STEPHEN HAWKING

O UNIVERSO NUMA CASCA DE NOZ

intrínseca

O universo numa casca de noz

Stephen Hawking

Tradução de Cássio de Arantes Leite

Revisão técnica de Amâncio Friaça
Astrofísico do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP



Copyright © 2001 by Stephen Hawking
Ilustrações originais © 2001 by Moonrunner Design Ltd. UK e The Book Laboratory™ Inc.

TÍTULO ORIGINAL
The Universe in a Nutshell

REVISÃO
Carolina Rodrigues
Daniel Seidl de Moura

ILUSTRAÇÕES
Moonrunner Design Ltd. UK e The Book Laboratory™ Inc.

REVISÃO DE EPUB
Juliana Pitanga

GERAÇÃO DE EPUB
Intrínseca

E-ISBN
978-85-8057-889-8

Edição digital: 2016

1ª EDIÇÃO

TIPOGRAFIA
Weiss

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORA INTRÍNSECA LTDA.
Rua Marquês de São Vicente, 99/3º andar
22451-041 – Gávea
Rio de Janeiro – RJ
Tel./Fax: (21) 3206-7400
www.intrinseca.com.br


You
Tube


intrínseca

S U M Á R I O

Folha de rosto
Créditos
Mídias sociais

PREFÁCIO

CAPÍTULO 1
Uma breve história da relatividade
Como Einstein lançou as bases das duas teorias fundamentais do século XX: a relatividade geral e a teoria quântica.

CAPÍTULO 2
A forma do tempo
A relatividade geral de Einstein dá forma ao tempo. Como conciliar isso com a teoria quântica.

CAPÍTULO 3
O universo numa casca de noz
O universo tem múltiplas histórias, cada uma determinada por uma noz minúscula.

CAPÍTULO 4
Prevendo o futuro
Como a perda de informação nos buracos negros pode reduzir nossa capacidade de prever o futuro.

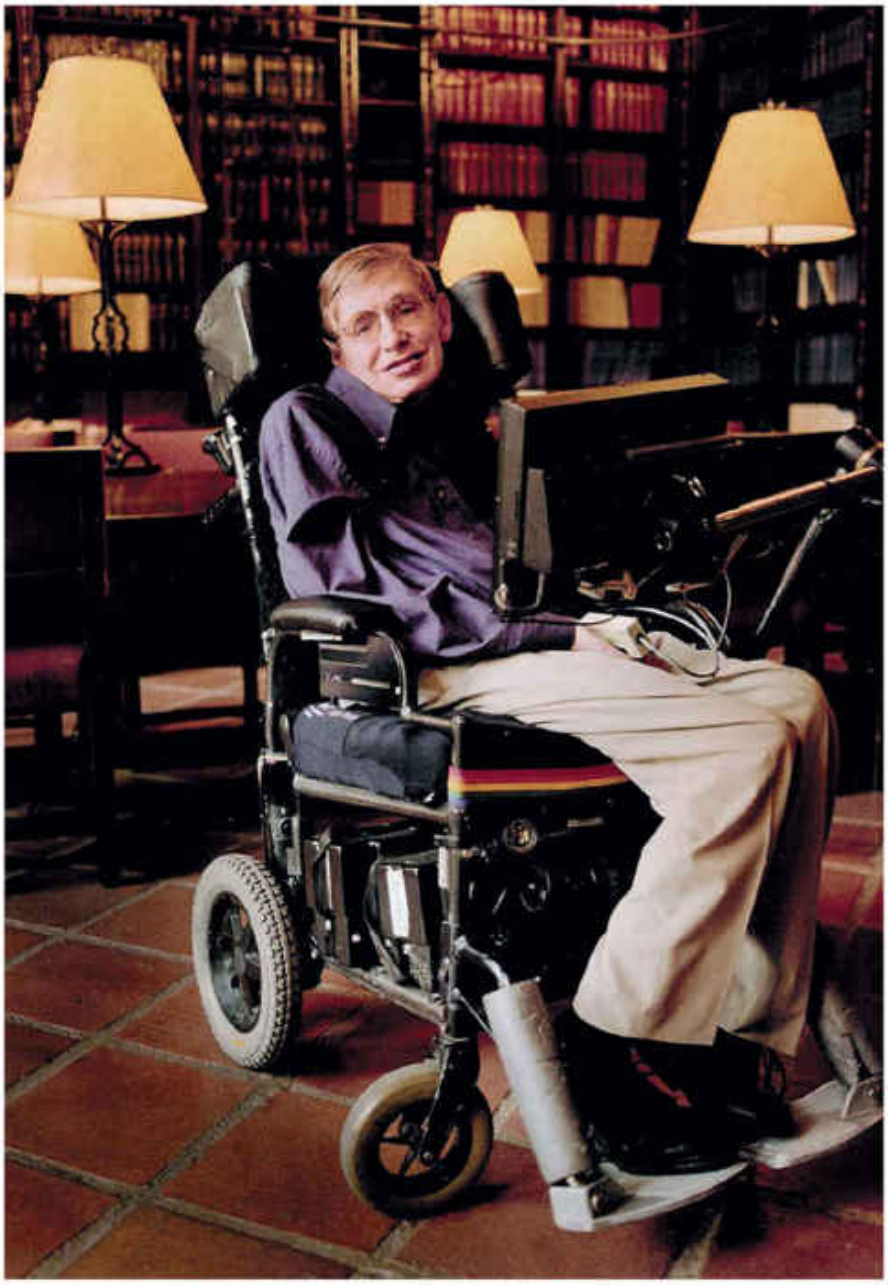
CAPÍTULO 5
Protegendo o passado
A viagem no tempo é possível? Uma civilização avançada poderia voltar e mudar o passado?

CAPÍTULO 6
Nosso futuro? *Jornada nas Estrelas* ou não?
Como as vidas biológica e eletrônica continuarão a ganhar complexidade a uma taxa cada vez maior.

CAPÍTULO 7
Admirável mundo brana
Vivemos em uma brana ou não passamos de hologramas?

Glossário
Sugestões de leitura
Créditos das imagens
Sobre o autor

Conheça outros títulos do autor
Leia também



Stephen Hawking em 2001, © Stewart Cohen.

Prefácio

Eu não esperava que *Uma breve história do tempo*, meu livro de divulgação científica, fizesse tamanho sucesso. A obra permaneceu na lista de best-sellers do jornal londrino *The Sunday Times* por mais de quatro anos, o que é mais tempo do que qualquer outro livro já tinha ficado anteriormente e algo surpreendente para uma obra sobre ciência cuja leitura não é tão fácil. Depois disso, as pessoas sempre me perguntavam quando eu escreveria uma sequência. Eu resistia porque não queria escrever *O filho da breve história* ou *Uma história do tempo um pouco mais longa*, e porque estava ocupado com minha pesquisa. Porém acabei percebendo que existia espaço para um tipo diferente de livro, talvez de compreensão mais fácil. *Uma breve história do tempo* foi organizado de forma linear, com a maioria dos capítulos em sequência e dependendo logicamente dos capítulos anteriores. Isso agradou a alguns leitores, mas outros ficaram empacados nos primeiros capítulos e nunca chegaram ao material mais interessante adiante. O presente livro, por outro lado, está mais para uma árvore. Os Capítulos 1 e 2 formam um tronco central a partir do qual os demais se ramificam.

Esses ramos são razoavelmente independentes entre si e podem ser lidos em qualquer ordem depois do tronco central. Correspondem a campos em que trabalhei ou sobre os quais refleti desde a publicação de *Uma breve história do tempo*. Assim, apresentam um retrato de algumas das áreas mais ativas na pesquisa atual. Dentro de cada capítulo também tentei evitar uma única estrutura linear. As ilustrações e suas legendas oferecem uma rota alternativa ao texto, como na edição especial ilustrada de *Uma breve história do tempo*, publicada em 1996, e os boxes, ou

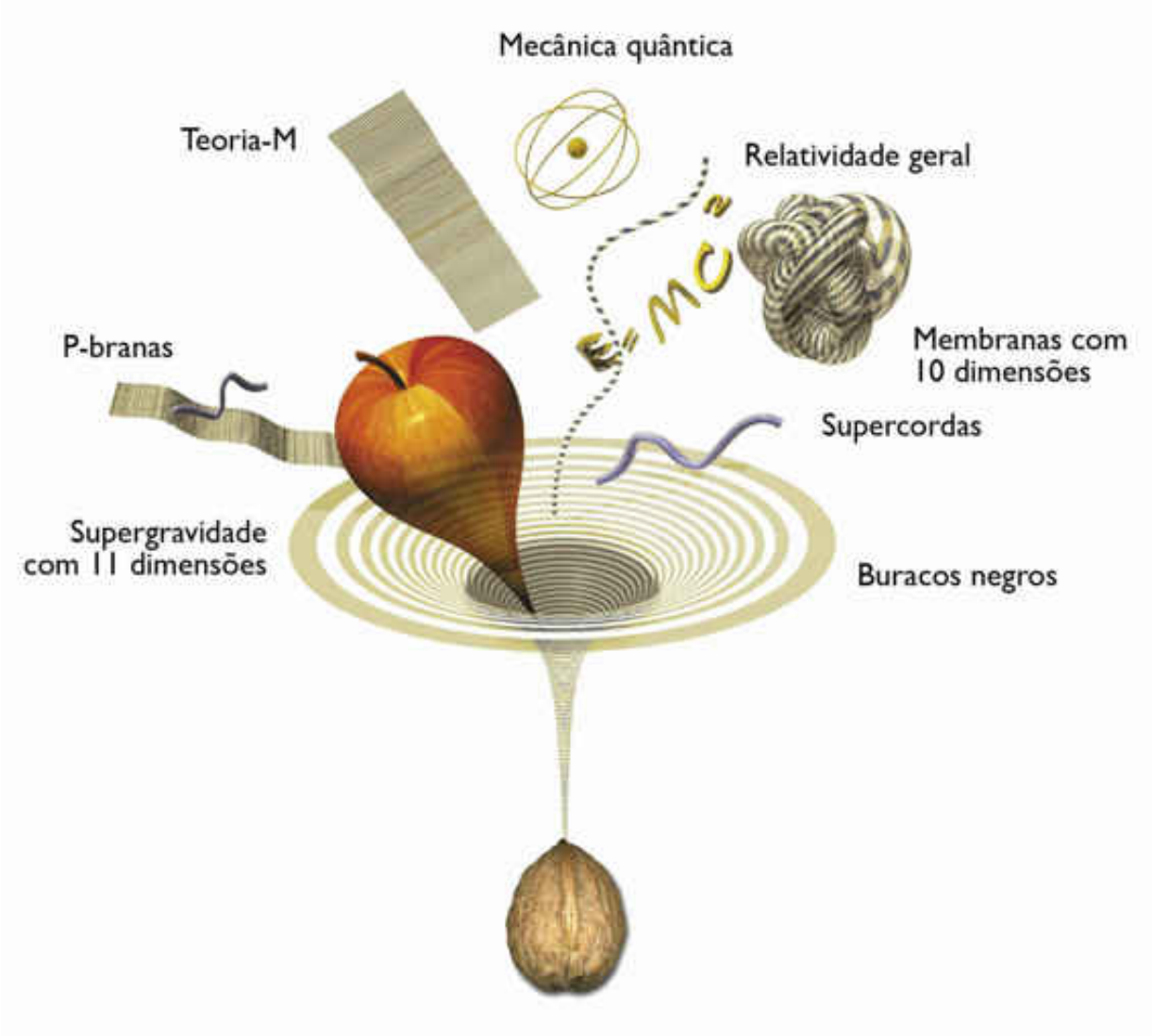
colunas laterais, proporcionam a oportunidade de investigar certos assuntos em mais detalhes do que é possível no texto principal.

Em 1988, quando *Uma breve história do tempo* foi publicado, a Teoria de Tudo definitiva parecia estar logo ali, no horizonte. Até que ponto a situação mudou desde então? Estamos mais próximos de nossa meta? Como será descrito neste livro, avançamos bastante depois disso. Entretanto, a viagem continua em curso, e o fim ainda não está à vista. Segundo um velho ditado, é melhor viajar com esperança do que chegar ao destino. A busca por descobertas estimula nossa criatividade em todos os campos, não apenas na ciência. Se chegássemos ao fim da linha, o espírito humano feneceria e morreria. Mas acho que nunca vamos ficar estagnados: devemos crescer em complexidade, quando não em profundidade, e seremos sempre o centro de um horizonte de possibilidades em expansão.

Quero partilhar minha empolgação pelas descobertas que estão sendo feitas e pelo retrato da realidade que vem surgindo. Concentrei-me em áreas com as quais trabalhei pessoalmente devido a um sentimento de maior envolvimento. Os detalhes do trabalho são muito técnicos, porém acredito que as ideias amplas podem ser transmitidas sem excesso de bagagem matemática. Espero ter conseguido.

Recebi um bocado de ajuda com este livro. Gostaria de mencionar em especial Thomas Hertog e Neel Shearer, pela contribuição nas ilustrações, legendas e boxes, Ann Harris e Kitty Ferguson, que editaram o manuscrito (ou, mais precisamente, os arquivos de computador, porque tudo que escrevo é eletrônico), Philip Dunn, do Book Laboratory and Moonrunner Design, que criou as ilustrações. Mas, acima de tudo, quero agradecer a todos que tornaram possível para mim levar uma vida razoavelmente normal e prosseguir com a pesquisa científica. Sem eles, este livro não poderia ter sido escrito.

Stephen Hawking
Cambridge, 2 de maio de 2001


Mecânica quântica
Teoria-M
Relatividade geral
$E = mc^2$
P-branas
Membranas com
10 dimensões
Supercordas
Supergravidade
com 11 dimensões
Buracos negros

CAPÍTULO 1

UMA BREVE HISTÓRIA DA RELATIVIDADE

Como Einstein lançou as bases das duas teorias fundamentais do século XX: a relatividade geral e a teoria quântica.



IMAGEM **A**:
Albert Einstein™



ALBERT EINSTEIN, DESCOBRIDOR das teorias da relatividade restrita e geral, nasceu em Ulm, na Alemanha, em 1879, mas no ano seguinte sua família se mudou para Munique, onde o pai, Hermann, e o tio, Jakob, começaram uma pequena e não muito bem-sucedida empresa de equipamentos elétricos. Albert não era nenhum menino prodígio, porém as afirmações de que se saía mal na escola parecem exageradas. Em 1894, o negócio de seu pai faliu e a família mudou-se para Milão. Os pais decidiram que ele deveria ficar em Munique para terminar os estudos, contudo o menino não gostou do autoritarismo do colégio e meses depois foi ao encontro da família na Itália. Mais tarde, em 1900, completou seus estudos em Zurique, formando-se na prestigiosa Escola Politécnica Federal, conhecida como ETH. A natureza contenciosa de Einstein e seu desprezo pela autoridade não lhe granjearam o apreço dos professores na ETH, e nenhum deles lhe ofereceu um cargo de assistente, que seria o caminho normal para uma carreira acadêmica. Após dois anos, ele enfim conseguiu um cargo modesto no escritório suíço de patentes, em Berna. Foi nesse emprego que, em 1905, Einstein escreveu três artigos que não apenas o estabeleceram como um dos principais cientistas do mundo, mas também deram início a duas revoluções conceituais, que transformaram nossa compreensão do tempo, do espaço e da própria realidade.

Próximo ao final do século XIX, os cientistas acreditavam estar perto de uma descrição completa do universo. Imaginavam que o espaço era preenchido por um meio contínuo chamado “éter”. Raios luminosos e sinais de rádio eram ondas nesse éter, assim como o som são ondas de pressão no ar. Para se chegar a uma teoria completa só faltava haver

medições cuidadosas das propriedades elásticas do éter. Na verdade, antecipando tais medições, o Jefferson Lab, na Universidade de Harvard, foi todo construído sem nenhum prego de ferro, de modo a não interferir nas delicadas medições magnéticas. Entretanto, os projetistas esqueceram que os tijolos avermelhados com os quais o laboratório e a maior parte de Harvard foram construídos contêm grandes quantidades de ferro. O prédio continua em uso até hoje, embora a universidade ainda não tenha muita certeza de quanto peso um assoalho de biblioteca sem pregos pode suportar.

