguir uma partícula de outra são determinadas pelo padrão vibratório da corda da partícula.

No começo da década de 1970, quando os físicos analisaram os padrões vibratórios que surgiam da primeira encarnação da teoria das cordas — a *teoria das cordas bosônicas* —, com o objetivo de determinar os tipos de propriedades das partículas que a teoria previa, encontraram-se com um obstáculo. O *spin* de

todos os padrões vibratórios da teoria das cordas bosônicas aparecia em números inteiros: *spin 0, spin 1, spin 2* e assim por diante. Isso era um problema porque, embora os valores dos *spins* das partículas mensageiras sejam desse tipo, isso não acontece com o das partículas de matéria (como o elétron e o quark), cujo *spin* é fracionário — *spin* ^{l}h. Em 1971, Pierre Ramond, da Universidade da Flórida, dedicou-se a remediar a situação e logo encontrou uma maneira de modificar as equações da teoria das cordas bosônicas de modo a permitir também padrões vibratórios intermediários (a relação com a massa que é originada de um oceano de Higgs será discutida posteriormente neste capítulo).

Com efeito, as análises mostraram que as pesquisas de Ramond, juntamente com os resultados encontrados por Schwarz e seu colaborador André Neveu e trabalhos posteriores de Ferdinando Gliozzi, Joël Scherk e David Olive, revelaram um equilíbrio perfeito — uma nova simetria — entre os padrões vibratórios com diferentes *spins* na teoria modificada das cordas. Os pesquisadores verificaram que os novos padrões vibratórios apareciam em pares cujos valores de *spin* diferiam um do outro em meia unidade. Para cada padrão vibratório com *spin 1/2* havia um padrão vibratório correlato com *spin 0.* Para cada padrão vibratório de *spin* 1 havia um padrão vibratório correlato com *spin 1/2* e assim por diante. A relação entre os valores de números inteiros e os fracionários recebeu o nome de *supersimetria,* e assim nasceu a *teoria das cordas supersimétricas,* ou, simplesmente, a *teoria das supercordas.* Quase uma década depois, quando Schwarz e Green mostraram que todas as anomalias potenciais que ameaçavam a teoria das cordas cancelavam-se mutuamente, eles já estavam trabalhando no esquema da teoria das *supercordas* e, assim, a revolução iniciada pela publicação do seu trabalho em 1984 é chamada, com mais propriedade, a primeira revolução de supercordas. (No texto que se segue, referir-me-ei muitas vezes às cordas e à teoria das cordas, mas isso é apenas uma simplificação. As referências serão sempre às supercordas e à teoria das supercordas).

Com base nisso, podemos agora dizer em que consistiria a promessa da teoria das cordas de ir além das descrições genéricas e explicar o universo em seus detalhes. A essência é a seguinte: entre os padrões vibratórios que as cordas podem executar têm de estar aqueles cujas propriedades concordam com os dos tipos de partículas conhecidas. A teoria tem padrões vibratórios com *spin* 72, mas eles têm de coincidir *precisamente* com os das partículas conhecidas de matéria, listadas na tabela 12.1. A teoria tem padrões vibratórios com *spin* 1, mas eles têm de coincidir *precisamente* com os das partículas mensageiras conhecidas, listadas na tabela 12.2. Por fim, se os experimentos efetivamente

descobrirem partículas com *spin* 0, como os que são previstos para os campos de Higgs, a teoria das cordas deve produzir padrões vibratórios que coincidem *precisamente* também com as propriedades dessas partículas. Em resumo, para que a teoria das cordas seja viável, os seus padrões vibratórios devem produzir e explicar as partículas do modelo-padrão.

Esta é, portanto, a grande oportunidade da teoria das cordas. Se ela for correta, *existirá* uma explicação para as propriedades das partículas que os pesquisadores identificaram e ela será encontrada nos padrões vibratórios ressonantes que as cordas podem executar. Se as propriedades desses padrões vibratórios coincidirem com as propriedades das partículas listadas nas tabelas 12.1 e 12.2, acho que isso convencerá mesmo os céticos mais renitentes a respeito da veracidade da teoria, ainda que ninguém tenha jamais visto diretamente a extensão espacial da própria corda. E além de fazer com que ela se imponha como a tão buscada teoria unificada, essa coincidência entre a teoria e os dados experimentais fará com que a teoria das cordas proporcione a primeira explicação fundamental de por que o universo é como é.

E como a teoria das cordas enfrenta esse teste crucial?

VIBRAÇÕES DEMAIS

Bem, à primeira vista, a teoria das cordas não passa no teste. Para começar, existe um número infinito de padrões vibratórios diferentes. Os primeiros dessa lista infindável aparecem na figura 12.4. Mas as tabelas 12.1 e 12.2 contêm apenas um número finito de partículas, de modo que, desde o início, parece haver um grande desencontro entre a teoria das cordas e o mundo real. Além disso, quando analisamos matematicamente as possíveis energias — e por conseguinte as massas — desses padrões vibratórios, defrontamo-nos com outra desproporção significativa entre teoria e observação. As massas dos padrões vibratórios admissíveis não guardam semelhança com as massas das partículas, que foram medidas experimentalmente e estão registradas nas tabelas 12.1 e 12.2. Não é difícil saber por quê.

Desde os primeiros dias da teoria das cordas, os pesquisadores viram que a rigidez de uma corda é inversamente proporcional ao seu comprimento (ao quadrado do comprimento, para ser mais preciso): as cordas longas envergam-se facilmente, mas quanto mais curtas forem, mas rígidas se tornam. Em 1974, quando Schwarz e Scherk propuseram diminuir o tamanho das cordas para que elas incorporassem a força gravitacional na intensidade correta, propuseram, como decorrência, aumentar a tensão das cordas — ao valor extraordinário de

mil trilhões de trilhões de trilhões (10^{39}) de toneladas, cerca de (10^{41}) vezes maior do que o da tensão de uma corda comum de piano. Imagine então fazer vibrar uma corda mínima e extremamente rígida para produzir um dos padrões, cada vez mais complexos, que aparecem na figura 12.4. Você verá que, quanto maior for o número de cristas e vales, maior será a quantidade de energia a ser empregada. Reciprocamente, uma vez que a corda vibre em um desses padrões mais complexos, passa a conter uma enorme quantidade de energia. Portanto, todos os padrões vibratórios, à exceção dos mais simples, contêm grande quantidade de energia, razão por que, graças a $E = mc^2$, correspondem a partículas com massas também enormes.

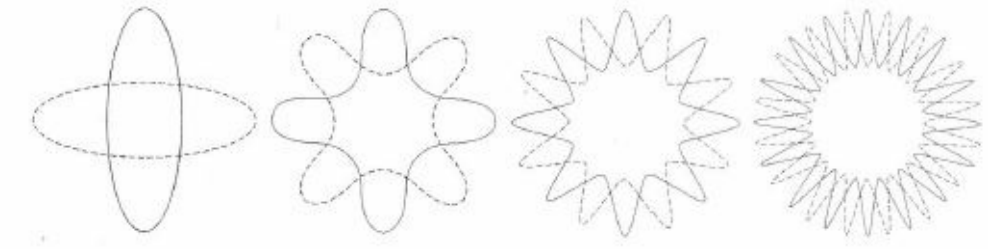


Figura 12.4. *Os primeiros exemplos dos padrões vibratórios das cordas.*

Quando digo enormes, quero dizer enormes. Os cálculos indicam que as massas das vibrações das cordas seguem uma série análoga à das harmonias musicais: todas são múltiplas de uma massa fundamental, a *massa de Planck*, assim como os tons são múltiplos de uma frequência fundamental. Para os padrões da física das partículas, a massa de Planck é colossal — cerca de 10 bilhões de bilhões (10^{19}) de vezes maior do que a massa do próton e aproximadamente igual à massa de um grão de poeira ou de uma bactéria. Assim, as massas possíveis das vibrações das cordas são zero vezes a massa de Planck, uma vez a massa de Planck, duas vezes a massa de Planck, três vezes a massa de Planck e assim por diante, o que mostra que as massas de todas as vibrações das cordas, com a exceção das relativas a zero vezes a massa de Planck, são gigantescas.[15]

Como se vê, algumas das partículas das tabelas 12.1 e 12.2 têm realmente massa igual a zero, mas a maioria não. E as massas diferentes de zero que aparecem nas tabelas estão mais longe da massa de Planck do que o sultão de Brunei está de precisar de um empréstimo. Assim, podemos ver claramente que as massas das partículas conhecidas não se coadunam com o padrão apontado pela teoria das cordas. Isso significa que a teoria das cordas está descartada? Você pode pensar que sim, mas a verdade é que não. A lista infinita de padrões vibratórios cujas massas são cada vez mais distantes das massas das partículas conhecidas é um

desafio que a teoria tem de superar. Anos de pesquisas revelaram estratégias promissoras para fazê-lo.

Note, em primeiro lugar, que experimentos realizados com os tipos conhecidos de partículas nos ensinam que as partículas pesadas tendem a ser instáveis. Tipicamente, elas se desintegram com rapidez, formando uma chuva de partículas mais leves e gerando, por fim, os tipos mais leves e mais comuns que aparecem nas tabelas 12.1 e 12.2. (O quark top, por exemplo, desintegrasse em cerca de 10^{-24} segundos.) É de esperar que essa lição valha também para os padrões vibratórios "superpesados", o que explicaria por que, mesmo que eles tenham sido copiosamente produzidos no tórrido universo primordial, poucos, ou nenhum deles, tenham sobrevivido até hoje. Mesmo que a teoria das cordas esteja correta, a nossa única chance de ver os padrões vibratórios superpesados estaria em produzi-los por meio de colisões a altas energias em aceleradores de partículas. Contudo, como os aceleradores atuais só alcançam energias equivalentes a aproximadamente mil vezes a massa do próton, eles são capazes de excitar apenas os padrões vibratórios mais plácidos da teoria das cordas. Desse modo, a previsão da teoria das cordas a respeito de uma torre de partículas com massas milhões de bilhões de vezes maiores do que as que podemos alcançar com a nossa tecnologia atual não está em conflito com as observações.

Essa explicação também deixa claro que o contato entre a teoria das cordas e a física das partículas envolve apenas as vibrações das cordas com as menores energias — as vibrações sem massa —, uma vez que as outras estão muito além do que se pode alcançar com a tecnologia de hoje. Mas que dizer do fato de que a maioria das partículas das tabelas 12.1 e 12.2 tem massa? É uma questão importante, mas menos preocupante do que pode parecer à primeira vista. Como a massa de Planck é enorme, mesmo a mais pesada de todas as partículas conhecidas, o quark top, tem uma massa que equivale a apenas 0,00000000000000000116 (cerca de 10^{-17}) vezes a massa de Planck. Já a massa do elétron equivale a 0,00000000000000000000000034 (10^{-23}) vezes a massa de Planck. Portanto, em uma primeira aproximação — *válida até a décima sétima casa decimal* —, todas as partículas das tabelas 12.1 e 12.2 têm massas iguais a zero vezes a massa de Planck (assim como a riqueza da maioria dos terráqueos, em uma primeira aproximação, corresponde a zero vezes a riqueza do sultão de Brunei), tal como "previsto" pela teoria das cordas. O nosso objetivo é melhorar essa aproximação e mostrar que a teoria das cordas explica os pequeníssimos desvios com relação ao valor de zero vezes a massa de Planck que caracterizam as partículas das tabelas 12.1 e 12.2. Mas os padrões vibratórios sem massa não estão em desacordo tão flagrante com os dados como você poderia ter pensado inicialmente.

Isso é encorajador, mas um exame mais aprofundado revela ainda outros desafios. Usando as equações da teoria das supercordas, os físicos enumeraram todos os padrões vibratórios sem massa da teoria das cordas. Um deles é o gráviton, de *spin 2*, e esse é o grande êxito que deflagrou todo o assunto, ao assegurar que a gravidade faz parte da teoria quântica das cordas. Mas os cálculos também revelam que há padrões vibratórios sem massa e com *spin 1* em número *muitíssimo* maior do que o número das partículas da tabela 12.2 e que há também padrões vibratórios sem massa e com *spin 1/2* em número *muitíssimo* maior do que o das partículas da tabela 12.1. Além disso, a lista dos padrões vibratórios de *spin 1/2* não revela traço de agrupamentos repetitivos semelhantes às estruturas das famílias da tabela 12.1. Uma inspeção um pouco mais profunda mostra, portanto, que vai ficando cada vez mais difícil ver como as vibrações das cordas podem alinhar-se com os tipos conhecidos de partículas.

Dessa maneira, em meados da década de 1980 havia razões para que estivéssemos animados com a teoria das supercordas, mas também havia razões para o ceticismo. Inegavelmente, a teoria das supercordas representa um passo audacioso rumo à unificação. Ao propiciar o primeiro enfoque consistente para a fusão entre a gravidade e a mecânica quântica, ela fez na física o que o inglês Roger Bannister fez ao correr uma milha em menos de quatro minutos: mostrou ser possível o que parecia impossível. A teoria das supercordas mostrou em caráter definitivo que é possível romper a barreira aparentemente impenetrável que separa os dois pilares da física do século XX.

Todavia, ao tratar de avançar e mostrar que a teoria das supercordas poderia explicar as características específicas da matéria e das forças da natureza, os cientistas encontraram dificuldades. Isso levou os céticos a proclamar que a teoria das supercordas, apesar do seu potencial unificador, era uma simples estrutura matemática, sem relacionamento direto com o universo físico.

Além dos problemas que já discutimos, no alto da lista em que os céticos enumeravam as deficiências da teoria das supercordas estava um aspecto de que ainda não falamos. A teoria, com efeito, proporciona uma união bem-sucedida entre a gravidade e a mecânica quântica, livre das inconsistências matemáticas que arruinaram todas as tentativas anteriores. Contudo, por estranho que pareça, nos primeiros anos depois da sua descoberta, os físicos viram que as equações da teoria das supercordas *não* apresentam essas invejáveis propriedades em um universo com três dimensões espaciais. Na verdade, as equações só são consistentes do ponto de vista matemático se o universo tiver *nove* dimensões espaciais, ou, se incluirmos a dimensão temporal, elas só funcionam em um universo com dez dimensões no espaço-tempo!

Comparada com esta questão pelo menos bizarra, as dificuldades na obtenção de um alinhamento correto entre os padrões vibratórios das cordas e os tipos conhecidos de partículas parece um problema secundário. A teoria das supercordas requer a existência de seis dimensões espaciais que nunca ninguém viu. Isso não é um detalhe: é um *problema*.
Ou não?
As descobertas teóricas feitas durante as primeiras décadas do século XX, muito antes de que a teoria das cordas entrasse em cena, sugeriam que a existência de dimensões adicionais não representaria problema algum. E com os conhecimentos adquiridos até o final do século, os físicos mostraram que essas dimensões adicionais têm a capacidade de fazer a ponte entre os padrões vibratórios da teoria das cordas e as partículas elementares que os pesquisadores descobriram.
Este é um dos desenvolvimentos mais gratificantes da teoria. Vejamos como funciona.

A UNIFICAÇÃO COM MAIS DIMENSÕES

Em 1919, Einstein recebeu um artigo que poderia facilmente ser considerado a fantasia de um excêntrico. Escrito por um matemático alemão pouco conhecido, chamado Theodor Kaluza, ele apresentava, em poucas páginas, um enfoque para a unificação das duas forças conhecidas à época, a gravidade e o eletromagnetismo. Com esse fim, Kaluza propunha uma ruptura radical com algo que é tão básico e tão cotidiano que parecia estar fora de discussão. A sua proposição era a de que o universo não tem três dimensões espaciais. Em vez disso, Kaluza pedia a Einstein e à comunidade científica que considerasse a possibilidade de que o universo tenha *quatro* dimensões espaciais, as quais, somadas à dimensão do tempo, dariam ao universo um total de cinco dimensões no espaço-tempo.
Para começo de conversa, o que é que isso significa? Bem, quando afirmamos que o universo tem três dimensões espaciais, queremos dizer que há três direções independentes, ou eixos ao longo dos quais podem ocorrer os movimentos. A partir da sua própria posição você pode delineá-las como esquerda/direita, frente/trás e acima/abaixo. Em um universo com três dimensões espaciais, qualquer movimento constitui-se de alguma combinação de movimentos ao longo dessas três direções. Do mesmo modo, em um universo com três dimensões espaciais, são necessárias exatamente três informações para que se especifique uma localização. Em uma cidade, por exemplo, é preciso conhecer a rua onde está o edifício, a rua do cruzamento mais próximo e o número do andar

onde está o objeto buscado. E se você quiser chegar pontualmente, é preciso especificar uma quarta informação: uma hora. Esse é o significado de um espaço-tempo quadridimensional.

Kaluza propôs que, além de esquerda/direita, frente/trás e acima/abaixo, *o universo tem mais uma dimensão espacial que, por alguma razão, ninguém nunca viu.* Se isso for certo, quer dizer que existe uma outra direção independente na qual as coisas podem mover-se e que, portanto, temos de dar quatro informações para especificar de forma precisa uma localização espacial, e cinco informações para especificar também o tempo.

Muito bem: isso é o que o artigo recebido por Einstein em abril de 1919 propunha. A pergunta é: por que Einstein não o jogou fora? Nunca vemos uma outra dimensão espacial — nunca ficamos vagando sem rumo porque as três dimensões espaciais são insuficientes para que nos desloquemos aonde queiramos —, por que então contemplar uma ideia tão estranha? Aqui está o porquê. Kaluza percebeu que as equações da teoria da relatividade geral de Einstein poderiam, com facilidade, ser matematicamente estendidas a um universo que tivesse mais uma dimensão espacial. Ele executou essa extensão e verificou, naturalmente, que a versão da relatividade geral com dimensões adicionais não só incluía as equações originais de Einstein para a gravidade, mas também as equações adicionais, por causa da nova dimensão espacial. Ao estudar as novas equações, Kaluza descobriu algo extraordinário: as equações eram nada mais nada menos do que as que Maxwell descobrira no século XIX para descrever o campo eletromagnético! Ao imaginar um universo com uma dimensão espacial a mais, ele propusera uma solução para o que Einstein via como um dos problemas mais importantes de toda a física. *Kaluza encontrara um esquema que combinava as equações originais de Einstein para a relatividade geral com as equações de Maxwell para o eletromagnetismo.* Foi por isso que Einstein não jogou o trabalho fora.

Intuitivamente, a proposição de Kaluza pode ser vista assim: na relatividade geral, Einstein despertou o espaço e o tempo. Eles espreguiçaram, flexionaram-se e esticaram-se e Einstein percebeu que havia encontrado a encarnação geométrica da força gravitacional. O trabalho de Kaluza sugeria que o alcance geométrico do espaço e do tempo era ainda maior. Einstein percebeu que os campos gravitacionais podem ser descritos como curvas e ondulações nas dimensões usuais, e Kaluza percebeu que em um universo com uma dimensão espacial adicional haveria curvas e ondulações adicionais, as quais, segundo a sua análise revelava, seriam precisamente adequadas para descrever os campos eletromagnéticos. Nas mãos de Kaluza, o próprio enfoque geométrico que

Einstein deu ao universo mostrou-se capaz de unir a gravidade e o eletromagnetismo.
Evidentemente, havia ainda um problema. Embora a matemática funcionasse bem, não havia — e ainda não há — evidências de outra dimensão espacial, além daquelas que conhecemos. A descoberta de Kaluza seria mera curiosidade ou seria pertinente para o nosso universo? Kaluza era um teórico convicto. Ele aprendeu a nadar lendo um tratado sobre natação e depois jogando-se ao mar. Mas a ideia de uma dimensão espacial invisível, por mais que a teoria fosse convincente, continuava a parecer abstrusa. Então, em 1926, o físico sueco Oskar Klein introduziu uma nova nuance na ideia de Kaluza, sugerindo onde a dimensão adicional poderia estar escondida.

AS DIMENSÕES OCULTAS

Para entender a ideia de Klein, imagine Philippe Petit andando em uma longa corda bamba, revestida de borracha, que se estende do monte Everest até Lhotse. Vista de uma distância de muitos quilômetros, como na figura 12.5, a corda bamba parece ser um objeto unidimensional, como uma linha — que só tem extensão em uma direção, a do comprimento. Se nos dissessem que uma minhoca estava também andando na corda à frente de Philippe, teríamos que animá-la a correr, pois continuar à frente seria a única maneira de evitar ser esmagada. É lógico que um momento de reflexão basta para que percebamos que a superfície da corda bamba é algo mais complexo do que apenas a dimensão esquerda/direita que podemos ver diretamente. Embora não nos seja possível ver a olho nu a partir de uma grande distância, a superfície da corda bamba tem uma segunda dimensão: a dimensão horária/anti-horária que a envolve. Com a ajuda de um modesto telescópio, essa dimensão circular torna-se visível e podemos ver que a minhoca se move não só ao longo da direção estendida, esquerda/direita, mas também na dimensão horário/anti-horário, que é pequena e recurvada. Portanto, em todos os pontos da corda bamba, a minhoca tem duas direções independentes nas quais pode mover-se [isso é o que queremos dizer quando apontamos que a superfície da corda bamba é bidimensional]. (se contássemos a esquerda, a direita, o sentido horário e o anti-horário separadamente, concluiríamos que a minhoca pode mover-se em quatro sentidos. Mas, quando falamos em direções “independentes”, é porque as agrupamos ao longo dos seus eixos geométricos, no caso o eixo esquerda/direita e o eixo horário/anti-horário) e, por conseguinte, escapar das pisadas de Philippe, ou mantendo-se à sua frente, como já havíamos pensado, ou colocando-se no lado de baixo da dimensão circular e deixando Philippe passar pelo lado de cima.

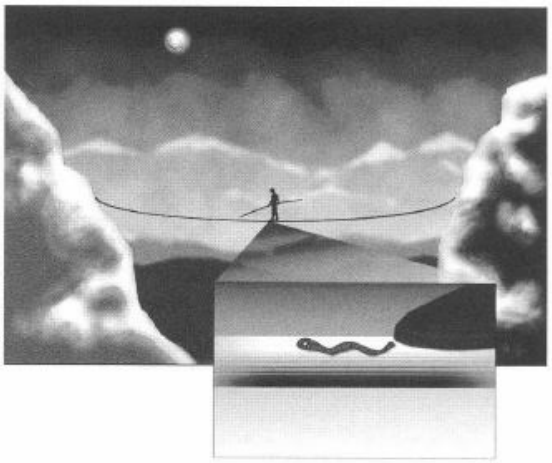


Figura 12.5. *À distância, uma corda bamba parece ser unidimensional, embora um telescópio suficientemente potente torne visível a sua segunda dimensão, que é recurvada.*

A corda bamba ilustra que as dimensões — as direções independentes em que qualquer coisa pode mover-se — têm duas variedades qualitativamente distintas. Podem ser grandes e fáceis de ver, como a dimensão esquerda/direita da superfície da corda bamba, ou mínimas e mais difíceis de ver, como a dimensão horária/anti-horária que envolve a superfície da corda. Neste exemplo, ver a dimensão circular da superfície da corda bamba não foi um desafio particularmente difícil. Só precisamos de um instrumento razoável de magnificação. Mas, como se pode imaginar, quanto menor for uma dimensão recurvada, mais difícil será detectá-la. A alguns quilômetros de distância, não é impossível detectar a dimensão circular de uma corda bamba. Outra coisa seria revelar a dimensão circular de algo como um fio dental ou uma fibra nervosa.

A contribuição de Klein foi a de sugerir que o que é verdadeiro para um objeto *dentro* do universo pode ser também verdadeiro para o próprio tecido do universo. Então, assim como a superfície da corda bamba tem dimensões grandes e pequenas, também as tem o tecido do espaço. Talvez as três dimensões que conhecemos tão bem — esquerda/direita, frente/trás e acima/abaixo — sejam como a extensão horizontal da corda bamba, dimensões do tipo grande e fácil de ver. Mas, assim como a superfície da corda bamba tem uma dimensão adicional, recurvada e circular, talvez o tecido do espaço tenha também uma dimensão pequena, recurvada e circular, tão pequena que não existe equipamento de aumento suficientemente potente que possa revelar a sua existência. Por causa do seu tamanho muito pequeno, argumentava Klein, a dimensão ficaria oculta.

Mas o que é “pequeno”? Bem, ao incorporar certos aspectos da mecânica quântica à proposição original de Kaluza, Klein fez análises matemáticas que revelaram que o raio de uma dimensão espacial circular adicional teria uma extensão aproximadamente igual à distância de Planck,[16] que é, claro, demasiado

pequena para poder ser verificada de forma experimental. (Os melhores equipamentos de que dispomos hoje têm uma resolução limitada a cerca de um milésimo do tamanho de um núcleo atômico, que é mais de 100 milhões de bilhões de vezes maior do que a distância de Planck). Porém, para uma minhoca imaginária do tamanho da distância de Planck, essa dimensão mínima, recurvada e circular propiciaria uma nova direção pela qual ela poderia passear com a mesma liberdade com que uma minhoca normal passeia pela dimensão circular de uma corda bamba como a da figura 12.5. Logicamente, assim como uma minhoca normal não encontra muito o que explorar na direção horária até voltar à posição de origem, a minhoca planckiana também voltaria repetidamente ao ponto de origem se se movesse ao longo da dimensão recurvada do espaço. Mas, à parte a pequenez do tamanho da viagem, a dimensão recurvada propiciaria à minhoquinha uma direção na qual ela poderia mover-se com a mesma facilidade com que o faria nas três dimensões estendidas que conhecemos.

Para compor uma visão intuitiva do que acontece, note que o que estamos chamando de dimensão recurvada da corda bamba — a direção horária/anti-horária — *existe em todos os pontos ao longo da dimensão estendida.* A minhoca pode mover-se na direção circular da corda bamba em qualquer ponto ao longo do seu comprimento, e podemos dizer que a superfície da corda bamba tem uma dimensão longa, com uma direção circular muito pequena vinculada a cada um dos seus pontos, como na figura 12.6. Devemos conservar em mente essa imagem porque ela também se aplica à proposição de Klein relativa ao caráter oculto da dimensão espacial adicional de Kaluza.

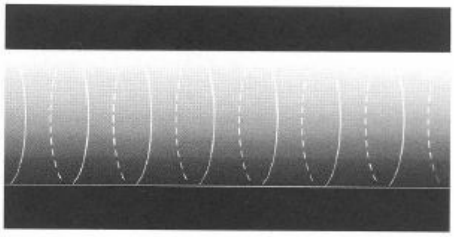


Figura 12.6. *A superfície de uma corda bamba tem uma dimensão longa com uma dimensão circular vinculada a ela em todos os pontos.*

Para que possamos visualizar, examinemos de novo o tecido do espaço, mostrando sequencialmente a sua estrutura em escalas de distância cada vez menores, como na figura 12.7. Nos primeiros níveis de magnificação não acontece nada de extraordinário: o tecido do espaço continua a parecer tridimensional (o que, como sempre, está representado esquematicamente na página do livro como uma malha bidimensional). Contudo, ao chegarmos à escala de Planck, que é o nível máximo de magnificação da figura, Klein sugere

que uma nova dimensão recurvada torna-se visível. Assim como a dimensão circular da corda bamba existe em todos os pontos ao longo da sua dimensão longa e estendida, também a dimensão circular desta proposição existe em todos os pontos das três dimensões espaciais estendidas da nossa vida cotidiana. Na figura 12.7 isso é ilustrado pela presença da dimensão circular adicional em diversos pontos ao longo das dimensões estendidas (uma vez que desenhar um círculo em cada ponto tiraria a nitidez da imagem) e a similaridade com a corda bamba da figura 12.6 pode ser imediatamente percebida. Na proposição de Klein, portanto, o espaço tem três dimensões estendidas (das quais a figura mostra apenas duas) e uma dimensão circular adicional, vinculada a todos e cada um dos pontos. Note que a dimensão adicional não é um calombo, nem um laço dentro das três dimensões espaciais usuais, como as limitações gráficas da figura podem fazer crer. Ao contrário, a dimensão adicional é uma nova direção, completamente distinta das três que conhecemos, que existe em todos os pontos do nosso espaço tridimensional comum, mas é tão pequena que escapa à detecção, mesmo com os instrumentos mais sofisticados.

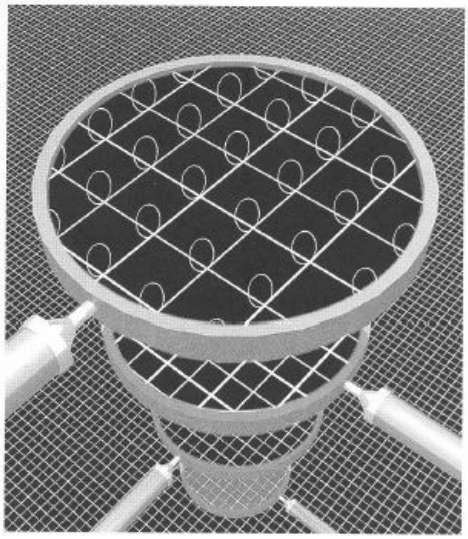


Figura 12.7. *A proposição de Kaluza-Klein consiste em que, nas escalas muito pequenas, o espaço tem uma dimensão circular adicional que se vincula a todos os pontos que nos são familiares.*

Com essa modificação aposta à ideia original de Kaluza, Klein proporcionou uma resposta à pergunta de como o universo poderia ter, além das três dimensões espaciais familiares, outras que permanecem ocultas. A partir de então, suas ideias ficaram conhecidas como a teoria de Kaluza-Klein. E como uma dimensão espacial adicional era a única coisa que faltava a Kaluza para unificar a relatividade geral e o eletromagnetismo, a *teoria de Kaluza-Klein* pareceria ser exatamente o que Einstein buscava. Realmente, Einstein e muitos outros ficaram

animadíssimos com a possível unificação por meio de uma nova dimensão espacial oculta. Iniciou-se um esforço vigoroso para ver se esse esquema funcionaria bem quando se incorporassem todos os detalhes. Não tardou muito para que a *teoria de Kaluza-Klein* começasse a apresentar os seus problemas. Talvez o mais evidente de todos foi o fato de que as tentativas de incorporar o elétron ao arcabouço extradimensional fracassaram.[17] Einstein continuou a experimentar com a teoria de Kaluza-Klein pelo menos até a década de 1940, mas a promessa inicial desse enfoque não se concretizou, e o interesse por ele despertado extinguiu-se gradualmente.

Em poucas décadas, contudo, a teoria de Kaluza-Klein daria uma espetacular volta por cima.

A TEORIA DAS CORDAS E AS DIMENSÕES OCULTAS

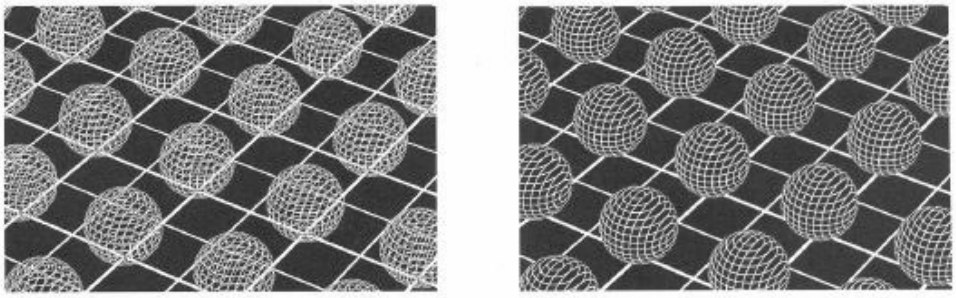
Além das dificuldades que a teoria de Kaluza-Klein encontrou ao tentar descrever o microcosmo, havia ainda uma outra razão pela qual os cientistas tinham hesitações a respeito dela. Muitos consideravam arbitrário e extravagante postular a ideia de uma dimensão espacial oculta. Kaluza não chegara à noção de uma nova dimensão espacial através de uma cadeia rigorosa de raciocínio dedutivo. Ao contrário, ele a tirou da cartola e, ao analisar as suas implicações, descobriu um vínculo inesperado entre a relatividade geral e o eletromagnetismo. Assim, embora essa tenha sido uma grande descoberta em si mesma, ela carecia de um sentido de inevitabilidade. Se se perguntasse a Kaluza e a Klein *por que* o universo teria quatro dimensões espaciais, em vez de cinco, seis ou 7 mil, eles não poderiam dar uma resposta mais convincente do que “porque sim”.

Mais de três décadas depois, a situação mudou radicalmente. A teoria das cordas é a primeira que unifica a relatividade geral e a mecânica quântica. Ademais, ela tem o potencial para unificar o que sabemos sobre todas as forças e toda a matéria. Mas as equações da mecânica quântica para a teoria das cordas não funcionam nas quatro dimensões do espaço-tempo, nem em cinco, seis ou 7 mil. Ao contrário, pelas razões que discutiremos na próxima seção, as equações da teoria das cordas funcionam apenas em dez dimensões do espaço-tempo — nove espaciais e uma temporal. A teoria das cordas exige mais dimensões.

Este é um tipo de resultado fundamentalmente diferente, que nunca foi encontrado antes na história da física. Antes das cordas, nenhuma teoria havia se pronunciado a respeito do número das dimensões espaciais do universo. Todas as teorias, de Newton a Maxwell e a Einstein, tomaram como certo que o

universo tinha três dimensões espaciais, assim como nós tomamos como certo que o Sol nascerá de novo amanhã. Quando Kaluza e Klein impuseram-se o desafio de sugerir a existência de quatro dimensões espaciais, isso correspondia, na verdade, a uma outra premissa — diferente, mas de toda maneira uma premissa. Com a teoria das cordas, pela primeira vez eram apresentadas equações que faziam uma *previsão* sobre o número das dimensões espaciais. É um cálculo — e não uma premissa, não uma hipótese, não um palpite inspirado — o que determina o número das dimensões espaciais de acordo com a teoria das cordas. E o mais surpreendente é que o número calculado não é o número três, mas sim o nove. A teoria das cordas nos leva *inevitavelmente* a um universo com seis dimensões espaciais a mais e proporciona, assim, um contexto irrecusável e pré-ordenado para invocarmos de novo as ideias de Kaluza e Klein.

A proposição original de Kaluza e Klein supunha a existência de apenas uma dimensão oculta, mas ela pode facilmente ser generalizada para duas, três e mesmo para as seis dimensões adicionais requeridas pela teoria das cordas. Por exemplo, na figura 12.8a substituímos a dimensão circular adicional da figura 12.7, que era uma forma unidimensional, pela superfície de uma esfera, que é uma forma bidimensional (lembre-se da discussão do capítulo 8, em que vimos que a superfície de uma esfera é bidimensional porque requer duas informações — como a latitude e a longitude, no caso da superfície terrestre — para especificar uma localização). Tal como no caso do círculo, considere que a esfera está vinculada a todos os pontos das dimensões usuais, embora, para que a imagem permaneça clara na figura 12.8a, só tenhamos desenhado as esferas que repousam sobre as interseções das linhas da malha. Em um universo desse tipo seriam necessárias cinco informações para localizar uma posição no espaço: três para localizá-la nas grandes dimensões (rua, cruzamento, andar) e duas para localizá-la na esfera (latitude, longitude) vinculada a esse ponto. Por certo, se o raio da esfera for pequeno demais — bilhões de vezes menor do que um átomo —, as duas últimas informações não teriam muita importância para a localização de seres relativamente grandes como nós. De toda maneira, a dimensão adicional seria parte integrante da configuração ultramicroscópica do tecido espacial. Uma minhoca ultramicroscópica precisaria dos cinco dados para poder comparecer pontualmente a um evento.



(a) (b)

Figura 12.8. *Visão ampliada de um universo com as três dimensões usuais, representadas pela malha, e (a) duas dimensões recurvadas, representadas pelas esferas ocas, e (b) três dimensões recurvadas, representadas pelas esferas sólidas.*

Avancemos uma dimensão mais. Na figura 12.8a, consideramos apenas a superfície das esferas. Imagine agora que, como na figura 12.8b, o tecido do espaço inclua também o interior das esferas — a nossa minhoquinha planckiana poderá cavar um buraco na esfera, como as minhocas normais fazem nas maçãs, e mover-se pelo interior dela. A especificação da localização da minhoca requereria agora *seis* informações: três para as dimensões espaciais estendidas normais e três mais para a esfera vinculável a esse ponto (latitude, longitude e profundidade de penetração). Se a isso somamos o tempo, este é um exemplo de universo com *sete* dimensões do espaço-tempo.

Aqui se verifica um salto. Embora seja impossível desenhar, imagine que em todos os pontos das três dimensões estendidas da nossa vida cotidiana o universo não tenha uma dimensão adicional, como na figura 12.7, nem duas dimensões adicionais, como na figura 12.8a, nem três dimensões adicionais, como na figura 12.8b, mas sim seis dimensões espaciais adicionais. Eu, com certeza, não consigo visualizar essa possibilidade, nem conheço ninguém que o faça. Mas o significado é claro. A especificação da localização espacial de uma minhoca do tamanho da escala de Planck nesse universo requer nove informações: três para localizar a posição nas dimensões estendidas normais e seis mais para localizá-la nas dimensões recurvadas vinculadas àquele ponto. Quando também se leva em consideração o tempo, temos um universo com dez dimensões do espaço-tempo, como requerem as equações da teoria das cordas. Se as seis dimensões adicionais recurvadas forem muito pequenas, elas facilmente escapariam à detecção.

A FORMA DAS DIMENSÕES OCULTAS

Na verdade, as equações da teoria das cordas determinam mais do que o número das dimensões espaciais. Determinam também os tipos de forma que podem

assumir.[18] As figuras mais recentes mostram as formas mais simples — circulares, esferas ocas e esferas sólidas —, mas as equações da teoria das cordas indicam uma classe significativamente mais complexa de formas hexadimensionais, conhecidas como formas de Calabi-Yau, ou espaços de CalabiYau. Seu nome deriva de dois matemáticos, Eugênio Calabi e Shing-Tung Yau, que descobriram essas formas matematicamente bem antes de que a sua importância para a teoria das cordas fosse percebida. A figura 12.9a é uma ilustração aproximada de um desses exemplos. Lembre-se de que nessa figura um gráfico bidimensional ilustra um objeto hexadimensional, o que resulta em uma série de distorções significativas. Mesmo assim, a figura dá uma ideia geral da aparência dessas formas. Se a forma particular da figura 12.9a constituísse as seis dimensões adicionais da teoria das cordas, o espaço teria, nas escalas ultramicroscópicas, a forma ilustrada na figura 12.9b. Como a forma de Calabi-Yau estaria vinculada a todos os pontos das três dimensões usuais, eu, você e tudo o mais estaríamos repletos dessas pequenas formas e envoltos por elas. Literalmente, ao andar de um lugar para o outro, o seu corpo se moveria através de todas as nove dimensões, circunavegando rápida e repetidamente a forma como um todo, de maneira que, em consequência, você não sentiria o seu próprio movimento através das seis dimensões adicionais.
Se essas ideias estiverem corretas, o tecido ultramicroscópico do cosmo é composto pela mais rica das texturas.

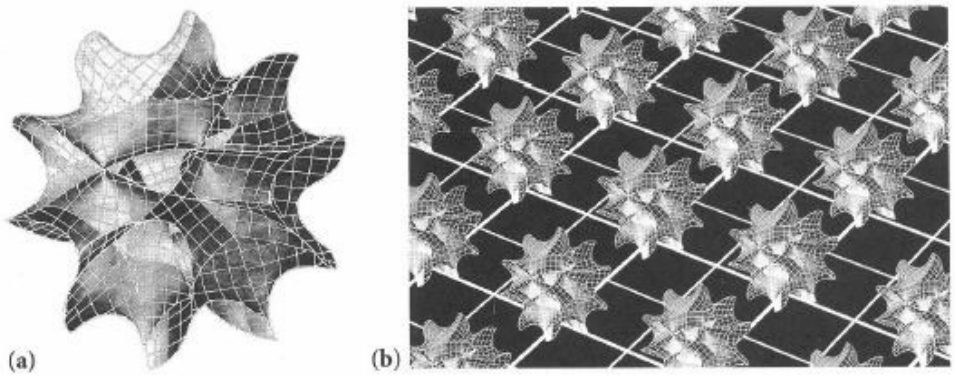


Figura 12.9. (*a*) *Um exemplo de forma de Calabi-Yau.* (*b*) *Detalhe altamente ampliado do espaço, com dimensões adicionais representadas por pequeníssimas formas de Calabi-Yau.*

A FÍSICA DAS CORDAS E AS DIMENSÕES ADICIONAIS

A beleza da relatividade geral está em que a física da gravidade é controlada pela geometria do espaço. Com as dimensões espaciais adicionais propostas pela teoria das cordas, seria natural imaginar que o poder da geometria na

determinação da física ficasse substancialmente aumentado. E é verdade. Vejamos esse aspecto, preliminarmente, considerando uma questão que até aqui evitei. Por que a teoria das cordas requer dez dimensões do espaço-tempo? A resposta é difícil, do ponto de vista matemático, mas tentarei uma explicação que seja suficiente para ilustrar como ela provém de uma interação entre a geometria e a física.

Imagine uma corda que se limite a vibrar na superfície bidimensional de uma mesa. A corda poderá executar uma série de padrões vibratórios, mas apenas aqueles que envolvem exclusivamente movimentos nas direções esquerda/direita e frente/trás da superfície da mesa. Se a seguir permitirmos que a corda vibre na terceira dimensão, com movimentos na direção acima/abaixo, com o que ela abandona a superfície da mesa, novos padrões vibratórios tornam-se acessíveis. Embora a visualização em mais de três dimensões seja difícil, essa conclusão — mais dimensões significando mais padrões vibratórios — é de ordem geral. Se uma corda puder vibrar em uma quarta dimensão espacial, ela poderá executar mais padrões vibratórios do que em apenas três dimensões. Se ela puder vibrar em uma quinta dimensão espacial, poderá executar mais padrões vibratórios do que em apenas quatro, e assim por diante. Essa é uma noção importante, porque há uma equação da teoria das cordas que exige que o número de padrões vibratórios independentes seja compatível com um requisito muito preciso. Se esse requisito for violado, a matemática da teoria das cordas se desorganiza e as suas equações perdem o sentido. Em um universo com três dimensões espaciais, o número de padrões vibratórios é demasiado pequeno e o requisito não é satisfeito. Com quatro dimensões espaciais, o número de padrões vibratórios ainda é muito pequeno e continua a ser pequeno com cinco, seis, sete ou oito dimensões. Mas com nove dimensões espaciais, o requisito do número de padrões vibratórios fica perfeitamente satisfeito. É assim que a teoria das cordas determina o número das dimensões espaciais.[19] (permita-me prepará-lo para um desenvolvimento importante que encontraremos no próximo capítulo. Os estudiosos das cordas sabem há décadas que as equações que eles normalmente usam para as análises matemáticas são apenas aproximadas (as equações exatas têm se revelado de difícil identificação e compreensão). Muitos pensavam, todavia, que as equações aproximadas eram suficientemente precisas para determinar o número requerido de dimensões adicionais. Mais recentemente (para espanto da maioria dos físicos da especialidade), alguns teóricos mostraram que as equações aproximadas *não levaram em conta* uma outra dimensão. Acredita-se agora que a teoria requer *sete* dimensões adicionais. Como veremos, isso não compromete o material que discutimos neste capítulo, mas revela que ele se insere em um esquema ainda mais amplo e unificado.[20])

Isso ilustra bem a interação da geometria com a física. A relação entre elas e a teoria das cordas vai mais além e, com efeito, proporciona uma maneira de enfocar um problema crucial encontrado antes. Lembre-se de que, ao tentar estabelecer o contato entre os padrões vibratórios das cordas e os tipos conhecidos de partículas, os físicos enfrentaram dificuldades. Viram que havia

demasiados padrões vibratórios sem massa e, além disso, as propriedades específicas dos padrões não correspondiam às partículas conhecidas de matéria e de força. Mas o que eu não havia mencionado antes, porque ainda não havíamos discutido a ideia das dimensões adicionais, é que, embora esses cálculos tenham levado em conta o *número* de dimensões adicionais (o que explica, em parte, por que se encontraram tantos padrões vibratórios), não levaram em conta o tamanho diminuto e a complexidade da *forma* das dimensões adicionais — supondo que todas as dimensões espaciais fossem planas e estendidas —, e isso faz uma diferença substancial.

As cordas são tão pequenas que, mesmo estando as seis dimensões adicionais comprimidas em uma forma de Calabi-Yau, elas ainda assim vibram em todas essas direções. Isso tem grande importância por duas razões. Em primeiro lugar, fica claro que as cordas vibram sempre em todas as nove dimensões espaciais, o que significa que o requisito do número de padrões vibratórios continua a ser atendido, mesmo estando as dimensões adicionais intensamente recurvadas. Em segundo lugar, assim como os padrões vibratórios das correntes de ar que passam por uma tuba são afetados pelas curvas da forma do instrumento, os padrões vibratórios das cordas são influenciados pelas curvas da geometria das seis dimensões adicionais. Se modificarmos a forma da tuba, estreitando uma passagem ou alongando uma câmara, os padrões vibratórios do ar e, em consequência, o som do instrumento também se modificarão. Do mesmo modo, se a forma e o tamanho das dimensões adicionais se modificarem, as propriedades específicas de cada padrão vibratório possível de uma corda também serão significativamente afetadas. E como o padrão vibratório de uma corda determina a sua massa e a sua carga, isso significa que as dimensões adicionais desempenham um papel essencial na determinação das propriedades das partículas.

Esse é um conceito-chave. O tamanho e a forma específica das dimensões adicionais exercem profundo impacto sobre os padrões vibratórios e, por conseguinte, sobre as propriedades das partículas. Como a estrutura básica do universo — da formação das galáxias e das estrelas à existência da vida como a conhecemos — depende sensivelmente das propriedades das partículas, o código do cosmo pode muito bem estar escrito na geometria de uma forma de Calabi-Yau.

Vimos o exemplo de uma forma de Calabi-Yau na figura 12.9, mas existem pelo menos centenas de milhares de outras possibilidades. A questão é saber que forma de Calabi-Yau constituiria a parte do tecido do espaço-tempo correspondente às dimensões adicionais. Essa é uma das perguntas mais

importantes que a teoria das cordas enfrenta, uma vez que somente com uma escolha clara da forma de Calabi-Yau poderemos determinar as características específicas dos padrões vibratórios das cordas. Até agora, ela permanece sem resposta. A razão está em que o nosso entendimento atual das equações da teoria das cordas não nos fornece indícios que nos permitam escolher uma dentre tantas formas. Do ponto de vista das equações que conhecemos, todas as formas de Calabi-Yau têm igual validade. As equações não determinam sequer o tamanho das dimensões adicionais. Como não podemos vê-las, elas devem ser pequenas, mas não sabemos quão pequenas.

Será essa uma falha fatal da teoria das cordas? É possível, mas não creio. Como discutiremos em maior profundidade no próximo capítulo, as equações exatas da teoria vêm resistindo aos esforços dos teóricos já por muitos anos e eles se valem, nas circunstâncias, de equações *aproximadas.* Tais equações permitiram-nos perceber muitíssimas características da teoria das cordas, mas para certas questões — inclusive o tamanho e a forma exata das dimensões adicionais — as equações aproximadas não são suficientes. Com os progressos que estamos fazendo no aperfeiçoamento das análises matemáticas e no afinamento das equações aproximadas, a determinação da forma das dimensões adicionais continua a ser um objetivo fundamental — e, a meu ver, atingível. Mas até aqui ele permanece fora do nosso alcance.

Contudo, podemos continuar a perguntar se *alguma* escolha de uma forma de Calabi-Yau produz os padrões vibratórios que se aproximam mais estreitamente das partículas conhecidas. E neste caso a resposta é gratificante.

Falta-nos muito para que cheguemos a investigar todas as possibilidades, mas os exemplos de formas de Calabi-Yau que já encontramos dão origem a padrões vibratórios das cordas que, em linhas gerais, estão de acordo com as tabelas 12.1 e 12.2. Em meados da década de 1980, por exemplo, Philip Candeias, Gary Horowitz, Andrew Strominger e Edward Witten (a equipe de físicos que estabeleceu a importância das formas de Calabi-Yau para a teoria das cordas) descobriram que cada buraco — termo usado aqui com uma acepção matemática precisa — contido em uma forma de Calabi-Yau dá origem a uma *família* de padrões vibratórios de energia mínima. Uma forma de Calabi-Yau com três buracos forneceria, assim, a explicação para a estrutura repetitiva de três famílias de partículas elementares da tabela 12.1. Com efeito, várias dessas formas de Calabi-Yau com três buracos já foram encontradas. Além disso, entre essas formas preferidas de espaços Calabi-Yau estão as que produzem exatamente o número correto de partículas mensageiras, assim como as cargas elétricas certas e as propriedades da força nuclear adequadas para coincidir com as partículas das tabelas 12.1 e 12.2.

Esse é um resultado extremamente encorajador, mas de modo algum garantido. Ao unificar a relatividade geral e a mecânica quântica, a teoria das cordas pode ter alcançado um objetivo só para se ver na impossibilidade de sequer aproximar-se de outro, igualmente importante: o de explicar as propriedades das partículas conhecidas de matéria e de força. Os pesquisadores têm confiança em que a teoria já deu mostras de ser capaz de superar essa perspectiva desalentadora. Prosseguir no caminho e calcular com precisão as massas das partículas é um desafio muito maior. Como vimos, as partículas das tabelas 12.1 e 12.2 têm massas que se desviam das vibrações de menor energia das cordas — zero vezes a massa de Planck — em menos de um milionésimo de bilionésimo. Calcular esses desvios infinitesimais requer um nível de precisão que está muito além do que podemos alcançar com o que sabemos atualmente sobre as equações da teoria das cordas.

Com efeito, como muitos outros teóricos das cordas, suspeito que as diminutas massas das tabelas 12.1 e 12.2 aparecem na teoria das cordas de maneira comparável ao que acontece no modelo-padrão. Lembre-se de que no capítulo 9 vimos que no modelo-padrão um campo de Higgs toma um valor diferente de zero em todo o espaço e que a massa de uma partícula depende da intensidade da força de resistência que ela experimenta ao mover-se através do oceano de Higgs. Um cenário similar parece ocorrer na teoria das cordas. Se um enorme conjunto de cordas vibrar coordenadamente e da maneira adequada por todo o espaço, pode propiciar um ambiente uniforme que, para todos os efeitos, seria indistinguível de um oceano de Higgs. As vibrações das cordas que no início geravam massa igual a zero adquiririam massas minimamente diferentes de zero graças à força de resistência que experimentam ao mover-se e vibrar em meio à versão da teoria das cordas que equivale ao oceano de Higgs.

Note, porém, que no modelo-padrão a força de resistência experimentada por uma partícula — e, por conseguinte, a massa que ela adquire — é determinada por meio de medição experimental e especificada na teoria como dado inicial. Na versão da teoria das cordas, a força de resistência — e, por conseguinte, as massas dos padrões vibratórios — seria atribuída a interações entre as cordas (uma vez que o oceano de Higgs seria feito de cordas) e deveria ser *calculável.* Pelo menos em princípio, a teoria das cordas permite a determinação de todas as propriedades das partículas por meio da própria teoria.

Ninguém ainda conseguiu isso, mas, como já temos ressaltado, a teoria das cordas é em grande medida uma obra em desenvolvimento. Com o tempo, os pesquisadores esperam realizar por completo o potencial desse enfoque rumo à unificação. A motivação é forte porque a recompensa potencial é grande. Com muito trabalho e bastante sorte, a teoria das cordas poderá um dia explicar as

propriedades fundamentais das partículas e, por sua vez, explicar por que o universo é como é.

O TECIDO DO COSMO DE ACORDO COM A TEORIA DAS CORDAS

Embora grande parte da teoria das cordas ainda esteja além dos limites da nossa compreensão, ela já nos mostrou panoramas maravilhosos. O que mais impressiona é que, ao resolver o conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica, a teoria das cordas revelou que o tecido do cosmo pode ter muitas dimensões mais do que as que percebemos diretamente — dimensões que podem ser a chave para o esclarecimento de alguns dos mistérios mais profundos do universo. Além disso, a teoria nos informa que as noções comuns de espaço e tempo não se estendem aos domínios subplanckianos, o que sugere que o espaço e o tempo, como os compreendemos hoje, podem ser meras aproximações de conceitos mais fundamentais que ainda aguardam a nossa descoberta.

Nos momentos iniciais do universo, esses aspectos do tecido do espaço e do tempo, aos quais hoje só podemos ter acesso por meio da matemática, seriam manifestos. Naquela ocasião, quando até mesmo as três dimensões espaciais que conhecemos eram pequenas, provavelmente não havia grandes distinções entre o que hoje denominamos dimensões estendidas e as dimensões recurvadas da teoria das cordas. A atual disparidade de tamanho se deve à evolução cosmológica, que, de um modo que ainda não compreendemos, terá ocasionado a escolha de três dimensões espaciais como especiais, submetendo-as, e apenas elas, aos 14 bilhões de anos de expansão que analisamos nos capítulos precedentes. Se olharmos ainda mais atrás no tempo, a totalidade do universo observável estaria compactada no domínio subplanckiano, de modo que aquilo a que nos temos referido como trecho difuso (na figura 10.6) agora pode ser identificado como o reino em que o espaço e o tempo que nos são familiares ainda estavam por surgir, a partir das entidades mais fundamentais — o que quer que elas sejam — que as pesquisas atuais buscam compreender.

A continuação do progresso rumo ao entendimento do universo primordial, e, portanto, rumo à determinação da origem do espaço, do tempo e da seta do tempo, requer instrumentos teóricos mais afiados para que possamos compreender a teoria das cordas — objetivo que, não faz muito tempo, parecia nobre mas distante. Como veremos agora, com o desenvolvimento da teoria-M, esse progresso superou muitas das previsões mais otimistas dos mais otimistas.

13. O universo em uma brana

Especulações sobre o espaço e o tempo na teoria-M

A história da teoria das cordas é uma das mais tortuosas do caminho dos avanços científicos. Mesmo hoje, mais de três décadas depois da sua articulação inicial, a maioria dos seus seguidores acredita que ainda não temos uma boa resposta para a pergunta mais elementar: o que é a teoria das cordas? Sabemos bastante *sobre* a teoria. Conhecemos as suas características básicas, os seus êxitos principais, os seus aspectos promissores e os desafios que enfrenta. Também sabemos usar as suas equações para calcular o comportamento das cordas e as suas interações em uma ampla gama de circunstâncias. Mas a maioria dos pesquisadores crê que a nossa formulação atual da teoria ainda carece de princípios fundamentais semelhantes aos que encontramos nos outros avanços científicos. A relatividade especial tem o princípio da constância da velocidade da luz; a relatividade geral tem o princípio da equivalência; a mecânica quântica tem o princípio da incerteza; e os teóricos da teoria das cordas continuam em busca de um princípio análogo que capte a essência da teoria.

Em grande medida, essa deficiência existe porque a teoria das cordas desenvolveu-se em sucessivos saltos, e não como consequência de uma concepção ampla, unificada e totalizante. O *objetivo* da teoria das cordas — a unificação de todas as forças e de toda a matéria em um arcabouço de mecânica quântica — é o mais amplo possível, mas a evolução da teoria foi claramente fragmentada. Depois de ter sido descoberta, em um golpe de sorte, há mais de trinta anos, a teoria das cordas foi sendo construída por grupos de cientistas, de modo que alguns deles descobriam certas propriedades essenciais da teoria estudando *certas* equações, enquanto outros grupos revelavam outras implicações cruciais, estudando *outras* equações.

Os teóricos das cordas podem ser comparados a uma tribo primitiva que faz escavações em um local onde foi encontrada, por acaso, uma nave espacial. Mexendo aqui e remexendo ali, a tribo poderia, pouco a pouco, ir encaixando algumas partes da nave e ir deduzindo aspectos da sua operação. E isso, por sua vez, daria aos pesquisadores primitivos a sensação de que todos os botões e controles funcionam em conjunto, de maneira coordenada e unificada. A sensação dos teóricos das cordas é similar. Os resultados de muitos anos de pesquisas convergem e ajustam-se. Isso instila uma confiança crescente entre os

pesquisadores de que a teoria das cordas está se aproximando da construção de um arcabouço potente e coerente — que ainda não foi inteiramente revelado, mas que, em última análise, exporá os mecanismos de funcionamento da natureza com inigualável clareza e abrangência.
Nos últimos tempos, nada ilustra melhor esse processo do que o que deflagrou a *segunda revolução das supercordas* — revolução que, entre outras coisas, introduziu mais uma dimensão oculta, entrelaçada no tecido espacial, abriu novas possibilidades para que a teoria seja testada experimentalmente, sugeriu que o universo pode estar ao lado de outros, revelou que poderemos criar buracos negros com a próxima geração de aceleradores de partículas de alta energia e levou a uma nova teoria cosmológica em que o tempo e a sua seta podem, como o arco gracioso dos anéis de Saturno, dar voltas e mais voltas em um círculo.

A SEGUNDA REVOLUÇÃO DAS SUPERCORDAS

Há um detalhe negativo com relação à teoria das cordas que ainda não expus, mas que os leitores do meu livro anterior, *O universo elegante*, poderão recordar. Nas últimas décadas, foram desenvolvidas não só uma, porém cinco versões diferentes da teoria das cordas. Os seus nomes, que não têm maior relevância para nós, são: *Tipo I*, *Tipo IIA*, *Tipo IIB*, *Heterótica-O e Heterótica-E*.
Todas compartilham os aspectos essenciais apresentados no capítulo precedente — os componentes básicos são filamentos de energia vibrante — e, como revelado pelos cálculos, nas década de 1970 e de 1980, cada uma das cinco teorias requer seis dimensões espaciais adicionais. Mas uma análise mais aprofundada revela diferenças significativas entre elas. Por exemplo, a teoria do Tipo i inclui os laços de cordas vibrantes que vimos no capítulo precedente, as chamadas *cordas fechadas*, porém, ao contrário das outras teorias das cordas, ela também contém *cordas abertas*, filamentos vibrantes que têm duas pontas soltas. Além disso, os cálculos mostram que a lista de padrões vibratórios das cordas e a maneira pela qual cada padrão influencia os outros e interage com eles diferem de uma teoria para outra.
Os mais otimistas entre os teóricos das cordas pensavam que essas diferenças serviriam para eliminar quatro das cinco versões quando pudéssemos fazer comparações específicas entre os resultados experimentais. Mas, com franqueza, a simples existência de cinco formulações diferentes da teoria das cordas é uma fonte de contida insatisfação. O sonho da unificação leva a que os cientistas busquem uma teoria única para o universo. Se as pesquisas confirmassem que

um único esquema teórico poderia abranger tanto a relatividade geral quanto a mecânica quântica, os teóricos alcançariam o nirvana. Teríamos assim uma forte indicação de que a hipótese é válida, mesmo sem dispormos ainda de verificação experimental direta. Afinal de contas, já temos uma pletora de dados experimentais que comprovam a relatividade geral e a mecânica quântica, e ninguém tem dúvidas de que as leis que comandam o universo devem ser mutuamente compatíveis. Se tivéssemos uma teoria única, coerente do ponto de vista matemático e capaz de incorporar os dois pilares da física do século XX, teríamos, afinal, uma evidência forte, embora indireta, da sua inevitabilidade.

Mas o fato é que há cinco versões da teoria das cordas, similares na superfície e diferentes nos detalhes, e isso não deixa de indicar que a teoria não passa no teste da unicidade. Mesmo que o futuro mostre que os otimistas estão certos e que apenas uma das cinco versões seja confirmada experimentalmente, ainda assim teríamos o problema de explicar por que existem outras quatro formulações coerentes. As outras quatro seriam apenas curiosidades matemáticas? Teriam alguma significação para o mundo físico? A sua existência poderia ser a ponta de um iceberg teórico por meio do qual os cientistas demonstrariam posteriormente que na verdade existem mais cinco, ou seis, ou sete, ou talvez um número infinito de diferentes variações matemáticas sobre o tema das cordas?

No fim da década de 1980, ou no início da de 1990, quando os físicos estavam ainda buscando compreender as diferentes correntes da teoria das cordas, o enigma da existência das cinco versões não era um problema com que os pesquisadores estavam acostumados a lidar. Tratava-se de uma dessas questões silenciosas que todos supunham que seria resolvida em algum momento do futuro, quando se chegasse a um entendimento significativamente mais sofisticado de cada uma das teorias.

Mas na primavera de 1995, quase que de surpresa essas modestas expectativas foram espetacularmente superadas. Com base nos trabalhos de diversos estudiosos das cordas (inclusive Chris Hull, Paul Townsend, Ashoke Sen, Michael Duff, John Schwarz e muitos outros), Edward Witten — que é o mais renomado teórico das cordas dos últimos vinte anos — descobriu uma unidade oculta entre as cinco teorias das cordas. Witten mostrou que, em vez de serem distintas, elas, na verdade, eram apenas cinco maneiras diferentes de analisar matematicamente uma *mesma* teoria. As cinco formulações eram como versões de um mesmo livro em cinco idiomas diferentes, que pareciam textos distintos ao leitor não poliglota e que assim permaneciam porque Witten ainda não escrevera o dicionário que permitiria a sua tradução. Uma vez elaborado, o dicionário proporcionou uma demonstração convincente de que — tal como um

texto original único do qual derivam cinco traduções — uma única teoria original une as cinco formulações da teoria das cordas. Essa teoria unificadora recebeu o nome de *teoria-M*, no qual o M simboliza algo — Mãe? Matriz? Magistral? Majestosa? Misteriosa? Mágica? — cujo significado aguarda os resultados de um vigoroso esforço mundial de pesquisa que busca agora dar forma final à visão projetada pela notável descoberta de Witten.

Essa descoberta revolucionária propiciou um grande avanço. Witten demonstrou que a teoria das cordas é uma teoria única em um dos seus trabalhos mais apreciados (além de um importante trabalho subseqüente, escrito em colaboração com Petr Horava). Os teóricos das cordas já não precisam dizer, com certo constrangimento, que a sua candidata ao título de teoria unificada, tão buscada por Einstein, carecia, ela própria, de unidade, porque era apresentada em cinco versões diferentes. Em contraste, o que poderia ser mais adequado para a proposição mais ousada de teoria unificada do que ser, ela própria, o objeto de uma meta-unificação? Graças ao trabalho de Witten, a unidade incorporada em cada uma das teorias das cordas foi estendida ao esquema das cordas como um todo.

A figura 13.1 esboça a situação das cinco teorias das cordas antes e depois da descoberta de Witten e é uma boa imagem-resumo, que deve ser recordada. Ela ilustra o fato de que a teoria-M não é um enfoque novo, por si só, mas promete, ao desanuviar o ambiente, uma formulação mais sofisticada e completa das leis da física do que o que qualquer uma das teorias das cordas poderia propiciar em separado. A teoria-M unifica e abarca igualmente todas as cinco teorias das cordas e mostra que cada uma delas faz parte de uma síntese teórica maior.

O PODER DA TRADUÇAO

Embora a figura 13.1 transmita esquematicamente a essência do conteúdo da descoberta de Witten, da maneira como foi apresentada poderia parecer como algo secundário. Antes da descoberta de Witten, muitos pesquisadores pensavam que havia cinco versões distintas da teoria das cordas e depois mudaram de opinião. Mas se não fosse por todos conhecido que havia cinco teorias das cordas aparentemente diferentes umas das outras, que importância teria o fato de que o mais destacado de todos os teóricos das cordas tenha mostrado que, afinal, elas não eram separadas e diferentes? Em outras palavras, por que a descoberta de Witten foi revolucionária, e não uma simples e modesta contribuição que corrigiu uma falha anterior de interpretação?

Vejamos por quê. Nas últimas décadas, os teóricos das cordas viram-se reiteradamente amarrados a um problema matemático. Como tem sido

extremamente difícil deduzir e analisar a forma exata das equações que descrevem qualquer uma das cinco teorias das cordas, os teóricos basearam a maior parte das suas pesquisas em equações aproximadas, muito mais fáceis de trabalhar. Se bem que existam boas razões para crer que as equações aproximadas possam, em muitas circunstâncias, dar respostas compatíveis com as das equações verdadeiras, nas aproximações — assim como nas traduções — algo sempre se perde e, por essa razão, certos problemas cruciais têm se mantido fora do alcance matemático das equações aproximadas, o que tem constituído um sério entrave ao progresso.

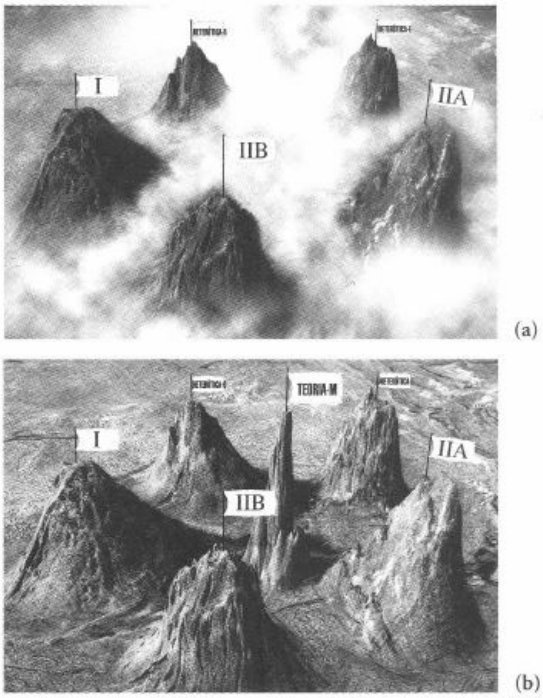


Figura 13.1. (*a*) *Representação esquemática das cinco teorias das cordas, antes de 1995.* (*b*) *Representação esquemática da meta-unificação revelada pela teoria-M.*

As imprecisões inerentes às traduções podem ser remediadas pelos leitores de duas maneiras imediatas. A melhor opção, se as habilidades linguísticas do leitor estiverem à altura, é a de consultar o texto original. Mas atualmente o análogo dessa opção não está ainda à disposição dos estudiosos das cordas. Graças à consistência do dicionário desenvolvido por Witten e outros, temos fortes indícios de que as cinco teorias das cordas são descrições diferentes de uma única teoria-mãe, a teoria-M, mas os pesquisadores ainda não alcançaram a compreensão integral desse nexo teórico. Aprendemos muito a respeito da teoria-M nos últimos anos, mas ainda temos muito o que aprender até que alguém possa afirmar sensatamente que alcançou o seu entendimento adequado e

completo. É como se tivéssemos, na teoria das cordas, cinco traduções de um texto original ainda desconhecido.

Outra solução possível, bem conhecida dos leitores de traduções que não dispõem do original (como no caso da teoria das cordas), ou, o que ocorre com maior frequência, não conhecem a língua em que está escrito, é consultar diversas traduções do texto original para outras línguas com as quais se tem familiaridade. As passagens em que as traduções convergem inspiram maior confiança e aquelas em que elas divergem podem indicar possíveis imprecisões ou interpretações diferentes. Esse foi o enfoque que Witten nos abriu com a sua descoberta de que as cinco teorias das cordas são traduções diferentes de uma mesma teoria subjacente. Com efeito, a descoberta propiciou uma versão extremamente potente dessa linha de ataque, que podemos compreender melhor por meio de uma pequena extensão da analogia da tradução.

Imagine um manuscrito original que contém uma enorme variedade de trocadilhos, rimas e piadas sutis e cheias de conotações culturais específicas, de tal modo que o texto não pode ser expresso harmoniosamente e em sua inteireza em nenhuma das cinco línguas em que está sendo traduzido. Alguns trechos poderiam ter boa tradução em suaíli e outros poderiam ser simplesmente impenetráveis nessa língua. Essas mesmas passagens talvez alcançassem excelente profundidade na língua esquimó, que poderia produzir, contudo, traduções obscuras em outras seções. O sânscrito possivelmente captasse a essência de algumas passagens mais completas, mas outros trechos particularmente difíceis poderiam ficar sem uma boa solução em todas as cinco línguas e só o texto-mãe seria inteligível. Essa é a situação que mais se aproxima das cinco teorias das cordas. Os estudiosos verificaram que, para certas questões, uma das cinco pode proporcionar uma descrição transparente das implicações físicas, enquanto as descrições dadas pelas outras quatro versões são demasiado complexas, do ponto de vista matemático, para serem úteis. Aí está o poder da descoberta de Witten. Antes dela, os pesquisadores ficavam paralisados diante de questões aparentemente intratáveis. O trabalho de Witten mostrou que todas essas questões admitem quatro traduções matemáticas — quatro reformulações matemáticas — e, muitas vezes, uma delas mostra-se muito mais fácil de trabalhar. Dessa maneira, *o dicionário que permite traduzir as cinco teorias de uma para outra pode, por vezes, proporcionar meios para colocar questões que eram terrivelmente difíceis em uma versão em termos comparativamente simples em outra versão.*

Não se trata de um método a toda prova. As cinco traduções de certas passagens do texto-mãe podem ser igualmente incompreensíveis, e as descrições

matemáticas dadas pelas cinco teorias das cordas podem ser igualmente difíceis de entender. Nesses casos, além da necessidade de consultar o próprio texto original, precisaríamos compreender com maior inteireza a fugidia teoria-M para poder progredir. Mesmo assim, em diversas circunstâncias, o dicionário de Witten representa um excelente instrumento para analisar a teoria das cordas.