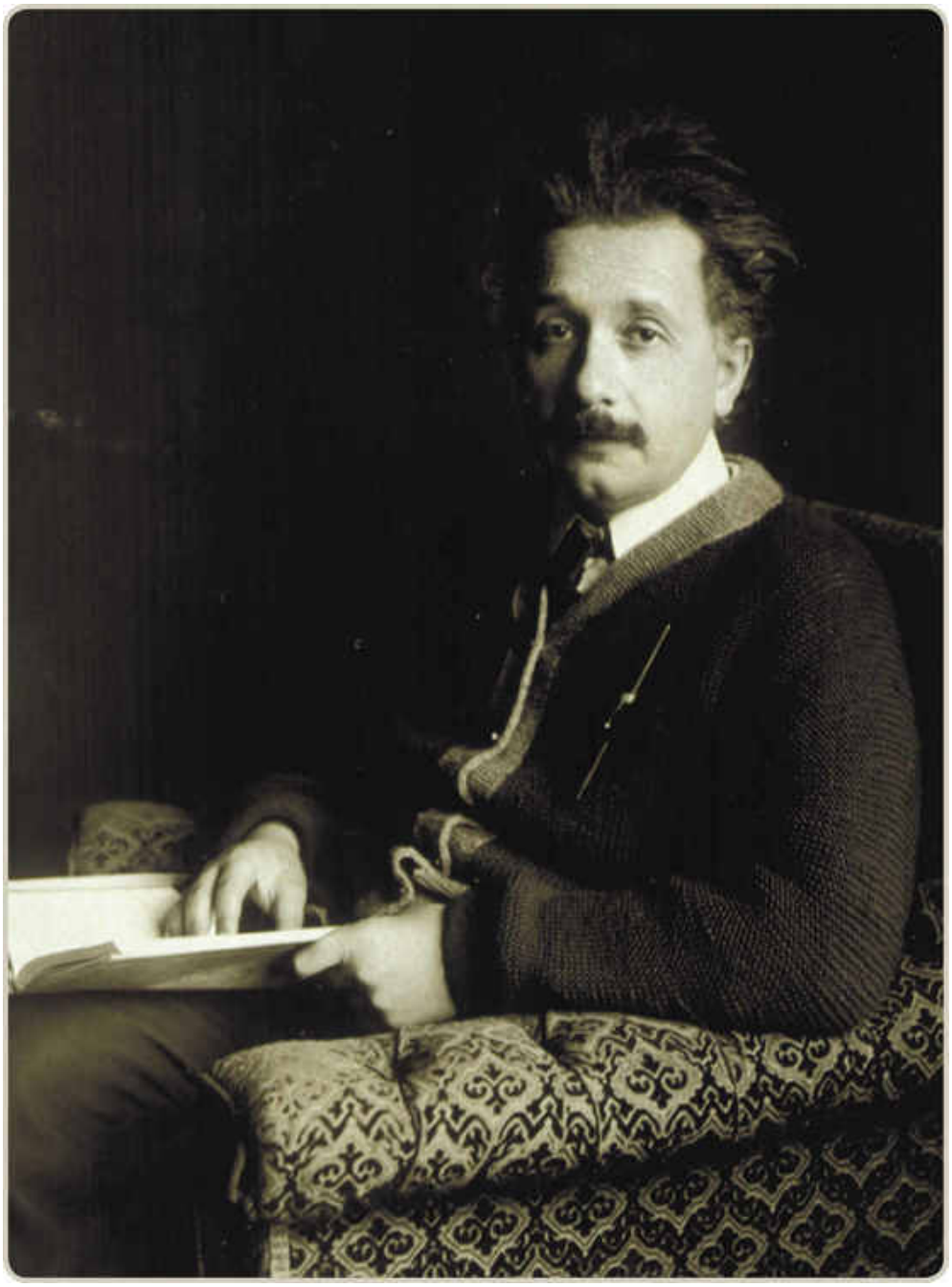


IMAGEM **B**: *Albert Einstein em 1920*.
Albert Einstein™



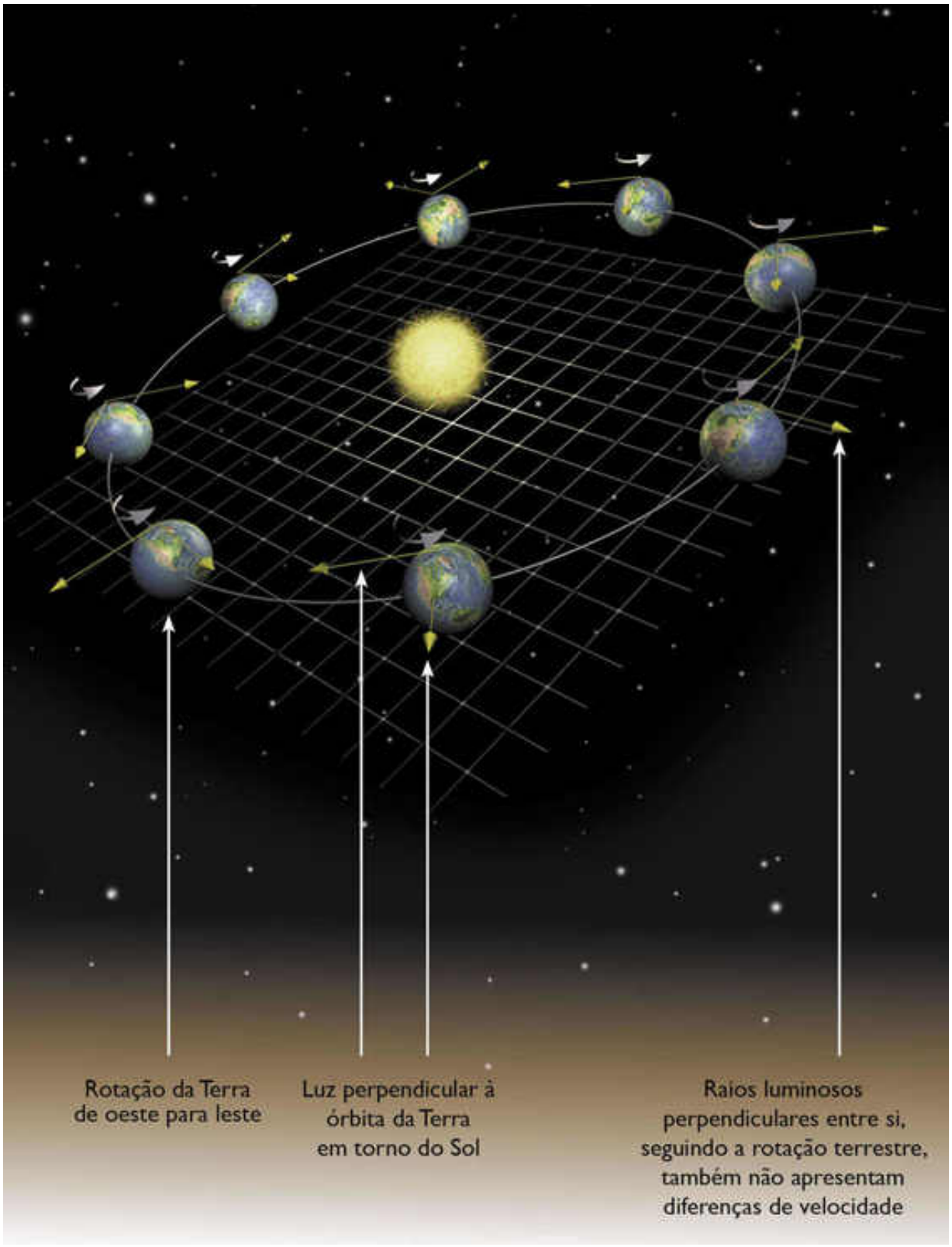
(FIG. 1.1)
A TEORIA DO ÉTER FIXO
Se a luz fosse uma onda em um material elástico chamado éter, a velocidade da luz deveria parecer mais elevada para uma pessoa em uma espaçonave (a) deslocando-se em direção a ela e mais baixa em uma espaçonave (b) viajando na mesma direção da luz.

No fim do século, começaram a surgir discrepâncias na ideia de um éter onipresente. Esperava-se que a luz viajasse a uma velocidade fixa através do éter, mas que, ao viajarmos através do éter na mesma direção que a luz, a velocidade da luz parecesse menor e, ao viajarmos na direção oposta à luz, a velocidade da luz parecesse maior (Figura 1.1).

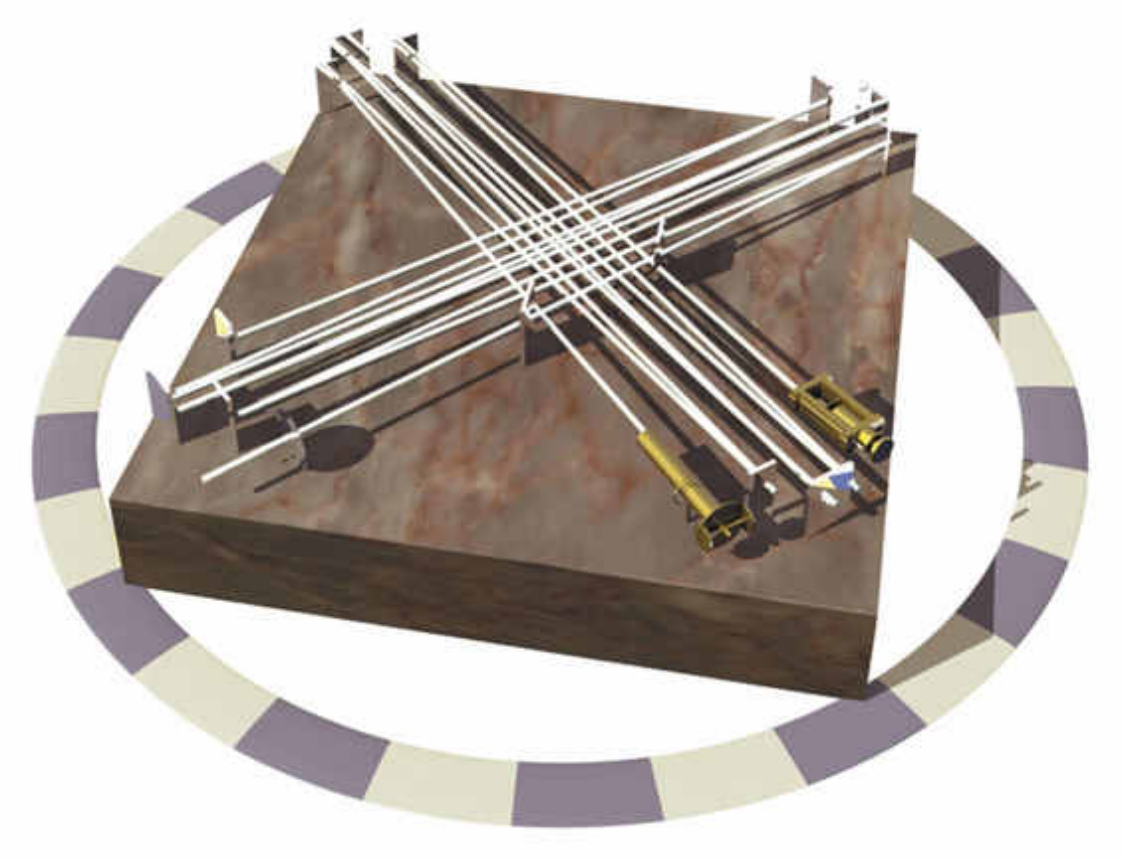
Contudo, uma série de experimentos foi incapaz de sustentar essa ideia. O mais cuidadoso e preciso desses experimentos foi realizado por Albert Michelson e Edward Morley, na Case School of Applied Science, em Cleveland, Ohio, em 1887. Eles compararam a velocidade da luz em dois feixes perpendiculares entre si. À medida que a Terra gira em torno de seu eixo e orbita o Sol, o dispositivo se move através do éter com velocidade e direção variadas (Figura 1.2). No entanto, Michelson e Morley não encontraram diferenças diárias ou anuais entre os dois feixes de luz. Era como se a luz viajasse sempre à mesma velocidade em relação ao observador, independentemente da velocidade e da direção em que o observador estivesse se deslocando (Figura 1.3).

Com base no experimento de Michelson-Morley, o físico irlandês George FitzGerald e o físico holandês Hendrik Lorentz sugeriram que

corpos movendo-se através do éter se contrairiam e que os relógios andariam mais devagar. Essa contração e o retardamento dos relógios seriam tais que todas as pessoas teriam uma mesma medição para a velocidade da luz, a despeito de como estivessem se deslocando em relação ao éter (FitzGerald e Lorentz ainda viam o éter como uma substância real). Entretanto, em um artigo escrito em junho de 1905, Einstein notou que, se o observador não pudesse detectar se estava ou não se deslocando através do espaço, o conceito de éter seria supérfluo. Em vez disso, ele partiu do postulado de que as leis da ciência deveriam parecer as mesmas para todos os observadores se movendo livremente. Em particular, todos deveriam calcular a mesma velocidade para a luz, não importando a rapidez com que se movessem. A velocidade da luz independe do movimento do observador e é a mesma em todas as direções.



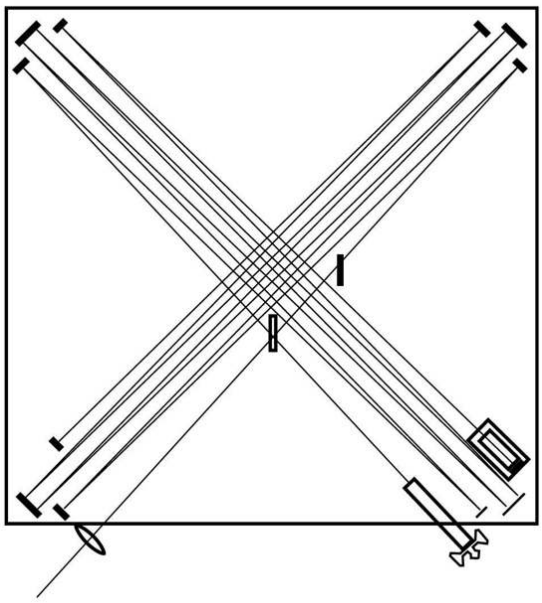
(FIG. 1.2)
Nenhuma diferença foi encontrada entre a velocidade da luz em direção à órbita terrestre e em uma direção perpendicular a ela.



(FIG. 1.3) MEDINDO A VELOCIDADE DA LUZ

No interferômetro de Michelson-Morley, a luz de uma fonte é dividida em dois feixes por um espelho semitransparente. Os dois feixes luminosos viajam perpendicularmente entre si e depois se combinam em um único feixe ao atingir o espelho semitransparente outra vez. Uma diferença na velocidade da luz viajando nas duas direções poderia fazer com que as cristas de onda de um feixe chegassem ao mesmo tempo que os vales de onda do outro e os anulassem.

Abaixo: Diagrama do experimento reconstruído a partir do que apareceu na *Scientific American* de 1887.



Para tal, foi necessário abandonar a ideia de que havia uma grandeza chamada tempo que todos os relógios deveriam medir. Em vez disso, cada pessoa teria seu próprio tempo. Os tempos de dois observadores iriam corresponder se eles estivessem em repouso em relação um ao outro, mas não se estivessem se movendo.



(FIG. 1.4)
Uma versão do paradoxo dos gêmeos (Fig. 1.5) foi testada experimentalmente com dois relógios atômicos sendo transportados por avião em direções opostas ao redor do mundo.

Quando voltaram a se encontrar, o relógio que voou para leste havia registrado ligeiramente menos tempo.

Isso foi confirmado por uma série de experimentos, incluindo um em que dois relógios atômicos foram colocados em aviões voando em direções opostas ao redor do mundo e ao regressar mostraram tempos ligeiramente diferentes (Figura 1.4). Tal experimento pode sugerir que, se alguém quiser viver mais tempo, deve se manter viajando sempre para leste, de modo que a velocidade do avião seja acrescentada à rotação da Terra. Contudo, o ganho de uma minúscula fração de segundo na vida da

pessoa seria mais do que anulado pela ingestão da comida servida pelas companhias aéreas.



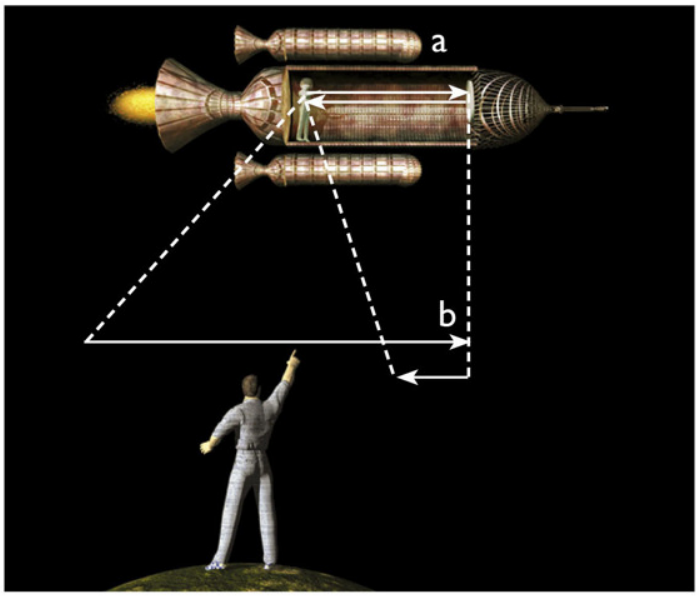
(FIG. 1.5)
O PARADOXO DOS GÊMEOS

Na teoria da relatividade, cada observador tem sua própria medida de tempo. Isso pode levar ao chamado paradoxo dos gêmeos.

Um dos gêmeos (a) parte em uma viagem espacial na qual se aproxima da velocidade da luz (c), enquanto seu irmão (b) permanece na Terra.

Devido ao movimento do primeiro irmão, o tempo anda mais devagar na espaçonave, do ponto de vista do irmão que ficou para trás. Assim, quando a nave volta, o viajante espacial (a2) descobre que seu irmão (b2) envelheceu mais do que ele.

Embora isso pareça contrariar o bom senso, uma série de experimentos sugeriu que nesse cenário o gêmeo viajando de fato estaria mais jovem.



(FIG. 1.6)

Uma espaçonave passa pela Terra da esquerda para a direita a quatro quintos da velocidade da luz. Um pulso luminoso é emitido em uma ponta da cabine e refletido na outra ponta (a).

A luz é observada por pessoas na Terra e na espaçonave. Devido ao movimento da espaçonave, elas vão discordar quanto à distância que a luz viajou ao ser refletida de volta (b).

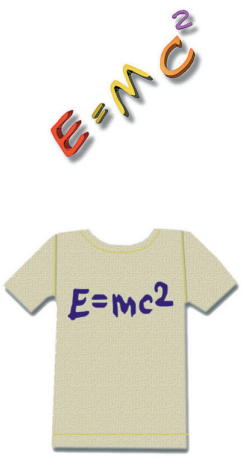
Logo, elas devem discordar também quanto ao tempo que a luz levou, pois, segundo o postulado de Einstein, a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores movendo-se livremente.

O postulado de Einstein de que as leis da natureza devem parecer as mesmas para todos os observadores se deslocando livremente foi a base para a teoria da relatividade, assim chamada porque sugeria que apenas o movimento relativo era importante. A beleza e a simplicidade da teoria convenceram muitos pensadores, mas uma boa dose de oposição perdurou. Einstein jogara por terra dois absolutos da ciência do século XIX: o repouso absoluto, como representado pelo éter, e o tempo absoluto ou universal que seria medido por todos os relógios. Muita gente achou isso um conceito perturbador. Acaso significaria, perguntavam, que *tudo* era relativo, que não havia padrões morais absolutos? O incômodo continuou ao longo das décadas de 1920 e 1930. Quando Einstein recebeu o Prêmio Nobel, em 1921, a nomeação foi por um trabalho importante, mas (para seus padrões) comparativamente menor, também realizado em 1905. Não houve menção à relatividade, que era considerada controversa demais. (Até hoje recebo de duas a três cartas por semana me dizendo que Einstein estava errado.) Todavia, a teoria da relatividade é hoje completamente aceita pela comunidade científica, e suas previsões já foram verificadas em incontáveis aplicações.



FIG 1.7

Uma consequência muito importante da relatividade é a relação entre massa e energia. O postulado de Einstein de que a velocidade da luz deve parecer a mesma para todos sugeria que nada podia se mover mais rápido do que a luz. O que acontece é que, quando alguém usa energia para acelerar qualquer coisa, seja uma partícula ou uma nave espacial, a massa do objeto aumenta, fazendo com que passe a ser difícil acelerá-lo ainda mais. Acelerar uma partícula à velocidade da luz seria impossível, pois exigiria uma quantidade infinita de energia. Massa e energia são equivalentes, como resumido na famosa equação de Einstein, $E = mc^2$ (Figura 1.7). Essa provavelmente é a única equação da física reconhecível nas ruas. Entre suas consequências estava a percepção de que, se o núcleo de um átomo de urânio fosse dividido em dois núcleos com massa total ligeiramente menor, isso liberaria uma tremenda quantidade de energia (ver Figura 1.8).



Em 1939, quando se vislumbrava a perspectiva de uma nova guerra, um grupo de cientistas que percebeu essas implicações convenceu Einstein a superar seus escrúpulos pacifistas e contribuir com sua autoridade em uma carta para o presidente Roosevelt instando os Estados Unidos a iniciar um programa de pesquisa nuclear.



IMAGEM **C**.

Isso levou ao Projeto Manhattan e, por fim, às bombas que explodiram em Hiroshima e Nagasaki em 1945. Algumas pessoas puseram a culpa da bomba atômica em Einstein porque ele descobriu a relação entre massa e energia, mas isso é como culpar Newton de causar acidentes de avião por ter descoberto a lei da gravidade. O próprio Einstein não participou do Projeto Manhattan e ficou horrorizado com o uso das bombas.



A CARTA PROFÉTICA DE EINSTEIN AO PRESIDENTE ROOSEVELT EM 1939

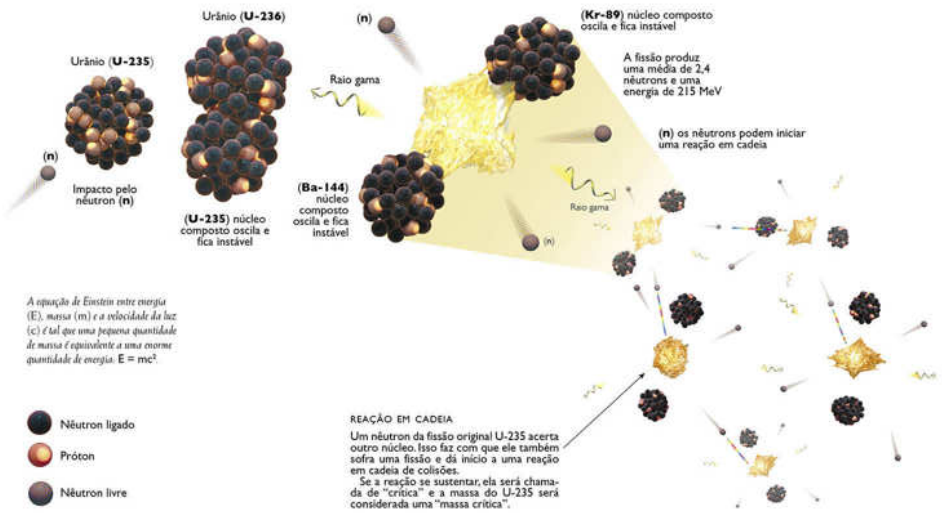
"No decurso dos últimos meses, tornou-se provável — mediante o trabalho de Joliot, na França, bem como de Fermi e Szilard, nos Estados Unidos — que pode vir a ser possível desencadear uma reação em cadeia nuclear numa grande massa de urânio, mediante a qual vastos montantes de energia e grandes quantidades de novos elementos com as propriedades do rádio seriam gerados. Hoje, parece quase certo que isso pode ser conseguido em um futuro imediato. Esse novo fenômeno levaria também à construção de bombas, e é concebível — embora muito menos certo — que bombas extremamente poderosas de um novo tipo possam assim ser construídas."

Após seus inovadores artigos de 1905, Einstein estabeleceu sua reputação científica. Contudo, apenas em 1909 lhe ofereceram um cargo na Universidade de Zurique que lhe permitiu deixar o escritório de patentes. Dois anos depois, ele se transferiu para a Universidade Alemã, em Praga, mas voltou a Zurique em 1912, dessa vez para a ETH. Apesar do antissemitismo disseminado em grande parte da Europa, mesmo nas universidades, Einstein era agora uma valiosa aquisição no mundo acadêmico. Recebeu ofertas de Viena e Utrecht, porém preferiu aceitar uma posição de pesquisador na Academia Prussiana de Ciências em

Berlim, pois isso o liberava da obrigação de lecionar. Mudou-se para Berlim em abril de 1914, e pouco depois a esposa e os dois filhos se juntaram a ele. Mas o casamento já não andava bem havia algum tempo, e a família logo voltou para Zurique. Embora Einstein os visitasse às vezes, ele e a esposa acabaram se divorciando. Mais tarde, Einstein se casou com sua prima Elsa, que morava em Berlim. O fato de ter passado os anos da guerra solteiro, sem compromissos domésticos, pode ser um motivo para esse período ter sido tão produtivo cientificamente.

Embora a teoria da relatividade se adequasse bem às leis que governavam a eletricidade e o magnetismo, não era compatível com a lei da gravitação de Newton. Essa lei dizia que, se mudássemos a distribuição da matéria em uma região do espaço, a mudança no campo gravitacional seria sentida instantaneamente por toda parte no universo. Isso não apenas significaria que poderíamos enviar sinais a uma velocidade superior à da luz (algo proibido pela relatividade); a fim de compreender o que se entendia por instantâneo, exigia também a existência de um tempo absoluto ou universal, que a relatividade abolira em prol do tempo pessoal.

Fig. 1.8


Urânio (U-235)
(n)
Impacto pelo nêutron (n)
Urânio (U-236)
(U-235) núcleo composto oscila e fica instável
Raio gama
(n)
(Ba-144) núcleo composto oscila e fica instável
(Kr-89) núcleo composto oscila e fica instável
A fissão produz uma média de 2,4 nêutrons e uma energia de 215 MeV
(n) os nêutrons podem iniciar uma reação em cadeia
Raio gama
(n)
A equação de Einstein entre energia (E), massa (m) e a velocidade da luz (c) é tal que uma pequena quantidade de massa é equivalente a uma enorme quantidade de energia. E = mc²
Nêutron ligado
Próton
Nêutron livre
REAÇÃO EM CADEIA
Um nêutron da fissão original U-235 acerta outro núcleo. Isso faz com que ele também sofra uma fissão e dá início a uma reação em cadeia de colisões.
Se a reação se sustentar, ela será chamada de "crítica" e a massa do U-235 será considerada uma "massa crítica".

(FIG. 1.8)
ENERGIA DE LIGAÇÃO NUCLEAR

Os núcleos são feitos de prótons e nêutrons unidos por uma força forte. Mas a massa do núcleo é sempre menor do que a soma das massas individuais dos prótons e nêutrons que o compõem. A diferença é uma medida da energia de ligação nuclear que mantém o núcleo coeso. Essa energia de ligação pode ser calculada com base na relação de Einstein: energia de ligação nuclear = Δmc^2 onde Δm é a diferença entre a massa do núcleo e a soma das massas individuais.

É a liberação dessa energia potencial que cria a força explosiva devastadora de um dispositivo nuclear.



(FIG. 1.9)
Um observador numa caixa não sabe dizer a diferença entre estar em um elevador estacionário na Terra (a) e ser acelerado por um foguete no espaço livre (b). Se o motor do foguete for

desligado (c), a sensação será a de que o elevador está em queda livre para o fundo do poço (d).

Einstein estava ciente da dificuldade em 1907, quando ainda trabalhava no escritório de patentes em Berna, mas foi só em Praga, em 1911, que começou a pensar seriamente no problema. Ele percebeu que havia uma estreita relação entre aceleração e campo gravitacional. Uma pessoa dentro de uma caixa fechada, como um elevador, seria incapaz de dizer se a caixa estava em repouso no campo gravitacional terrestre ou sob a aceleração de um foguete no espaço livre. (Claro, isso foi antes da era de *Jornada nas Estrelas*, logo Einstein pensava no experimento em termos de elevadores, não espaçonaves.) Mas não podemos acelerar ou entrar em queda livre por uma grande distância em um elevador sem que aconteça um desastre (Figura 1.9).



FIG. 1.10

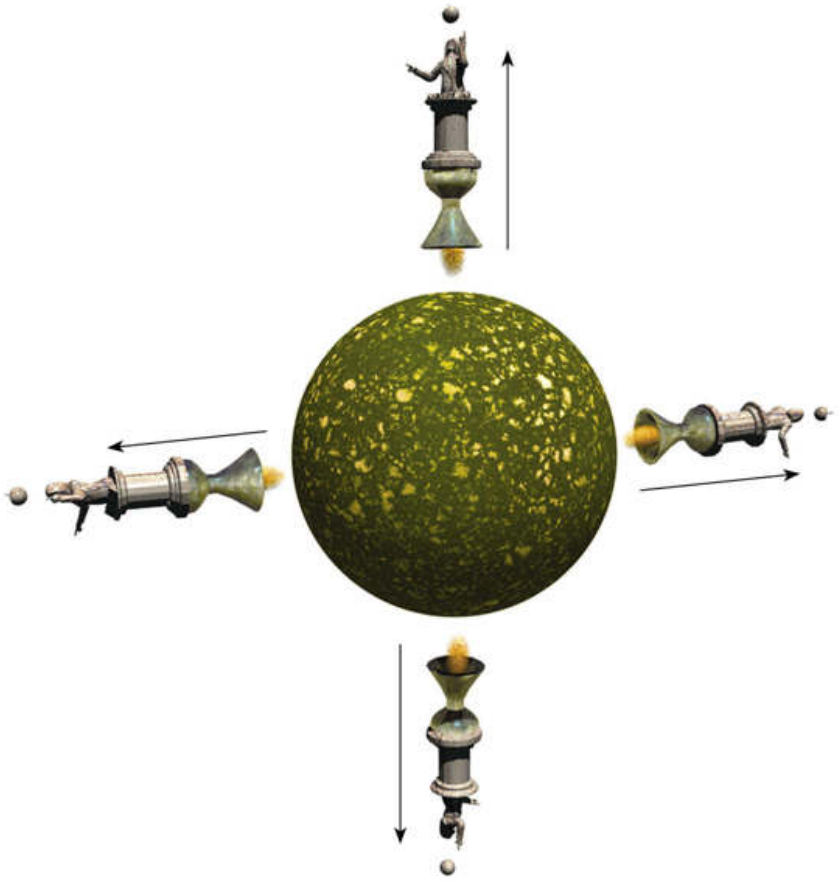


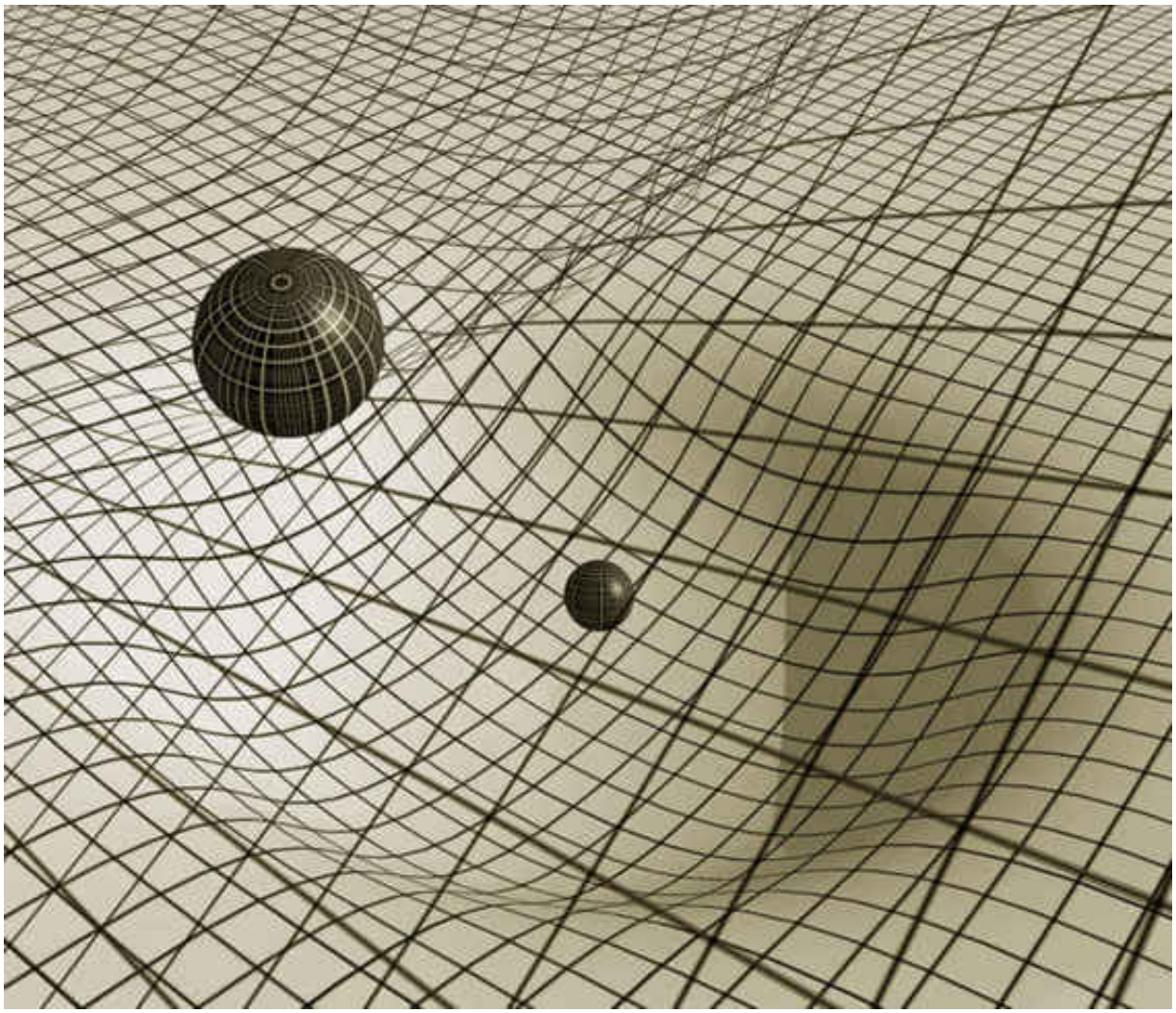
FIG. 1.11

Se a Terra fosse plana (Fig. 1.10), poderíamos dizer tanto que a maçã caiu na cabeça de Newton devido à gravidade quanto que a Terra e Newton estavam acelerando para cima. Essa equivalência não funcionava para uma Terra esférica (Fig. 1.11), pois pessoas em lados opostos do mundo estariam se afastando entre si. Einstein superou essa dificuldade tornando o espaço e o tempo curvos.

Se a Terra fosse plana, poderíamos igualmente dizer que a maçã atingiu a cabeça de Newton por causa da gravidade ou porque Newton e a superfície da Terra estavam se movendo para cima (Figura 1.10). Porém, essa equivalência entre a aceleração e a gravidade não parecia funcionar em uma Terra redonda — pessoas em lados opostos do mundo teriam de acelerar em direções opostas, mas permanecer a uma distância constante uma da outra (Figura 1.11).

No entanto, ao voltar de Zurique em 1912, Einstein teve seu momento eureca ao perceber que a equivalência funcionaria se a geometria do

espaço-tempo fosse curva, não plana, como se presumira até então. Sua ideia foi que massa e energia deformariam o espaço-tempo de um modo ainda não determinado. Objetos como maçãs ou planetas tentariam se deslocar em linha reta através do espaço-tempo, mas pareceria que suas trajetórias eram arqueadas por um campo gravitacional, pois o espaço-tempo é curvo (Figura 1.12).



(FIG. 1.12) CURVAS NO ESPAÇO-TEMPO

A aceleração e a gravidade podem ser equivalentes somente se um corpo maciço deformar o espaço-tempo, desse modo curvando as trajetórias dos objetos nas proximidades.

Com a ajuda de seu amigo Marcel Grossmann, Einstein estudou a teoria dos espaços e superfícies curvos que fora desenvolvida antes por Georg

Friedrich Riemann. Entretanto, Riemann pensara exclusivamente no espaço como sendo curvo. Coube a Einstein perceber que a curvatura se dava no espaço-tempo. Einstein e Grossmann escreveram um artigo conjunto em 1913 para apresentar a ideia de que o que pensamos como forças gravitacionais nada mais é do que uma expressão do fato de o espaço-tempo ser curvo. Contudo, devido a um erro de Einstein (que era humano e falível como qualquer um), eles não conseguiram encontrar as equações que relacionavam a curvatura do espaço-tempo à massa e à energia nele existentes. Einstein continuou a trabalhar no problema em Berlim, alheio a assuntos domésticos e em geral sem se deixar afetar pela guerra, até enfim encontrar as equações corretas em novembro de 1915. Ele discutira suas ideias com o matemático David Hilbert durante uma visita à Universidade de Göttingen no verão de 1915, e Hilbert descobriu independentemente as mesmas equações poucos dias antes de Einstein. Não obstante, como o próprio Hilbert admitiu, o crédito pela nova teoria cabia a Einstein. A ideia de relacionar a gravidade à curvatura do espaço-tempo foi do físico. Foi graças à condição civilizada da Alemanha nesse período que tais discussões e trocas de ideias científicas puderam ocorrer sem perturbação mesmo em tempos de guerra — um gritante contraste com a era nazista de vinte anos depois.

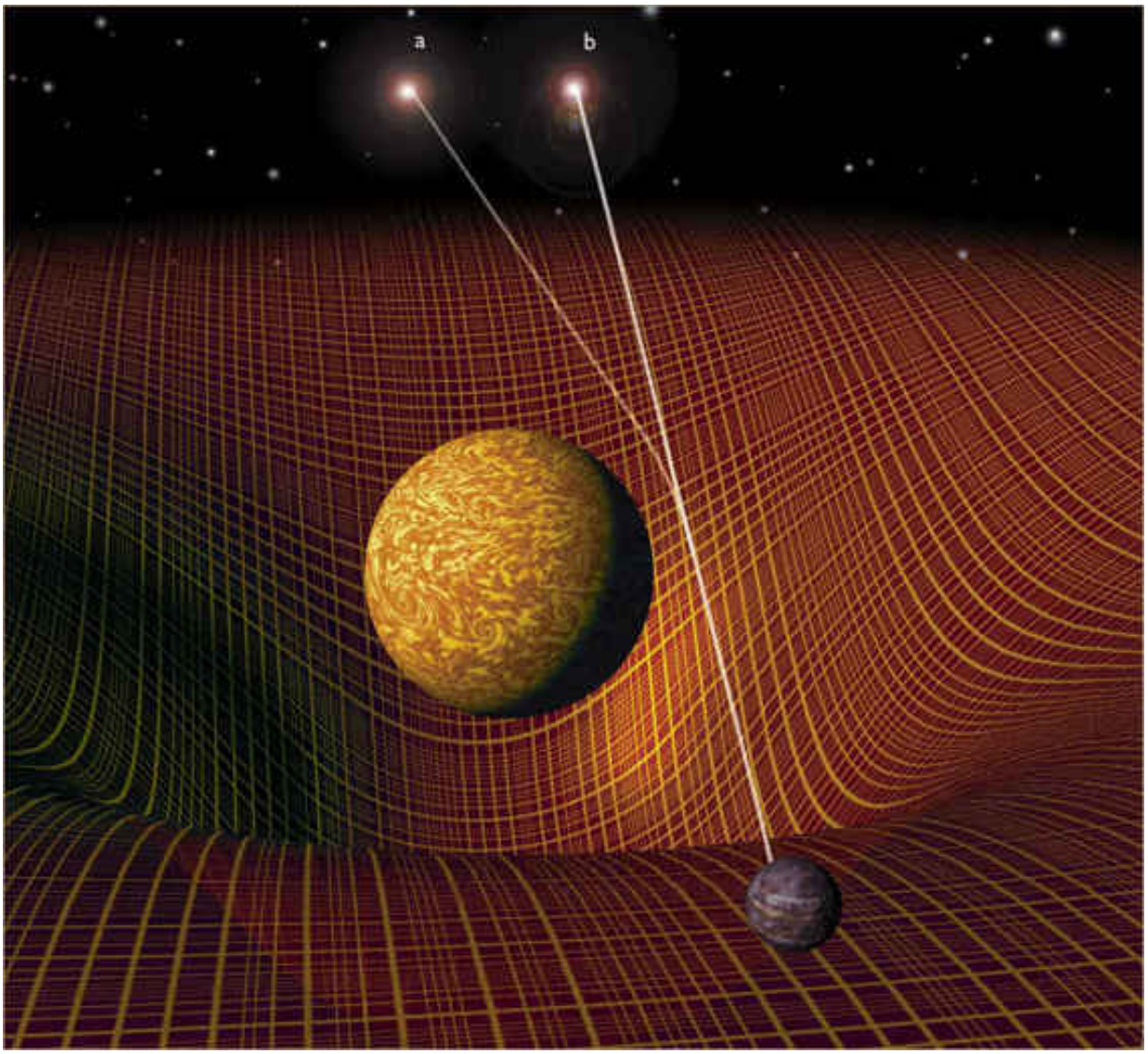


IMAGEM **D**.
Albert Einstein™

A nova teoria do espaço-tempo curvo foi chamada de relatividade geral a fim de distingui-la da teoria original sem gravidade, que passou a ser conhecida como relatividade restrita. Ela foi confirmada de maneira espetacular em 1919, quando uma expedição inglesa à África Ocidental observou uma ligeira curvatura na luz de uma estrela passando perto do Sol durante um eclipse (Figura 1.13). Ali estava a evidência direta de que o espaço e o tempo eram curvos, e ela motivou a maior mudança em nossa percepção do universo em que vivemos desde que Euclides escreveu seus *Elementos de geometria*, por volta de 300 a.C.