Portanto, assim como cada uma das traduções de um texto complexo tem a sua própria importância, o mesmo acontece com cada uma das formulações da teoria das cordas. Combinando as percepções geradas pela perspectiva de cada uma delas, podemos responder a perguntas e revelar aspectos que ficariam inteiramente fora do alcance de qualquer uma das cinco teorias isoladamente. A descoberta de Witten deu aos analistas um poder de fogo cinco vezes maior para expandir as fronteiras da teoria das cordas. Foi por isso, em grande medida, que ela gerou uma revolução.

ONZE DIMENSÕES

Então, que novas percepções surgiram a partir da capacidade que adquirimos para analisar a teoria das cordas? Surgiram muitas. Relatarei aquelas que causaram maior impacto na história do espaço e do tempo.

De importância fundamental é a revelação feita pelo trabalho de Witten de que as equações aproximadas que a teoria das cordas usou nas década de 1970 e de 1980, segundo as quais o universo deve ter nove dimensões espaciais, *erraram esse número por um.* A sua análise mostrou que a resposta exata é a de que o universo, segundo a teoria-M, tem dez dimensões espaciais, ou seja, onze dimensões no espaço-tempo. Assim como Kaluza descobriu que um universo com cinco dimensões no espaço-tempo propiciava um esquema explicativo que unificava o eletromagnetismo e a gravidade e assim como os teóricos das cordas descobriram que um universo com dez dimensões no espaço-tempo propiciava um esquema explicativo que unificava a relatividade geral e a mecânica quântica, Witten descobriu que um universo com onze dimensões no espaço-tempo propicia um esquema explicativo que unifica todas as teorias das cordas. Como cinco vilarejos que, vistos do solo, parecem ser completamente separados, mas, quando vistos de avião — mediante o uso da dimensão vertical —, revelam-se unidos por uma rede de caminhos, a dimensão espacial adicional que surge da análise de Witten foi essencial para que ele descobrisse as conexões entre as cinco teorias das cordas.

A descoberta de Witten sem dúvida seguia o padrão histórico de atingir a unidade com mais dimensões, mas quando ele a anunciou, na conferência internacional anual da teoria das cordas em 1995, causou um abalo nos alicerces

da teoria. Os pesquisadores, inclusive eu próprio, já haviam deliberado longamente sobre as equações aproximadas que estavam em uso e todos tinham confiança em que as análises já haviam dado a palavra final quanto ao número de dimensões. A revelação de Witten causou sobressaltos.

Ele mostrou que todas as análises anteriores haviam feito uma simplificação matemática que levava à *suposição* de que uma décima dimensão espacial, ainda não conhecida, seria extremamente pequena, muito menor do que todas as outras. Tão pequena, na verdade, que as equações aproximadas da teoria das cordas, usadas por todos os pesquisadores, careciam do poder de resolução necessário para revelar ao menos um indício matemático de sua existência. Isso levou a que todos concluíssem que a teoria das cordas tinha apenas nove dimensões espaciais. Mas com as novas percepções do esquema unificador da teoria-M, Witten pôde transcender as equações aproximadas, fazer exames mais agudos e demonstrar que havia uma outra dimensão espacial que ninguém antes percebera. Desse modo, Witten descobriu que os cinco esquemas de dez dimensões que os teóricos haviam desenvolvido por mais de uma década eram, na verdade, cinco descrições aproximadas de uma única teoria subjacente, com onze dimensões.

Você pode se perguntar se essa descoberta inesperada não invalidaria os trabalhos anteriores da teoria das cordas. Basicamente não os invalidou. A décima dimensão espacial acrescentou um aspecto inesperado à teoria, mas se a teoria-M estiver correta e se a nova dimensão for realmente muito menor do que as demais — como se supôs por tanto tempo —, os trabalhos anteriores permanecem válidos. Contudo, como as equações conhecidas ainda não são capazes de determinar os tamanhos e as formas das dimensões adicionais, os teóricos das cordas têm dedicado muito empenho nos últimos anos para investigar a nova possibilidade de que a décima dimensão espacial não seja assim tão pequena. Entre outras coisas, os amplos resultados desses estudos colocaram a ilustração esquemática do poder unificador da teoria-M, que aparece na figura 13.1, sobre sólidas bases matemáticas.

Tenho a suspeita de que a atualização de dez para onze dimensões — independentemente da sua grande importância para a estrutura matemática da teoria-M — não altera de forma substancial as bases da teoria. Tentar imaginar sete dimensões recurvadas é, salvo para os mais estritos especialistas, um exercício muito similar ao de imaginar seis.

Porém outra possível consequência da segunda revolução das supercordas, estreitamente correlacionada ao que acabamos de ver, de fato altera a base da imagem intuitiva da teoria das cordas. As percepções coletivas de diversos

pesquisadores — Witten, Duff, Hull, Townsend e muitos outros — demonstraram que *a teoria das cordas não é apenas uma teoria de cordas.*

BRANAS

Uma pergunta natural que pode haver lhe ocorrido no último capítulo é: *por que cordas*? Por que esses componentes unidimensionais são tão especiais? Ao unirmos a relatividade geral e a mecânica quântica, vimos a importância do fato de que as cordas não são pontos, porque têm um tamanho diferente de zero. Mas esse requisito também pode ser satisfeito por componentes bidimensionais, com a forma de discos em miniatura, ou tridimensionais, com a forma de gotas, ou bolas, ou grãos. Ou então, já que a teoria tem uma abundância de dimensões espaciais, poderíamos até mesmo imaginar bolas com um número maior de dimensões. Por que esses componentes não desempenham nenhum papel nas nossas teorias fundamentais?

Na década de 1980 e no início da década seguinte, a maioria dos estudiosos das cordas acreditava ter uma resposta convincente. Eles argumentavam qu*e já* haviam sido feitas tentativas de formular uma teoria fundamental com base em componentes com a forma de gotas, inclusive por ícones da física do século XX, como Werner Heisenberg e Paul Dirac. Mas o seu trabalho, assim como muitos estudos posteriores, revelaram a extrema dificuldade de elaborar uma teoria baseada em gotículas que satisfizesse os requisitos físicos mais elementares — como, por exemplo, manter todas as probabilidades da mecânica quântica entre 0 e 1 (probabilidades negativas ou maiores do que 1 não fazem sentido), ou excluir as comunicações mais rápidas do que a luz. Para as partículas pontuais, meio século de pesquisas iniciadas na década de 1920 mostrou que essas condições podiam ser satisfeitas (desde que ignorássemos a gravidade). E já na década de 1980, as investigações de Schwarz, Scherk, Green e outros, que já duravam mais de dez anos, mostraram, para a surpresa de muitos pesquisadores, que as condições também podiam ser satisfeitas por componentes unidimensionais, cordas (que necessariamente *incluíam* a gravidade). Mas parecia impossível conseguir o mesmo resultado trabalhando com componentes fundamentais com duas ou mais dimensões espaciais. A razão estava, em síntese, em que o número de simetrias respeitadas pelas equações aumenta colossalmente para objetos unidimensionais (cordas) e cai acentuadamente a partir daí. Essas simetrias são mais abstratas do que as que discutimos no capítulo 8 (têm a ver com a maneira como as equações se modificam se, ao estudarmos o movimento de uma corda, ou de um componente com mais dimensões, ampliarmos ou afastarmos o foco,

alterando de forma arbitrária o grau de resolução das nossas observações). Essas transformações são decisivas para a formulação de um conjunto de equações fisicamente corretas, e a validade requerida para as simetrias parecia estar ausente a partir do nível de cordas.[1]

Foi, portanto, um novo choque para a maioria dos teóricos das cordas quando o trabalho de Witten e uma avalanche de resultados subseqüentes[2] levaram à percepção de que a teoria das cordas e o esquema da teoria-M, ao qual ela agora pertence, *efetivamente* contêm componentes além das cordas. As análises mostraram que há objetos bidimensionais, naturalmente denominados membranas (outro significado possível para o M da teoria-M) ou — para facilitar a nomenclatura que sistematiza os seus primos com mais dimensões — *2-branas*. Há também objetos com três dimensões espaciais, denominados *3-branas*. E, embora seja cada vez mais difícil visualizar, as análises mostram que há ainda objetos com *p* dimensões espaciais, em que *p* pode ser qualquer número inteiro menor do que dez. Esses objetos são conhecidos, sem conotação derrogatória, como *p-branas* (a expressão *p-brana* vem do inglês *p-brane*, e perde, na tradução, o toque de humor: *p-brane* soa como *pea-brain* [cérebro de ervilha, que corresponde à nossa expressão "cérebro de galinha"- N. T.)]). Vê-se assim que as cordas são apenas um dos componentes da teoria das cordas, e não o *único* componente.

Esses outros componentes ficaram fora do âmbito das pesquisas anteriores por razões comparáveis ao que aconteceu com a décima dimensão espacial: as equações aproximadas das cordas revelaram-se demasiado toscas para exibi-los. No contexto teórico em que os pesquisadores fizeram as suas investigações matemáticas, as p-branas são sensivelmente mais pesadas do que as cordas. E quanto mais pesado seja algo, mais energia é necessária para produzi-lo. Uma das limitações das equações aproximadas das cordas — limitação intrínseca e bem conhecida por todos os teóricos das cordas — é que elas se tornam cada vez menos precisas para descrever entidades e processos que envolvam quantidades crescentes de energia. No nível extremamente alto de energia requerido pelas p-branas, as equações aproximadas carecem de precisão para expor as branas que se ocultam nos lugares recônditos, e essa é a razão pela qual passaram-se décadas sem que a sua presença fosse matematicamente notada. Mas com as várias reformulações e com os novos enfoques trazidos pelo esquema teórico unificador da teoria-M, os pesquisadores conseguiram superar alguns obstáculos técnicos e captar com plena visibilidade matemática todo um conjunto de componentes com mais dimensões.[3]

A revelação de que na teoria das cordas há outros componentes além das cordas não invalida nem torna obsoletos os trabalhos anteriores, e o mesmo acontece

com a descoberta da décima dimensão espacial. As pesquisas mostram que, se as branas multidimensionais tiverem massa muito maior do que a das cordas — o que era implicitamente suposto nos estudos prévios —, elas terão impacto mínimo sobre uma ampla gama de cálculos teóricos. Mas assim como a décima dimensão espacial não tem necessariamente que ser muito menor do que todas as demais, tampouco as branas multidimensionais têm necessariamente que ser muito mais pesadas. Há múltiplas circunstâncias, ainda hipotéticas, em que a massa de uma brana multidimensional pode ser do mesmo nível que os padrões vibratórios das cordas de menores massas, e nesses casos a brana *efetivamente* exerce um impacto significativo sobre os resultados físicos. Por exemplo, o trabalho que eu fiz com Andrew Strominger e David Morrison mostrou que uma brana pode envolver uma porção esférica de uma forma de Calabi-Yau, tal como uma folha de plástico envolve uma fruta. Se essa porção do espaço encolher, a brana envolvente também encolherá e a sua massa diminuirá. Esse decréscimo da massa, como pudemos demonstrar, permite que a porção do espaço entre em colapso total, abrindo-se e rasgando-se — o espaço pode rasgar-se — enquanto a brana envolvente garante que não se produzam consequências fisicamente catastróficas. Discuti em detalhe esse desenvolvimento em O *universo elegante* e voltarei a ele brevemente quando discutirmos as viagens no tempo, no capítulo 15, e por essa razão não elaborarei mais sobre esse ponto agora. Mas esse breve comentário deixa claro que as branas multidimensionais podem exercer um efeito significativo na física da teoria das cordas.

Entretanto, segundo nosso foco atual há uma outra maneira profunda pela qual as branas afetam a visão do universo de acordo com a teoria-M. A grande extensão do cosmo — a totalidade do espaço-tempo de que temos consciência — pode ser, ela própria, uma enorme brana. Podemos estar vivendo em um mundo-brana.

MUNDOS-BRANA

Testar a teoria das cordas é um desafio porque as cordas são ultrapequenas. Mas lembre-se das razões físicas que determinam o tamanho das cordas. A partícula mensageira da gravidade — o gráviton — está entre os padrões vibratórios das cordas com menor energia, e a intensidade da força gravitacional que ele comunica é proporcional ao comprimento da corda. Como a gravidade é uma força extremamente fraca, o comprimento da corda deve ser mínimo. Os cálculos mostram que esse comprimento deve estar dentro de uma margem de até cem vezes a distância de Planck para que o padrão vibratório do gráviton possa comunicar a força gravitacional com a intensidade observada.

Com essa explicação, vemos que uma corda com muita energia não tem por que ser de tamanho mínimo, pois já não terá nenhuma conexão direta com a partícula gráviton (o gráviton é um padrão vibratório de *baixa* energia e massa zero). Com efeito, à medida que aumenta a quantidade de energia de uma corda, a princípio ela vibra com intensidade crescente, mas, a partir de certo ponto, a energia adicional produz um efeito diferente: o aumento do comprimento da corda, aumento esse que não encontra limites. Se alimentássemos uma corda com a quantidade suficiente de energia, poderíamos fazê-la crescer até um tamanho macroscópico. Com a nossa tecnologia atual, não conseguiríamos chegar nem perto disso, mas é possível que o ambiente tórrido e extremamente energético logo após o Big-Bang tenha produzido cordas longas. Se alguma tiver conseguido sobreviver até os nossos dias, seria possível que ela se estendesse por todo o céu. Embora com possibilidade baixa, é até mesmo possível que essas cordas longas tenham deixado marcas, mínimas mas detectáveis, nos dados que recebemos do espaço, o que talvez nos permitisse um dia confirmar a teoria das cordas por meio de observações astronômicas.

As *p*-branas multidimensionais tampouco precisam ter necessariamente tamanho mínimo e, como elas têm mais dimensões do que as cordas, abre-se uma nova possibilidade qualitativa. Quando pensamos em uma corda longa — talvez infinitamente longa —, imaginamos um objeto unidimensional longo que existe dentro das três dimensões espaciais estendidas da nossa vida cotidiana. Uma boa imagem para uma comparação seria uma linha de transmissão elétrica que se estendesse por todo o nosso campo de visão. Do mesmo modo, se pensarmos em uma 2-brana grande — talvez infinitamente grande —, imaginaremos uma superfície bidimensional grande que existe dentro das três dimensões espaciais estendidas da nossa experiência normal. Não conheço nenhuma analogia realista, mas uma imagem visual relativamente adequada seria uma enorme tela de cinema *drive-in*, extremamente fina, com comprimento e largura suficientes para cobrir todo o nosso campo de visão. Porém quando se trata de uma grande 3-brana, encontramo-nos em uma situação qualitativamente nova. A 3-brana tem três dimensões, de modo que se elas forem grandes — talvez i infinitamente grandes — a brana *ocuparia* a totalidade das três dimensões espaciais estendidas. Enquanto a 1-brana e a 2-brana são objetos, como a linha de transmissão e a tela de cinema, que existem *dentro* das nossas três dimensões espaciais estendidas, a 3-brana grande preencheria todo o espaço de que temos consciência.

Isso levanta uma possibilidade interessante. Poderíamos estar vivendo, aqui e agora, dentro de uma 3-brana? Assim como Branca de Neve existe no mundo

bidimensional de uma tela de cinema — uma 2-brana — que reside, ela própria, dentro de um universo com mais dimensões (as três dimensões espaciais da sala de projeção), será que tudo o que conhecemos também existe em uma tela tridimensional — uma 3-brana — que reside, ela própria, dentro do universo da teoria das cordas, que tem mais dimensões? Será que o que Newton, Leibniz, Mach e Einstein denominaram espaço tridimensional é apenas uma entidade particular que faz parte da teoria das cordas? Usando uma linguagem mais relativística: será que o espaço-tempo quadridimensional desenvolvido por Minkowski e Einstein é a expressão de uma 3-brana que se desdobra no tempo? Em síntese: será que o universo que conhecemos é uma brana?[4]

A possibilidade de que estejamos vivendo dentro de uma 3-brana — o chamado *cenário do mundo-brana* — é o último toque dado na história da teoria das cordas/teoria-M. Como veremos, ela oferece uma maneira qualitativamente nova de conceber a teoria das cordas/teoria-M, que tem numerosas e importantes ramificações. O aspecto físico essencial é que as branas são como um velcro cósmico: em certo sentido, como veremos a seguir, elas grudam.

BRANAS QUE GRUDAM E CORDAS QUE VIBRAM

Uma das motivações para a apresentação do nome “teoria-M” está em que hoje sabemos que a “teoria das cordas” faz menção a apenas um dos diversos componentes da teoria. Os estudos teóricos revelaram as cordas unidimensionais décadas antes de que análises mais sofisticadas descobrissem as branas multidimensionais, razão por que a “teoria das cordas” é hoje uma categoria histórica. Muito embora a teoria-M exiba uma democracia de formas, em que estão representados objetos de várias dimensões, as cordas ainda desempenham um papel fundamental na nossa concepção atual. Em um sentido particular, isso se torna imediatamente claro. Quando todas as p-branas multidimensionais são muito mais pesadas do que as cordas, elas podem ser ignoradas, e é isso o que os pesquisadores vêm fazendo, sem saber, desde a década de 1970. Entretanto há um outro sentido, mais amplo, em que as cordas também aparecem em primeiro lugar.

Em 1995, logo depois que Witten anunciou a sua descoberta, Joe Polchinski, da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, pôs-se a pensar. Alguns anos antes, em um trabalho escrito com Robert Leigh e Jin Dai, Polchinski descobrira um aspecto interessante, embora algo obscuro, da teoria das cordas. A motivação e o raciocínio de Polchinski eram de natureza técnica e os detalhes não são relevantes para a nossa discussão. Mas os resultados sim. Ele descobriu que, em certas situações, as pontas das cordas abertas — lembre-se de que estes são

segmentos de cordas com duas pontas soltas — não poderiam mover-se com total liberdade. Assim como uma conta de um colar pode mover-se, mas desde que siga o cordão em que está enfiada, e uma bola de bilhar também pode mover-se, mas desde que siga os contornos da superfície da mesa, as pontas de uma corda aberta poderiam mover-se, mas estariam restringidas por formas e contornos particulares do espaço. A corda continuaria livre para vibrar, no entanto Polchinski e os seus colaboradores mostraram que as suas pontas ficariam "presas" ou "confinadas" a certas regiões.

Em algumas situações, a região poderia ser unidimensional, caso em que as pontas das cordas seriam como duas contas de colar a deslizar pelo fio e a corda seria o próprio fio. Em outras situações, a região poderia ser bidimensional, caso em que as pontas das cordas se assemelhariam a duas bolas de bilhar ligadas por um fio, a rolar pela superfície da mesa. Em outras situações, a região poderia ter três, quatro ou qualquer outro número de dimensões menor do que dez. Esses resultados, revelados por Polchinski e também por Petr Horava e Michael Green, ajudaram a resolver um persistente enigma na comparação entre cordas abertas e fechadas, mas o trabalho mereceu pouca atenção ao longo dos anos.[5] Em outubro de 1995, quando Polchinski terminou de repensar as suas percepções iniciais à luz das descobertas de Witten, a situação modificou-se.

Uma questão a que o trabalho de Polchinski deixou de responder claramente pode ter lhe ocorrido enquanto você lia o parágrafo anterior: se as pontas das cordas abertas ficam presas a uma região particular do espaço, *a que é que elas ficam presas*? Os fios e as mesas de bilhar têm uma existência tangível, independente das contas ou das bolas cujos movimentos eles restringem. Que dizer das regiões do espaço que restringem os movimentos das pontas das cordas abertas? Seriam elas permeadas por algum componente fundamental e independente da teoria das cordas que agarra implacavelmente as pontas das cordas abertas? Antes de 1995, quando se pensava que a teoria das cordas era apenas uma teoria sobre cordas, não havia candidatos para esse posto. Mas depois do progresso feito por Witten e da torrente de resultados por ele inspirados, a resposta ficou óbvia para Polchinski. Se as pontas das cordas abertas têm os seus movimentos restritos a uma região do espaço com *p* dimensões, é porque essa região está ocupada por uma *p*-brana (o nome exato dessas entidades grudentas é *p-branas de Dirichlet*, ou, abreviadamente, *D-pbranas.* Usaremos simplesmente o nome *p-branas*) Os seus cálculos indicaram que as recém-descobertas p-branas tinham exatamente as propriedades adequadas para ser os objetos que retêm implacavelmente as pontas das cordas abertas, constrangendo-as a mover-se dentro da região do espaço com p dimensões que elas ocupam.

Para entender melhor o que isso significa, veja a figura 13.2. Em (a), vemos um par de 2-branas com uma quantidade de cordas abertas que se movimentam e vibram, todas com os movimentos das suas pontas limitados às respectivas branas. A situação com as branas multidimensionais é idêntica, embora seja mais difícil de visualizar. As pontas das cordas abertas podem mover-se livremente sobre a p-brana, ou no seu interior, mas não podem deixar a própria brana. Com respeito aos movimentos que saem das branas, estas entidades são a coisa mais grudenta que se pode imaginar. É possível também que uma das pontas de uma corda aberta fique presa a uma p-brana e a outra ponta a outra p-brana, que pode ter as mesmas dimensões da primeira (figura 13.2b), ou não (figura 13.2c).

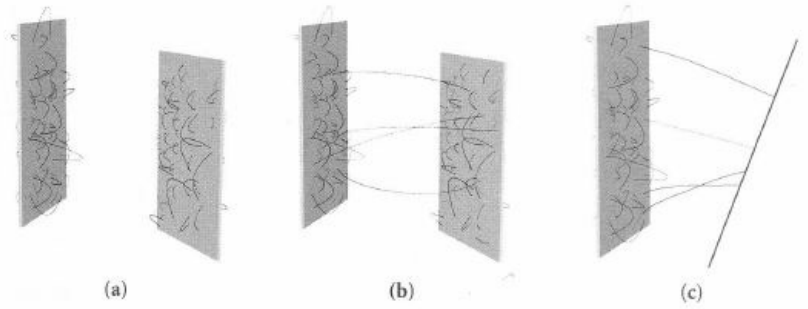


Figura 13.2. *(a) Cordas abertas cujas pontas ligam-se a branas bidimensionais ou 2-branas. (b) Cordas que se estendem de uma 2-brana a outra. (c) Cordas que se estendem de uma 2-brana a uma 1-brana.*

O trabalho de Polchinski somou-se à descoberta de Witten — de que existe uma conexão entre as várias teorias das cordas — como um manifesto complementar de apoio à segunda revolução das supercordas. Enquanto algumas das mentes mais brilhantes da física teórica do século XX lutaram sem êxito para formular uma teoria que contivesse componentes fundamentais com mais dimensões do que os pontos (zero dimensões), ou as cordas (uma dimensão), os resultados de Witten e Polchinski, juntamente com importantes observações feitas por muitos dos atuais pesquisadores de vanguarda, revelaram o caminho para o progresso. Esses cientistas deixaram claro que a teoria das cordas/teoria-M contém componentes multidimensionais, e, além disso, as conclusões de Polchinski, em particular, também propiciaram uma maneira de analisar do ponto de vista teórico (esperando que a sua existência seja comprovada) as suas propriedades físicas específicas. As propriedades de uma brana, Polchinski argumentou, são em grande medida captadas pelas propriedades das cordas abertas vibrantes cujas pontas ela contém. Assim como você pode conhecer muitas das características de um tapete passando a mão sobre a sua textura — composta pelos laços de lã cujas pontas estão presas ao fundo do tapete —, muitas das

características de uma brana podem ser determinadas pelo estudo das cordas cujas pontas estão presas a ela.
Essa conclusão teve uma importância primordial. Ela mostrou que décadas de pesquisas que produziram métodos matemáticos eficientes para estudar objetos unidimensionais — as cordas — podiam servir para estudar objetos multidimensionais — as p-branas. Foi, portanto, extraordinário que Polchinski tenha conseguido revelar que a análise dos objetos multidimensionais reduzia-se, em grande medida, à análise das cordas, já inteiramente familiar, embora ainda hipotética. É nesse sentido que as cordas são especiais entre os demais componentes. Se compreendermos o comportamento das cordas, teremos avançado muitíssimo no entendimento do comportamento das p-branas.
Tendo em mente esses desenvolvimentos, voltemos agora ao cenário dos mundos-brana — possibilidade de que estejamos vivendo dentro de uma 3-brana.

O NOSSO UNIVERSO COMO UMA BRANA

Se realmente vivemos dentro de uma 3-brana — se o nosso espaço-tempo quadridimensional não é mais do que a história vivida por uma 3-brana através do tempo —, então a venerável questão de saber se o espaço-tempo é "algo" ganharia contornos absolutamente novos. O nosso espaço-tempo quadridimensional derivaria de uma entidade física real na teoria-M, uma 3-brana, e não de alguma ideia vaga ou abstrata. Segundo esse ponto de vista, a realidade do nosso espaço-tempo quadridimensional estaria em pé de igualdade com a realidade de um elétron ou de um quark. (Logicamente, você poderia ainda perguntar se o espaço-tempo maior dentro do qual as cordas e as branas existem — as onze dimensões da teoria-M — é uma entidade em si mesma. Contudo, a realidade do cenário do espaço-tempo que vivenciamos diretamente tornar-se-ia óbvia.) Mas se o universo de que temos consciência for realmente uma 3-brana, será que nem mesmo uma espiada acidental revelaria que estamos imersos em algo — no interior da 3-brana?
Bem, a física moderna, como vimos, já sugeriu diversas coisas dentro das quais poderíamos estar imersos: um oceano de Higgs, a energia escura que permeia o espaço, miríades de flutuações quânticas. Nenhuma dessas alternativas se faz visível aos nossos próprios olhos ou diretamente perceptível de algum modo. Portanto, não chega a ser um choque que a teoria-M acrescente mais um candidato à lista de coisas invisíveis que preenchem o espaço "vazio". Mas não sejamos levianos. Com relação a cada uma das possibilidades anteriores, compreendemos o impacto que causam sobre a física e sabemos como

determinar se elas realmente existem. Com efeito, para duas das três hipóteses — a energia escura e as flutuações quânticas — conhecemos fortes indícios que apoiam a sua existência. Dados similares com relação ao campo de Higgs estão sendo buscados nos aceleradores de partículas atuais e futuros. E qual é a situação correspondente na hipótese de que vivamos dentro de uma 3-brana? Se o cenário do mundo-brana estiver correto, por que não vemos a 3-brana e como poderemos determinar a sua existência?

A resposta mostra como as implicações físicas da teoria-M no contexto do mundo-brana diferem radicalmente dos cenários anteriores. Consideremos, como exemplo importante, o movimento da luz — o movimento dos fótons. Na teoria das cordas, o fóton, como se sabe, é um padrão vibratório particular das cordas. Porém os estudos matemáticos revelaram que, no cenário do mundo-brana, apenas as vibrações das cordas abertas, e não as das cordas fechadas, produzem fótons, e isso faz uma grande diferença. As pontas das cordas abertas estão obrigadas a mover-se no interior da 3-brana, mas, dentro dessa limitação, são completamente livres. Isso implica que os fótons (cordas abertas que executam o modo de vibração dos fótons) podem viajar sem nenhuma limitação ou obstrução por toda a nossa 3-brana. E isso faria com que a brana ficasse *totalmente transparente — totalmente invisível —*, o que nos impediria de ver que estamos imersos em seu interior.

Igualmente importante é o fato de que, como as pontas das cordas abertas não podem sair da brana, elas não podem mover-se nas dimensões adicionais. Assim como o fio limita o movimento das contas e a mesa de bilhar limita o movimento das bolas, a nossa 3-brana grudenta permitiria que os fótons se movessem *apenas* dentro das nossas três dimensões espaciais. Como os fótons são as partículas mensageiras do eletromagnetismo, isso implica que a força eletromagnética — a luz — fique presa nas nossas três dimensões, como mostra (em duas dimensões, para que possamos, desenhá-la) a figura 13.3.

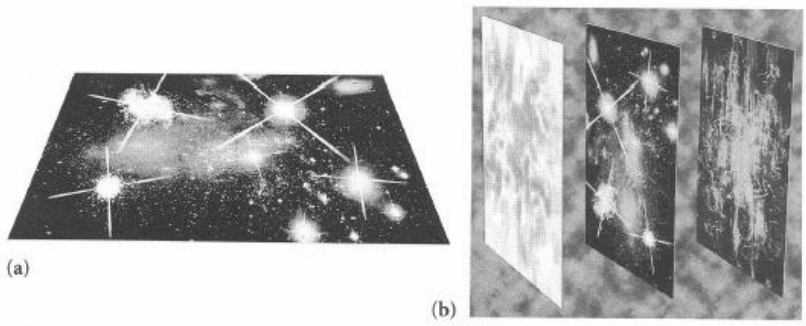


Figura 13.3. (*a*) *No cenário do mundo-brana, os fótons são cordas abertas cujas pontas estão confinadas ao interior da brana, de modo que eles — ou seja, a luz — não podem ir além dos seus limites.* (*b*) *O nosso mundo-brana poderia estar flutuando em uma grande extensão de dimensões adicionais que permanecem invisíveis para nós, uma vez que a luz que vemos não pode sair da nossa brana. Poderia haver também outros mundos-brana flutuando perto de nós.*

Essa é uma percepção profunda, com importantes consequências. Antes, pensávamos que as dimensões adicionais da teoria das cordas/teoria-M tivessem que ser intensamente deformadas. A razão, obviamente, era a de que não víamos as dimensões adicionais e, portanto, elas tinham de estar ocultas. E uma maneira de se ocultarem seria ter um tamanho tão pequeno que os nossos equipamentos não pudessem detectá-las. Mas vamos reexaminar essa questão no cenário do mundo-brana. Como detectamos as coisas? Quando usamos os olhos, usamos a força eletromagnética; quando usamos instrumentos poderosos como o microscópio eletrônico, também usamos a força eletromagnética; quando usamos aceleradores de partículas, uma das forças de que nos valemos para examinar o ultrapequeno é, novamente, a força eletromagnética. Mas se a força eletromagnética estiver confinada à nossa 3-brana, às nossas três dimensões espaciais, ela *não poderá* examinar as dimensões adicionais, qualquer que seja o tamanho delas. Sendo assim, os fótons não podem escapar das nossas dimensões, entrar nas outras e depois regressar aos nossos olhos, ou aos nossos equipamentos, *mesmo que elas sejam tão grandes quanto as dimensões espaciais que nos são familiares.*

Assim, se estamos vivendo em uma 3-brana, temos uma explicação alternativa para o fato de não termos consciência das dimensões adicionais. Não se trata necessariamente de serem extremamente pequenas. Elas podem ser grandes. Nós não as vemos por causa da maneira como vemos. A nossa visão depende da força eletromagnética, que não tem acesso a nenhuma dimensão além das três que conhecemos. Como uma formiga caminhando sobre a folha de uma planta aquática, sem ter a menor ideia das águas profundas que estão logo abaixo da superfície visível. Poderíamos estar flutuando dentro de um espaço multidimensional de proporções grandes e crescentes, como na figura 13.3b, mas

a força eletromagnética — presa para sempre no interior das nossas dimensões — não poderia nunca revelar-nos esse fato.

Você poderá dizer: muito bem, mas a força eletromagnética é apenas uma das quatro forças da natureza. E as outras três? Será que elas conseguiriam examinar as dimensões adicionais e revelar-nos a sua existência? Para as forças nucleares forte e fraca, a resposta é novamente não. No cenário do mundo-brana os cálculos mostram que as partículas mensageiras dessas forças — os glúons e as partículas W e Z — também derivam de padrões vibratórios de cordas abertas, de modo que elas estão tão presas quanto os fótons, e os processos que envolvem as forças nucleares forte e fraca são igualmente cegos com relação às dimensões adicionais. O mesmo é válido para as partículas de matéria. Os elétrons, os quarks e todos os outros tipos de partícula também derivam das vibrações das cordas abertas com pontas presas. *Portanto, no cenário do mundo-brana, eu, você e tudo o mais que podemos ver estamos permanentemente presos no interior da nossa 3-brana.* Levando em conta o tempo, tudo está aprisionado dentro da nossa fatia quadridimensional de espaço-tempo.

Bem, quase tudo. Para a força da gravidade a situação é diferente. As análises matemáticas do cenário do mundo-brana revelam que os grávitons derivam do padrão vibratório das cordas fechadas, tal como nos cenários sem branas. E as cordas fechadas — cordas sem pontas — não estão confinadas pelas branas. Elas têm liberdade tanto para viajar dentro delas quanto para deixá-las. Por conseguinte, se estamos vivendo em uma brana, não poderíamos estar completamente isolados das dimensões adicionais. Por meio da força gravitacional, poderíamos tanto influenciar as dimensões adicionais quanto ser influenciados por elas. Nesse cenário, a gravidade propiciaria o nosso único meio de contato com o que está além das três dimensões espaciais.

Que tamanho poderiam ter as dimensões adicionais sem que nos apercebêssemos delas por meio da força gravitacional? Essa é uma pergunta interessante e crucial. Vamos examiná-la.

A GRAVIDADE E AS DIMENSÕES ADICIONAIS GRANDES

Em 1687, quando Newton propôs a lei da gravitação universal, ele estava, na verdade, fazendo uma afirmação importante a respeito do número das dimensões espaciais. Newton não se limitou a dizer que a força de atração entre dois objetos se enfraquece à medida que a distância entre eles aumenta. Ele propôs uma fórmula, a *lei do inverso do quadrado*, que descreve de maneira precisa a diminuição da atração gravitacional com o aumento das distâncias. De acordo

com a sua fórmula, se se duplicar a distância entre dois objetos, a atração gravitacional entre eles cairá quatro vezes (2^2); se se triplicar a distância, a atração cairá nove vezes (3^2); e se se quadruplicar a distância, a atração cairá dezesseis vezes (4^2). Em síntese, a força gravitacional decresce em proporção ao quadrado da separação. A experiência acumulada ao longo dos últimos séculos mostra largamente que essa fórmula funciona.

Mas *por que* a força depende do quadrado da distância? Por que ela não cai na proporção do cubo da separação (de modo que, quando a distância duplica, a força cai oito vezes), ou pela quarta potência (de modo que, quando a distância duplica, a força cai dezesseis vezes), ou, o que seria mais simples, por que a força gravitacional entre dois objetos não decresce na proporção direta da separação (de modo que, quando a distância duplica, a força cai duas vezes)? A resposta está diretamente ligada ao número de dimensões espaciais.

Um modo de perceber esse aspecto é pensar em como o número de grávitons emitidos e absorvidos por dois objetos depende da sua separação, ou pensar em como o encurvamento do espaço-tempo, que cada objeto experimenta, diminui com o aumento da distância entre eles. Mas vamos adotar um enfoque mais simples e mais conservador, que nos leva rápida e intuitivamente à resposta correta. Desenhemos uma figura (a figura 13.4a) que ilustre esquematicamente o campo gravitacional produzido por um objeto de grande massa — digamos o Sol — assim como a figura 3.1 ilustra esquematicamente o campo magnético produzido por um ímã. Enquanto as linhas do campo magnético distribuem-se do polo norte ao pólo sul do ímã, veja que as linhas do campo gravitacional emanam radialmente em todas as direções e não param de avançar. A intensidade da atração gravitacional experimentada por um objeto — imaginemos um satélite em órbita — a determinada distância é proporcional à densidade das linhas do campo naquela posição. Quanto maior for o número de linhas do campo que penetram no satélite, como na figura 13.4b, maior será a atração gravitacional a que ele estará submetido.

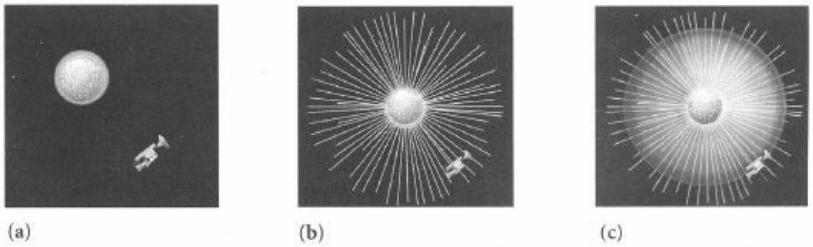


Figura 13.4. (*a*) *A força gravitacional exercida pelo Sol sobre um objeto como um satélite é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. A razão está em que as linhas do campo gravitacional do Sol distribuem-se uniformemente, como em* (*b*), *e têm, portanto, uma densidade, na distância d, que é inversamente proporcional à área de uma esfera imaginária de raio d — desenhada esquematicamente em* (*c*) —, *área que a geometria básica mostra ser proporcional a* d^2.

Podemos explicar agora a origem da lei de Newton sobre o inverso do quadrado da distância. Uma esfera imaginária cujo centro é o Sol e cuja superfície passa pela localização do satélite, como na figura 13.4c, tem uma área que — como a área de qualquer esfera no espaço tridimensional — é proporcional ao *quadrado* do seu raio e, portanto, neste caso, proporcional ao *quadrado* da distância entre o Sol e o satélite. Isso significa que a densidade das linhas do campo que passam pela esfera — o número total das linhas do campo dividido pela área da esfera — diminui em proporção ao quadrado da separação entre o Sol e o satélite. Se dobrarmos a distância, o mesmo número de linhas do campo estará agora distribuído uniformemente em uma esfera cuja área é quatro vezes maior e, portanto, a atração gravitacional a essa distância será quatro vezes menor. A lei do inverso do quadrado da distância, de Newton, é, assim, o reflexo de uma propriedade geométrica das esferas em três dimensões espaciais.

E se o universo tivesse apenas duas ou mesmo uma dimensão espacial, como se comportaria a fórmula de Newton? A figura 13.5a mostra uma versão bidimensional do Sol e do satélite que gira ao redor dele. Como se vê, a qualquer distância dada, as linhas do campo gravitacional do Sol distribuem-se uniformemente em um círculo, que é o análogo de uma esfera com uma dimensão a menos. Como a circunferência do círculo é proporcional ao seu raio (e não ao quadrado dele), se dobrarmos a separação Sol—satélite, a densidade das linhas do campo diminuirá duas vezes (e não quatro) e a força da atração gravitacional do Sol cairá apenas à metade (e não à quarta parte). Se o universo tivesse apenas duas dimensões espaciais, portanto, a atração gravitacional seria inversamente proporcional à separação entre os objetos, e não ao quadrado dela.

Se o universo tivesse somente uma dimensão espacial, como na figura 13.5b, a lei da gravidade seria ainda mais simples. As linhas do campo gravitacional não teriam como expandir-se e a força gravitacional não diminuiria com a separação. Se dobrássemos a distância entre o Sol e o satélite (supondo que tais objetos

pudessem existir em um universo assim), o mesmo número de linhas do campo penetraria no satélite e, por conseguinte, a força gravitacional que atuaria entre eles não experimentaria variação.
Embora seja impossível desenhá-lo, o padrão ilustrado nas figuras 13.4 e 13.5 estende-se diretamente a universos com quatro, cinco, seis ou qualquer outro número de dimensões espaciais. Quanto mais dimensões espaciais houver, mais espaço haverá para que as linhas da força gravitacional se distribuam. E quanto mais distribuídas elas estiverem, mais acentuada será a queda da intensidade da força com o aumento da separação. Com quatro dimensões espaciais, a lei de Newton seria a lei do inverso do cubo (dobrando-se a separação, a intensidade da força cairia oito vezes); com cinco dimensões espaciais, ela seria o inverso da quarta potência (dobrando-se a separação, a intensidade da força cairia dezesseis vezes); com seis dimensões espaciais, ela seria o inverso da quinta potência (dobrando-se a separação, a intensidade da força cairia 32 vezes); e assim por diante.

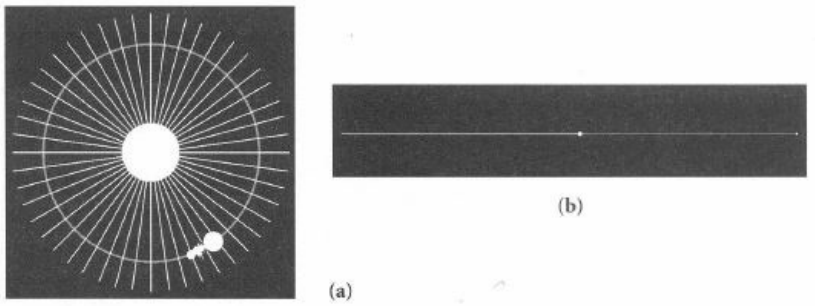


Figura 13.5. (*a*) *Em um universo com apenas duas dimensões espaciais, a força gravitacional decresce em proporção à separação, porque as suas linhas de força distribuem-se uniformemente em um círculo cuja circunferência é proporcional ao seu raio.* (*b*) *Em um universo com apenas uma dimensão espacial, as linhas do campo gravitacional não têm como distribuir-se, de modo que a força gravitacional é constante, independentemente da separação.*

Você poderia pensar que a precisão e a consistência com que a versão do inverso do quadrado da distância da lei de Newton explica uma série de dados — dos movimentos dos planetas às trajetórias dos cometas — são uma confirmação de que vivemos em um universo que tem precisamente três dimensões espaciais, mas essa conclusão seria precipitada. Sabemos que a lei do quadrado da distância funciona nas escalas astronômicas[6] e sabemos também que ela funciona nas escalas terrestres, o que se coaduna bem com o fato de que nessas escalas percebemos três dimensões espaciais. Mas será que sabemos que ela funciona em escalas menores? Até que ponto do microcosmo a lei do inverso do quadrado da distância foi testada? Na verdade, os pesquisadores a confirmaram apenas até um décimo de milímetro. Se trouxermos dois objetos a uma separação de um décimo de milímetro, os dados confirmarão que a intensidade da atração

gravitacional segue as previsões da lei do inverso do quadrado da distância. Mas testar a lei em escalas menores tem se revelado, até agora, uma difícil empreitada do ponto de vista técnico (os efeitos quânticos e a reduzida intensidade da gravidade complicam muito os experimentos). Essa é uma questão crucial, porque a detecção de desvios na lei seria um sinal convincente da existência de dimensões adicionais.

Para vermos isso de maneira explícita, trabalhemos com um exemplo em menos dimensões, mais fácil de desenhar e de analisar. Imaginemos que o universo em que vivemos tivesse apenas uma dimensão espacial — ou, pelo menos, essa seria a nossa percepção, com base no fato de que só há uma dimensão visível e no fato de que séculos de experimentos revelaram que a força gravitacional não varia com o aumento ou a diminuição da separação entre os objetos. Mas imaginemos também que durante todo esse tempo os cientistas só tivessem sido capazes de testar a lei da gravidade em distâncias não inferiores a um décimo de milímetro e que não existissem dados disponíveis para distâncias mais curtas do que essa. Imaginemos agora que os integrantes de um pequeno grupo de físicos teóricos fossem as únicas pessoas que sabiam que o universo tinha, na verdade, uma segunda dimensão espacial recurvada, de modo que a sua verdadeira forma se aproximaria da forma da superfície da corda bamba de Philippe Petit, mostrada na figura 12.5. Que efeito teria isso sobre futuros testes gravitacionais mais sofisticados? A resposta pode ser deduzida se olharmos para a figura 13.6. Se aproximarmos dois pequeníssimos objetos a uma distância bem curta — muito menor do que a circunferência da dimensão deformada —, o caráter bidimensional do espaço apareceria de imediato, porque, nessas escalas, as linhas do campo gravitacional *teriam* como distribuir-se (figura 13.6a). A força gravitacional variaria na proporção *inversa* da separação quando os objetos estivessem muito próximos e não seria, portanto, independente com relação à distância.

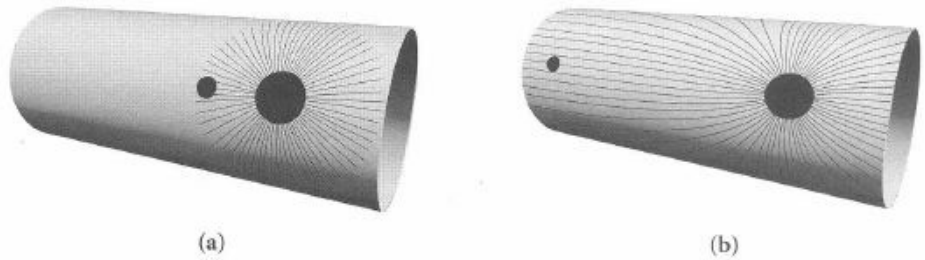


Figura 13.6. (*a*) *Quando os objetos estão próximos, a atração gravitacional varia da maneira como o faz em duas dimensões espaciais.* (*b*) *Quando os objetos estão mais afastados, a atração gravitacional comporta-se como o faz em uma dimensão espacial — é constante.*

Assim, se você fosse um cientista nesse universo, e se desenvolvesse métodos extremamente precisos para medir a força gravitacional, encontraria o seguinte: quando dois objetos estão extremamente próximos um do outro, muito mais próximos do que o tamanho da dimensão deformada, a atração gravitacional entre eles diminuiria na proporção da sua separação, tal como se espera de um universo com duas dimensões espaciais. Mas, se os objetos estiverem separados por uma distância não inferior à circunferência da dimensão deformada, as coisas se modificariam. Além dessa distância, as linhas do campo gravitacional já não poderiam ampliar a sua distribuição. Elas já teriam alcançado a sua distribuição máxima na segunda dimensão deformada — já teriam saturado essa dimensão —, de modo que, a partir dessa distância, a força gravitacional já não diminuiria, como mostra a figura 13.6b. Trata-se de uma situação comparável à do encanamento de uma casa antiga. Se alguém abrir a torneira da pia da cozinha no momento em que você está tomando banho, a pressão da água diminuirá porque o líquido se distribuirá entre dois canos. A pressão diminuirá novamente se alguém abrir a torneira do tanque de lavar roupa, pois a água se distribuirá ainda mais. Mas a partir do momento em que todas as torneiras da casa estiverem abertas, a pressão permanecerá constante. Embora você não possa desfrutar da pressão ideal da água, que relaxa o corpo no banho, como era o seu desejo, pelo menos a intensidade do chuveiro já não cairá mais porque a água já estará completamente distribuída por todos os canos “adicionais”. Do mesmo modo, a partir do momento em que o campo gravitacional estiver completamente distribuído por todas as dimensões adicionais recurvadas, ele não continuará a enfraquecer-se com o aumento da distância.

Com base nesses dados, podem-se fazer duas deduções. Em primeiro lugar, uma vez que a força gravitacional diminui na proporção do aumento da distância quando dois objetos estão muito próximos um do outro, pode-se perceber que o universo tem duas dimensões espaciais, e não apenas uma. Em segundo lugar, a passagem dessa situação para outra em que a força gravitacional é constante — resultado conhecido através de séculos de experimentos anteriores — permite a conclusão de que uma dessas dimensões é deformada, com um tamanho aproximadamente igual ao da distância em que essa passagem ocorre. Com essas conclusões, você derrubaria séculos, ou mesmo milênios, de crenças e percepções a respeito de algo tão básico e aparentemente tão inquestionável como o número das dimensões espaciais.

Embora esse exemplo, destinado a facilitar a visualização, esteja situado em um universo com menos dimensões, a nossa situação poderia ser bem parecida. Séculos de experimentos confirmam que a gravidade varia na proporção inversa do quadrado da distância, o que evidencia a existência de três dimensões

espaciais. Mas até 1998 nenhum experimento havia testado a força da gravidade para distâncias menores do que um milímetro (hoje, como mencionamos, chegamos a um décimo de milímetro). Isso levou Savas Dimopoulos, de Stanford, Nima Arkani-Hamed, atualmente em Harvard, e Gia Dvali, da New York University, a propor que, *no cenário do mundo-brana,, as dimensões adicionais poderiam ter até um milímetro e permanecer sem detecção.* Essa sugestão radical inspirou diversos grupos experimentais a iniciar o estudo da gravidade a distâncias submilimétricas, na esperança de encontrar violações da lei do inverso do quadrado da distância. Até aqui, nada se encontrou nesse sentido, até a distância de um décimo de milímetro. Assim, de acordo com o que podemos testar hoje em termos gravitacionais, *se estivermos vivendo em uma 3-brana, as dimensões adicionais poderiam chegar a um décimo de milímetro sem que as possamos perceber.*

Essa é uma das conclusões mais impressionantes da última década. Usando as três forças não gravitacionais, podemos examinar o espaço até um bilionésimo de bilionésimo (10^{18}) de metro, sem encontrar nenhuma evidência de dimensões adicionais. Mas, no cenário do mundo-brana, as forças não gravitacionais são impotentes na busca das dimensões adicionais, uma vez que estão presas ao interior da própria brana. Apenas a gravidade pode propiciar-nos uma janela para a natureza das dimensões adicionais e, em razão do nosso nível de desenvolvimento tecnológico nos dias de hoje, elas podem ter a espessura de um fio de cabelo humano e permanecer completamente invisíveis aos nossos instrumentos mais sofisticados. Agora mesmo, bem ao seu lado, ao meu lado, ao lado do que quer que seja, pode haver uma outra dimensão espacial — além de esquerda/direita, frente/trás e acima/abaixo, deformada, mas suficientemente grande para ser capaz de engolir algo da espessura desta página — que está além do nosso alcance. (existe mesmo uma proposição, feita por Lisa Randall, de Harvard, e Raman Sundrum, de Johns Hopkins, segundo a qual também a gravidade pode estar aprisionada, não por uma brana grudenta, mas sim por dimensões adicionais que se deformam na medida exata, o que relaxa ainda mais os limites para o seu tamanho).

DIMENSÕES ADICIONAIS GRANDES E CORDAS GRANDES

Ao aprisionar três das quatro forças, o cenário do mundo-brana relaxa significativamente os limites experimentais quanto ao tamanho possível das dimensões adicionais, mas essas dimensões não são as únicas coisas que, segundo esse ponto de vista, podem ser relativamente grandes. A partir das percepções de Witten, Joe Lykken, Constantin Bachas e outros, Ignatios Antoniadis, juntamente com Arkani-Hamed, Dimopoulos e Dvali, concebeu a ideia de que no cenário do mundo-brana mesmo cordas não excitadas e com

baixa energia podem ser *muito* maiores do que se imaginava anteriormente. Com efeito, as duas escalas — o tamanho das dimensões adicionais e o tamanho das cordas — estão intimamente relacionadas.

Lembre-se de que no último capítulo vimos que o tamanho básico de uma corda é determinado pelo requisito de que o padrão vibratório do seu gráviton comunique uma força gravitacional com a intensidade apropriada. A debilidade da gravidade implica que a corda deve ser muito pequena, na faixa do tamanho da distância de Planck (10^{-33} centímetros). Mas essa conclusão depende fortemente do tamanho das dimensões adicionais. A razão está em que, na teoria das cordas/teoria-M, a intensidade da força gravitacional que observamos nas três dimensões espaciais estendidas representa uma interação entre dois fatores. Um deles é a intensidade intrínseca e fundamental da força gravitacional. O outro é o tamanho das dimensões adicionais. Quanto maiores forem estas, maior será a proporção da força gravitacional que se distribuirá entre elas e, por conseguinte, mais fraca ela *aparentará* ser nas dimensões familiares. Assim como os canos mais grossos produzem menor pressão de água, porque oferecem mais espaço para que a água se distribua, também as dimensões adicionais produzem uma gravidade mais fraca porque lhe propiciam mais espaço para que ela se distribua.

Os cálculos originais que determinaram o comprimento das cordas partiram do princípio de que as dimensões adicionais seriam tão diminutas, com o tamanho da ordem da distância de Planck, que a gravidade não teria como distribuir-se dentro delas. Desse ponto de vista, a gravidade parece fraca porque ela *é* fraca. Mas se trabalharmos no cenário do mundo-brana e admitirmos que as dimensões adicionais podem ser muito maiores do que anteriormente se considerava, a debilidade que observamos na gravidade já não significa necessariamente que ela seja intrinsecamente fraca. Em vez disso, ela pode ser uma força relativamente poderosa que nos parece fraca apenas porque as dimensões adicionais, sendo relativamente grandes, como canos grossos, diluem a sua intensidade intrínseca. Seguindo essa linha de raciocínio, se a gravidade for muito mais intensa do que antes se supunha, as cordas podem ser muito mais longas também.

Com os nossos conhecimentos de hoje, a questão do comprimento das cordas ainda não tem uma resposta definida e única. Diante da liberdade recém-descoberta de variar tanto o tamanho das cordas quanto o das dimensões adicionais, em escalas muito mais amplas do que antes se supunha, as possibilidades são muitas. Dimopoulos e seus colaboradores argumentam que os resultados experimentais atuais, tanto na física das partículas quanto na astrofísica, mostram que as cordas não excitadas não podem ser maiores do que

um bilionésimo de bilionésimo de metro (10^{-18} metros). Embora esse comprimento seja pequeno em comparação com os nossos padrões cotidianos, ele é cerca de 100 milhões de bilhões (10^{17}) de vezes maior do que a distância de Planck — *quase 100 milhões de bilhões de vezes maior do que antes se pensava*. Como veremos agora, esse tamanho seria suficientemente grande para que os sinais das cordas pudessem ser detectados pela próxima geração de aceleradores de partículas.

A TEORIA DAS CORDAS CONFRONTA OS EXPERIMENTOS?

A possibilidade de que estejamos vivendo dentro de uma grande 3-brana é, naturalmente, apenas isso: uma possibilidade. E dentro do cenário do mundo-brana, a possibilidade de que as dimensões adicionais sejam bem maiores do que se pensava — e a possibilidade correlata de que também as cordas possam ser muito maiores — é, igualmente, apenas isto: uma possibilidade. *Mas são possibilidades extraordinárias.* É verdade que, mesmo que o cenário do mundo-brana seja correto, os tamanhos das dimensões adicionais e das cordas poderiam continuar a ser de ordem planckiana. Mas a possibilidade de que, na teoria das cordas/teoria-M, as cordas e as dimensões adicionais sejam muito maiores — a ponto de estar quase ao alcance da nossa tecnologia atual — é fantástica. Ela significa que há pelo menos uma possibilidade de que nos próximos anos a teoria das cordas/teoria-M estabeleça contato com a física observável e se torne uma ciência experimental.

Que possibilidade é essa? Nem eu nem ninguém sabe. A minha intuição me diz que ela não é grande, mas também me diz que é informada por quinze anos de trabalhos realizados no contexto convencional, com cordas e dimensões adicionais de tamanho planckiano. Talvez os meus instintos sejam antiquados. Mas a questão deverá ser resolvida sem desdouro para a intuição de quem quer que seja. Se as cordas ou algumas das dimensões adicionais forem grandes, as implicações para os próximos experimentos são espetaculares.

No capítulo seguinte consideraremos diversos experimentos que testarão, entre outras coisas, as possibilidades de que as cordas e as dimensões adicionais relativamente grandes possam existir. Por agora, então, vamos servir apenas alguns aperitivos. Se as cordas alcançarem um bilionésimo de bilionésimo (10^{-18}) de metro, as partículas correspondentes às vibrações harmônicas mais altas da figura 12.4 não terão massas enormes, superiores à massa de Planck, como no cenário-padrão. Em vez disso, as massas serão apenas cerca de mil, ou poucas mil vezes, maiores do que a do próton, o que é suficientemente baixo para estar

ao alcance do Grande Colisor de Hadrons, em construção no CERN. Se essas vibrações das cordas forem excitadas por meio de colisões de alta energia, os detectores do acelerador se iluminarão como a bola de cristal da Times Square na noite de ano-novo. Toda uma série de partículas nunca antes vistas seria produzida e as suas massas seriam relacionadas umas com as outras, assim como as vibrações harmônicas se relacionam em um violoncelo. A assinatura da teoria das cordas deixaria a sua marca nos dados com tal vigor que os pesquisadores não poderiam deixar de reconhecê-la, mesmo sem óculos.

Além disso, no cenário do mundo-brana, as colisões de alta energia poderiam produzir até mesmo — veja bem — buracos negros em miniatura. Embora pensemos nos buracos negros como estruturas colossais no espaço profundo, sabe-se, desde os primeiros dias da relatividade geral, que se comprimirmos uma quantidade suficiente de matéria na palma da mão, criaríamos um miniburaco negro. Isso nunca foi feito porque não dispomos de nenhum instrumento mecânico que nem mesmo remotamente possa aproximar-se do poder de compressão necessário para isso. Hoje, o único mecanismo reconhecido para a produção de buracos negros envolve a atração gravitacional de uma estrela de enorme massa, que supera a pressão para fora normalmente exercida pelos processos estelares de fusão nuclear e leva a estrela ao colapso sobre si mesma. Mas, se a intensidade intrínseca da gravidade nas escalas diminutas for muito maior do que antes se pensava, é possível produzir miniburacos negros com um poder de compressão significativamente menor do que se imaginava. Os cálculos revelam que o Grande Colisor de Hadrons pode ter justamente o poder de compressão necessário para criar uma cornucópia de buracos negros microscópicos por meio de colisões de alta energia entre prótons.[7] Pense em como isso é espantoso. O Grande Colisor de Hadrons poderia ser uma fábrica de buracos negros microscópicos! Eles seriam tão pequenos e durariam tão pouco tempo que não nos ofereceriam nenhuma ameaça (anos atrás, Stephen Hawking mostrou que todos os buracos negros desintegram-se por meio de processos quânticos — os grande desintegram-se muito devagar e os pequenos muito depressa), mas o fato de produzi-los representaria a confirmação de algumas das ideias mais exóticas que já foram contempladas.

A COSMOLOGIA DO MUNDO-BRANA

Um dos principais objetivos das pesquisas atuais, que está sendo buscado com vigor por cientistas em toda parte do mundo (inclusive por mim), é o de formular um conceito de cosmologia que incorpore as novas ideias da teoria das cordas/teoria-M. A razão é clara: a cosmologia lida com as grandes questões que

nos deixam engasgados e nós já compreendemos que certos aspectos da experiência cotidiana — como a seta do tempo — relacionam-se diretamente com as condições vigentes no nascimento do universo. Ademais, a cosmologia proporciona ao teórico o que Nova York proporcionava a Frank Sinatra: o campo de provas por excelência. Se uma teoria resistir às condições extremas que caracterizaram os momentos iniciais do universo, ela resistirá a tudo.

Hoje, a cosmologia, segundo a teoria das cordas/teoria-M, é um trabalho em andamento, em que os pesquisadores seguem dois caminhos principais. O primeiro enfoque, mais convencional, imagina que, assim como a inflação propiciou um desdobramento breve, mas profundo, para o modelo-padrão do Big-Bang, a teoria das cordas/teoria-M propicia um desdobramento ainda mais fundamental e talvez ainda mais profundo para a inflação. A esperança reside em que a teoria das cordas/teoria-M venha a definir o trecho difuso que usamos para denotar a nossa ignorância a respeito dos primeiros momentos do universo e que a partir daí o drama cosmológico se desenvolva de acordo com o roteiro notavelmente eficaz da teoria inflacionária, relatado nos capítulos anteriores.

Temos experimentado algum progresso com respeito a certos detalhes requeridos por esse enfoque (tais como a busca de um entendimento de por que apenas três das dimensões espaciais do universo sofreram expansão e o desenvolvimento de métodos matemáticos que podem revelar-se importantes para a análise do reino sem tempo e sem espaço que pode ter precedido a inflação), mas o momento da "heureca" ainda está por vir. A intuição nos diz que, enquanto a cosmologia inflacionária imagina que o universo observável era cada vez menor, mais quente, mais denso e mais energético à medida que recuamos no rumo da sua origem, a teoria das cordas/teoria-M domestica esse comportamento selvagem ("singular", na língua dos físicos), apresentando um tamanho mínimo (como na nossa discussão das páginas 405-7), abaixo do qual outras categorias físicas, novas e menos singulares, passam a ter importância. Esse raciocínio está no cerne do sucesso da fusão entre a relatividade geral e a mecânica quântica, obtida pela teoria das cordas/teoria-M, e o meu pensamento mais profundo é que muito em breve descobriremos como aplicar o mesmo raciocínio à cosmologia. Mas por enquanto o trecho difuso continua difuso e todo mundo tem direito a ter a sua opinião sobre quando alcançaremos a nitidez.

O segundo enfoque emprega o cenário do mundo-brana e propõe, na sua encarnação mais radical, um esquema cosmológico completamente novo. Ainda estamos longe de estar seguros de que esse enfoque venha a sobreviver ao escrutínio matemático detalhado, mas ele sem dúvida oferece um bom exemplo de como novas descobertas na teoria fundamental podem sugerir novos

caminhos através de territórios aparentemente bem conhecidos. A proposição denomina-se *modelo cíclico.*

COSMOLOGIA CÍCLICA

Do ponto de vista do tempo, a experiência comum confronta-nos com dois tipos de fenômenos: os que têm começo, meio e fim claramente delineados (este livro, um jogo de futebol, uma vida humana) e os que são cíclicos e acontecem repetidamente (as estações do ano, o nascer e o pôr-do-sol, os casamentos de Larry King). Evidentemente, um exame mais aprofundado nos indica que os fenômenos cíclicos também têm um começo e um fim, uma vez que os ciclos em geral não são perpétuos. O Sol nasce e se põe — ou seja, a Terra gira em torno do seu próprio eixo e faz revoluções ao redor do Sol — há cerca de 5 bilhões de anos, mas antes disso o Sol e o sistema solar ainda não haviam se formado. E algum dia, daqui a uns outros 5 bilhões de anos, o Sol se transformará em uma estrela gigante vermelha e devorará os planetas do sistema solar, inclusive a Terra, e terminará com a noção do nascer e do pôr-do-sol, pelo menos aqui.

Mas esses são frutos do conhecimento científico moderno. Para os antigos, os fenômenos cíclicos pareciam eternos. E para muitos eles eram os fenômenos primários, por completar o seu curso e continuamente voltar a começar. Os ciclos dos dias e das estações marcam o ritmo do trabalho e da vida, portanto não é surpreendente que algumas das cosmologias mais antigas vissem a evolução do mundo como um processo cíclico. Em vez de propor começo, meio e fim, a cosmologia cíclica imagina que o mundo muda através do tempo, assim como a Lua muda através das fases. Depois de passar por uma sequência completa, ficam maduras as condições para que tudo volte a começar e dar início a um novo ciclo.

Desde a descoberta da relatividade geral, diversos modelos cosmológicos cíclicos foram propostos. O mais conhecido foi desenvolvido na década de 1930 por Richard Tolman, do Califórnia Institute of Technology. Tolman sugeriu que a expansão que observamos no universo poderia sofrer desaceleração e parar, um dia, ao que se seguiria um período de contração no qual o universo ficaria cada vez menor. Mas em vez de chegar a um terrível final em que ele implodiria e chegaria ao fim, Tolman propôs que o universo *rebotaria*: o espaço se contrairia até certo ponto e voltaria a crescer, iniciando um novo ciclo de expansão, seguido de uma nova contração. Um universo que repetisse eternamente esse ciclo — expansão, contração, rebote, expansão de novo — evitaria com elegância as espinhosas questões relativas à origem. Nesse cenário, o próprio

conceito de origem não seria aplicável, uma vez que o universo sempre teria existido e sempre continuaria a existir.

Mas Tolman compreendeu que, a partir da nossa perspectiva atual, os ciclos poderiam repetir-se durante algum tempo, mas não indefinidamente. A razão está em que durante cada ciclo, a segunda lei da termodinâmica determina que, em média, a entropia aumentaria.[8] E de acordo com a relatividade geral, a quantidade de entropia no começo de cada ciclo determina a duração que esse ciclo terá. Mais entropia significa um período de expansão mais longo até que o movimento para fora chegue a parar e reverter-se em movimento para dentro. Cada um dos ciclos sucessivos duraria, portanto, muito mais do que o que o antecedeu. Reciprocamente, os ciclos anteriores seriam cada vez mais curtos. A análise matemática indica que o encurtamento constante dos ciclos implica que eles não podem estender-se infinitamente no passado. Mesmo no esquema cíclico de Tolman o universo teria de ter um começo.

A proposição de Tolman invocava um universo esférico que, como já vimos, é incompatível com as observações. Mas a cosmologia cíclica tem uma encarnação radicalmente nova que envolve um universo plano e que foi desenvolvida recentemente no contexto da teoria das cordas/teoria-M. A ideia, apresentada por Paul Steinhardt, juntamente com o seu colaborador Neil Turok, da Universidade de Cambridge (que fizeram intenso uso dos resultados descobertos em suas colaborações com Burt Ovrut, Nathan Seiberg e Justin Khoury), propõe um novo mecanismo que impulsiona a evolução cósmica.[9] Em síntese, ela sugere que nós vivemos em uma 3-brana que se choca violentamente, em intervalos de alguns trilhões de anos, com outra 3-brana, paralela e próxima. E o “bang” da colisão dá início a cada novo ciclo cosmológico.

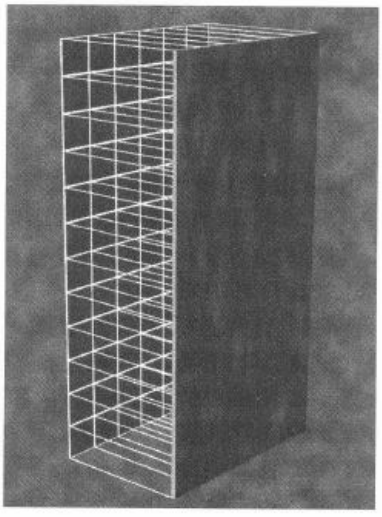


Figura 13.7. *Duas 3-branas separadas por um pequeno intervalo.*

O esquema básico da proposição está ilustrado na figura 13.7 e foi sugerido alguns anos antes por Horava e Witten em um contexto não cosmológico. Horava e Witten estavam tentando completar a proposição de Witten de unificar as cinco teorias das cordas e viram que se uma das sete dimensões adicionais da teoria-M tivesse uma forma bem simples — não um círculo, como na figura 12.7, mas um pequeno segmento de linha reta, como na figura 13.7 — e estivesse amarrada a entidades chamadas branas do fim do mundo, de forma semelhante à lombada de um livro, poder-se-ia estabelecer uma conexão direta entre a teoria das cordas Heterótica-E e todas as demais. Os detalhes relativos à maneira pela qual eles conseguiram estabelecer essa conexão não são óbvios nem essenciais. (Se você estiver interessado, veja, por exemplo, O *universo elegante*, capítulo 12.) O que importa aqui é que ela é um ponto de partida que surge naturalmente a partir da própria teoria. Steinhardt e Turok a recolheram para a sua proposição cosmológica.

Especificamente, Steinhardt e Turok imaginaram que cada brana da figura 13.7 tem três dimensões espaciais e que o segmento de linha reta entre elas provê uma quarta dimensão espacial. As seis dimensões espaciais restantes estão deformadas em um espaço de Calabi-Yau (que não aparece na figura) que tem a forma adequada para que os padrões vibratórios das cordas produzam os tipos conhecidos de partículas.[10] O universo do qual temos consciência direta corresponde a uma dessas 3-branas. Você pode imaginar, por exemplo, que a segunda 3-brana é um outro universo, cujos habitantes, se houver, também só teriam consciência de três dimensões espaciais — supondo que o seu conhecimento e a sua tecnologia experimental não sejam francamente superiores aos nossos. Nesse esquema, portanto, haveria uma outra 3-brana — um outro universo — bem junto a nós, flutuando a uma distância submilimétrica (e a separação entre ambos seria a quarta dimensão espacial, como na figura 13.7). Mas como a nossa 3-brana gruda e a gravidade que experimentamos é muito fraca, não tomamos conhecimento da existência desse universo vizinho, nem os seus hipotéticos habitantes têm conhecimento da nossa existência.

Porém, de acordo com o modelo cosmológico cíclico de Steinhardt e Turok, a figura 13.7 não representa algo que sempre existiu e que sempre existirá. Ao contrário, segundo esse modelo, as duas 3-branas atraem-se mutuamente, quase como se estivessem ligadas por mínimos elásticos —, o que implica que cada uma delas dirige a evolução cosmológica da outra: as branas executam um ciclo infinito de colisões, rebotes e novas colisões, regenerando eternamente a expansão dos seus mundos tridimensionais. Para saber como isso acontece, veja a figura 13.8, que ilustra um ciclo completo, passo a passo.