A teoria da relatividade geral de Einstein transformou o espaço e o tempo de um fundo passivo onde os eventos têm lugar em participantes ativos na dinâmica do universo. Isso levou a um grande problema que

permanece na linha de frente da física no século XXI. O universo é cheio de matéria, e a matéria deforma o espaço-tempo de um modo que os corpos caem uns sobre os outros. Einstein percebeu que suas equações não tinham uma solução que descrevesse um universo estático, imutável no tempo. Em vez de abrir mão de um universo eterno como esse, no qual ele e a maioria das outras pessoas acreditavam, Einstein contornou as equações acrescentando um termo que denominou constante cosmológica, que curvava o espaço-tempo no sentido oposto, de modo que os corpos se afastavam. O efeito de repulsão da constante cosmológica podia equilibrar o efeito de atração da matéria, possibilitando assim uma solução estática para o universo. Essa foi uma das grandes oportunidades perdidas da física teórica. Se tivesse se atido a suas equações originais, Einstein poderia ter previsto que o universo devia estar se expandindo ou se contraindo. Da maneira como ocorreu, a possibilidade de um universo dependente do tempo não foi levada a sério senão após as observações na década de 1920 feitas pelo telescópio de 2,5 metros de Monte Wilson.

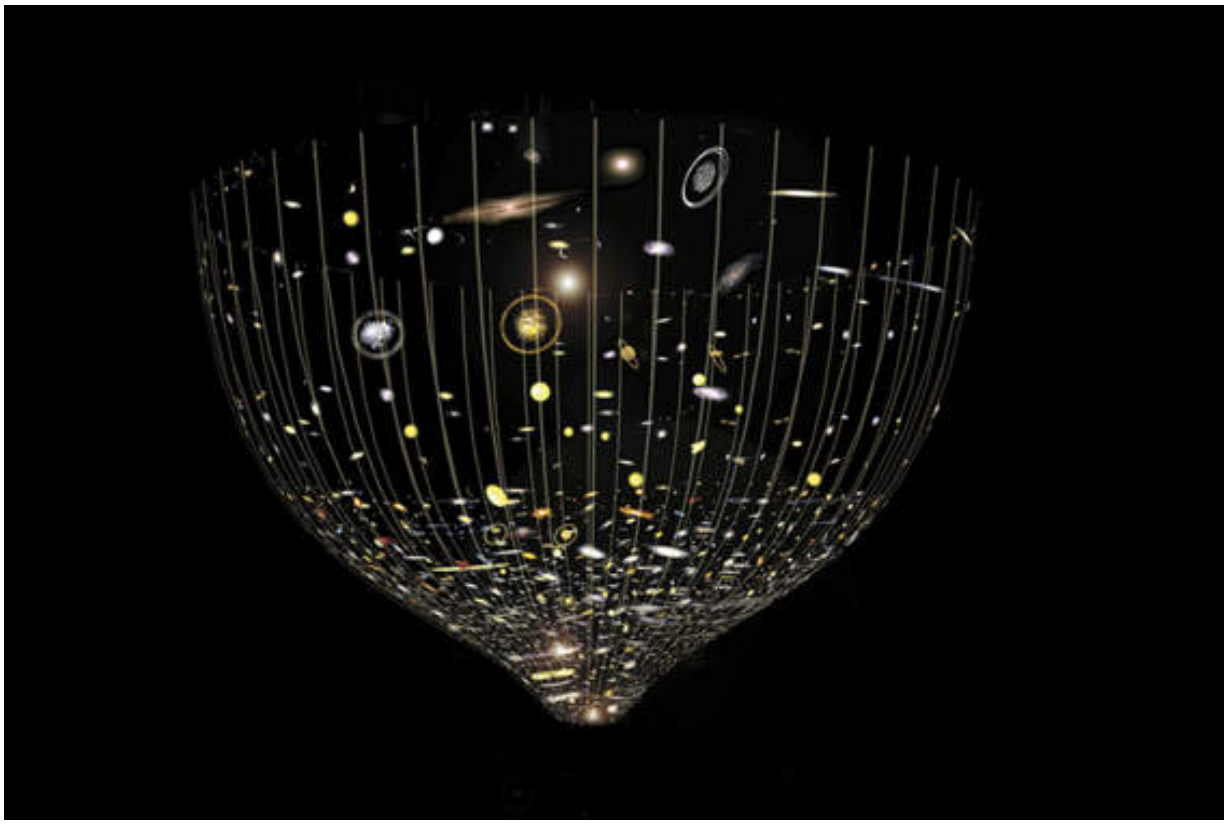


(FIG. 1.13) CURVAS DA LUZ

A luz de uma estrela passando perto do Sol é defletida pelo modo como a massa do Sol curva o espaço-tempo (a). Isso gera um ligeiro desvio na posição aparente da estrela tal como vista da Terra (b). O fenômeno pode ser observado durante um eclipse.

Essas observações revelaram que, quanto mais distantes de nós estão as outras galáxias, mais rápido elas se afastam. O universo está se expandindo, com a distância entre duas galáxias quaisquer continuamente aumentando com o tempo (Figura 1.14). Essa descoberta eliminou a necessidade de uma constante cosmológica para obter uma solução estática para o universo. Einstein mais tarde chamou a constante cosmológica de o maior erro de sua vida. Entretanto, hoje parece que não

foi um erro, afinal: observações recentes, descritas no Capítulo 3, sugerem que de fato deve haver uma pequena constante cosmológica.



(FIG. 1.14)
Observações de galáxias indicam que o universo está em expansão: a distância entre quase todo par de galáxias está aumentando.

A relatividade geral transformou por completo a discussão sobre a origem e o destino do universo. Um universo estático poderia ter existido para sempre ou poderia ter sido criado na presente forma em algum momento do passado. Entretanto, se as galáxias estão se afastando hoje, isso significa que devem ter sido mais próximas no passado. Cerca de quinze bilhões de anos atrás, estariam todas em cima umas das outras e a densidade seria muito grande. Esse estado foi chamado de "átomo primordial" pelo padre católico Georges Lemaître, que foi o primeiro a investigar a origem do universo hoje chamada de Big Bang.

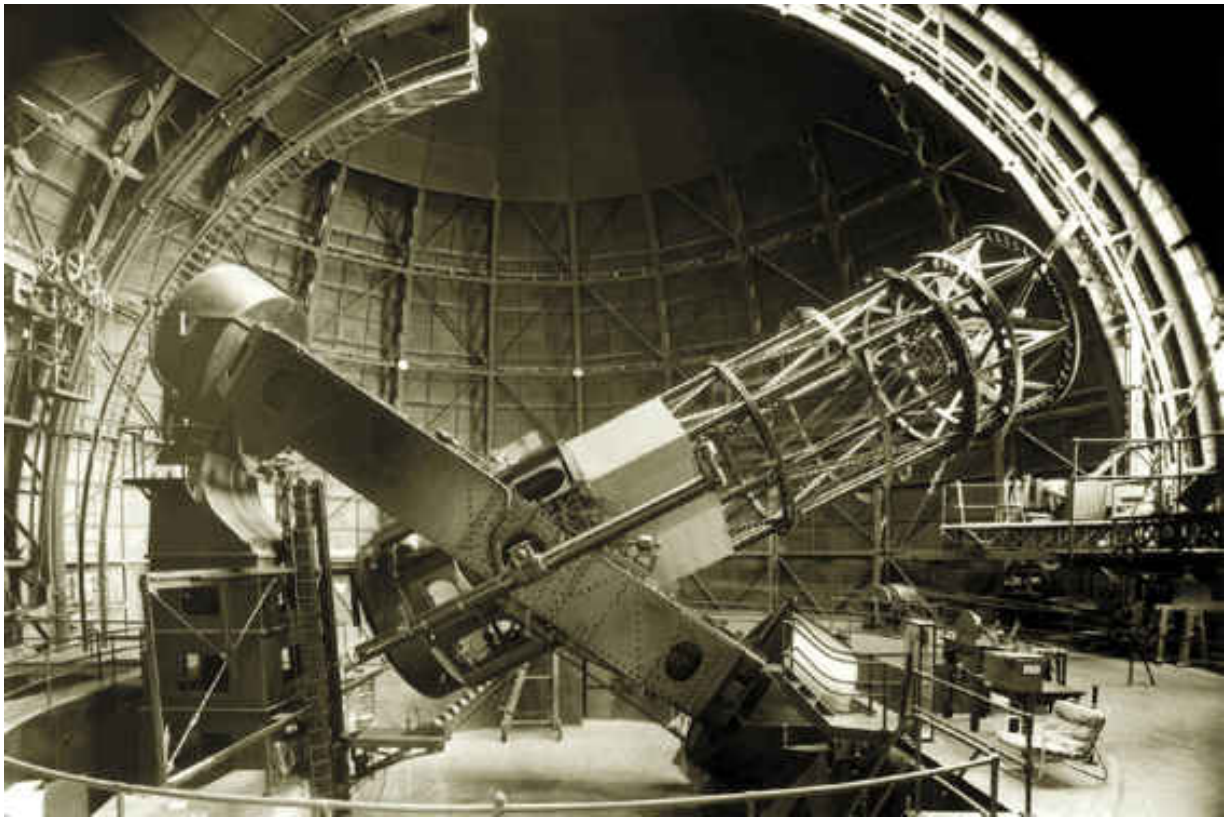


IMAGEM **E**:
O telescópio Hooker, de 2,5 metros, no Observatório de Monte Wilson.

Einstein parece nunca ter levado o Big Bang a sério. Ao que tudo indica, ele acreditava que o modelo simples de um universo em expansão uniforme não funcionaria se acompanhássemos o movimento das galáxias de volta no tempo e que as pequenas velocidades laterais das galáxias teriam feito com que escapassem umas das outras. Ele achou que o universo podia ter tido uma fase prévia de contração, com um repique para a presente expansão a uma densidade razoavelmente moderada. Entretanto, hoje sabemos que, para que as reações nucleares no universo primitivo tivessem produzido as quantidades de elementos leves que observamos à nossa volta, a densidade deve ter sido de pelo menos uma tonelada por centímetro cúbico e a temperatura, de dez bilhões de graus. Além do mais, observações da radiação cósmica de fundo em micro-ondas indicam que a densidade no passado foi provavelmente da ordem de cem bilhões de trilhões de trilhões de trilhões de trilhões de trilhões (1 seguido

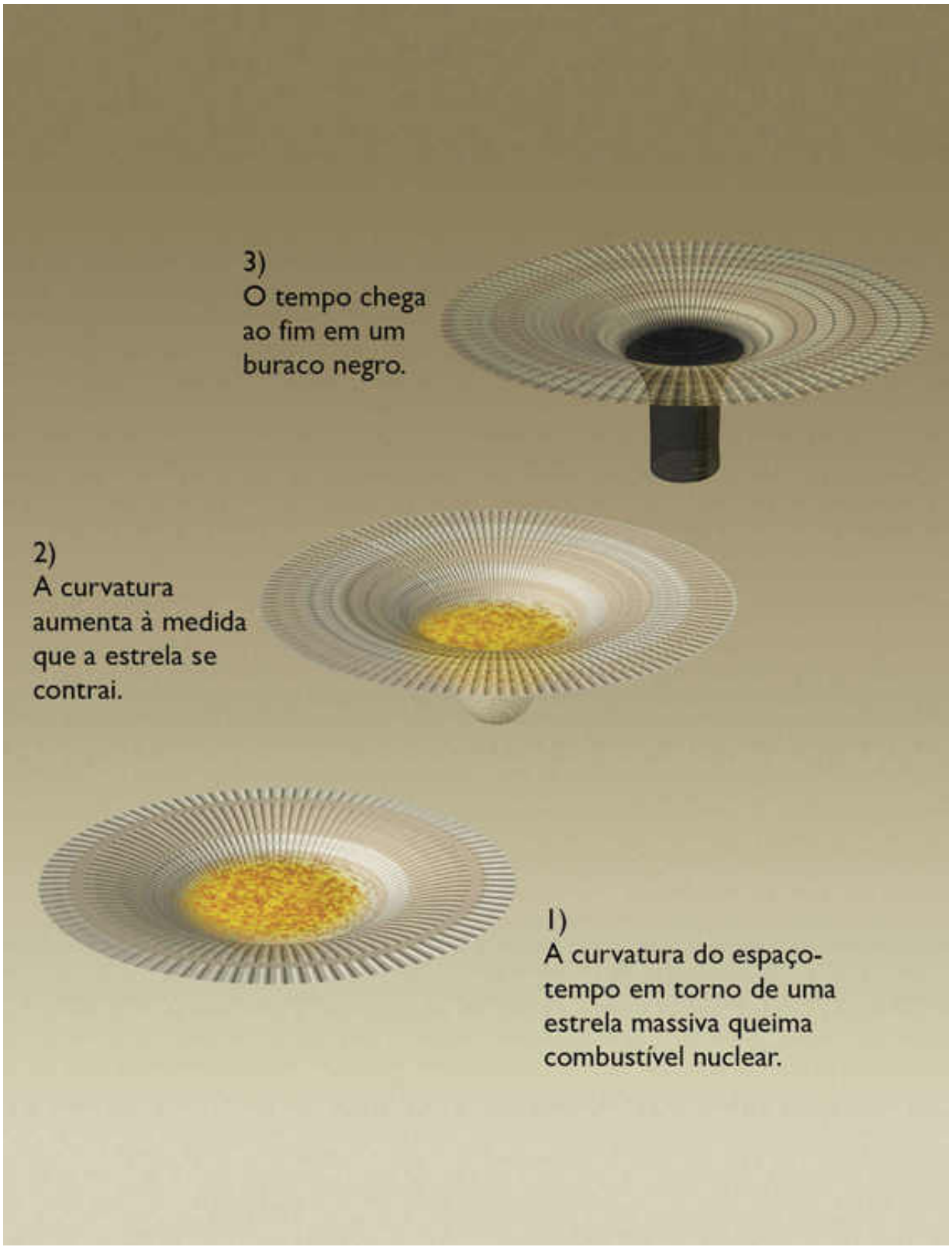
de 71 zeros) de toneladas por polegada cúbica. Também sabemos hoje que a teoria da relatividade geral de Einstein não permite que o universo sofra um repique de uma fase de contração para a presente expansão. Como será discutido no Capítulo 2, Roger Penrose e eu conseguimos mostrar que a relatividade geral prevê que o universo começou em um Big Bang. Assim, a teoria de Einstein sugere, sim, que o tempo teve um início, embora a ideia sempre o tenha desagradado.

Ele ficou ainda mais relutante em admitir a previsão da relatividade geral de que o tempo terminaria para as estrelas massivas quando elas chegassem ao fim de sua vida e não mais gerassem calor suficiente para contrabalançar a força de sua própria gravidade, que tentava torná-las menores. Einstein achava que tais estrelas se acomodariam numa espécie de estado final, mas sabemos hoje que não existem configurações de estado final para estrelas com mais do que o dobro da massa do Sol. Essas estrelas continuarão encolhendo até se tornarem buracos negros, regiões do espaço-tempo tão deformadas que a luz não pode escapar delas (Figura 1.15).

Penrose e eu demonstramos a previsão da relatividade geral de que o tempo chegaria ao fim no interior de um buraco negro, não só para a estrela como também para qualquer astronauta infeliz que porventura caísse dentro dele. Contudo, tanto o início quanto o fim do tempo seriam lugares onde as equações da relatividade geral não poderiam ser definidas. Assim, a teoria não poderia prever o que emergiria do Big Bang. Alguns viram isso como um indicativo da liberdade de Deus para iniciar o universo como bem entendesse, mas outros (incluindo eu) acharam que o início do universo deve ser governado pelas mesmas leis vigentes em outras épocas. Fizemos algum progresso rumo a esse objetivo, como será descrito no Capítulo 3, mas ainda não dispomos de uma compreensão total da origem do universo.

O motivo para a relatividade geral não ser válida no Big Bang era sua incompatibilidade com a teoria quântica, a outra grande revolução conceitual do início do século XX. O primeiro passo rumo à teoria quântica viera em 1900, quando Max Planck descobriu, em Berlim, que a

radiação de um corpo incandescente poderia ser explicada se a luz fosse emitida ou absorvida somente em pacotes discretos, denominados quanta. Em um de seus revolucionários artigos, escrito em 1905, quando ele trabalhava no escritório de patentes, Einstein mostrou que a hipótese quântica de Planck podia explicar o que é chamado de efeito fotoelétrico, o modo como certos metais emitem elétrons quando a luz incide sobre eles. Essa é a base dos detectores de luz e das câmeras de televisão modernos, e foi por esse trabalho que Einstein recebeu o Prêmio Nobel de física.



(FIG. 1.15)
Quando uma estrela maciça exaure seu combustível nuclear, ela perde calor e se contrai. A curvatura do espaço-tempo se torna tão grande que é criado um buraco negro de onde a luz não

pode escapar. Dentro do buraco negro o tempo chegará ao fim.