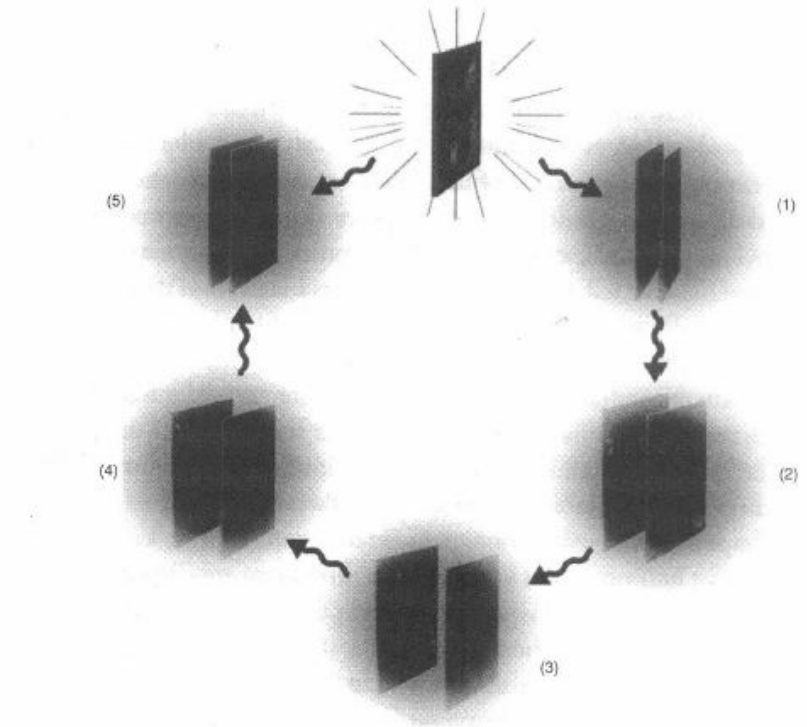


Figura 13.8. *Diversos estágios do modelo cosmológico cíclico do mundo-brana.*

No estágio 1, as duas 3-branas acabaram de colidir e começam a rebotar. A tremenda energia da colisão deposita uma quantidade significativa de radiação de alta temperatura e de matéria em ambas as 3-branas e — eis a chave — Steinhardt e Turok argumentam que *as propriedades específicas dessa matéria e dessa radiação têm um perfil praticamente idêntico ao do que é produzido pelo modelo inflacionário.* Embora alguma controvérsia persista quanto a este ponto, Steinhardt e Turok afirmam que a colisão entre as duas 3-branas resulta em condições físicas extremamente próximas às que existiriam no momento que se segue ao surto de expansão inflacionária no enfoque mais convencional discutido no capítulo 10. Não chega a surpreender, portanto, que, para um observador hipotético no interior da nossa 3-brana, os estágios seguintes do modelo cosmológico cíclico sejam essencialmente os mesmos que aparecem no enfoque-padrão, como ilustrado na figura 9.2 (interpretando-se a figura como a descrição da evolução em uma das 3-branas). Assim, quando a nossa 3-brana rebota da colisão, ela se expande e se resfria, e as estruturas cósmicas, como as estrelas e as galáxias, vão se formando gradualmente a partir do plasma primordial, como se vê no estágio 2. A seguir, inspirados pelas recentes observações de supernovas discutidas no capítulo 10, Steinhardt e Turok configuraram o modelo de tal modo que, uns 7 bilhões de anos depois do início do ciclo — estágio 3 —, a energia contida na matéria e na radiação comuns

atinge, graças à expansão da brana, um grau de diluição suficiente para que o componente de energia escura passe a predominar e, por meio da sua pressão negativa, impulsione uma era de expansão acelerada. (Isso requer uma regulação arbitrária dos detalhes, mas permite que o modelo seja compatível com as observações, razão pela qual os proponentes do modelo cíclico argumentam que a proposição é correta.) Cerca de 7 bilhões de anos depois, nós, seres humanos, nos encontramos aqui na Terra, pelo menos no ciclo atual, passando pelos primeiros estágios da fase acelerada. A seguir, durante os próximos *trilhões* de anos, nada de muito diferente acontecerá, e a nossa 3brana continuará a sua expansão acelerada. Esse é um tempo suficiente para que o nosso espaço tridimensional se estique de uma maneira tão colossal que a matéria e a radiação se diluirão quase por completo, deixando o mundo-brana quase completamente vazio e quase completamente uniforme: estágio 4.

A essa altura, a nossa 3-brana terá completado o rebote a partir da colisão inicial e terá começado a se reaproximar da segunda 3-brana. À medida que vamos chegando perto de uma outra colisão, as agitações quânticas das cordas presas à nossa brana acrescentam pequenas rugas ao vazio uniforme que a caracterizava: estágio 5. Com o aumento da velocidade da contração, as rugas continuam a crescer. Então, em uma colisão cataclísmica, encontramos a segunda 3-brana, rebotamos e o ciclo recomeça. As rugas quânticas trazem pequenas inomogeneidades à radiação e à matéria produzidas durante a colisão e, tal como no cenário inflacionário, esses desvios com relação à uniformidade perfeita provocam a formação de aglomerados que, ao longo do processo, gerarão as estrelas e as galáxias.

Esses são os estágios principais do modelo cíclico (também chamado carinhosamente de *big splat).* A sua premissa — mundos-brana que se chocam — é muito diferente da que orienta a bem-sucedida teoria inflacionária, mas existem pontos de contato significativos entre esses dois pontos de vista. Uma similaridade essencial é que ambos atribuem à agitação quântica a geração das desuniformidades iniciais. Com efeito, Steinhardt e Turok argumentam que as equações que explicam as rugas quânticas do modelo cíclico são praticamente idênticas às do cenário inflacionário, de modo que as desuniformidades resultantes previstas pelas duas teorias são também praticamente idênticas.[11] Além disso, embora não haja um surto inflacionário no modelo cíclico, há um período de 1 trilhão de anos (que começa no estágio 3) de moderada expansão acelerada. Trata-se apenas de uma questão de pressa *versus* paciência. O que o modelo inflacionário consegue em um instante, o modelo cíclico consegue no que é, comparativamente, uma eternidade. Como a colisão no modelo cíclico não é o começo do universo, há uma abundância de questões cosmológicas que se

resolvem vagarosamente (como os problemas da planura e do horizonte) durante o último trilhão de anos de cada ciclo *anterior.* O enorme período de expansão acelerada, porém calma ao final de cada ciclo, estica a nossa 3-brana, tornando-a suave, plana e, salvo por flutuações quânticas mínimas mas importantes, inteiramente uniforme. Assim, o longo estágio final de cada ciclo, seguido pela colisão que dá início ao ciclo seguinte, produz um ambiente muito parecido com o que é gerado pelo breve surto de expansão do enfoque inflacionário.

UMA BREVE AVALIAÇAO

Nos seus respectivos níveis de desenvolvimento atual, tanto o modelo inflacionário quanto o cíclico proporcionam esquemas cosmológicos interessantes, mas não oferecem uma teoria completa. A ignorância a respeito das condições que prevaleceram nos momentos iniciais do universo força os proponentes da cosmologia inflacionária a simplesmente supor, sem justificativas teóricas, o surgimento das condições requeridas para a irrupção do surto inflacionário. É assim que a teoria resolve diversos enigmas cosmológicos e lança a seta do tempo. Mas essas resoluções dependem, em primeiro lugar, de que a inflação tenha ocorrido. Além disso, a cosmologia inflacionária ainda não se implantou por completo na teoria das cordas e, por isso, ainda não faz parte de uma fusão coerente entre a relatividade geral e a mecânica quântica.

O modelo cíclico também tem a sua lista de imperfeições. Tal como ocorre com o modelo de Tolman, considerações relativas ao acúmulo de entropia (e também à mecânica quântica)[12] levam à conclusão de que os ciclos do modelo cíclico não poderiam perpetuar-se. Ao contrário, os ciclos têm de ter começado em algum momento definido do passado, razão por que, assim como no caso da inflação, continuamos precisando de uma explicação para o início do primeiro ciclo. Se houvesse essa explicação, a teoria, assim como a inflação, resolveria os principais problemas cosmológicos e lançaria a seta do tempo, a partir de cada colisão a baixa entropia apontando para a frente, rumo aos estágios subsequentes da figura 13.8. Mas, na sua concepção atual, o modelo cíclico não oferece nenhuma explicação de como e por que o universo se encontra na configuração necessária da figura 13.8. Por exemplo, por que seis dimensões ficam deformadas em um espaço de Calabi-Yau particular enquanto uma das dimensões adicionais prestimosamente toma a forma de um segmento espacial que separa as duas 3-branas? Como as duas branas do fim do mundo alinham-se de forma tão perfeita e atraem-se mutuamente com a força exata para lançar os estágios da figura 13.8 da maneira como os descrevemos? E o que é ainda mais

importante: o que é que realmente acontece quando as duas 3-branas colidem, causando o *bang* da versão do modelo cíclico?

Quanto a esta última questão, há a esperança de que a colisão inicial do modelo cíclico seja menos problemática do que a singularidade que encontramos no tempo zero da cosmologia inflacionária. Em vez de a totalidade do espaço estar infinitamente comprimida, no enfoque cíclico apenas a dimensão que existe entre as branas se encolhe, enquanto as próprias branas experimentam uma expansão global durante cada ciclo, e não uma contração. E isso, segundo a argumentação de Steinhardt, Turok e seus colaboradores, implica temperaturas e densidades *finitas* nas próprias branas. Mas essa é uma conclusão altamente arriscada porque, até o momento, ninguém conseguiu trabalhar com êxito as equações que determinariam o que aconteceria quando as branas se chocassem. Com efeito, as análises já realizadas indicam que a colisão das branas padece dos mesmos problemas que afetam a teoria inflacionária no tempo zero: a matemática não dá conta delas. Assim, a cosmologia continua à espera de uma solução rigorosa para o seu começo singular — seja o verdadeiro começo do universo, seja o do ciclo atual.

O aspecto mais atraente do modelo cíclico é a maneira pela qual ele incorpora a energia escura e a expansão acelerada que observamos. Em 1998, quando se descobriu que o universo estava passando por uma expansão acelerada, isso caiu como uma grande surpresa para a maioria dos físicos e astrônomos. Embora o fato possa ser incorporado à cosmologia inflacionária, supondo-se que o universo contenha exatamente a quantidade necessária de energia escura para que isso aconteça, a aceleração da expansão aparece, no entanto, como um adendo injustificado. No modelo cíclico, ao contrário, o papel da energia escura é natural e crucial. O período de 1 trilhão de anos de expansão vagarosa mas constante é fundamental para esclarecer as coisas, para diluir o universo observável até a beira do vácuo e para restabelecer as condições para o desenvolvimento do próximo ciclo. Desse ponto de vista, tanto o modelo inflacionário quanto o cíclico dependem da expansão acelerada — o modelo inflacionário próximo ao começo e o modelo cíclico ao final de cada um dos seus ciclos —, mas só este último conta com apoio observacional direto. (Lembre-se de que, segundo o modelo cíclico, estamos justamente entrando na fase de 1 trilhão de anos de expansão acelerada, expansão essa que foi recentemente observada.) Isso não é quase nada na cronologia do modelo cíclico, mas significa também que, se a expansão acelerada não for confirmada nas observações futuras, o modelo inflacionário poderia sobreviver (embora o mistério a respeito de 70% da conta de energia do universo persistisse também), no entanto o modelo cíclico não poderia.

NOVAS VISÕES DO ESPAÇO-TEMPO

O cenário do mundo-brana e o modelo cosmológico cíclico por ele gerado são muito especulativos. Eu os discuti aqui não tanto porque esteja certo de que estão corretos, mas porque quero ilustrar as maneiras notavelmente novas de pensar sobre o espaço que habitamos e a revolução pela qual estamos passando, sob a inspiração da teoria das cordas/teoria-M. Se estivermos vivendo em uma 3-brana, a pergunta secular que fazemos a respeito da corporalidade do espaço tridimensional teria a sua resposta mais concreta: o espaço seria uma brana e, portanto, seria definitivamente “algo”. Pode ser também que ele não tenha nada de especial, pois pode haver muitas outras branas, de várias dimensões, flutuando no interior do espaço multidimensional da teoria das cordas/teoria-M. E se a evolução cosmológica da nossa 3-brana é impulsionada por repetidas colisões com uma brana vizinha, o tempo como o conhecemos valeria apenas para um dos múltiplos ciclos do universo, com uma sucessão de Big-Bangs, um após o outro.

Para mim, essa visão é admirável e, ao mesmo tempo, nos traz uma sensação de humildade. Pode haver muito mais do que o espaço e o tempo que conhecemos. E, sendo assim, o que consideramos como “tudo” pode ser apenas uma pequena fração de uma realidade muito mais rica.

PARTE V

Realidade e imaginação

14. Assim na terra como no céu

Experimentações com o espaço e o tempo

Avançamos muito desde que Empédocles de Agrigento explicou o universo utilizando a terra, o ar, o fogo e a água. E grande parte do progresso que fizemos desde Newton até as descobertas revolucionárias do século XX obteve extraordinárias confirmações experimentais com base em previsões teóricas detalhadas e precisas. Mas desde meados da década de 1980 temos sido vítimas do nosso próprio êxito. Com o ímpeto incessante de fazer avançar cada vez mais os limites do conhecimento, as nossas teorias penetraram em domínios que estão além do alcance da tecnologia disponível.
Contudo, com diligência e sorte, muitas das ideias de vanguarda serão testadas durante as próximas décadas. Como discutiremos neste capítulo, experimentos planejados ou já em execução têm o potencial de aprimorar o nosso conhecimento a respeito da existência de dimensões adicionais, da composição da matéria escura e da energia escura, da origem da massa e do oceano de Higgs, de aspectos da cosmologia do universo primitivo, da relevância da supersimetria e, possivelmente, da veracidade da própria teoria das cordas. Assim, com uma boa dose de sorte, poderemos por fim testar algumas ideias imaginativas e inovadoras a respeito da unificação, da natureza do espaço e do tempo e das nossas origens cósmicas.

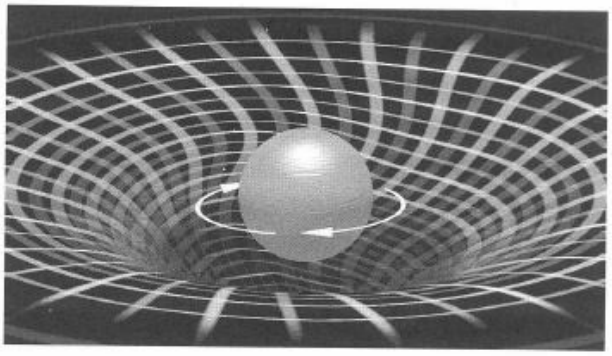


Figura 14.1. *Um objeto em rotação e de grande massa arrasta o espaço — os referenciais em queda livre — à sua volta.*

EINSTEIN E O REMOINHO DO ESPAÇO

Na sua luta de uma década para formular a teoria geral da relatividade, Einstein buscou inspiração em diversas fontes. A mais influente de todas foram os

estudos feitos sobre a matemática dos espaços curvos, desenvolvidos no século XIX por pilares da matemática, inclusive Carl Friedrich Gauss, János Bolyai, Nikolai Lobachevsky e Georg Bernhard Riemann. Como vimos no capítulo 3, Einstein inspirou-se também nas ideias de Ernst Mach. Lembre-se de que Mach advogava um conceito relacionai do espaço: para ele, o espaço proporcionava a linguagem para especificar a localização de um objeto com relação a outro, mas não era, ele próprio, uma entidade independente. Inicialmente, Einstein foi um ardoroso defensor da perspectiva de Mach, porque representava o maior grau de relatividade a que podia chegar uma teoria que adotasse esse conceito. Mas à medida que se aprofundava a compreensão de Einstein a respeito da relatividade geral, ele percebeu que ela não incorporava por completo as ideias de Mach. De acordo com a relatividade geral, a água do balde de Newton, girando em um universo vazio, tomaria uma forma côncava, e isso conflitava com a perspectiva puramente relacionai de Mach por implicar uma noção absoluta de aceleração. Ainda assim, a relatividade geral incorpora alguns aspectos do ponto de vista de Mach e, dentro dos próximos anos, um experimento orçado em mais de 500 milhões de dólares e que está em desenvolvimento há quase quarenta anos testará um dos aspectos mais proeminentes da formulação de Mach.

A física a ser estudada é conhecida desde 1918, quando os pesquisadores austríacos Joseph Lense e Hans Thirring empregaram a relatividade geral para mostrar que, assim como um objeto de grande massa faz curvar-se o espaço e o tempo — como uma bola de boliche em uma cama elástica —, também um objeto em rotação arrasta o espaço (e o tempo) à sua volta, como uma pedra que gira dentro de um pote de melado. Isso é conhecido como *arraste de referenciais* e implica, por exemplo, que um asteroide em queda livre rumo a uma estrela de nêutrons ou a um buraco negro ver-se-á dominado por um remoinho do espaço em rotação e, como em uma batedeira de bolo, será tragado à medida que avança em sua viagem. O efeito recebe esse nome porque, do ponto de vista do asteroide — a partir do seu esquema de referência —, ele não está sendo arrastado em círculos. Ao contrário, da sua perspectiva ele cai diretamente rumo ao centro de gravidade, seguindo as linhas da estrutura espacial; no entanto, como o próprio espaço está girando (conforme a figura 14.1), essa estrutura fica distorcida, e o conceito de “cair diretamente” difere do que deveríamos esperar com base em uma perspectiva distante que não sofra a influência do remoinho do espaço.

Para ver a conexão com Mach, pense em uma versão de arraste de referenciais em que o objeto de grande massa em rotação é uma esfera enorme e oca. Os cálculos iniciais, feitos a partir de 1912, por Einstein (antes mesmo que ele completasse a relatividade geral), foram significativamente ampliados em 1965 por Dieter Brill e Jeffrey Cohen e por fim completados em 1985 pelos físicos

alemães Herbert Pfister e K. Braun. Eles revelam que o espaço no interior da esfera oca seria arrastado pelo movimento rotacional e entraria em um remoinho.[1] Se um balde estacionário cheio de água — estacionário tal como visto de uma perspectiva distante — fosse colocado dentro dessa esfera em rotação, os cálculos mostram que o espaço em rotação exerceria uma força sobre a água estacionária, que a faria crescer contra a parede do balde e assumir a forma côncava.

Esse resultado teria deixado Mach extremamente feliz. Embora talvez não gostasse da descrição em termos de "espaço em rotação" — uma vez que essa descrição implica que o espaço é "algo" —, ele teria grande satisfação em ver que o movimento rotatório *relativo* entre a esfera e o balde provoca uma mudança na forma da água. Com efeito, se se tratasse de uma esfera oca que contivesse massa suficiente, comparável à que está contida em todo o universo, os cálculos revelam que não tem nenhuma importância se é a esfera que gira em volta do balde, ou se é o balde que gira dentro da esfera. Tal como argumentava Mach, a única coisa que importa é o movimento rotacional relativo entre ambos. E, como os cálculos a que me refiro empregam apenas a relatividade geral, este é um exemplo explícito de um aspecto claramente machiano incorporado à teoria de Einstein. (Contudo, a relatividade geral não concorda com o raciocínio machiano ortodoxo de que a água permaneceria plana se o balde girasse em um universo infinito e vazio. O que os resultados de Pfister e Braun mostram é que uma esfera em rotação com massa suficiente pode bloquear completamente a influência normal do espaço que está além da própria esfera.)

Em 1960, Leonard Schiff, da Universidade de Stanford, e George Pugh, do Departamento de Defesa do Governo dos EUA sugeriram, de forma independente, que a previsão do arraste de referenciais feita pela relatividade geral poderia ser testada experimentalmente usando-se o movimento rotacional da Terra. Schiff e Pugh perceberam que, de acordo com a física newtoniana, um giroscópio em rotação — uma roda que gira presa a um eixo — que flutuasse em uma órbita alta acima da superfície da Terra apontaria para uma direção fixa e imutável. Mas, de acordo com a relatividade geral, o eixo giraria, ainda que minimamente, por causa do arraste causado pela Terra sobre o espaço circundante. Como a massa da Terra é ínfima em comparação com a da esfera oca hipotética usada nos cálculos de Pfister e Braun, o grau de arraste de referenciais causado pela rotação da Terra é mínimo. Os cálculos específicos mostraram que, se o eixo de rotação do giroscópio fosse inicialmente dirigido a uma estrela escolhida como referência, um ano mais tarde, o pequeno remoinho do espaço teria deslocado a direção do eixo em cerca de um centésimo de milésimo de grau. Esse é o ângulo que o ponteiro dos segundos de um relógio

percorre em cerca de dois milésimos de segundo, de modo que a sua detecção representa um desafio científico, tecnológico e de engenharia de bom tamanho.
Depois de outros quarenta anos de desenvolvimentos e de quase cem teses de doutorado, uma equipe de Stanford, chefiada por Francis Everitt e financiada pela Nasa, está pronta para iniciar o experimento. Nos próximos anos, o satélite *Gravity Probe B* (Sonda Gravitacional B), flutuando a mais de seiscentos quilômetros de distância no espaço e dotado de quatro dos giroscópios mais estáveis que já foram construídos, tentará medir o arraste de referenciais causado pela rotação da Terra. Se o experimento tiver êxito, teremos uma das confirmações mais precisas da relatividade geral jamais feitas, e a primeira demonstração convincente de um efeito machiano.[2] Igualmente fascinante é a possibilidade de que os experimentos detectem um desvio com relação ao que prevê a relatividade geral. Uma pequena rachadura nos alicerces da relatividade geral, como essa, pode ser justamente o necessário para darmos uma olhada experimental em aspectos até aqui ocultos do espaço-tempo.

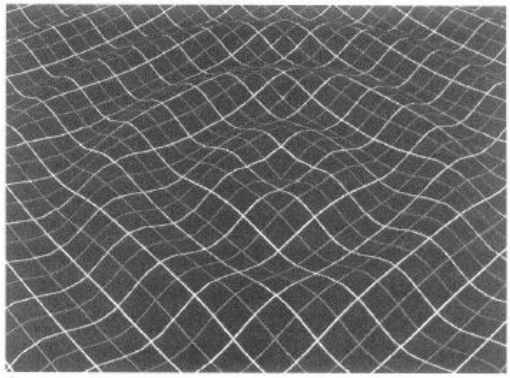


Figura 14.2. *As ondas gravitacionais são rugas no tecido do espaço-tempo.*

PEGANDO A ONDA

Uma lição essencial da relatividade geral é a de que a massa e a energia causam a deformação do tecido do espaço-tempo. Isso é o que ilustramos na figura 3.10, quando mostramos o ambiente recurvado à volta do Sol. Uma das limitações de uma figura estática, no entanto, é que ela não é capaz de descrever como as curvas e deformações do espaço evoluem quando a massa e a energia se movem ou modificam de alguma outra forma a sua configuração.[3]



Figura 14.3. *A passagem de uma onda gravitacional estica um objeto em uma direção e depois na direção perpendicular. (Nesta imagem, a escala de distorção para uma onda gravitacional típica está enormemente exagerada.)*

A relatividade geral prevê que, assim como uma cama elástica assume uma forma deformada mas estável se você estiver parado sobre ela, porém se ergue e se abaixa se você pular, também o espaço pode assumir uma forma fixa e deformada se a matéria estiver perfeitamente estável, como se supõe na figura 3.10, mas pequenas ondas aparecem na sua estrutura quando a matéria se move para um lado ou para o outro. Einstein chegou a essa conclusão entre 1916e 1918, quando usou as então recém-elaboradas equações da relatividade geral para mostrar que — assim como as cargas elétricas que percorrem uma antena de transmissão produzem ondas eletromagnéticas (essa é a maneira pela qual o rádio e a televisão funcionam) — a matéria que corre de um lugar para outro (como na explosão de uma supernova) produz ondas gravitacionais. E como gravidade é curvatura, uma onda gravitacional é uma onda de curvatura. Da mesma forma que jogar uma pedra em uma lagoa gera ondas de água que se espalham, a matéria giratória gera ondas espaciais que também se espalham. De acordo com a relatividade geral, a explosão de uma supernova distante é como uma pedra cósmica jogada em uma lagoa do espaço-tempo, como ilustra a figura 14.2. A figura mostra uma característica distintiva importante das ondas gravitacionais: ao contrário das ondas eletromagnéticas, de som e de água — ondas que viajam *através* do espaço —, as ondas gravitacionais viajam *dentro* do espaço. Elas são distorções andantes da geometria do próprio espaço.

Embora as ondas gravitacionais sejam vistas hoje como uma previsão correta da relatividade geral, por muitos anos foram tema de controvérsias e de confusões, causadas, pelo menos em parte, por uma adesão demasiado rígida à filosofia machiana. Se a relatividade geral incorporasse por completo as ideias de Mach, a "geometria do espaço" seria simplesmente uma linguagem conveniente para expressar a posição e o movimento de um objeto dotado de massa com relação a outro. Segundo essa maneira de ver, o espaço vazio seria um conceito vazio. Como, então, poderíamos falar de um espaço vazio que se agita? Muitos físicos tentaram provar que essas supostas ondas no espaço eram apenas erros de interpretação da matemática da relatividade geral, mas, com o passar do tempo, as análises teóricas convergiram quanto à conclusão correta: as ondas gravitacionais são reais e o espaço *pode* ficar ondulado.

Com a passagem de cada crista e cada vale, a geometria distorcida de uma onda gravitacional esticaria o espaço — e tudo o que exista nele — em uma direção e em seguida comprimiria o espaço — e tudo o que exista nele — na direção perpendicular àquela, como retrata, com grande exagero, a figura 14.3. Em princípio, seria possível detectar a passagem de uma onda gravitacional medindo-se repetidamente as distâncias entre diversas localizações e verificando-se que as relações entre essas distâncias modificam-se de um momento para o outro.

Na prática, ninguém chegou a esse resultado e ninguém foi capaz de detectar diretamente uma onda gravitacional. (Existem, no entanto, provas indiretas convincentes sobre a sua existência.[4]) A dificuldade está em que a distorção provocada pela passagem de uma onda gravitacional é caracteristicamente diminuta. O teste da bomba atômica em Trinity, em 16 de julho de 1945, equivaleu à explosão de 20 mil toneladas de TNT e causou um brilho tão grande que as testemunhas a vários quilômetros de distância tiveram que usar proteção ocular para evitar as sérias consequências decorrentes das ondas eletromagnéticas por ela geradas. Mas mesmo que você estivesse no pé da torre de trinta metros em que a bomba foi colocada, as ondas gravitacionais produzidas pela explosão teriam esticado, ou comprimido, o seu corpo apenas o equivalente a uma fração minúscula do diâmetro de um átomo. Isso mostra como são comparativamente fracos os distúrbios gravitacionais e dá uma ideia do tamanho do desafio tecnológico envolvido na sua detecção. (Como uma onda gravitacional também pode ser vista como um número enorme de grávitons viajando de maneira coordenada — assim como uma onda eletromagnética é composta de um número enorme de fótons coordenados —, isso também dá uma ideia de como é difícil detectar um gráviton).

Não estamos particularmente interessados em detectar ondas gravitacionais produzidas por armas nucleares, mas a situação com relação às fontes astrofísicas não é muito diferente. Quanto mais próxima e mais pesada for a fonte astrofísica e quanto mais energético e violento for o movimento envolvido, mais fortes serão as ondas gravitacionais que receberíamos. Mas mesmo que uma estrela a 10 mil anos-luz de distância se transformasse em supernova, a consequente passagem das suas ondas gravitacionais pela Terra esticaria uma vara de um metro em um milionésimo de bilionésimo de centímetro, o que corresponde a um centésimo do tamanho de um núcleo atômico. Assim, a menos que algum evento astrofísico totalmente surpreendente de proporções verdadeiramente cataclísmicas venha a ocorrer nas nossas proximidades, a detecção de uma onda gravitacional requererá instrumentos capazes de reagir a modificações de tamanho fantasticamente pequeno.

Os cientistas que desenharam e construíram o Observatório de Ondas Gravitacionais com Interferômetro a Laser — Ligo (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), administrado pelo Caltech e pelo MITe financiado pela National Science Foundation — têm se mostrado à altura do desafio. O Ligo é impressionante e a sensibilidade dele esperada é assombrosa. É formado por dois tubos ocos com quatro quilômetros de comprimento e pouco mais de um metro de largura cada um, que se articulam para compor um L gigantesco. A luz de laser, emitida simultaneamente através de túneis de vácuo no interior de cada tubo e refletida por espelhos de alto polimento, é utilizada para medir o comprimento relativo de cada tubo com precisão fantástica. A ideia é a de que, se uma onda gravitacional passar pelo Ligo, um tubo se esticará com relação ao outro, e se essa diferença tiver a amplitude suficiente, os cientistas poderão detectá-la.

Os tubos são longos porque o esticamento e a compressão provocados por uma onda gravitacional são cumulativos. Se uma onda gravitacional esticasse algo que tem quatro metros de comprimento, digamos, em 10^{20} metros, o esticamento será mil vezes maior, digamos de 10^{17} metros, se o objeto tiver quatro quilômetros de comprimento. Portanto, quanto maior for o comprimento monitorado, mais fácil será detectar uma modificação no comprimento. Para aumentar as suas chances, os cientistas do Ligo dirigem os raios laser para que eles percorram mais de cem vezes o caminho entre os espelhos situados nos extremos dos tubos em cada evento, o que aumenta o comprimento total sob monitoramento para cerca de oitocentos quilômetros para cada raio. Graças a esses recursos e proezas de engenharia, o Ligo deve ser capaz de detectar qualquer modificação no comprimento dos tubos que exceda um trilionésimo da espessura de um fio de cabelo humano — um centésimo de milionésimo do tamanho de um átomo.

E são dois esses instrumentos em forma de L. Um está em Livingston, Louisiana, e o outro, a uns 3 mil quilômetros de distância, em Hanford, Washington, ambos nos EUA**.** Se uma onda gravitacional procedente de alguma fonte astrofísica distante passar pela Terra, o efeito que ela exercerá sobre cada detector deverá ser idêntico, de modo que ambos os experimentos devem produzir o mesmo resultado. É importante comprovar essa consistência porque, apesar de todas as precauções que foram tomadas para proteger os detectores, as ocorrências da vida diária, como a passagem de um caminhão pesado, o impacto da queda de uma árvore e tantas outras coisas, poderiam produzir efeitos similares aos das ondas gravitacionais. O requisito da coincidência entre detectores que estão distantes um do outro serve para eliminar esses casos enganadores.

Os pesquisadores também calcularam cuidadosamente as frequências das ondas gravitacionais — o número de cristas e vales que devem passar pelo detector a cada segundo — que se pode esperar que a ocorrência de uma série de fenômenos astrofísicos venha a produzir, o que inclui explosões de supernovas, o movimento rotacional de estrelas de nêutrons não-esféricas e colisões entre buracos negros. Sem essas informações, os cientistas estariam buscando agulhas no palheiro. Com elas, podem enfocar os detectores em uma faixa de frequência bem definida. Curiosamente, os cálculos revelam que algumas frequências de ondas gravitacionais devem ficar na faixa de poucos mil ciclos por segundo. Se se tratasse de ondas de som, elas estariam bem na faixa de audibilidade humana. A união de duas estrelas de nêutrons soaria como o canto de um passarinho que fosse ficando cada vez mais agudo. A colisão de dois buracos negros pareceria o trinado de um pardal que de repente sofresse uma pancada no peito. Existe uma cacofonia digna de uma floresta tropical provocada pelas ondas gravitacionais que oscilam através do tecido do cosmo. Se tudo correr de acordo com os planos, o Ligo será o primeiro instrumento a detectá-las.[5]

O que torna tudo isso muito interessante é que as ondas gravitacionais maximizam a utilidade dos dois aspectos principais da gravidade: a sua debilidade e a sua ubiquidade. Entre todas as quatro forças, a gravidade é a que interage mais debilmente com a matéria. Isso implica que as ondas gravitacionais podem passar através de materiais que são opacos à luz, dando acesso a domínios astrofísicos anteriormente ocultos. Além disso, uma vez que tudo é sujeito à gravidade (enquanto, por exemplo, a força eletromagnética apenas afeta objetos que têm carga elétrica), tudo também tem a capacidade de gerar ondas gravitacionais e, portanto, de gerar uma assinatura observável. O Ligo representa, assim, um ponto de inflexão significativo na nossa maneira de examinar o cosmo.

Durante muito tempo, tudo o que podíamos fazer era levantar a vista e examinar o céu com os olhos nus. No século XVII, Hans Lippershey e Galileu Galilei modificaram essa situação. Com a ajuda do telescópio, uma visão muito mais ampla do cosmo ficou ao alcance da humanidade. Com o passar do tempo, percebemos que a luz visível representa apenas uma faixa estreita das ondas eletromagnéticas. No século XX, com a ajuda de telescópios de infravermelho, de raios X e de raios gama, o cosmo abriu-se novamente para nós, revelando maravilhas que eram invisíveis nos comprimentos de onda aos quais os nossos olhos são sensíveis. Agora, no século XXI, estamos abrindo os céus uma vez mais. Com o Ligo e os aperfeiçoamentos subsequentes, (um deles é a Antena Espacial com Interferômetro a Laser [Lisa — Laser Interferometer Space Antenna], versão espacial do Ligo, formada por diversas naves espaciais separadas por milhões de quilômetros, que desempenharão o papel dos tubos de quatro quilômetros do Ligo. Há também outros detectores que desempenham um papel crucial

na busca de ondas gravitacionais, inclusive o detector anglo-germânico GEO600, O detector franco-italiano Virgo e o detector japonês Tama300) veremos o cosmo de uma maneira totalmente nova. Em vez das ondas eletromagnéticas, utilizaremos ondas gravitacionais. Em vez da força eletromagnética, utilizaremos a força gravitacional.
Para apreciar o caráter revolucionário dessa nova tecnologia, imagine um mundo em que cientistas extraterrestres estivessem, neste exato momento, descobrindo como detectar as ondas eletromagnéticas — a luz — e pense em como a sua visão do universo iria modificar-se profundamente e em prazo tão curto. Estamos a ponto de detectar pela primeira vez as ondas gravitacionais e podemos estar, portanto, em uma posição similar. Passamos milhares de anos simplesmente olhando para o céu. Agora é como se pela primeira vez na história humana pudéssemos escutá-lo.

A BUSCA DAS DIMENSÕES ADICIONAIS

Até 1996, a maior parte dos modelos teóricos que incorporavam dimensões adicionais supunha que a sua extensão espacial fosse da ordem da distância de Planck (10^{-33} centímetros). Como essa ordem de grandeza é dezessete casas decimais menor do que qualquer coisa ao alcance da nossa capacidade de resolução atual, sem a descoberta de uma tecnologia nova e miraculosa, a física planckiana permanecerá fora do nosso alcance. Mas se as dimensões adicionais forem “grandes”, com mais do que um bilionésimo de bilionésimo (10^{-18}) de centímetro, o que equivale a um centésimo de milésimo do tamanho de um núcleo atômico, a esperança está viva.
Como vimos no capítulo 13, se alguma das dimensões adicionais for “muito grande” — algo em torno de algumas ordens de grandeza de um milímetro —, medições precisas da intensidade da gravidade devem revelar a sua existência. Tais experimentos estão em desenvolvimento já há alguns anos e as suas técnicas estão evoluindo rapidamente. Até agora não foram encontrados desvios com relação à lei do inverso do quadrado da distância que caracteriza o espaço tridimensional. Por isso os pesquisadores buscam atuar em distâncias menores. O menos que se pode dizer é que um sinal positivo nesse sentido abalaria os alicerces da física, pois representaria uma comprovação convincente da existência de dimensões adicionais acessíveis apenas à gravidade. E isso daria um forte apoio circunstancial ao cenário do mundo-brana da teoria das cordas/teoria-M.
Se as dimensões adicionais forem grandes, mas não muito, os experimentos de medições precisas da gravidade provavelmente não serão capazes de detectá-las. Porém outros enfoques indiretos permanecem disponíveis. Já mencionamos, por

exemplo, que as dimensões adicionais grandes implicariam que a intensidade intrínseca da gravidade seria maior do que se pensava. A debilidade que observamos na gravidade seria atribuída ao fato de ela se distribuir pelas dimensões adicionais, e não a uma fraqueza intrínseca. Em pequenas escalas de distância, antes que essa distribuição tenha lugar, a gravidade seria intensa. Entre outras implicações, isso significa que a criação de pequenos buracos negros requereria muito menos massa e energia do que o que seria necessário em um universo em que a gravidade fosse intrinsecamente muito mais fraca. No capítulo 13, discutimos a possibilidade de que esses buracos negros microscópicos possam ser produzidos por meio de colisões a altas energias entre prótons no Grande Colisor de Hadrons, o acelerador de partículas que está sendo construído em Genebra, na Suíça, e que deverá estar concluído em 2007. As perspectivas aqui são amplas. Mas há uma outra possibilidade tentadora, levantada por Alfred Shapere, da Universidade de Kentucky, e Jonathan Feng, da Universidade da Califórnia em Irvine. Esses pesquisadores notaram que os raios cósmicos — partículas elementares que correm pelo espaço e bombardeiam continuamente a nossa atmosfera — também poderiam dar início à produção de buracos negros microscópicos.

As partículas de raios cósmicos foram descobertas em 1912 pelo cientista austríaco Victor Hess. Mais de nove décadas depois, elas ainda apresentam aspectos misteriosos. A cada segundo, os raios cósmicos golpeiam a nossa atmosfera e produzem uma cascata de bilhões de partículas que caem como chuva e passam por dentro dos nossos corpos. Algumas delas são detectadas por diversos instrumentos que exercem essa função em muitos lugares diferentes do mundo. Mas ninguém sabe com certeza plena que tipos de partícula constituem os raios cósmicos (embora se esteja formando um consenso de que são prótons), e apesar de, segundo se crê, algumas dessas partículas altamente energizadas serem provenientes de explosões de supernovas, ninguém tem ao menos uma ideia a respeito da origem das partículas de raios cósmicos de energia máxima. Em 15 de outubro de 1991, por exemplo, o detector de raios cósmicos Fly’s Eye (Olho de Mosca), no deserto de Utah, nosEUA**,** detectou uma partícula que cruzava os céus com uma energia equivalente à massa de 30 bilhões de prótons. Trata-se de uma partícula subatômica com um nível de energia quase igual à de um chute de Roberto Carlos, 100 milhões de vezes maior do que a quantidade de energia das partículas que o Grande Colisor de Hadrons produzirá.[6] O aspecto intrigante é que não conhecemos nenhum processo astrofísico que possa produzir partículas com essa quantidade de energia. Os pesquisadores estão reunindo dados adicionais em detectores mais sensíveis na esperança de resolver o mistério.

Para Shapere e Feng, a origem das partículas de raios cósmicos superenergéticas tinha importância secundária. Eles perceberam que, independentemente da procedência dessas partículas, se a gravidade for muito mais forte do que se supunha nas escalas microscópicas, as partículas de raios cósmicos de energia máxima poderiam ter o impulso necessário para criar buracos negros mínimos ao chocar-se violentamente com a nossa atmosfera superior.

Tal como no caso de serem produzidos nos aceleradores de partículas, esses buracos negros mínimos não representariam nenhum perigo para os cientistas ou para o mundo como um todo. Após a sua criação, eles se desintegrariam rapidamente, emitindo uma cascata de partículas mais corriqueiras. Com efeito, os buracos negros microscópicos teriam uma vida tão curta que os cientistas não os buscariam diretamente. Em vez disso, buscariam as provas da sua existência por meio de estudos detalhados dos efeitos que a chuva de partículas por eles produzida apresentaria nos detectores. O mais sensível dos detectores de raios cósmicos, o Observatório Pierre Auger — com uma área de observação do tamanho do estado de Rhode Island — está em construção no Oeste da Argentina. Shapere e Feng estimam que, se o tamanho de todas as dimensões adicionais for pelo menos igual a 10^{-14} metros, o detector Auger, após um ano recolhendo dados, verá os traços característicos das partículas produzidas por cerca de uma dúzia de buracos negros mínimos gerados na atmosfera superior. Se essas assinaturas dos buracos negros não forem encontradas, o experimento concluirá que as dimensões adicionais são menores. Encontrar os remanescentes de buracos negros produzidos por colisões de raios cósmicos certamente não é fácil, mas um êxito aqui abriria a primeira janela experimental para as dimensões adicionais, os buracos negros, a teoria das cordas e a gravidade quântica.

Além da produção de buracos negros, há outra maneira, baseada nos aceleradores, para que os pesquisadores possam continuar a buscar as dimensões adicionais na próxima década. A ideia é uma variação sofisticada da explicação do “bolso furado” para a desaparecimento das moedas que você pensava estar carregando.

A conservação da energia é um princípio fundamental da física. A energia pode manifestar-se de múltiplas formas — a energia cinética do movimento de uma bola chutada por um jogador de futebol, a energia potencial gravitacional, que afeta o movimento da bola em sua trajetória ascendente, a energia de som e de calor, quando a bola volta a chocar-se com o solo e excita todo tipo de movimento vibratório, a energia da massa, presa dentro da própria bola, e assim por diante —, mas quando todos os portadores de energia são levados em conta, o valor final é sempre igual ao inicial.[7] Até hoje, nenhum experimento contradisse essa lei sobre o equilíbrio perfeito da energia.

No entanto, dependendo do tamanho exato das hipotéticas dimensões adicionais, os experimentos de alta energia que serão conduzidos nas novas instalações do Fermilab e do Grande Colisor de Hadrons podem revelar processos que parecem violar a conservação da energia: a energia final de uma colisão pode ser menor do que a inicial. A razão está em que, assim como quando você perde moedas dentro do bolso, a energia (conduzida pelos grávitons) pode perder-se nas fendas — o pequeno espaço adicional — ocasionadas pelas dimensões adicionais, não aparecendo, assim, no computo final da energia. A possibilidade desse "sinal de déficit de energia[5] é uma outra maneira de vermos que o tecido do cosmo tem complexidades que vão muito além do que se pode ver diretamente.

Sem dúvida, quando falamos das dimensões adicionais, não sou imparcial. Estou trabalhando nesse assunto há mais de quinze anos e ele tem um lugar especial no meu coração. Mas, tendo feito essa admissão, posso dizer que é para mim muito difícil imaginar uma descoberta que possa ser mais fascinante do que comprovar a existência de outras dimensões espaciais, além das que nos são familiares. Para mim, não há nenhuma outra proposição séria cuja confirmação possa abalar tão profundamente as bases de física e demonstrar tão cabalmente que temos de continuar a questionar elementos básicos e aparentemente inquestionáveis da realidade.

A PARTÍCULA DE HIGGS, A SUPERSIMETRIA E A TEORIA DAS CORDAS

Além dos desafios científicos inerentes à busca do desconhecido e da possibilidade de encontrarmos provas da existência de dimensões adicionais, há duas motivações específicas para os recentes aperfeiçoamentos no acelerador do Fermilab e para a construção do Grande Colisor de Hadrons. Uma delas é encontrar as partículas de Higgs. Como vimos no capítulo 9, as fugidias partículas de Higgs seriam os componentes mínimos do campo de Higgs — campo hipotético que forma o oceano de Higgs e confere massa aos demais tipos de partículas fundamentais. Os estudos teóricos e experimentais atualmente em curso sugerem que a partícula de Higgs deve ter uma massa na faixa de cem a mil vezes maior do que a do próton. Se a massa real estiver próxima ao limite menor, o Fermilab terá uma chance bastante razoável de descobrir uma partícula de Higgs no futuro próximo. E, com certeza, se o Fermilab não tiver êxito e se a massa estimada estiver realmente no limite inferior da faixa, o Grande Colisor de Hadrons deverá produzir grandes quantidades de partículas de Higgs até o final da década. A detecção dessas partículas seria um marco importante, pois confirmaria a existência de um tipo de campo que os teóricos da física das

partículas e os cosmólogos têm arguido há décadas, sem obter ainda nenhuma comprovação experimental.

Outro dos objetivos principais do Fermilab e do Grande Colisor de Hadrons é o de detectar provas da supersimetria. Lembre-se do capítulo 12, quando vimos que a supersimetria emparelha partículas cujos *spins* diferem em meia unidade e é uma ideia que surgiu originalmente dos estudos da teoria das cordas no início da década de 1970. Se a supersimetria for relevante para o mundo real, decorre que para cada tipo conhecido de partícula com *spin* fracionário em meia unidade deve haver um parceiro com *spin* expresso em número inteiro. E para cada tipo conhecido de partícula com *spin* de número inteiro, deve haver um parceiro com *spin* fracionário em meia unidade. Por exemplo, ao elétron, que tem *spin* fracionário, deve corresponder um tipo de partícula com *spin* inteiro, denominado elétron supersimétrico, ou, abreviadamente, selétron; aos quarks, de *spin* fracionário, devem corresponder quarks supersimétricos, ou squarks; ao neutrino, de *spin* também fracionário, deve corresponder o sneutrino, de *spin* inteiro; e aos glúons, fótons e partículas W e Z, de *spins* inteiros, devem corresponder também os gluínos, fotinos, winos e zinos, de *spins* fracionários. (É verdade. Os físicos às vezes exageram um pouco).

Essas partículas supostamente simétricas nunca foram encontradas, e a explicação para isso, que os físicos enunciam com os dedos cruzados, é que as partículas supersimétricas são substancialmente mais pesadas do que os seus parceiros conhecidos. Considerações teóricas sugerem que as partículas supersimétricas podem ser mil vezes mais pesadas do que o próton e, nesse caso, o fato de que elas nunca aparecem nos dados experimentais não teria nada de misterioso: os aceleradores de partículas existentes não têm energia suficiente para produzi-las. Na próxima década isso vai mudar. O novo acelerador aperfeiçoado do Fermilab já tem uma chance de encontrar algumas partículas supersimétricas. E, como no caso da partícula de Higgs, se o Fermilab não lograr detectar a supersimetria e se a nossa estimativa para a faixa da massa das partículas supersimétricas estiver dentro de limites razoáveis, o Grande Colisor de Hadrons deve produzi-las com facilidade.

A confirmação da supersimetria seria o desenvolvimento mais importante da física de partículas elementares nos últimos vinte anos, determinaria o passo seguinte dos nossos conhecimentos, avançando com relação ao tão bem-sucedido modelo-padrão da física de partículas, e proporcionaria provas circunstanciais de que a teoria das cordas está no caminho certo. Note, porém, que isso não seria uma comprovação da própria teoria das cordas. Ainda que a supersimetria tenha sido descoberta no processo de desenvolvimento da teoria

das cordas, os físicos já perceberam há algum tempo que a supersimetria é um princípio mais geral, que pode ser facilmente incorporado aos enfoques tradicionais das partículas pontuais. A confirmação da supersimetria consagraria um elemento vital do esquema das cordas e daria orientação a muitas pesquisas subsequentes, mas não constituiria a confirmação da teoria das cordas.

Por outro lado, se for correto o cenário do mundo-brana, os próximos experimentos com aceleradores efetivamente têm o potencial para confirmar a teoria das cordas. Como mencionamos brevemente no capítulo 13, se as dimensões adicionais, no cenário do mundo-brana, chegarem ao tamanho de 10^{-16} centímetros, não só a gravidade seria intrinsecamente mais intensa do que antes se supunha, mas também as cordas seriam significativamente mais longas. Como as cordas mais longas são menos rígidas, requerem menos energia para vibrar. Ao passo que no esquema convencional das cordas os padrões vibratórios teriam energias mais de 1 milhão de bilhões de vezes maiores do que o limite da nossa capacidade experimental atual, no cenário do mundo-brana as energias dos padrões vibratórios das cordas poderiam ser de apenas mil vezes a massa do próton. Se for esse o caso, as colisões a altas energias no Grande Colisor de Hadrons serão como uma bola de golfe que, após um longo voo, cai e ricocheteia sobre as cordas de metal no interior de um piano aberto: as colisões terão energia suficiente para excitar muitas "oitavas" de padrões vibratórios das cordas. Os pesquisadores detectariam uma grande quantidade de partículas novas e nunca antes vistas — ou seja, padrões vibratórios novos e nunca antes vistos —, cujas energias corresponderiam às ressonâncias harmônicas da teoria das cordas.

As propriedades dessas partículas e as relações entre elas revelariam com segurança que todas são parte da mesma partitura cósmica: notas diferentes, mas relacionadas umas às outras; padrões vibratórios diferentes de um único tipo de objeto — uma corda. No futuro previsível, esse é o cenário mais provável de confirmação da teoria das cordas.

Como vimos em capítulos anteriores, a radiação cósmica de fundo em micro-ondas teve um papel proeminente nas pesquisas cosmológicas desde a sua descoberta em meados da década de 1960. A razão é clara: nos estágios iniciais do universo, o espaço estava permeado por um banho de partículas eletricamente carregadas — elétrons e prótons — que, por meio da força eletromagnética, atiravam os fótons incessantemente para todos os lados. Mas 300 mil breves anos depois do Big-Bang, o universo resfriou-se o suficiente para permitir a combinação de elétrons e prótons em átomos eletricamente neutros — e a partir desse momento, a radiação pôde viajar através do espaço sem maiores perturbações, propiciando, assim, uma fotografia precisa do universo primordial. Existem cerca de 400 milhões desses fótons da radiação cósmica original

circulando por cada metro cúbico do espaço, como verdadeiras relíquias do universo primitivo.

As medições iniciais da radiação cósmica de fundo em micro-ondas revelaram que a sua temperatura era notavelmente uniforme, mas, como vimos no capítulo 11, os exames mais detalhados, feitos a partir de 1992, pelo Cosmic Background Explorer (Cobe) (Explorador do Fundo Cósmico) e por diversas outras iniciativas posteriores de observações mais sofisticadas, encontraram sinais de pequenas variações de temperatura, ilustradas na figura 14.4a. Os dados aparecem em tons da cor cinza, e as partes claras e as escuras mostram variações de alguns décimos milésimos de grau. O aspecto da figura apresenta uma irregularidade, diminuta mas inegável, na distribuição da temperatura da radiação através do espaço.

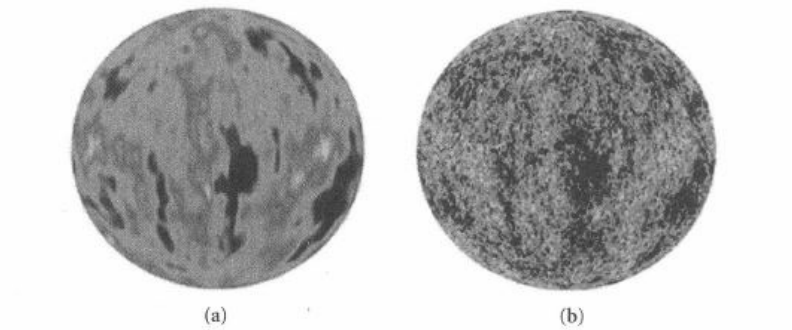


Figura 14.4. (*a*) *Dados relativos à radiação cósmica de fundo em microondas coletados pelo satélite Cobe. A radiação está viajando pelo espaço sem perturbações desde cerca de 300 mil anos depois do Big-Bang, de modo que esta ilustração retrata as pequeníssimas variações de temperatura presentes no universo cerca de 14 bilhões de anos atrás.* (*b*) *Dados mais detalhados coletados pelo satélite WMAP.*

O experimento Cobe, além de ser uma importante descoberta, marcou uma mudança fundamental no caráter da pesquisa cosmológica. Antes dele, os dados cosmológicos eram toscos. Por outro lado, uma teoria cosmológica era considerada viável se se revelasse compatível com os aspectos gerais das observações astronômicas. Os teóricos podiam propor os mais diversos esquemas dando apenas um mínimo de consideração para a satisfação de requisitos observacionais. Simplesmente não havia muitos requisitos observacionais, e os que existiam não eram particularmente precisos. Mas o Cobe deu início a uma nova era em que os padrões tornaram-se consideravelmente mais estritos. Hoje já há um conjunto de dados precisos com os quais qualquer teoria tem de se mostrar compatível, inclusive para que possa ser levada em conta. Em 2001, foi lançado o satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) (Sonda Wilkinson de Anisotropia em Micro-ondas), empreendimento conjunto da Nasa e da Universidade de Princeton, para medir a radiação cósmica de fundo em micro-ondas com resolução e sensibilidade cerca

de quarenta vezes maiores do que as do Cobe. Comparando-se os resultados iniciais do WMAP— figura 14.4b — com os do Cobe — figura 14.4a —, pode-se ver imediatamente como a definição da imagem do WMAP é mais precisa e detalhada. Outro satélite, o Planck, que está sendo desenvolvido pela Agência Espacial Européia, tem o lançamento planejado para 2007 e, se tudo correr bem, alcançará uma resolução dez vezes melhor do que a do WMAP.

O fluxo de dados precisos provocou uma seleção no campo das proposições cosmológicas, no qual o modelo inflacionário é, de longe, o concorrente principal. Mas, como mencionamos no capítulo 10, a cosmologia inflacionária não é uma teoria única. Os teóricos propuseram muitas versões diferentes (inflação velha, inflação nova, inflação quente, inflação híbrida, hiperinflação, inflação assistida, inflação eterna, inflação estendida, inflação caótica, inflação dupla, inflação de escala fraca, inflação hipernatural, para mencionar apenas algumas), cada uma das quais tem como marca o breve surto de expansão rápida, mas apresenta diferenças nos detalhes (quanto ao número de campos e quanto às formas que pode tomar a sua energia potencial, quanto aos campos que ficam presos em superfícies mais altas, e assim por diante). Essas diferenças dão lugar a previsões ligeiramente divergentes para as propriedades da radiação cósmica de fundo em micro-ondas (campos diferentes com energias diferentes têm flutuações quânticas ligeiramente diferentes). A comparação com os dados do WMAP e do Planck deverá eliminar muitas proposições e refinar, assim, a nossa compreensão.

Com efeito, os dados poderão selecionar o campo ainda mais. Embora as flutuações quânticas ampliadas pela expansão inflacionária constituam uma explicação muito convincente para as variações de temperatura que observamos, esse modelo tem um competidor. O modelo cosmológico cíclico de Steinhardt e Turok, descrito no capítulo 13, oferece uma possibilidade alternativa. À medida que as duas 3-branas do modelo cíclico aproximam-se vagarosamente uma da outra, as flutuações quânticas fazem com que seções diferentes aproximem-se em ritmos ligeiramente diferentes. Quando elas por fim se chocam, mais ou menos 1 trilhão de anos depois, diferentes localizações nas branas farão contato em momentos ligeiramente diferentes uns dos outros, como quando duas lixas grossas entram em contato. Os mínimos desvios com relação a um impacto perfeitamente uniforme produzem mínimos desvios com relação a uma evolução perfeitamente uniforme ao longo de cada brana. Como uma das duas branas é, supostamente, o nosso espaço tridimensional, deveríamos poder captar os desvios com relação à uniformidade. Steinhardt, Turok e seus colaboradores argumentaram que as inomogeneidades geram desvios de temperatura de forma igual à dos que derivam do esquema inflacionário. Portanto, com os dados de

hoje, o modelo cíclico oferece uma explicação igualmente viável para as observações.

Contudo, os dados mais sofisticados que estão sendo coletados nesta última década podem ser capazes de estabelecer uma distinção entre os dois enfoques. No esquema inflacionário, não só as flutuações quânticas do campo do inflaton são ampliadas pelo surto de expansão exponencial, mas também são geradas pequeníssimas dobras quânticas no tecido espacial, por causa do seu extremo esticamento. Como as dobras do espaço não são nada mais do que ondas gravitacionais (conforme nossa discussão anterior sobre o Ligo), o esquema inflacionário prevê que nos primeiros momentos do universo produziram-se ondas gravitacionais.[8] Muitas vezes elas são denominadas ondas gravitacionais primordiais, para que se diferenciem das que foram geradas mais recentemente por eventos astrofísicos violentos. No modelo cíclico, por outro lado, o desvio com relação à uniformidade perfeita forma-se pouco a pouco, durante o transcurso de um período de tempo quase insondável, visto como as branas levam 1 trilhão de anos para chegar ao choque seguinte. A ausência de uma mudança vigorosa e súbita na geometria das branas e na geometria do espaço significa que não se geram dobras espaciais e, portanto, que o modelo cíclico prevê também a ausência de ondas gravitacionais primordiais. Dessa maneira, se chegarmos a detectar ondas gravitacionais primordiais, estaremos diante de um novo triunfo do modelo inflacionário e o modelo cíclico estará definitivamente descartado.

Não é provável que o Ligo tenha a sensibilidade necessária para detectar as ondas gravitacionais previstas pela inflação, mas é possível que elas sejam observadas pelo Planck ou por outro experimento com satélite, denominado Cosmic Microwave Background Polarization (CMBPol) (Polarização Cósmica de Fundo em Micro-ondas), que está sendo planejado agora. O Planck, e o CMBPol em particular, não focalizarão apenas variações de temperatura na radiação cósmica de fundo em micro-ondas, pois medirão também a polarização, as direções médias dos *spins* dos fótons de micro-ondas detectados. Por meio de uma cadeia de raciocínios demasiado técnicos para que os descrevêssemos aqui, conclui-se que as ondas gravitacionais produzidas pelo Big-Bang deixariam uma marca clara na polarização da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, a qual talvez seja suficientemente grande para ser medida.

Assim, dentro de uma década poderemos ter uma percepção nítida sobre se o Big-Bang foi realmente um choque e se o universo de que temos consciência é realmente uma 3-brana. Na Idade de Ouro da cosmologia, algumas das ideias mais fantásticas podem chegar a ser efetivamente testadas.

MATÉRIA ESCURA, ENERGIA ESCURA E O FUTURO DO UNIVERSO

No capítulo 10 vimos os fortes indícios teóricos e observacionais que apontam para que apenas 5% da massa do universo derivam dos componentes encontrados na matéria comum — prótons e nêutrons (os elétrons representam menos de 0,5% da massa da matéria comum) —, enquanto 25% derivam da matéria escura e 70% da energia escura. Mas persiste uma incerteza significativa quanto à identidade específica desse material escuro. Uma hipótese natural é a de que a matéria escura também é composta por prótons e nêutrons que, de algum modo, não se aglomeraram para formar estrelas emissoras de luz. Porém uma outra consideração teórica torna remota essa possibilidade.

Por meio de observações detalhadas, os astrônomos conhecem com clareza as quantidades médias relativas dos elementos leves — hidrogênio, hélio, deutério e lítio — distribuídos pelo cosmo. Essas quantidades relativas concordam, com grande precisão, com os cálculos teóricos referentes aos processos que levaram, de acordo com o que sabemos, à sintetização desses núcleos durante os primeiros minutos do universo. Essa concordância é um dos grandes êxitos da cosmologia teórica moderna. Contudo, esses cálculos supõem que a massa da matéria escura *não* é formada por prótons e nêutrons. Se os prótons e nêutrons fossem os componentes dominantes nas escalas cósmicas, a receita teria de ser descartada e os cálculos produziriam resultados incompatíveis com as observações.

Que constitui, então, a matéria escura, se não são prótons e nêutrons? Até hoje ninguém sabe, mas não por falta de proposições. Os nomes dos candidatos cobrem uma vasta faixa, de axions a zinos, e quem descobrir a resposta certamente fará uma viagem a Estocolmo. O fato de que até agora ninguém foi capaz de detectar uma partícula de matéria escura é uma forte limitação que afeta todas as proposições. A razão reside em que a matéria escura não está situada apenas no espaço exterior. Ela se distribui por todo o universo e, assim, flutua também entre nós, aqui na Terra. De acordo com muitas das proposições, agora mesmo bilhões de partículas de matéria escura estão atravessando os nossos corpos a cada segundo e, nesse contexto, só seriam candidatos viáveis as partículas que podem passar através da matéria maciça sem deixar traços significativos.

Os neutrinos são uma possibilidade. Os cálculos estimam que haja cerca de 55 milhões de neutrinos por metro cúbico de espaço, desde que eles foram criados no Big-Bang, de modo que se qualquer dos três tipos de neutrino tiver uma massa igual a um centésimo de milionésimo (10^{-8}) da massa do próton, aí poderia estar a explicação da matéria escura. Embora experimentos recentes

tenham produzido fortes indícios de que os neutrinos têm massa, de acordo com os dados atuais eles seriam demasiado leves para constituir a matéria escura: a sua massa total seria mais de cem vezes inferior ao necessário.

Outra proposição promissora envolve partículas supersimétricas, especialmente o fotinho, o zino e o higgsino (parceiros do fóton, da partícula Z e da partícula de Higgs). Essas são as mais pertinentes entre as partículas supersimétricas: podem atravessar toda a Terra sem que o seu movimento sofra nenhum tipo de perturbação, motivo por que escapam facilmente da nossa detecção.[9] A partir dos cálculos feitos para estimar a quantidade dessas partículas que teria sido produzida no Big-Bang e sobrevivido até hoje, os físicos estimam que as suas massas teriam de ser da ordem de cem a mil vezes maiores do que a do próton para corresponder à matéria escura. Esse é um número intrigante, porque vários estudos de modelos de partículas supersimétricas, assim como da teoria das supercordas, chegaram a essa mesma faixa para as massas dessas partículas, sem nenhuma preocupação quanto à matéria escura e à cosmologia. Essa confluência seria totalmente inesperada e inexplicável, a não ser que a matéria escura fosse realmente composta por partículas supersimétricas. Assim, a busca das partículas supersimétricas nos aceleradores de partículas atuais e futuros pode ser vista também como parte da busca da composição da matéria escura.

Já há algum tempo vêm se desenvolvendo buscas mais diretas das partículas de matéria escura que atravessam a Terra, por meio de experimentos extremamente difíceis e desafiadores. Dentre o milhão de partículas de matéria escura que devem passar a cada segundo por uma área correspondente ao tamanho de uma moeda, no máximo uma por dia deixaria traços nos equipamentos construídos pelos pesquisadores especialmente para detectá-las. Até o momento, não se obteve nenhuma confirmação de detecção de partículas de matéria escura.[10] Como o estímulo ainda está bem vivo, os pesquisadores continuam a trabalhar com grande intensidade. É bem possível que nos próximos anos a identidade da matéria escura esteja esclarecida.

A confirmação definitiva da existência da matéria escura e a determinação direta da sua composição seriam um avanço de grande importância. Pela primeira vez na história teríamos descoberto algo que é absolutamente fundamental e surpreendentemente fugidio: a composição da vasta maioria do conteúdo material do universo.

De todo modo, como vimos no capítulo 10, os dados mais recentes sugerem fortemente que, mesmo com a identificação da matéria escura, persistiria ainda a necessidade de verificação experimental para uma parte significativa da trama: as observações das supernovas que nos informam a respeito de uma constante cosmológica centrífuga que representa 70% da energia total do universo. Por ser

a descoberta mais impressionante e inesperada da última década, a existência de uma constante cosmológica — uma energia que permeia o espaço — requer uma confirmação vigorosa e a toda prova. Diversas hipóteses já foram levantadas, e algumas já estão em execução.

Os experimentos sobre a radiação cósmica de fundo em micro-ondas desempenham um papel importante também aqui. O tamanho das manchas da figura 14.4 — em que, novamente, cada mancha é uma região com temperatura uniforme — reflete a forma global do tecido espacial. Se o espaço tivesse a forma de uma esfera, como na figura 8.6a, a expansão global faria com que as manchas fossem um pouco maiores do que na figura 14.4b. Se o espaço tivesse a forma de uma sela, como na figura 8.6c, o encolhimento global faria com que as manchas fossem um pouco menores. E se o espaço fosse plano, como na figura 8.6b, o tamanho das manchas teria um valor intermediário. As medições precisas iniciadas pelo Cobe e aprimoradas pelo WMAP dão vigoroso apoio à proposição de que o espaço é plano. Isso não só condiz com as expectativas teóricas ocasionadas pelos modelos inflacionários, mas também harmoniza-se perfeitamente com os resultados das supernovas. Como vimos, um universo espacialmente plano requer que a densidade de matéria/energia total seja igual à densidade crítica. Com uma contribuição de 30% por parte da matéria comum e da matéria escura e uma contribuição de 70% por parte da energia escura, tudo se casa de maneira impressionante.

Uma confirmação mais direta dos resultados das supernovas é o objetivo da SuperNova/Acceleration Probe (SNAP) (Sonda de aceleração/SuperNova). Proposta por cientistas do Laboratório Lawrence Berkeley, a SNAP seria um telescópio orbital a bordo de um satélite, com a capacidade de observar e medir um número vinte vezes maior de supernovas com relação às que foram estudadas até aqui. A SNAP teria a capacidade de confirmar o dado anterior, de que 70% do universo é composto por energia escura, e também de determinar com maior precisão a natureza da energia escura.

Observe que, embora eu tenha descrito a energia escura como uma versão da constante cosmológica de Einstein — uma energia constante e imutável que leva o espaço a expandir-se —, existe uma possibilidade alternativa intimamente correlata. Lembre-se de que na discussão sobre a cosmologia inflacionária (e a rã que salta) vimos que um campo cujo valor fique preso acima da configuração de energia mínima pode atuar como uma constante cosmológica, impulsionando uma expansão acelerada do espaço, mas só pode fazê-lo, caracteristicamente, por um breve tempo. Mais cedo ou mais tarde, o campo encontrará o caminho que leva ao fundo da sua bacia de energia potencial e o impulso expansivo desaparecerá. Na cosmologia inflacionária, isso acontece em uma fração mínima

de segundo. Mas ao introduzir um novo campo e ao escolher cuidadosamente a forma da sua energia potencial, os físicos encontraram maneiras segundo as quais a expansão acelerada seria muito mais suave em seu impulso e também muito mais duradoura — de modo que o campo tenha uma fase comparativamente vagarosa e firme de aceleração da expansão espacial, que dure não apenas uma fração de segundo, mas sim bilhões de anos, enquanto o campo desliza lentamente para o valor mínimo de energia. Isso traz a possibilidade de que agora mesmo estejamos vivendo uma versão extremamente suave do surto inflacionário que se acredita tenha ocorrido durante os primeiros momentos do universo.

A diferença entre uma verdadeira constante cosmológica e essa última possibilidade, conhecida como quintessência, tem hoje importância mínima, mas exerceria um efeito profundo no futuro de longo prazo do universo. Uma constante cosmológica é constante — proporciona uma expansão acelerada sem fim, de modo que o universo se expandirá cada vez mais rapidamente e se tornará cada vez mais distribuído, diluído e estéril. A quintessência, por outro lado, proporciona uma expansão acelerada que em algum momento chega ao fim, o que sugere um futuro remoto menos desolado do que o que decorreria de uma expansão acelerada eterna. Ao medir mudanças na aceleração do espaço durante longos períodos de tempo (por meio de observações de supernovas a diferentes distâncias e, portanto, em várias épocas do passado), a SNAP poderá distinguir entre as duas possibilidades. Ao determinar se a energia escura é realmente uma constante cosmológica, a SNAP nos permitirá formar uma percepção do destino do universo a longo prazo.

ESPAÇO, TEMPO E ESPECULAÇÃO

A viagem em busca da descoberta da natureza do espaço e do tempo tem sido longa e cheia de surpresas. Sem dúvida, ela está apenas começando. Durante os últimos séculos, testemunhamos mudanças radicais que, uma após a outra, transformaram as nossas concepções a respeito do espaço e do tempo e voltaram a transformá-las sucessivamente. As proposições teóricas e experimentais que cobrimos neste livro representam a elaboração dessas ideias pela nossa geração e provavelmente constituirão uma parte importante do nosso legado científico. No capítulo 16, discutiremos alguns dos progressos mais recentes e especulativos com o objetivo de antecipar os próximos passos da viagem. Mas antes, no capítulo 15, especularemos em uma direção diferente.

Embora não exista um padrão estabelecido para as descobertas científicas, a história nos mostra que a profundidade do conhecimento é, muitas vezes, o

primeiro passo rumo ao controle da tecnologia. O conhecimento da força eletromagnética no século XIX acabou por levar ao telégrafo, ao rádio e à televisão. Com esse conhecimento e com o domínio posterior da mecânica quântica, pudemos desenvolver computadores, lasers e aparelhos eletrônicos cujo número é demasiado grande para que os mencionemos aqui. O conhecimento das forças nucleares levou à perigosa construção das armas mais poderosas jamais vistas no mundo, assim como ao desenvolvimento de tecnologias que um dia poderão satisfazer as nossas necessidades energéticas a partir apenas da água salgada. Será que o nosso conhecimento cada vez mais profundo do espaço e do tempo corresponderá a um padrão similar de novas descobertas e desenvolvimentos tecnológicos? Será que um dia seremos os senhores do espaço e do tempo e faremos coisas que hoje só acontecem no repertório da ficção científica?

Ninguém sabe. Mas vejamos até onde já chegamos e o que nos falta para atingir esse objetivo.