Einstein continuou a trabalhar na ideia do quantum até a década de 1920, mas ficou profundamente impressionado com o trabalho de Werner Heisenberg em Copenhague, de Paul Dirac em Cambridge e de Erwin Schrödinger em Zurique, que desenvolveram um novo panorama da realidade chamado mecânica quântica. As partículas minúsculas não mais tinham posição e velocidade definidas. Em vez disso, quanto maior a precisão com que se determinava a posição de uma partícula, menor a precisão com que se podia determinar sua velocidade, e vice-versa. Einstein ficou horrorizado com essa qualidade aleatória e imprevisível das leis fundamentais e nunca aceitou por completo a mecânica quântica. Seus sentimentos foram expressos na famosa máxima "Deus não joga dados". A maioria dos outros cientistas, porém, aceitou a validade das novas leis quânticas por elas fornecerem explicações para uma vasta gama de fenômenos antes incompreensíveis e apresentarem excelente conformidade com as observações. Elas são a base para os avanços modernos na química, na biologia molecular e na eletrônica e o alicerce da tecnologia que transformou o mundo nos últimos cinquenta anos.



IMAGEM **F**: *Albert Einstein com uma marionete de si mesmo pouco antes de chegar aos Estados Unidos para ficar.*
Albert Einstein™

Em dezembro de 1932, ciente de que Hitler e os nazistas estavam prestes a subir ao poder, Einstein deixou a Alemanha e quatro meses depois renunciou a sua cidadania, passando os últimos vinte anos de sua vida no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, em Nova Jersey.

Na Alemanha, os nazistas lançaram uma campanha contra a "ciência judaica" e os diversos cientistas alemães que eram judeus; foi em parte

por esse motivo que a Alemanha não conseguiu construir uma bomba atômica. Einstein e a relatividade foram os principais alvos dessa campanha. Quando lhe contaram sobre a publicação de um livro intitulado *100 autores contra Einstein*, ele respondeu: “Por que cem? Se eu estivesse errado, um só teria bastado.” Após a Segunda Guerra Mundial, ele exortou os Aliados a montar um governo mundial para controlar a bomba atômica. Em 1948, ofereceram-lhe a presidência do novo estado de Israel, mas ele recusou. Certa vez, disse: “A política existe para o momento, mas uma equação existe para a eternidade.” As equações de Einstein sobre a relatividade geral são seu melhor epitáfio e memorial. Elas existirão enquanto o universo existir.

O mundo mudou mais nos últimos cem anos do que em qualquer século precedente. O motivo não foram novas doutrinas políticas ou econômicas, mas os vastos progressos na tecnologia tornados possíveis pelos avanços na ciência básica. Quem simboliza melhor esses avanços do que Einstein?



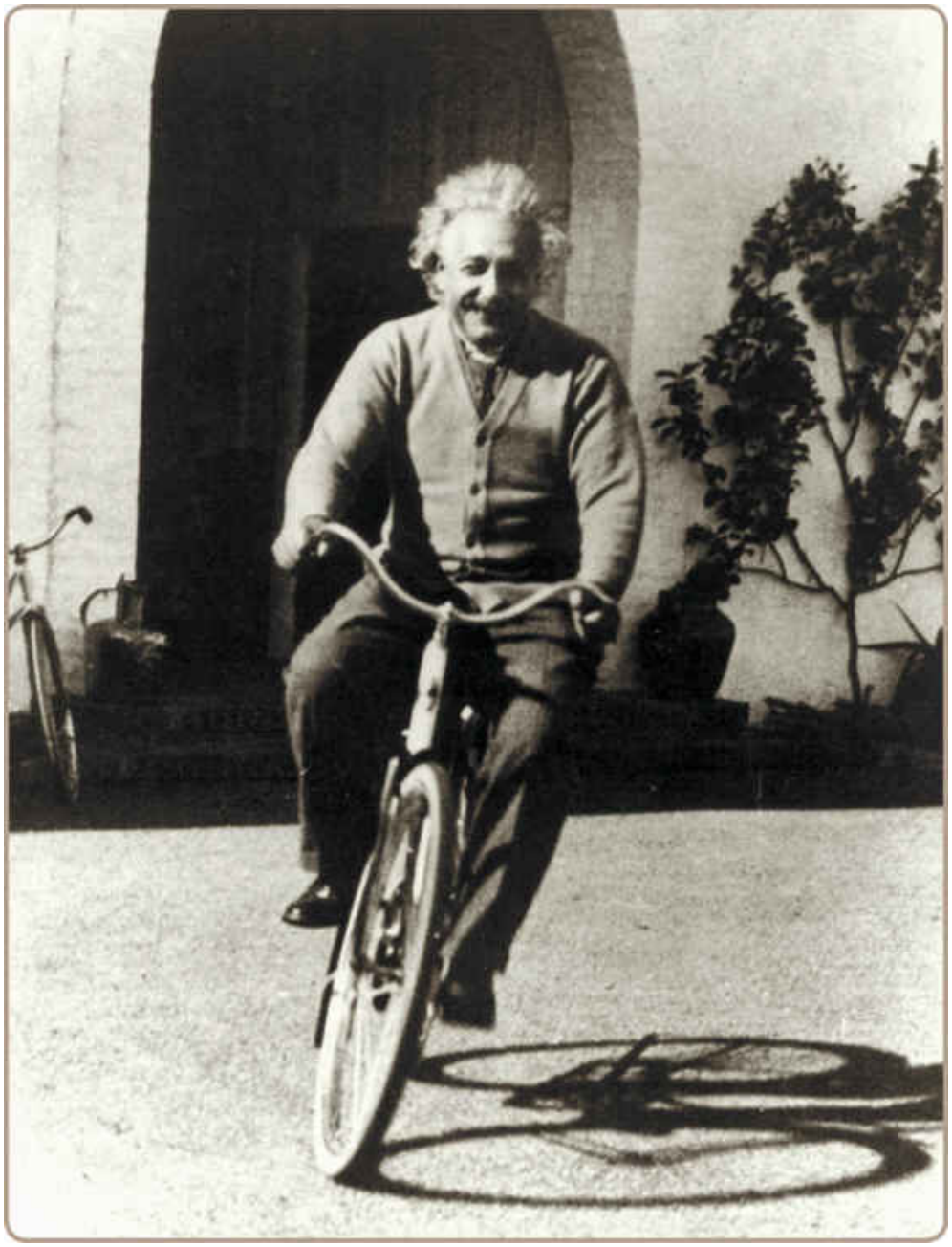


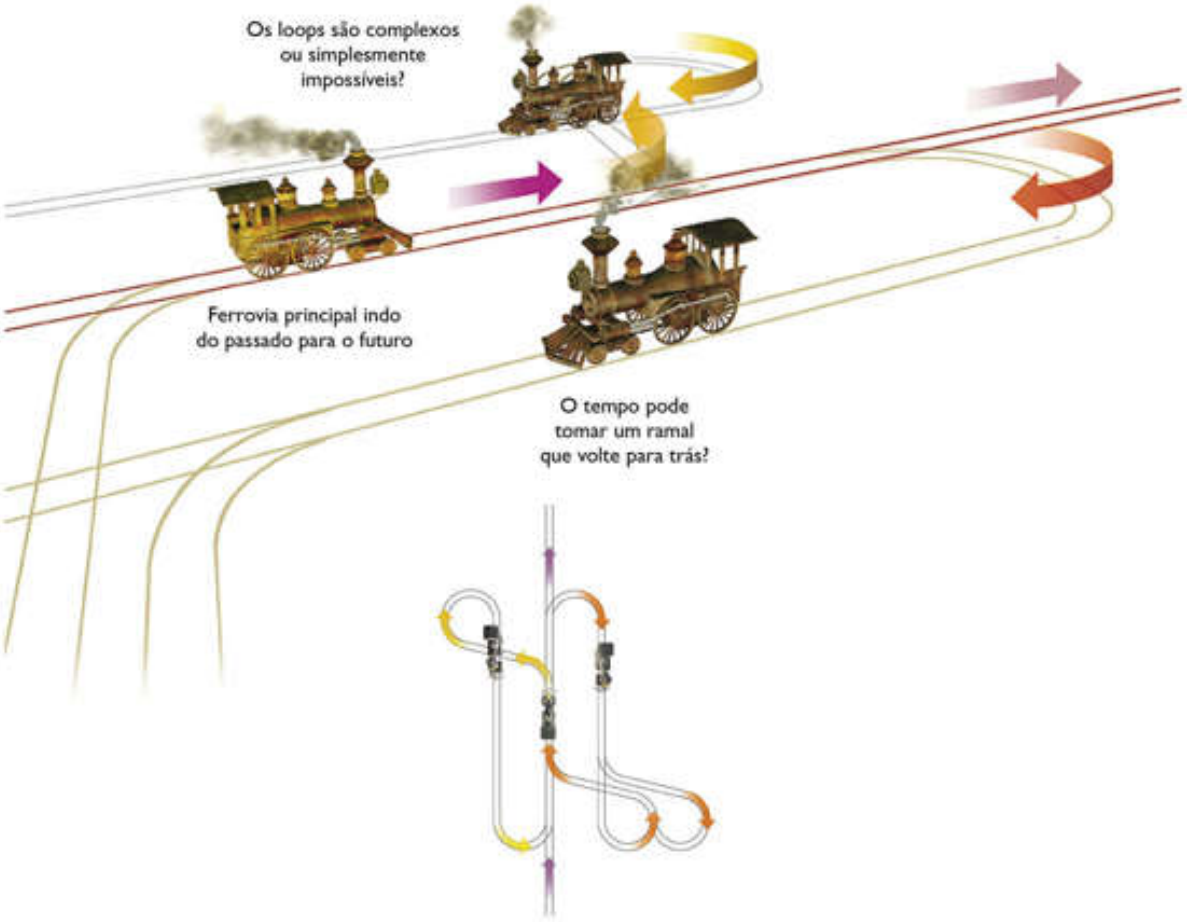
IMAGEM **G**.
Albert Einstein™

CAPÍTULO 2

A FORMA DO TEMPO

A relatividade geral de Einstein dá forma ao tempo.
Como conciliar isso com a teoria quântica.





(FIG. 2.1) MODELO DO TEMPO COMO UM TRILHO DE TREM

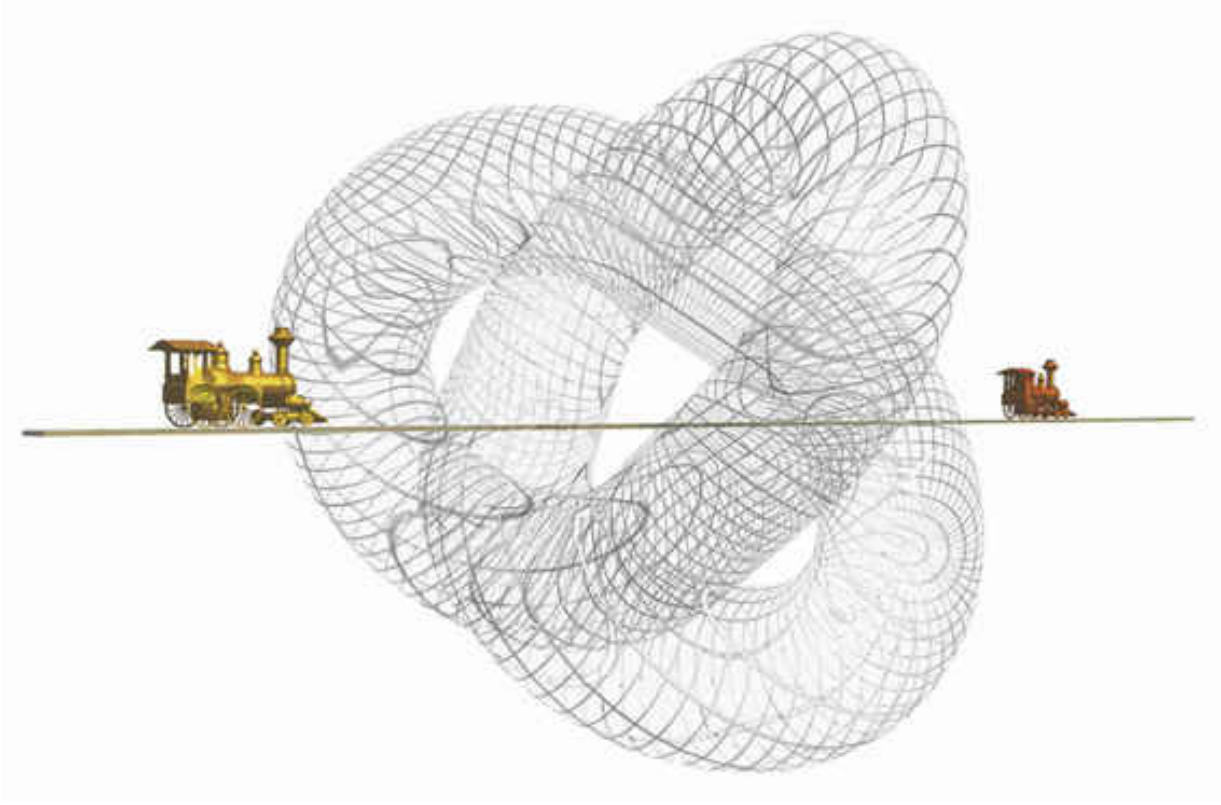
Mas será uma ferrovia que funciona apenas em uma direção — para o futuro — ou pode fazer a volta para retomar a linha principal em um entroncamento anterior?

O QUE É o tempo? É um rio sempre a correr, que leva embora todos os nossos sonhos, como diz um antigo hino inglês? Ou será uma linha ferroviária? Talvez ele tenha voltas e ramais, de modo que possamos avançar e mesmo assim regressar a uma estação anterior na linha (Figura 2.1).

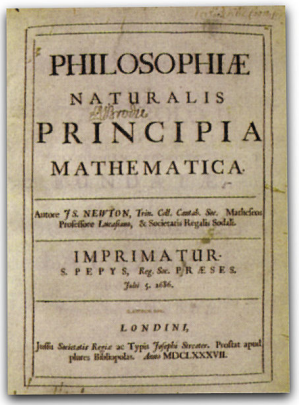
Charles Lamb, escritor do século XIX, afirmou: "Nada me deixa mais perplexo do que o tempo e o espaço. E contudo nada me inquieta *menos* do que o tempo e o espaço, pois nunca penso a respeito deles." A maioria de nós não se preocupa com o tempo e o espaço na maior parte do tempo, seja

ele o que for, mas todos nos perguntamos de vez em quando o que é o tempo, como começou e aonde está nos conduzindo.

Qualquer teoria científica sólida, seja do tempo, seja de outro conceito, deve, na minha opinião, se basear na filosofia da ciência mais efetiva de todas: a abordagem positivista proposta por Karl Popper e outros. Segundo esse modo de pensar, uma teoria científica é um modelo matemático que descreve e codifica as observações que fazemos. Uma boa teoria descreverá uma ampla gama de fenômenos com base em alguns postulados simples e fará previsões definidas passíveis de serem testadas. Se as previsões estiverem de acordo com as observações, a teoria sobreviverá ao teste, ainda que jamais se possa provar que está correta. Por outro lado, se as observações divergirem das previsões, deveremos descartar ou modificar a teoria. (Ao menos, é o que deveria acontecer. Na prática, as pessoas muitas vezes questionam a precisão das observações e a confiabilidade e o caráter moral de quem fez as observações.) Se assumimos a postura positivista, como no meu caso, não é possível dizer o que o tempo é de fato. Só o que podemos fazer é descrever o que se revelou ser um modelo matemático muito bom para o tempo e dizer quais previsões ele faz.



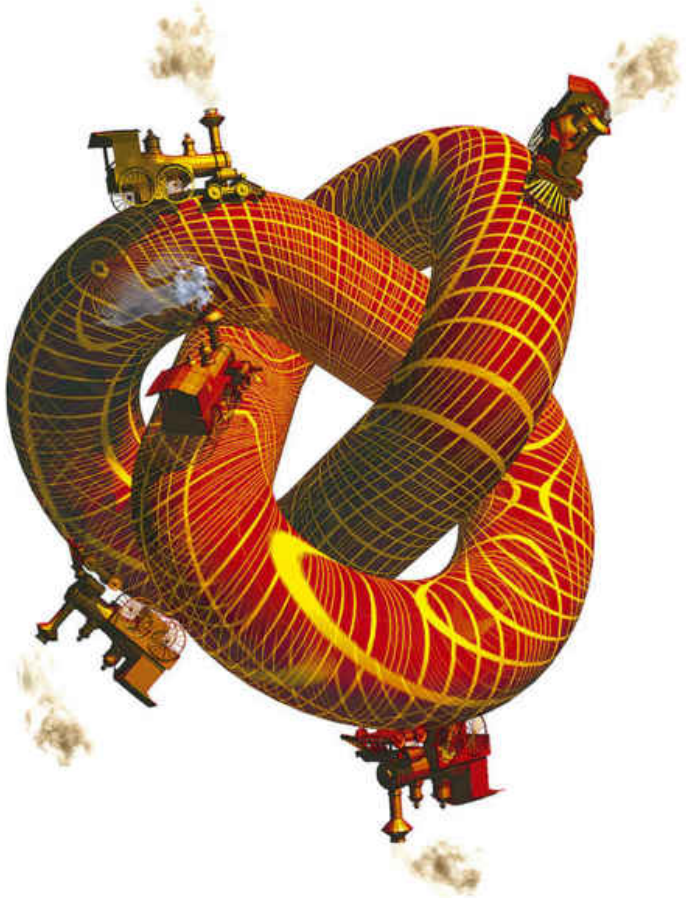
(FIG. 2.2)
O tempo de Newton era separado do espaço, como se fosse uma linha ferroviária se estendendo ao infinito em ambas as direções.


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA
Autore Is. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.
IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.
LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Isaac Newton publicou seu modelo matemático do tempo e do espaço há mais de trezentos anos.

Isaac Newton nos forneceu o primeiro modelo matemático para o tempo e o espaço em seu *Principia Mathematica*, publicado em 1687. Newton ocupou a cadeira lucasiana em Cambridge, hoje ocupada por mim, embora na época ela não funcionasse a eletricidade. Em seu modelo, o

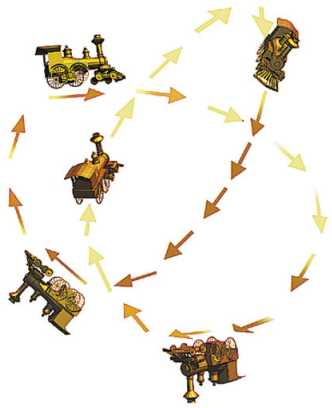
tempo e o espaço eram um fundo no qual os eventos ocorriam, mas que não era afetado por eles. O tempo existia separado do espaço e era tido como uma linha única, ou uma linha ferroviária, seguindo infinitamente em ambas as direções (Figura 2.2). O próprio tempo era considerado eterno, no sentido de que sempre existira e sempre continuaria a existir. No entanto, a maioria das pessoas achava que o universo físico fora criado mais ou menos em seu estado atual apenas alguns milhares de anos antes. Isso preocupava pensadores como o filósofo alemão Immanuel Kant. Se o universo de fato fora criado, por que existira uma espera infinita antes da criação? Por outro lado, se o universo existia desde sempre, por que tudo que ia acontecer já não havia acontecido, significando que a história estava terminada? E, em particular, por que o universo não atingira um equilíbrio térmico, com todas as coisas em uma mesma temperatura?