15. Teleportadores e máquinas do tempo

Viagem através do espaço e do tempo

Talvez tenha me faltado imaginação, lá pela década de 1960, mas o que realmente me surpreendeu foi o computador de bordo do *Enterprise*. A minha visão de mundo de aluno de escola primária permitia uma licença poética para coisas como viagens no tempo e um universo povoado por extraterrestres fluentes em inglês. Mas era incrível haver uma máquina que podia, ao apertar de um botão, exibir imediatamente um retrato de qualquer figura histórica, dar as especificações técnicas de qualquer equipamento ou dar acesso a qualquer livro. *Aquilo* atingiu fortemente a minha capacidade de combater a descrença. No final da década de 1960, este pré-adolescente estava certo de que não seria possível nunca reunir, armazenar e divulgar tal riqueza de informações. No entanto, menos de cinquenta anos depois, posso sentar-me aqui, na cozinha, com o meu laptop, com conexão sem fio para a internet e com um programa que reconhece a minha voz, e brincar de Kirk, passeando por uma vasta loja de conhecimentos — do mais importante ao mais pueril — sem sequer levantar um dedo. É verdade que a velocidade e a eficiência dos computadores do século XXIII**,** que aparecem em *Jornada nas estrelas*, ainda é de fazer inveja, mas é fácil imaginar que, quando aquele tempo chegar, a nossa tecnologia tenha superado as expectativas.

Este é apenas um dos múltiplos exemplos que transformaram a capacidade da ficção científica de antecipar o futuro em um simples clichê. Mas que dizer do mais tentador de todos os instrumentos — aquele em que alguém entra em uma câmara, aciona um controle e é transportado para lugares e tempos diferentes? Será possível que um dia nos liberaremos da pequenez da extensão espacial e temporal a que estamos confinados e poderemos explorar todos os rincões do espaço e do tempo? Ou será que essa distinção entre a ficção científica e a realidade permanecerá para sempre bem definida? Já tendo vivenciado a minha incapacidade infantil de prever a revolução da informação, seria fácil duvidar também da minha possibilidade de antever os outros avanços tecnológicos futuros. Assim, em vez de especular sobre a probabilidade do que pode vir a acontecer, descreverei neste capítulo o estado em que nos encontramos, tanto na teoria quanto na prática, na aventura de tornar reais os teleportadores e as

máquinas do tempo, e o que ainda nos falta para continuar avançando e chegar a dominar o espaço e o tempo.

TELEPORTAÇÃO EM UM MUNDO QUÂNTICO

Nas representações convencionais da ficção científica, um teleportador (ou, como em *Jornada nas estrelas*, um "transportador" — *transporter*) analisa um objeto, para determinar exatamente a sua composição, e envia essa informação a um local distante, onde o objeto é reconstituído. Dependendo da concepção específica de cada autor, os átomos e as moléculas do objeto podem ser enviados junto com os planos de reconstituição ou podem ser substituídos por átomos e moléculas localizados no local de recebimento para a construção de uma réplica perfeita. Como veremos, o enfoque científico dado à teleportação, que se desenvolveu na última década, está mais próximo, em espírito, desta última categoria, e isso levanta duas questões essenciais. A primeira é um enigma filosófico conhecido mas espinhoso: em que condições uma réplica exata deve ser identificada, denominada, considerada ou tratada como se fosse o original? A segunda é a questão de saber se é realmente possível, ainda que apenas em princípio, examinar um objeto e determinar a sua composição com precisão absoluta, de modo a que se possa estabelecer um projeto perfeito com base no qual a sua reconstituição seja realizável.

Em um universo comandado pelas leis da física clássica, a resposta à segunda questão seria positiva. Em princípio, os atributos de cada partícula que compõe um objeto — identidade, posição, velocidade etc. — podem ser medidos com precisão total, transmitidos a um local distante e utilizados como manual de instrução para a recriação do objeto. Realizar essa empreitada com relação a qualquer objeto que tenha mais do que algumas partículas elementares está visivelmente fora do nosso alcance, mas, em um universo clássico, o obstáculo seria a complexidade do empreendimento, e não a sua possibilidade física.

Em um universo comandado pelas leis da física quântica, ou seja, o nosso, a situação é bem mais complexa. Sabemos que o ato de medir obriga um entre miríades de atributos potenciais de um objeto a sair da névoa quântica e tomar um valor definido. Quando observamos uma partícula, por exemplo, os aspectos definidos que vemos não refletem o estado geral da mescla quântica difusa de atributos em que se encontrava no momento anterior ao da nossa observação.[1] Assim, se quisermos reproduzir um objeto, enfrentaremos uma situação paradoxal: para reproduzir, precisamos observar, para que saibamos o que vamos reproduzir. Mas o ato de observar produz mudanças, de modo que se reproduzirmos o que vemos não estaremos reproduzindo o que existia antes que

o víssemos. Isso sugere que a teleportação em um universo quântico é inatingível, não apenas por questão de limitações práticas derivadas da complexidade, mas em virtude de limitações fundamentais inerentes à física quântica. Não obstante, como veremos na próxima seção, no início da década de 1990, uma equipe internacional de físicos encontrou uma maneira engenhosa de evitar essa conclusão.

Quanto à primeira questão, sobre a relação entre a réplica e o original, a física quântica dá uma resposta que é ao mesmo tempo precisa e encorajadora. De acordo com a mecânica quântica, cada elétron no universo é idêntico a todos os demais, no sentido de que todos têm exatamente a mesma massa, exatamente a mesma carga elétrica, as mesmas propriedades das forças nucleares forte e fraca e o mesmo *spin* total. Além disso, a bem testada descrição dada pela mecânica quântica diz que esses atributos são *os únicos* que um elétron pode possuir. Os elétrons são todos idênticos com relação a essas propriedades e não há outras propriedades a considerar. Do mesmo modo, cada quark up é igual a todos os demais, cada quark down é igual a todos os demais, cada fóton é igual a todos os demais, e assim por diante, com relação a todos os tipos de partículas. Os praticantes da mecânica quântica sabem há muitas décadas que as partículas podem ser vistas como as unidades mínimas de um campo (por exemplo, o fóton é a unidade mínima do campo eletromagnético), e a física quântica mostra que esses componentes mínimos de determinado campo são sempre idênticos. (Ou, conforme a teoria das cordas, as partículas do mesmo tipo têm propriedades idênticas porque são vibrações idênticas de um mesmo tipo de corda.)

O que pode variar entre duas partículas do mesmo tipo são as probabilidades de que elas se localizem em várias posições, as probabilidades de que os seus *spins* apontem para direções particulares e as probabilidades de que elas tenham velocidades e energias particulares. Ou, na linguagem mais sucinta dos físicos, as duas partículas podem estar em *estados quânticos* diferentes. Mas, se duas partículas de um mesmo tipo estiverem no mesmo estado quântico — exceto, talvez, no caso em que uma partícula tenha alta probabilidade de estar em *um* lugar e a outra tenha uma alta probabilidade de estar em *outro* —, as leis da mecânica quântica deixam claro que elas são indistinguíveis, não apenas na prática, mas mesmo em princípio. Elas são gêmeas idênticas. Se se trocassem as posições das partículas (ou, mais precisamente, se se trocassem as probabilidades de as duas partículas estarem localizadas em determinada posição), não haveria nenhuma hipótese de que essa mudança fosse detectada.

Assim, se imaginarmos que começamos com uma partícula localizada aqui, (como a teleportação tem início com algo que está aqui e busca fazê-lo aparecer em uma localização distante, nesta seção muitas vezes referir-me-ei às partículas como se elas tivessem posições definidas. Para ser mais

preciso, eu deveria dizer sempre “começando com uma partícula que tem alta probabilidade de estar localizada aqui”, ou “começando com uma partícula que tem 99% de probabilidade de estar localizada aqui” e usar linguagem similar com relação ao local de destino da teleportação. Mas, para ser breve, usarei a linguagem menos formal) e que conseguimos, de algum modo, colocar outra partícula do mesmo tipo exatamente no mesmo estado quântico (com as mesmas probabilidades de orientação de *spin*, de energia etc.) em uma localização distante, a partícula resultante seria indistinguível da partícula original e o processo poderia ser corretamente denominado teleportação quântica. Evidentemente, se a partícula original sobrevivesse intacta ao processo, poderíamos nos sentir tentados a dar ao processo o nome de clonagem quântica, ou, talvez, fax quântico. Mas, como veremos, a realização científica dessas ideias não preserva a partícula original — que é inevitavelmente modificada durante o processo de teleportação —, de modo que não nos defrontaremos com esse dilema taxonômico.

Uma preocupação mais aguda, que os filósofos têm considerado atentamente e de diversas formas, é saber se o que é verdadeiro para determinada partícula também o é para um aglomerado delas. Se você pudesse teleportar de um lugar para o outro todas as partículas que compõem o seu carro, de maneira que o estado quântico de cada uma, inclusive o seu relacionamento com todas as demais, fosse reproduzido com 100% de fidelidade, poderia dizer que o carro foi teleportado? Apesar da falta de dados empíricos que pudessem orientar-nos, a base teórica em favor da teleportação é forte. Os arranjos atômicos e moleculares determinam as características físicas do objeto — sua aparência, textura, o som e o cheiro que emite e até mesmo o seu gosto —, de modo que o veículo resultante seria idêntico ao original: os pequenos amassados, os arranhões, o rangido da porta direita, o cheiro do cachorro da família, tudo, enfim; e o carro obedeceria ao comando do volante e dos pedais exatamente como fazia o original. A questão de saber se o carro é realmente o original ou, em vez disso, uma réplica exata não é pertinente. Se você pedisse a uma empresa de mudanças que mandasse o seu carro para Londres e ela, sem o seu conhecimento, em vez de embarcá-lo, o teleportasse da maneira aqui descrita, você não perceberia a diferença — nem teoricamente.

Mas e se a companhia de mudanças fizesse o mesmo com o seu gato, ou, se você próprio, cansado da comida de avião, decidisse teleportar-se na sua próxima travessia do Atlântico? Será que o gato ou a pessoa que desembarca da câmara receptora são os mesmos que embarcaram no teleportador? Pessoalmente, acho que sim. É verdade que, como não temos os dados pertinentes, o máximo que podemos fazer é especular. Mas, na minha maneira de pensar, um ser vivo cujos componentes atômicos e moleculares estão exatamente no mesmo estado quântico em que os meus estão *sou eu*. Ainda que o eu “original” existisse

depois de que a “cópia” fosse feita, eu (nós) diria (diríamos) sem hesitação que cada qual sou eu. Teríamos o mesmo pensamento — literalmente — quanto a que nenhum dos eus teria prioridade sobre o outro. Pensamentos, memórias, emoções e julgamentos têm a sua base física nas propriedades dos átomos e moléculas do corpo humano. Um conjunto desses componentes elementares em estado quântico idêntico deve produzir um ser consciente idêntico. Com o passar do tempo, as nossas experiências causariam diferenças entre nós, mas, nessas novas circunstâncias, realmente acredito que haveria dois “eus” e não um original, que fosse o “verdadeiro” eu, e uma cópia que não o fosse.

Na verdade, quero ser um pouco menos rigoroso. A nossa composição física passa por inúmeras transformações o tempo todo — algumas menores, outras drásticas —, mas continuamos sendo as mesmas pessoas. Dos sorvetes Häagen-Dazs, que inundam a corrente sanguínea com gorduras e açúcares, às ressonâncias magnéticas, que modificam os eixos de *spin* de vários núcleos atômicos no cérebro, aos transplantes de coração, às lipoaspirações e aos trilhões de átomos que são substituídos no corpo humano a cada milionésimo de segundo, passamos por mudanças constantes sem que a nossa identidade pessoal seja afetada. Assim, ainda que um ser teleportado não reproduzisse com perfeição o meu estado físico, ele poderia ser completamente indistinguível de mim. Para os efeitos deste livro, poderia perfeitamente *ser* eu.

Evidentemente, se você crê que a vida, e em especial a vida consciente, não se limita à sua constituição física, os seus requisitos para o êxito da teleportação serão mais estritos do que os meus. Esta difícil questão — até que ponto a nossa identidade pessoal está vinculada ao nosso ser físico — tem sido debatida há muitos anos sob as mais diversas roupagens sem que tenha surgido uma resposta que satisfaça a todos. Acredito que a identidade reside totalmente no campo físico, mas outros não estão de acordo e ninguém pode reivindicar a posse da resposta definitiva.

Mas, independentemente do nosso ponto de vista quanto à questão hipotética da teleportação de um ser vivo, os cientistas já comprovaram que, graças às maravilhas da mecânica quântica, *partículas individuais podem ser — e já foram — teleportadas.*

Vejamos como.

EMARANHAMENTO QUÂNTICO E TELEPORTAÇÃO QUÂNTICA

Em 1997, um grupo de físicos chefiado por Anton Zeilinger, então na Universidade de Innsbruck, e outro grupo, conduzido por A. Francesco De

Martini, na Universidade de Roma,[2] levaram a efeito a primeira teleportação bem-sucedida de um fóton. Em ambos os experimentos, um fóton inicial, em determinado estado quântico, foi teleportado a uma pequena distância através de um laboratório, mas não há nenhuma razão para supor que os mesmos procedimentos não operem igualmente bem qualquer que seja a distância. Ambos os grupos empregaram uma técnica baseada em conhecimentos teóricos relatados em 1993 por uma equipe de físicos — Charles Bennett, do Watson Research Center da IBM**;** Gilles Brassard, Claude Crepeau e Richard Josza, da Universidade de Montreal; o físico israelense Asher Peres e William Wootters, do Williams College — que tomou como ponto de partida o emaranhamento quântico (capítulo 4).

Lembre-se de que duas partículas emaranhadas, dois fótons, por exemplo, têm uma relação estranha e íntima. Embora cada uma delas tenha certa probabilidade de fazer o *spin* de uma maneira ou de outra, e embora elas, quando medidas, pareçam "escolher" aleatoriamente entre as várias possibilidades, a "escolha" feita por uma é imediatamente feita também pela outra, independentemente da sua separação espacial. No capítulo 4, explicamos que não há maneira de usar partículas emaranhadas para enviar mensagens de um lugar a outro com velocidade maior do que a da luz. Se uma série de fótons emaranhados fosse objeto de medições em lugares muito distantes um do outro, os dados coletados em cada detector seriam uma sequência aleatória de resultados (na qual a frequência global do tipo de *spin* seria consistente com as ondas de probabilidade das partículas). O emaranhamento se tornaria evidente apenas com a comparação das duas listas de resultados, que propiciaria a notável conclusão de que são idênticos. Mas essa comparação requer algum tipo de comunicação mais lenta do que a luz. E como antes da comparação não se poderia detectar nenhum traço do emaranhamento, não se poderia enviar nenhum sinal a velocidade superior à da luz.

Não obstante, ainda que o emaranhamento não possa ser usado para comunicações supra luminais, é impossível não pensar que as correlações a longa distância entre partículas são tão bizarras que têm de servir para alguma coisa extraordinária. Em 1993, Bennett e os seus colaboradores descobriram uma possibilidade nesse sentido. Eles mostraram que o emaranhamento quântico poderia ser usado para a teleportação quântica. Sabemos que não é possível enviar mensagens a velocidades maiores do que a da luz, mas, se aceitarmos a teleportação de uma partícula de um lugar para outro a velocidades menores do que a da luz, o emaranhamento dará conta do recado.

O raciocínio que orienta essa conclusão é astuto e engenhoso, além de matematicamente simples. Abaixo está descrito o seu aspecto geral.

Imagine que eu queira teleportar um fóton particular, que denominarei fóton A, da minha casa em Nova York para o meu amigo Nicholas, em Londres. Para simplificar, vejamos como eu teleportaria o estado quântico exato do *spin* do fóton — ou seja, como me certificaria de que Nicholas receberia um fóton cujas probabilidades de fazer o *spin* de uma maneira ou de outra sejam idênticas às do fóton A.

Não posso simplesmente medir o *spin* do fóton A, ligar para o Nicholas e instruí-lo a manipular um fóton no lugar onde ele está, de modo que o seu *spin* coincida com o que observei no meu fóton. O resultado que eu obteria seria afetado pela minha própria observação e já não refletiria o verdadeiro estado do fóton A antes de que eu o olhasse. Que fazer, então? De acordo com Bennett e seus colegas, o primeiro passo é que eu e Nicholas tenhamos um outro fóton cada um, que denominaremos fótons B e C, que estão emaranhados um com o outro. Como obter esses fótons emaranhados não importa descrever aqui. Vamos simplesmente supor que Nicholas e eu temos certeza de que, ainda que estejamos em lados opostos do Atlântico, se eu medir o *spin* do fóton B com relação a um eixo determinado e ele fizer o mesmo com relação ao fóton C, obteremos exatamente o mesmo resultado.

O passo seguinte, segundo Bennett e os seus colaboradores, *não* é medir diretamente o fóton A — o fóton que quero teleportar —, uma vez que isso significaria uma intervenção demasiado drástica. Em vez disso, devo medir uma característica que o fóton A e o fóton B, que está emaranhado com C, tenham *em comum.* A teoria quântica permite, por exemplo, que eu verifique se os fótons A e B têm o mesmo *spin* com relação ao eixo vertical, sem medir direta e individualmente os seus *spins.* Do mesmo modo, a teoria quântica permite que eu verifique se os fótons A e B têm o mesmo *spin* com relação ao eixo horizontal, sem medir direta e individualmente os seus *spins.* Com essas medições comuns, não deduzo o *spin* do fóton A, mas sim posso determinar como o *spin* do fóton A se relaciona com o do fóton B. E essa é uma informação importante.

O fóton C, em Londres, está emaranhado com o fóton B, de modo que se eu souber como o fóton A se relaciona com o B, posso deduzir como o fóton A se relaciona com o C. Então, se eu enviar essa informação por telefone para Nicholas e lhe disser como o *spin* do fóton A se relaciona com o do fóton C, ele poderá determinar como o fóton C deve ser manipulado para que o seu estado quântico coincida com o do fóton A. Uma vez feita essa manipulação, o estado quântico do fóton que está em seu poder será idêntico ao do fóton A, e isso basta para que declaremos que a teleportação do fóton A foi bem-sucedida. No mais

simples dos casos, por exemplo, se a minha medição revelasse que o *spin* do fóton B é idêntico ao do A, concluiríamos que o *spin* do fóton C também é idêntico ao do A, e, sem mais discussões, a teleportação estaria completa. O fóton C estaria no mesmo estado quântico do fóton A, tal como desejado.

Bem, quase. Essa é a ideia básica, mas para explicar a teleportação quântica em termos práticos deixei de fora, até aqui, um elemento absolutamente crucial da história. Ao executar a medição conjunta dos fótons A e B, efetivamente aprendo como o *spin* do fóton A se relaciona com o do fóton B. Mas, como acontece com todas as observações, a própria medição afeta os fótons. Portanto, *não* aprendo como o *spin* do fóton A se relacionava com o do fóton B antes da medição. Aprendo como eles se relacionam depois de serem afetados pelo ato de medir. Assim, à primeira vista, parece que estamos enfrentando o mesmo obstáculo quântico que descrevi no começo, quando discutíamos a reprodução do fóton A: a inevitável perturbação causada pelo processo de medição. É aí que entra em ação o auxílio do fóton C. Como os fótons B e C estão emaranhados, a perturbação que causo no fóton B em Nova York *também se refletirá no estado do fóton C em Londres.* Eis a maravilha da natureza do emaranhamento quântico, visto no capítulo 4. Com efeito, Bennett e seus colaboradores mostraram matematicamente que, em virtude do emaranhamento entre os fótons B e C, a perturbação causada pela minha medição do fóton B *é transferida à distância para o fóton* C.

E isso é fantasticamente interessante. Graças à minha medição, podemos conhecer a relação entre o *spin* do fóton A e o do fóton B, mas permanecemos com o difícil problema de que ambos os fótons ficam alterados em consequência da minha intervenção. Graças ao emaranhamento, contudo, o fóton C fica vinculado à minha medição — embora esteja a milhares de quilômetros de distância —, e isso nos permite isolar o efeito da perturbação e ter, assim, acesso à informação que normalmente se perde com o processo de medição. Se eu agora ligar para o Nicholas e lhe disser o resultado da minha medição, ele saberá como os *spins* dos fótons A e B se relacionam depois da perturbação e, por meio do fóton C, *terá acesso ao impacto da própria perturbação.* Isso permite que Nicholas use o fóton C para, por assim dizer, descontar a perturbação causada pela minha medição e assim contornar o obstáculo à reprodução do fóton A. Com efeito, como Bennett e os seus colaboradores mostram com detalhes, com uma manipulação extremamente simples do *spin* do fóton C (com base no meu telefonema, quando eu o informei sobre o relacionamento entre os *spins* dos fótons A e B), Nicholas se certificará de que o fóton C, do ponto de vista do *spin*, reproduz exatamente o estado quântico do fóton A, *antes da minha medição.*

Além disso, embora o *spin* seja apenas uma das características de um fóton, outros aspectos do estado quântico do fóton A (como a probabilidade de que ele tenha uma ou outra quantidade de energia) podem ser reproduzidos de maneira similar. Desse modo, graças a esse procedimento, podemos teleportar o fóton A de Nova York para Londres.[3]

Como se vê, a teleportação quântica envolve dois estágios, cada um dos quais provê informações essenciais e complementares. Em primeiro lugar, executamos uma medição conjunta do fóton que queremos teleportar e de um dos membros de um par de fótons emaranhados. A perturbação associada à medição é transferida ao membro distante do par emaranhado por meio das estranhezas da não-localidade quântica. Esse é o primeiro estágio, a parte especificamente quântica do processo de teleportação. No segundo estágio, o resultado da própria medição é comunicado ao local distante de recepção por meios mais comuns (telefone, fax, e-mail,...), no que se poderia denominar a parte clássica do processo de teleportação. A combinação do primeiro e do segundo estágios permite a reprodução exata do estado quântico do fóton que queremos teleportar por meio de uma operação direta (como uma rotação de certo número de graus em torno de um eixo particular) executada no membro distante do par emaranhado.

Existem ainda alguns aspectos adicionais da teleportação quântica. Como o estado quântico original do fóton A foi afetado pela minha medição, *o fóton* C, *em Londres, passa a ser o único que se conserva no estado original.* Já não há dois exemplares do fóton A original, de modo que, em vez de dar a esta operação o nome de fax quântico, na verdade é mais correto chamá-la de teleportação quântica.[4] Além disso, apesar de termos teleportado o fóton A de Nova York para Londres — embora o fóton que está em Londres se torne indistinguível do fóton original que está em Nova York —, não ficamos conhecendo o estado quântico do fóton A. A probabilidade de o fóton de Londres girar o seu *spin* em uma ou outra direção é exatamente a mesma que tinha o fóton A antes de que eu o afetasse, mas não ficamos sabendo que probabilidade é essa. Na verdade, esse é o truque da operação de teleportação. A perturbação causada pelas medições nos impede de determinar o estado quântico do fóton A, mas, de acordo com os procedimentos descritos, *não é necessário conhecer o estado quântico do fóton para teleportá-lo.* Precisamos conhecer apenas um aspecto do seu estado quântico — o que aprendemos graças à medição conjunta feita com o fóton B. O emaranhamento quântico com o distante fóton C se encarrega do restante.

A implementação dessa estratégia para a teleportação quântica não foi um assunto banal. No início da década de 1990, a criação de um par de fótons

emaranhados já era um procedimento padronizado, mas a execução de uma medição conjunta de dois fótons (tecnicamente denominada *medição do estado de Bell*) nunca tivera êxito. A conquista dos grupos de Zeilinger e De Martini foi a de inventar técnicas experimentais engenhosas para a medição conjunta e de levá-las à prática no laboratório.[5] Em 1997, eles alcançaram o objetivo, tornando-se os primeiros grupos a efetuar a teleportação de uma partícula.

TELEPORTAÇÃO REALISTA

Como eu, você, um carro e tudo o mais é composto por muitas partículas, o próximo passo natural é imaginar a aplicação da teleportação quântica a esses amplos conjuntos de partículas, para que possamos "irradiar" objetos macroscópicos de um lugar para o outro. Mas o salto entre a teleportação de uma partícula para a teleportação de um conjunto macroscópico de partículas é estarrecedor e está muitíssimo além do que os pesquisadores podem realizar por agora, muito além mesmo do que grande parte dos principais estudiosos do campo imaginam que possamos alcançar até no futuro distante. Mas, só pelo prazer de fazê-lo, vejamos como é o sonho de Zeilinger a respeito do modo pelo qual um dia poderíamos realizá-lo.

Imagine que eu queira teleportar o meu carro de Nova York para Londres. Em vez de prover-nos, a mim e a Nicholas, com um par de fótons emaranhados (que é o que nos seria necessário para teleportar um fóton), cada um de nós tem de ter uma câmara de partículas com um número suficiente de prótons, nêutrons, elétrons e assim por diante, para construir um carro inteiro, sendo que todas as partículas da minha câmara têm de estar emaranhadas quanticamente com as da câmara de Nicholas (veja a figura 15.1). Também precisarei de um instrumento que meça as propriedades que todas as partículas que compõem o meu carro têm em conjunto com outras partículas que se movem pelo interior da minha câmara (o análogo da medição das características conjuntas dos fótons A e B). Por meio do emaranhamento das partículas das duas câmaras, o impacto das medições conjuntas por mim efetuadas em Nova York será transferido para a câmara de partículas de Nicholas em Londres (o análogo da situação em que o estado quântico do fóton C refletia a medição conjunta de A e B). Se eu telefonar para Nicholas e lhe comunicar os resultado das minhas medições (a chamada será cara, pois eu terei de comunicar cerca de 10^{30} resultados), os dados o instruirão a manipular as partículas da sua câmara (do mesmo modo como a minha chamada anterior o instruiu a manipular o fóton C). Quando ele terminar, cada partícula da sua câmara estará precisamente no mesmo estado quântico de cada partícula do automóvel (antes que elas sejam submetidas a quaisquer medições) e, assim

como na nossa discussão anterior, Nicholas *terá* o carro (para os conjuntos de partículas — e não para partículas individuais — o estado quântico também codifica a relação de cada partícula do conjunto com todas as demais. Assim, ao reproduzir exatamente o estado quântico das partículas que compõem o automóvel, nos certificamos de que todas elas conservam as mesmas relações entre si. A única mudança que experimentam é a da sua localização, de Nova York para Londres). A teleportação de Nova York para Londres estará completa.

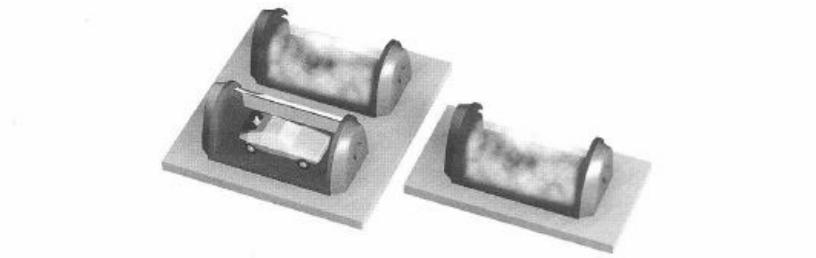


Figura 15.1. *Um enfoque imaginativo para a teleportação supõe duas câmaras de partículas quanticamente emaranhadas, em diferentes localizações, e um meio adequado para efetuar a medição conjunta das partículas que constituem o objeto a ser teleportado e das partículas que estão em uma das câmaras. Os resultados dessas medições propiciariam as informações necessárias para manipular as partículas que estão na segunda câmara, para reproduzir o objeto e completar a teleportação.*

Note, no entanto, que no dia de hoje todos os passos desta versão macroscópica da teleportação quântica são fantasiosos. Um objeto como um automóvel tem mais de 1 bilhão de bilhões de bilhões de partículas. Os cientistas estão aprendendo a manejar o emaranhamento de quantidades superiores a um par de partículas, mas permanecem extremamente longe de alcançar os números pertinentes para entidades macroscópicas.[6] O estabelecimento das duas câmaras de partículas emaranhadas está, portanto, absurdamente além do nosso alcance atual. Frise-se que a medição conjunta de *dois* fótons foi um feito já por si difícil e impressionante. Elaborar os procedimentos para a medição conjunta de bilhões e bilhões de partículas é, hoje, inimaginável. Do nosso ponto de vista atual, uma avaliação desapaixonada levaria à conclusão de que a teleportação de um objeto macroscópico, pelo menos da maneira até aqui empregada quanto às partículas individuais, está eras — se não uma eternidade — à nossa frente.

Contudo, como a transcendência das profecias negativas é a maior constante da ciência e da tecnologia, limitar-me-ei a notar o óbvio: a teleportação de corpos macroscópicos parece improvável. Quem é que sabe? Quarenta anos atrás, o computador do *Enterprise* também parecia bem improvável.[7]

OS ENIGMAS DA VIAGEM NO TEMPO

Não há dúvida de que a vida seria diferente se teleportar objetos macroscópicos fosse tão fácil quanto usar o correio expresso ou entrar no metrô. Poderíamos

efetuar deslocamentos hoje impraticáveis ou impossíveis, e o conceito de viajar no espaço sofreria uma revolução de tal ordem que esse salto em termos de praticabilidade e conveniência representaria uma mudança fundamental na nossa visão de mundo.

Mesmo assim, o impacto da teleportação sobre a visão que temos do universo empalideceria se comparo com a transformação radical que significaria conseguir viajar através do tempo de acordo com a própria vontade. Todos sabemos que com esforço e dedicação suficientes é possível, pelo menos em princípio, ir de um lugar a outro. Embora haja limitações tecnológicas para as nossas viagens através do espaço, dentro desses parâmetros podemos viajar de acordo com a nossa vontade e escolha. Mas viajar do agora para outro tempo é outra coisa. As nossas experiências atestam de maneira implacável que há, no máximo, uma via: esperar. Esperar que um segundo suceda o outro e que, metodicamente, o agora dê lugar ao futuro. E isso supõe que a direção é o futuro. A experiência nos informa que não existe nenhuma via para o passado, de modo que esse tipo de viagem não parece estar no menu. Ao contrário das viagens no espaço, as viagens no tempo estão, aparentemente, totalmente fora do raio de ação da nossa vontade e escolha. Em matéria de tempo, somos arrastados em uma direção única, queiramos ou não.

Se pudéssemos navegar pelo tempo como navegamos pelo espaço, a nossa visão de mundo não sofreria uma simples mudança: ela passaria pela transformação mais extraordinária na história da nossa espécie. À luz de um impacto tão assombroso, sempre fico perplexo diante do fato de que tão poucas pessoas têm consciência de que as bases teóricas de um tipo de viagem no tempo — a viagem ao futuro — estão estabelecidas desde o início do século passado.

Quando Einstein descobriu a natureza do espaço-tempo na relatividade especial, ele estabeleceu as bases para viagens rápidas ao futuro. Se você quiser ver o que acontecerá no planeta Terra daqui a mil, 10 mil ou 10 milhões de anos, as leis da física einsteiniana lhe dizem como fazer. Construa um veículo capaz de alcançar uma velocidade igual a 99,9999999996% da velocidade da luz. A essa velocidade, penetre no espaço profundo por um dia, ou dez dias, ou por um pouco mais de 27 anos, segundo o relógio de bordo. Faça uma curva abrupta e regresse à Terra, sempre à velocidade máxima. Quando você voltar, o tempo *efetivamente transcorrido* na Terra terá sido de mil, 10 mil ou 10 milhões de anos. Essa é uma conclusão da relatividade especial que é universalmente aceita e está verificada experimentalmente. É um exemplo do retardamento do tempo com o aumento da velocidade, descrito no capítulo 3.[8] É claro que, como construir esse tipo de veículo está além da nossa capacidade, a conclusão não foi testada literalmente. No entanto, como vimos, os pesquisadores confirmaram o

retardamento do tempo, por meio de um avião comercial, que viaja a uma fração mínima da velocidade da luz, e também com partículas elementares como os múons, que viajam a velocidades muito próximas à da luz nos aceleradores de partículas (os múons estacionários desintegram-se em cerca de dois milionésimos de segundo, mas, quanto mais rápido viajam, mais vagarosamente pulsam os seus relógios internos e, em consequência, mais tempo eles parecem existir). Tudo indica — e nada contraindica — que a relatividade especial está certa e a sua estratégia para alcançar o futuro funcionaria como previsto. A tecnologia, e não a física, é o que nos deixa presos a esta época (a fragilidade do corpo humano é outra limitação prática: a aceleração requerida para chegar a velocidades tão elevadas em um período de tempo razoável está muito acima do que o corpo pode suportar. Note também que o retardamento do tempo fornece, em princípio, uma estratégia para chegar a locais longínquos no espaço. Se um foguete deixasse a Terra e seguisse para a galáxia de Andrômeda viajando a 99,999999999999999% da velocidade da luz, teríamos de esperar quase 6 milhões de anos para que ele voltasse. Mas a essa velocidade, o tempo, no foguete, sofre um retardamento tão colossal com relação ao tempo que transcorre na Terra que o astronauta, ao regressar, teria envelhecido apenas oito horas (desprezando-se o fato de que ele, ou ela, não poderia ter sobrevivido às acelerações necessárias para alcançar a velocidade máxima, dar a volta para o regresso e parar na chegada).

Questões mais espinhosas aparecem, contudo, quando pensamos sobre o outro tipo de viagem no tempo — a viagem ao passado. Com certeza você tem conhecimento delas, como, por exemplo, do cenário em que você viaja ao passado e impede o seu próprio nascimento. Em muitas obras de ficção, isso é feito com violência. Contudo, qualquer intervenção menos drástica mas igualmente efetiva — como impedir que os seus pais cheguem a encontrar-se — tem o mesmo efeito. O paradoxo é claro: se você não nasceu nunca, como é que existe e, principalmente, como é que poderia viajar ao passado e impedir que os seus pais se encontrassem? Para viajar ao passado e impedir que os seus pais se conheçam é preciso que você tenha nascido; mas se você nascesse, viajasse ao passado e impedisse que os seus pais se conhecessem, você *não* teria nascido. Entramos em um impasse lógico.

Um paradoxo similar, sugerido pelo filósofo de Oxford Michael Dummett e divulgado pelo seu colega David Deutsch, provoca a nossa inteligência de uma maneira um pouco diferente e talvez mais intrigante. Uma das versões é a seguinte: imagine que eu construa uma máquina do tempo e viaje para dez anos no futuro. Depois de um rápido almoço no Tofu-4-U (a cadeia que substituiu os McDonald’s depois que a grande pandemia da vaca louca arrefeceu o entusiasmo do público por hambúrguer), vou a um café onde posso acessar a internet e busco inteirar-me sobre os avanços realizados pela teoria das cordas. Tenho, então, uma grata surpresa: todas as questões pendentes da teoria foram resolvidas; ela alcançou o seu desenvolvimento completo e já é utilizada com êxito para explicar todas as propriedades conhecidas das partículas. Descobriram-se provas

insofismáveis da existência das dimensões adicionais e as previsões da teoria com relação às partículas supersimétricas — massa, carga elétrica etc. — acabaram de ser plenamente confirmadas pelo Grande Colisor de Hadrons. Já não resta nenhuma dúvida: a teoria das cordas é a teoria unificada do universo.

Continuo a pesquisar para ver quem foi o responsável por esses grandes avanços e tenho uma surpresa ainda maior. O artigo decisivo foi escrito um ano antes por ninguém menos do que Rita Greene. Minha mãe. Fico chocado. Com todo o respeito, minha mãe é uma pessoa maravilhosa, mas não é uma cientista. Ela só leu umas poucas páginas do *Universo elegante*, por exemplo, e deixou-o de lado, dizendo que lhe dava dor de cabeça. Como pode ser, então, que ela tenha escrito o artigo *mais importante* da teoria das cordas? Em seguida, leio o artigo e fico boquiaberto com o desenvolvimento simples e profundo do seu raciocínio e com o fato de que, ao final, ela agradece *a mim* pelos anos de instrução intensiva em matemática e física que lhe dei depois que um seminário de Tony Robbins ajudou-a a superar os seus medos e entrar em contato com a cientista oculta que existia dentro dela. Caramba! Ela tinha acabado de inscrever-se no seminário quando parti para o futuro. É melhor eu voltar logo para começar a lhe dar as aulas.

Volto no tempo e começo a instruir a minha mãe sobre a teoria das cordas. Mas a coisa não anda. Passa um ano. Passam dois. Ela se esforça, mas não consegue progredir. Começo a preocupar-me. Prosseguimos por mais dois anos, porém o progresso é mínimo. Fico realmente preocupado. Já não há quase tempo para que o artigo seja divulgado. Como é que ela vai escrevê-lo? Por fim, tomo uma grande decisão. Quando eu li o artigo, no futuro, ele me deixou tão impressionado que retive claramente o texto na cabeça. Então, em vez de fazer com que a minha mãe descobrisse tudo por sua própria conta — o que me parecia cada vez mais improvável —, eu lhe digo como escrever e me certifico de que inclua todos os detalhes, tal como publicados no futuro. Ela divulga o texto e, quase que de imediato, ele incendeia o mundo da física. Tudo o que li a respeito do episódio na minha viagem ao futuro realmente acontece.

Eis a questão enigmática: a quem corresponde o mérito pelo documento revolucionário da minha mãe? Certamente não a mim. Eu soube do texto quando o li. Mas como o mérito poderia ser atribuído à minha mãe, se ela se limitou a escrever o que eu lhe ditei? Evidentemente, a questão principal não se refere apenas ao mérito; refere-se à origem do novo conhecimento, das novas percepções, do novo entendimento que o artigo propiciou. Quem é o responsável por isso? A quem posso apontar e dizer: “Esta pessoa, ou este computador, descobriu os novos resultados”? As ideias não são minhas nem da minha mãe. Ninguém mais estava envolvido e não usamos o computador. No entanto, de

algum modo, aqueles resultados brilhantes estavam no artigo dela. Aparentemente, em um mundo em que as viagens no tempo, tanto ao passado, quanto ao futuro, são possíveis, o conhecimento pode materializar-se a partir do nada. Embora isso não seja tão paradoxal quanto o ato de impedir o seu próprio nascimento, não deixa de ser estranho.

Que conclusões tirar desses paradoxos e dessas coisas estranhas? Devemos concluir que a viagem no tempo para o futuro é permitida pelas leis da física, mas que qualquer tentativa de viajar para o passado está condenada ao fracasso? Muitos pensam assim, porém, como veremos, existem maneiras de contornar as difíceis questões com que nos defrontamos. Isso não significa que seja possível viajar para o passado — essa é uma questão à parte, que consideraremos em breve — mas significa, sim, que as viagens ao passado não podem ser descartadas simplesmente com base nos enigmas que acabamos de discutir.

NOVAS REFLEXÕES SOBRE OS ENIGMAS

Lembre-se de que no capítulo 5 discutimos o fluxo do tempo, a partir da perspectiva da física clássica, e chegamos a uma imagem substancialmente diferente da que nos dá a nossa intuição. Um raciocínio cuidadoso levou-nos a ver o espaço-tempo como um bloco de gelo no qual todos os momentos estão congelados, o que contrasta com a imagem familiar do tempo como um rio que nos leva sempre para adiante, de um momento para o seguinte. Aqueles momentos congelados agrupam-se em *agoras* — eventos que acontecem ao mesmo tempo —, que se revelam de maneiras diferentes, de acordo com os diferentes estados de movimento dos observadores. E para permitir essa flexibilidade, para fatiarmos o bloco do espaço-tempo de acordo com diferentes noções de agora, invocamos também uma metáfora equivalente, em que o espaço-tempo era visto como um pão, que pode ser cortado em diferentes ângulos.

Mas, independentemente da metáfora, a lição do capítulo 5 é a de que os momentos — os eventos que compõem o pão do espaço-tempo — simplesmente existem. Eles não têm tempo. Cada momento — cada evento ou acontecimento — existe, assim como cada ponto do espaço. Os momentos não existem apenas no instante em que são iluminados pelo “holofote” do tempo presente de um observador. Essa imagem casa-se bem com a nossa intuição, mas não resiste a uma análise lógica. Ao contrário: uma vez iluminado, o momento permanece para sempre iluminado. Os momentos não mudam. Eles permanecem. O fato de serem “iluminados” é apenas uma das muitas características imutáveis que constituem um momento. Isso fica particularmente evidente na perspectiva

imaginária e instigante da figura 5.1, em que todos os eventos que compõem a história do universo estão à vista. Todos estão lá, estáticos e imutáveis. Os diferentes observadores não estão de acordo quanto a que eventos acontecem ao mesmo tempo — eles fatiam o pão do espaço-tempo em ângulos diferentes —, mas o pão como um todo e os eventos que o compõem são literalmente universais.

A mecânica quântica altera essa perspectiva clássica do tempo. Vimos, por exemplo, no capítulo 12 que, nas escalas extremamente pequenas, o espaço e o espaço-tempo tornam-se inevitavelmente irregulares e descontínuos. Mas (veja o capítulo 7) a visão completa do tempo no contexto da mecânica quântica requer uma solução para o problema quântico da medição. Uma das proposições nesse sentido, a interpretação dos muitos mundos, é particularmente pertinente para enfrentarmos os paradoxos ocasionados pelas viagens no tempo. Na próxima seção voltaremos a ela. Mas nesta seção vamos continuar a ser clássicos e examinaremos esses enigmas à luz da visão do espaço-tempo como um bloco de gelo ou como um pão.

Tomemos como exemplo a hipótese paradoxal de que você volte ao passado e impeça que os seus pais se conheçam. Intuitivamente, todos sabemos o significado que emprestamos a isso. Antes de que você voltasse ao passado, os seus pais se encontraram — digamos à meia-noite de 31 de dezembro de 1965, (eu deveria dizer zero hora de 1º de janeiro de 1966, mas isso não importa) na festa de ano-novo — e, tempos depois, você nasceu. Então, muitos anos depois disso, você decidiu viajar de volta ao passado — de volta a 31 de dezembro de 1965 —, chegou e resolveu mudar as coisas. Especificamente, você manteve os seus pais separados e impediu, assim, a sua própria concepção e nascimento. Mas vamos agora rebater essa descrição intuitiva com a descrição mais elaborada do tempo propiciada pelo pão do espaço-tempo.

Essencialmente, a descrição intuitiva não faz sentido porque supõe que os momentos podem mudar. Nesse quadro intuitivo, o soar da meia-noite de 31 de dezembro de 1965 (usando-se o fatiamento do tempo com padrões terrenos) é visto como o momento em que, “inicialmente”, os seus pais se encontram, mas, “subsequentemente”, a sua interferência modifica as coisas de tal maneira que, ao soar a meia-noite, os seus pais estão a quilômetros de distância um do outro. O problema com essa renarração dos eventos, no entanto, é que os momentos não mudam: como vimos, eles permanecem. O pão do espaço-tempo é fixo e imutável. Não faz sentido pensar que um momento era “inicialmente” de um jeito e “subsequentemente” de outro.

Se você viajou no tempo de volta para 31 de dezembro de 1965, então você esteve aí, sempre esteve aí e nunca deixou de estar aí. O 31 de dezembro de 1965

não aconteceu duas vezes, com você ausente na primeira e presente na segunda. A partir da perspectiva atemporal da figura 5.1, você existe — estático e imutável — em várias localizações do pão do espaço-tempo. Se você, hoje, programa os controles da sua máquina do tempo para enviá-lo para as 23h50 do dia 31 de dezembro de 1965, então esse momento posterior estará entre as localizações do espaço-tempo em que você pode ser encontrado. Mas a sua presença na noite do ano-novo de 1966 será um aspecto *eterno* e *imutável* do espaço-tempo.

Essa percepção nos leva a algumas outras conclusões um tanto bizarras, mas evita o paradoxo. Você apareceria, por exemplo, no pão do espaço-tempo às 23h50 de 31 de dezembro de 1965, porém não haveria nenhum traço da sua existência antes desse momento. Isso é estranho, mas não é paradoxal. Se alguém visse você aparecer de repente e perguntasse, com olhos amedrontados, de onde você veio, você responderia calmamente: “Do futuro”. Nesse cenário, pelo menos até aqui, não nos envolvemos em nenhum impasse lógico. Naturalmente, as coisas ficam mais interessantes se você tentar realizar a sua missão e impedir o encontro dos seus pais. Que acontece? Bem, se mantivermos cuidadosamente a perspectiva do “bloco do espaço-tempo”, concluiremos inescapavelmente que você não terá êxito. Por mais que se empenhe, não conseguirá nada naquela fadada noite de ano-novo. Impedir que os seus pais se encontrem — embora aparentemente seja algo que está dentro do campo das suas possibilidades — resulta, na verdade, em uma perda de tempo, do ponto de vista lógico. Os seus pais se encontraram ao soar da meia-noite. Você estava lá. E você “sempre” terá estado lá. Cada momento é o que é e não se modifica. Aplicar o conceito de mudança a um momento faz tanto sentido quanto submeter uma pedra à psicanálise. Os seus pais se encontraram ao soar da meia-noite de 31 de dezembro de 1965 e não há *nada* que possa fazer isso mudar porque esse encontro é um evento imutável que ocupa eternamente o seu lugar no espaço-tempo.

Aliás, pensando bem, você se lembra de que, na sua adolescência, uma vez você perguntou ao seu pai como foi que ele pediu a mão da sua mãe e ele respondeu que, na verdade, ele não tinha nenhuma intenção de propor casamento. Foi uma coisa muito repentina: mais ou menos dez minutos antes da meia-noite, na festa de ano-novo, ele ficou com os olhos esbugalhados porque um homem materializou-se bem à sua frente, dizendo que vinha do futuro, e então, quando ele viu a sua mãe, decidiu pedi-la em casamento ali mesmo, naquela hora.

O que importa é que o conjunto completo e imutável dos eventos do espaço-tempo necessariamente conforma um todo consistente e coerente. O universo faz sentido. Se você voltar no tempo até 31 de dezembro de 1965, estará, na

verdade, cumprindo o seu próprio destino. No pão do espaço-tempo há alguém presente às 23h50 do dia 31 de dezembro de 1965, que não estava lá em nenhum momento anterior. A partir da perspectiva imaginária e externa da figura 5.1, poderíamos ver esse aspecto diretamente. Poderíamos ver também, sem dúvida, que a pessoa é você, com a sua idade atual. Para que esses eventos, que se situam décadas antes, façam sentido, você *tem* de viajar de volta no tempo, até 1965. Além disso, a partir da nossa perspectiva externa, podemos ver que o seu pai lhe faz uma pergunta, logo depois das 23h50 de 31 de dezembro de 1965, com o olhar amedrontado, afasta-se rapidamente e encontra a sua mãe à meia-noite. Um pouco mais adiante no pão, podemos ver os seus pais casando-se, o seu nascimento, o desenvolvimento da sua infância e, ainda mais à frente, você entrando na máquina do tempo. Se as viagens ao passado fossem possíveis, já não poderíamos explicar os eventos de determinado tempo somente com base em eventos anteriores (a partir de qualquer perspectiva dada). Mas a totalidade dos eventos constituiria necessariamente uma história articulada, coerente e não contraditória.

Como ressaltamos na última seção, isso não significa, nem com uma grande dose de imaginação, que as viagens ao passado sejam possíveis. Mas sugere, sim, e com firmeza, que alegados paradoxos, como impedir o seu próprio nascimento, são produtos de erros de lógica. Se você viajar ao passado, não poderá mudá-lo, assim como não pode mudar o valor de π. Se você viajar ao passado, você é, será e sempre foi parte do passado, o mesmíssimo passado que o leva a viajar de volta a ele.

A partir da perspectiva externa da figura 5.1, essa explicação é sólida e coerente. Ao examinarmos a totalidade dos eventos do pão do espaço-tempo, vemos que eles se interligam, tal como em um jogo cósmico de palavras cruzadas. Contudo, a partir da sua própria perspectiva, em 31 de dezembro de 1965 as coisas continuam enigmáticas. Declarei que, mesmo que você estivesse determinado a impedir o encontro dos seus pais, o enfoque clássico do problema não permite que você tenha êxito. Você pode ver o encontro. Você pode até mesmo facilitá-lo, ainda que sem querer, como na história que inventei. Você pode viajar repetidas vezes ao passado, de maneira que esteja presente de múltiplas formas, tratando, todas as vezes, de impedir a união dos seus pais. Mas não é possível fazê-lo porque isso significaria mudar algo com relação ao qual o conceito de mudança não se aplica.

Porém mesmo com a ajuda dessas observações abstratas, não podemos deixar de perguntar: e o que é que impede a sua ação? Se você está lá na festa às 23h50 e vê a sua mãe, bem jovenzinha, à sua frente, o que é que o impede de afastá-la? Ou então, se você vê o seu pai, igualmente jovem, o que é que o impede de —

ora, afinal, é só uma especulação — atirar nele? Você não tem livre-arbítrio? Vejamos como, na opinião de alguns, a mecânica quântica entra em cena.

LIVRE-ARBÍTRIO, MUITOS MUNDOS E VIAGENS NO TEMPO

O livre-arbítrio é uma questão delicada, mesmo quando não estamos levando em conta as complicações das viagens no tempo. As leis da física clássica são deterministas. Vimos antes que, se você soubesse com precisão de que maneira as coisas são, ou estão, agora (a posição e a velocidade de todas as partículas do universo), as leis da física clássica lhe diriam exatamente como as coisas teriam sido, ou viriam a ser, em qualquer outro momento especificado. As equações são indiferentes à suposta liberdade da vontade humana. Com base nisso, alguns creem que o livre-arbítrio é uma ilusão em um universo clássico. Você é formado por um conjunto de partículas e, portanto, se as leis da física clássica puderem determinar todas as informações a respeito das suas partículas a qualquer momento — onde elas estariam, como se moveriam, e assim por diante —, a sua capacidade de determinar as ações com base na sua vontade estaria inteiramente comprometida. Esse raciocínio me parece convincente, mas os que creem que somos algo mais do que um simples conjunto de partículas não estão de acordo.
De qualquer maneira, a relevância dessas observações é limitada, uma vez que o universo é quântico, e não clássico. Na física quântica, a física do mundo real, há algumas semelhanças com essa perspectiva clássica; mas há também algumas diferenças potencialmente cruciais. Como vimos no capítulo 7, se conhecermos agora mesmo a função de onda quântica relativa a cada partícula do universo, a equação de Schrödinger nos dirá como era, ou como será, a função de onda em qualquer outro momento especificado. Esse componente da física quântica é totalmente determinista, assim como na física clássica. Contudo, o ato de observar complica o relato da mecânica quântica e, como vimos, prossegue até hoje um forte debate sobre o problema quântico da medição. Se um dia os físicos concluírem que a equação de Schrödinger é o único fator a ser levado em conta na mecânica quântica, então a física quântica, em sua totalidade, será tão determinista quanto a física clássica. E tal como acontece com relação à física clássica, algumas pessoas dirão que isso significa que o livre-arbítrio é uma ilusão. Outros dirão que não. Mas, se o nosso pensamento sobre a história quântica estiver ainda carente de algum outro fator — se a passagem das probabilidades para os resultados específicos requer algo além do esquema quântico ortodoxo —, é bem possível que o livre-arbítrio encontre a sua realização concreta no reino das leis da física. Pode ser que um dia cheguemos à conclusão de que, como alguns físicos especulam, o ato da observação

consciente é um elemento integral da mecânica quântica, o catalisador que induz a realização do resultado que será produzido a partir da névoa quântica.[9] Pessoalmente considero essa possibilidade extremamente improvável, mas não conheço nenhuma maneira de excluí-la.

A consequência é que a situação do livre-arbítrio e do seu papel na física fundamental permanece sem solução. Vamos, então, considerar as duas possibilidades: o livre-arbítrio ilusório e o livre-arbítrio real.

Se o livre-arbítrio for uma ilusão e se as viagens ao passado forem possíveis, a sua impossibilidade de impedir que os seus pais se encontrem não oferece nenhum enigma. Embora você tenha a sensação de ter controle sobre os seus atos, são as leis da física que, na verdade, manobram os cordões. Quando você entra em ação para afugentar a sua mãe ou para atirar contra o seu pai, as leis da física o atrapalham. A máquina do tempo pode deixá-lo no outro lado da cidade, você chega atrasado e vê que os seus pais já se encontraram; ou você puxa o gatilho, mas o revólver não funciona; ou você puxa o gatilho, mas erra o alvo e acerta o único rival do seu pai com relação à sua mãe, com o que acaba facilitando a sua união; ou, quem sabe, quando você desembarca da máquina do tempo já não sente o desejo de impedir que os seus pais se encontrem. Independentemente das suas intenções ao entrar na máquina do tempo, os seus atos, depois do seu desembarque, fazem parte da história coerente do espaço-tempo. As leis da física rebatem todas as suas tentativas de contrariar a lógica. Tudo o que você faz encaixa-se com perfeição. Sempre foi e sempre será. Não se pode mudar o que é imutável.

Se o livre-arbítrio não for uma ilusão e se as viagens ao passado forem possíveis, a física quântica proporciona sugestões alternativas para o que poderia acontecer e o faz de uma maneira claramente diferente da formulação baseada na física clássica. Uma proposição particularmente convincente, defendida por Deutsch, recorre à interpretação dos muitos mundos da mecânica quântica. Lembre-se de que vimos no capítulo 7 que, de acordo com os muitos mundos, todos os resultados potenciais incorporados em uma função de onda — o tipo de *spin* de uma partícula, a localização de uma outra partícula etc. — encontram a sua realização em universos separados e paralelos. Este universo, de que temos consciência a todo momento, é apenas um entre um número infinito de universos em que todas as possíveis evoluções permitidas pela física quântica alcançam separadamente a sua realização. Nesse esquema, existe a tentação de pensar que a liberdade que experimentamos ao fazer esta ou aquela escolha reflete a nossa possibilidade de entrar neste ou naquele universo paralelo no momento seguinte. Evidentemente, como haveria um número infinito de pessoas iguais a você e a

mim espalhados por todos os universos paralelos, os conceitos de identidade pessoal e de livre-arbítrio têm de ser reinterpretados nesse contexto mais amplo.

Do ponto de vista das viagens no tempo e dos paradoxos correlatos, a interpretação dos muitos mundos sugere uma nova resolução. Quando você viaja para as 23h50 de 31 de dezembro de 1965, puxa a arma, aponta para o seu pai e aperta o gatilho, o revólver funciona e a bala atinge o alvo. Mas como não é isso o que acontece no universo a partir do qual você embarcou para a sua odisseia no tempo, a sua viagem tem de ter ocorrido não só através do tempo, mas *também de um universo paralelo para outro.* No universo paralelo em que você desembarcou, os seus pais nunca se encontraram. A interpretação dos muitos mundos nos assegura de que esse universo existe (uma vez que todos os universos compatíveis com as leis da mecânica quântica existem em algum lugar). Assim, segundo esse ponto de vista não enfrentamos nenhum paradoxo lógico, pois há várias versões de um mesmo momento, cada qual situada em um universo paralelo e diferente. Na interpretação dos muitos mundos, é como se houvesse um número infinito de pães do espaço-tempo, e não apenas um. No seu universo de origem, os seus pais se encontraram em 31 de dezembro de 1965, você nasceu, cresceu, sentiu raiva do seu pai, ficou fascinado com as viagens no tempo e embarcou em uma viagem para 31 de dezembro de 1965. No universo ao qual você chega, o seu pai é assassinado em 31 de dezembro de 1965, antes de encontrar-se com a sua mãe, por um pistoleiro que diz ser o seu filho, vindo do futuro. Nesse universo, nenhuma versão da sua pessoa nasce, mas isso não importa, porque a versão de você que apertou o gatilho *tem* pais. Acontece que eles vivem em um outro universo paralelo. Se alguém nesse universo acreditará na sua história ou se achará que você é louco, não sei. Mas o que é claro é que em ambos os universos — aquele que você deixou e aquele em que você entrou — evitaram-se circunstâncias contraditórias.

E ainda mais: mesmo nesse contexto ampliado, a sua viagem no tempo não muda o passado. No universo que você deixou, isso é claro, pois você não visitou o seu passado. No universo em que você entra, a sua presença às 23h50 de 31 de dezembro de 1965 não modifica aquele momento. Naquele universo, você estava, e sempre estará, presente naquele momento. Note que na interpretação dos muitos mundos, cada sequência de eventos fisicamente consistente acontece em um dos universos paralelos. O universo em que você entra é aquele em que o assassinato que você premeditou se realiza. A sua presença em 31 de dezembro de 1965 e toda a confusão que você gerou fazem parte da trama imutável da realidade daquele universo.

A interpretação dos muitos mundos oferece uma resolução similar para a questão do conhecimento que parece materializar-se a partir do nada, como vimos no

exemplo em que a minha mãe escrevia um artigo fundamental para a teoria das cordas. De acordo com a interpretação dos muitos mundos, em um dos inúmeros universos paralelos, a minha mãe rápida e *efetivamente* transforma-se em uma especialista na teoria das cordas e descobre por conta própria tudo o que li no trabalho assinado por ela. Quando fiz a minha viagem ao futuro, a minha máquina do tempo me levou *àquele* universo. O texto do trabalho da minha mãe, que li enquanto estava lá, foi realmente escrito por ela naquele universo. Quando viajei de volta no tempo, entrei em um outro universo paralelo, no qual a minha mãe tem dificuldade de compreender as sutilezas da física. Depois de passar anos tentando ser seu professor, acabo desistindo e finalmente digo a ela o que o trabalho deve conter. Mas neste cenário não há nenhum enigma quanto à responsabilidade pelo avanço feito. A descoberta cabe à versão da minha mãe no universo em que ela é um ás da física. O resultado prático das minhas diversas viagens foi o de que as suas descobertas foram comunicadas a uma outra versão dela própria, em outro universo paralelo. Supondo que você considere os universos paralelos mais fáceis de aceitar do que as descobertas sem autores — o que é uma proposição discutível —, aí está uma explicação menos desconcertante para a interação entre^a troca de conhecimentos e as viagens no tempo.

Nenhuma das proposições discutidas nesta seção, assim como nas anteriores, constitui necessariamente a *solução* para os enigmas e paradoxos das viagens no tempo. Ao contrário, essas proposições visam mostrar que os enigmas e paradoxos não excluem as viagens ao passado, uma vez que, de acordo com o que sabemos atualmente, a física sugere possíveis maneiras de contornar os problemas. Mas o fato de uma coisa não estar excluída não significa de modo algum que ela seja possível. Portanto, cabe-nos fazer a pergunta principal...

É POSSÍVEL VIAJAR AO PASSADO?

Os físicos mais sóbrios diriam que não. Mas seria um não qualificado, diferente do não redondo que você receberia se perguntasse se a relatividade especial permite que um objeto dotado de massa sofra uma aceleração que o leve a alcançar e a ultrapassar a velocidade da luz, ou se a teoria de Maxwell permite que uma partícula com uma unidade de carga elétrica desintegre-se em partículas com duas unidades de carga elétrica.

A verdade é que ninguém demonstrou que as leis da física proíbem de maneira absoluta as viagens no tempo em direção ao passado. Ao contrário, alguns físicos chegaram mesmo a elaborar instruções hipotéticas para a construção de

máquinas do tempo (quando falamos de máquinas do tempo, estaremos sempre nos referindo a um instrumento que seja capaz de viajar tanto ao passado quanto ao futuro), totalmente dentro do contexto das leis da física conhecidas, por uma civilização que dispusesse de capacidade tecnológica ilimitada. As proposições não têm nada a ver com o aparelho descrito por H. G. Wells, nem com o superautomóvel de Doc Brown. E os elementos do desenho industrial estão sempre roçando nos limites da física conhecida, o que leva muitos pesquisadores a suspeitar que, com os refinamentos subsequentes do nosso entendimento das leis da natureza, as proposições atuais e futuras para a construção de máquinas do tempo serão consideradas inalcançáveis, por estarem além do que é fisicamente possível. Mas, no dia de hoje, essa suspeita baseia-se em impressões e raciocínios circunstanciais, e não em provas concretas.

O próprio Einstein, durante a década das intensas pesquisas que levaram à publicação da teoria da relatividade geral, refletiu sobre a questão das viagens ao passado.[10] Francamente, teria sido estranho se ele não o tivesse feito. Como o seu remanejamento radical do espaço e do tempo destruiu dogmas havia tanto tempo aceitos, a questão era saber qual a extensão do terremoto: que aspectos da visão familiar e intuitiva do tempo sobreviveriam — se é que haveria sobreviventes entre eles. Einstein nunca escreveu muito sobre o tema das viagens no tempo porque, de acordo com a sua própria apreciação, ele nunca fez muito progresso nessa área. No entanto, nas décadas que se seguiram à publicação do seu trabalho sobre a relatividade geral, outros físicos o fizeram, com vagar, mas com firmeza.

Entre os primeiros trabalhos da relatividade geral com pertinência para o tema das máquinas do tempo, estão os que o físico escocês W. J. van Stockum[11] escreveu em 1937 e o que um colega de Einstein no Instituto de Estudos Avançados, Kurt Gödel, escreveu em 1949. Van Stockum estudou um problema hipotético da relatividade geral, em que um cilindro muito denso e infinitamente longo entra em movimento rotativo em torno do seu eixo (infinitamente) longo. Embora um cilindro infinito seja fisicamente irreal, a análise de Van Stockum levou a uma revelação interessante. Como vimos no capítulo 14, objetos de grande massa, quando em rotação, arrastam o espaço em um movimento semelhante a um remoinho. Neste caso, o remoinho é tão significativo que, como mostra a análise matemática, não só o espaço, mas também o tempo é sugado por ele. Em termos gerais, a rotação torce a direção do tempo de tal maneira que o movimento circular à volta do cilindro leva ao passado. Se você estiver a bordo de um foguete e rodear o cilindro, poderá voltar ao seu ponto de partida no espaço *antes* de ter começado a viagem. É evidente que ninguém pode construir um cilindro rotativo infinitamente longo, mas esse trabalho constituiu

um dos primeiros indícios de que as viagens ao passado poderiam não estar proibidas pela relatividade geral.

O trabalho de Gödel também investigava uma situação que envolvia o movimento rotativo. Porém, em vez de concentrar-se em um objeto que girasse dentro do espaço, Gödel estudou o que aconteceria quando todo o espaço sofresse um movimento rotativo. Mach teria achado que isso não faz sentido. Se todo o universo estiver em rotação, não haverá nada com relação a que essa alegada rotação possa estar acontecendo. Mach concluiria que um universo em rotação e um universo estacionário são a mesma coisa. Mas esse é um outro exemplo em que a relatividade geral não concorda plenamente com a concepção relacionai que Mach tinha do espaço. De acordo com a relatividade geral, faz todo sentido falar da rotação do universo como um todo, inclusive porque a partir dessa possibilidade decorrem consequências observacionais simples. Por exemplo, se dispararmos um raio laser em um universo em rotação, a relatividade geral mostra que ele parecerá viajar por uma trajetória espiral, e não por uma linha reta (é mais ou menos o que você veria se estivesse em um carrossel e soltasse um balão de gás para o alto). O aspecto surpreendente da análise de Gödel foi a sua percepção de que, se você estivesse em um foguete que seguisse uma trajetória apropriada em um universo em rotação, também poderia voltar ao lugar de origem no espaço *antes* do momento da sua partida. Um universo em rotação seria, portanto, ele próprio uma máquina do tempo.

Einstein cumprimentou Gödel pela sua descoberta, mas sugeriu que novas investigações poderiam mostrar que as soluções das equações da relatividade geral que permitem as viagens ao passado na verdade colidem com outros requisitos físicos essenciais, o que as situaria como simples curiosidades matemáticas. Quanto à solução de Gödel, as observações posteriores, cada vez mais precisas, minimizaram a sua relevância direta ao deixar claro que o nosso universo não está em rotação. Mas Van Stockum e Gödel deixaram sair o gênio da garrafa e nas duas décadas seguintes surgiram novas soluções para as equações de Einstein que permitiam as viagens ao passado.

Nos últimos tempos ocorreu um renascimento do interesse na concepção de máquinas do tempo. Na década de 1970, Frank Tipler reavaliou e refinou a solução de Van Stockum e, em 1991, Richard Gott, da Universidade de Princeton, descobriu outro método para construir uma máquina do tempo por meio do uso das chamadas cordas cósmicas (filamentos hipotéticos, infinitamente longos, remanescentes das transições de fase do universo primitivo). Todas essas são contribuições importantes, mas a proposição mais simples de descrever, utilizando conceitos que desenvolvemos nos capítulos

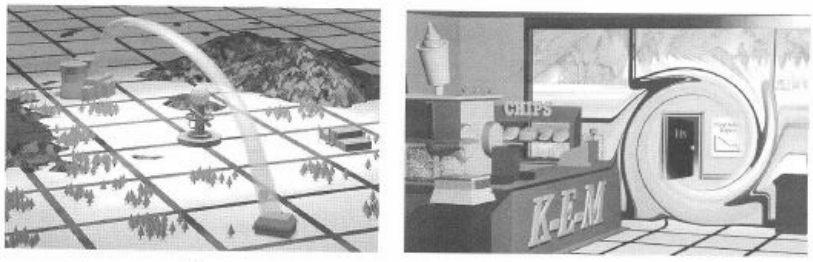
anteriores, foi formulada por Kip Thorne e seus alunos no Instituto Tecnológico da Califórnia — Caltech. Ela tem por base os buracos de minhoca.

GUIA PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DO TEMPO COM BASE EM BURACOS DE MINHOCA

Inicialmente, explorarei a estratégia básica para a construção da máquina do tempo de Thorne, que se vale de buracos de minhoca, e na seção seguinte discutirei os desafios com que se defrontaria o empreiteiro a quem Thorne encomendasse a execução do projeto.

Um *buraco de minhoca* é um túnel hipotético através do espaço. Os túneis familiares, que perfuram as montanhas, proporcionam atalhos para se chegar de um lugar a outro. Os buracos de minhoca têm a mesma função, mas diferem dos túneis convencionais em um aspecto importante. Enquanto os túneis convencionais proporcionam uma nova via através do espaço existente — a montanha e o espaço que ela ocupa já existiam antes que o túnel fosse construído —, os buracos de minhoca proporcionam uma via de um ponto a outro do espaço através de um tubo espacial novo, que não existia anteriormente. Se se removesse o túnel que perfura a montanha, o espaço ocupado por ele continuaria a existir. Se se removesse o buraco de minhoca, o espaço ocupado por ele desapareceria.

A figura 15.2 ilustra um buraco de minhoca que liga o mercado à usina nuclear de Springfield, mas o desenho engana porque o buraco de minhoca parece passar pelo espaço aéreo da cidade. Seria mais correto imaginá-lo como uma nova região do espaço que se conecta com o espaço comum e corrente apenas nas suas pontas — nas suas bocas. Se você estivesse andando pelas ruas de Springfield e esquadrinhasse o céu à procura de um buraco de minhoca, não veria nada. A única maneira de vê-lo seria ir ao mercado, onde você veria uma abertura no espaço normal — uma das bocas do buraco de minhoca. Olhando pela abertura, você veria o interior da usina atômica, localizada na segunda boca, como na figura 15.2b. Outro aspecto enganador da figura 15.2a está em que o buraco de minhoca não parece ser um atalho. Isso pode ser resolvido modificando-se a ilustração, como aparece na figura 15.3. Como se vê, o caminho normal entre o mercado e a usina atômica é, com efeito, mais longo do que a nova passagem espacial propiciada pelo buraco de minhoca. As contorções da figura 15.3 refletem as dificuldades de desenhar em uma página a geometria da relatividade geral, mas a figura dá uma ideia intuitiva da nova ligação que o buraco de minhoca proporcionaria.



(a) (b)

Figura 15.2. (*a*) *Buraco de minhoca que vai do mercado à usina nuclear.* (*b*) *Visão que se tem através do buraco de minhoca, quando se olha a partir da boca que está no mercado em direção à boca que está na usina nuclear.*

Ninguém sabe se os buracos de minhoca existem, porém há muitos anos os físicos já deixaram claro que eles são permitidos pela matemática da relatividade geral e que, portanto, são válidos como objetos de estudo teórico. Na década de 1950, John Wheeler e seus colaboradores estiveram entre os primeiros pesquisadores a investigar os buracos de minhoca, ocasião em que descobriram muitas das suas propriedades matemáticas fundamentais. Mais recentemente, contudo, Thorne e seus colaboradores revelaram a grande riqueza dos buracos de minhoca, ao perceberem que eles não só podem proporcionar atalhos através do espaço, mas também através do tempo.

A ideia é a seguinte: imagine que Bart e Lisa estejam parados, um em cada ponta do buraco de minhoca de Springfield — Bart na usina atômica e Lisa no mercado —, conversando tranquilamente sobre o que comprar para Homer no dia do seu aniversário, quando Bart resolve dar um pulinho até a galáxia de Andrômeda, para dar a Homer uns peixinhos andromedanos fritos, que ele adora. Lisa não está com vontade de viajar, mas, como ela sempre quis conhecer Andrômeda, convence Bart a colocar a sua boca do buraco de minhoca na nave espacial para a viagem, de modo que ela, na outra boca, possa dar uma olhada. Não pense que isso significa que Bart tenha que ir esticando o buraco de minhoca à medida que a viagem transcorre porque isso só faria sentido se o buraco de minhoca fizesse a ligação entre o mercado e a nave espacial de Bart através do espaço comum. Não é esse o caso. Como se vê na figura 15.4, graças às maravilhas da geometria da relatividade geral, o comprimento do buraco de minhoca pode permanecer fixo durante toda a viagem.