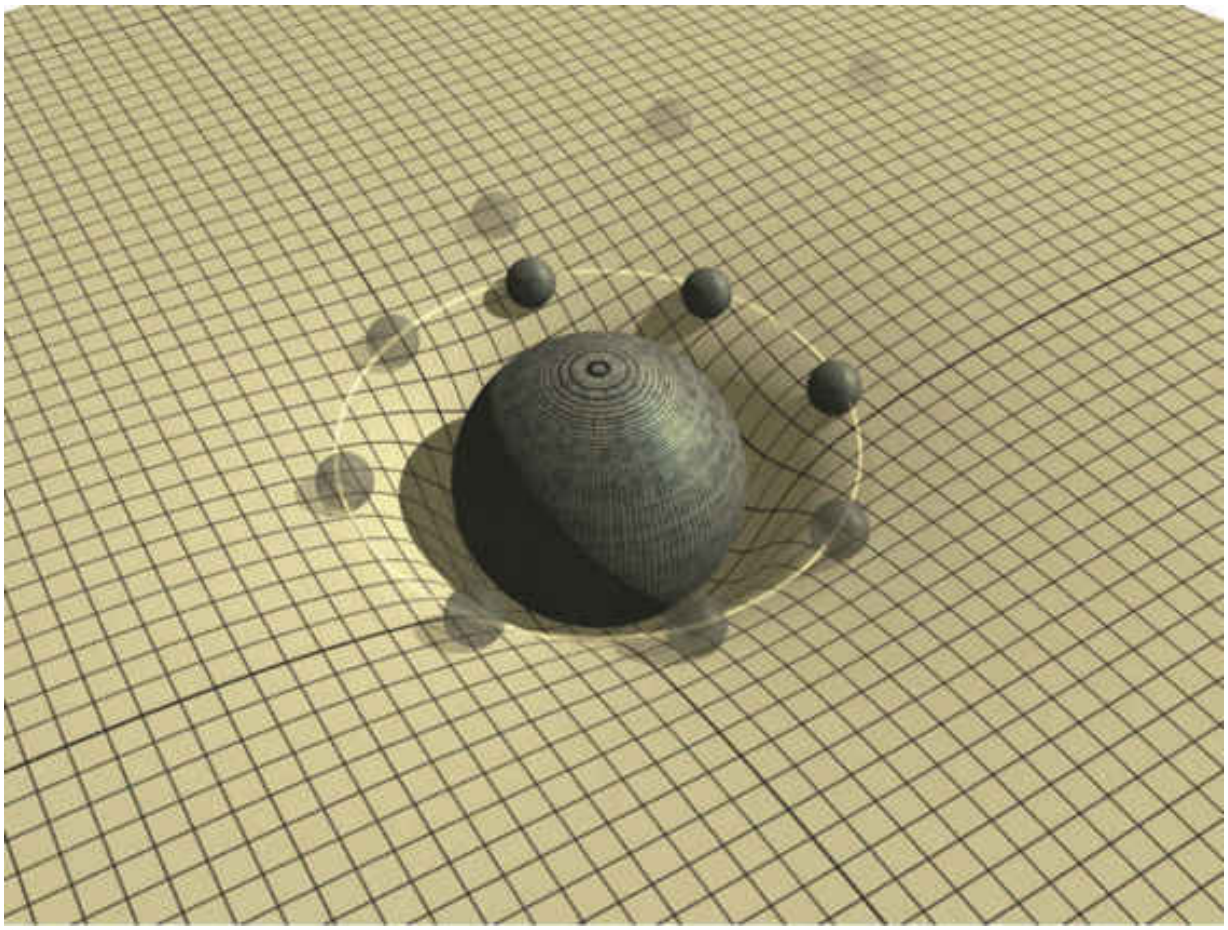


(FIG. 2.3) A FORMA E A DIREÇÃO DO TEMPO

A teoria da relatividade de Einstein, que condiz com grande número de experimentos, mostra que o tempo e o espaço estão inextricavelmente interconectados.

Não podemos curvar o espaço sem afetar também o tempo. Assim, o tempo tem forma. Porém, parece ter também uma direção de mão única, como as locomotivas na ilustração acima.





(FIG. 2.4)
A ANALOGIA DO LENÇOL DE BORRACHA
A grande bola no centro representa um corpo maciço como uma estrela.

Seu peso curva o lençol perto dela. As esferas menores rolando no lençol são desviadas por essa curvatura e contornam a grande bola, da mesma forma que os planetas no campo gravitacional de uma estrela podem orbitá-la.

Kant chamou esse problema de "antinomia da razão pura", pois lhe pareceu ser uma contradição lógica — e não tinha solução. Mas a contradição existia apenas no contexto do modelo matemático newtoniano, em que o tempo era uma linha infinita, independentemente do que estivesse acontecendo no universo. Porém, como vimos no Capítulo 1, um modelo matemático completamente novo foi proposto por Einstein em 1915: a teoria da relatividade geral. Nos anos subsequentes ao artigo de Einstein, acrescentamos alguns enfeites a essa teoria, mas nosso modelo de tempo e espaço continua baseado no que Einstein propôs. Este e os próximos capítulos descreverão como nossas ideias se desenvolveram nos

anos posteriores ao revolucionário artigo de Einstein. É uma história de sucesso sobre o trabalho de um grande número de pessoas, e tenho orgulho de ter dado minha pequena contribuição.

A relatividade geral combina a dimensão do tempo com as três dimensões do espaço para formar o que chamamos de espaço-tempo (ver Figura 2.3). A teoria incorpora o efeito da gravidade ao afirmar que a distribuição de matéria e energia no universo curva e deforma o espaço-tempo e por isso ele não é plano. Objetos nesse espaço-tempo tentam se deslocar em linha reta, mas, como o espaço é curvo, suas trajetórias parecem distorcidas. Eles se movem como que afetados por um campo gravitacional.



Santo Agostinho, filósofo do século V que afirmava que o tempo não existia antes do início do mundo.

Página de De Civitate Dei*, século XII. Biblioteca Laurenziana, Florença.*

Numa analogia grosseira, que não deve ser interpretada de forma muito literal, imaginemos um lençol de borracha. Podemos pôr uma bola grande sobre o lençol para representar o Sol. O peso da bola exercerá uma compressão no lençol e fará com que ele se curve próximo ao Sol. Se jogarmos pequenas esferas de rolimã sobre o lençol, elas não passarão

rolando diretamente para o outro lado, mas irão convergir em torno do peso maior, como planetas orbitando o Sol (Figura 2.4).

A analogia é incompleta, pois nela apenas uma seção bidimensional do espaço (a superfície do lençol de borracha) é curva, e o tempo permanece imperturbado, como na teoria newtoniana. Entretanto, na teoria da relatividade, que condiz com um grande número de experimentações, o tempo e o espaço estão inextricavelmente enredados. Não se pode curvar o espaço sem afetar também o tempo. Logo, o tempo tem forma. Curvando o espaço e o tempo, a relatividade geral faz com que deixem de ser um fundo passivo no qual os eventos acontecem para se transformarem em participantes ativos, dinâmicos, dos acontecimentos. Na teoria newtoniana, em que o tempo existia independentemente de qualquer outra coisa, poderíamos nos perguntar: o que Deus fazia antes de criar o universo? Como afirmou Santo Agostinho, não se devem fazer piadas a respeito disso, como foi o caso de um homem que disse: "Ele estava preparando o Inferno para quem faz perguntas demais." Essa é uma questão séria sobre a qual as pessoas refletiram ao longo das eras. Segundo Santo Agostinho, antes de ter criado o céu e a terra, Deus não fez coisa alguma. E, na verdade, isso está bem próximo das ideias modernas.

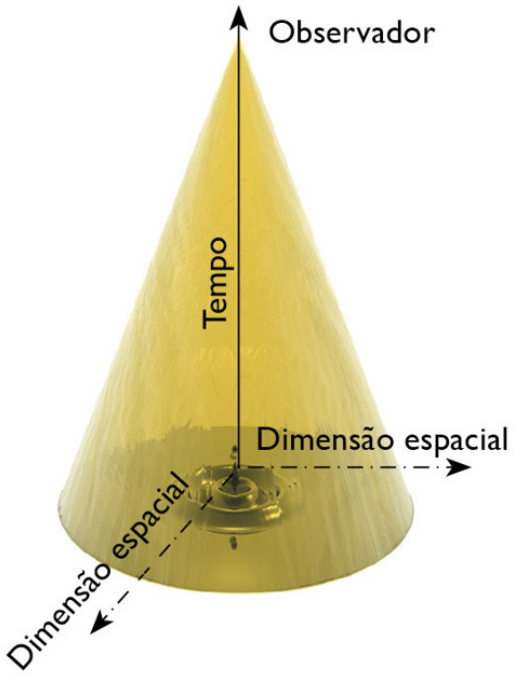
Na relatividade geral, por outro lado, o tempo e o espaço não existem independentemente do universo ou um do outro. Eles são definidos por medições no interior do universo, como o número de vibrações do cristal de quartzo em um relógio ou o comprimento de uma régua. É bem concebível que o tempo definido dessa maneira, dentro do universo, tenha um valor mínimo ou máximo — em outras palavras, um início ou um fim. Não faria sentido perguntar o que aconteceu antes do início ou o que acontecerá após o fim, pois tais tempos não seriam definidos.

Era sem dúvida importante decidir se o modelo matemático da relatividade geral *previa* que o universo — e o próprio tempo — devia ter um início ou um fim. O preconceito generalizado entre os físicos teóricos, inclusive Einstein, sustentava que o tempo devia ser infinito em ambas as direções. Caso contrário, havia perguntas embaraçosas sobre a criação do universo, que pareciam fora do domínio da ciência. Eram conhecidas

soluções das equações de Einstein em que o tempo tinha um início ou um fim, mas elas eram todas muito especiais, com grande dose de simetria. Pensava-se que em um corpo real, cedendo sob o peso da própria gravidade, a pressão ou as velocidades laterais impediriam a matéria de entrar em colapso num mesmo ponto, no qual a densidade seria infinita. Do mesmo modo, se acompanhássemos a expansão do universo de volta no tempo, verificaríamos que a matéria do universo não emergia toda ela de um ponto de densidade infinita. Um ponto de densidade infinita como esse foi chamado de singularidade e seria um início ou um fim do tempo.

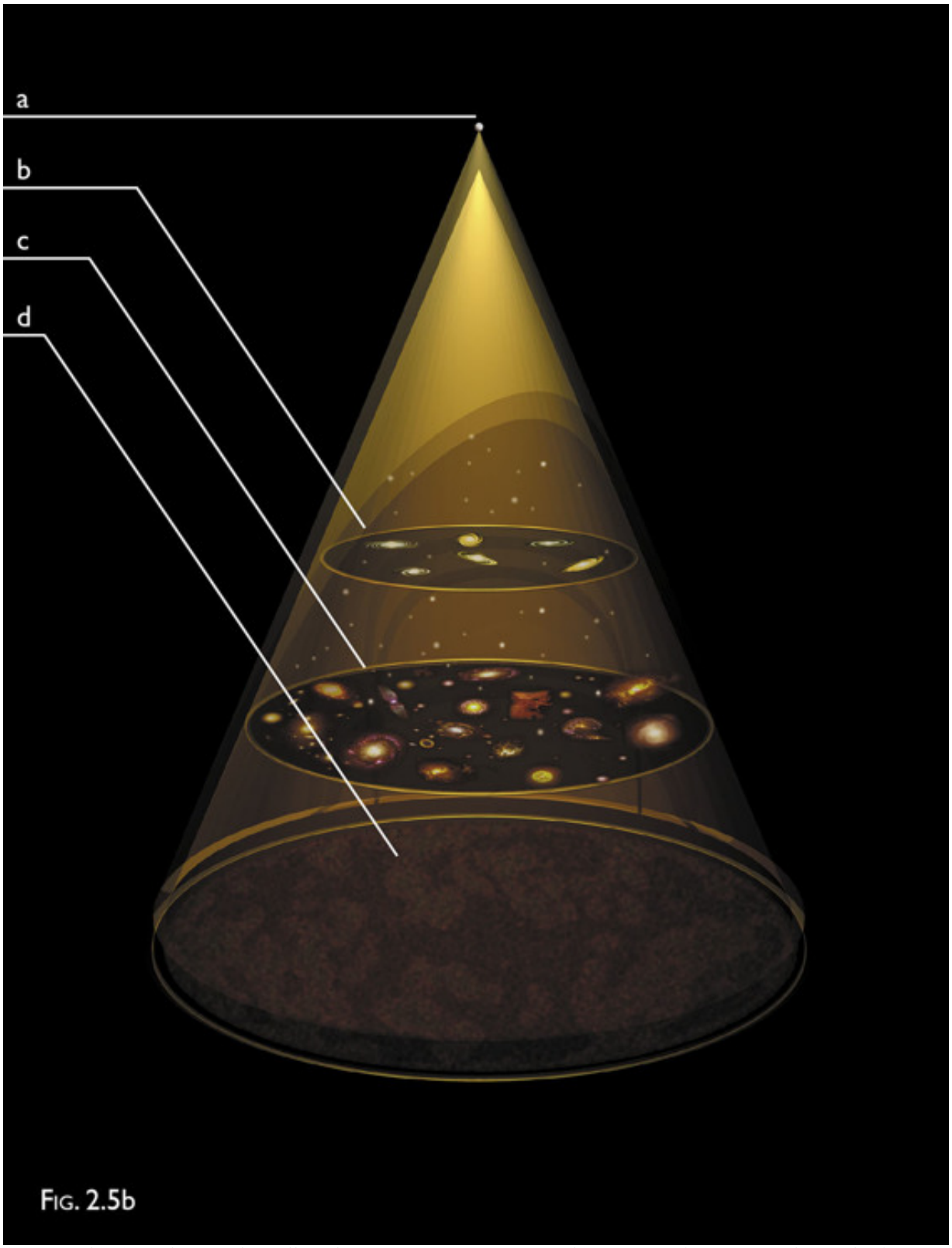
Em 1963, dois cientistas russos, Evgenii Lifshitz e Isaac Khalatnikov, alegaram ter provado que todas as soluções das equações de Einstein com uma singularidade tinham uma combinação especial de matéria e velocidades. As chances de que a solução representando o universo tivesse essa combinação especial eram praticamente nulas. Quase todas as soluções capazes de representar o universo evitariam ter uma singularidade de densidade infinita. Antes da era durante a qual o universo se expandia, devia ter havido uma fase de contração prévia durante a qual toda a matéria desabava junta, mas escapava de colidir entre si, voltando a se afastar para chegar à atual fase de expansão. Se esse fosse o caso, o tempo continuaria a avançar para sempre, do passado infinito ao futuro infinito.

Nem todo mundo ficou convencido com os argumentos de Lifshitz e Khalatnikov. Roger Penrose e eu, de nossa parte, adotamos uma abordagem diferente, baseada não em um estudo detalhado de soluções, mas na estrutura global do espaço-tempo. Na relatividade geral, o espaço-tempo é curvado não apenas pelos objetos maciços nele presentes, mas também pela energia existente. A energia é sempre positiva e por isso dá ao espaço-tempo uma curvatura que deforma as trajetórias dos raios luminosos em direção uns aos outros.



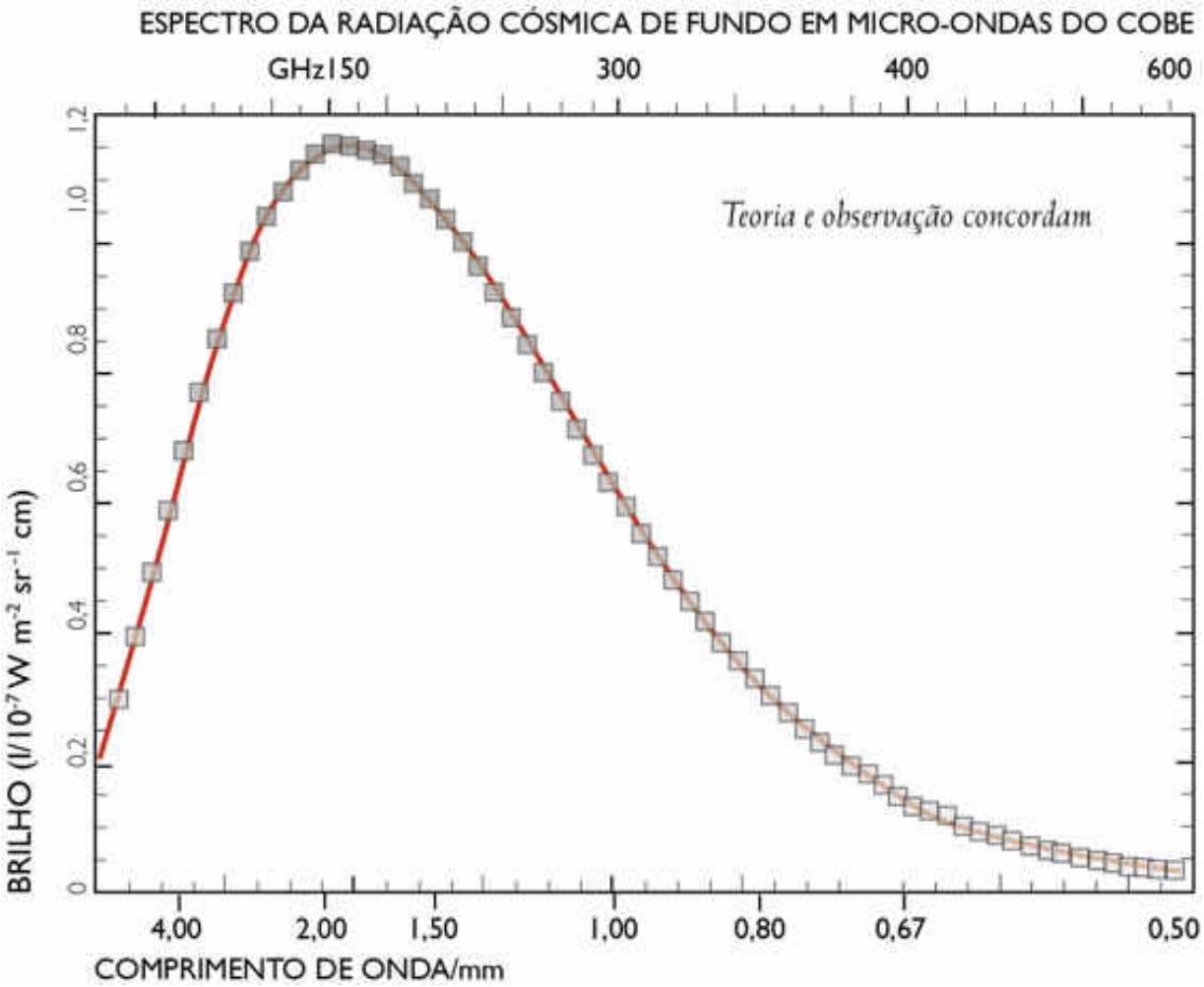
(FIG. 2.5a e 2.5b) NOSSO CONE DE LUZ DO PASSADO

Quando olhamos para galáxias distantes, estamos olhando para o universo em uma época anterior, pois a luz viaja a uma velocidade finita. Se representarmos o tempo pela direção vertical e representarmos duas das três direções espaciais horizontalmente, a luz que hoje nos chega no ponto de cima viajou até nós em um cone.



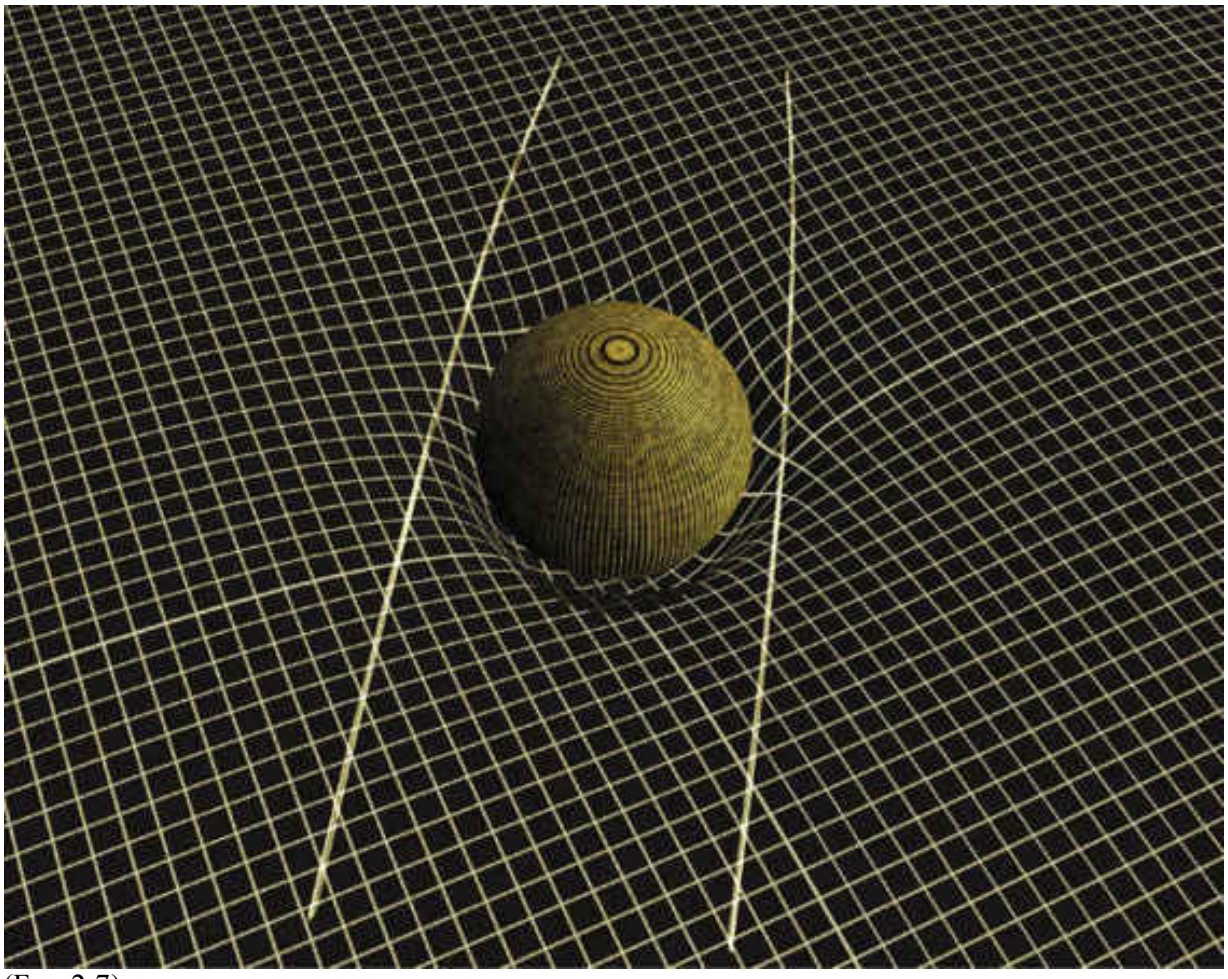
(FIG. 2.5b) (a) Observador olhando para trás no tempo. (b) Aparência recente das galáxias. (c) Aparência das galáxias há cinco bilhões de anos. (d) Radiação cósmica de fundo.

Agora, considere nosso cone de luz do passado (Figura 2.5), ou seja, as trajetórias através do espaço-tempo dos raios luminosos vindos de galáxias distantes que chegam até nós no tempo presente. Em um diagrama com o tempo representado para cima e o espaço para os lados, esse é um cone com seu vértice, ou ponta, virado para nós. À medida que avançamos rumo ao passado, descendo o cone a partir do vértice, vemos galáxias em épocas cada vez mais antigas. Como o universo se expande e antes tudo era muito mais próximo, conforme olhamos mais para trás vemos regiões de maior densidade de matéria. Observamos um tênue fundo de radiação em micro-ondas que se propaga até nós ao longo de nosso cone de luz do passado de uma época muito mais antiga, quando o universo era bem mais denso e quente do que é hoje. Sintonizando receptores para diferentes frequências de micro-ondas, podemos medir o espectro (a distribuição da potência arranjada segundo a frequência) dessa radiação. Encontramos um espectro que é característico da radiação de um corpo a uma temperatura de 2,7 graus acima do zero absoluto. Essa radiação em micro-ondas não é de grande utilidade para descongelar uma pizza, mas o fato de o espectro se ajustar com tamanha exatidão ao da radiação de um corpo com 2,7 graus nos informa que a radiação deve ter vindo de regiões que são opacas para as micro-ondas (Figura 2.6).



(FIG. 2.6)
MEDIDA DO ESPECTRO DO FUNDO DE MICRO-ONDAS
O espectro — a distribuição da intensidade em função da frequência — da radiação cósmica de fundo em micro-ondas é característico de um corpo aquecido. Para que a radiação esteja em equilíbrio térmico, a matéria deve ter se espalhado em diversos momentos. Isso indica que deve ter havido matéria suficiente em nosso cone de luz do passado para levá-lo a se curvar.

Portanto, podemos concluir que nosso cone de luz do passado deve passar por certa quantidade de matéria à medida que o acompanhamos para trás. Essa quantidade de matéria é suficiente para curvar o espaço-tempo; assim os raios luminosos em nosso cone de luz do passado são curvados uns em direção aos outros (Figura 2.7).



(FIG. 2.7) CURVANDO O ESPAÇO-TEMPO

Como a gravidade exerce atração, a matéria sempre deforma o espaço-tempo de modo que os raios luminosos se curvem na direção um do outro.

Conforme voltamos no tempo, as seções transversais de nosso cone de luz do passado atingem um tamanho máximo e começam a diminuir outra vez. Nosso passado tem a forma de uma pera (Figura 2.8).

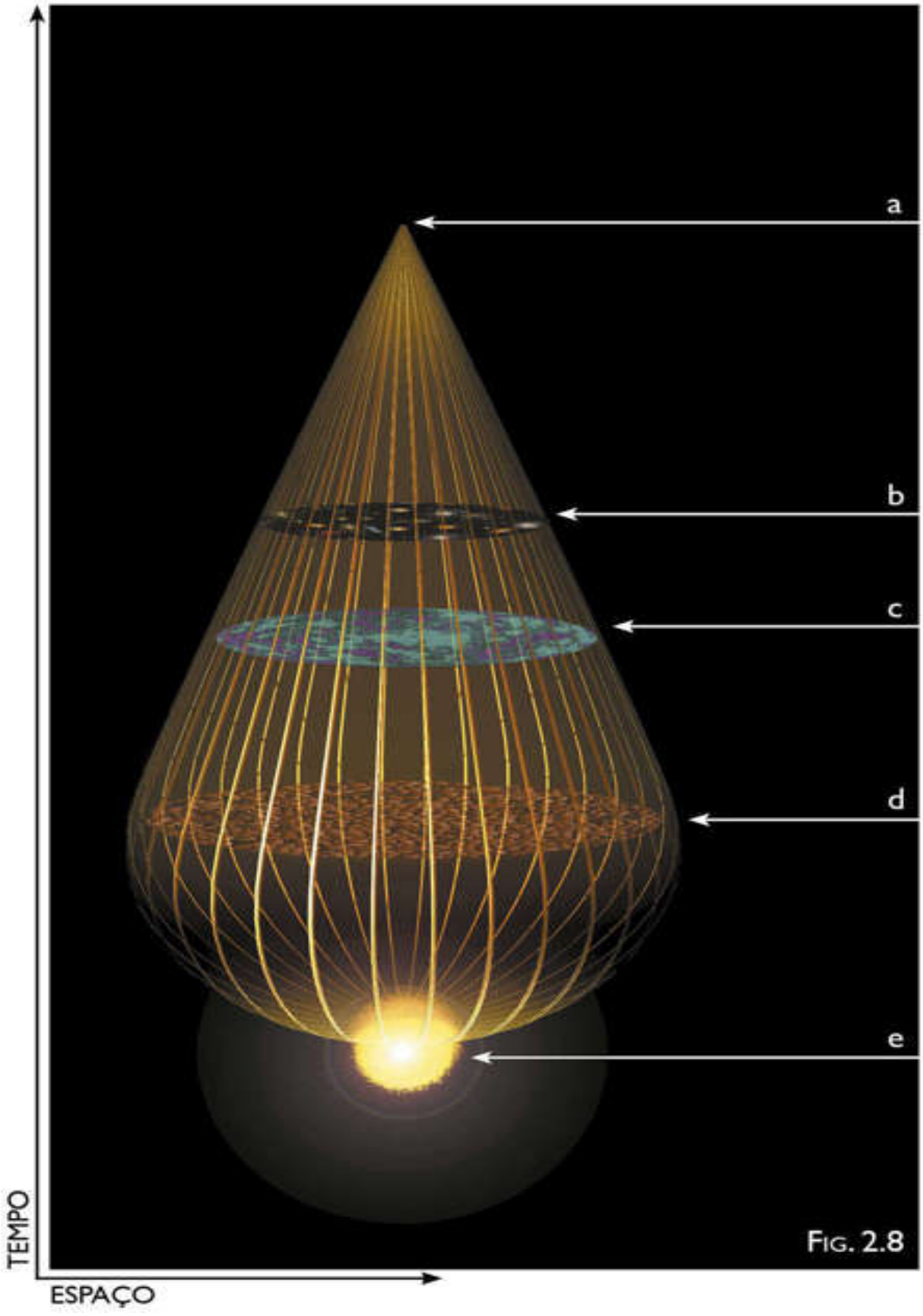


FIG. 2.8

(FIG. 2.8) O TEMPO TEM FORMATO DE PERA

Se seguirmos nosso cone de luz do passado para trás no tempo, ele voltará a ser curvado pela matéria no universo primitivo. Todo o universo que observamos está contido dentro de uma região cujo contorno encolhe a zero no Big Bang. Isso seria uma singularidade, lugar onde a densidade da matéria seria infinita e a relatividade geral clássica deixaria de vigorar.

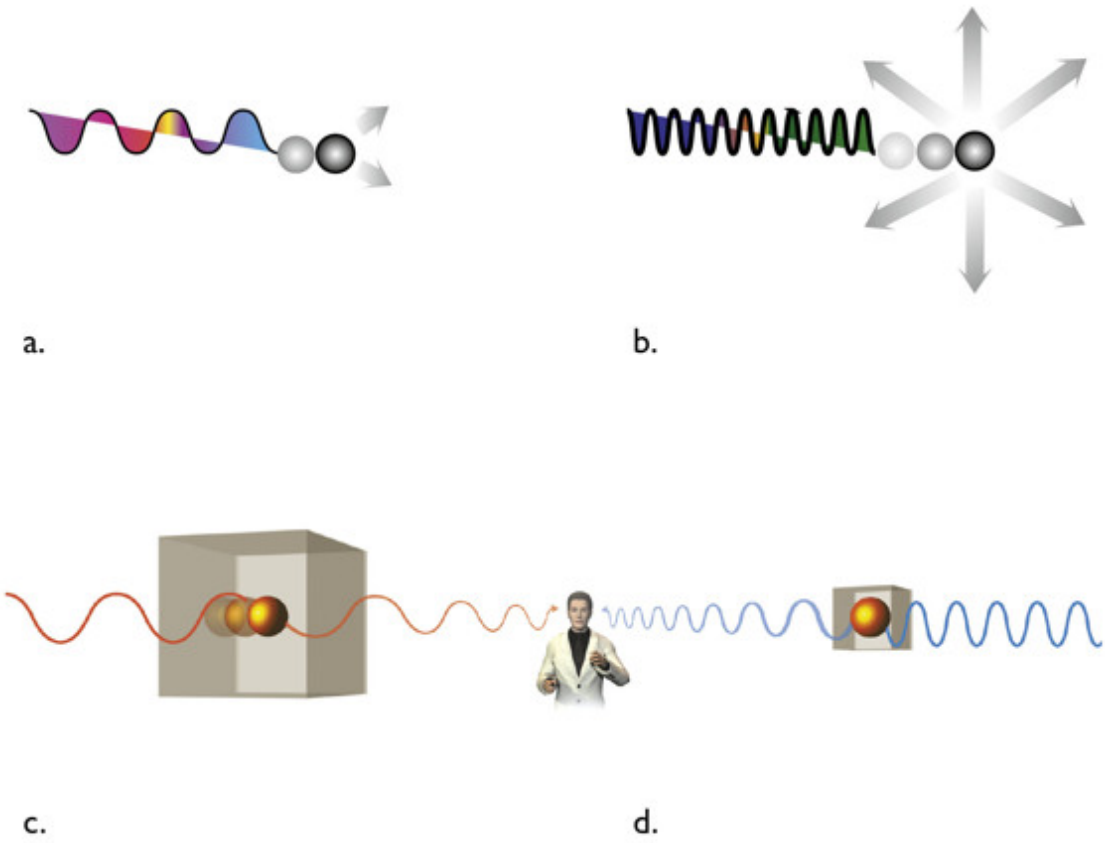
(a) O observador olhando para trás no tempo neste momento. (b) Galáxias cinco bilhões de anos atrás. (c) Fundo de micro-ondas. (d) Densidade da matéria fazendo o cone de luz se curvar. (e) Singularidade do Big Bang.

Conforme acompanhamos nosso cone de luz do passado ainda mais para trás, a densidade de energia positiva da matéria faz com que os raios luminosos se curvem uns na direção dos outros com força ainda maior. A seção transversal do cone de luz encolherá para tamanho zero em um tempo finito. Isso significa que toda a matéria dentro de nosso cone de luz do passado fica aprisionada em uma região cujo contorno encolhe a zero. Portanto, não constitui grande surpresa que Penrose e eu pudéssemos provar que, no modelo matemático da relatividade geral, o tempo deve ter tido início no que é chamado de Big Bang. Argumentos semelhantes mostram que o tempo teria um fim quando as estrelas ou galáxias entrarem em colapso sob o peso da própria gravidade para formar buracos negros. Evitamos a antinomia da razão pura de Kant deixando de lado sua pressuposição implícita de que o tempo tinha um significado independente do universo. Nosso artigo, provando que o tempo teve um início, ganhou o segundo prêmio no concurso patrocinado pela Gravity Research Foundation em 1968, e Roger e eu dividimos a nababesca quantia de 300 dólares. Não creio que outro ensaio premiado naquele ano tenha mostrado valor tão duradouro.

Houve diversas reações a nosso trabalho. Ele incomodou muitos físicos, mas deleitou os líderes religiosos que acreditavam num ato da criação, pois ali estava a comprovação científica. Nesse meio-tempo, Lifshitz e Khalatnikov ficaram numa situação embaraçosa. Eles não podiam refutar os teoremas matemáticos demonstrados por nós, mas, estando sob o sistema soviético, não podiam admitir que tinham se enganado e que a ciência ocidental estava com a razão. Entretanto, salvaram a situação encontrando uma família de soluções mais geral com uma singularidade,

que não eram especiais no mesmo sentido em que haviam sido suas soluções anteriores. Isso possibilitou reivindicarem as singularidades e o início ou fim do tempo como sendo uma descoberta soviética.

O PRINCÍPIO DA INCERTEZA



(a) Comprimentos de onda de baixa frequência perturbam menos a velocidade da partícula. (b) Comprimentos de onda de alta frequência perturbam mais a velocidade da partícula. (c) Quanto mais longo for o comprimento de onda usado para observar uma partícula, maior a incerteza de sua posição. (d) Quanto mais curto for o comprimento de onda usado para observar uma partícula, maior a certeza de sua posição.

Um passo importante para a descoberta da teoria quântica foi a sugestão de Max Planck em 1900 de que a luz sempre vem em pequenos pacotes chamados quanta. Mas, ainda que a hipótese quântica de Planck explicasse claramente as observações da taxa de radiação dos corpos quentes, o pleno alcance de suas implicações só foi percebido em meados dos anos 1920, quando o físico alemão Werner Heisenberg formulou seu famoso princípio da incerteza. Ele notou que a hipótese de Planck sugere que, quanto mais precisamente tentamos medir a posição de uma partícula, menor a precisão com que podemos medir sua velocidade, e vice-versa.

Mais exatamente, ele mostrou que a incerteza na posição de uma partícula vezes a incerteza em seu momento linear deve sempre ser maior do que a constante de Planck, uma grandeza relacionada de perto com o conteúdo de energia de um quantum de luz.