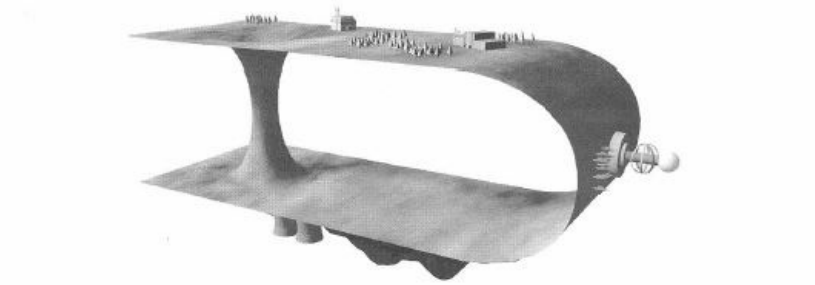


Figura 15.3. *Geometria que mostra mais claramente que o buraco de minhoca é um atalho. (As bocas do buraco de minhoca estão dentro do mercado e da usina nuclear, embora seja difícil visualizá-las nesta representação.)*

Esse é um ponto crucial. Ainda que Bart viaje para Andrômeda, a distância entre ele e Lisa, através do buraco de minhoca, não se modifica. Isso deixa claro o papel do buraco de minhoca como atalho através do espaço.

Para definir bem as coisas, digamos que Bart viaje para Andrômeda durante quatro horas a 99,9999999999999999% da velocidade da luz e continue conversando com Lisa através do buraco de minhoca, tal como vinham fazendo antes do voo. Quando a nave chega a Andrômeda, Lisa pede que Bart pare um pouco de falar, para que ela possa apreciar a vista sem atrapalhações. Ela fica exasperada com a insistência de Bart em terminar logo com a compra e voltar para casa, mas concorda em ficar conversando com ele até o seu regresso. Quatro horas e uns cinquenta jogos-da-velha depois, Bart aterrissa são e salvo no espaço-porto de Springfield.

Ao olhar pela janela da nave, no entanto, ele leva um grande susto. Os edifícios são completamente diferentes e o painel que fica em cima do estádio marca uma data cerca de 6 milhões de anos no futuro. “Uai!?!”, ele exclama, mas um momento depois tudo fica claro. Ele se lembra de uma conversa que teve recentemente com um amigo, que lhe disse que, quanto mais rápido uma pessoa viajar, mais devagar o seu relógio anda. Se a pessoa viajar para o espaço a uma velocidade altíssima e regressar, apenas algumas horas podem ter transcorrido a bordo da nave espacial, mas milhares, ou milhões de anos, se não forem mais, terão passado para uma outra pessoa que tenha ficado estacionária. Com um cálculo rápido, Bart confirma que, à velocidade em que ele estava viajando, as oito horas transcorridas a bordo corresponderiam a 6 milhões de anos na Terra. A data no painel está correta. Bart percebe que viajou para o futuro longínquo da Terra.

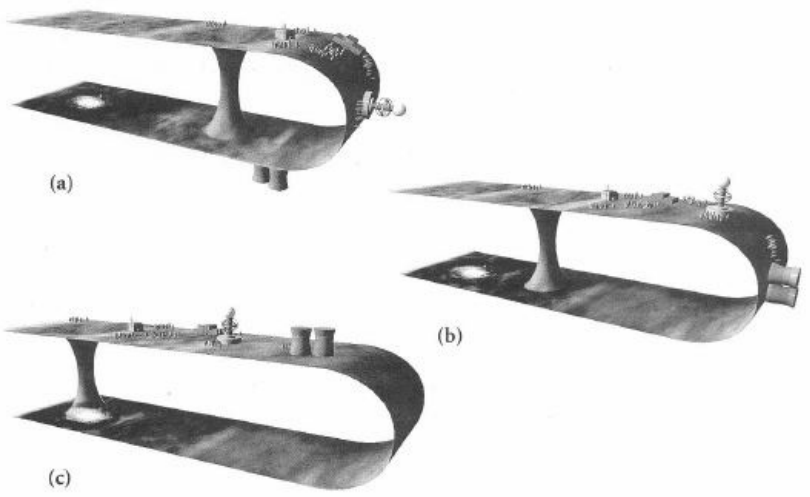


Figura 15.4. (*a*) *Buraco de minhoca que liga o mercado à usina nuclear.* (*b*) A *abertura inferior do buraco de minhoca é transportada* (*a partir da usina nuclear*) *para o espaço exterior* (*em uma espaçonave que não aparece na figura*). *A extensão do buraco de minhoca permanece a mesma.* (*c*) *A abertura do buraco de minhoca chega à galáxia de Andrômeda; a outra abertura permanece no mercado. A extensão do buraco de minhoca permanece constante durante toda a viagem.*

"... Bart! Alô, Bart!", Lisa grita através do buraco de minhoca. "Você está me escutando? Venha. Estou te esperando para o jantar." Bart olha para a sua boca do buraco de minhoca e diz a Lisa que ele já aterrissou no espaçoporto de Springfield. Lisa olha com mais atenção pela abertura do buraco de minhoca e vê que Bart está falando a verdade, mas em seguida olha pela janela para o espaçoporto e não vê a nave espacial. "Não estou entendendo", ela diz.

"Na verdade, está tudo certo", Bart responde, com visível orgulho. "Eu aterrissei no espaçoporto, mas seis milhões de anos no futuro. Você não me vê no espaçoporto porque está olhando para o lugar certo, mas no tempo errado. Você está olhando seis milhões de anos atrás."

"Ah, sei! É aquele negócio da relatividade do tempo, da teoria de Einstein", Lisa concorda. "Legal! De qualquer maneira quero ir para casa jantar. Então entra logo no buraco de minhoca porque temos de andar depressa." "Tudo bem", diz Bart, atravessando o buraco de minhoca. No mercado ele compra uns biscoitos de manteiga e vai com Lisa para casa.

Veja que, embora a passagem de Bart pelo buraco de minhoca tenha durado apenas um momento, com esse ato ele viajou *para um passado de 6 milhões de anos*. Ele, a nave espacial e a boca do buraco de minhoca aterrissaram no futuro longínquo. Se ele tivesse saído da nave, falado com as pessoas e visto os jornais, tudo teria confirmado esse fato. Contudo, ao passar pelo buraco de minhoca e reencontrar Lisa, ele se viu de volta no presente. Isso seria igualmente verdadeiro para quem quer que passasse junto com Bart pela boca do buraco de minhoca: tal pessoa também viajaria 6 milhões de anos de volta no tempo. Do

mesmo modo, qualquer pessoa que entrasse pela boca do buraco de minhoca no mercado e saísse pela outra boca, que Bart deixou aberta na nave espacial, viajaria 6 milhões de anos no futuro. O que importa notar é que Bart levou uma das bocas do buraco de minhoca em uma viagem não só através do espaço, mas também através do tempo. *A viagem de Bart levou-o, juntamente com a boca do buraco de minhoca, para o futuro da Terra. Em síntese, Bart transformou um túnel através do espaço em um túnel através do tempo. Transformou o buraco de minhoca em uma máquina do tempo.*

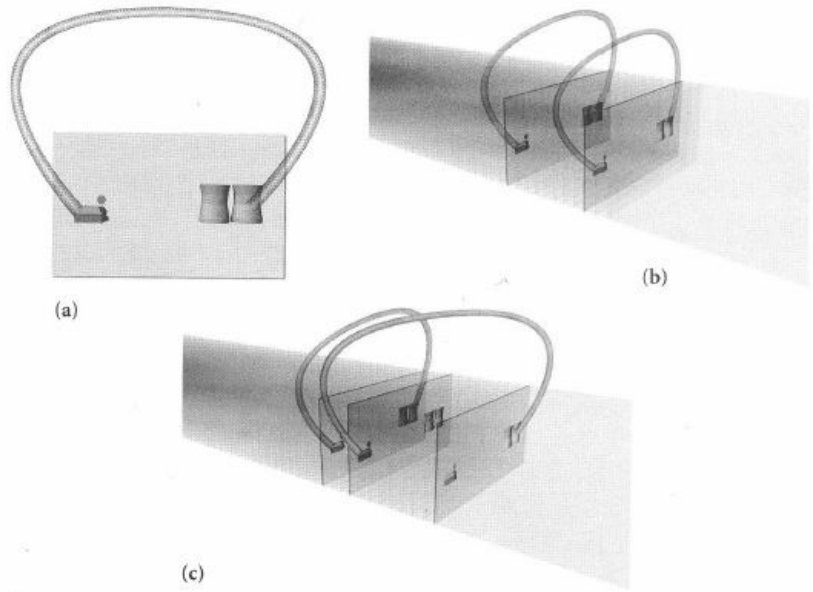


Figura 15.5. (*a*) *Um buraco de minhoca, criado em algum momento do tempo, liga uma localização do espaço à outra.* (*b*) *Se as bocas do buraco de minhoca não se moverem, uma com relação à outra, elas "passam" através do tempo com a mesma velocidade, de modo que o túnel liga as duas regiões no mesmo tempo.* (*c*) *Se uma das bocas do buraco de minhoca fizer uma viagem de ida e volta (não mostrada na ilustração), o tempo transcorrido nessa boca será menor e, portanto, o túnel ligará as duas regiões do espaço em momentos diferentes do tempo. O buraco de minhoca torna-se uma máquina do tempo.*

A figura 15.5 mostra uma maneira genérica de visualizar o que acontece. Na figura 15.5a, vemos um buraco de minhoca que liga uma localização do espaço à outra. A configuração do buraco de minhoca é desenhada de maneira a ressaltar que ele está fora do espaço comum. A figura 15.5b mostra a evolução temporal desse buraco de minhoca, supondo que ambas as suas bocas permaneçam estacionárias. (As fatias de tempo são as de um observador estacionário.) A figura 15.5c mostra o que acontece quando uma das bocas é colocada em uma nave espacial e levada para uma viagem de ida e volta. Para a boca que se move, assim como para um relógio que se move, o tempo passa mais devagar, de modo que a boca que se move é transportada para o futuro. (Se o tempo transcorrido no relógio que se move é de uma hora enquanto o tempo transcorrido nos relógios

estacionários é de mil anos, o relógio que se move ter-se-á deslocado para o futuro dos relógios estacionários.) Assim, ao contrário do que acontece quando a boca de um buraco de minhoca estacionário liga-se, através do túnel, com a outra boca na mesma fatia do tempo, a boca do buraco de minhoca que se move liga-se com a outra boca em uma fatia do tempo futuro, como se vê na figura 15.5c. A menos que as bocas continuem a mover-se, a diferença de tempo entre elas ficará congelada. A qualquer momento, uma pessoa que entrar por uma boca e sair pela outra será um viajante no tempo.

A CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DO TEMPO COM BASE NOS BURACOS DE MINHOCA

Temos claro, agora, um projeto para a construção de uma máquina do tempo. Passo 1: encontre ou crie um buraco de minhoca suficientemente amplo para que você, ou qualquer coisa que você queira fazer viajar através do tempo, possa passar por ele. Passo 2: estabeleça uma diferença de tempo entre as bocas do buraco de minhoca — por exemplo, fazendo com que uma se mova com relação à outra. Pronto. É isso.

E na prática? Bem, como mencionei no princípio, ninguém sabe sequer se os buracos de minhoca existem. Alguns físicos sugeriram que eles devem ser abundantes no âmbito microscópico do tecido espacial, sendo produzidos continuamente por flutuações quânticas do campo gravitacional. Sendo assim, o desafio consistiria em ampliá-los para o nível macroscópico. Já se fizeram proposições sobre como isso poderia ser feito, mas elas situam-se talvez um pouco além dos limites que as teorias impõem às fantasias. Outros imaginam a criação de grandes buracos de minhoca como um projeto de engenharia no âmbito da relatividade geral aplicada. Sabemos que o espaço responde à distribuição da massa e da energia, de modo que, com suficiente controle sobre a massa e a energia, poderíamos fazer com que uma região do espaço gerasse um buraco de minhoca. Isso apresenta um complicador adicional, porque, assim como temos de perfurar uma montanha para fazer a boca de um túnel, também teríamos de rasgar o tecido do espaço para fazer a boca de um buraco de minhoca.[12] Ninguém sabe se as leis da física permitem esses rasgos no espaço. Certos trabalhos sobre a teoria das cordas, com os quais estive envolvido (veja a página 446), mostraram que alguns tipos de rasgos espaciais são possíveis, mas até o momento não se tem ideia sobre se esses rasgos poderiam ser adequados para a criação de buracos de minhoca. O resumo da ópera é que a aquisição intencional de um buraco de minhoca macroscópico é uma fantasia que, na melhor das hipóteses, está *muito* longe de ser realizada.

Além disso, mesmo que conseguíssemos pôr as mãos em um buraco de minhoca macroscópico, outras coisas ainda estariam faltando, e teríamos de enfrentar dois obstáculos significativos. Em primeiro lugar, na década de 1960, Wheeler e Robert Fuller mostraram, usando as equações da relatividade geral, que os buracos de minhoca são instáveis. As suas paredes tendem ao colapso em uma fração de segundo, o que elimina a sua utilidade potencial para qualquer tipo de viagem. Mais recentemente, contudo, alguns físicos (inclusive Thorne e Morris, e também Matt Visser) encontraram uma possível saída para o problema do colapso. Se o buraco de minhoca não estiver vazio e contiver certo tipo de material — a chamada matéria exótica —, esse material pode exercer uma força sobre as paredes que tornaria possível manter o buraco de minhoca aberto e estável. Embora a matéria exótica seja similar, em seus efeitos, a uma constante cosmológica, ela geraria a gravidade repulsiva para fora por possuir energia negativa (e não apenas a pressão negativa característica de uma constante cosmológica).[13] Em condições altamente especiais, a mecânica quântica admite a energia negativa,[14] mas a geração de quantidades suficientes de matéria exótica para manter aberto um buraco de minhoca macroscópico seria um desafio monumental. (Por exemplo, Visser calculou que a quantidade de energia negativa necessária para manter aberto um buraco de minhoca de um metro de largura corresponde aproximadamente ao total da energia produzida pelo Sol em 10 bilhões de anos.[15])

Em segundo lugar, mesmo que encontrássemos ou criássemos um buraco de minhoca macroscópico, e mesmo que de algum modo conseguíssemos impedir o súbito colapso das suas paredes, e mesmo que conseguíssemos induzir uma diferença de tempo entre as suas bocas (por exemplo, fazendo com que uma delas se desloque a altas velocidades), ainda assim permaneceria um outro obstáculo para a criação de uma máquina do tempo. Diversos físicos, inclusive Stephen Hawking, levantaram a possibilidade de que as flutuações no vácuo — a agitação derivada da incerteza quântica experimentada por todos os campos, até no espaço vazio, que discutimos no capítulo 12 — poderiam destruir um buraco de minhoca no mesmo momento em que ele fosse posicionado para converter-se em máquina do tempo. A razão está em que, exatamente no momento em que se torna possível viajar no tempo através do buraco de minhoca, entra em ação um devastador mecanismo de retroalimentação semelhante ao ruído penetrante que ocorre quando os níveis do microfone e do alto-falante em um sistema de som não estão bem ajustados. As flutuações no vácuo provenientes do futuro podem viajar pelo buraco de minhoca ao passado, percorrer o espaço e o tempo comuns, voltar pelo buraco de minhoca para o futuro, e depois novamente para o passado, criando um ciclo infindável e enchendo o buraco de minhoca com quantidades

cada vez maiores de energia. Presumivelmente, essa intensa geração de energia destruiria o buraco de minhoca. As pesquisas teóricas sugerem que essa é uma possibilidade real, mas os cálculos necessários são demasiado altos para os nossos conhecimentos atuais de relatividade geral e mecânica quântica em um espaço-tempo curvo e, em consequência, não temos comprovações efetivas.
Os desafios à construção de máquinas do tempo com base em buracos de minhoca são claramente imensos. Mas a palavra final só poderá ser dada depois de alcançarmos um maior refinamento nos campos da mecânica quântica e da gravidade, talvez mediante os avanços esperados na teoria das supercordas. Embora, no nível intuitivo, os físicos estejam geralmente de acordo quanto a que as viagens ao passado são impossíveis, a rigor a questão ainda permanece em aberto.

TURISMO CÓSMICO

Falando em viagens no tempo, Hawking levantou uma questão interessante. Por que, perguntou ele, se as viagens no tempo são possíveis, não fomos inundados com visitantes do futuro? Bem, você pode argumentar, talvez tenhamos sido. E pode prosseguir dizendo que já retivemos tantos deles nos nossos controles de entrada de turistas que os demais já não se atrevem a identificar-se perante as nossas autoridades. É claro que Hawking está brincando, e eu também, mas a questão que ele suscita é séria. Se você acredita, como eu, que não recebemos visitas do futuro, será que isso significa que as viagens no tempo são impossíveis? Evidentemente, se as pessoas do futuro conseguiram construir máquinas do tempo, algum historiador certamente terá obtido uma bolsa de estudos para observar ao vivo a fabricação da primeira bomba atômica, ou a primeira viagem à Lua, ou a primeira gravação do *Big Brother* na televisão. Assim, se acreditamos que ninguém do futuro nos tenha visitado, talvez estejamos, implicitamente, dizendo que não acreditamos que uma máquina do tempo com essas propriedades venha a ser construída.
Essa não é, no entanto, uma conclusão inevitável. *As máquinas do tempo até então propostas não permitem viagens a tempos anteriores ao da construção da própria máquina do tempo.* No que diz respeito às máquinas do tempo com base em buracos de minhoca, isso é fácil de ver examinando-se a figura 15.5. Embora haja uma diferença de tempo entre as bocas do buraco de minhoca e embora essa diferença permita viagens no tempo para a frente e para trás, não é possível alcançar um tempo anterior àquele em que a diferença de tempo foi estabelecida. O próprio buraco de minhoca não existe na extrema esquerda do pão do espaço-

tempo, de modo que não há como usá-lo para chegar a esse ponto. Assim, se a primeira máquina do tempo for construída, digamos, dentro de 10 mil anos, esse momento, sem dúvida, atrairá muitos turistas do futuro, mas todos os tempos anteriores, como o nosso, permanecerão inacessíveis.

Acho curioso e significativo que o nosso entendimento atual das leis da natureza não só sugira como evitar os aparentes paradoxos das viagens no tempo, mas também ofereça proposições quanto à própria realização de tais viagens. Não me entenda mal: incluo-me entre os físicos sóbrios que creem intuitivamente que um dia verificaremos que as viagens ao passado não são possíveis. Porém até que tenhamos a prova definitiva, acho justo e correto permanecermos abertos a essa possibilidade. Na pior das hipóteses, os pesquisadores que se dedicam a essas questões estarão aumentando substancialmente a nossa compreensão do espaço e do tempo em circunstâncias extremas. Na melhor das hipóteses, eles estarão dando os primeiros passos para a nossa integração na via expressa do espaço-tempo. Afinal de contas, cada momento que passa sem que sejamos capazes de construir uma máquina do tempo é um momento que estará para sempre fora do nosso alcance e do alcance dos que nos seguirão no futuro.

16. O futuro de uma alusão

Perspectivas para o espaço e o tempo

Os físicos passam grande parte das suas vidas em um estado de confusão. É uma marca da profissão. Para ter êxito na física é preciso abraçar a dúvida e seguir pelo caminho sinuoso que leva à clareza. O torturante desconforto da perplexidade é o que inspira homens e mulheres, que são iguais a todos os outros, a praticar atos de extraordinário engenho e criatividade. Nada exige tanta concentração da mente quanto os detalhes dissonantes que requerem resoluções harmoniosas. Mas na busca da explicação, ao procurar novos enfoques para resolver as questões pendentes, os teóricos devem mover-se com cautela, sem se deixar desorientar na floresta densa, guiados basicamente pela intuição, pelos impulsos, pelos indícios e pelos cálculos. E como a maioria dos pesquisadores tem o hábito de ocultar as suas pegadas, as descobertas muitas vezes oferecem poucas informações a respeito do caminho percorrido. Mas que não se perca de vista o fato de que o esforço é essencial. A natureza não entrega os seus segredos facilmente.

Neste livro examinamos vários capítulos da história das tentativas da nossa espécie para compreender o espaço e o tempo. E, embora tenhamos alcançado êxitos surpreendentes, ainda não chegamos ao momento definitivo de “heureca”, quando toda confusão cessa e a clareza prevalece. Não há dúvida de que ainda estamos no meio da floresta. E daqui, para onde vamos? Qual será o próximo capítulo da história do espaço-tempo? É claro que ninguém sabe ao certo. Mas nos últimos anos surgiram diversas pistas. Embora elas ainda tenham que ser integradas em um quadro coerente, muitos físicos creem que já temos uma indicação quanto à próxima revolução na maneira de ver o cosmo. Com o tempo, as nossas concepções atuais sobre o espaço e o tempo podem passar a ser vistas como simples alusões aos princípios mais fundamentais, mais profundos e mais sutis que conformam a realidade física. No capítulo final deste relato, consideremos algumas dessas pistas e tratemos de vislumbrar os cenários para onde nos dirigimos no esforço contínuo de conhecer o tecido do cosmo.

O ESPAÇO E O TEMPO SAO CONCEITOS FUNDAMENTAIS?

O filósofo alemão Immanuel Kant sugeriu que pensar e descrever o universo sem levar em conta o espaço e o tempo seria algo não só difícil, mas

absolutamente impossível. Francamente, entendo o ponto de vista de Kant. Sempre que me sento, fecho os olhos e trato de pensar sobre as coisas sem contextualizá-las no espaço e no tempo, acabo desistindo. Inexoravelmente. O espaço, através do contexto, e o tempo, através da mudança, sempre encontram uma maneira de aparecer. Ironicamente, a ocasião em que mais me aproximo de libertar o pensamento de uma associação direta com o espaço-tempo é quando mergulho nos cálculos matemáticos (que tantas vezes têm a ver com o próprio espaço-tempo), porque a natureza do exercício parece ter o poder de absorver, ainda que de forma momentânea, os meus pensamentos em um raciocínio abstrato, aparentemente independente do espaço e do tempo. Porém os próprios pensamentos e o corpo em que eles ocorrem fazem parte, claramente, do espaço e do tempo que nos são familiares. Na verdade, evitar o espaço e o tempo é mais difícil do que se afastar da própria sombra.

Apesar de tudo, muitos dos físicos mais importantes dos nossos dias suspeitam de que o espaço e o tempo, embora tudo permeiem, talvez não sejam verdadeiramente fundamentais. Assim como a dureza de uma bala de canhão decorre das propriedades coletivas dos seus átomos, e assim como o perfume de uma rosa decorre das propriedades coletivas das suas moléculas, e assim como a rapidez de uma pantera decorre das propriedades coletivas dos seus músculos, nervos e ossos, também as propriedades do espaço e do tempo — que constituem um dos temas principais deste livro — podem decorrer do comportamento coletivo de algum ou alguns outros componentes mais fundamentais, que ainda não foram identificados.

Os físicos por vezes resumem essa possibilidade dizendo que o espaço- tempo pode ser uma ilusão — afirmação provocante, mas cujo significado requer uma interpretação adequada. Afinal, se você fosse atingido por uma bala de canhão, ou se inalasse a deliciosa fragrância de uma rosa, ou se visse uma pantera em ação, não negaria a existência dessas coisas simplesmente porque elas são compostas por entidades mais básicas e elementares. Acho, ao contrário, que quase todos estaríamos de acordo em que esses aglomerados de matéria existem e em que muito se pode aprender estudando-se como as suas características familiares decorrem dos seus componentes atômicos. Mas, como eles são objetos compostos, o que não devemos tentar é construir uma teoria do universo com base em balas de canhão, rosas ou panteras. Do mesmo modo, se descobrirmos que o espaço e o tempo são entidades compostas, isso não significaria que as suas manifestações comuns, do balde de Newton à gravidade de Einstein, são ilusórias. Praticamente não há dúvida de que o espaço e o tempo conservarão a sua posição de tudo abranger na realidade experiencial, qualquer que seja o desenvolvimento futuro dos nossos conhecimentos. Contudo, se o espaço-tempo

for uma composição derivada de elementos mais básicos, isso significará que teremos de descobrir como fazer uma descrição ainda mais elementar do universo, na qual não entrem, nem o espaço nem o tempo. Nesse caso, a ilusão teria sido criada por nós mesmos, derivada da crença de que o entendimento mais profundo do cosmo daria um enfoque mais preciso e agudo ao espaço e ao tempo. Assim como a dureza de uma bala de canhão, o perfume de uma rosa e a velocidade de uma pantera desaparecem quando examinamos a matéria nos níveis atômico e subatômico, o espaço e o tempo podem também dissolver-se quando vistos a partir da formulação mais fundamental das leis da natureza.

Pode-lhe parecer muito improvável que o espaço e o tempo não estejam entre os componentes fundamentais do cosmo. E você pode estar certo. Mas os rumores a respeito de uma próxima saída do espaço-tempo do reino das leis mais profundas da física não nasceram de teorias bizarras. Ao contrário, a ideia é afim com uma série de considerações judiciosas. Vejamos algumas das principais entre elas.

MÉDIA QUÂNTICA

No capítulo 12, discutimos como o tecido do espaço — e todas as demais coisas em um universo quântico — sofre as agitações da incerteza quântica. Essas flutuações, como você se lembrará, infernizam as teorias que se baseiam em partículas pontuais e as impedem de desenvolver uma teoria quântica adequada para a gravidade. Ao substituir as partículas pontuais por cordas e laços, a teoria das cordas distribui as flutuações — reduzindo substancialmente a sua magnitude — e dessa maneira resulta na unificação entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Contudo, as flutuações do espaço-tempo, ainda que diminuídas, certamente continuam a existir (como ilustra o penúltimo nível de ampliação da figura 12.2) e até mesmo fornecem importantes pistas com relação ao destino do espaço-tempo.

Em primeiro lugar, aprendemos que o espaço e o tempo familiares, que permeiam os nossos pensamentos e constituem a base das nossas equações, são uma espécie de processo de obtenção de uma média. Pense nos pixels que compõem a imagem da televisão e que você percebe nitidamente quando vê a tela bem de perto. Essa imagem é muito diferente da que você vê a uma distância mais confortável, porque quando você já não consegue individualizar os pixels, os seus olhos os combinam, formando uma média que aparece nítida. Note que é só por meio desse processo de tirar a média que os pixels produzem a imagem contínua que nos é familiar. Do mesmo modo, a estrutura microscópica do espaço-tempo está cheia de ondulações aleatórias, mas nós não tomamos consciência delas porque carecemos de uma capacidade de resolução adequada a

essas escalas mínimas. Em vez disso, os nossos olhos, e mesmo os nossos equipamentos mais potentes, combinam as ondulações formando uma média, de maneira muito semelhante ao que ocorre com os pixels da televisão. Como as flutuações são aleatórias, em uma região pequena do espaço, há, tipicamente, tantas ondulações "para cima" quanto "para baixo", razão pela qual, ao tirar-se a média, elas tendem a cancelar-se mutuamente, produzindo um espaço-tempo plácido. Mas, tal como na analogia da televisão, *é só por meio desse processo de tirar a média que surge uma forma tranquila e regular para o espaço-tempo.*

A média quântica provê uma interpretação simples para a afirmação de que o espaço-tempo familiar pode ser uma ilusão. As médias servem para muitos fins, mas, por sua própria natureza, não fornecem uma imagem discriminada dos detalhes. A família média nos Estados Unidos tem 2,2 filhos, mas você nunca conseguirá visitar uma família que tenha 2,2 filhos. O preço médio de um galão de leite nos EUA é de 2,783 dólares, mas será muito difícil encontrar um mercado que o venda exatamente a esse preço. Assim também, o espaço-tempo familiar é, ele próprio, o resultado de um processo de formação de uma média e pode não permitir a descrição dos detalhes de algo que devêssemos considerar como elementar. O espaço e o tempo podem ser apenas conceitos aproximativos e coletivos, extremamente úteis para analisarmos o universo em todas as escalas maiores do que a ultramicroscópica, mas tão ilusórios quanto uma família com 2,2 filhos.

O segundo ensinamento correlato é o de que as agitações quânticas cada vez mais intensas que se formam nas escalas cada vez menores sugerem que a noção de dividir as distâncias ou as durações em unidades cada vez menores alcança um limite à altura da distância de Planck (10^{-33} centímetros) e do tempo de Planck (10^{-43} segundos). Vimos essa ideia no capítulo 12, quando enfatizamos que, embora essa noção entre claramente em conflito com as nossas experiências normais do espaço e do tempo, não chega a ser surpreendente que uma propriedade importante para a vida cotidiana não consiga sobreviver nos domínios microscópicos. E como a divisibilidade arbitrária do espaço e do tempo é uma das suas propriedades com a qual temos mais familiaridade, a inaplicabilidade desse conceito às escalas ultrapequenas é mais um indício de que algo mais existe nas micro profundidades — algo que poderia ser o substrato último do espaço-tempo —, a entidade à qual alude a noção usual de espaço-tempo. A nossa expectativa é de que esse componente final, esse material mais elementar do espaço-tempo, não permita novas divisões em partes ainda menores em função das violentas flutuações que aí encontraríamos e que seja, portanto, muito diferente do espaço-tempo que vivenciamos diretamente nas escalas maiores. Parece provável, então, que a aparência dos componentes

fundamentais do espaço-tempo — o que quer que eles sejam — passe por uma transformação significativa no processo por meio do qual eles fornecem a média que constitui o espaço-tempo da nossa experiência cotidiana.
Dessa maneira, procurar o espaço-tempo familiar nas leis mais profundas da natureza pode ser como apreciar a *Nona Sinfonia* de Beethoven ouvindo cada uma das suas notas individualmente, ou um quadro de Monet observando apenas cada uma das suas pinceladas. Tal como nos casos dessas obras-primas da expressão humana, o conjunto do espaço-tempo da natureza pode ser tão diferente das partes que o compõem que não exista nada, no nível fundamental, que se pareça com ele.

GEOMETRIA E TRADUÇAO

Outra consideração, que os físicos denominam dualidade geométrica, também sugere que o espaço-tempo não seja elementar, mas o faz a partir de um ponto de vista bem diferente. A sua descrição é um pouco mais técnica do que a da média quântica; portanto, sinta-se livre para saltar etapas se esta seção começar a ficar muito pesada. Porém, como diversos pesquisadores consideram que este material está entre as características mais emblemáticas da teoria das cordas, vale a pena tratar de conhecer a essência das suas ideias.
No capítulo 13 vimos como as cinco teorias das cordas, supostamente diferentes, são, na verdade, diferentes traduções de uma mesma teoria. Entre outras coisas, ressaltamos que essa é uma percepção importante porque, por meio da tradução, questões extremamente difíceis por vezes se tornam muito mais simples e fáceis de responder. Mas há um aspecto do dicionário das traduções que unifica as cinco teorias que não mencionei até agora. Assim como o grau de dificuldade de uma questão pode alterar-se radicalmente por meio da tradução de uma formulação para outra, o mesmo sucede com a descrição da forma geométrica do espaço-tempo. Veja o que quero dizer com isso.
Como a teoria das cordas requer mais do que a dimensão temporal e as três dimensões espaciais que conhecemos, motivou-nos, nos capítulos 12 e 13, a questão de saber onde essas dimensões adicionais poderiam estar escondidas. A resposta que encontramos é que elas podem estar enroladas, ocupando um tamanho que até aqui escapou à nossa detecção, por ser menor do que a nossa capacidade de examiná-las experimentalmente. Vimos também que a física, nas dimensões grandes que nos são familiares, depende do tamanho e da forma das dimensões adicionais porque as suas propriedades geométricas afetam os padrões vibratórios que as cordas podem executar. Bem. Vamos agora à parte em que não toquei.

O dicionário que traduz as questões colocadas em uma das teorias das cordas em termos de outras questões colocadas nas outras teorias, *assim também traduz a geometria que as dimensões adicionais têm em uma das teorias para outras geometrias que essas dimensões têm nas demais teorias.* Se, por exemplo, você estiver estudando as implicações físicas da teoria das cordas de tipo IIA com relação às dimensões adicionais recurvadas em uma forma e um tamanho particulares, todas as conclusões a que você chegar poderão, pelo menos em princípio, ser deduzidas por meio de traduções adequadas dessa questão, por exemplo, na teoria das cordas de tipo IIB**.** Mas o dicionário das traduções exige que as dimensões adicionais da teoria IIB estejam recurvadas em uma forma geométrica específica que depende da forma dada pela teoria IIA**,** *mas difere dela em linhas gerais*. Em síntese, determinada teoria das cordas com dimensões recurvadas em determinada forma geométrica corresponde — por ser a sua tradução — a outra teoria das cordas com dimensões recurvadas que têm uma forma geométrica *diferente***.**

E as diferenças na geometria do espaço-tempo não têm de ser necessariamente pequenas. Por exemplo, se uma das dimensões adicionais, digamos da teoria das cordas de tipo IIA**,** estiver recurvada em um círculo, como na figura 12.7, o dicionário das traduções mostra que isso é absolutamente equivalente ao que ocorre com o tipo IIB**,** em que uma das dimensões adicionais também está recurvada em um círculo, mas cujo raio, neste caso, é *inversamente* proporcional ao do círculo original. Se o primeiro círculo for pequeno, o segundo será grande, e vice-versa. E não há maneira alguma de distinguir entre as duas geometrias. (Se expressarmos os comprimentos como múltiplos da distância de Planck, e se o raio de um círculo for *R*, o dicionário mostrará que o outro círculo tem raio igual a 1/R.) Você poderia pensar que seria fácil distinguir imediatamente entre uma dimensão pequena e uma grande, mas na teoria das cordas nem sempre é assim. Todas as observações derivam das interações entre as cordas e essas duas teorias, a de tipo IIA**,** com uma dimensão circular grande, e a de tipo IIB**,** com uma dimensão circular pequena, são simplesmente traduções diferentes — diferentes expressões — de uma mesma estrutura física. Cada observação descrita em uma das teorias das cordas tem uma descrição alternativa e igualmente viável nas outras teorias, ainda que a linguagem de cada teoria e as interpretações dadas por ela possam ser diferentes. (Isso é possível porque há duas configurações qualitativamente diferentes para as cordas que se movem em uma dimensão circular: uma quando a corda se estende à volta de todo o círculo, como um elástico em uma lata de refrigerante, e outra quando a corda reside em uma região do círculo, mas não o envolve por completo. A primeira tem energias

que são *proporcionais* ao raio do círculo [quanto maior for o raio, mais longas serão as cordas que o envolvem e, portanto, mais energia elas terão de conter] e a segunda tem energias que são *inversamente proporcionais* ao raio [quanto menor for o raio, mais enclausuradas as cordas estarão e, portanto, mais energia elas utilizarão para mover-se, em razão da incerteza quântica]. Veja que, se o círculo original for substituído por outro com o raio *inverso*, e trocarmos também as cordas "envolventes" pelas "não envolventes", as energias físicas — e, em última análise, a própria estrutura física — não serão afetadas. Isso é exatamente o que o dicionário das traduções requer para passar da teoria de tipo IIA para a de tipo IIB e é também por isso que duas geometrias aparentemente diferentes — uma dimensão circular grande e outra pequena — podem ser equivalentes.)

Uma ideia similar também prevalece se substituirmos as dimensões circulares pelas formas de Calabi-Yau, de natureza mais complexa, que apresentamos no capítulo 12. O dicionário traduz determinada teoria das cordas com dimensões adicionais recurvadas em uma forma de Calabi-Yau específica para outra teoria das cordas com dimensões adicionais recurvadas em outra forma de Calabi-Yau (forma essa que é denominada *forma dual* ou *espelho* da original). Nesses casos, não só os tamanhos das formas de Calabi-Yau podem diferir, mas também as suas formas, inclusive o número e o tipo dos seus rasgos. Porém o dicionário das traduções mostra que essas diferenças são tais que, ainda que as dimensões adicionais tenham tamanhos e formas diferentes, as estruturas físicas que decorrem de cada teoria são absolutamente idênticas. (Há dois tipos de rasgos nas formas de Calabi-Yau, mas os padrões vibratórios das cordas — e, por conseguinte, as suas implicações físicas — são sensíveis apenas à *diferença* entre o número de rasgos de cada tipo. Assim, se uma forma de Calabi-Yau tiver, digamos, dois rasgos do primeiro tipo e cinco do segundo e outra forma tiver cinco rasgos do primeiro tipo e dois do segundo, ambas as formas, embora difiram entre si como entes geométricos, podem dar lugar a estruturas físicas idênticas. Para os detalhes relativos à dualidade geométrica que envolve os círculos e as formas de Calabi-Yau, veja O *universo elegante*, capítulo 10).

A partir de uma outra perspectiva, portanto, isso acentua a suspeita de que o espaço não seja um conceito elementar. Alguém que descreva o universo usando uma das cinco teorias das cordas afirmaria que o espaço, inclusive as dimensões adicionais, tem um tamanho e uma forma particulares, enquanto outra pessoa, usando outra das teorias das cordas, afirmaria que o espaço, inclusive as dimensões adicionais, tem um tamanho e uma forma diferentes. O fato de que ambos esses observadores estejam simplesmente empregando *descrições matemáticas* alternativas para o mesmo *universo físico* não significa que um

esteja certo e o outro errado. Ambos estariam certos, ainda que as suas conclusões a respeito do espaço — quanto ao tamanho e à forma — divergissem. Note também que não se trata de que eles estejam cortando o pão do espaço-tempo de maneiras diferentes e igualmente válidas, como na relatividade especial. Esses dois observadores não estariam de acordo quanto à própria estrutura global do espaço-tempo. Essa é a questão. Se o espaço-tempo fosse realmente elementar, a expectativa da maioria dos físicos seria a de que todos, independentemente da perspectiva — independentemente da linguagem ou da teoria utilizada —, estivessem de acordo quanto às suas propriedades geométricas. Mas o fato de que, pelo menos no contexto da teoria das cordas, esse não é necessariamente o caso, faz crer que o espaço-tempo possa ser um fenômeno secundário.

Somos, portanto, levados a perguntar: se as pistas descritas nas duas últimas seções apontam para a direção correta, e se o espaço-tempo familiar é apenas uma manifestação em grande escala de alguma entidade mais elementar, que entidade é essa e quais são as suas propriedades essenciais? Por enquanto, ninguém sabe. Mas, ao buscar as respostas, os pesquisadores encontraram mais pistas, as mais importantes das quais decorrem de certas considerações sobre os buracos negros.

PARA ONDE VAI A ENTROPIA DOS BURACOS NEGROS?

Os buracos negros têm as fisionomias mais inescrutáveis de todo o universo. De uma perspectiva externa, nada parece ser mais simples do que eles. Os três aspectos distintivos de um buraco negro são a massa (que determina o seu tamanho — a distância entre o centro e o horizonte de eventos, que é a superfície que o envolve e a partir da qual não há mais retorno ao espaço exterior), a carga elétrica e a velocidade de rotação. E acabou. Não há outros detalhes que possam ser deduzidos a partir do exame do aspecto que um buraco negro apresenta ao mundo. Os físicos referem-se a isso dizendo que ªos buracos negros não têm cabelo", no sentido de que eles carecem de detalhes que lhes confiram individualidade. Exceto pelas variações na massa, na carga e na rotação (que só podem ser medidas indiretamente, por meio do efeito que ele produz sobre o gás e sobre as estrelas circundantes, uma vez que os buracos negros são negros), todos os buracos negros são iguais.

No entanto, por detrás da sua cara de jogador de pôquer, os buracos negros abrigam os maiores reservatórios de caos que o universo conhece. Dentre todos os sistemas físicos com determinado tamanho e de *qualquer* composição possível, os buracos negros contêm o máximo possível de entropia. Lembre-se

de que no capítulo 6 vimos que uma maneira aproximada de pensar sobre isso provém diretamente da definição de entropia, como medida do número de rearranjos dos componentes internos de um objeto que não produzem efeito sobre a sua aparência. Quando se trata de buracos negros, ainda que não possamos determinar quais são esses componentes — uma vez que não sabemos o que acontece com a matéria quando ela é esmagada no centro do buraco negro —, podemos dizer com certeza que os rearranjos desses componentes produzem tanto efeito sobre a massa, a carga e a rotação do buraco negro quanto os rearranjos das páginas de *Guerra e paz* afetam o peso do livro. E como a massa, a carga e a rotação determinam por completo o aspecto que o buraco negro apresenta ao mundo, *toda e qualquer* manipulação passa despercebida, e podemos dizer que os buracos negros têm entropia máxima.

Mesmo assim, você poderia sugerir uma maneira muito simples de aumentar a entropia de um buraco negro. Produza uma esfera oca do mesmo tamanho que o buraco negro escolhido e encha-a com gás (hidrogênio, hélio, dióxido de carbono, qualquer gás) de modo a preencher todo o interior da esfera. Quanto mais gás você introduzir, maior será a entropia, uma vez que quanto mais componentes houver, maior será o número de rearranjos possíveis. Você poderia concluir, então, que se continuar a injetar o gás indefinidamente a sua entropia também aumentará indefinidamente e em algum momento ultrapassará a do buraco negro. É uma estratégia inteligente, mas a relatividade geral mostra onde ela falha. Quanto mais gás você colocar na esfera, maior se tornará a massa que ela contém. E antes que você alcance a entropia de um buraco negro de igual tamanho, a massa cada vez maior no interior da esfera alcançará um valor crítico que faz com que a esfera e o seu conteúdo *transformem-se em um buraco negro.* Não adianta insistir. Os buracos negros têm o monopólio da desordem máxima.

Que acontece se você tentar aumentar ainda mais a entropia do próprio buraco negro continuando a injetar mais gás no seu espaço interior? Com efeito, a entropia continuará a crescer, mas você terá alterado as regras do jogo. À medida que novas quantidades de matéria cruzam o horizonte de eventos do buraco negro, não é só a entropia que aumenta, mas *também o tamanho* do buraco negro. O tamanho de um buraco negro é proporcional à sua massa e, portanto, se você injetar mais massa, o buraco negro se torna mais pesado e maior. Assim, uma vez que você tenha maximizado a entropia de uma região do espaço criando nela um buraco negro, quaisquer tentativas de aumentar a entropia dessa região serão inúteis, pois ela simplesmente não pode conter mais desordem por estar saturada de entropia. O que quer que você faça, o que quer que você atire dentro do buraco negro fará necessariamente com que ele cresça e envolva, por isso,

uma região maior do espaço. Desse modo, a quantidade de entropia contida no interior de um buraco negro nos informa algo fundamental, não só a respeito do buraco negro, mas do próprio espaço: *o máximo de entropia que uma região do espaço pode conter — qualquer região do espaço, em qualquer lugar, em qualquer tempo — é igual à entropia contida em um buraco negro de tamanho equivalente ao da região em questão.*

Então, qual a quantidade de entropia contida em um buraco negro de determinado tamanho? Aqui é que as coisas ficam interessantes. Raciocinemos intuitivamente e comecemos com algo mais fácil de visualizar, como o ar em um compartimento selado. Se uníssemos dois compartimentos, dobrando o volume e o número total das moléculas de ar, poderíamos pensar que dobraríamos também a entropia? Os cálculos específicos confirmam[1] essa conclusão e indicam que, permanecendo constantes todos os demais fatores (constância da temperatura, da densidade etc.), as entropias dos sistemas físicos familiares são proporcionais aos seus volumes. O pensamento seguinte é o de que a mesma conclusão aplica-se às coisas menos familiares, como os buracos negros, o que nos leva a esperar que a entropia de um buraco negro seja proporcional ao seu volume.

No entanto, na década de 1970, Jacob Bekenstein e Stephen Hawking descobriram que não é assim. As suas análises matemáticas indicaram que a entropia de um buraco negro não é proporcional ao seu volume, mas sim à *área* do seu horizonte de eventos, o que corresponde, em linhas gerais, à área da sua superfície. Essa resposta é muito diferente. Se dobrarmos o raio de um buraco negro, o seu volume crescerá oito vezes (2^3), enquanto a área da sua superfície crescerá apenas quatro vezes (2^2). Se multiplicarmos o raio por cem, o volume crescerá 1 milhão de vezes (100^3), enquanto a área da sua superfície crescerá apenas 10 mil vezes (100^2). Os buracos negros grandes têm muito mais volume do que área superficial.[2] Assim, embora os buracos negros contenham o máximo de entropia entre todas as coisas de determinado tamanho, Bekenstein e Hawking mostraram que a quantidade de entropia neles contida é menor do que ingenuamente se supunha.

O fato de que a entropia seja proporcional à área da superfície não é apenas uma distinção curiosa entre os buracos negros e os compartimentos selados, da qual poderíamos simplesmente tomar nota e seguir adiante. Vimos que os buracos negros estabelecem um limite para a quantidade de entropia que, mesmo em princípio, pode estar contida em uma região do espaço: considere um buraco negro cujo tamanho seja absolutamente igual ao da região em questão, verifique quanta entropia ele contém e esse será o limite absoluto para a quantidade de entropia que tal região do espaço pode conter. Como essa entropia é

proporcional à área superficial do buraco negro, pois assim revelaram os estudos de Bekenstein e Hawking, e como essa área é igual à área da superfície da região, que, por nossa escolha, tem o mesmo tamanho, concluímos que o máximo de entropia que qualquer região do espaço pode conter é proporcional à área da superfície *da região*.[3]

A discrepância entre esta conclusão e aquela a que chegamos quando pensávamos no ar injetado em um compartimento selado (em que vimos que a entropia é proporcional ao *volume* do compartimento e não à área da sua superfície) é fácil de identificar: como supusemos que o ar estava uniformemente distribuído, o raciocínio feito para o compartimento ignorava a gravidade. Lembre-se de que, quando a gravidade impera, as coisas se aglomeram. Ignorar a gravidade é possível quando as densidades são baixas, mas quando consideramos grandes entropias, as densidades são altas, a gravidade passa a imperar e o raciocínio que fizemos para o compartimento selado já não é válido. Ao contrário, essas condições extremas requerem os cálculos de Bekenstein e Hawking, baseados na gravidade, o que leva à conclusão de que a entropia potencial máxima de uma região do espaço é proporcional à área da sua superfície, e não ao seu volume.

Tudo bem, mas qual é a importância disso? É dupla.

Em primeiro lugar, o limite de entropia nos dá outra pista de que o espaço ultramicroscópico tem uma estrutura atomizada. Bekenstein e Hawking verificaram que, se se dividisse o horizonte de eventos de um buraco negro em quadrados com lado igual a uma distância de Planck (e, portanto, com área de cerca de 10^{66} centímetros), a entropia do buraco negro seria igual ao número de quadrados que aquela superfície pode acomodar.[4] É fácil ver que este resultado indica com clareza uma conclusão: cada quadrado de Planck é uma unidade mínima e fundamental do espaço e cada quadrado leva também uma unidade mínima de entropia. Isso sugere que não há nada, nem mesmo em princípio, que possa ocorrer *dentro* de um quadrado de Planck, porque se existisse essa atividade, ela poderia gerar desordem e, assim, o quadrado de Planck poderia conter mais do que a unidade de entropia determinada por Bekenstein e Hawking. Somos levados de novo, a partir de uma perspectiva completamente diferente, à noção de uma entidade espacial elementar.[5]

Em segundo lugar, para um físico, o limite superior para a quantidade de entropia que pode existir em uma região do espaço é um dado de importância muito especial e quase sagrada. Para compreender o porquê disso, imagine que você trabalha para um psiquiatra da escola behaviorista e que o seu trabalho consiste em manter um registro contínuo e detalhado das interações entre grupos de crianças intensamente hiperativas. Todas as manhãs, você reza para que os

grupos daquele dia sejam bem-comportados, porque quanto mais confusão as crianças criarem, mais difícil será o seu trabalho. A razão é óbvia e intuitiva, mas convém explicitá-la. Quanto mais bagunceiras forem as crianças, maior será o número das coisas que você terá de registrar. O universo oferece ao físico o mesmo desafio. Uma teoria física fundamental destina-se a descrever tudo o que acontece — ou poderia acontecer, mesmo em princípio —, em determinada região do espaço. E, assim como com as crianças, quanto maior for a desordem que a região possa conter — mesmo em princípio —, maior será o número das coisas que a teoria terá de explicar. Dessa forma, o nível máximo de entropia que uma região pode conter representa um teste simples e incisivo: os físicos esperam que uma teoria verdadeiramente fundamental tenha uma correspondência perfeita com a entropia máxima de qualquer região dada do espaço. A teoria deve ser tão afinada com a natureza que a sua capacidade máxima de contabilizar a desordem corresponda *exatamente* ao máximo grau de desordem que uma região possa conter. Nem mais, nem menos.

A questão está em que, se a validade da conclusão dos compartimentos selados fosse ilimitada, tal teoria fundamental teria de ter a capacidade de contabilizar volumetricamente a desordem de qualquer lugar. Mas como esse raciocínio não se sustenta quando se inclui a gravidade — e como uma teoria fundamental tem de incluir a gravidade —, vemos que tal teoria só precisa contabilizar a quantidade de desordem que corresponde à área superficial de qualquer região. E como mostram os exemplos numéricos dados alguns parágrafos atrás, para regiões grandes, a última é muito menor do que a primeira.

Portanto, o resultado de Bekenstein e Hawking nos indica que uma teoria que inclua a gravidade é, em certo sentido, mais simples do que outra que não a inclua. Há menos “graus de liberdade” — menos coisas que podem alterar-se e assim contribuir para a desordem — que precisam ser descritos pela teoria. Essa é uma conclusão que tem valor intrínseco, mas se dermos mais um passo nessa linha de raciocínio, vamos nos encontrar com algo extremamente bizarro. Se a entropia máxima de qualquer região do espaço é proporcional à área da superfície dessa região, e não ao seu volume, então, talvez, os graus de liberdade verdadeiros e fundamentais — os atributos que têm o potencial de produzir a desordem — estão, na verdade, na superfície daquela região, e não no seu volume interno. Assim, talvez os processos físicos reais do universo aconteçam em uma superfície fina e distante que nos envolve, e tudo o que vemos e vivenciamos seja simplesmente uma projeção desses processos. Em outras palavras: talvez o universo seja como um holograma.

Essa é uma ideia estranha, mas, como veremos, recentemente vem recebendo apoio substancial.

O UNIVERSO É UM HOLOGRAMA?

Um holograma é um pedaço bidimensional de plástico gravado que, quando iluminado com uma luz de laser apropriada, projeta uma imagem tridimensional.[6] No início da década de 1990, o holandês, vencedor do Prêmio Nobel, Gerard't Hooft e Leonard Susskind, co-inventor da teoria das cordas, sugeriram que o próprio universo poderia operar de maneira análoga à de um holograma. Eles divulgaram a estranha ideia de que as idas e vindas que observamos nas três dimensões da nossa vida diária poderiam ser apenas projeções holográficas de processos físicos que ocorrem em uma superfície bidimensional distante. Nessa visão nova e peculiar, nós próprios e tudo o que vemos e fazemos seríamos como imagens holográficas. Platão acreditava que as percepções comuns fossem simples sombras da realidade, mas o princípio holográfico, ao convergir para essa metáfora, vira-a de cabeça para baixo. As sombras — as coisas que se achatam e existem em uma superfície bidimensional — são reais, e o que parece ser o conjunto das entidades multidimensionais de estrutura mais rica (nós e o mundo à nossa volta) são simples projeções delas. (se você hesita em reescrever Platão, o cenário do mundo-brana dá uma versão da holografia em que as sombras voltam para o seu lugar. Imagine que existamos em uma 3-brana, que circunda uma região com quatro dimensões espaciais (assim como a casca bidimensional de uma maçã circunda o seu interior tridimensional). O princípio holográfico nesse contexto diria que as nossas percepções tridimensionais seriam as sombras da estrutura física quadridimensional que tem lugar na região circundada pela nossa brana).

Permita-me repetir que, embora essa seja uma ideia fantasticamente extravagante e cujo papel final na nossa compreensão do espaço-tempo está longe de ficar claro, o chamado *princípio holográfico* de Gerard' t Hooft e Susskind é bem fundamentado. Uma vez que, como vimos na última seção, a entropia máxima que uma região do espaço pode conter é função da área da sua superfície, e não do seu volume interior, é natural que pensemos, então, que os componentes mais fundamentais do universo, os seus graus de liberdade mais básicos — as entidades que abrigam a entropia do universo, assim como as páginas de *Guerra e paz* abrigam a entropia do livro —, existiriam na superfície limítrofe, e não no interior do universo. O que vivenciamos no "volume" do universo — no seu *corpo*, como muitas vezes se diz — seria determinado pelo que acontece na superfície limítrofe, assim como o que vemos em uma projeção holográfica é determinado pela informação codificada em uma lâmina circundante de plástico. As leis da física atuariam como o laser do universo, iluminando os processos reais do cosmo — processos que ocorrem em uma superfície fina e distante — e gerando as ilusões holográficas da vida cotidiana.

Ainda não sabemos como esse princípio holográfico poderia realizar-se no mundo real. Existe o desafio de que, nas descrições convencionais, o universo é visto ou como infinito ou como envolvido em si mesmo, tal qual uma esfera ou uma tela de jogo de vídeo (veja o capítulo 8), e não teria, portanto, fronteiras ou limites. Onde, então, estaria localizada a "superfície holográfica limítrofe"? Além disso, os processos físicos parecem estar claramente sob o nosso controle, aqui mesmo, bem no interior do universo. Nada indica que alguma coisa que estaria ocorrendo em algum confim difícil de localizar detenha o controle do que acontece aqui, no corpo do universo. Será que o princípio holográfico implica que o *nosso* sentido de controle e de autonomia é ilusório? Ou será que a holografia deve ser vista como algo que articula uma espécie de dualidade na qual, com base em uma escolha — e não com base na estrutura física —, poder-se-ia optar entre uma descrição familiar, na qual as leis fundamentais operam aqui, no corpo do universo (o que se alinha com a nossa intuição e a nossa percepção), e uma descrição nada familiar, em que a ação fundamental da física ocorre em algum tipo de fronteira do universo, sendo que ambos os pontos de vista seriam igualmente válidos? Essas são questões essenciais que permanecem sem resposta.

Mas, em 1997, baseando-se em pensamentos anteriores de diversos teóricos das cordas, o físico argentino Juan Maldacena efetuou um avanço que modificou de forma espetacular a maneira de pensar sobre esse tema. A sua descoberta não é diretamente relevante para a questão do papel da holografia no nosso universo real, mas, na melhor tradição da física, ele identificou um contexto hipotético — um universo hipotético — em que as considerações abstratas sobre a holografia poderiam tornar-se concretas e precisas com o uso da matemática. Por motivos técnicos, Maldacena estudou um universo hipotético com quatro dimensões espaciais grandes e uma dimensão temporal, todas com curvatura negativa uniforme — uma versão, com mais dimensões, das batatas fritas de lata, como na figura 8.6c. As análises matemáticas revelam que tal espaço-tempo de cinco dimensões tem uma fronteira,[7] que, como todas as fronteiras, tem uma dimensão a menos do que a forma que ela envolve: três dimensões espaciais e uma dimensão temporal. (Como sempre, os espaços com maior número de dimensões são de difícil visualização. Se você fizer questão de uma imagem mental, pense em um frasco de azeitonas: o conteúdo tridimensional do frasco corresponde ao espaço-tempo de cinco dimensões e a superfície bidimensional do frasco corresponde à fronteira quadridimensional.) Com a inclusão das dimensões recurvadas adicionais requeridas pela teoria das cordas, Maldacena argumenta de forma convincente que as estruturas físicas vistas por um observador que vivesse no interior desse universo (um observador que estivesse entre as azeitonas)

podem ser inteiramente descritas em termos de desenvolvimentos físicos que ocorrem na fronteira do universo (na superfície do frasco).

Apesar de não ser realista, esse trabalho proporcionou o primeiro exemplo concreto e matematicamente bem estruturado em que o princípio holográfico alcançou realização explícita.[8] Por essa razão, ele iluminou a noção da holografia em sua aplicação a um universo inteiro. Por exemplo, no trabalho de Maldacena a descrição do corpo e a da fronteira estão em absoluto pé de igualdade. Nenhuma das duas é primária e a outra secundária. No mesmo espírito que preside às relações entre as cinco teorias das cordas, as expressões teóricas do corpo e da fronteira são traduções uma da outra. A característica in- comum desta tradução em particular, contudo, está em que a teoria do corpo tem mais dimensões do que a teoria equivalente formulada para a fronteira. Além disso, a teoria do corpo inclui a gravidade (pois Maldacena a formulou usando a teoria das cordas), e os cálculos mostram que a teoria da fronteira não a inclui. Mesmo assim, quaisquer perguntas ou cálculos feitos em uma das teorias podem ser traduzidos a perguntas e cálculos equivalentes feitos na outra. Uma pessoa pouco familiarizada com o dicionário pensaria que as perguntas e os cálculos correspondentes em ambas as situações não têm nada a ver uns com os outros (por exemplo, como a teoria da fronteira não inclui a gravidade, as questões relativas à gravidade na teoria do corpo do universo têm traduções que parecem muito distintas na teoria da fronteira), mas os que conhecem ambas as línguas — os que são peritos em ambas as teorias — reconheceriam os relacionamentos e perceberiam que as respostas às perguntas correspondentes são concordantes. Com efeito, todos os cálculos feitos até o momento, e foram muitos, apoiam essa afirmativa.

É difícil captar os detalhes de todas estas coisas, mas não deixe que isso obscureça o ponto principal. A conclusão de Maldacena é fantástica. Ele encontrou uma concretização efetiva, embora hipotética, da holografia no contexto da teoria das cordas. Demonstrou que uma teoria quântica particular que não inclui a gravidade é uma tradução — indistinguível do original — de outra teoria quântica que inclui a gravidade, mas é formulada com uma dimensão espacial a mais. Hoje estão sendo conduzidos diversos programas de pesquisa para determinar como esses enfoques poderíam ser aplicados a um universo mais realista, o nosso universo, mas o progresso é lento, porque a análise se defronta com obstáculos técnicos. (Maldacena escolheu aquele exemplo hipotético particular porque era relativamente mais fácil de analisar do ponto de vista matemático. Os exemplos mais realistas são muito mais difíceis de trabalhar.) No entanto, já sabemos que a teoria das cordas pode, pelo menos em certos contextos, abrigar o conceito da holografia. E, tal como no caso das

traduções geométricas descritas anteriormente, aqui também há um indício de que o espaço-tempo não é elementar. Tanto o tamanho e a forma do espaço-tempo podem mudar na tradução de uma formulação teórica para a outra, como também pode mudar o *número* das dimensões espaciais.

Cada vez mais esses indícios apontam para a conclusão de que a forma do espaço-tempo é muito mais um detalhe cuja formulação varia de uma teoria para outra do que um elemento fundamental da realidade. Assim como o número das letras, as sílabas e as vogais da palavra *cat* diferem das da palavra *gato*, a forma do espaço-tempo, o seu tamanho e mesmo o número das suas dimensões também variam quando traduzidos. Para qualquer observador que esteja empregando uma teoria para pensar a respeito do universo, o espaço-tempo pode parecer real e indispensável. Mas se esse mesmo observador passar a empregar outra teoria, cuja formulação seja uma tradução da primeira, o que lhe parecia antes algo real e indispensável também se modifica necessariamente. Assim, se essas ideias estiverem corretas — e devo ressaltar que elas ainda têm de ser comprovadas rigorosamente, embora os estudiosos já tenham reunido grande quantidade de dados positivos —, constituem um forte desafio ao primado do espaço e do tempo.

Entre todas as pistas aqui discutidas, creio que o princípio holográfico é o que mais provavelmente desempenhará um papel dominante nas pesquisas futuras. Ele decorre de uma característica básica dos buracos negros — a sua entropia —, cujo entendimento, de acordo com muitos físicos, está baseado em sólidos fundamentos teóricos. Ainda que os detalhes das nossas teorias venham a modificar-se, esperamos que qualquer descrição lógica da gravidade venha a incorporar os buracos negros e, por conseguinte, os limites da entropia que informaram esta discussão persistirão e a holografia será aplicável. O fato de que a teoria das cordas incorpore naturalmente o princípio holográfico — pelo menos em exemplos que se prestam à análise matemática — é outro elemento de apoio que sugere fortemente a validade do princípio. A minha expectativa é a de que, qualquer que seja a direção para a qual se encaminhem as buscas dos fundamentos do espaço e do tempo, quaisquer que sejam as modificações da teoria das cordas/teoria-M que nos esperam no futuro, a holografia continuará a ser um conceito orientador.

OS COMPONENTES DO ESPAÇO-TEMPO

Ao longo do livro aludimos periodicamente aos componentes ultramicroscópicos do espaço-tempo; muito embora tenhamos dado argumentos indiretos a favor da sua existência, ainda não dissemos nada a respeito do que possam ser. E com

boas razões: na verdade, não temos a menor ideia a esse respeito. Ou então, melhor dizendo, se se trata de identificar os componentes elementares do espaço-tempo, não existe nenhuma ideia na qual possamos confiar plenamente. Existe aqui uma lacuna no nosso conhecimento, e vale a pena ver o problema no seu contexto histórico.

Se houvesse sido feita uma pesquisa entre os cientistas no fim do século XIX a respeito dos seus pontos de vista quanto aos componentes elementares da matéria, o resultado não teria apontado um acordo geral. Não mais do que cem anos atrás, a hipótese atômica ainda era controvertida. Cientistas bem conhecidos, como Ernst Mach, não acreditavam nela. Além disso, depois que a hipótese atômica alcançou aceitação geral no início do século XX, os cientistas tiveram que ficar continuamente atualizando o quadro das partículas com o que se supunha serem novos componentes elementares (por exemplo, inicialmente prótons e nêutrons, depois quarks). A teoria das cordas é o passo mais recente dado ao longo desse caminho, mas como ainda está pendente de confirmação experimental (e mesmo que assim não fosse, sempre há a possibilidade de que outra teoria ainda mais refinada venha a ser desenvolvida), devemos assinalar com clareza que a busca dos componentes mais elementares da natureza continua.

A incorporação do espaço e do tempo em um contexto científico moderno deu-se com Newton, no século XVII, mas um pensamento mais concatenado com relação aos seus aspectos microscópicos só ocorreu no século XX, com as descobertas da relatividade geral e da mecânica quântica. Assim, nas escalas históricas do tempo, estamos, na verdade, apenas começando a analisar o espaço-tempo, razão por que a falta de uma proposição definitiva para os seus "átomos" — os componentes mais elementares do espaço-tempo — não chega a ser uma nota baixa no boletim de física. Longe disso. O fato de que tenhamos chegado até onde estamos — tendo revelado vários aspectos do espaço e do tempo que estão muitíssimo além da experiência comum — mostra que fizemos um progresso que seria impensável um século atrás. A busca dos componentes mais elementares da natureza, seja com relação à matéria, seja com relação ao espaço-tempo, é um desafio formidável que certamente nos manterá ocupados ainda por algum tempo.

Para o espaço-tempo há atualmente dois caminhos promissores na busca dos componentes fundamentais. Uma proposição vem da teoria das cordas e a outra vem de uma teoria conhecida como *gravidade quântica de laços.*

A proposição da teoria das cordas, dependendo de quanto você invista intelectualmente nela, poderá parecer-lhe ou intuitivamente agradável ou absolutamente desconcertante. Como estamos falando do "tecido" do espaço-

tempo, a sugestão da teoria é a de que talvez o espaço-tempo seja o resultado do entrelaçamento de cordas, assim como uma camisa é o resultado do entrelaçamento de fios. Portanto, do mesmo modo como agrupar fios em determinado padrão produz o tecido de uma camisa, talvez agrupar inúmeras cordas em determinado padrão produza o que comumente chamamos de tecido do espaço-tempo. A matéria, você e eu, seria então o resultado de aglomerações adicionais de cordas vibrantes — como uma música tocada onde antes só havia barulheira, ou como um fino desenho aplicado sobre um material qualquer — que se movem no contexto formado pelo entrelaçamento das cordas do espaço-tempo.

Na minha percepção, essa é uma proposição atraente e convincente, mas até agora ninguém ainda transformou essas palavras em um raciocínio matemático preciso. Do meu ponto de vista, os obstáculos que se antepõem a essa tarefa estão longe de ser banais. Se a sua camisa se desfiasse por completo, por exemplo, os fios soltos formariam um montinho no chão. Dependendo das circunstâncias, você poderia ficar constrangido ou irritado, porém não veria nada de misterioso no episódio. Mas pensar em algo equivalente com relação às cordas — as cordas do espaço-tempo, neste caso — é algo que, literalmente, põe a mente à prova (pelo menos a minha). Que faríamos com um "monte" de cordas que se tenham desfiado do tecido do espaço-tempo, ou, mais apropriadamente, cordas que nem sequer se tenham reunido para produzir o tecido do espaço-tempo? Existe a tentação de pensar nelas como pensamos nos fios de camisa — como matéria-prima que necessita ser entrelaçada —, mas isso passa ao largo de uma sutileza absolutamente essencial: imaginamos as cordas como entidades que vibram no espaço e através do tempo, porém sem o tecido do espaço-tempo, que, na nossa proposição, pensamos ser constituído pela própria união ordenada das cordas, *não há nem espaço nem tempo.* Nessa proposição, os conceitos de espaço e tempo não têm sentido até que muitas cordas se entrelacem para produzi-los.

Assim, para que a proposição faça sentido, precisaríamos de um arcabouço para descrever as cordas que não suponha que elas estejam vibrando desde o início em um espaço-tempo preexistente. Precisaríamos de uma formulação da teoria das cordas que dispensasse totalmente o espaço e o tempo, como pré-requisitos; uma formulação em que o espaço-tempo seja o resultado do comportamento coletivo das cordas.

Apesar do progresso já alcançado nesse rumo, ninguém ainda apresentou uma formulação da teoria das cordas que dispense o espaço e o tempo — algo a que os cientistas se referem como formulação independente do ambiente (essa expressão provém da noção difusa de que o espaço-tempo é o cenário no qual

ocorrem os fenômenos físicos). Até o momento, todas as teorias vêem essencialmente as cordas como entidades que se movem e vibram em um espaço-tempo que é inserido “à mão” na teoria. O espaço-tempo não decorre da teoria, como os físicos imaginam que ocorreria em um esquema independente do ambiente, e tem de ser suprido pelo formulador da teoria. Muitos pesquisadores consideram que o desenvolvimento de uma formulação independente do ambiente é o principal problema ainda não resolvido pela teoria das cordas. Uma vez solucionado esse problema, não só teríamos uma percepção a respeito da origem do espaço-tempo, mas também provavelmente poderíamos resolver os maiores enigmas que encontramos no fim do capítulo 12 — a incapacidade atual da teoria de identificar a forma geométrica das dimensões adicionais. Uma vez que possamos desembaraçar o formalismo matemático básico de qualquer espaço-tempo em particular, o raciocínio nos indica que a teoria das cordas adquiriria a capacidade de examinar todas as possibilidades e, talvez, escolher entre elas.

Outra dificuldade com que se defronta a proposição de que as cordas são os fios do espaço-tempo é que, como vimos no capítulo 13, a teoria das cordas tem outros componentes além das cordas. Que papel desempenhariam esses outros componentes na composição fundamental do espaço-tempo? Essa questão é colocada em relevo com particular nitidez pelo cenário do mundo-brana. Se o espaço tridimensional que conhecemos é uma 3-brana, essa brana é indecomponível ou é o resultado de uma combinação de outros componentes da teoria? As branas são feitas de cordas ou tanto elas quanto as cordas são elementares? Ou será que deveríamos considerar outra possibilidade, a de que branas e cordas sejam feitos de outros componentes ainda mais elementares? Essas perguntas estão na vanguarda das pesquisas atuais, mas como este capítulo final é sobre indícios e pistas, deixe-me mencionar uma formulação relevante, que vem recebendo muita atenção.

Falamos antes das várias branas que se encontram na teoria das cor- das/teoria-M: 1-branas, 2-branas, 3-branas, 4-branas e assim por diante. Embora eu não tenha mencionado, a teoria também contém *0-branas* — componentes que não têm extensão espacial, assim como as partículas pontuais. Isso poderia parecer contrário ao próprio espírito da teoria das cordas/teoria-M, que abandonou o esquema das partículas pontuais justamente para domar as fortes ondulações da gravidade quântica. Contudo, as 0-brana, assim como as suas primas da figura 13.2, que existem em dimensões adicionais, já vêm literalmente envolvidas com as cordas, e as suas interações são, portanto, comandadas pelas cordas. Não surpreende, então, que as 0-brana se comportem de maneira muito diferente com relação às partículas pontuais convencionais. Mais importante ainda, elas

participam integralmente da diluição e diminuição da agitação ultramicroscópica do espaço-tempo. As 0-brana não reintroduzem os problemas fatais que afligem as formulações feitas em termos de partículas pontuais que tentam unir a relatividade geral e a mecânica quântica.

Com efeito, Tom Banks, da Universidade de Rutgers, e Willy Fischler, da Universidade do Texas, em Austin, juntamente com Leonard Susskind e Stephen Shenker, ambos atualmente em Stanford, formularam uma versão da teoria das cordas/teoria-M na qual as 0-brana *são* os componentes elementares que se combinam para gerar as cordas e as outras branas com mais dimensões.

Essa proposição, conhecida como *Teoria Matriz* — outro possível significado para o "M" da "teoria-M" —, gerou uma avalanche de pesquisas, mas as dificuldades da matemática nelas envolvida têm impedido, até aqui, que os cientistas concluam os seus trabalhos. Todavia, os cálculos já feitos dão bom apoio à proposição. Se a Teoria Matriz for correta, isso poderia significar que tudo — cordas, branas e talvez até o espaço e o tempo — seja composto de aglomerações específicas de 0-brana. Essa é uma perspectiva atraente, e os pesquisadores estão cautelosamente otimistas quanto a que, nos próximos anos, o progresso a ser alcançado estabeleça a sua validade.

Seguimos, até agora, os caminhos trilhados pelos teóricos das cordas na busca dos componentes do espaço-tempo, mas, como já mencionei, há um segundo caminho, originado pelo principal competidor da teoria das cordas, a gravidade quântica de laços. Essa teoria data de meados da década de 1980 e é outra proposição promissora para a fusão entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Não tentarei dar aqui uma descrição detalhada (se você tiver interesse, dê uma olhada no excelente livro *Três caminhos para a gravidade quântica*, de Lee Smolin), mas farei menção a alguns pontos mais importantes que contribuem particularmente para iluminar a nossa discussão.

Tanto a teoria das cordas quanto a gravidade quântica de laços proclamam haver alcançado o tão sonhado objetivo de proporcionar uma teoria quântica da gravidade. Mas elas o fazem de maneiras muito diferentes. A teoria das cordas desenvolveu-se a partir da boa tradição da física das partículas, que buscou por várias décadas os componentes elementares da matéria. Para a maioria dos primeiros pesquisadores das cordas, a gravidade era, na melhor das hipóteses, uma preocupação distante e secundária. Em contraste com esse enfoque, a gravidade quântica de laços desenvolveu-se a partir de uma tradição firmemente ancorada na teoria da relatividade geral. Para a maioria dos praticantes dessa proposição, a gravidade sempre foi o foco principal. Uma apreciação simples diria que a teoria das cordas começa com o pequeno (a teoria quântica) e se desenvolve para abarcar o grande (a gravidade), enquanto a gravidade quântica

de laços começa com o grande (a gravidade) e se desenvolve para abarcar o pequeno (a teoria quântica).[9] Com efeito, como vimos no capítulo 12, a teoria das cordas foi formulada inicialmente como uma teoria quântica da força nuclear forte, que opera nos núcleos atômicos. Só depois percebeu-se, de maneira casual, que a teoria, na verdade, incluía a gravidade. Por outro lado, a gravidade quântica de laços toma a teoria da relatividade geral de Einstein como ponto de partida e busca incorporar-lhe a mecânica quântica.

Esse começo em lados opostos do espectro reflete-se nas maneiras pelas quais as teorias têm se desenvolvido. Em certo sentido, as principais realizações de cada uma delas correspondem aos fracassos da outra. Por exemplo, a teoria das cordas funde todas as forças e toda a matéria, inclusive a gravidade (uma unificação completa que escapa ao enfoque dos laços), descrevendo todas as coisas em termos de cordas vibrantes. A partícula da gravidade, o gráviton, é apenas um modo particular de vibração das cordas, e assim a teoria descreve naturalmente como esses componentes elementares da gravidade movem-se e interagem na mecânica quântica. Contudo, como acabamos de observar, a grande falha das formulações atuais da teoria das cordas está em que elas pressupõem o espaço-tempo como o cenário no qual as cordas movem-se e vibram. Por outro lado, a principal realização da gravidade quântica de laços, bastante impressionante, aliás, é que ela *não* supõe o espaço-tempo como cenário. A gravidade quântica de laços é um arcabouço independente do ambiente. No entanto, extrair desse ponto de partida extraordinariamente incomum, sem espaço e sem tempo, o espaço e o tempo familiares e os aspectos conhecidos e sólidos da relatividade geral aplicáveis às escalas das grandes distâncias (algo que as formulações atuais da teoria das cordas fazem facilmente), está longe de ser um problema trivial, e os pesquisadores ainda estão tratando de resolvê-lo. Além disso, em comparação com a teoria das cordas, a gravidade quântica de laços fez muito menos progresso no entendimento da dinâmica dos grávitons.

Uma possibilidade harmoniosa está em que os entusiastas da teoria das cordas e os defensores da gravidade quântica de laços estejam, na verdade, construindo a mesma teoria, a partir de pontos de partida amplamente diferentes. O fato de que ambas as teorias envolvam laços — laços de cordas, na teoria das cordas; laços mais difíceis de descrever matematicamente, na gravidade quântica de laços, mas, em linhas gerais, laços elementares de espaço — sugere a possibilidade da existência dessa vinculação. Essa possibilidade encontra apoio também no fato de que, nos poucos problemas acessíveis a ambas as teorias, como a entropia dos buracos negros, elas concordam plenamente entre si.[10] E na questão dos componentes do espaço-tempo, ambas sugerem a existência de algum tipo de estrutura atomizada. Já vimos os indícios que apontam nessa direção na teoria

das cordas. Na gravidade quântica de laços, tais indícios são ainda mais explícitos e convincentes. Os pesquisadores dessa teoria mostraram que inúmeros laços podem entrelaçar-se, como em um trabalho de crochê, e assim produzir estruturas cujas características, nas grandes escalas, assemelham-se às de uma região do espaço-tempo. E, o que é mais importante ainda, os pesquisadores calcularam as áreas que essas superfícies espaciais poderiam ter. E, assim como pode haver um elétron, ou dois elétrons, ou 202 elétrons, mas não pode haver 1,6 elétron nem nenhuma outra fração, os cálculos mostram que as áreas dessas superfícies podem ser iguais a uma distância de Planck ao quadrado, duas distâncias de Planck ao quadrado, 202 distâncias de Planck ao quadrado, mas nunca um número fracionário. Aqui também vemos uma forte indicação teórica de que o espaço, como os elétrons, tem uma estrutura divisível em unidades.[11]

Se eu tivesse que arriscar um palpite a respeito dos desenvolvimentos futuros, imaginaria que as técnicas relativas a modelos independentes do ambiente desenvolvidas pela gravidade quântica de laços serão adaptadas para a teoria das cordas, o que daria lugar a uma formulação independente do ambiente também para esta teoria. Essa seria, imagino, a faísca que desencadearia a terceira revolução das supercordas, com a qual, espero, muitos dos mistérios profundos que permanecem serão resolvidos. Provavelmente, tais desenvolvimentos também levariam a bom termo a longa história da nossa busca do entendimento do espaço-tempo. Em capítulos anteriores seguimos as oscilações do pêndulo das opiniões entre as posições relacionistas e absolutistas com relação ao espaço, ao tempo e ao espaço-tempo e perguntamos: o espaço é um “algo” ou não? O espaço-tempo é um “algo” ou não? E na evolução do nosso pensamento ao longo de alguns séculos, encontramos visões divergentes. Creio que uma fusão entre a relatividade geral e a mecânica quântica, que seja confirmada experimentalmente e independente do ambiente, dará uma solução compensadora a essa questão. Em virtude da independência com relação ao ambiente, os componentes da teoria poderiam estar relacionados uns com os outros, mas, com a ausência de um espaço-tempo inserido na teoria desde o início, não haveria um cenário em que eles próprios estivessem contidos. Só os relacionamentos relativos importariam, em uma solução que traria muito do espírito dos relacionistas, como Leibniz e Mach. E com a reunião dos componentes da teoria — sejam eles cordas, branas, laços ou algo mais que venha a ser descoberto em pesquisas futuras — teríamos um espaço-tempo familiar na escala grande (ou o nosso espaço-tempo real, ou exemplos hipotéticos, úteis para experimentos abstratos) e recuperaríamos a noção de que ele é um “algo”, como na discussão que fizemos sobre a relatividade geral. Em um espaço- tempo vazio, plano e infinito (um dos

exemplos hipotéticos úteis), a água do balde de Newton tomaria uma forma côncava. O ponto essencial seria que a distinção entre o espaço-tempo e as entidades materiais mais tangíveis praticamente se evaporaria, pois tudo decorreria de aglomerados específicos de componentes mais básicos em uma teoria que é fundamentalmente relacionai, não espacial e não temporal. Se assim for, Leibniz, Newton, Mach e Einstein poderiam reivindicar cada qual a sua parte dos créditos pela vitória.

ESPAÇO INTERIOR E ESPAÇO EXTERIOR

Especular sobre o futuro da ciência é um exercício agradável e construtivo, que coloca os nossos afazeres em um contexto mais amplo e dá ênfase aos objetivos maiores para os quais trabalhamos, lenta e deliberadamente. Mas quando a especulação se volta para o futuro do próprio espaço-tempo, ela adquire uma conotação quase mística: estamos considerando o destino das coisas que dominam o sentido que damos à própria realidade. Repitamos que não há dúvida de que o espaço e o tempo, quaisquer que sejam as nossas descobertas futuras, continuarão a conformar as nossas experiências individuais. Do ponto de vista da vida cotidiana, o espaço e o tempo são permanentes. O que continuará a modificar-se, e provavelmente de uma maneira drástica, é o nosso entendimento do arcabouço que eles nos fornecem — ou seja, o cenário da realidade das nossas experiências. Depois de séculos de pensamentos, a única coisa que podemos fazer é retratar o espaço e o tempo como os nossos mais íntimos desconhecidos. Eles entram, imperturbáveis, em nossas vidas, mas recusam-se olimpicamente a nos dar a conhecer a sua constituição fundamental a partir das nossas percepções, que formamos com base nas informações e influências que eles próprios nos passam com tanta prodigalidade.

Durante os últimos cem anos, adquirimos intimidade com certos aspectos anteriormente ocultos do espaço e do tempo, graças às duas teorias de Einstein e à mecânica quântica. O retardamento do tempo, a relatividade da simultaneidade, os fatiamentos alternativos do espaço-tempo, a gravidade vista como a deformação e o encurvamento do espaço e do tempo, a natureza probabilística da realidade e o emaranhamento quântico a longa distância não estavam nem mesmo na lista em que os melhores físicos do século XIX enumerariam o que se poderia esperar do século XX. Mas assim aconteceu, como nos confirmam os resultados experimentais e as explicações teóricas.

Na nossa época, formamos a nossa própria panóplia de ideias inesperadas: matéria escura e energia escura, que parecem ser, com grande predominância, os principais componentes do universo; ondas gravitacionais, ondulações no tecido

do espaço-tempo, que foram previstas por Einstein na relatividade geral e que podem, um dia, permitir-nos olhar mais para trás no tempo; um oceano de Higgs, que permeia a totalidade do espaço e que, se confirmado, nos ajudará a compreender como as partículas ganham massa; uma expansão inflacionária, que pode explicar a forma do cosmo, resolver o enigma de por que ele é tão uniforme nas grandes escalas e dar direção à seta do tempo; a teoria das cordas, que coloca laços e segmentos de energia em lugar das partículas pontuais e que promete uma versão corajosa do sonho de Einstein, em que todas as partículas e todas as forças combinam-se em uma única teoria; dimensões espaciais adicionais, decorrentes da matemática da teoria das cordas e que talvez possam ser detectadas na próxima década nos experimentos realizados com os aceleradores de partículas; um mundo-brana, em que as três dimensões espaciais podem ser um entre muitos universos que flutuam em um espaço-tempo multidimensional; e talvez até mesmo um espaço-tempo emergente, no qual o próprio tecido do espaço e do tempo seria composto por entidades mais elementares, que existem fora do espaço e do tempo.

Durante a próxima década, aceleradores de partículas cada vez mais poderosos nos darão o ingrediente experimental necessário, e muitos cientistas confiam em que os dados que serão produzidos nas colisões a altas energias que estão programadas confirmarão diversas dessas construções teóricas cruciais. Compartilho esse entusiasmo e espero ansiosamente os resultados. Até que as nossas teorias façam contato com fenômenos observáveis e verificáveis, elas permanecerão no limbo — continuarão sendo um conjunto de ideias promissoras que podem ter, ou não, relevância para o mundo real. Os novos aceleradores de partículas aumentarão substancialmente a interseção entre as teorias e os experimentos, e nós, os físicos, esperamos que isso venha a colocar muitas dessas ideias no reino das ciências consagradas.

Há também outra hipótese que, embora ainda muito incerta, provoca em mim uma sensação incomparavelmente maravilhosa. No capítulo 11, discutimos como os efeitos de agitações quânticas diminutas podem ser vistos em qualquer noite de céu limpo, por haverem alcançado tamanho enorme graças à expansão cósmica, resultando nos aglomerados responsáveis pela formação das estrelas e das galáxias. (Lembre-se da analogia com desenhos feitos na superfície de um balão, que se afastam uns dos outros à medida que o balão é inflado.) Essa percepção nos dá um acesso demonstrável à física quântica por meio das observações astronômicas. Talvez ela possa ser levada ainda mais adiante. Talvez a expansão cósmica tenha podido ampliar as impressões até mesmo de processos e aspectos cuja escala inicial era ainda mais reduzida — a estrutura física das cordas, ou, mais globalmente, a gravidade quântica, ou a estrutura

ultramicroscópica atomizada do espaço-tempo —, espalhando a sua influência de alguma maneira sutil, mas observável, por todo o céu. Talvez, enfim, o universo já tenha exposto as fibras microscópicas do tecido do cosmo e as tenha desdobrado claramente no céu e só nos esteja faltando aprender como reconhecê-las.

Para avaliarmos as proposições mais recentes a respeito das leis mais profundas da física, talvez seja mesmo necessária a força feroz dos aceleradores de partículas, capaz de recriar as condições violentas que nunca mais se fizeram presentes depois dos momentos que se seguiram ao Big-Bang. Para mim, contudo, nada seria mais poético, nenhum resultado seria mais belo, nenhuma unificação mais completa, do que a confirmação das nossas teorias sobre o ultrapequeno — as nossas teorias a respeito da composição ultramicroscópica do espaço, do tempo e da matéria — por meio da contemplação tranquila e silenciosa do céu.

Notas
(Obs.: em algumas notas símbolos matemáticos e letras de alfabetos não latinos não foram adequadamente reconhecidos pelo OCR)

1. OS CAMINHOS DA REALIDADE [pp. 17-39]

1. Lorde Kelvin foi citado pelo físico Albert Michelson durante a sua palestra por ocasião da cerimônia de dedicação do Laboratório Ryerson, da Universidade de Chicago, em 1894 (veja D. Kleppner, *Physics Today*> novembro de 1998).
2. Lorde Kelvin, "Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light", *Phil Mag.* Ii 6ª série, 1 (1901).
3. A. Einstein, N. Rosen e B. Podolsky, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).
4. Sir Arthur Eddington, *The nature of the physical world* (Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1928).
5. Como a nota 2 do capítulo 6 descreve em maior profundidade, esta é uma afirmação exagerada porque há exemplos, que envolvem partículas relativamente esotéricas (como os mésons K e B), que mostram que a chamada força nuclear fraca não trata o passado e o futuro de maneira absolutamente simétrica. Contudo, na minha opinião e na de muitos outros que se ocuparam deste ponto, como essas partículas não desempenham essencialmente nenhum papel na determinação das propriedades dos objetos materiais cotidianos, não é provável que elas tenham importância para a explicação do enigma da seta do tempo (embora eu me apresse em dizer que ninguém sabe com certeza). Assim, embora a afirmação seja tecnicamente exagerada, tomarei como premissa constante que o erro que cometemos ao afirmar que as leis tratam o passado e o futuro em pé de igualdade é mínimo — pelo menos do ponto de vista da explicação do enigma da seta do tempo.
6. Timothy Ferris, *Corning of age in the milky way* (Nova York: Anchor, 1989).

2. UNIVERSO E O BALDE [pp. 40-57]

1. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's mathematical principle of natural philosophy and his system of the world*, trad. A. Motte e Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1934), v. l, p. 10.
2. Ibid., p. 6.
3. Ibid.

4. Ibid., p. 12.
5. Albert Einstein, no prefácio do livro de Max Jammer, *Concepts of space: the histories of theories of space in physics* (Nova York: Dover, 1993).
6. A. Rupert Hall, *Isaac Newton, adventurer in thought* (Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1992), p. 27.
7. Ibid.
8. H. G. Alexander (ed.), *The Leibniz-Clarke correspondence* (Manchester: Manchester University Press, 1956).
9. Particularizo Leibniz como representante dos que argumentam contra atribuir-se ao espaço uma existência independente da dos objetos que nele se encontram, posição que é defendida também por muitos outros, como Christiaan Huygens e Bishop Berkeley.
10. Veja, por exemplo, Max Jammer, p. 116.
11. V. I. Lênin, *Materialism and empiriocriticism: critical comments on a reactionary philosophy* (Nova York: International Publications, 1909). Segunda edição em inglês de *Materializm i Empiriocriticizm: Crititcheskia Zametki ob' Odnoi Reactcionnoi Filosofii* (Moscou: Zveno Press, 1909).

3. A RELATIVIDADE E O ABSOLUTO [pp. 58-99]

1.Para o leitor treinado em matemática, estas quatro equações sãoV • *E* = p/e_0, *V* • *B* = 0, V x *E* + *dB/dt* = 0, V x B $e_{()}jx_{()}$*dEldt fij,* em que *E, B,* p, /, e_0 e $p_{,0}$ denotam o campo elétrico, o campo magnético, a densidade da carga elétrica, a densidade da corrente elétrica, a permissividade do espaço livre e a permeabilidade do espaço livre, respectivamente. Como se vê, as equações de Maxwell relacionam a taxa de variação dos campos eletromagnéticos com a presença de cargas e correntes elétricas. Não é difícil demonstrar que essas equações implicam que as ondas eletromagnéticas tenham uma velocidade dada por $l/\sqrt{e_Q pi_0}$, Q^{ue} resulta ser a velocidade da luz.
2. Existe uma certa controvérsia quanto ao papel desempenhado por tais experimentos no desenvolvimento da relatividade especial por Einstein. Na biografia que escreveu sobre Einstein, *Subtle is the lord: the Science and the life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), pp. 115-9, Abraham Pais argumentou, usando as próprias afirmações feitas por Einstein nos últimos anos da sua vida, que o grande cientista conhecia os resultados de Michelson-Morley. Albrecht Fõlsing, em *Albert Einstein: a biography* (Nova York: Viking, 1997), pp. 217-20, também argumentou que Einstein conhecia os resultados de Michelson-Morley, assim como outros experimentos infrutíferos em busca de

evidências da existência do éter, como o trabalho de Armand Fizeau. Mas Fölsing e muitos outros historiadores da ciência também argumentaram que esses experimentos desempenharam, no máximo, um papel secundário no pensamento de Einstein, que se orientava principalmente por considerações de simetria matemática, simplicidade e uma notável intuição física.

3. Para que possamos ver qualquer coisa, a luz tem de viajar até os nossos olhos; do mesmo modo, para que vejamos a luz, ela própria tem de fazer essa viagem. Assim, quando falo que Bart vê a luz que parte, faço uma simplificação. Estou supondo que Bart tenha um pequeno exército de ajudantes que se movem à mesma velocidade que ele, mas situados a diferentes distâncias ao longo do caminho seguido por ele e pela luz. Estes ajudantes mantêm Bart atualizado a respeito da distância a que a luz se encontra e do momento em que ela alcançou essas localizações distantes. Com base nessas informações, Bart pode calcular a velocidade com que a luz se afasta dele.

4. Há muitas deduções matemáticas das ideias de Einstein sobre o espaço e o tempo que resultam da relatividade especial. Se você tiver interesse, pode, por exemplo, ler o capítulo 2 de O *universo elegante* (assim como os detalhes matemáticos que aparecem nas notas relativas ao capítulo). Uma descrição mais técnica mas extremamente clara é dada por Edwin Taylor e John Archibald Wheeler em *Spacetime physics: introduction to special relativity* (Nova York: W. H. Freeman & Co., 1992).

5. A noção de que o tempo para à velocidade da luz é interessante, mas é importante não exagerar quanto às implicações desse fato. A relatividade especial mostra que nenhum objeto material pode alcançar a velocidade da luz: quanto mais rapidamente um objeto material viaje, tanto mais difícil é fazer aumentar a sua velocidade. Em velocidades já muito próximas à da luz, teríamos que dar ao objeto um impulso de força essencialmente infinita para aumentar a sua velocidade, o que nunca poderá ser feito. Assim, a perspectiva “atemporal” do fóton limita-se a objetos sem massa (de que o fóton é um exemplo) e a “atemporalidade” só é acessível a uns poucos tipos de partículas e está permanentemente fora do limite do que pode ser alcançado por qualquer outra coisa. Imaginar como o universo apareceria para algo que se move à velocidade da luz é um exercício interessante e frutífero, mas, em última análise, temos de concentrar-nos nas perspectivas que podem ser alcançadas por objetos materiais, como nós próprios, se quisermos extrair inferências a respeito de como a relatividade especial afeta o nosso conceito vivencial do tempo.

6. Veja Abraham Pais, *Subtle is the lord*, pp. 113-4.

7. Para sermos mais precisos, *definimos* que a água está girando quando ela toma uma forma côncava e que não está girando quando não a toma. A partir de uma perspectiva machiana, em um universo vazio não existe o conceito de rotação, de modo que a superfície da água estaria sempre plana (ou, para evitarmos questões relativas às consequências da falta de gravidade sobre a água, podemos dizer que a ausência de tensão na corda amarrada entre as duas pedras a manteria sempre frouxa). O que afirmamos aqui é que, em contraste, na relatividade especial existe a noção de rotação, mesmo em um universo vazio, de maneira que a superfície da água pode ser côncava (e a tensão da corda pode mantê-la esticada). Nesse sentido, a relatividade especial viola as ideias de Mach.
8. Albrecht Fölsing, *Albert Einstein* (Nova York: Viking Press, 1997), pp. 208-10.
9. O leitor com inclinação pela matemática notará que se escolhermos as unidades de maneira que a velocidade da luz tome a forma de uma unidade espacial por uma unidade de tempo (como um ano-luz por ano, ou um segundo-luz por segundo, em que um ano-luz corresponde a mais de 9 trilhões de quilômetros e um segundo-luz a cerca de 300 mil quilômetros), então a luz se moverá através do espaço-tempo em raios com 45 graus de inclinação (porque essas linhas diagonais são as que cobrem uma unidade de espaço por uma unidade de tempo, duas unidades de espaço por duas unidades de tempo e assim por diante). Como nada pode exceder a velocidade da luz, qualquer objeto material tem de percorrer, em um determinado intervalo de tempo, uma distância espacial menor do que a que um raio de luz percorreria e, em consequência, o caminho por ele seguido através do espaço-tempo tem de compor com a linha central do diagrama (a linha que atravessa o pão de crosta a crosta, passando pelo centro) um ângulo menor do que 45 graus. Além disso, Einstein demonstrou que as fatias de tempo para um observador que se mova com a velocidade v— a totalidade do espaço em um momento do tempo desse observador — têm uma equação (supondo uma única dimensão espacial por razões de simplicidade) dada por $t_{movimento} = \Upsilon\ (\sim\ (v/c^2)\ ^{x}{}_{a}$,«cbm,b)> em que 7 = (1 $v^2/c^2)^{1/2}$, ecéa velocidade da luz. Em unidades em que *c*1, notamos que v < 1, de modo que uma fatia de tempo para o observador em movimento — o local em que $t_{em\ movimento}$ toma um valor fixo — tem a forma *(t* $_{estacionário}$ *vx* $_{estac}i_0$*nário*) = constante. Essas fatias de tempo formam um ângulo com relação às fatias de tempo estacionárias (os locais da forma t $_{esfíinoMí}$j$_{no}$ = constante), e como v < 1, o ângulo entre elas é menor do que 45 graus.
10. Para o leitor com inclinação pela matemática, a afirmação aqui feita é a de que as geodésicas do espaço-tempo de Minkowski — os caminhos de

comprimento espaço-temporal extremo entre dois pontos dados — são entidades geométricas que não dependem de nenhuma escolha particular de coordenadas ou esquemas referenciais. Elas são características intrínsecas, absolutas e geométricas do espaço-tempo. Explicitamente, usando a métrica-padrão de Minkowski, as geodésicas (de tipo temporal) são linhas retas (cujo ângulo com respeito ao eixo do tempo é menor do que 45 graus, uma vez que a velocidade envolvida é menor do que a da luz).

11. Há algo mais, que também tem importância e com o que todos os observadores, independentemente do seu movimento, também concordam. Está implícito no que descrevemos, mas vale a pena explicitar. Se um evento é causa de outro (eu atiro uma pedra e quebro o vidro de uma janela), todos os observadores concordam em que a causa aconteceu *antes* do efeito (todos os observadores concordam em que eu atirei a pedra *antes* de que o vidro da janela se quebrasse). Para o leitor que tem inclinação pela matemática, não é difícil verificar isso usando a nossa descrição esquemática do espaço-tempo. Se o evento A é a causa do evento B, uma linha traçada de A a B corta cada uma das fatias de tempo (fatias de tempo de um observador em repouso com relação a A) em um ângulo que é *maior* do que 45 graus (o ângulo entre os eixos espaciais — eixos que estão em qualquer fatia de tempo considerada — e a linha entre A e B é maior do que 45 graus). Por exemplo, se A e B acontecem na nossa localização do espaço (o elástico que aperta o meu dedo [A] faz com que ele fique roxo [B]), então a linha que liga A e B faz um ângulo de 90 graus com relação às fatias de tempo. Se A e B acontecem em diferentes localizações do espaço, o que quer que tenha viajado de A a B para exercer a influência (a minha pedra que viajou da minha mão para a vidraça) o fez a uma velocidade menor do que a da luz, o que significa que o ângulo difere de 90 graus (o ângulo em que não está envolvida nenhuma velocidade) em menos de 45 graus — isto é: o ângulo com respeito às fatias de tempo (os eixos espaciais) é maior do que 45 graus. (Lembre-se de que na nota 9 deste capítulo vimos que a velocidade da luz estabelece o limite e que esse movimento traça as linhas de 45 graus.) Aqui, como na nota 9, os diferentes fatiamentos do tempo associados com um observador em movimento formam ângulos com relação aos de um observador em repouso, mas o ângulo é sempre *menor* do que 45 graus (uma vez que o movimento relativo entre dois objetos materiais é sempre menor do que a velocidade da luz). E como o ângulo associado com eventos causalmente relacionados é sempre *maior* do que 45 graus, as fatias de tempo de um observador, que viaja necessariamente a uma velocidade inferior à da luz, não podem encontrar primeiro o efeito e depois a causa. Para todos os observadores, a causa precede o efeito.

12. Entre outras coisas, a noção de que as causas precedem os seus efeitos (veja a nota precedente) seria negada, se as influências pudessem viajar mais rápido do que a luz.
13. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton s mathematical principies of natural philosophy and his system of the world*, trad. A. Motte e Florian Cajori (Berkeley: University of Califórnia Press, 1962), v. l,p. 634.
14. Como a atração gravitacional da Terra difere de um lugar a outro, um observador em queda livre e que tenha alguma extensão espacial ainda poderá detectar também uma influência gravitacional residual. Por exemplo, se o observador, ao mover-se em queda livre, esticar os braços e soltar duas bolas de tênis — uma com a mão direita e a outra com a esquerda —, ambas cairão através de um caminho que leva ao centro da Terra. Assim, a partir da perspectiva do observador, ele estará caindo diretamente para o centro da Terra, a bola solta com a mão direita o acompanhará em uma trajetória ligeiramente inclinada para a esquerda e a bola solta com a mão esquerda fará uma trajetória ligeiramente inclinada para a direita. Medições cuidadosas indicarão ao observador que a distância entre as duas bolas diminuirá pouco a pouco; elas se aproximarão uma da outra. Este efeito deriva essencialmente de que as bolas foram soltas em lugares ligeiramente diferentes do espaço, de modo que as suas trajetórias de queda livre em direção ao centro da Terra são também ligeiramente diferentes. Assim, um enunciado mais preciso da observação de Einstein é que quanto menor a extensão espacial de um objeto, mais completamente ele pode eliminar a gravidade ao mover-se em queda livre. Este é um importante ponto de partida, que pode, no entanto, ser ignorado para os efeitos da nossa discussão.
15. Para uma explicação mais detalhada, mas também global, da deformação do espaço e do tempo de acordo com a relatividade geral, veja, por exemplo, o capítulo 2 de O *universo elegante*.
16. Para o leitor treinado em matemática, as equações de Einstein são $G^{\wedge}_{v} = (87tG/c^4)T|jiu$, em que o lado esquerdo descreve a curvatura do espaço-tempo usando o tensor de Einstein e o lado direito descreve a distribuição da matéria e da energia no universo usando o tensor de energia-momento.
17. Charles Misner, Kip Thorne e John Archibald Wheeler, *Gravitation* (São Francisco: W. H. Freeman and Co., 1973), pp. 544-5.
18. Em 1954, Einstein escreveu para um colega: “Na verdade, já não se deveria falar mais do princípio de Mach” (citado em Abraham Pais, *Subtle is the lord*, p. 288).
19. Como mencionado anteriormente, sucessivas gerações atribuíram a Mach as ideias que se seguem, muito embora a sua obra não as contenha explicitamente

dessa maneira.
20. Impõe-se aqui a qualificação de que os objetos situados a uma distância tão grande que o tempo transcorrido desde a origem do universo não foi suficiente para que a luz emitida por eles — ou a sua influência gravitacional — tenha chegado até nós, não exercem impacto sobre a gravidade que experimentamos.
21. O leitor treinado reconhecerá que esta afirmação é, tecnicamente falando, demasiadoforte, uma vez que existem soluções não triviais (ou seja, soluções que não são do tipo do espaço de Minkowski) de espaço vazio para a relatividade geral. Aqui estou simplesmente usando o fato de que a relatividade especial pode ser entendida como um caso especial da relatividade geral em que a gravidade é ignorada.
22. Para equilibrar, devo observar que há físicos e filósofos que não concordam com esta conclusão. Embora Einstein tenha desistido do princípio de Mach, nos últimos trinta anos ele recobrou vida própria. Várias versões e interpretações da ideia de Mach foram divulgadas e alguns físicos sugerem, por exemplo, que a relatividade geral, sim, adota as ideias de Mach. São apenas algumas formas particulares que o espaço-tempo pode ter — como o espaço-tempo plano e infinito de um universo vazio — que não o fazem. Eles sugerem a possibilidade de que qualquer espaço-tempo realista, ainda que de maneira remota — dotado de estrelas e galáxias e assim por diante —, efetivamente satisfaz o princípio de Mach. Outros ofereceram reformulações do princípio de Mach em que não se trata mais de saber como objetos, tais como pedras amarradas por cordas ou baldes cheios de água, se comportam em um universo vazio, mas sim de como os vários fatiamentos do tempo — as várias geometrias espaciais tridimensionais — relacionam-se entre si através do tempo. Uma referência esclarecedora a respeito do pensamento moderno sobre essas ideias está em *Maais principie: from Newtons bucket to quantum gravity*, de Julian Barbour e Herbert Pfister (eds.) (Berlim: Birkhàuser, 1995), que é uma coleção de ensaios sobre o tema. A propósito, essa referência contém uma pesquisa de opinião com cerca de quarenta físicos e filósofos a respeito de como veem o princípio de Mach. A maior parte (mais de 90%) concorda em que a relatividade geral não se coaduna inteiramente com as ideias de Mach. Outra discussão excelente e extremamente interessante sobre essas ideias, feita a partir de uma perspectiva francamente favorável a Mach e em nível adequado ao público em geral, está no livro de Julian Barbour *The end. of time: the next revolution in physics* (Oxford: Oxford University Press, 1999).
23. O leitor com inclinação para a matemática poderá considerar esclarecedor o fato de que Einstein acreditava que o espaço-tempo não tinha existência independente da sua métrica (o instrumento matemático que dá as relações de

distância no espaço-tempo), de modo que, se tudo fosse removido — inclusive a própria métrica —, o espaço-tempo *não* seria um "algo". Sempre me refiro ao "espaço-tempo" como um complexo que inclui a métrica que resolve as equações de Einstein e, portanto, a conclusão a que chegamos, em linguagem matemática, é a de que o espaço-tempo métrico é um "algo".
24. Max Jammer, *Concepts of space*, p. XVII. [4]

4. O ESPAÇO EMARANHADO [pp. 100-52]

1. Mais precisamente, este parece ser um conceito medieval, cujas raízes históricas remontam a Aristóteles.
2. Como discutiremos posteriormente neste livro, há áreas de conhecimento (como o BigBang e os buracos negros) que continuam a apresentar muitos mistérios, devidos, pelo menos em parte, aos tamanhos extremamente reduzidos e às densidades extremamente altas que levam ao impasse mesmo teorias mais refinadas como a de Einstein. Assim, esta afirmação se aplica a todos os contextos, salvo aqueles extremos, em que as próprias leis conhecidas entram em suspeição.
3. Um dos primeiros leitores deste texto, que, surpreendentemente, é um perito em vudu, informou-me de que o que se imagina é que *algo* se desloca de um lugar a outro para transmitir as intenções do praticante de vudu — especificamente um espírito. Portanto, o meu exemplo de um processo não-local pode estar errado, dependendo da sua posição quanto ao vudu. Mas a ideia é clara.
4. Para evitar confusões, permitam-me enfatizar novamente que, quando eu digo "o universo não é local", ou "algo que fazemos em um lugar pode estar emaranhado com algo que ocorre em outro lugar", não me refiro à capacidade de exercer um controle intencional e instantâneo sobre algo que está distante. Em vez disso, como ficará claro, o efeito a que me refiro manifesta-se como *correlação* entre eventos que ocorrem — usualmente sob a forma de correlações entre resultados de medições — em localizações distantes (localizações com relação às quais não haveria tempo suficiente para que a própria luz viajasse de uma para a outra). Estou me referindo, assim, ao que os físicos denominam *correlações não-locais*. À primeira vista, tais correlações podem não parecer particularmente surpreendentes. Se alguém lhe envia pelo correio uma luva e manda a outra parte do par de luvas para outra pessoa a milhares de quilômetros de distância, haverá uma correlação de esquerda e direita entre as duas luvas: se você receber a luva esquerda, a outra pessoa receberá a luva direita; se a sua for

a direita, a dele será a esquerda. Evidentemente, não há nada de misterioso nessas correlações. Mas, como descreveremos, as correlações que aparecem no mundo quântico parecem ter um caráter diferente. É como se houvesse um par de “luvas quânticas”, em que cada membro pode tanto ser o da esquerda quanto o da direita e só se produzisse um comprometimento com uma definição quando um dos membros do par for apropriamente observado ou sofrer uma interação. A estranheza surge porque, embora cada luva pareça escolher o seu lado aleatoriamente, quando observada, ambas as luvas funcionam em conjunto, ainda que separadas por grandes distâncias: quando uma escolhe a esquerda, a outra escolhe a direita e vice-versa.

5. A mecânica quântica faz previsões a respeito do microcosmo que concordam fantasticamente com as observações experimentais. Neste ponto há acordo universal. Porém, como os detalhes da mecânica quântica, tal como vimos neste capítulo, diferem significativamente dos que provêm da nossa experiência comum, e como também há diferentes formulações matemáticas da teoria (e diferentes formulações sobre como a teoria se comporta no intervalo entre os fenômenos do microcosmo e os resultados mensuráveis do macrocosmo), não há consenso sobre como *interpretar vá* rios aspectos da teoria (e vários dados enigmáticos que a teoria, no entanto, logra explicar matematicamente), inclusive questões relativas à não-localidade. Neste capítulo, adotei um ponto de vista particular, que considero o mais convincente com base no nosso atual conhecimento teórico e nos resultados experimentais. Saliento, contudo, que nem todos estão de acordo com esse ponto de vista. Em uma próxima nota, depois de explicar essa perspectiva mais a fundo, referir-me-ei brevemente a algumas das outras perspectivas e recomendarei leituras a respeito delas. Saliento também que, como veremos posteriormente, os experimentos contradizem a crença de Einstein de que os dados pudessem ser explicados com base apenas no fato de que as partículas possuíssem sempre propriedades definidas, embora ocultas, *sem qualquer emprego ou menção de emaranhamentos não-locais.* No entanto, o fracasso desta perspectiva exclui apenas que o nosso universo seja local. Não exclui a possibilidade de que as partículas tenham as características definidas mas ocultas.

6. Para o leitor com inclinação para a matemática, observo que há um aspecto potencialmente enganador nessa descrição. Para sistemas com muitas partículas, a onda de probabilidade (a função de onda, na terminologia-padrão) tem essencialmente a mesma interpretação aqui descrita, mas é definida como função no *espaço de configuração* das partículas (para uma única partícula, o espaço de configuração é isomórfico ao espaço real, mas para um sistema com N partículas

ele tem 3N dimensões). É importante ter isso em mente quando pensamos sobre a questão de se a função de onda é uma entidade física real ou simplesmente um instrumento matemático, pois, se tomarmos a primeira posição, será necessário adotar também a realidade do espaço de configuração — uma variação interessante dos temas dos capítulos 2 e 3. Na teoria quântica de campo relativística, os campos podem ser definidos nas quatro dimensões normais do espaço-tempo, mas existem também outras formulações, de uso menos corrente, que invocam funções de onda generalizadas — chamadas *funcionais de onda (wavefunctionals*), definidas em um espaço ainda mais abstrato, *o espaço dos campos (field space).*

7. As experiências a que me refiro aqui são as do *efeito fotoelétrico*, em que a luz que incide sobre diversos metais faz com que os elétrons sejam ejetados da superfície do metal. Os físicos verificaram que quanto maior a intensidade da luz, tanto maior o número de elétrons emitidos. Além disso, as experiências revelaram que a energia de cada elétron ejetado é determinada pela cor — a frequência — da luz. Como argumentou Einstein, isso é fácil de entender, se se admitir que os raios de luz são compostos por partículas, uma vez que a maior intensidade da luz traduz-se em um maior número de partículas (mais fótons) no raio de luz — e quanto mais fótons houver, mais elétrons serão por eles atingidos e, consequentemente, ejetados da superfície metálica. Além disso, a frequência da luz determinaria a energia de cada fóton e, por conseguinte, determinaria também a energia de cada elétron ejetado, o que confirma exatamente os dados. As propriedades dos fótons como partículas foram finalmente confirmadas por Arthur Compton, em 1923, por meio de experiências que envolviam a disseminação elástica de elétrons e fótons.

8. Institut International de Physique Solvay, *Rapport et discussions du 5ème Conseil* (Paris, 1928), pp. 253 e segs.

9. Irene Born, trad., *The Born-Einstein letters* (Nova York: Walker, 1971), p. 223.

10. Henry Stapp, *Nuovo Cimento* 40B (1977), pp. 191-204.

11. David Bohm está entre os cientistas mais criativos que trabalharam com a mecânica quântica no século XX. Nasceu na Pennsylvania em 1917 e estudou com Robert Oppenheimer em Berkeley. Quando era professor da Universidade de Princeton foi convocado a testemunhar perante a Comissão de Atividades Antiamericanas da Câmara de Deputados dos EUA**,** mas recusou-se a comparecer. Preferiu deixar os Estados Unidos, tornando-se professor na Universidade de São Paulo, Brasil, depois na Technion, em Israel, e finalmente

no Birkbeck College da Universidade de Londres. Viveu em Londres até a sua morte, em 1992.

12. Por certo, se se esperar o tempo suficiente, o que for feito com uma partícula pode, em princípio, afetar a outra: uma partícula pode enviar um sinal que alerte a outra de que ela foi submetida a uma medição e esse sinal pode afetar a segunda partícula. Contudo, como nenhum sinal pode viajar a velocidades superiores à da luz, esse tipo de influência não é instantâneo. O ponto importante da presente discussão é o de que no próprio momento em que se mede o *spin* de uma partícula com relação ao eixo escolhido, conhecemos o *spin* da outra partícula com relação a esse eixo. Portanto, qualquer tipo de comunicação "normal" entre as partículas — luminal ou subluminal — é irrelevante.

13. Nesta seção e na próxima, a descrição da descoberta de Bell que eu emprego é uma "dramatização" inspirada pelos maravilhosos textos de David Mermin: "Quantum mysteries for anyone", *Journal ofPhilosophy* 78, (1981), pp. 397-408; "Can you help your team tonight by watching on TV?" em *Philosophical consequences ofquantum theory: reflections on BelYs theorem*, James T. Cushing e Ernan McMullin (eds.) (University of Notre Dame Press, 1989); "Spooky action at a distance: mysteries of the quantum theory", em *The great ideas today* (Encyclopaedia Britannica, Inc., 1988), todos os quais estão reunidos em N. David Mermin, *Boojums all the way through* (Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1990). Para quem esteja interessado em desenvolver essas ideias do ponto de vista técnico, nada melhor do que começar pelos próprios textos de Bell, muitos dos quais estão reunidos em J. S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics* (Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1997).

14. Conquanto a premissa da localidade seja crucial na argumentação de Einstein, Podolsky e Rosen, outros pesquisadores tentaram encontrar falhas em outros elementos do seu raciocínio, com vistas a evitar a conclusão de que o universo admite aspectos não-locais. Afirma-se por vezes, por exemplo, que tudo o que os dados requerem é que abandonemos o chamado realismo — a ideia de que os objetos possuem as propriedades que detectamos ao medi-las independentemente do processo de medição. Nesse contexto, no entanto, essa afirmação não resolve o problema. Se o raciocínio de Einstein, Podolsky e Rosen tivesse sido confirmado experimentalmente, não haveria nada de misterioso a respeito das correlações de longo alcance da mecânica quântica, que não seriam mais surpreendentes do que as correlações de longo alcance de caráter clássico, como o fato de que se aqui está a luva da mão esquerda, a sua parceira, em outro lugar, será a luva da mão direita. Mas esse raciocínio é refutado pelos resultados

de Bell/Aspect. E se, em resposta a essa refutação a Einstein, Podolsky e Rosen, abandonarmos o realismo — como o fazemos na mecânica quântica padrão —, isso não ajudará em nada a diminuir a assombrosa estranheza das correlações de longo alcance entre processos *aleatórios* amplamente separados. Quando abandonamos o realismo, as luvas, tal como na nota 4, tornam-se "luvas quânticas". O abandono do realismo não torna menos bizarras, de modo algum, as correlações não-locais observadas. É verdade que se, diante dos resultados de Einstein, Podolsky, Rosen, Bell e Aspect, tentarmos manter o realismo — como, por exemplo, na teoria de Bohm, discutida mais adiante neste capítulo — o tipo de não-localidade requerida para ser consistente com os dados poderá ser mais severo, envolvendo interações não-locais e não apenas correlações não-locais. Muitos físicos resistem a essa opção e por isso abandonam o realismo.

15. Veja, por exemplo, Murray Gell-Mann, *The quark and the jaguar* (Nova York: Freeman, 1994), e Huw Price, Times *arrow and Archimedes'point* (Oxford: Oxford University Press, 1996).

16. A relatividade especial proíbe a qualquer coisa que tenha alguma vez viajado a velocidades inferiores à da luz ultrapassar a barreira por ela estabelecida. Mas se algo *sempre* viajou a uma velocidade mais rápida do que a da luz, isso não fica explicitamente proibido pela relatividade especial. As partículas hipotéticas desse tipo recebem o nome de *táquions.* A maioria dos físicos acredita que os *táquions* não existem, mas outros entretêm-se com a possibilidade de que existam. Até aqui, contudo, em grande medida por causa das estranhas características que essas partículas teriam, de acordo com as equações da relatividade especial, ninguém encontrou qualquer utilidade particular para elas — mesmo no terreno hipotético. Atualmente, tende-se a considerar que as teorias que dão lugar a *táquions* sofrem de instabilidade.

17. O leitor com inclinação para a matemática deve notar que, essencialmente, a relatividade especial afirma que as leis da física devem ser invariantes em Lorentz, ou seja, invariantes nas transformações coordenadas SO(3,l) no espaço-tempo de Minkowski. A conclusão, portanto, é a de que a mecânica quântica estaria a par com a relatividade especial se pudesse ser formulada de um modo completamente invariante em Lorentz. A mecânica quântica relativística e a teoria quântica de campo relativística já avançaram muito nessa direção, mas ainda não há acordo total sobre se elas enfocaram o problema quântico da medição dentro de um esquema invariante em Lorentz. Na teoria quântica de campo relativística, por exemplo, é fácil computar de maneira completamente invariante em Lorentz as amplitudes de probabilidade e as probabilidades para os resultados de várias experiências. Mas os tratamentos-padrões não chegam a

descrever também o modo pelo qual um ou outro resultado particular emerge do domínio das possibilidades quânticas — ou seja, o que acontece no processo de medição. Essa é uma questão particularmente importante para o emaranhamento, uma vez que o fenômeno depende do efeito da ação do experimentador — o ato de medir uma das propriedades da partícula emaranhada. Para uma discussão mais detalhada, veja Tim Maudlin, *Quantum non-locality and relativity* (Oxford: Blackwell, 2002).

18. Para o leitor com inclinação pela matemática, eis o cálculo da mecânica quântica que faz previsões de acordo com esses experimentos. Suponha que, dentre os eixos ao longo dos quais os detectores medem o spm, um seja vertical e os outros 120 graus no sentido horário e no sentido anti-horário com relação à vertical (como 12 horas, 4 horas e 8 horas, em dois relógios, um para cada detector, de frente um para o outro) e considere, para fins de argumentação, que dois elétrons emerjam em sentidos opostos e se dirijam a esses detectores no chamado estado singleto. Esse é o estado cujo *spin* total é zero, o que assegura que, se um elétron for detectado no estado de *spin* para cima, o outro estará no estado de *spin* para baixo com relação a um eixo dado, e vice-versa. (Lembre-se de que, no texto, para simplificar, descrevi a correlação entre os elétrons como se ambos tivessem o mesmo *spin*, para cima ou para baixo. Na verdade, a correlação é tal que os *spins* apontam para direções opostas. Para manter a associação com o texto principal, pode-se imaginar que os detectores foram calibrados de maneira oposta, de modo que o que um vê como *spin* para cima, o outro vê como *spin* para baixo.) Um resultado-padrão obtido por meio da mecânica quântica elementar indica que, se o ângulo entre os eixos ao longo dos quais os nossos dois detectores medem os *spins* dos elétrons for 0, então a probabilidade de que eles venham a medir valores opostos de *spin* é $\cos^2$ ($^\circ/_2$). Assim, se os eixos dos detectores estiverem alinhados (0 = 0), eles certamente medirão valores opostos de *spin* (o que é análogo à condição de que os detectores do texto principal sempre meçam valores iguais de *spin* quando apontados para a mesma direção), e se eles estiverem dispostos em ângulos, seja de +120, seja de -120 graus, a probabilidade de que venham a medir valores opostos de *spin é* $\cos^2$ (+120° ou -120°) = V4. E se os eixos dos detectores estiverem dispostos de maneira aleatória, em V3 das vezes eles apontarão para a mesma direção $e^2/3$ das vezes não o farão. Desse modo, no conjunto de todos os casos, esperamos encontrar *spins* opostos em (V3) (1) + (^{2}A) *(^{l}U)* = V2 das vezes, como mostram os dados.

Pode parecer estranho que a premissa da localidade produza uma correlação de *spin* mais alta (superior a 50%) do que a que encontramos na mecânica quântica

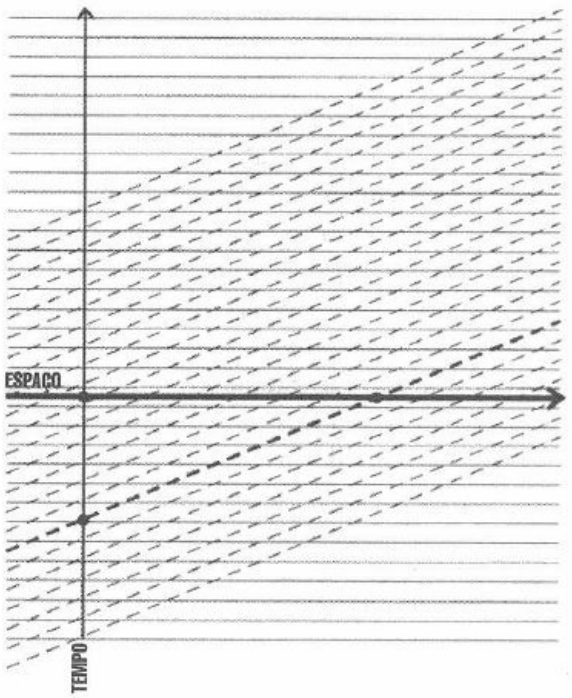
padrão (exatamente 50%). Poder-se-ia pensar que o emaranhamento a longa distância da mecânica quântica produzisse uma correlação maior. Na verdade, é o que acontece. Isso pode ser visto da seguinte maneira: com uma correlação de 50% para todas as medições, a mecânica quântica produz uma correlação de 100% para as medições em que os eixos dos detectores da esquerda e da direita são ajustados para apontar para a mesma direção. No universo local de Einstein, Podolsky e Rosen, uma correlação superior a 55% em todas as medições é necessária para assegurar um acordo de 100% quando se escolhem os mesmos eixos. Em linhas gerais, portanto, em um universo local, uma correlação de 50% para todas as medições produziria uma correlação *menor* do que 100% quando se escolhem os mesmos eixos — isto é, uma correlação menor do que a que encontramos no nosso universo quântico não-local.

19. Você poderia pensar que um colapso instantâneo estaria violando desde o início o limite de velocidade estabelecido pela luz, com o que violaria a relatividade especial, e se as ondas de probabilidade fossem realmente como as ondas de água, a sua argumentação seria irrefutável. Com efeito, seria mais extraordinário que o valor de uma onda de probabilidade caísse repentinamente a zero em toda uma enorme extensão do espaço do que se toda a água do oceano Pacífico de repente se tornasse totalmente plana e deixasse de mover-se. Mas os defensores da mecânica quântica argumentam que as ondas de probabilidade *não* são como as ondas de água. Uma onda de probabilidade, embora descreva a matéria, não é, ela própria, algo material. A argumentação prossegue afirmando que a barreira da velocidade da luz aplica-se apenas aos objetos materiais. Coisas cujos movimentos podem ser diretamente vistos, sentidos e detectados. Se a onda de probabilidade de um elétron caiu a zero na galáxia de Andrômeda, um físico do local simplesmente não conseguirá, com 100% de certeza, detectar o elétron. Nas observações feitas em Andrômeda, nada revelará a súbita mudança na onda de probabilidade associada à detecção do elétron, digamos, em Nova York. Na medida em que o elétron não viaje de um ponto a outro a uma velocidade maior do que a da luz, não haverá conflito com a relatividade especial. Como se vê, a única coisa que acontece é que o elétron foi detectado em Nova York e não em qualquer outro lugar. A sua velocidade nem sequer entra em discussão. Desse modo, embora o colapso instantâneo das ondas de probabilidade apresente enigmas e problemas (que serão discutidos em maior detalhe no capítulo 7), não necessariamente ele implica um conflito com a relatividade especial.

20. Para uma discussão de algumas dessas propostas, veja Tim Maudlin, *Quantum nonlocality and relativity.*

5. O RIO GELADO [pp. 155-71]

1. Para o leitor com inclinação pela matemática, a partir da equação $t_{cm\ movimento} = 7\ (t_{esta}.\ cionário \sim (^{y}/c^{2})^{x}\ estacionário)$ (discutida na nota 9 do capítulo 3) vemos que a lista de agoras de Chewie conterá, em um determinado momento, eventos que, para os observadores da Terra, terão
acontecido $(v/c^{5\,2})\ x_{terra}$ antes, sendo x_{terra} a distância entre Chewie e a Terra. Isso supõe que Chewie esteja afastando-se da Terra. Para um movimento dele em direção à Terra, v terá o sinal contrário e, portanto, os observadores que se dirigem à Terra afirmarão que esses eventos acontecem $(v/c^{2\,*\,*})\ x_{terra}$ depois. Se atribuirmos os valores de v = 10 quilômetros por hora e $x_{terra} = 10^{10}$ anos-luz, verificaremos que $(v/c^{2})\ x_{terra}$ corresponde a cerca de 150 anos.
2. Esses números — e os números similares dados alguns parágrafos mais abaixo para descrever o movimento de Chewie em direção à Terra — eram válidos à época da publicação deste livro, mas, à medida que o tempo passa na Terra, eles vão se tornando ligeiramente imprecisos.
3. O leitor com inclinação pela matemática deve notar que a metáfora do fatiamento do pão do espaço-tempo em ângulos diferentes é o conceito usual dos *diagramas de espaço-tempo* que se ensinam nos cursos sobre a relatividade especial. Nos diagramas de espaço-tempo, a totalidade do espaço tridimensional em um determinado momento do tempo, de acordo com um observador considerado estacionário, é indicada por uma linha horizontal (ou, em diagramas mais elaborados, por um plano horizontal), enquanto o tempo é indicado pelo eixo vertical. (Na nossa descrição, cada “fatia de pão” — um plano — representa a totalidade do espaço em um momento do tempo, enquanto o eixo que passa pelo meio do pão, de uma crosta à outra, é o eixo do tempo.) Os diagramas de espaço-tempo propiciam uma maneira instigante de ilustrar a afirmação que fizemos a respeito da sua fatia de agora e da de Chewie.



As linhas contínuas sem negrito são fatias de tempo iguais (fatias de agoras) para observadores em repouso com relação à Terra (para simplificar, imaginemos que a Terra não está girando nem sofrendo qualquer aceleração, uma vez que tais movimentos são complicações irrelevantes para esta discussão), e as linhas pontilhadas sem negrito são fatias de tempo iguais para observadores que se afastam da Terra a uma velocidade de, digamos, quase dez quilômetros por hora. Quando Chewie está em repouso com relação à Terra, as primeiras representam as suas fatias de agoras (e como você está em repouso na Terra durante toda a história, essas linhas contínuas sem negrito sempre representam as suas fatias de agoras), e a linha contínua em negrito mostra a fatia de agora que contém você (o ponto escuro à esquerda), na Terra, no século XXI, e ele (o ponto escuro à direita), ambos em repouso e lendo. Quando Chewie está se afastando da Terra, as linhas pontilhadas representam as suas fatias de agoras, e a linha pontilhada em negrito mostra a fatia de agora que contém Chewie (que acaba de se levantar e começa a andar) e o acidente com o *Titanic* (o ponto escuro abaixo e à esquerda). Note também que uma das fatias de tempo pontilhadas subsequentes conterá Chewie andando (se ele ainda estiver por perto!) e você, na Terra, no século XXI, sentado e lendo. Assim, o que para você é um único momento aparecerá em duas das listas de agoras de Chewie — uma que é relevante antes que ele comece a andar e outra que é relevante depois. Isso revela uma outra maneira em que a noção simples e intuitiva de *agora* — quando destinada a aplicar-se ao espaço como um todo — é transformada pela relatividade especial

em um conceito com aspectos altamente incomuns. Além disso, essas listas de agoras *não* codificam a causalidade: a causalidade-padrão (nota 11, capítulo 3) permanece em pleno vigor. As listas de agoras de Chewie saltam porque ele salta de um esquema referencial para outro. Mas todos os observadores — utilizando uma escolha única e bem definida para a "coordenatização" do espaço-tempo — concordarão entre si quanto a quais são os eventos que podem afetar outros.

4. O leitor perito reconhecerá que estou supondo um espaço-tempo minkowskiano. Em outras geometrias, uma argumentação similar não representará necessariamente o espaçotempo como um todo.

5. *Albert Einstein and Michele Besso: correspondence 1903-1955*, P. Speziali (ed.) (Paris: Hermann, 1972).

6. Essa discussão destina-se a proporcionar um sentido qualitativo de como uma experiência que ocorre *agora*, juntamente com lembranças que você tem *agora*, formam a base da sua percepção de ter acumulado essas lembranças durante a sua vida. Mas se, por exemplo, o seu cérebro e o seu corpo fossem colocados, de algum modo, exatamente no mesmo estado em que se encontram agora, você teria a mesma percepção de haver vivido as situações que as suas lembranças lhe trazem (supondo, como eu, que a base de todas as experiências está no estado físico do cérebro e do corpo), mesmo que essas experiências nunca tenham acontecido, mas sim tenham sido implantadas artificialmente no seu cérebro. Uma maneira de simplificar essa discussão está na sensação de que vivenciamos imediatamente as coisas que acontecem, quando, na realidade, é necessário um certo tempo para que o cérebro processe, reconheça e interprete os estímulos que recebe. Embora verdadeiro, isso não é particularmente relevante para o que desejo assinalar. Trata-se de uma complicação interessante, ainda que pouco tenha a ver com esse caso, derivada de uma análise do tempo feita de maneira diretamente associada à experiência humana. Como vimos antes, os exemplos humanos ajudam a tornar as discussões mais diretas e viscerais, mas nos obrigam a tomar cautela com os aspectos da discussão que são mais interessantes do ponto de vista da biologia do que da perspectiva da física.

7. Você pode perguntar qual a relação entre essa discussão e a descrição que fizemos no capítulo 3 sobre objetos que se "movem" através do espaço à velocidade da luz. Para o leitor que não tem inclinação pela matemática, a resposta, em linhas gerais, é a de que a história de um objeto é representada por uma curva no espaço-tempo — um caminho através do pão do espaço-tempo que focaliza todos os lugares em que o objeto esteve, no momento em que ele aí esteve (parecido com o que vemos na figura 5.1). A noção intuitiva de "movimento" através do espaço-tempo pode ser expressa em linguagem "não-fluxional" simplesmente especificando-se esse caminho (ao contrário de

imaginarmos o caminho desenhando-se ante os nossos olhos). A "velocidade" associada a esse caminho é uma medida do comprimento do caminho (de um determinado ponto a outro) dividido pela diferença de tempo registrada em um relógio levado por alguém, ou algo, entre os dois pontos assinalados do caminho. Aqui também temos um conceito que não envolve nenhum fluxo de tempo: simplesmente olhamos para o que o relógio marca nos dois pontos de interesse. O que acontece é que a velocidade que se obtém dessa maneira é, para *qualquer* movimento, igual à velocidade da luz. O leitor com inclinação pela matemática perceberá que a razão disso é clara. No espaço-tempo de Minkowski a métrica é $ds^2 = c^2dt^2\ dx^2$ (onde dx^2 *é* o comprimento euclidiano $dx_x^2 + dx_2^2 + dx_3^2$), e o tempo levado por um relógio (tempo "próprio") é dado por $dr^2 = ds^2/c^2$. Portanto, claramente, a velocidade através do espaço-tempo, tal como definida, é dada matematicamente por *dsldr*, que é igual a c.

8. Rudolf Carnap, "Autobiography", em *The philosophy of Rudolf Carnap*, P. A. Schilpp (ed.) (Chicago: Library of Living Philosophers, 1963), p. 37.

6. O ACASO E A SETA [pp. 72-209]

1. Note que a assimetria a que me refiro — a seta do tempo — deriva da ordem em que os eventos ocorrem *no* tempo. Podemos pensar também em assimetrias no próprio tempo — por exemplo, como veremos nos capítulos posteriores, segundo algumas teorias cosmológicas, o tempo pode ter tido um começo, mas pode não ter fim. Essas são noções distintas de assimetria temporal e a nossa discussão estará focalizada na primeira. Mesmo assim, ao final do capítulo concluiremos que a assimetria temporal das coisas depende de condições especiais no início da história do universo, o que liga a seta do tempo a aspectos da cosmologia.

2. Para o leitor com inclinação pela matemática, serei mais preciso quanto ao significado de simetria de inversão temporal e assinalarei uma exceção interessante, cuja significação para as questões que estamos discutindo neste capítulo ainda não foi inteiramente resolvida. A noção mais simples de simetria de inversão temporal é a afirmação de que um conjunto de leis da física obedece à simetria de inversão temporal se, dada qualquer solução para as equações, digamos S(f), então *S(-t)* também será uma solução para as equações. Por exemplo, na mecânica newtoniana, com forças que dependem das posições das partículas, se $x(t) = (xft), x_2(t)_J..., x_{3n}(t))$ são as posições de *n* partículas em três dimensões espaciais, então o fato de que *x(t)* resolva $d^2x(t)/dt^2 = F(x\{t))$ implica que *x(-t)* também será uma solução para as equações de Newton, ou seja, d^2x

($t)/dt^2$ = *F(x{-t)).* Veja que *x(-t)* representa o movimento das partículas que passam pelas mesmas posições que *x(t*), mas na ordem inversa, com velocidades inversas.

Como regra geral, um conjunto de leis da física proporciona-nos um algoritmo para a evolução do estado inicial de um sistema físico no tempo t_0 para um outro tempo *t* -1t_0. Concretamente, esse algoritmo pode ser visto como um mapa *U(t)* que toma como dado *S(t_0)* e produz S(f+í$_0$), ou seja: *S(t+t_0) = U(t)S(t_0).* Dizemos que as leis que dão origem a *U{t)* têm simetria de inversão temporal se existir um mapa T que satisfaça *U{-t)* = T'^{1} *U(t)* T. Traduzindo, esta equação diz que, por meio de uma adequada manipulação do estado do sistema físico em um momento (logrado por T), a evolução em um valor tem direção ao tempo futuro de acordo com as leis da teoria (logrado por *U(t)) é* equivalente a uma evolução do sistema em *t* unidades em direção ao tempo passado (indicado por *U{-t)).* Por exemplo, se especificarmos 0 estado de um sistema de partículas em um momento por meio das suas posições e velocidades, então T manteria fixas todas as posições das partículas e inverteria todas as velocidades. A evolução dessa configuração de partículas em direção ao futuro com um valor *t é* equivalente à evolução da configuração original das partículas em direção ao passado com um valor í. (O fator de T'^{1} anula a inversão da velocidade, de modo que, ao final, não só as posições das partículas, mas também as suas velocidades são o que teriam sido t unidades de tempo anteriormente.)

Para certos conjuntos de leis, a operação T é mais complexa do que na mecânica newtoniana. Por exemplo, se estudarmos o movimento das partículas com cargas elétricas na presença de um campo eletromagnético, a inversão das velocidades das partículas seria inadequada para que as equações produzissem uma evolução em que as partículas refazem o seu caminho. Em vez disso, a direção do campo eletromagnético também teria de ser invertida. (Isso é necessário para que o termo v x *B* da equação de Lorentz permaneça invariável.) Assim, nesse caso, a operação T compreende ambas as transformações. O fato de que tenhamos de fazer mais do que simplesmente inverter todas as velocidades das partículas não produz impacto sobre nenhuma das discussões que se seguem neste texto. A única coisa que importa é que o movimento das partículas em uma direção é tão consistente com as leis da física quanto o movimento das partículas na direção inversa. O fato de que, para chegar a isto, tenhamos que inverter quaisquer campos magnéticos que por acaso estejam presentes não tem qualquer relevância específica.

As coisas são mais sutis quando se trata das interações nucleares fracas. As interações fracas são descritas por uma teoria quântica de campos particular

(brevemente discutida no capítulo 9), e um teorema geral mostra que as teorias quânticas de campo (desde que locais, unitárias e invariantes de Lorentz — justamente as que apresentam interesse) sempre são simétricas no contexto das operações *combinadas* de conjugação de carga C (que substitui as partículas pelas respectivas antipartículas), paridade *P* (que inverte as posições desde a origem) e uma operação crua de inversão temporal *T* (que substitui *t* por *-t).* Assim poderíamos definir uma operação T como o produto CPT, mas se a invariância de T requerer absolutamente que a operação *CP* seja incluída, T já não seria interpretada simplesmente como partículas que refazem os seus caminhos (uma vez que, por exemplo, as identidades das partículas seriam modificadas por tal T — as partículas seriam substituídas pelas respectivas antipartículas — e, portanto, já não seriam as partículas originais a refazer os seus caminhos). Na realidade, verifica-se que há algumas situações experimentais exóticas que nos encurralam nessa situação. Há certos tipos de partículas (mésons K, mésons B) cujo repertório de comportamentos é invariante em CPT, mas não em *T* apenas. Isso foi demonstrado indiretamente em 1964 por James Cronin, Vai Fitch e seus colaboradores (razão pela qual Cronin e Fitch receberam o Prêmio Nobel em 1980) quando se verificou que os mésons K violavam a simetria CP (o que deixa claro que eles têm de violar a simetria T, para que *não* violem *CPT).* Mais recentemente, a violação da simetria *T* foi comprovada diretamente pelo experimento CPLEAR, no CERN**,** e pelo experimento KTEV**,** no Fermilab. Em termos gerais, esses experimentos mostram que se se visse um filme dos processos registrados que envolvem esses mésons, seria possível determinar se o filme estava sendo projetado na direção correta do tempo ou na direção inversa. Em outras palavras, essas partículas específicas podem distinguir entre o passado e o futuro. O que permanece obscuro, contudo, é se isso tem alguma relevância com relação à seta do tempo que nós experimentamos nos contextos habituais. Afinal de contas, essas são partículas exóticas que podem ser produzidas por breves momentos em colisões a altas energias, mas que não estão entre os componentes dos objetos materiais familiares. Para muitos físicos, entre os quais me incluo, parece improvável que a invariância temporal de não-inversão evidenciada por essas partículas desempenhe um papel na resposta ao enigma da seta do tempo, razão por que não prosseguiremos na discussão desse exemplo excepcional. Mas a verdade é que ninguém sabe ao certo.

3. Às vezes acho que há uma relutância em aceitar a afirmação teórica de que os pedaços do ovo realmente voltariam a reunir-se para formar novamente um ovo inteiro. Mas a simetria de inversão temporal das leis da natureza, elaborada com

maior precisão na nota anterior, indica que é isso o que aconteceria. Microscopicamente, a quebra de um ovo é um processo físico que envolve as várias moléculas que formam a casca. Aparecem as rachaduras e a casca se parte porque os grupos de moléculas são forçados a separar-se em função do impacto sofrido pelo ovo. Se esses movimentos moleculares acontecessem no sentido inverso, as moléculas voltariam a unir-se, recompondo a casca em sua integridade original.

4. Para manter o foco nas maneiras modernas de refletir sobre essas ideias, estou deixando de lado algumas histórias muito interessantes. Mesmo o pensamento de Boltzmann a respeito da entropia passou por significativos refinamentos durante as décadas de 1870 e 1880, quando ele se correspondeu e interagiu com físicos como James Clerk Maxwell, lorde Kelvin, Josef Loschmidt, Josiah Willard Gibbs, Henri Poincaré, S. H. Burbury e Ernest Zermelo. Com efeito, Boltzmann pensava inicialmente que poderia provar que a entropia seria sempre e absolutamente não decrescente em um sistema físico isolado, e não que fosse simplesmente muito improvável que ocorresse uma redução da entropia. Mas as objeções levantadas por esses físicos e por outros levaram Boltzmann a favorecer, subsequentemente, o enfoque estatístico/probabilístico para esta questão, o qual é empregado até os nossos dias.

5. Estou supondo o uso de um exemplar da edição de *Guerra e paz* da Modern Library Classics, traduzida para o inglês por Constance Garnett, com 1386 páginas de texto.

6. O leitor com inclinação pela matemática deve notar que, como os números podem ser extremamente grandes, a entropia é, na verdade, definida como o logaritmo do número de arranjos possíveis, detalhe que aqui não nos interessa particularmente. Mas isso é importante como questão de princípio, porque é muito conveniente dizer que a entropia é uma quantidade *extensiva*, o que significa que se unimos dois sistemas, a entropia resultante dessa união é a soma das entropias individuais anteriores. Isso só é verdadeiro para a forma logarítmica da entropia, porque o número de arranjos em tais situações é dado pelo produto dos arranjos individuais, de modo que o logaritmo do número de arranjos é aditivo.

7. Embora possamos prever, *em princípio*, onde cada página cairá, pode-se pensar que existe um elemento adicional que determina o ordenamento das páginas: a maneira como as páginas são reunidas para recompor a pilha. Isso não é relevante para a questão de física que estamos discutindo, mas caso você esteja interessado, imagine que temos um acordo de que as páginas serão recolhidas uma a uma, começando pela que está mais próxima a quem as recolha e

continuando assim, sucessivamente. (Poderemos concordar também em que mediremos as distâncias a partir do canto mais próximo da página em questão.)
8. Seria *extremamente* otimista esperar que se tenha êxito no cálculo do movimento de apenas algumas páginas com a precisão requerida para prever o ordenamento das páginas (depois de empregarmos algum algoritmo para recompor a pilha, tal como na nota anterior). Dependendo da flexibilidade e do peso do papel, mesmo esse cálculo comparativamente "simples" pode estar fora do alcance dos nossos computadores atuais.
9. Você pode estar preocupado com a existência de uma diferença fundamental entre a definição de uma noção de entropia para o ordenamento das páginas e a definição correspondente para um conjunto de moléculas. Afinal, o ordenamento das páginas pode ser decomposto página a página — você pode contá-las e, portanto, embora o número total de possibilidades possa ser muito grande, ele é finito. O movimento e a posição até mesmo de uma única molécula, ao contrário, são contínuos — não podem ser contados um a um e, portanto (pelo menos de acordo com a física clássica), há um número infinito de possibilidades. Como se pode, então, fazer um cálculo preciso do número de rearranjos moleculares? Bem, a resposta curta é que essa é uma boa pergunta, mas ninguém ainda foi capaz de respondê-la completamente — e se isso basta para acalmar a sua preocupação, sinta-se livre para voltar agora para o texto principal. A resposta mais longa requer um pouco de matemática e pode ser difícil de acompanhar sem uma formação adequada. Os físicos descrevem um sistema clássico de múltiplas partículas invocando um *espaço-fase*, um espaço de 6N dimensões (em que N é o número de partículas) no qual cada ponto denota todas as posições e velocidades das partículas (cada posição e cada velocidade requer três números, por causa da dimensionalidade 6N do espaço-fase). O ponto fundamental é que o espaço-fase pode ser dividido em regiões tais que todos os pontos em uma região dada correspondem aos arranjos das velocidades e direções das moléculas que têm, em conjunto, a mesma aparência e as mesmas características globais. Se a configuração das moléculas fosse modificada de um ponto em uma região dada do espaço-fase para outro ponto na mesma região, uma avaliação macroscópica comprovaria que as duas configurações são indistinguíveis. Em vez de contar o número de pontos em uma região dada — o que seria o análogo mais direto da contagem do número de diferentes reordenamentos das páginas, mas que daria certamente em um resultado infinito —, os físicos definem a entropia em termos do *volume* de cada região no espaço-fase. Quanto maior o volume, mais pontos haverá e mais alta será a entropia. E o volume de uma região, mesmo uma região de um espaço com maior número de dimensões, é algo que pode receber uma definição matemática rigorosa. (Matematicamente, isso requer que se escolha de

algo chamado medida e, para o leitor com inclinação pela matemática, acrescentarei que normalmente empregamos a medida que é uniforme para todos os microestados compatíveis com um macroestado dado — ou seja, supõe-se que cada configuração microscópica associada com um determinado conjunto de propriedades macroscópicas tenha a mesma probabilidade).

10. Conhecemos especificamente uma maneira em que isto poderia acontecer: se, alguns dias antes, as moléculas de CO2 estivessem a princípio dentro da garrafa, sabemos pela nossa discussão acima que se agora invertêssemos simultaneamente a velocidade e a direção de todas as moléculas de CO2 e de todos os outros átomos e moléculas que de algum modo interagiram com elas e esperássemos o mesmo número de dias, as moléculas se *agrupariam* de novo no interior da garrafa. Mas essa inversão não pode ser realizada na prática e muito menos se pode esperar que aconteça espontaneamente. Devo observar, contudo, que é possível provar matematicamente que, se esperarmos o tempo suficiente, as moléculas de CO_2 encontrarão de modo espontâneo *o caminho de volta para a garrafa.* Um resultado comprovado no século XIX pelo matemático francês Joseph Liouville pode ser utilizado para demonstrar o que se conhece como teorema da recorrência de Poincaré. Ele diz que, com o passar do tempo, um sistema com energia finita e confinado em um volume espacial finito (como moléculas de CO_2 em uma sala fechada) *voltará a um estado arbitrariamente próximo ao seu estado inicial* (neste caso, todas as moléculas de CO2 no interior da garrafa de refrigerante). O problema está no tempo que se tem de esperar para que isso aconteça. Para sistemas com um número relativamente pequeno de componentes, o teorema indica que, tipicamente, teríamos que esperar muito mais do que a idade do universo para que os componentes se reagrupassem de modo espontâneo na configuração inicial. Todavia, como questão de princípio, é bom notar que, com paciência e longevidade infinitas, todo sistema físico espacialmente contido retornará à configuração inicial.

11. Então você pode perguntar por que a água chega a transformar-se em gelo, uma vez que isso significa que as moléculas de H20 tornam-se mais ordenadas, ou seja, atingem uma entropia mais baixa e não mais alta. A resposta, em termos genéricos, é que quando a água líquida se transforma em gelo, ela libera energia para o ambiente (o oposto do que ocorre quando o gelo se derrete, quando ele absorve energia do ambiente), e isso aumenta a entropia ambiental. A temperaturas ambientais suficientemente baixas, ou seja, abaixo de zero grau Celsius, o aumento da entropia ambiental supera a diminuição da entropia da água, de modo que o congelamento passa a ser favorecido pela entropia. É por isso que o gelo se forma no frio do inverno. Igualmente, quando os cubos de

gelo se formam no congelador, a entropia do gelo baixa, mas a geladeira libera calor no ambiente e, quando isso é levado em conta, ocorre um aumento líquido na entropia total. A resposta mais precisa, para o leitor com inclinação para a matemática, é que fenômenos espontâneos do tipo que estamos discutindo aqui são comandados pelo que se conhece como *energia livre.* Intuitivamente, a energia livre é a parte da energia de um sistema que pode ser armazenada para produzir trabalho. Matematicamente, a energia livre, F, define-se: $F = U — TS$, onde U representa a energia total, T a temperatura e S a entropia. Um sistema sofre modificação espontânea quando dela resulta um decréscimo na sua energia livre. A baixas temperaturas, a queda de U associada à transformação da água líquida em gelo supera o decréscimo de S (supera o acréscimo em TS) e, portanto, ocorre. Contudo, a altas temperaturas (acima de zero grau Celsius), a transformação do gelo em água líquida ou em vapor passa a ser favorecida pela entropia (o aumento de S supera as mudanças de U) e, portanto, ocorrerá.

12. Para uma discussão antiga sobre como uma aplicação direta do raciocínio entrópico nos levaria a concluir que a memória e os registros históricos não são relatos confiáveis do passado, veja C. F. von Weizsäcker, em *The unity ofnature* (Nova York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980), pp. 138-46 (publicado originalmente em *Annalen der Physik* 36 (1939). Para uma discussão excelente e mais recente, veja David Albert em *Time and chance* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000).

13. Com efeito, como as leis da física não distinguem entre as direções para adiante e para trás no tempo, a explicação de que havia cubos de gelo completamente formados meia hora antes, às 22 horas, seria *precisamente* tão absurda — entropicamente falando — quanto a previsão de que meia hora depois, às 23 horas, os pedaços de gelo tivessem voltado a crescer e a formar cubos inteiros. Ao contrário, a explicação de que às 22 horas havia água líquida, que pouco a pouco formou pequenos pedaços de gelo até as 22h30 é *precisamente* tão sensata quanto a previsão de que às 23 horas os pequenos pedaços de gelo estarão derretidos na água líquida, o que é costumeiro e totalmente esperável. Essa última explicação, da perspectiva da observação feita às 22h30, é perfeitamente simétrica com relação ao tempo e concorda, ademais, com as nossas observações subsequentes.

14. O leitor particularmente cuidadoso poderia pensar que eu deturpei a discussão com as palavras “no início”, as quais introduzem uma assimetria temporal. O que quero dizer, em palavras mais precisas, é que precisamos de que prevaleçam condições especiais em (pelo menos) uma das pontas da dimensão temporal. Como ficará claro, as condições especiais consistem em uma

condição-limite de baixa entropia e eu denominarei “passado” a direção em que essa condição seja satisfeita.
15. A ideia de que a seta do tempo requer um passado de baixa entropia tem uma longa história, que remonta a Boltzmann e outros. Ela é discutida com algum detalhe em Hans Reichenbach, *The direction of time* (Mineola, N.Y.: Dover Publications, 1984), e foi defendida de uma maneira quantitativa particularmente interessante em Roger Penrose, *The emperors new mind* (Nova York: Oxford University Press, 1989), pp. 317 e segs.
16. Lembre-se de que a discussão neste capítulo não leva em conta a mecânica quântica. Como Stephen Hawking mostrou na década de 1970, quando se consideram os efeitos quânticos, os buracos negros permitem a emissão de uma certa quantidade de radiação, mas isso não afeta a sua condição de serem os objetos com maior entropia no cosmo.
17. Uma pergunta natural é como saber que não haverá nenhuma circunstância futura que também tenha impacto sobre a entropia. Na verdade, não sabemos, e alguns físicos chegaram a sugerir experimentos com vistas a detectar a possível influência que tal circunstância futura poderia exercer sobre as coisas que observamos hoje. Para a leitura de um artigo interessante que discute a possibilidade de afetações passadas e futuras sobre a entropia, veja Murray Gell-Mann e James Hartle, “Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology”, em *Physical origins of time asymmetry*, J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, W. H. Zurek (eds.) (Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1996), assim como outros artigos nas partes 4 e 5 dessa coletânea.
18. Em toda a extensão deste capítulo falamos da seta do tempo referindo-nos ao fato aparente de que existe uma assimetria ao longo do eixo do tempo (do eixo do tempo de qualquer observador) do espaço-tempo: uma colossal variedade de seqüências de eventos está alinhada em uma ordem ao longo do eixo do tempo, mas o ordenamento inverso de tais eventos não ocorre nunca, ou praticamente nunca. Há tempos, os físicos e os filósofos têm dividido essas seqüências de eventos em subcategorias cujas assimetrias temporais poderiam, em princípio, obedecer a explicações logicamente independentes. Por exemplo, o calor passa dos objetos quentes para os mais frios, mas não dos frios para os quentes; as ondas eletromagnéticas emanam de fontes como as estrelas e as lâmpadas, mas nunca parecem convergir para dentro dessas fontes; o universo parece estar se expandindo uniformemente, e não contraindo-se; e nós recordamos o passado e não o futuro (esses são os eixos do tempo respectivamente denominados termodinâmico, eletromagnético, cosmológico e psicológico). Todos esses são fenômenos assimétricos com relação ao tempo, mas que poderiam, em princípio,

adquirir a sua assimetria temporal de princípios físicos totalmente diferentes. A minha opinião, que muitos compartilham (mas outros não), é a de que, talvez com a exceção da seta cosmológica, esses fenômenos temporalmente assimétricos não são fundamentalmente diferentes e, em última análise, obedecem à mesma explicação — a que descrevemos neste capítulo. Por exemplo, por que a radiação eletromagnética viaja em ondas que se expandem e não em ondas que se contraem, embora ambas as direções correspondam a soluções perfeitamente válidas para as equações de Maxwell para o eletromagnetismo? Bem, porque o nosso universo tem fontes coerentes, ordenadas e de baixa entropia para essas ondas expansivas — estrelas e lâmpadas, para mencionar apenas duas — e porque a existência dessas fontes ordenadas deriva do ambiente ainda mais ordenado do universo em sua origem, como vimos no texto principal. O eixo psicológico do tempo é de tratamento mais difícil porque ainda há muitíssimo por conhecer a respeito da base microfísica do pensamento humano. Mas já fizemos grandes progressos na compreensão da seta do tempo no que concerne aos computadores — elaborar, completar e depois produzir o registro de uma computação é uma sequência computacional básica cujas propriedades entrópicas já estão bem compreendidas (desenvolvidas por Charles Bennet, Rolf Landauer e outros) e são perfeitamente compatíveis com a segunda lei da termodinâmica. Assim, se é que o pensamento humano pode ser assimilado aos processos computacionais, uma explicação termodinâmica semelhante poderia aplicar-se. Note também que a assimetria associada com o fato de que o universo está em expansão e não em contração relaciona-se com a seta do tempo que estamos explorando, embora seja logicamente diferente dela. Se a expansão do universo sofresse desaceleração, terminasse e se transformasse em contração, a seta do tempo continuaria a apontar para a mesma direção. Os processos físicos (os ovos que se quebram, as pessoas que envelhecem etc.) continuariam a acontecer na direção normal, ainda que a expansão do universo se tivesse invertido.

19. O leitor com inclinação para a matemática notará que, quando fazemos esse tipo de afirmação probabilística, estamos assumindo uma medida de probabilidade particular: a que é uniforme para todos os microestados compatíveis com o que vemos *agora.* Naturalmente, há outras medidas que poderiam ser invocadas. Por exemplo, David Albert, em *Time and chance*, advogou o uso de uma medida de probabilidade uniforme para todos os microestados compatíveis com o que vemos *agora* e com o que ele denomina a *hipótese do passado* — o fato aparente de que o universo começou em um estado de baixa entropia. O uso dessa medida nos permite eliminar a

consideração de todas as histórias que não sejam compatíveis com o passado de baixa entropia atestado pela nossa memória, pelos registros e pelas teorias cosmológicas. Nessa linha de pensamento, não há quebra-cabeça probabilístico a respeito de um universo com baixa entropia. Ele começou assim, como premissa, com probabilidade 1. Persiste, porém, o grande enigma de *por que* ele começou assim, mesmo que isso não esteja expresso em um contexto probabilístico.
2. Você pode ficar tentado a argumentar que o universo conhecido tinha baixa entropia no início porque era muito menor em tamanho do que é hoje e, por conseguinte — como um livro com menos páginas —, permitia muito menos rearranjos dos seus componentes. Mas esse argumento não se sustenta por si só. Mesmo um universo pequeno pode ter uma entropia enorme. Por exemplo, um destino possível (embora improvável) para o universo é o de que a expansão atual se reverta um dia e que o universo imploda, terminando na denominada contração final *(big crunch).* Os cálculos mostram que, ainda que o tamanho do universo diminuísse durante a fase da implosão, a entropia continuaria a aumentar, o que demonstra que um tamanho pequeno não assegura uma baixa entropia. No capítulo 11, contudo, veremos que o pequeno tamanho inicial do universo efetivamente desempenha um papel na melhor explicação de que dispomos para o começo de baixa entropia.

7. O TEMPO E O QUANTUM [pp. 210-55]

1. É um fato bem conhecido que as equações da física clássica não dão conta com exatidão do movimento de três ou mais corpos que interagem mutuamente. Assim, mesmo na física clássica, qualquer previsão que façamos a respeito do movimento de um conjunto grande de partículas será, necessariamente, aproximada. A questão é que não existe um limite fundamental à qualidade possível dessas aproximações. Se o mundo fosse comandado pela física clássica, nós, com computadores cada vez mais poderosos e com dados iniciais cada vez mais precisos a respeito das posições e das velocidades, nos aproximaríamos cada vez mais das respostas exatas.
2. Ao final do capítulo 4, observei que os resultados obtidos por Bell, Aspect e outros não excluem a possibilidade de que as partículas sempre tenham posições e velocidades definidas, mesmo que não possamos nunca determinar simultaneamente ambos os aspectos. Ademais, a versão de Bohm para a mecânica quântica realiza explicitamente essa possibilidade. Assim, embora a visão, sustentada por tantas pessoas, de que um elétron não tem posição enquanto não for medido corresponda ao enfoque convencional da mecânica

quântica, estritamente falando ela não deve ser tomada como tendo valor absoluto. Leve em conta, contudo, que segundo Bohm, como veremos mais adiante neste capítulo, as partículas são "acompanhadas" por ondas de probabilidade. Assim, a teoria de Bohm sempre invoca partículas e ondas, enquanto o enfoque convencional vê uma complementaridade que, em termos gerais, invoca partículas *ou* ondas. Assim, a conclusão que estamos buscando — que a descrição da mecânica quântica para o passado seria totalmente incompleta se nos limitássemos exclusivamente a dizer que uma partícula passou por um determinado ponto do espaço a cada momento definido do tempo (que é o qu*e faríamos* na física clássica) — é verdadeira apesar de tudo. Na visão convencional da mecânica quântica, temos de incluir também uma pletora de outras posições que uma partícula poderia ter ocupado a qualquer momento dado, enquanto segundo Bohm temos de incluir também a onda "piloto", um objeto que também se espalha por um sem-número de outras posições. (O leitor mais familiarizado com o tema terá notado que a onda piloto é apenas uma função de onda da mecânica quântica convencional, embora a sua encarnação na teoria de Bohm seja bem distinta.) Para evitar qualificações infindáveis, a discussão que se segue dar-se-á a partir da perspectiva da mecânica quântica convencional (que é o enfoque mais comumente utilizado), deixando-se as observações de Bohm e de outros para a parte final do capítulo.

3. Para um tratamento matemático altamente pedagógico, veja R. P. Feynman e A. R. Hibbs, *Quantum mechanics and path integrais* (Burr Ridge, 111.: McGraw-Hill Higher Education, 1965).

4. Você pode ter a tentação de invocar a discussão do capítulo 3, em que vimos que à velocidade da luz o tempo para, e argumentar que, na perspectiva do fóton, todos os momentos são um mesmo momento, de maneira que o fóton "sabe" qual é a posição do interruptor do detector quando passa pelo divisor de feixes. Mas esse experimento pode ser realizado com outros tipos de partículas, como os elétrons, que viajam a velocidades inferiores à da luz, e os resultados não se modificam. Essa perspectiva não ilumina, portanto, os aspectos essenciais da situação física.

5. A configuração experimental discutida, assim como os próprios resultados experimentais, provém de Y. Kim, R. Yu, S. Kulik, Y. Shih e M. Scully, *Phys. Rev. Lett*, v. 84, n. 1, pp. 1-5.

6. A mecânica quântica também pode basear-se em uma equação equivalente apresentada em forma diferente (conhecida como mecânica matricial) por Werner Heisenberg em 1925. Para o leitor com inclinação para a matemática, a

equação de Schrödinger é: *Hty (x,t) = ih {d ^(x$_y$t)ldt)y* em que *H* representa a hamiltoniana, ^ representa a função de onda *eh é a* constante de Planck.

7. O leitor treinado notará que suprimi um ponto sutil aqui. Teríamos que levar em conta o complexo conjugado da função de onda da partícula para assegurar-nos de que ela resolve a versão invertida no tempo da equação de Schrödinger. Assim, a operação T descrita na nota 2 do capítulo 6 toma uma função de onda Ψ *(x,t)* e a compara com Ψ*(x,-*1).* Isso não tem impacto significativo sobre o texto.

8. Bohm, na verdade, redescobriu e desenvolveu um enfoque que remonta ao príncipe Louis de Broglie, razão por que ele é, por vezes, denominado enfoque Broglie-Bohm.

9. Para o leitor com inclinação pela matemática, o enfoque de Bohm é local no espaço de *configuração*, mas claramente *não-local* no espaço real. Modificações ocorridas em uma função de onda em uma determinada localização do espaço real exercem imediatamente uma influência sobre partículas que estejam em outras localizações distantes.

10. Para um tratamento excepcionalmente claro do enfoque de Ghirardi-Rimini-Weber e a sua relevância para a compreensão do emaranhamento quântico, veja J. S. Bell, “Are there quantum jumps?” em *Speakable and unspeakable in quantum mechanics* (Cambridge, Ingl.: Cambridge University Press, 1993).

11. Alguns físicos consideram as questões dessa lista como subprodutos irrelevantes de confusões anteriores relativas à mecânica quântica. Segundo esse ponto de vista, a função de onda é simplesmente um instrumento teórico para que se façam previsões (probabilísticas) e a sua única realidade é a realidade matemática. (Este enfoque é por vezes denominado “cala a boca e calcula”, uma vez que encoraja o uso da mecânica quântica e das funções de onda com o objetivo de fazer previsões, sem perder muito tempo pensando no que são e para que servem as funções de onda.) Uma variação sobre esse tema argumenta que as funções de onda, na verdade, nunca entram em colapso, mas que as interações com o ambiente fazem com que assim *pareça.* (Em breve discutiremos uma versão desse enfoque.) Tenho simpatia por essas ideias e, com efeito, creio firmemente que a noção do colapso da função de onda será, por fim, abandonada. Mas não considero satisfatório o enfoque anterior porque não estou disposto a abandonar o propósito de compreender o que acontece no mundo quando “não estamos olhando”, e penso que o enfoque posterior, que, a meu ver, aponta na direção correta, ainda requer um maior desenvolvimento matemático. A essência do fato é que a medição causa algo que ou é, ou parece, ou *simula ser* um colapso de função de onda. Seja por meio de um melhor conhecimento das

influências ambientais, seja por meio de outro enfoque ainda não sugerido, esse efeito aparente tem de ser estudado e não simplesmente deixado de lado.

12. Há outras questões controvertidas, associadas à interpretação dos muitos mundos, que vão além dessa óbvia extravagância. Por exemplo, há desafios técnicos à definição de uma noção de probabilidade em um contexto que envolva um número infinito de cópias dos observadores cujas medições estão supostamente sujeitas a essas probabilidades. Se um determinado observador é realmente uma de muitas cópias, em que sentido poderíamos dizer que ele tem uma probabilidade particular de medir este ou aquele resultado? Quem é "ele", na verdade? Cada cópia do observador medirá — com probabilidade 1 — o resultado que estiver assentado para a cópia particular do universo em que ele reside, pelo que todo o arcabouço probabilístico requer (e recebe e continua a receber) um escrutínio cuidadoso no esquema dos muitos mundos. Além disso, de um ponto de vista mais técnico, o leitor com inclinação para a matemática perceberá que, na dependência de como se definam precisamente os muitos mundos, pode ser necessário selecionar uma base de auto vetores. Mas como fazê-lo? Muitas discussões já se realizaram e muitos textos já foram escritos sobre todas essas questões, mas não há, até aqui, resoluções universalmente aceitas. O enfoque baseado na descoerência, que discutiremos em breve, trouxe luz ao debate e oferece boas percepções com relação à questão da seleção da base eigeniana.

13. O enfoque de Bohm, ou de Broglie-Bohm, nunca recebeu muita atenção. Talvez uma razão para isso, como assinalou John Bell no seu artigo "The impossible pilot wave", publicado em *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, seja que nem de Broglie, nem Bohm tenham gostado particularmente do que descobriram. Mas, como também indica Bell, o enfoque de Broglie-Bohm afasta boa parte das indefinições e da subjetividade do método mais convencional. Se não por outra razão, mesmo que o enfoque esteja errado, vale a pena saber que as partículas podem ter posições definidas e velocidades definidas em todos os momentos (as quais estão, mesmo em princípio, além da nossa capacidade de medir), e continuar a comportar-se de maneira compatível com as previsões da mecânica quântica padrão — com incerteza e tudo. Outro argumento contra o enfoque de Bohm é o de que a não-localidade nesse esquema é mais "severa" do que na mecânica quântica padrão. Com isso quero dizer que segundo Bohm as interações não-locais (entre a função de onda e as partículas) são um elemento fundamental da teoria desde o começo, enquanto na mecânica quântica a não-localidade só aparece nas instâncias mais profundas e surge apenas por meio de correlações não-locais entre medições amplamente separadas. Mas do ponto de vista dos que apoiam essa ideia, o fato de algo estar

escondido não significa que não esteja presente e, ainda mais, como o enfoque-padrão é vago com relação ao problema quântico da medição — que é o próprio lugar onde a não-localidade se torna aparente —, uma vez que essa questão esteja completamente resolvida, a não-localidade poderá, afinal, não ficar tão escondida. Outros argumentaram que existem obstáculos à composição de uma versão relativística do enfoque de Bohm, embora já se tenha feito algum progresso também nessa frente (veja, por exemplo, John Bell, *Beablesfor quantum field theory*, na coletânea indicada acima). Desse modo, definitivamente vale a pena manter em mente esse enfoque alternativo, ainda que apenas como uma defesa contra conclusões apressadas sobre o que seriam as implicações inevitáveis da mecânica quântica. Para o leitor com inclinação pela matemática, um ótimo tratamento da teoria de Bohm e das questões relativas ao emaranhamento quântico pode ser lido em Tim Maudlin, *Quantum non-locality and relativity* (Malden, Mass.: Blackwell, 2002).

14. Para uma discussão técnica e profunda sobre a seta do tempo em geral e para o papel da descoerência em particular, veja H. D. Zeh, *Thephysical basis of the direction of time* (Heidelberg: Springer, 2001).

15. Para que você tenha uma ideia de como a descoerência trabalha depressa — como a influência ambiental suprime a interferência quântica e transforma, assim, as probabilidades quânticas em probabilidades clássicas familiares —, aqui vão alguns exemplos. Os números são aproximados, mas a mensagem é clara. A função de onda de um grão de poeira que flutua na sua sala, bombardeado por moléculas de ar que se agitam, alcança a descoerência em cerca de um bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo (10^{-36}) de segundo. Se o grão de poeira for mantido em uma câmara de vácuo perfeito, submetida apenas a interações com a luz do Sol, a sua função de onda alcançará a descoerência um pouco mais devagar e tomará um milésimo de bilionésimo de bilionésimo (10^{-21}) de segundo. E se o grão de poeira estiver na mais profunda escuridão do espaço vazio, sujeito apenas a interações com os fótons de microondas que são relíquias do Big-Bang, a sua função de onda alcançará a descoerência em cerca de um milionésimo de segundo. Esses números são extremamente pequenos, o que mostra que a descoerência, mesmo para algo mínimo como um grão de poeira, acontece muito rapidamente. Para os objetos maiores, a descoerência ocorre ainda mais depressa. Não chega, portanto, a ser surpreendente que, mesmo em um universo quântico como o nosso, o mundo à nossa volta apresente o comportamento que vemos. (Veja, por exemplo, E. Joos, “Elements of environmental decoherence”, em *Decoherence: theoretical,*

experimental, and conceptual problems, Ph. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O. Stamatescu (eds.) [Berlim: Springer, 2000].)

8. OS FLOCOS DE NEVE E O ESPAÇO-TEMPO [pp. 259-93]

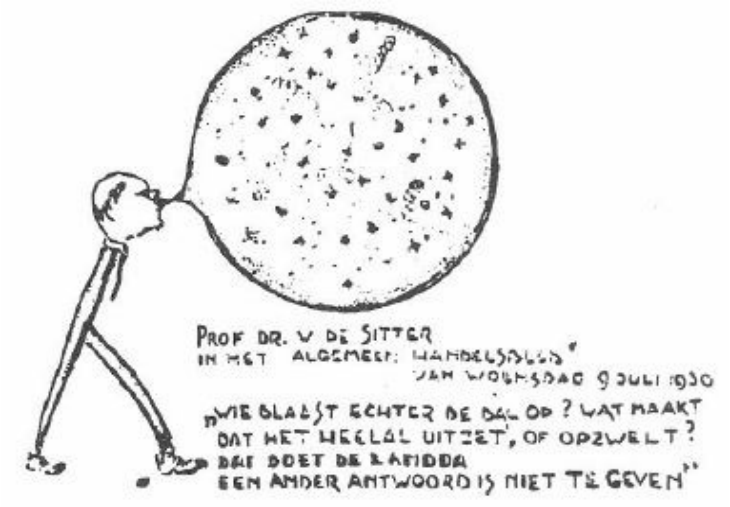
1. Mais precisamente, a simetria entre as leis em Connecticut e as leis em Nova York utiliza *tanto* a simetria translacional *quanto* a simetria rotacional. Ao exibir-se em Nova York, o ginasta não só terá mudado de lugar, com relação a Connecticut, mas também, com toda probabilidade, executará os seus números olhando para uma outra direção (leste, em vez de norte, por exemplo).
2. Normalmente se diz que as leis do movimento de Newton são relevantes para "observadores inerciais", mas se prestarmos maior atenção à maneira como esses observadores são especificados, o raciocínio parece ser circular: os observadores inerciais são aqueles para os quais as leis de Newton vigoram. Uma boa maneira de pensar a respeito desse ponto é notar que as leis de Newton chamam a nossa atenção para uma classe ampla e particularmente útil de observadores: aqueles cuja descrição de movimento se adequa plenamente e quantitativamente ao esquema newtoniano. Eles são, por definição, observadores inerciais. Do ponto de vista operacional, os observadores inerciais são aqueles sobre os quais não há nenhum tipo de força atuando — ou seja, observadores que não experimentam acelerações. Em contraste, a relatividade geral de Einstein aplica-se a todos os observadores, independentemente do seu estado de movimento.
3. Se vivêssemos em uma época em que *todas* as mudanças cessassem, não sentiríamos a passagem do tempo (todas as funções do corpo e do cérebro também estariam congeladas). Mas saber se isso significaria que o bloco do espaço-tempo da figura 5.1 teria chegado ao fim, ou se, em vez disso, ele prosseguiria ao longo do eixo do tempo sem qualquer mudança — ou seja, saber se o tempo teria chegado ao fim ou se continuaria a existir em algum sentido formal e abstrato — é uma questão hipotética difícil de responder e basicamente irrelevante para qualquer coisa que possamos medir ou experimentar. Note que essa situação hipotética é diferente de um estado de desordem máxima em que a entropia não pode mais aumentar mas em que mudanças microscópicas, como os movimentos aleatórios das moléculas de gás, continuam a acontecer.
4. A radiação cósmica de fundo em micro-ondas foi descoberta em 1964 pelos cientistas Arno Penzias e Robert Wilson, do Laboratório Bell, quando estavam testando uma grande antena destinada à comunicação por satélites. Penzias e Wilson encontraram um ruído de fundo que se mostrou impossível de neutralizar (até mesmo depois que eles removeram dejetos de pássaros — "ruído branco" —

do interior da antena). Com a colaboração decisiva de Robert Dicke, de Princeton, e dos seus alunos Peter Roll e David Wilkinson, juntamente com Jim Peebles, percebeu-se, finalmente, que a antena estava captando uma radiação em micro-ondas que provinha do Big-Bang. (Essa descoberta foi facilitada pelo importante trabalho cosmológico realizado anteriormente por George Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman.) Como veremos mais pormenorizadamente nos últimos capítulos, a radiação nos dá uma imagem não retocada do universo quando ele tinha cerca de 300 mil anos de existência. Foi então que as partículas que têm carga elétrica, como os elétrons e os prótons, e que afetam o movimento dos raios de luz, combinaram-se para formar os átomos eletricamente neutros. Isso permitiu, basicamente, que a luz pudesse viajar de forma livre. Desde então, essa luz primordial — produzida nos primeiros estágios do universo — viaja sem obstáculos e hoje permeia todo o espaço com fótons de micro-ondas.

5. O fenômeno físico aqui descrito, como discutiremos no capítulo 11, é conhecido como *desvio para o vermelho.* Os átomos comuns, como o hidrogênio e o oxigênio, emitem luz com comprimentos de onda bem documentados por experimentos de laboratório. Como essas substâncias são componentes das galáxias que se afastam umas das outras, a luz que elas emitem torna-se mais alongada, de modo similar ao que acontece com o som da sirene de um carro de polícia que, ao passar por você, baixa em altura. Como o vermelho corresponde ao maior comprimento de onda da luz visível a olho nu, esse alongamento da luz denomina-se desvio para o vermelho. A intensidade do desvio para o vermelho aumenta com o aumento da velocidade de recessão, o que permite que a medida dos comprimentos de onda recebidos indique, por meio de comparações com os resultados de laboratório, a velocidade dos objetos distantes. (Este é um tipo de desvio para o vermelho, similar ao efeito Doppler. O desvio para o vermelho também pode ser causado pela gravidade: os fótons se alongam quando escapam dos campos gravitacionais.)

6. Para sermos mais precisos, o leitor com inclinação pela matemática notará que uma partícula de massa m, pousada sobre a superfície de uma bola de raio R e densidade de massa p, experimenta uma aceleração d^2R/dt^2 dada por $(4 K/3)R^{\grave{o}}Gp/R^2_y$ e, portanto, $(1 /R) d^2R/dt^2 = (4\text{TI}/3)$ Gp. Se identificarmos formalmente R com o raio do universo e p com a densidade de massa do universo, teremos a equação de Einstein para a evolução do tamanho do universo (supondo a ausência de pressão).

7. Veja P. J. E. Peebles, *Principies of physical cosmology* (Princeton: Princeton University Press, 1993), p. 81.



“Mas quem é mesmo que está inflando esta bola? O que é que faz o universo expandir-se ou inflar-se? Quem faz isso é um lambda! Não existe outra resposta.” (Tradução para o inglês de Koenraad Schalm.) O lambda é uma referência à constante cosmológica, ideia que encontraremos no capítulo 10.

8. Para evitar confusões, deixe-me dizer que um defeito do modelo das moedas é que todas elas são essencialmente iguais, o que certamente não é o caso com as galáxias. Mas a questão é que na escala máxima — da ordem de 100 milhões de anos-luz — acredita-se que as diferenças individuais entre as galáxias tornam-se menos relevantes, de modo que, quando examinamos enormes volumes de espaço, as propriedades gerais de quaisquer desses volumes são extremamente similares.

9. Você também poderia viajar até a borda de um buraco negro e ficar lá, com os motores ligados, para evitar ser tragado pelo buraco. O forte campo gravitacional do buraco negro manifesta-se sob a forma de uma severa deformação do espaço-tempo e isso faz com que o seu relógio marque o tempo muito mais vagarosamente do que em locais menos extremos da galáxia (como em uma extensão espacial relativamente vazia). Também aqui, o período de tempo medido pelo seu relógio é perfeitamente válido. Mas, tal como no caso de uma viagem espacial a alta velocidade, trata-se de uma perspectiva totalmente individualista. Quando analisamos as características do universo como um todo, é mais útil empregar uma noção do tempo transcorrido que seja amplamente aplicável e consensual. Isso é o que proporcionam os relógios que se movem juntamente com o fluxo cósmico da expansão do espaço, submetidos a campos gravitacionais bem mais suaves e normais.

10. O leitor com inclinação pela matemática notará que a luz viaja ao longo de geodésicas nulas da métrica do espaço-tempo, que, para melhor definição,

podemos considerar como sendo $às^2\ dt^2\ a^2(t)(dx\text{r}^2)$, em que $doê\ dx^2 + dx^2 + dx^2$ e os x, são coordenadas de movimento conjunto. Fazendo $ds^2 = 0$, o que é apropriado para uma geodésica nula, podemos escrever JJ° ($dt/a(t)$)) para o total da distância conjunta que a luz emitida no tempo t pode percorrer até o tempo t_0. Se multiplicarmos isto pelo valor do fator de escala a(no tempo t_0, teremos calculado a distância física que a luz percorreu nesse intervalo de tempo. Esse algoritmo tem amplo uso para o cálculo da distância que a luz pode viajar em qualquer intervalo de tempo dado, o que revela se dois pontos do espaço estão, por exemplo, em contato causai. Como se pode ver, para uma expansão acelerada, mesmo para um t_0 arbitrariamente grande, a integral é limitada, o que mostra que a luz nunca alcançará posições em movimento conjunto arbitrariamente distantes. Assim, em um universo em expansão acelerada, há localizações com as quais não podemos comunicar-nos nunca e, reciprocamente, regiões que nunca podem comunicar-se conosco. Diz-se dessas regiões que elas estão fora do nosso horizonte cósmico.

11. Ao analisar as formas geométricas, os matemáticos e os físicos usam um enfoque quantitativo para a curvatura desenvolvido no século XIX e que hoje é parte de um corpo de conhecimento matemático conhecido como geometria diferencial. Uma maneira não-técnica de pensar sobre essa medição da curvatura é estudar triângulos desenhados ou no interior da forma que nos interessa ou sobre ela. Se os ângulos do triângulo somam 180 graus, como o que acontece quando o desenho se faz sobre uma superfície plana, dizemos que a forma é plana. Mas se a soma dos ângulos é maior ou menor do que 180 graus, como acontece quando o triângulo é desenhado na superfície de uma esfera (a curvatura positiva da esfera faz com que a soma dos ângulos seja maior do que 180 graus) ou na superfície de uma sela (a curvatura negativa da forma da sela faz com que a soma dos ângulos seja menor do que 180 graus), dizemos que a forma é curva. Isso está ilustrado na figura 8.6.

12. Se colássemos as bordas verticais de um toro, uma com a outra (o que seria possível fazer, uma vez que elas estão identificadas — quando você passa por uma borda aparece imediatamente na outra), obteríamos um cilindro. E se fizéssemos o mesmo com as bordas superior e inferior (que teriam agora forma circular), obteríamos uma rosquinha. A rosquinha é, portanto, uma outra maneira de pensar sobre os toros e de representá-los. Essa representação traz consigo, porém, uma complexidade, uma vez que a rosquinha já não tem a aparência plana. Mas, na verdade, ela é plana! Usando a noção de curvatura dada na nota anterior, você pode ver que todos os triângulos desenhados na superfície da rosquinha têm ângulos cuja soma é 180 graus. O fato de que a rosquinha parece

curva é um artifício que se deve à maneira como inserimos uma forma bidimensional no nosso mundo tridimensional. Por essa razão, no contexto deste livro, é preferível empregar as representações manifestamente despidas de curvas, como as dos toros bi e tridimensionais que discutimos no texto principal.
13. Note que não fomos rígidos em distinguir os conceitos de forma e curvatura. Existem três tipos de *curvatura* para o espaço completamente simétrico: positiva, zero e negativa. Mas duas formas podem ter a mesma curvatura e não ser idênticas. O exemplo mais simples é o da tela plana de vídeo e um plano infinito. Assim, a simetria nos permite reduzir a curvatura do espaço a três possibilidades, mas há algo mais do que três formas para o espaço (que diferem entre si naquilo que os matemáticos consideram ser as suas propriedades globais) capazes de concretizar essas três curvaturas.
14. Até agora, focalizamos exclusivamente a curvatura do espaço tridimensional — a curvatura das fatias de espaço do pão do espaço-tempo. Contudo, embora a representação seja difícil, em todos os três casos de curvatura espacial (positiva, zero e negativa), a totalidade do espaço-tempo quadridimensional é deformada e o grau de curvatura aumenta à medida que examinamos o universo aproximando-nos cada vez mais do Big-Bang. Com efeito, próximo ao momento do Big-Bang, a curvatura quadridimensional do espaço-tempo é tão alta que as equações de Einstein não são aplicáveis. Discutiremos esse aspecto em capítulos posteriores.

9. A VAPORIZAÇÃO DO VÁCUO [pp. 294-316]

1. Se aumentarmos a temperatura muito mais, encontraremos um quarto estado da matéria denominado *plasma*, em que os átomos se desintegram nas partículas que os compõem.
2. Existem substâncias curiosas, como os sais de Rochelle, que ficam menos ordenados com as temperaturas mais altas e mais ordenados com as temperaturas mais baixas — o inverso do que normalmente esperaríamos.
3. Uma diferença entre os campos de força e os campos de matéria é expressa pelo *princípio da exclusão*, de Wolfgang Pauli. Esse princípio mostra que, enquanto um número enorme de partículas de força (como os fótons) podem combinar-se para produzir campos acessíveis aos físicos pré-quânticos, como Maxwell, campos que você pode ver toda vez que entra em uma sala escura e acende a luz, as partículas de matéria geralmente estão excluídas pelas leis da física quântica de uma cooperação tão coerente e organizada. (Dito de maneira mais precisa, duas partículas da mesma espécie, como dois elétrons, têm

excluída a possibilidade de ocupar o mesmo estado, ao passo que para os fótons não existe essa restrição. Assim, os campos de matéria em geral não têm uma manifestação macroscópica de tipo clássico.)

4. No esquema da teoria quântica de campo, todas as partículas conhecidas são vistas como excitações de um campo subjacente, associado com a espécie da qual a partícula é membro. O fóton é uma excitação do campo dos fótons — ou seja, o campo eletromagnético; o quark up é uma excitação do campo dos quarks up; o elétron é uma excitação do campo dos elétrons, e assim por diante. Dessa maneira, toda a matéria e todas as forças são descritas por meio de uma linguagem uniforme na mecânica quântica. Um problema importante é a dificuldade em descrever todas as características quânticas da gravidade nessa linguagem, questão que discutiremos no capítulo 12.

5. Embora o campo de Higgs tenha esse nome em homenagem a Peter Higgs, muitos outros físicos — Thomas Kibble, Philip Anderson, R. Brout e François Englert, entre outros — desempenharam papéis vitais na sua proposição e no seu desenvolvimento teórico.

6. Lembre-se de que o *valor* do campo é dado pela sua distância com relação ao centro da forma, de modo que, mesmo que o campo tenha *energia* zero quando o seu valor está no fundo da forma (uma vez que a altura acima denota a energia do campo), o seu valor não é zero.

7. Na descrição feita no texto, o valor do campo de Higgs é dado pela sua distância com relação ao centro da forma, razão por que você pode estar pensando como os diferentes pontos do vale circular da forma — que estão à mesma distância do seu centro — podem dar lugar a resultados não idênticos para o valor de Higgs. A resposta, para o leitor com inclinação pela matemática, está em que os diferentes pontos do vale representam valores do campo de Higgs que têm a mesma magnitude, mas diferentes fases (o valor do campo de Higgs é um número complexo).

8. Em princípio, existem na física dois conceitos de massa. Um é o conceito descrito no texto principal: a massa é vista como a propriedade de um objeto que resiste à aceleração. Essa noção de massa é por vezes chamada *massa inercial* O segundo conceito de massa é o que é relevante para a gravidade: a massa vista como a propriedade de um objeto que determina a força com que ele será atraído por um campo gravitacional com força especificada (como o da Terra). Essa noção de massa é por vezes chamada *massa gravitacional.* À primeira vista, o campo de Higgs é relevante apenas para a compreensão da massa inercial. Contudo, o princípio da equivalência da relatividade geral afirma que a força provocada pelo movimento acelerado e pelos campos gravitacionais são

indistinguíveis — são equivalentes. E isso implica uma equivalência entre os conceitos de massa inercial e massa gravitacional. Assim, o campo de Higgs é relevante para ambos os tipos de massa que mencionamos, uma vez que, segundo Einstein, eles são idênticos.

9. Agradeço a Raphael Kasper por assinalar que essa descrição é uma variação da metáfora premiada do professor David Miller, apresentada em resposta ao desafio lançado em 1993 pelo ministro da Ciência do Reino Unido, William Waldegrave, à comunidade britânica de físicos, para que explicasse por que o dinheiro dos contribuintes deveria ser gasto em pesquisas destinadas à busca da partícula de Higgs.

10. O leitor com inclinação pela matemática deve notar que os fótons e os bósons W e Z são descritos na teoria eletrofraca como pertencentes à representação adjunta do grupo SU(2) x U(l), e são, portanto, intercambiáveis pela ação desse grupo. Além disso, as equações da teoria eletrofraca possuem simetria completa sob a ação desse grupo e é nesse sentido que dizemos que as partículas de força são inter-relacionadas. Mais precisamente, na teoria eletrofraca, o fóton é uma mescla particular do bóson de calibre da simetria manifesta U(l) e do subgrupo U(l) de SU(2); ele é, portanto, intimamente relacionado com os bósons de calibre da força fraca. Contudo, em razão da estrutura do produto do grupo de simetria, os quatro bósons (existem dois bósons W com cargas elétricas opostas) não se misturam completamente sob a sua ação. Em certo sentido, portanto, as interações fracas e eletromagnéticas fazem parte de um mesmo esquema matemático, o qual, no entanto, não é tão completamente unificado quanto poderia ser. Quando acrescentamos as interações fortes, o grupo é ampliado com a inclusão de um fator SU(3) — a "cor" SU(3) — e o fato de o grupo ter *três* fatores independentes, SU(3) x SU(2) x U(l), apenas ressalta a falta de uma unidade completa. Aí está uma parte da motivação para a grande unificação, que discutiremos na próxima seção: a grande unificação busca um grupo (de Lie) semi-simples único — com um só fator — que descreva as forças nas escalas mais altas de energia.

11. O leitor com inclinação pela matemática deve notar que a teoria da grande unificação de Georgi e Glashow baseava-se no grupo SU(5), que inclui SU(3), o grupo associado com a força nuclear forte, e também SU(2) x U(l), o grupo associado com a força eletrofraca. Desde então, os físicos têm estudado as implicações de outros grupos potenciais da grande unificação, como SO(IO) e E_6.

10. A DESCONSTRUÇÃO DO BIG-BANG [pp. 317-52]

1. Como vimos, o “bang” do Big-Bang não é uma explosão que ocorreu em uma localização específica de uma extensão espacial preexistente. E é por isso que não perguntamos também *onde* ele ocorreu. Essa descrição jocosa da deficiência do Big-Bang que utilizamos aqui deve-se a Alan Guth. Veja, por exemplo, o seu livro *The inflationary universe* (Reading, Ing.: Perseus Books, 1997), p. XIII.
2. O termo “Big-Bang” é usado por vezes para denotar o evento que ocorreu no próprio tempo zero e que deu origem ao universo. Mas como as equações da relatividade geral perdem aplicabilidade no tempo zero, como veremos no próximo capítulo, ninguém tem qualquer conhecimento sobre o evento em si. É a essa omissão que fazemos referência quando dizemos que a teoria do Big-Bang deixa de fora o “bang”. Neste capítulo, restringimo-nos aos campos em que as equações mantêm a sua aplicabilidade. A cosmologia inflacionária faz uso dessas equações bem-comportadas para revelar uma expansão breve e explosiva do espaço que nós, naturalmente, tomamos como sendo o “bang” deixado de fora pela teoria do Big-Bang. Esse enfoque, contudo, certamente deixa sem resposta a questão do que aconteceu no momento inicial da criação do universo — se é que esse momento existiu.
3. Abraham Pais, *Subtle is the lora* (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 253.
4. Para o leitor com inclinação pela matemática: Einstein substituiu a equação original $G = SnT^{\wedge}$ por $G + Ag^{\wedge} = 87iT^{\wedge}{}_{v}$, em que A é um número que denota o tamanho da constante cosmológica.
5. Quando me refiro à massa de um objeto, nesse contexto, refiro-me à soma total das massas das partículas que o compõem. Se um cubo fosse composto, digamos, por mil átomos de ouro, eu estaria me referindo a mil vezes a massa de um átomo de ouro. Essa definição harmoniza-se com a perspectiva newtoniana. As leis de Newton dizem que a massa — e o peso — de tal cubo equivaleria à de mil átomos de ouro. De acordo com Einstein, contudo, o peso do cubo dependeria também da energia cinética dos átomos (assim como de todas as demais contribuições para a energia do cubo). Isso decorre de $E = mc^2$: mais energia (£), independentemente da fonte, traduz-se em mais massa (m). Assim, também é possível dizer que, como Newton não conhecia a equação $E = mc^2$, a sua lei da gravidade usa uma definição de massa que despreza diversas contribuições à energia, como a energia associada ao movimento.
6. Essa discussão alude às questões físicas subjacentes, mas não chega a captá-las por completo. A pressão exercida pela mola comprimida influencia, com efeito, a intensidade com que a caixa é atraída pela Terra. Mas isso se dá porque

a mola comprimida afeta a energia total da caixa e, como vimos no parágrafo anterior, de acordo com a relatividade geral, a energia total é que é relevante. Mas o que quero explicar aqui é que a própria pressão — e não apenas por meio da contribuição que resulta na energia total — gera gravidade, assim como o fazem a massa e a energia. De acordo com a relatividade geral, a pressão gravita. Note também que a gravidade repulsiva a que nos referimos é o campo gravitacional *interno* experimentado em uma região do espaço preenchida por algo que tem pressão negativa, e não positiva. Em uma situação como essa, a pressão negativa gerará um campo gravitacional repulsivo que atua dentro da região.

7. Do ponto de vista matemático, a constante cosmológica é representada por um número, normalmente denotado por A (veja a nota 4). Einstein descobriu que essa equação funcionava perfeitamente quer se escolhesse para A um número positivo, quer um número negativo. A discussão do texto principal concentra-se em um caso de importância particular para a cosmologia moderna (e para as observações modernas, como se verá), em que A é positivo, uma vez que isso dá lugar a uma pressão negativa e a uma gravidade repulsiva. Um valor negativo para A produz uma gravidade atrativa normal. Note também que, como a pressão exercida pela constante cosmológica é uniforme, ela não exerce diretamente nenhuma força. Apenas as diferenças de pressão, como as que os nossos ouvidos sentem sob a superfície da água, resultam em uma força de pressão. Assim, a força exercida pela constante cosmológica é uma força puramente gravitacional.

8. Os ímãs comuns têm sempre um polo norte e um polo sul. Por outro lado, as teorias da grande unificação sugerem a existência de partículas que são como um só polo magnético, norte ou sul. Tais partículas são denominadas monopolos e poderiam ter um impacto importante na cosmologia-padrão do Big-Bang. Elas nunca foram observadas.

9. Guth e Tye reconheceram que um campo de Higgs super-resfriado agiria como uma constante cosmológica, conclusão a que antes já haviam chegado Martinus Veltman e outros. Com efeito, Tye disse-me que, se não fosse pelos limites de espaço na *Physical Review Letters*, a revista à qual ele e Guth apresentaram o trabalho, eles não teriam suprimido uma sentença final que notava que o seu modelo provocaria um período de expansão exponencial. Mas Tye também observa que foi Guth quem percebeu as importantes implicações cosmológicas de um período de expansão exponencial (que será discutido neste e no próximo capítulo), o que colocou a inflação na vanguarda e no centro dos mapas da cosmologia.

Na história por vezes tortuosa das descobertas, o físico russo Alexei Starobinsky havia encontrado, poucos anos antes, um meio diferente de gerar o que hoje

denominamos expansão inflacionária, mas o artigo que descreve o seu trabalho não foi muito divulgado entre os cientistas ocidentais. Contudo, Starobinsky não ressaltou que um tal período de expansão rápida resolveria problemas cosmológicos cruciais (como o problema do horizonte e o problema da planura, que serão discutidos adiante), o que explica, em parte, por que o seu trabalho não gerou a resposta entusiástica que o de Guth recebeu. Em 1981, o físico japonês Katsuhiko Sato também desenvolveu uma versão da cosmologia inflacionária e até mesmo antes (em 1978) os físicos russos Guenady Chibisov e Andrei Linde chegaram à ideia da inflação, mas concluíram — ao estudá-la em detalhe — que ela sofria de um problema-chave (discutido na nota 11) e por isso não publicaram o seu trabalho.

O leitor com inclinação pela matemática deve notar que não é difícil ver como surge a expansão acelerada. Uma das equações de Einstein é $d^2a/dt^2/a\ 4n/3$ (p + 3p), onde *a*, *pe p* são o fator de escala do universo (o seu "tamanho"), a densidade de energia e a densidade de pressão, respectivamente. Veja que se o lado direito da equação for positivo, o fator de escala aumentará em ritmo crescente: a taxa de crescimento do universo acelerar-se-á com o tempo. Para um campo de Higgs situado em uma superfície mais alta, a sua densidade de pressão resulta ser igual ao negativo da sua densidade de energia (o que também é válido para uma constante cosmológica), e, em consequência, o lado direito é efetivamente positivo.

10. A física subjacente a esses saltos quânticos é o princípio da incerteza, que vimos no capítulo 4. Discutirei de forma mais explícita a aplicação da incerteza quântica aos campos nos capítulos 11 e 12, mas, como antecipação, noto brevemente aqui o seguinte. O valor de um campo em um determinado ponto do espaço e a taxa de variação do seu valor nesse ponto desempenham o mesmo papel com relação ao campo que a posição e a velocidade (o momento) desempenham para uma partícula. Assim, do mesmo modo que não podemos conhecer nunca a posição e a velocidade definidas de uma partícula, um campo tampouco pode ter um valor definido e uma taxa de variação definida para esse valor, em qualquer ponto dado do espaço. Quanto mais definido for o valor de um campo em um instante, tanto mais incerta será a taxa de variação desse valor — ou seja, tanto mais provável será que o valor do campo se modifique no instante seguinte. É a essa mudança, induzida pela incerteza quântica, que me refiro quando menciono saltos quânticos no valor do campo.

11. As contribuições de Linde e de Albrecht e Steinhardt foram absolutamente cruciais, porque o modelo original de Guth — hoje chamado *inflação velha* — tinha uma falha perniciosa. Lembre-se de que o campo de Higgs super-resfriado (ou, na terminologia que apresentaremos em breve, o campo do inflaton) tem um

valor que fica preso na superfície mais alta da forma de energia, de maneira *uniforme* em todo o espaço. Por conseguinte, quando descrevo a rapidez com que o campo do inflaton super-resfriado pode dar um salto para o valor de energia mínima, temos de perguntar se esse salto quanticamente induzido aconteceria em todos os lugares do espaço ao mesmo tempo. E a resposta é que isso não aconteceria. Em vez disso, como Guth argumentou, o relaxamento do campo do inflaton para um valor de energia igual a zero ocorre por meio de um processo denominado nucleação de bolha: o valor energético do inflaton cai a zero em um ponto do espaço e isso ocasiona uma bolha que se expande e cujos limites se estendem à velocidade da luz, situação na qual o valor energético do inflaton cai a zero com a passagem da superfície da bolha. Guth imaginou que muitas dessas bolhas, com centros aleatórios, terminariam por unir-se e formar um universo com um campo do inflaton de energia zero em todas as partes. O problema, contudo, como o próprio Guth percebeu, estava em que o espaço à volta das bolhas ainda estava permeado com um campo do inflaton de valor diferente de zero, de modo que essas regiões continuariam a sofrer uma expansão inflacionária rápida, o que separaria as bolhas. Não poderia, assim, haver nenhuma garantia de que as bolhas em expansão pudessem encontrar-se umas com as outras e unir-se em uma extensão espacial grande e homogênea. Além disso, Guth argumentava que a energia do campo do inflaton não se perdia ao relaxar-se em um valor energético igual a zero, pois convertia-se nas partículas normais de matéria e radiação que existem no universo. Para compor um modelo com as observações, no entanto, essa conversão teria de produzir uma distribuição *uniforme* de matéria e energia na totalidade do espaço. No mecanismo proposto por Guth, essa conversão aconteceria por meio da colisão das superfícies das bolhas, mas os cálculos — realizados por Guth e Erick Weinberg, da Universidade de Columbia, e também por Stephen Hawking, Ian Moss e John Steward, da Universidade de Cambridge — revelaram que a distribuição da matéria e da energia não era uniforme. Dessa maneira, o modelo inflacionário original de Guth apresentou significativos problemas de detalhamento.

As observações de Linde e de Albrecht e Steinhardt — agora chamadas de *inflação nova* — resolveram esses problemas irritantes. Ao modificar a forma de energia potencial para o que aparece na figura 10.2, esses pesquisadores verificaram que o inflaton poderia relaxar-se até o valor energético zero, “rolando” pela encosta da colina de energia até o vale, em um processo gradual e harmonioso que não requeria o salto quântico da proposta original. E os seus cálculos mostraram que essa descida mais gradual pela encosta da colina prolongava o surto do espaço inflacionário o suficiente para que uma só bolha

crescesse o bastante para compreender todo o universo observável. Por conseguinte, nessa concepção não há necessidade de preocupar-nos com fusões de bolhas. Igualmente importante é o fato de que, em vez de converter a energia do campo do inflaton para a energia das partículas e da radiação comuns, por meio de colisões de bolhas, no novo enfoque o inflaton chega gradualmente a essa conversão de energia de maneira uniforme em todo o espaço através de um processo similar ao da fricção. À medida que o campo desce a encosta da colina de energia — de maneira uniforme em todo o espaço —, ele libera a sua energia "atritando-se" (interagindo) com campos mais familiares para as partículas e a radiação. A inflação nova conserva, assim, todo o êxito do enfoque de Guth e resolve o importante problema encontrado pelo modelo original.

Cerca de um ano depois do significativo progresso oferecido pela inflação nova, Andrei Linde alcançou um outro grande avanço. Para que a inflação nova possa ocorrer com êxito, diversos elementos decisivos têm que funcionar ajustadamente: a forma de energia potencial tem que ter o formato apropriado; o valor do campo do inflaton tem que começar no alto da forma (e, em um detalhe técnico, o valor do campo do inflaton tem que ser, também ele, uniforme em uma extensão espacial suficientemente grande). Embora seja possível que o universo satisfaça essas condições, Linde descobriu uma maneira de gerar um surto inflacionário em uma situação mais simples e menos dependente da imaginação. Ele percebeu que, mesmo com uma forma de energia potencial simples, como a da figura 9.1a, e mesmo sem requerer um valor inicial muito específico para o campo do inflaton, a inflação poderia ocorrer naturalmente. A ideia é a seguinte: imagine que no universo primitivo as coisas fossem "caóticas" — por exemplo, imagine que havia um campo do inflaton cujo valor oscilava aleatoriamente de um número para outro. Em algumas localizações do espaço, esse valor poderia ser diminuto, mediano em outras e alto em outras localizações mais. Nada particularmente digno de registro teria ocorrido em regiões em que o valor do campo fosse pequeno ou médio. Mas Linde percebeu que algo fantasticamente interessante teria ocorrido em regiões em que o campo do inflaton tivesse alcançado um valor alto (mesmo que a região fosse mínima, com um comprimento de apenas 10^{33} centímetros). Quando o valor do campo do inflaton é alto — quando ele está no alto da forma de energia da figura 9.1a —, uma espécie de fricção cósmica tem lugar. O valor do campo busca descer a encosta da colina, rumo a uma energia potencial mais baixa, mas o seu alto valor contribui para uma força de resistência que o faz rolar muito vagarosamente. Assim, o valor do campo do inflaton teria permanecido praticamente constante e (de modo muito semelhante ao de um campo do inflaton no alto da colina de energia potencial na inflação nova) teria aportado uma energia e uma pressão

negativa praticamente constantes. Como já sabemos, estas são as condições requeridas para dar início a um surto de expansão inflacionária. Desse modo, sem recorrer a uma forma de energia potencial particularmente especial e sem determinar uma configuração especial para o campo do inflaton, o ambiente caótico do universo primitivo poderia ter naturalmente dado lugar a uma expansão inflacionária. Com boa razão, Linde deu a este enfoque o nome de *inflação caótica.* Muitos cientistas o consideram como a configuração mais convincente do paradigma inflacionário.

12. Quem conhece essa história perceberá que a excitação provocada pela descoberta de Guth deveu-se a que ela fornecia soluções para problemas cosmológicos cruciais, como o problema do horizonte e o problema da planura, como descreveremos adiante.

13. Você pode perguntar se o campo de Higgs eletrofraco ou campo de Higgs da grande unificação podem prestar um serviço dobrado — desempenhando o papel descrito no capítulo 9 e também dando início à expansão inflacionária em um momento anterior, antes de formar o oceano de Higgs. Já se propuseram modelos dessa espécie, mas eles caracteristicamente padecem de problemas técnicos. As configurações mais convincentes da expansão inflacionária recorrem a um novo campo de Higgs que faz o papel do inflaton.

14. Veja a nota 11 deste capítulo.

15. Por exemplo, você pode conceber o nosso horizonte como uma gigantesca esfera imaginária, em cujo centro estamos nós, a qual separa as coisas com as quais podemos comunicar-nos (as coisas que estão dentro da esfera) das coisas com as quais não podemos comunicar-nos (as que estão fora da esfera), no tempo que transcorre depois do Big-Bang. Hoje, o raio da nossa "esfera do horizonte" é de cerca de 14 bilhões de anos-luz. Nas etapas anteriores da história do universo, o seu raio era muito menor, uma vez que a luz teria tido menos tempo para viajar. Veja também a nota 10 do capítulo 8.

16. Essa é a essência da maneira pela qual a cosmologia inflacionária resolve o problema do horizonte e, para evitar confusões, darei uma ilustração sobre um elemento-chave da solução. Você e uma amiga saem em um campo aberto, em uma noite de verão, e brincam de comunicar-se trocando sinais de lanterna. Por mais que vocês corram uma para longe da outra, *sempre* será possível intercambiar os sinais de luz. Por quê? Porque para que você não pudesse receber a luz que a sua amiga aponta na sua direção, ou para que ela não pudesse receber a luz que você aponta na direção dela, vocês teriam que afastar-se uma da outra a uma velocidade maior do que a da luz, e isso é impossível. Como é possível, então, que regiões do espaço que podiam intercambiar sinais de luz no início da história do universo (e que, por isso, têm, por exemplo, a mesma

temperatura) hoje se encontrem fora do campo de intercomunicação? O exemplo das lanternas deixa claro que essas regiões têm de ter se separado a velocidades maiores do que a da luz. E, com efeito, o impulso colossal da gravidade repulsiva durante a fase inflacionária *realmente* afastou todas as regiões do espaço umas das outras a uma velocidade muito maior do que a da luz. É preciso dizer novamente que isso não apresenta nenhuma contradição com a relatividade especial, uma vez que o limite de velocidade estabelecido pela luz refere-se ao movimento através do espaço e não ao movimento do próprio espaço que se dilata. Portanto, um aspecto novo e importante da cosmologia inflacionária é o de que ela envolve um curto período em que ocorreu uma expansão supraluminal do espaço.

17. Note que o valor numérico da densidade crítica decresce com a expansão do universo. Mas a questão é que, se a verdadeira densidade de massa/energia do universo for igual à densidade crítica em algum tempo, ela decrescerá exatamente da mesma maneira e manter-se-á igual à densidade crítica para sempre.

18. O leitor com inclinação pela matemática deve notar que durante a fase inflacionária o tamanho do horizonte cósmico manteve-se fixo enquanto o espaço se expandia enormemente (como se pode ver facilmente tomando-se uma forma exponencial para o fator de escala da nota 10 do capítulo 8). É nesse sentido que o nosso universo é um grão de poeira em um cosmo gigantesco, no esquema inflacionário.

19. R. Preston, *First light* (Nova York: Random House Trade Paperbacks, 1996), p. 118.

20. Para um excelente relato em profundidade sobre a matéria escura, veja L. Krauss, *Quintessence: the mystery of missing mass in the universe* (Nova York: Basic Books, 2000).

21. O leitor perito perceberá que eu não estou fazendo distinção entre os diversos problemas da matéria escura que ocorrem em diferentes escalas de observação (galáctica e cósmica), uma vez que a contribuição da matéria escura para a densidade de massa cósmica é a minha única preocupação aqui.

22. Existe, na verdade, alguma controvérsia quanto a ser esse o único mecanismo que opera para todos os tipos de supernovas Ia (agradeço a D. Spergel por ter me assinalado esse ponto), mas a uniformidade desses eventos — que é o que nos interessa nesta discussão — tem muito boa base observacional.

23. É interessante notar que, anos antes dos resultados das supernovas, trabalhos teóricos inovadores de Jim Peebles, de Princeton, e também de Lawrence Krauss, de Case Western, e de Michael Turner, da Universidade de Chicago, e de Gary Steigman, do estado de Ohio, sugeriram que o universo poderia ter uma

constante cosmológica pequena, mas diferente de zero. Na época, muitos físicos não levaram muito a sério essa sugestão, mas agora, com os dados das supernovas, a atitude modificou-se significativamente. Note também que vimos, neste mesmo capítulo, que o impulso centrífugo da constante cosmológica pode ser comparável ao de um campo de Higgs que, como a rã na superfície mais alta, fica preso acima da sua configuração de energia mínima. Assim, embora uma constante cosmológica seja perfeitamente compatível com os dados, um enunciado mais preciso diria que os pesquisadores das supernovas concluíram que o espaço deve estar permeado por algo *semelhante* a uma constante cosmológica, que gera um impulso para fora. (Existem situações em que um campo de Higgs pode gerar um impulso para fora duradouro, diferente, portanto, do breve surto para fora que ocorreu nos primeiros momentos da cosmologia inflacionária. Isso será discutido no capítulo 14, quando consideraremos a questão de saber se os dados realmente requerem uma constante cosmológica ou se alguma outra entidade com consequências gravitacionais similares pode resolver o problema.) Os pesquisadores usam com frequência o termo "energia escura" para referir-se difusamente a um componente do universo que é invisível e faz com que todas as regiões do espaço se repilam, em vez de se aproximarem.
24. A energia escura é a explicação mais aceita para a expansão acelerada que observamos, mas existem outras teorias. Sugeriu-se, por exemplo, que os dados podem ser explicados se a força da gravidade desviar-se da sua intensidade normal, prevista por Newton e Einstein, quando as escalas de distância envolvidas forem extremamente grandes — de tamanho cosmológico. Outros há que ainda não estão convencidos de que os dados efetivamente revelem uma aceleração cósmica e aguardam medições mais precisas. É importante manter em mente essas ideias alternativas, sobretudo se ocorrerem observações futuras que produzam resultados que afetem negativamente as explicações atuais. No momento, no entanto, há amplo consenso quanto a que as explicações teóricas descritas no texto principal são as mais convincentes.

11. DIAMANTES QUÂNTICOS NO CÉU [pp. 353-75]

1. Entre os principais cientistas que no início da década de 1980 empenhavam-se em determinar como as flutuações quânticas produziriam "inomogeneidades" estavam Stephen Hawking, Alexei Starobinsky, Alan Guth, So-Young Pi, James Bardeen, Paul Steinhardt, Michael Turner, Viatcheslav Mukhanov e Gennady Chibisov.
2. Mesmo com a discussão do texto principal, você pode estar ainda intrigado a respeito de como uma quantidade mínima de massa/energia em um grão de

inflaton pode produzir a colossal quantidade de massa/energia que constitui o universo observável. Como é possível terminar com mais massa/energia do que a que havia no começo? Bem, como o texto principal explica, o campo do inflaton, em razão da sua pressão negativa, “garimpa” energia a partir da gravidade. Isso significa que ao crescimento da energia no campo do inflaton corresponde um decréscimo de energia no campo gravitacional. A característica especial do campo gravitacional, conhecida desde os dias de Newton, é que a sua energia pode tornar-se arbitrariamente negativa. A gravidade é como um banco disposto a emprestar somas ilimitadas de dinheiro. Ela incorpora um suprimento essencialmente ilimitado de energia, que alimenta o campo do inflaton à medida que o espaço se expande.

A massa e o tamanho específicos do grão inicial do campo do inflaton uniforme dependem dos detalhes do modelo da cosmologia inflacionária que se esteja aplicando (sobretudo dos detalhes específicos da forma de energia potencial do campo do inflaton). No texto principal, imaginei que a densidade inicial de energia do campo do inflaton fosse de cerca de 10^{82} gramas por centímetro cúbico, de modo que um volume de cerca de $(10^{26}$ centímetros$)^3 = 10^{78}$ centímetros cúbicos teria uma massa total de cerca de dez quilogramas. Esses valores são típicos de uma classe bastante convencional de modelos inflacionários, mas eu os emprego apenas para dar uma noção muito aproximada dos números envolvidos. Para que tenhamos uma ideia da gama de possibilidades, deve-se notar que nos modelos caóticos de inflação de Andrei Linde (veja a nota 11 do capítulo 10) o nosso universo observável teria emergido de um grão inicial ainda menor, com um diâmetro de 10^{-33} centímetros (a chamada distância de Planck), cuja densidade de energia seria ainda maior, cerca de 10^{94} gramas por centímetro cúbico, o que daria uma massa total menor, cerca de 10^{-3} gramas (a chamada massa de Planck). Nessas hipóteses de inflação, o grão inicial teria a massa equivalente a um grão de poeira.

3. Veja Paul Davies, “Inflation and time asymmetry in the universe”, em *Nature*, v. 301, p. 398; Don Page, “Inflation does not explain time asymmetry”, em *Nature*, v. 304, p. 39; e Paul Davies, “Inflation in the universe and time asymmetry”, em *Nature*, v. 312, p. 524.

4. Para explicar o ponto essencial, é conveniente dividir a entropia em duas partes: uma devida ao espaço-tempo e à gravidade e outra devida a tudo o mais. Assim captamos intuitivamente as ideias principais. Devo alertar, contudo, para o fato de que não é fácil desenvolver um tratamento matemático rigoroso em que o aporte da gravidade à entropia seja claramente identificado, isolado e contabilizado. Isso, no entanto, não compromete as conclusões qualitativas a que chegamos. Caso você tenha dificuldade em aceitar esse ponto, note que a

discussão como um todo pode ser amplamente reformulada, sem fazermos referência à entropia gravitacional. Como ressaltamos no capítulo 6, quando a gravidade atrativa normal é relevante, a matéria se agrupa em aglomerados. Ao fazê-lo, ela converte energia gravitacional potencial em energia cinética, que, em seguida, é parcialmente convertida em radiação, que emana dos próprios aglomerados de matéria. Essa é uma sequência de eventos que faz aumentar a entropia (a velocidade média maior das partículas faz aumentar o volume do espaço de fase pertinente; a produção de radiação por meio de interações faz aumentar o número total das partículas — e ambos os fatores fazem aumentar a entropia total). Nesse sentido, o que chamamos, no texto principal, de *entropia gravitacional* pode ser rebatizado como *entropia da matéria gerada pela força gravitacional*. Quando dizemos que a entropia gravitacional é baixa, queremos deixar claro que a força gravitacional tem o potencial de gerar quantidades significativas de entropia por meio da formação de aglomerados de matéria. Ao realizar esse potencial de entropia, os aglomerados de matéria criam um campo gravitacional não-uniforme e não-homogêneo — curvas e rugas no espaço-tempo — que, como assinalei no texto, têm entropia mais alta. Mas essa discussão deixa claro que isso também pode ser visto como expressão do fato de que os aglomerados de matéria (e a radiação produzida no processo) têm entropia mais alta (do que quando a matéria está dispersa de maneira uniforme). Desse modo, o leitor especializado notará que, se tomamos um ambiente gravitacional clássico (um espaço-tempo clássico) como um estado coerente de grávitons, esse é um estado essencialmente singular, que tem, portanto, baixa entropia. A atribuição da entropia só seria possível com níveis menores de detalhamento. Mas, como esta nota assinala, isso não é particularmente necessário. Por outro lado, se a matéria aglomerar-se o suficiente para criar buracos negros, uma atribuição inquestionável da entropia torna-se possível: a área do horizonte de eventos do buraco negro (como explicaremos no capítulo 16) é a medida da entropia do buraco negro. E essa entropia pode ser chamada, sem nenhuma ambiguidade, de entropia gravitacional.

5. Assim como é possível tanto que um ovo se quebre, quanto que os pedaços da casca quebrada voltem a reunir-se para formar um ovo inteiro, assim também é possível que as flutuações quânticas induzidas cresçam e produzam inomogeneidades (como já descrevemos) ou que inomogeneidades suficientemente correlatas atuem em conjunto para suprimir tal crescimento. Assim, a contribuição da inflação para resolver o problema da seta do tempo também requer flutuações quânticas iniciais suficientemente não-correlatas. Também aqui, se pensarmos à maneira de Boltzmann, entre todas as flutuações que produzem condições adequadas para a inflação, mais cedo ou mais tarde

haverá uma que satisfaça também essa condição, permitindo que tenha início o universo que conhecemos.
6. Alguns físicos afirmam que a situação é melhor do que a aqui descrita. Andrei Linde, por exemplo, argumenta que na inflação caótica (veja a nota 11 do capítulo 10) o universo observável surge a partir de um grão do tamanho da escala de Planck, que contém um campo do inflaton *uniforme* com densidade de energia na escala de Planck. De acordo com essas premissas, Linde argumenta também que a entropia de um campo do inflaton uniforme em um grão tão pequeno é aproximadamente igual à entropia de qualquer outra configuração do campo do inflaton, donde se conclui que as condições necessárias para que se chegue à inflação não eram especiais. A entropia do grão de tamanho da escala de Planck era baixa, mas compatível com a entropia possível que um grão de tamanho da escala de Planck *poderia* ter. O subsequente surto inflacionário produziu então, bem rápido, um universo enorme com uma entropia colossalmente mais alta — mas que, por causa da distribuição regular e uniforme da matéria, também estava enormemente longe da entropia que poderia ter tido. A seta do tempo aponta na direção em que esse hiato de entropia vai se suavizando.
Embora eu goste dessa visão otimista, até que tenhamos um conhecimento mais amplo da estrutura física a partir da qual a inflação supostamente emerge, é necessário ter cautela. O leitor especializado, por exemplo, notará que esse enfoque usa premissas favoráveis, mas não justificadas, a respeito dos modos de campos de alta energia (transplanckianos) — modos que podem afetar o desencadear da inflação e desempenhar um papel crucial na formação da estrutura.

12. O MUNDO EM UMA CORDA [pp. 379-433]

1. As indicações circunstanciais que tenho em mente aqui derivam do fato de que as intensidades de todas as três forças não gravitacionais dependem da energia e da temperatura do ambiente em que elas atuam. A energias e temperaturas baixas, como as do nosso ambiente cotidiano, as intensidades das três forças são diferentes. Mas há indicações indiretas, teóricas e experimentais, de que a temperaturas muito altas, como as que ocorreram nos primeiros momentos do universo, as intensidades das três forças convergiam, revelando, ainda que de maneira indireta, que as próprias forças não gravitacionais podem ser essencialmente unificadas, parecendo diferentes apenas em condições de

energia e temperatura baixas. Para uma discussão mais detalhada, veja, por exemplo, O *universo elegante*, capítulo 7.

2. Ao sabermos que um campo, como qualquer dos campos de força conhecidos, é um componente da organização do cosmo, sabemos também que ele existe em toda parte — está cosido no tecido do cosmo. É impossível extirpar o campo, como é impossível extirpar o próprio espaço. O máximo que podemos fazer para eliminar a presença de um campo é, portanto, fazê-lo tomar um valor que minimize a sua energia. Para os campos de força, como a força eletromagnética, esse valor é zero, como discutido no texto principal. Para campos como o inflaton, ou o campo de Higgs do modelo-padrão (que, para simplificar, não consideraremos aqui), esse valor pode ser algum número diferente de zero, que depende da forma específica da energia potencial do campo, como discutimos nos capítulos 9 e 10. Como mencionado no texto principal, e para continuar a linha de raciocínio, estamos discutindo explicitamente apenas as flutuações quânticas dos campos cujo estado de energia mínima é atingido quando o seu valor é zero, embora as flutuações associadas ao campo de Higgs e do inflaton não requeiram modificações nas nossas conclusões.

3. Na verdade, o leitor com inclinação pela matemática deve notar que o princípio da incerteza determina que as flutuações de energia são inversamente proporcionais ao grau de resolução das nossas medições no tempo, de modo que, quanto mais precisa for a resolução no tempo dos processos pelos quais examinamos a energia de um campo, tanto mais frenéticas serão as ondulações do campo.

4. Nesse experimento, Lamoreaux verificou a força de Casimir em uma configuração modificada que envolvia a atração entre uma lente esférica e uma placa de quartzo. Mais recentemente, Gianni Carugno, Roberto Onofrio e seus colaboradores na Universidade de Padova vêm realizando o experimento mais difícil, que envolve o esquema original de Casimir, com duas placas paralelas. (Manter as duas placas em posição rigorosamente paralela é um enorme desafio experimental.) Até aqui eles confirmaram as previsões de Casimir a uma taxa de 15%.

5. Em retrospecto, essas percepções mostram que, se Einstein não tivesse introduzido a constante cosmológica em 1917, os teóricos da física quântica teriam introduzido a sua própria versão algumas décadas depois. Você se lembrará de que a constante cosmológica era uma energia que Einstein imaginava cobrir todo o espaço, mas cuja origem ele — assim como os proponentes mais modernos da constante cosmológica — não especificou. Sabemos agora que, de acordo com a física quântica, o espaço vazio é permeado com campos em agitação e, como vemos diretamente, graças à descoberta de

Casimir, a resultante agitação microscópica do campo inunda o espaço com energia. Com efeito, um grande desafio que a física teórica enfrenta agora é o de mostrar que a soma combinada das agitações de todos os campos produz uma energia total no espaço vazio — uma constante cosmológica total — que está dentro dos limites observacionais atualmente determinados pelas observações de supernovas discutidas no capítulo 10. Até agora, ninguém conseguiu alcançar esse resultado. A execução da análise exata tem se mostrado estar além da capacidade dos nossos métodos teóricos atuais e os cálculos aproximados produzem resultados *enormemente* maiores do que o permitido pelas observações, o que sugere que as aproximações são muito inadequadas. Na visão de muitos pesquisadores, a determinação do valor da constante cosmológica (se igual a zero, como se pensou por muito tempo, ou se pequeno e diferente de zero, como sugerido pela inflação e pelos dados das supernovas) é um dos problemas mais importantes da física teórica que ainda aguardam resposta.

6. Nesta seção, descrevo uma maneira de ver o conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Mas para manter-nos no espírito do tema de buscar a natureza verdadeira do espaço e do tempo, devo notar que outros enigmas, menos tangíveis, mas potencialmente importantes, afetam as tentativas de unificar a relatividade geral e a mecânica quântica. Um deles, particularmente torturante, surge quando a aplicação direta do procedimento de transformação das teorias clássicas não gravitacionais (como a eletrodinâmica de Maxwell) em teorias quânticas é estendida à relatividade geral clássica (como revela Bryce DeWitt no que hoje se conhece como a equação Wheeler-DeWitt). Na equação principal que daí decorre, sucede que a variável de tempo não aparece. Assim, em vez de termos uma incorporação matemática específica do tempo — o que acontece em todas as demais teorias fundamentais —, nesse enfoque que busca a quantização da gravidade, a evolução temporal tem de ser acompanhada por meio de uma característica física do universo (como a densidade), cuja evolução esperamos que ocorra de maneira regular. Ninguém sabe ao certo no momento se esse procedimento é apropriado para a quantização da gravidade (embora recentemente se tenha feito um bom progresso por meio de uma derivação desse formalismo, denominada *gravidade quântica de laços;* veja o capítulo 16), portanto não está claro se a ausência de uma variável de tempo explícita seria a indicação de algo mais profundo (o tempo como um conceito derivado?) ou não. Neste capítulo, concentramo-nos em uma teoria diferente para a unificação entre a relatividade geral e a mecânica quântica — a *teoria de supercordas.*

7. Chega a ser uma impropriedade terminológica falarmos do “centro” de um buraco negro como se fosse um lugar do espaço. A razão está em que, de maneira geral, ao cruzarmos o horizonte de eventos de um buraco negro — o seu

limite exterior —, estabelece-se um intercâmbio entre os papéis do espaço e do tempo. Com efeito, assim como não podemos resistir a passarmos de um instante do tempo para o seguinte, tampouco podemos resistir à atração para o "centro" do buraco negro depois de cruzarmos o seu horizonte de eventos. Essa analogia entre o avançar no tempo e o mergulhar para o centro do buraco negro é fortemente motivada pela descrição matemática desses objetos. Assim, em vez de pensarmos no centro do buraco negro como um lugar no espaço, é melhor concebê-lo como uma localização no tempo. Além disso, como não se pode ir além do centro de um buraco negro, temos a tentação de pensar que essa é uma localização no espaço-tempo em que o tempo chega ao fim. Isso bem pode ser verdade. Mas como as equações clássicas da relatividade geral se dissolvem nas condições extremas de enorme densidade de massa, a nossa capacidade de fazer afirmações categóricas como essa fica comprometida. Isso sugere claramente que, se dispuséssemos de equações que não se dissolvessem no interior dos buracos negros, poderíamos obter importantes avanços na conceituação da natureza do tempo. Esse é um dos objetivos da teoria de supercordas.

8. Como nos capítulos anteriores, quando menciono o "universo observável", refiro-me à parte do universo com a qual poderíamos, pelo menos em princípio, ter comunicação no tempo posterior ao Big-Bang. Em um universo cuja extensão espacial seja infinita, como vimos no capítulo 8, a totalidade do espaço *não* se reduz a um ponto no momento da explosão. Por certo, tudo o que pertence à parte observável do universo comprime-se em um espaço cada vez menor à medida que recuamos em direção ao começo, mas, embora seja difícil de compreender, há coisas — infinitamente distantes — que ficam separadas de nós para sempre, mesmo que a densidade da matéria e da energia aumentem indefinidamente.

9. Leonard Susskind, em "The elegant universe", *NOVA*, série de televisão da **PBS,** com três horas de duração, transmitida pela primeira vez em 28 de outubro e 4 de novembro de 2003.

10. Com efeito, a dificuldade de desenvolver testes experimentais para a teoria de supercordas é um obstáculo real, que tem prejudicado substancialmente a aceitação da teoria. Contudo, como veremos nos capítulos posteriores, já tem havido bom progresso nessa direção. Os teóricos de cordas têm muitas esperanças de que os próximos aceleradores de partículas e as experiências no espaço exterior venham a proporcionar pelo menos dados circunstanciais que apoiem a teoria e, quem sabe, com alguma sorte, muito mais ainda.

11. Embora isso não tenha sido explicitado no texto principal, note que todas as partículas conhecidas têm *antipartículas* — com a mesma massa da partícula

correspondente, mas com carga de força oposta (como a carga elétrica de sinal contrário). A antipartícula do elétron é o posítron; a antipartícula do quark up é o anti-quark up (o que não chega a ser uma surpresa); e assim por diante.

12. Como veremos no capítulo 13, trabalhos recentes sobre a teoria de cordas sugerem que as cordas podem ser muito maiores do que o comprimento de Planck e isso traz inúmeras implicações de grande importância — inclusive a possibilidade de tornar a teoria experimentalmente verificável.

13. A existência dos átomos foi proposta inicialmente graças a meios indiretos (como explicação para as relações específicas segundo as quais várias substâncias químicas combinam-se; e posteriormente por meio do movimento browniano). A existência dos buracos negros foi confirmada pela primeira vez de maneira satisfatória para grande número de físicos, graças à observação do efeito por eles produzidos sobre o gás que cai em sua direção, proveniente de estrelas próximas, e não porque eles fossem "vistos" diretamente.

14. Como até mesmo uma corda que vibra placidamente tem *alguma* quantidade de energia, você pode perguntar como é possível que o padrão vibratório de uma corda possa produzir uma partícula sem massa. A resposta tem a ver, novamente, com a incerteza quântica. Por mais plácida que seja uma corda, a incerteza quântica implica que ela tenha um mínimo de agitação. E graças à estranheza da mecânica quântica, essa agitação, induzida pela incerteza, tem energia *negativa*. Quando essa energia entra em contato com a energia positiva que provém da mais suave das vibrações normais da corda, o total de massa/energia é igual a zero.

15. Para o leitor com inclinação pela matemática, o enunciado mais preciso é o de que os *quadrados* das massas dos modos vibracionais das cordas correspondem a múltiplos inteiros do quadrado da massa de Planck. Expondo com precisão ainda maior (o que é importante para alguns desenvolvimentos recentes que veremos no capítulo 13): os quadrados dessas massas são múltiplos inteiros da *escala das cordas* (que é proporcional ao inverso do quadrado do comprimento da corda). Em formulações convencionais da teoria de cordas, a escala das cordas e a massa de Planck são próximas, razão por que simplifiquei o texto principal e mencionei apenas a massa de Planck. Contudo, no capítulo 13 consideraremos situações em que a escala das cordas pode ser diferente da massa de Planck.

16 Não é difícil entender, em termos gerais, como a distância de Planck apareceu na análise de Klein. A relatividade geral e a mecânica quântica invocam três constantes fundamentais da natureza: *c* (a velocidade da luz), G (a intensidade básica da força gravitacional) e *fi* (a constante de Planck, que descreve o

tamanho dos efeitos quânticos). Essas três constantes podem combinar-se para produzir uma quantidade apresentada em termos de unidades de distância: $(\hbar G/c^3)^{1/2}$, que é, por definição, a distância de Planck. Colocando-se os valores numéricos das três constantes, tem-se que a distância de Planck é de cerca de $1{,}616 \times 10^{-33}$ centímetros. Assim, a menos que um número não dimensional de valor substancialmente diferente de 1 surja da própria teoria — algo que não acontece com frequência em uma teoria física simples e bem formulada —, podemos esperar que a distância de Planck seja o tamanho característico dos comprimentos, como o comprimento da dimensão espacial recurvada. Isso não significa, no entanto, que possamos excluir a possibilidade de que as dimensões sejam maiores do que a distância de Planck. No capítulo 13 veremos interessantes trabalhos recentes que pesquisaram intensamente essa possibilidade.

17. Incorporar uma partícula com a carga do elétron e com a sua massa relativamente diminuta revelou-se um desafio formidável.

18. Note que o requisito da simetria uniforme que usamos no capítulo 8 para diminuir o número de alternativas para a forma do universo era motivado por observações astronômicas (como as da radiação cósmica de fundo em micro-ondas) no âmbito das *três dimensões amplas.* Esses requisitos de simetria não têm relação com a forma das seis dimensões espaciais mínimas adicionais.

19. Você pode estar pensando se, além das dimensões espaciais adicionais, não poderiam existir também dimensões temporais adicionais. Pesquisadores (como Itzhak Bars, da University of Southern Califórnia) investigaram essa possibilidade e demonstraram que é pelo menos possível formular teorias que tenham uma segunda dimensão temporal e que pareçam fisicamente razoáveis. Mas se essa segunda dimensão temporal estaria em pé de igualdade com a dimensão temporal que conhecemos, ou se seria apenas uma criação matemática, é uma questão que nunca ficou esclarecida. O sentimento dominante inclina-se mais para a última do que para a primeira hipótese. Por outro lado, a interpretação mais direta da teoria de cordas diz que as dimensões espaciais adicionais são tão reais quanto as que conhecemos usualmente.

20. Os teóricos de cordas (e as pessoas que leram O *universo elegante*, capítulo 12) reconhecerão que o enunciado mais preciso é o de que certas formulações da teoria de cordas (discutidas no capítulo 13 deste livro) admitem limites que envolvem onze dimensões do espaço-tempo. Prossegue o debate sobre se a teoria de cordas tem como requisito fundamental a existência de onze dimensões do espaço-tempo, ou se a formulação de onze dimensões deve ser vista como um limite particular (por exemplo, quando se toma o valor grande da constante de acoplamento das cordas na formulação do tipo IIA), em pé de igualdade com

outros limites. Como essa distinção não tem grande impacto sobre a nossa discussão geral, adotei o primeiro ponto de vista, basicamente pela facilidade de ter um número fixo e uniforme para o total das dimensões.

13. O UNIVERSO EM UMA BRANA [pp. 434-75]

1. Para o leitor com inclinação pela matemática, refiro-me aqui à simetria *conforme* — simetria que opera no âmbito de transformações arbitrárias, que preservam o ângulo de um volume do espaço-tempo varrido pelo componente fundamental proposto. As cordas cobrem superfícies bidimensionais no espaço-tempo e as equações da teoria de cordas são invariantes no âmbito do grupo conforme bidimensional, que é um grupo de simetrias dimensionais *infinitas.* Em contraste, para outros números de dimensões espaciais, associados com objetos que não são, eles próprios, unidimensionais, o grupo conforme é dimensionalmente finito.
2. Muitos físicos contribuíram significativamente para esses desenvolvimentos, seja fazendo a pesquisa básica, seja fazendo novas descobertas: Michael Duff, Paul Howe, Takeo Inami, Kelley Stelle, Eric Bergshoeff, Ergin Szegin, Paul Townsend, Chris Hull, Chris Pope, John Schwarz, Ashoke Sen, Andrew Strominger, Curtis Callan, Joe Polchinski, Petr Horava, J. Dai, Robert Leigh, Hermann Nicolai e Bernard deWit, entre muitos outros.
3. Com efeito, como explicado no capítulo 12 de O *universo elegante*, existe um vínculo ainda mais estreito entre a ignorada décima dimensão espacial e as *p*-branas. À medida que se aumenta o tamanho da décima dimensão espacial, digamos na formulação do tipo IIA**,** as cordas unidimensionais se esticam em membranas do feitio de câmaras de ar. Quando se supõe que a décima dimensão é muito pequena, como implicitamente sempre se fazia, antes dessas descobertas, as câmaras se assemelham às cordas e se comportam como cordas. Assim como no caso das cordas, ainda não sabemos se essas branas recém-descobertas são indivisíveis ou, ao contrário, feitas de componentes ainda menores. Os pesquisadores admitem a possibilidade de que os componentes da teoria-M até aqui identificados não constituem o fim da busca dos *verdadeiros* componentes elementares do universo. Contudo, a resposta positiva também é possível. Como o que se segue é basicamente independente dessa questão, adotaremos a perspectiva mais simples e imaginaremos que todos os componentes — cordas e branas de todas as dimensões — são fundamentais. Mas que acontece com o raciocínio anterior, que sugeria que objetos fundamentais com um maior número de dimensões não poderiam ser

incorporados a um esquema fisicamente possível? Bem, aquele raciocínio estava, também ele, ancorado em um outro esquema aproximado da mecânica quântica — esquema ortodoxo e plenamente testado em combate, mas que, como todas as aproximações, tem seus limites. Embora os pesquisadores ainda tenham que desvendar as sutilezas associadas à incorporação de objetos multidimensionais a uma teoria quântica, esses componentes encaixam-se de maneira tão perfeita e coerente em todas as cinco formulações das cordas que praticamente todos acreditam que as temíveis violações de princípios básicos e sagrados da física não ocorrem.

4. Na verdade, podemos estar vivendo em uma membrana com mais dimensões ainda (uma 4-brana, uma 5-brana,...) das quais três preenchem o espaço comum e outras preenchem algumas das dimensões adicionais menores requeridas pela teoria.

5. O leitor com inclinação pela matemática deve notar que há muitos anos os teóricos de cordas sabem que as cordas fechadas respeitam algo denominado dualidade T (conceito desenvolvido no capítulo 16 e no capítulo 10 de O *universo elegante).* Basicamente, a dualidade T é a afirmação de que, se uma dimensão adicional tiver a forma de um círculo, para a teoria de cordas é completamente irrelevante que o raio do círculo seja *R* ou *1/R.* A razão está em que as cordas podem mover-se à volta dos círculos (“modo de momento”) e/ou envolvê-los (“modo de voltas”) e, com a substituição de *R* por 1*/R, os* físicos perceberam que os papéis desses dois modos simplesmente se substituem um ao outro, mantendo sem modificações as propriedades físicas globais da teoria. É essencial para essa teoria que as cordas sejam fechadas, uma vez que, se fossem abertas, não haveria uma noção topologicamente estável de que elas envolvam uma dimensão circular. Assim, à primeira vista, pareceria que as cordas fechadas e as cordas abertas comportam-se de maneiras completamente diferentes nas condições de dualidade T. Com um exame mais atento e fazendo uso das condições de contorno de Dirichlet para as cordas abertas (razão do “D” em D-branas), Polchinski, Dai, Leigh, assim como Horava, Green e outros pesquisadores resolveram esse enigma.

6. As formulações que tentaram contornar a proposição da matéria escura ou da energia escura sugeriram que mesmo o comportamento ortodoxo da gravidade nas grandes escalas pode ser diferente do que Newton e Einstein supunham e assim tentaram explicar efeitos gravitacionais incompatíveis com a presença apenas do material que conseguimos enxergar. Até o momento, essas formulações são altamente especulativas e encontram pouco apoio, seja experimental, seja teórico.

7. Os físicos que apresentaram essa ideia são S. Giddings e S. Thomas e S.

Dimopoulos e G. Landsberg.
8. Note que a fase de contração desse universo pulsante não é igual ao inverso da fase de expansão. Processos físicos como os que levam os ovos a se espatifarem e as velas a se derreterem aconteceriam na direção normal do tempo, “para a frente”, tanto durante as fases de expansão quanto durante as subsequentes fases de contração. É por isso que a entropia cresceria durante ambas as fases.
9. O leitor especializado notará que o modelo cíclico pode ser enunciado nos termos de uma teoria de campo quadridimensional efetiva em uma das 3-branas e, nessa forma, ele compartilha muitos aspectos com modelos inflacionários mais familiares, baseados em campos escalares. Quando falo em um “mecanismo radicalmente novo”, refiro-me à descrição conceituai em termos de branas que se chocam, o que é, em si mesmo e por suas consequências, uma maneira radicalmente nova de pensar em cosmologia.
10. Não se confunda com a contagem das dimensões. As duas 3-branas, juntamente com o intervalo espacial entre elas, têm quatro dimensões. O tempo acrescenta uma quinta. Sobram seis mais para o espaço de Calabi-Yau.
11. Uma exceção importante, mencionada ao final deste capítulo e discutida com mais detalhes no capítulo 14, tem a ver com inomogeneidades no campo gravitacional, denominadas ondas gravitacionais primordiais. A cosmologia inflacionária e o modelo cíclico diferem nesse ponto, oferecendo uma possibilidade de distingui-los experimentalmente.
12. A mecânica quântica assegura que sempre há uma probabilidade diferente de zero de que uma flutuação aleatória interrompa o processo cíclico (por exemplo, se uma brana desalinhar-se com relação à outra) e paralise o modelo. Ainda que a probabilidade seja minúscula, ela acontecerá mais cedo ou mais tarde, de modo que os ciclos não podem continuar indefinidamente.

14. ASSIM NA TERRA COMO NO CÉU [pp. 479-503]

1.Albert Einstein, “Vierteljahrschrift für gerichtliche Medizin und õffentliches Sanitàtswesen” 44 37 (1912). D. Brill e J. Cohen, *Phys. Rev.* v. 143, n. 4, 1011 (1966); H. Pfíster e K. Braun, *Class. Quantum Grav.* 2, 909 (1985).
2. Nas quatro décadas posteriores à proposta inicial de Schiff e Pugh, foram executados outros testes sobre o arraste de referenciais. Esses experimentos (efetuados, entre outros, por Bruno Bertotti, Ignazio Ciufolini e Peter Bender; e por I. I. Shapiro, R. D. Reasenberg, J. F. Chandler e R. W. Babcock) estudaram os movimentos da Lua e de satélites em órbita terrestre e obtiveram alguns elementos de comprovação dos efeitos de arraste de referenciais. Uma importante vantagem da Sonda Gravitacional B é a de ser o primeiro

experimento inteiramente controlado pelos pesquisadores, razão por que deve produzir os dados mais precisos e mais diretos relativos ao arraste de referenciais.

3. Embora as imagens que normalmente buscam retratar a deformação do espaço dêem efetivamente uma ideia a respeito da descoberta de Einstein, outra das suas limitações está em que elas não ilustram a deformação do tempo. Isso é importante porque a relatividade geral mostra que, para um objeto comum como o Sol, diferentemente do que para um objeto extremo, como um buraco negro, a deformação do tempo (quanto mais próximo do Sol, mais vagarosamente o relógio anda) é muito mais pronunciada do que a deformação do espaço. Retratar a deformação do tempo é graficamente mais sutil e também é mais difícil dar a ideia de como a deformação do tempo contribui para as trajetórias espaciais curvas, como a órbita elíptica da Terra ao redor do Sol, e é por isso que a figura 3.10 (e praticamente todas as tentativas de visualizar a relatividade geral que eu conheço) focaliza apenas a deformação do espaço. Mas é bom manter em mente que em muitos ambientes astrofísicos comuns o fator dominante é a deformação do tempo.

4. Em 1974, Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram um sistema binário pulsante — dois pulsares (estrelas de nêutrons que giram rapidamente) em órbita, um à volta do outro. Como os pulsares se movem muito depressa e estão muito próximos um do outro, a relatividade geral de Einstein prevê que eles emitam uma copiosa radiação gravitacional. Embora a detecção direta dessa radiação seja um grande desafio, a relatividade geral mostra que ela deve revelar-se indiretamente de outras maneiras: a energia emitida pela radiação deve causar um decréscimo gradual do período orbital dos dois pulsares. Os pulsares foram observados continuamente desde a sua descoberta e, com efeito, o seu período orbital diminuiu — e em concordância com a previsão da relatividade geral, dentro de um desvio inferior a um milésimo. Assim, mesmo que a radiação gravitacional emitida não seja detectada diretamente, temos elementos convincentes que comprovam a sua existência. Graças à sua descoberta, Hulse e Taylor receberam o Prêmio Nobel de Física em 1993.

5. Veja, contudo, a nota 4, acima.

6. Do ponto de vista energético, portanto, os raios cósmicos constituem um acelerador natural muito mais possante do que qualquer instrumento que possamos construir no futuro previsível. O inconveniente está em que, embora as partículas dos raios cósmicos possam ter energias extremamente altas, não temos nenhum controle sobre elas — nem sobre a sua composição, nem sobre a sua ocorrência. Em termos de colisões de raios cósmicos, somos observadores passivos. Além disso, o número de partículas de raios cósmicos cai

abruptamente à medida que aumenta o nível de energia que elas contêm. Dez bilhões de partículas de raios cósmicos com energia equivalente à massa de um próton (cerca de um milésimo da capacidade prevista para o Grande Colisor de Hadrons) passam a cada segundo por cada quilômetro quadrado da superfície da Terra (e um bom número deles passa através do seu corpo também a cada segundo), mas apenas *uma* partícula com energia máxima (cerca de 100 bilhões de vezes a massa do próton) passaria por um quilômetro quadrado da superfície da Terra a cada *século.* Por fim, os aceleradores fazem as partículas colidirem movendo-as rapidamente em direções opostas e criando assim um grande centro de energia de massa. Por outro lado, as partículas de raios cósmicos chocam-se com as partículas da atmosfera, que se movem com relativa lentidão. Esses inconvenientes não são, no entanto, insuperáveis. Durante muitas décadas, os cientistas aprenderam muito com o estudo dos dados gerados pelos abundantes raios cósmicos de menor energia. Para lidar com a escassez de colisões a altas energias, os cientistas construíram grandes conjuntos de detectores, com o objetivo de registrar o maior número possível de partículas.

7. O leitor especializado perceberá que a conservação da energia em uma teoria com espaço-tempo dinâmico é uma questão sutil. Por certo, o tensor de tensões de todas as fontes para as equações de Einstein tem conservação covariante. Mas isso não se traduz em uma lei global de conservação da energia. E com boa razão. O tensor de tensões não leva em conta a energia gravitacional — noção notoriamente difícil na relatividade geral. Em escalas de distância e de tempo suficientemente pequenas — como as que ocorrem nos experimentos com aceleradores — a conservação local da energia é válida, mas as afirmações referentes à conservação global devem ser tratadas com maior cuidado.

8. Isso é verdade para os modelos inflacionários mais simples. Os pesquisadores verificaram que versões mais complexas da inflação podem suprimir a produção de ondas gravitacionais.

9. Para ser um candidato viável a componente da matéria escura, uma partícula tem de ser estável ou de vida muito longa — uma partícula que não se desintegre formando outras partículas. Isso é o que se espera que aconteça com as partículas parceiras supersimétricas mais leves. Desse modo, uma afirmação mais precisa dirá que os mais leves dentre os zinos, higgsinos ou fotinos são candidatos viáveis a componentes da matéria escura.

10. Não faz muito tempo, um grupo conjunto de pesquisa ítalo-chinês conhecido como Experimento de Matéria Escura *(Dark Matter Experiment— DAMA),* que operava a partir do Laboratório de Gran Sasso, na Itália, fez o anúncio sensacional de que havia alcançado a primeira detecção direta de matéria escura. Até agora, no entanto, nenhum outro grupo conseguiu confirmar a afirmação.

Com efeito, outro experimento, a Busca Criogênica da Matéria Escura *(Cryogenic Dark Matter Search — CDMS*), com base em Stanford e empregando pesquisadores dos **EUA** e da Rússia, reuniu dados que, na opinião de muitos, refutam os resultados do *DAMA* com alto grau de confiabilidade. Muitas outras pesquisas sobre a matéria escura estão em curso além dessas. Para ler a esse respeito, consulte *http://hepwww.rlac.uk/ukdmc/dark_matter/ other_searches.html.*

15. TELEPORTADORES E MÁQUINAS DO TEMPO [pp. 504-41]

1. Essa afirmação ignora as teorias de variáveis ocultas, como a de Bohm. Mas, mesmo nessas teorias, o nosso propósito seria o de teleportar o estado quântico de um objeto (a sua função de onda), de modo que a simples medição da posição óu da velocidade seria inadequada.
2. O grupo de pesquisas de Zeilinger incluía também Dick Bouwmeester, Jian-Wi Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl e Harald Weinfurter; o grupo de De Martini incluiu S. Giacomini, G. Milani, F. Sciarrino e E. Lombardi.
3. Para o leitor que tenha alguma familiaridade com o formalismo da mecânica quântica, eis os passos essenciais da teleportação quântica. Imagine que o estado inicial de um fóton que esteja comigo em Nova York seja |‘'P‘)$_1$ = a|0)! + (3|l)i, onde |0) e |l) são os dois estados de polarização do fóton e que admitamos valores definidos e normalizados, mas arbitrários para os coeficientes. O meu objetivo é o de dar a Nicholas informações suficientes para que ele possa produzir um fóton em Londres exatamente no mesmo estado quântico. Para isso, Nicholas e eu obtemos inicialmente um par de fótons emaranhados, digamos no estado |'^{v}J/')$_2$3 — (1 *\/2)* |0$_2$0$_3$) — (1 "\/2)11$_2$13)O estado inicial do sistema de três fótons é, portanto, *\$^{y}$l^{r})\23* = (a\/2) {|0i0$_2$0$_3$) — 10,1213)} + 0\/2) {| 110$_2$0$_3$) — 1111213)}* Quando eu executo a medição do estado de Bell para os fótons 1 e 2, projeto essa parte do sistema em um de quatro estados: |<b)$_{\pm}$ = (1V2) {|0i0$_2$> — 1111$_2$)}^{e} |d)$_{\pm}$ = (lV2) {|0,1$_2$) — 1110$_2$)}>Se expressarmos novamente o estado inicial usando essa base de auto-estados para as partículas 1 e 2, encontraremos: '^{V}P')$_{12}$3 = $^{1}/_{2}${|$^{<}$®*>+(^{ot}|0$_3$> PM + l®>-(«|0$_3$> + PM + |ft>+(-a|l3> + PIO3» -r |íl>_ (ot| 1$_3$) p|0$_3$)}. Assim, depois de executar a minha medição, provocarei o “colapso” do sistema em uma dessas quatro possibilidades. Uma vez que eu comunique a Nicholas (por meios convencionais) o resultado encontrado, ele saberá como manipular o fóton 3 de modo a reproduzir o estado original do fóton 1. Por exemplo, se eu verificar que a minha medição produz o estado |<í>)_, Nicholas não precisará fazer nada com o fóton 3, uma vez que, tal como

visto acima, ele já estará no estado original do fóton 1. Se eu encontrar qualquer outro resultado, Nicholas terá de executar uma rotação adequada (determinada, como se vê, pelo resultado específico que eu encontrar) para colocar o fóton 3 no estado desejado.

4. Com efeito, o leitor com inclinação pela matemática notará que não é difícil fazer a prova do chamado teorema da não-clonagem quântica. Imagine que tenhamos um operador de clonagem unitário U, que toma qualquer estado dado como dado inicial e cria duas cópias dele como produto *(U* reproduz |a) |a)|a), para qualquer estado dado |ot)). Note que *U,* atuando sobre um estado como (|a) - l-1(3)), produz (|a)|a) + |p)|0)), que não é uma cópia desdobrada do estado original (|a) + |p))(|a) + |p)), e que, portanto, não existe nenhum operador *U* para efetuar a clonagem quântica. (Isto foi demonstrado pela primeira vez por Wootters e Zurek, no início da década de 1980.)

5. Muitos pesquisadores envolveram-se tanto com o desenvolvimento teórico quanto com o desenvolvimento experimental da teleportação quântica. Além dos que são discutidos no texto, mencionamos, entre outros, o trabalho de Sandu Popescu, que, quando estava na Universidade de Cambridge, desempenhou um papel importante nos experimentos de Roma; e o do grupo de Jeffrey Kimble no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), que foi pioneiro na teleportação de aspectos contínuos de estados quânticos.

6. Para uma visão extremamente interessante do progresso realizado no emaranhamento de sistemas de muitas partículas, veja, por exemplo, B. Julsgaard, A. Kozhekin e E. S. Polzik, “Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects”, *Nature* 413 (setembro de 2001), pp. 400-3.

7. Uma das áreas de pesquisa mais ativas e animadas que fazem uso de emaranhamentos quânticos e de teleportações quânticas é o campo da computação quântica. Para apresentações recentes e acessíveis sobre computação quântica, veja Tom Siegfried, *The bit and the pendulum* (Nova York: John Wiley, 2000), e George Johnson, *A shortcut through time* (Nova York: Knopf, 2003).

8. Um aspecto do retardamento do tempo a velocidades crescentes, que não discutimos no capítulo 3 mas que desempenhará um papel neste capítulo, é o chamado paradoxo dos gêmeos. É uma questão fácil de apresentar: se eu e você nos movemos a velocidade constante um com relação ao outro, eu pensarei que o seu relógio estará andando devagar em comparação com o meu. Mas como você tem tanto direito quanto eu de se julgar em repouso, você pensará que é o meu relógio que está em movimento e que está, portanto, andando devagar. O fato de que eu e você pensemos que o relógio do outro é que anda devagar pode parecer

um paradoxo, mas não é. A velocidades constantes, os nossos relógios continuarão a afastar-se um do outro e, portanto, não estarão sujeitos a uma comparação direta para determinar qual é o que está "realmente" andando devagar. E todas as outras comparações indiretas (como, por exemplo, por meio de uma ligação de telefone celular) ocorrem com certo retardo no tempo, por causa da separação espacial, o que necessariamente traz à cena as complicações derivadas das diferentes noções de *agora* dos diferentes observadores, como vimos nos capítulos 3 e 5. Não vou voltar a esse ponto aqui, mas quando essas complicações da relatividade especial são incorporadas às análises, não há contradição entre as nossas respectivas afirmações de que é o relógio do outro que está andando devagar (veja, por exemplo, E. Taylor e J. A. Wheeler, *Spacetime physics*, para uma discussão completa, técnica e, ao mesmo tempo, acessível). As coisas parecem ficar mais difíceis, por exemplo, se você desacelerar, parar, der a volta e encaminhar-se em direção a mim, de modo que possamos comparar os nossos relógios frente a frente, eliminando as complicações das diferentes noções de agora. Quando nos encontrarmos, qual dos dois relógios estará adiantado? Esse é o chamado paradoxo dos gêmeos: se eu e você somos gêmeos, quando nos reencontrarmos teremos a mesma idade ou um de nós parecerá mais velho? A resposta é que o meu relógio estará adiantado com relação ao seu. Se somos gêmeos, eu parecerei mais velho. Há muitas maneiras de explicar isso, mas a mais simples é notar que, quando você muda a sua velocidade e sofre uma aceleração, perde-se a simetria entre as nossas perspectivas. Você pode afirmar com certeza que está *em movimento* (uma vez que, por exemplo, você *sente* o movimento, ou, utilizando a discussão do capítulo 3, a sua viagem através do espaço-tempo, ao contrário da minha, não se deu em linha reta) e, por conseguinte, que o seu relógio andou mais devagar do que o meu. Passou menos tempo para você do que para mim.

9. John Wheeler, entre outros, sugeriu um possível papel central para os observadores em um universo quântico, resumido em uma das suas famosas máximas: "Nenhum fenômeno elementar é um fenômeno até ser observado como fenômeno" Você pode ler mais a respeito da trajetória fascinante de Wheeler na ciência da física em John Archibald Wheeler e Kenneth Ford, *Geons, black holes, and quantum foam: a life in physics* (Nova York: Norton, 1998). Roger Penrose também estudou a relação entre a física quântica e a mente em *The empero's new mind* e também em *Shadows ofthe mind: a searchfor the missing Science of consciousness* (Oxford: Oxford University Press, 1994).

10. Veja, por exemplo, "Reply to Criticisms", em *Albert Einstein*, v. 7 de *The library of living philosophersy* P. A. Schilpp (ed.) (Nova York: MJF Books,

2001).
11. W. J. van Stockum, *Proc. R. Soc. Edin.* A57 (1937), p. 135.
12. O leitor perito reconhecerá que estou simplificando a questão. Em 1996, Robert Geroch, que era aluno de John Wheeler, mostrou ser possível, pelo menos em princípio, construir um buraco de minhoca sem rasgar o espaço. Mas, ao contrário do enfoque mais intuitivo para a construção de buracos de minhoca, com rompimento do espaço, em que a simples existência do buraco de minhoca não leva à viagem no tempo, no enfoque de Geroch, a própria fase da construção requer necessariamente uma distorção do tempo de tal ordem que uma pessoa poderia viajar livremente para a frente e para trás no tempo (mas não para antes do início da própria construção).
13. De modo geral, se você passasse por uma região que contivesse essa matéria exótica a uma velocidade próxima à da luz e fizesse uma média de todas as mensurações da densidade de energia que teria detectado, a resposta encontrada seria negativa. Os físicos dizem que essa matéria exótica viola a chamada condição de energia fraca média.
14. A forma mais simples de concretização da matéria exótica provém das flutuações no vácuo do campo eletromagnético entre as placas paralelas do experimento de Casimir, discutido no capítulo 12. Os cálculos mostram que o decréscimo das flutuações quânticas entre as placas, em comparação com o espaço vazio, provoca uma densidade média de energia negativa (e também pressão negativa).
15. Para um relato pedagógico e técnico a respeito de buracos de minhoca, veja Matt Visser, *Lorentzian wormholes: from Einstein to Hawking* (Nova York: American Institute of Physics Press, 1996).

16. O FUTURO DE UMA ALUSÃO [pp. 542-69]

1. O leitor com inclinação pela matemática lembrar-se-á de que a nota 6 do capítulo 6 observa que a entropia é definida como o *logaritmo* do número de rearranjos (ou estados), e isso é importante para que obtenhamos a resposta certa neste exemplo. Quando se unem dois compartimentos selados, os vários estados das moléculas de ar podem ser dados pela descrição do estado das moléculas de ar do primeiro compartimento seguida pela descrição do estado das moléculas de ar do segundo compartimento. Desse modo, o número de arranjos para os dois compartimentos é o quadrado do número de arranjos para cada um deles separadamente. Depois de tirarmos o logaritmo, isso nos indica que a entropia dobrou.

2. Veja que não faz muito sentido comparar volumes com áreas, uma vez que as unidades de medida utilizadas são diferentes. O que eu quero dizer aqui, como indicado no texto principal, é que a taxa de crescimento do volume em função do raio é muito maior do que a taxa de crescimento da área superficial. Assim, como a entropia é proporcional à superfície e não ao volume, o seu crescimento com relação ao tamanho da região é mais lento do que se ela fosse proporcional ao volume.
3. Isso capta o espírito do limite da entropia, mas o leitor perito verá que estou simplificando. O limite mais preciso, proposto por Raphael Bousso, determina que o fluxo de entropia através de uma hipersuperfície nula (com parâmetro focalizador 0 não positivo em todas as partes) tem o limite de A/4, em que A é a área de uma seção transversal de tipo espacial da hipersuperfície nula (a "folha de luz").
4. Mais precisamente, a entropia de um buraco negro é a área do seu horizonte de eventos expressa em unidades de Planck, dividida por 4 e multiplicada pela constante de Boltzmann.
5. O leitor com inclinação pela matemática pode lembrar-se de que nas notas do capítulo 8 há uma outra noção de horizonte — um horizonte cósmico — que é a superfície divisória entre as coisas com as quais um observador pode ou não entrar em contato de causalidade. Acredita-se que esses horizontes também abrigam entropia, a qual é proporcional à sua área superficial.
6. Em 1971, o físico Dennis Gabor, nascido na Hungria, ganhou o Prêmio Nobel pela descoberta de algo denominado *holografia.* Motivado inicialmente pelo objetivo de aperfeiçoar o poder de resolução de microscópios eletrônicos, Gabor trabalhou na década de 1940 com vistas a encontrar maneiras de captar uma quantidade maior de informações a partir das ondas de luz que ricocheteiam em um objeto. Uma câmera, por exemplo, grava a intensidade das ondas de luz. Os lugares onde a intensidade é alta produzem regiões mais brilhantes na fotografia e os lugares em que a intensidade é baixa são escuros. Gabor e muitos outros perceberam, contudo, que a intensidade é apenas uma parte das informações trazidas pelas ondas de luz. Um exemplo disso está na figura 4.2b: se, por um lado, o padrão de interferência é afetado pela intensidade (a amplitude) da luz (as ondas que têm maior amplitude produzem padrões globalmente mais brilhantes), o próprio padrão surge porque as ondas sobrepostas que provêm de cada uma das fendas alcançam as suas cristas, vales e alturas intermediárias em diferentes localizações da tela do detector. Essa última informação é chamada *informação de fase:* diz-se que duas ondas de luz estão *em fase* em determinado lugar quando elas se reforçam mutuamente (porque passam por cristas e vales

simultaneamente); que estão *fora de fase* quando se cancelam mutuamente (uma está na crista quando a outra está no vale); e que têm relações intermediárias de fase entre esses dois extremos, nos pontos em que, de modo geral, elas se reforçam parcialmente ou se cancelam parcialmente. Os padrões de interferência, portanto, gravam as informações de fase das ondas de luz que se cruzam.

Gabor desenvolveu um meio de gravar, em um filme especialmente elaborado para isso, tanto a intensidade quanto a informação da fase da luz que ricocheteia em um objeto. Traduzido em linguagem moderna, a sua hipótese é muito similar à configuração experimental da figura 7.1, exceto porque um dos dois raios laser é direcionado para ricochetear no objeto de interesse na sua trajetória até a tela do detector. Se a tela estiver equipada com um filme que tenha a emulsão fotográfica apropriada, ela registrará um padrão de interferência — sob a forma de linhas diminutas gravadas na superfície do filme — entre o raio que não foi afetado e o que se refletiu no objeto. O padrão de interferência codificará tanto a intensidade da luz refletida quanto as relações de fase entre os dois raios de luz. As consequências do trabalho de Gabor para a ciência foram substanciais, pois permitiram grandes aperfeiçoamentos em uma ampla gama de técnicas de pesquisas. Para o público em geral, no entanto, o impacto principal foi o desenvolvimento artístico e comercial dos hologramas.

As fotografias comuns parecem planas porque registram apenas a intensidade da luz. Para alcançar profundidade, é necessária a informação de fase. A razão está em que, ao viajarem, as ondas de luz percorrem ciclos, de uma crista a um vale e novamente a uma crista, de modo que as informações de fase — ou, mais precisamente, as diferenças de fase entre os raios de luz que refletem as partes próximas de um objeto — codificam as diferenças entre as distâncias que os raios de luz percorreram. Por exemplo, se olharmos de frente para um gato, os seus olhos estarão um pouco mais atrás do que o focinho e essa diferença de profundidade estará codificada na diferença de fase entre os raios de luz que são refletidos por cada um dos elementos que compõem a cabeça do gato. Ao emitirmos um laser através de um holograma, conseguimos explorar as informações de fase gravadas no holograma e com isso damos profundidade à imagem. Conhecemos bem os resultados: fantásticas projeções tridimensionais geradas por um plástico bidimensional. Observe, porém, que os nossos olhos não usam as informações da fase para perceber a profundidade. Eles usam a paralaxe: a pequena diferença entre os ângulos em que a luz viaja de um ponto determinado até os nossos olhos, o esquerdo e o direito, dá as informações que o nosso cérebro usa para determinar a distância a que se encontra o ponto de origem. É por isso que as pessoas que perdem a visão de um olho (o que você

pode perceber mantendo um dos olhos fechado por algum tempo) têm a visão em profundidade comprometida.

7. Para o leitor com inclinação pela matemática, o que afirmamos aqui é que os raios de luz, ou, falando em um sentido mais amplo, as partículas sem massa, podem viajar a partir de qualquer ponto no interior de um espaço anti-deSitter para o infinito espacial e voltar, em um tempo finito.

8. Para o leitor com inclinação pela matemática, Maldacena trabalhou no contexto de AdS_5 X S^5, em que a teoria da fronteira decorre da fronteira de AdS_5.

9. Essa afirmação pertence mais à sociologia do que à física. A teoria de cordas desenvolveu-se a partir da tradição da física quântica das partículas, enquanto a gravidade quântica de laços desenvolveu-se a partir da tradição da relatividade geral. Contudo, é importante notar que, até o dia de hoje, somente a teoria de cordas pôde estabelecer contato com as previsões corretas da relatividade geral, uma vez que somente ela reduz-se convincentemente à relatividade geral nas grandes escalas de distância. A gravidade quântica de laços alcança um bom entendimento nos domínios quânticos, mas tem dificuldade em vencer o hiato que os separa dos fenômenos de grande escala.

10. Para sermos mais precisos, como se vê no capítulo 13 de O *universo elegante*, conhecemos a quantidade de entropia dos buracos negros desde o trabalho de Bekenstein e Hawking, na década de 1970. Contudo, o enfoque adotado por esses pesquisadores foi bastante indireto e nunca identificou os rearranjos microscópicos — como no capítulo 6 — responsáveis pela entropia encontrada. Em meados da década de 1990, essa falha foi corrigida por dois teóricos de cordas, Andrew Strominger e Cumrun Vafa, que encontraram, astuciosamente, uma relação entre os buracos negros e certas configurações de branas na teoria de cordas/teoria-M. Em linhas gerais, eles conseguiram determinar que certos buracos negros especiais admitiriam exatamente o mesmo número de rearranjos dos seus componentes elementares (o que quer que eles sejam) que seriam admitidos por combinações especiais e particulares de branas. Ao contar o número dós rearranjos das branas (e ao tirar-lhes o logaritmo), a resposta que encontraram foi a área do buraco negro correspondente, em unidades de Planck, dividida por 4 — que é exatamente a resposta encontrada anos antes para a entropia dos buracos negros. Na gravidade quântica de laços, os pesquisadores também conseguiram mostrar que a entropia de um buraco negro é proporcional à área da sua superfície, mas não conseguiram ainda chegar à resposta exata (área da superfície em unidades de Planck dividida por 4). A introdução, em condições apropriadas, de um parâmetro conhecido como parâmetro de Immirzi permite que a entropia do buraco negro surja com exatidão

da matemática da gravidade quântica de laços, mas até agora não há uma explicação fundamental e universalmente aceita, dentro da própria teoria, para o valor exato desse parâmetro.
Como fiz em todo este capítulo, suprimi parâmetros numéricos quantitativamente importantes, mas conceitualmente irrelevantes.

Glossário

ABSOLUTISTA: Perspectiva segundo a qual o espaço é absoluto.
ACELERAÇÃO: Movimento que envolve uma alteração na velocidade e/ou na direção.
ACELERADOR DE PARTÍCULAS: Instrumento de pesquisa da física das partículas no qual as partículas se chocam a altas velocidades.
AGITAÇÃO QUÂNTICA: Variação rápida e inevitável no valor de um campo, nas pequenas escalas, derivada da incerteza quântica.
BACIA DE ENERGIA POTENCIAL: Forma que descreve a energia contida em um campo para determinado valor desse campo; tecnicamente denominada energia potencial do campo.
BURACO NEGRO: Objeto cujo imenso campo gravitacional aprisiona qualquer coisa, mesmo a luz, que dele se aproxime demasiado (mais próximo do que o horizonte de eventos do buraco negro).
CAMPO: “Névoa” ou “essência” que permeia o espaço; pode transmitir uma força ou descrever a presença ou o movimento de partículas. Matematicamente, envolve um número ou um conjunto de números em cada ponto do espaço, que significa(m) o valor do campo.
CAMPO DE HIGGS, CAMPO DE HIGGS ELETROFRACO: Campo que adquire um valor diferente de zero no espaço frio e vazio; dá origem às massas das partículas fundamentais.
CAMPO DO ELÉTRON: O campo com relação ao qual o elétron é o componente mínimo e fundamental.
CAMPO DO INFLATON: O campo cuja energia e cuja pressão negativa impulsionam a expansão inflacionária.
CAMPO ELETROMAGNÉTICO: O campo que exerce a força eletromagnética.
CENÁRIO DO MUNDO-BRANA: Possibilidade inerente à teoria das cordas/teoria-M, segundo a qual as três dimensões espaciais que nos são familiares são uma 3-brana.
COLAPSO DA ONDA DE PROBABILIDADE, COLAPSO DA FUNÇÃO DE ONDA: Desenvolvimento hipotético no qual uma onda de probabilidade (uma função de onda) muda de uma forma bem distribuída para uma forma pontiaguda.
CONSTANTE COSMOLÓGICA: Energia e pressão hipotéticas que preenchem o espaço de maneira uniforme; origem e composição desconhecidas.

CORDAS ABERTAS: Na teoria das cordas, filamentos de energia que têm a forma de fragmentos.
CORDAS FECHADAS: Na teoria das cordas, filamentos de energia que têm a forma de laços.
COSMOLOGIA: Estudo da origem e da evolução do universo.
COSMOLOGIA INFLACIONÁRIA: Teoria cosmológica que incorpora um surto breve, mas enorme de expansão espacial no universo primordial.
CROMODINÂMICA QUÂNTICA: Teoria quântica da força nuclear forte.
CURVATURA NEGATIVA: Forma do espaço que contém densidade menor do que a densidade crítica; espaço em forma de sela.
D-BRANA: Uma p-brana que “gruda”; p-brana na qual as pontas das cordas abertas ficam presas.
DENSIDADE CRÍTICA: Valor da densidade de massa/energia requerido para que o espaço seja plano; cerca de 10 23 gramas por metro cúbico.
DISTÂNCIA DE PLANCK: Tamanho (10 33 centímetros) abaixo do qual o conflito entre a relatividade geral e a mecânica quântica torna-se manifesto; tamanho abaixo do qual a noção convencional de espaço se dissolve.
EMARANHAMENTO QUÂNTICO: Fenômeno quântico em que partículas espacialmente distantes têm propriedades correlatas.
ENERGIA ESCURA: Energia e pressão hipotéticas que preenchem o espaço de maneira uniforme; noção mais ampla do que a da constante cosmológica, uma vez que a sua energia/pressão pode variar com o tempo.
ENERGIA POTENCIAL: Energia armazenada em um campo ou em um objeto.
ENTROPIA: Medida da desordem de um sistema físico; número dos rearranjos dos componentes fundamentais de um sistema que deixam sem modificações a sua aparência geral.
ESPAÇO ABSOLUTO: Visão newtoniana do espaço; percebe o espaço como imutável e independente dos seus componentes.
ESPAÇO PLANO: Forma possível do universo espacial, sem curvatura.
ESPAÇO-TEMPO: União entre o espaço e o tempo, articulada pela primeira vez pela relatividade especial.
ESPAÇO-TEMPO ABSOLUTO: Visão do espaço que resulta da relatividade especial; percebe o espaço como imutável e independente dos seus componentes, através da totalidade do tempo, a partir de qualquer perspectiva.
ÉTER, ÉTER LUMINÍFERO: Substância hipotética que preenche o espaço e provê o meio para que a luz se propague.
FATIA DE TEMPO: A totalidade do espaço em um momento dado do tempo; fatia individual do pão ou do bloco do espaço-tempo.

FÍSICA CLÁSSICA: No contexto deste livro, as leis da física segundo Newton e Maxwell. Genericamente, termo usado com frequência para referir-se a todas as leis não quânticas da física, inclusive a relatividade especial e a relatividade geral.
FLUTUAÇÃO QUÂNTICA, FLUTUAÇÃO QUÂNTICA DO VÁCUO: Veja agitação quântica.
FORÇA DE CASIMIR: Força de origem quântica exercida por um desequilíbrio de oscilações de campo no vácuo.
FORÇA ELETROMAGNÉTICA: Uma das quatro forças da natureza; atua sobre partículas que têm carga elétrica.
FORÇA NUCLEAR FORTE: Força da natureza que influencia os quarks; mantém os quarks unidos dentro dos prótons e dos nêutrons.
FORÇA NUCLEAR FRACA: Força da natureza que atua nas escalas subatômicas e é responsável por fenômenos como a desintegração radioativa.
FÓTON: Partícula mensageira da força eletromagnética; unidade mínima da luz.
FUNÇÃO DE ONDA: Veja onda de probabilidade.
GLÚON: Partícula mensageira da força nuclear forte.
GRANDE CONTRAÇÃO (BIG CRUNCH): Um dos possíveis fins do universo, análogo ao inverso do Big-Bang, no qual o espaço entra em colapso sobre si mesmo.
GRANDE UNIFICAÇÃO: Teoria que tenta unificar as forças forte, fraca e eletromagnética.
GRÁVITON: Partícula mensageira hipotética da força gravitacional.
HORIZONTE, HORIZONTE CÓSMICO: Localizações espaciais além das quais a luz não terá tido tempo para alcançar-nos desde o começo do universo.
HORIZONTE DE EVENTOS: Esfera imaginária que envolve um buraco negro e delineia os pontos a partir dos quais já não há retorno; o que quer que cruze o horizonte de eventos não escapa da gravidade do buraco negro.
INDEPENDÊNCIA DO AMBIENTE, INDEPENDÊNCIA DO CONTEXTO: Propriedade de uma teoria física na qual o espaço e o tempo derivam de um conceito mais fundamental, em vez de serem inseridos de maneira axiomática.
INÉRCIA: Propriedade que têm os objetos de resistir à aceleração.
INFORMAÇÃO DE ESCOLHA: Na mecânica quântica, informação que delineia a trajetória percorrida por uma partícula da fonte ao detector.
INTERFERÊNCIA: Fenômeno em que ondas que se sobrepõem criam um padrão distintivo; na mecânica quântica, envolve a combinação de alternativas aparentemente excludentes.
INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE: Interpretação da mecânica quântica segundo a qual os objetos grandes obedecem às leis clássicas e os objetos

pequenos obedecem às leis quânticas.
INTERPRETAÇÃO DOS MUITOS MUNDOS: Interpretação da mecânica quântica segundo a qual todas as potencialidades incorporadas em uma onda de probabilidade realizam-se em universos separados.
INVARIÂNCIA ROTACIONAL: Característica de um sistema físico, ou de uma lei teórica, de não ser afetado(a) por uma rotação.
INVARIÂNCIA TRANSLACIONAL: Propriedade das leis da natureza segundo a qual elas são aplicáveis em qualquer posição do espaço.
KELVIN: Escala na qual as temperaturas são marcadas a partir do zero absoluto (a menor temperatura possível, -273° na escala Celsius).
MASSA DE PLANCK: Massa (105 gramas, massa de um grão de poeira; 10 bilhões de bilhões de vezes maior do que a massa do próton); massa típica de uma corda vibrante.
MATÉRIA ESCURA: Matéria distribuída pelo espaço, que exerce gravidade mas não emite luz.
MECÂNICA QUÂNTICA: Teoria desenvolvida nas décadas de 1920 e de 1930 para descrever o domínio dos átomos e das partículas subatômicas.
MODELO-PADRÃO: Na mecânica quântica, teoria composta pela cromodinâmica quântica e pela teoria eletrofraca; descreve toda a matéria e todas as forças, com exceção da gravidade. Baseada no conceito de partículas pontuais.
OCEANO DE HIGGS: Linguagem abreviada, usada neste livro para designar o valor esperado de um campo de Higgs no vácuo.
ONDA DE PROBABILIDADE: Na mecânica quântica, onda que codifica a probabilidade de que uma partícula seja encontrada em determinada posição.
PARTÍCULA DE HIGGS: Componente quântico mínimo de um campo de Higgs.
PARTÍCULA MENSAGEIRA: Unidade mínima de uma força, que comunica a sua influência.
PARTÍCULAS W, D, Z: Partículas mensageiras da força nuclear fraca.
P-BRANA: Componente da teoria das cordas/teoria-M com p dimensões espaciais.
P-BRANAS DE DIRICHLET: Veja D-brana.
PRINCÍPIO DA INCERTEZA: Propriedade da mecânica quântica que estabelece a existência de um limite fundamental para a precisão com que certas características físicas complementares podem ser medidas ou especificadas.
PRINCÍPIO DE MACH: Princípio segundo o qual todo movimento é relativo e o padrão de repouso é dado pela distribuição média da massa no universo.

PROBLEMA DA PLANURA: Desafio enfrentado pelas teorias cosmológicas para explicar o caráter plano que se observa no espaço.
PROBLEMA DO HORIZONTE: Desafio enfrentado pelas teorias cosmológicas para explicar como regiões do espaço que estão além dos seus respectivos horizontes cosmológicos têm propriedades praticamente idênticas.
PROBLEMA QUÂNTICO DA MEDIÇÃO: Problema de explicar como as miríades de possibilidades codificadas em uma onda de probabilidade dão lugar, quando medidas, a um único resultado.
QUARK: Partícula elementar sujeita à força nuclear forte; tem seis variedades (up, downy strange, charm, top e bottom).
QUEBRA ESPONTÂNEA DA SIMETRIA: Termo técnico para a formação de um oceano de Higgs; processo pelo qual uma simetria previamente manifesta fica oculta ou destruída.
RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICRO-ONDAS: Radiação eletromagnética (fótons), remanescente do universo primordial, que permeia o espaço.
RELACIONISTA: Perspectiva que sustenta que todo movimento é relativo e que o espaço não é absoluto.
RELATIVIDADE ESPECIAL: Teoria de Einstein, segundo a qual o espaço e o tempo não são absolutos individualmente, pois dependem do movimento relativo entre diferentes observadores.
RELATIVIDADE GERAL: Teoria da gravidade de Einstein; invoca a curvatura do espaço e do tempo.
SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA: Lei que afirma que, em média, a entropia de um sistema físico tende a aumentar a partir de qualquer momento.
SETA DO TEMPO: Direção na qual o tempo parece apontar — do passado para o futuro.
SIMETRIA: Em um sistema físico, transformação que não modifica a sua aparência (por exemplo, a rotação de uma esfera perfeita em torno ao seu eixo não modifica a esfera); transformação de um sistema físico que não produz efeito sobre as leis que o descrevem.
SIMETRIA DE INVERSÃO DO TEMPO: Propriedade das leis conhecidas da natureza de não fazer distinção entre as duas direções do tempo. Tendo como referência qualquer momento, as leis tratam o passado e o futuro exatamente da mesma maneira.
SIMETRIA ROTACIONAL: Veja invariância rotacional.
SIMETRIA TRANSLACIONAL: Veja invariância translacional.
SPIN: Na mecânica quântica, propriedade das partículas elementares pela qual, tal como no caso de um pião, elas têm movimento rotacional (têm momento

angular intrínseco).
SUPERSIMETRIA: Simetria em que as leis não se modificam quando partículas que têm o spin em números inteiros (partículas de força) são intercambiadas com partículas que têm o spin em frações em metade de um número inteiro (partículas de matéria).
TEMPO DE PLANCK: Tempo (10 43 segundos) que a luz toma para cruzar a distância de Planck; intervalo de tempo abaixo do qual a noção convencional de tempo se dissolve.
TEORIA DAS CORDAS: Teoria baseada em filamentos vibrantes unidimensionais de energia (veja teoria das supercordas), mas que não incorpora, necessariamente, a supersimetria. Usada, por vezes, como nome abreviado da teoria das supercordas.
TEORIA DAS SUPERCORDAS: Teoria em que os componentes fundamentais são laços unidimensionais (cordas fechadas) ou fragmentos (cordas abertas) de energia vibrante, a qual une a relatividade geral e a mecânica quântica; incorpora a supersimetria.
TEORIA DE KALUZA-KLEIN: Teoria sobre o universo, que envolve mais de três dimensões espaciais.
TEORIA DO BIG-BANG/TEORIA-PADRÃO DO BIG-BANG: Teoria que descreve um universo quente e em expansão, a partir de um momento após o seu nascimento.
TEORIA ELETROFRACA: Teoria que unifica as forças eletromagnética e nuclear fraca na força eletrofraca.
TEORIA-M: Teoria, ainda incompleta, que unifica as cinco versões da teoria das cordas; teoria totalmente integrada na mecânica quântica que se aplica a todas as forças e a toda a matéria.
TEORIA UNIFICADA: Teoria que descreve todas as forças e toda a matéria em uma única estrutura teórica.
TRANSIÇÃO DE FASE: Mudança Qualitativa que se produz em um sistema físico quando a sua temperatura se modifica além de certos limites.
UNIVERSO OBSERVÁVEL: A parte do universo que está no interior do nosso horizonte cósmico; a parte do universo que está suficientemente próxima para que a luz emitida já tenha chegado até nós; a parte do universo que podemos ver.
VÁCUO: O maior vazio que pode existir em uma região; o estado de energia mínima.
VALOR ESPERADO DO CAMPO DE HIGGS NO VÁCUO: Situação na qual um campo de Higgs adquire um valor diferente de zero no espaço vazio; oceano de Higgs.

VELA-PADRÃO: Objeto de brilho intrínseco conhecido, útil para a mensuração das distâncias cósmicas.
VELOCIDADE (VELOCITY): A rapidez do deslocamento de um objeto e a direção desse movimento.

Sugestões de leitura

A literatura técnica e de divulgação científica sobre o espaço e o tempo é vasta. As referências abaixo destinam-se principalmente ao leitor leigo, mas algumas obras requerem conhecimento mais avançado. Elas me foram de grande ajuda e constituem um bom começo para o leitor que deseja prosseguir na exploração dos vários desdobramentos relatados neste livro.

ALBERT, David. Quantum mechanics and experience. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1994.

_____Time and chance. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000.

ALEXANDER, H. G. The Leibniz-Clarke correspondence. Manchester, Ing.: Manchester Univer¬sity Press, 1956.

BARBOUR, Julian. The end of time. Oxford: Oxford University Press, 2000.

_____; PFISTER, Herbert. Mach's principie. Boston: Birkhäuser, 1995.

BARROW, John. The book ofnothing. Nova York: Pantheon, 2000.

BARTUSIAK, Mareia. Einsteirís unfinished symphony. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2000.

BELL, John. Speakable and unspeakable in quantum mechanics. Cambridge, Ing.: Cambridge University Press, 1993.

BLANCHARD, Ph.; GIULIANI, D.; Joos, E. et al. Decoherence: theoretical, experimental and conceptual problems. Berlim: Springer, 2000.

CALLENDER, Craig; HUGGET, Nick. Physics meets philosophy at the planck scale. Cambridge, Ing.: Cambridge University Press, 2001.

COLE, K. C. The hole in the universe. Nova York: Harcourt, 2001.

CREASE, Robert; MANN, Charles. The second creation. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996.

DAVIES, Paul. About time. Nova York: Simon & Schuster, 1995.

DAVIES, Paul. How to build a time machine. Nova York: Allen Lane, 2001.

_____Space and time in the modem universe. Cambridge, Ing.: Cambridge University Press, 1997.

D'ESPAGNAT, Bernard. Veiled reality. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.

DEUTSCH, David. Thefahric of reality. Nova York: Allen Lane, 1997. FERRIS, Timothy. Corning of age in the milky way. Nova York: Anchor, 1989.

_____The whole shebang. Nova York: Simon & Shuster, 1997.

FEYNMAN, Richard. QED. Princeton: Princeton University Press, 1985.

FÖLSING, Albrecht. Albert Einstein. Nova York: Viking, 1997.
GELL-MANN, Murray. The quark and the jaguar. Nova York: W. H. Freeman, 1994.
GLEICK, James. Isaac Newton. Nova York: Pantheon, 2003. [Isaac Newton: uma biografia. São Paulo: Companhia das Letras, 2004.]
GOTT, J. Richard. Time travei in Einstein s universe. Boston: Houghton Mifflin, 2001.
GUTH, Alan. The inflationary universe. Reading, Mass.: Perseus, 1997.
GREENE, Brian. The elegant universe. Nova York: Vintage, 2000. [O universo elegante. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.]
GRIBBIN, John. Schrödingers kittens and the searchfor reality. Boston: Little Brown, 1995.
HALL, A. Rupert. Isaac Newton. Cambridge, Ing.: Cambridge University Press, 1992.
HALLIWELL, J. J.; PÉREZ-MERCADER, J.; ZUREK, W. H. Physical origens of time asymmetry. Cambridge, Ing.: Cambridge University Press, 1994.
HAWKING, Stephen. The universe in a nutshell. Nova York: Bantam, 2001.
_____; PENROSE, Roger. The nature of space and time. Princeton: Princeton University Press,
1996.
_____; THORNE, Kip; NOVIKOV, Igor et al. The future of spacetime. Nova York: Norton, 2002. [O futuro do espaço-tempo. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.]
JAMMER, Max. Concepts of space. Nova York: Dover, 1993.
JOHNSON, George. A shortcut through time. Nova York: Knopf, 2003.
KAKU, Michio. Hyperspace. Nova York: Oxford University Press, 1994.
KIRSCHNER, Robert. The extravagant universe. Princeton: Princeton University Press, 2002.
KRAUSS, Lawrence. Quintessence. Nova York: Perseus, 2000.
LINDLEY, David. Boltzmanns atom. Nova York: Free Press, 2001.
_____Where does the weirdness go? Nova York: Basic Books, 1996.
MACH, Ernst. The Science of mechanics. La Salle, 111.: Open Court, 1989.
MAUDLIN, Tim. Quantum non-locality and relativity. Malden, Mass.: Blackwell, 2002.
MERMIN, N. David. Boojums all the way through. Nova York: Cambridge University Press, 1990.
OVERBYE, Dennis. Lonely hearts of the cosmos. Nova York: HarperCollins, 1991.

PAIS, Abraham. Subtle is the lord. Oxford: Oxford University Press, 1982.
PENROSE, Roger. The emperors new mind. Nova York: Oxford University Press, 1989.
PRICE, Huw. Times arrow and Arcimedes'point. Nova York: Oxford University Press, 1996.
REES, Martin. Before the beginning. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.
_____Just six numbers. Nova York: Basic Books, 2001.
REINCHENBACH, Hans. The direction of time. Mineola, N.Y.: Dover, 1956.
_____The philosophy of space and time. Nova York: Dover, 1958.
SAVITT, Steven. Times arrows today. Cambridge, Ing.: Cambridge University Press, 2000.
SCHRÖDINGER, Erwin. What is life? Cambridge, Ing.: Canto, 2000.
SIEGFRIED, Tom. The bit and the pendulum. Nova York: John Wiley, 2000.
SKLAR, Lawrence. Space, time, and spacetime. Berkeley: University of California Press, 1977.
SMOLIN, Lee. Three roads to quantum gravity. Nova York: Basic Books, 2001.
STENGER, Victor. Timeless reality. Amherst, N.Y.: Prometheus Books, 2000.
THORNE, Kip. Black holes and time warps. Nova York: W. W. Norton, 1994.
von WEIZSÂCKER, Carl Friedrich. The unity of nature. Nova York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980.
WEINBERG, Steven. Dreams of a final theory. Nova York: Pantheon, 1992.
_____Thefirst three minutes. Nova York: Basic Books, 1993.
WILCZEK, Frank; DEVINE, Betsy. Longingfor the harmonies. Nova York: Norton, 1988.
ZEH, H. D. The physical basis of the direction of time. Berlin: Springer, 2001.