A maioria dos físicos ainda mostrava uma antipatia instintiva pela ideia do tempo com um início ou fim. Por isso observavam que seria de se esperar que o modelo matemático talvez não fosse uma boa descrição do espaço-tempo perto de uma singularidade. O motivo é que a relatividade geral, que descreve a força gravitacional, é uma teoria clássica — como foi comentado no Capítulo 1 — e não incorpora a incerteza da teoria quântica que governa todas as demais forças conhecidas por nós. Essa incoerência não faz diferença na maior parte do universo na maior parte do tempo, pois a escala em que o espaço-tempo é curvado é muito grande e a escala em que os efeitos quânticos são importantes é muito pequena. Contudo, perto de uma singularidade, as duas escalas seriam comparáveis e os efeitos gravitacionais quânticos seriam importantes. Assim, o que os teoremas de singularidade desenvolvidos por Penrose e por mim de fato mostraram é que nossa clássica região do espaço-tempo está ligada ao passado, e possivelmente ao futuro, pelas regiões em que a gravitação quântica é importante. Para compreender a origem e o destino do universo,

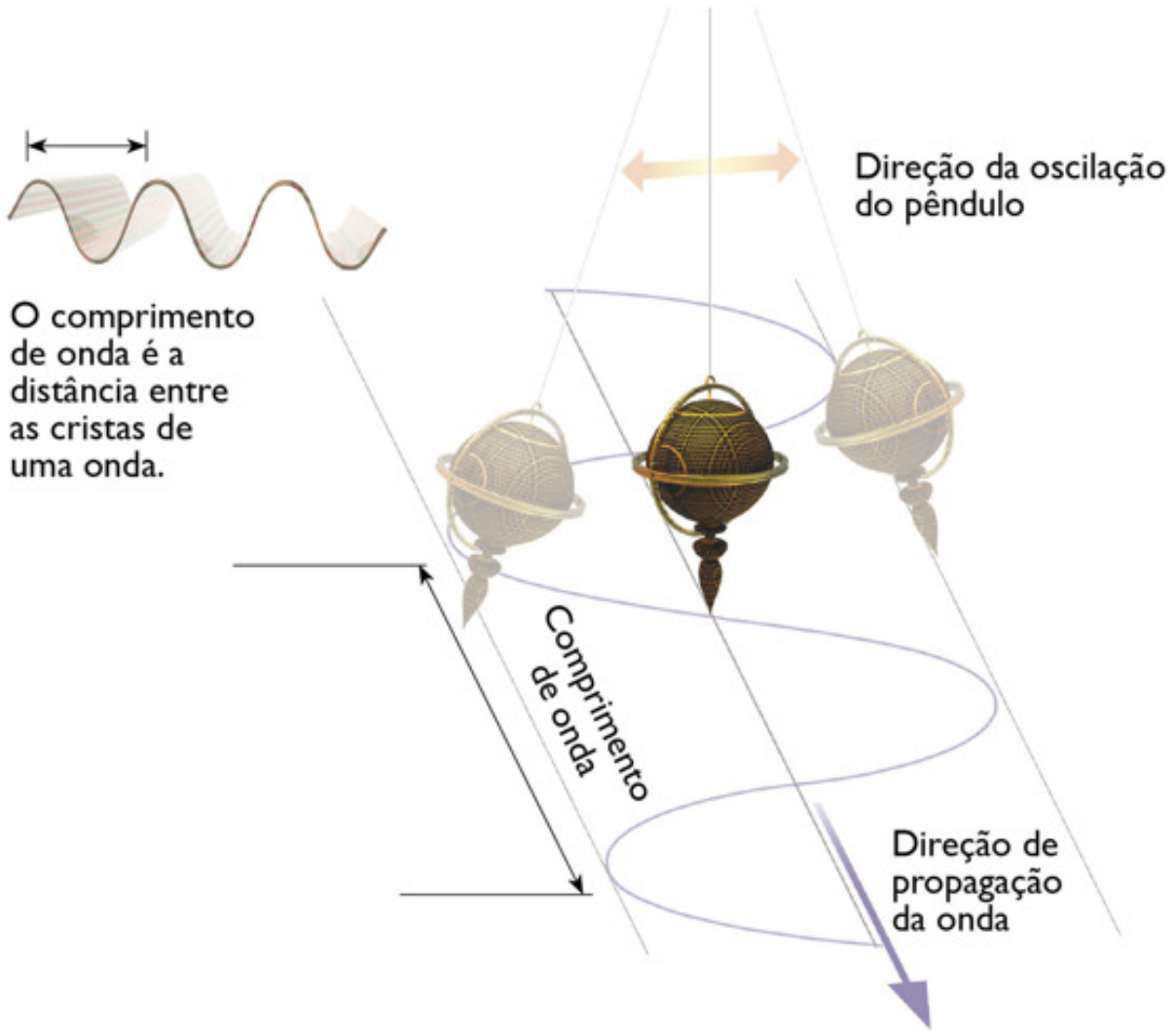
precisamos de uma teoria da gravitação quântica, e esse será o tema da maior parte deste livro.

O CAMPO DE MAXWELL

Em 1865, o físico britânico James Clerk Maxwell combinou todas as leis conhecidas da eletricidade e do magnetismo. A teoria de Maxwell se baseia na existência de "campos" que transmitem ações de um lugar para outro. Ele percebeu que os campos que transmitem perturbações elétricas e magnéticas são entidades dinâmicas: eles podem oscilar e se mover pelo espaço.

A síntese do eletromagnetismo feita por Maxwell pode ser condensada em duas equações que determinam a dinâmica desses campos. Ele próprio derivou a primeira grande conclusão dessas equações: a de que as ondas eletromagnéticas de todas as frequências viajam pelo espaço a uma mesma velocidade fixa — a velocidade da luz.

Teorias quânticas de sistemas como átomos, com um número finito de partículas, foram formuladas na década de 1920 por Heisenberg, Schrödinger e Dirac. (Dirac foi outro ocupante anterior da minha cadeira em Cambridge, mas ela ainda não era motorizada.) Entretanto, as pessoas encontravam dificuldades quando tentavam estender ideias quânticas ao campo de Maxwell, que descreve a eletricidade, o magnetismo e a luz.

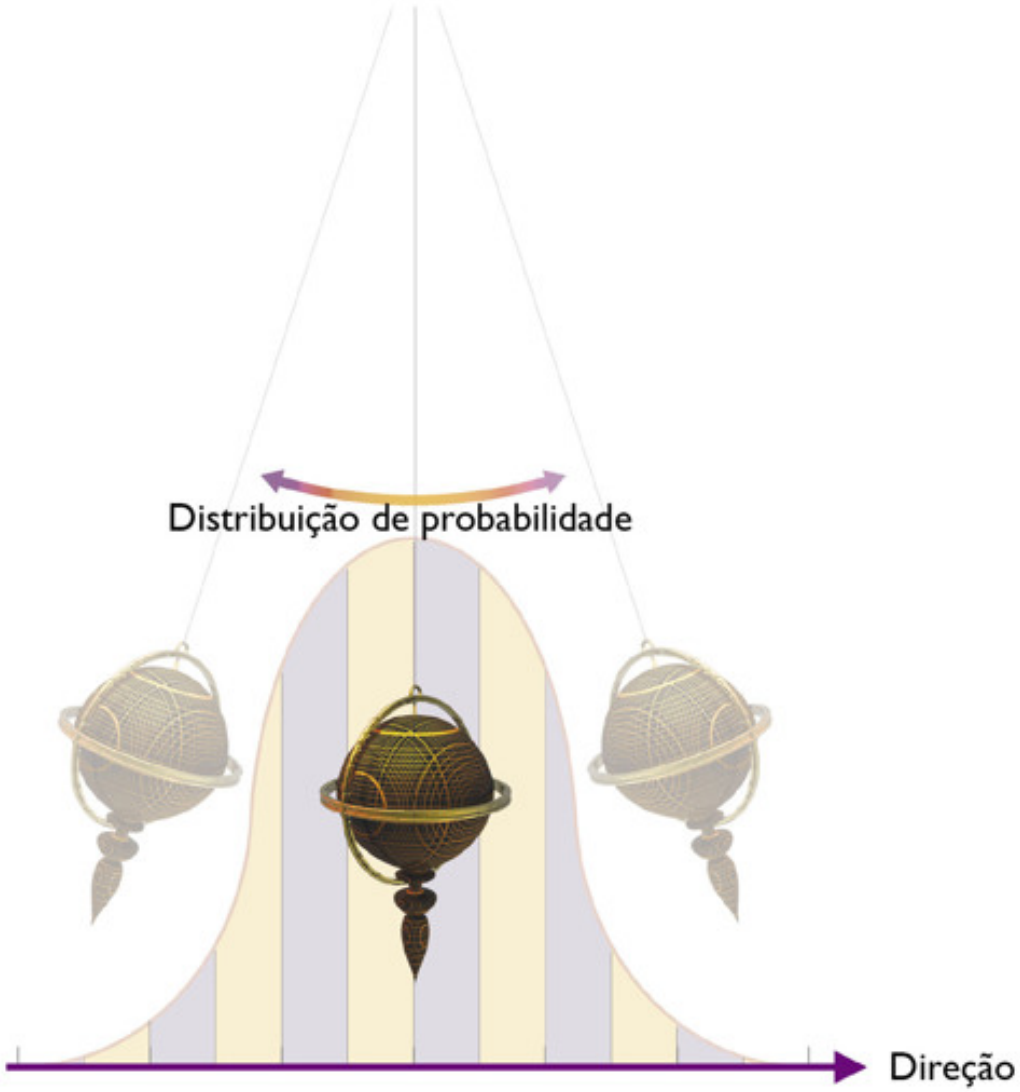


(FIG. 2.9)
PROPAGAÇÃO DE ONDA COM PÊNDULO OSCILANDO
A radiação eletromagnética viaja pelo espaço como uma onda, com seus campos elétrico e magnético oscilando como um pêndulo em direções transversais em relação à direção de movimento da onda. A radiação pode ser composta de campos de diferentes comprimentos de onda.

Podemos pensar no campo de Maxwell como um composto de ondas com diferentes comprimentos (a distância entre uma crista de onda e a seguinte). Numa onda, o campo oscilará de um valor ao outro como um pêndulo (Figura 2.9).

De acordo com a teoria quântica, o estado fundamental, ou estado de energia mais baixa, de um pêndulo não se resume a permanecer no ponto de menor energia, apontando diretamente para baixo. Isso exigiria tanto uma posição definida quanto uma velocidade definida, zero. Seria uma violação do princípio de incerteza, que não admite a medição precisa da posição e da velocidade ao mesmo tempo. A incerteza da posição multiplicada pela incerteza do momento linear deve ser maior do que uma quantidade determinada, conhecida como constante de Planck — número que é comprido demais para escrever, de modo que usamos um símbolo para ele: $\hbar$.

Assim, o estado fundamental ou estado de energia mais baixa de um pêndulo não tem energia nula, como seria de se esperar. Em vez disso, mesmo em seu estado fundamental um pêndulo ou qualquer sistema oscilante deve ter uma quantidade mínima do que chamamos de flutuações de ponto zero. Isso significa que o pêndulo não necessariamente estará apontando direto para baixo, mas terá também uma probabilidade de ser encontrado a um pequeno ângulo em relação à vertical (Figura 2.10). De modo similar, mesmo no vácuo ou no estado de energia mais baixa, as ondas no campo de Maxwell não serão exatamente nulas, mas poderão apresentar pequenas medidas. Quanto mais alta a frequência (o número de oscilações por minuto) do pêndulo ou da onda, mais elevada a energia do estado fundamental.



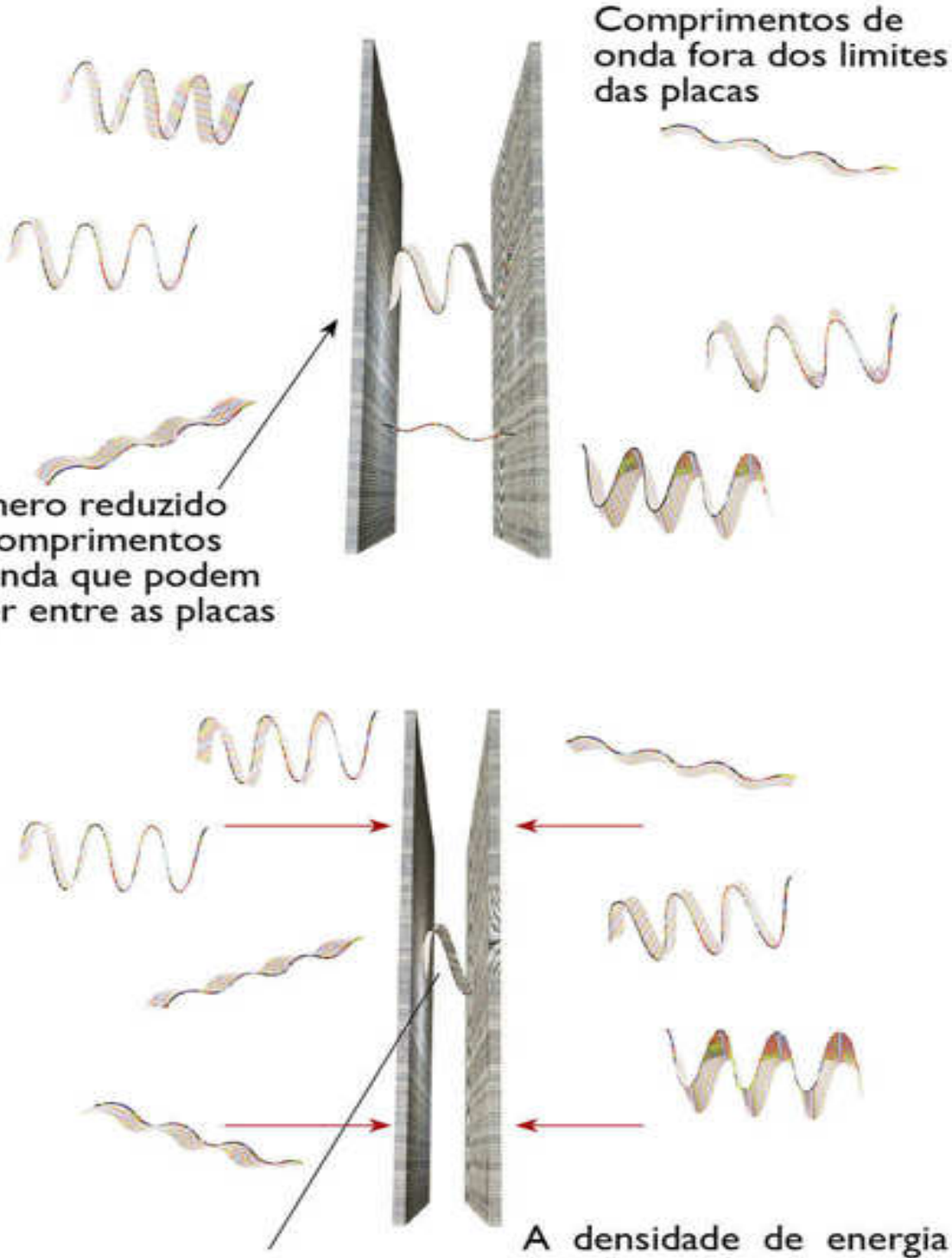
(FIG. 2.10)
PÊNDULO COM DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE
Segundo o princípio de Heisenberg, é impossível que um pêndulo aponte absolutamente para baixo, com velocidade zero. A teoria quântica na verdade prevê que, mesmo em seu estado de energia mais baixo, o pêndulo deve ter uma quantidade mínima de flutuações.

Isso significa que a posição do pêndulo será dada por uma distribuição de probabilidade. Em seu estado fundamental, a posição mais provável é apontando diretamente para baixo, mas há também a probabilidade de ele ser encontrado formando um pequeno ângulo com a vertical.

Cálculos das flutuações do estado fundamental nos campos de Maxwell e de elétrons tornavam infinitas a massa e a carga aparentes dos elétrons, ao contrário do que mostram as observações. Entretanto, na década de 1940, os físicos Richard Feynman, Julian Schwinger e Shin'ichiro Tomonaga desenvolveram um modo consistente de remover ou "subtrair"

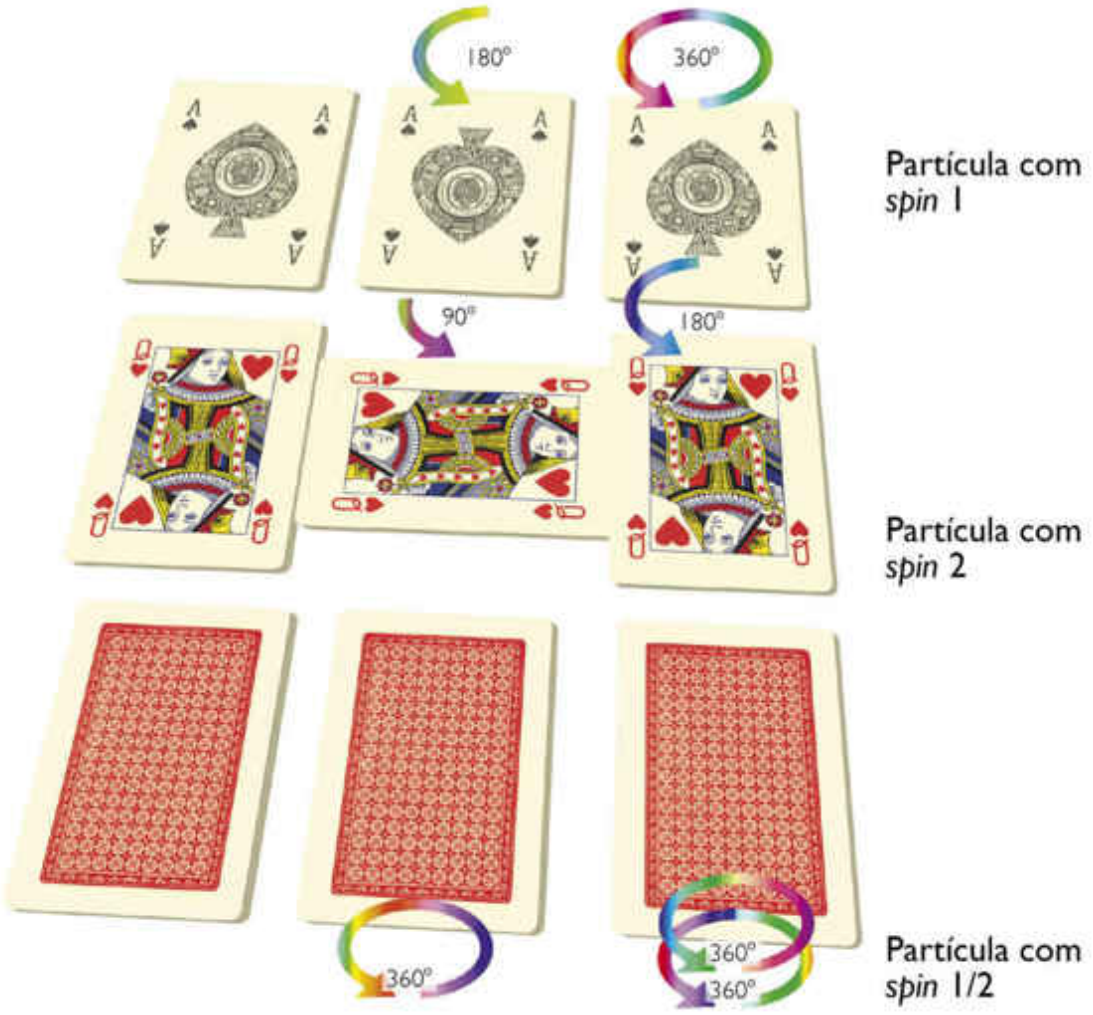
esses infinitos e lidar apenas com os valores finitos observados da massa e da carga. Mesmo assim, as flutuações do estado fundamental ainda causavam pequenos efeitos que podiam ser medidos e que concordavam bem com o experimento. Esquemas de subtração similares para remover infinitos funcionaram para o campo de Yang-Mills na teoria proposta por Chen Ning Yang e Robert Mills. A teoria de Yang-Mills é uma extensão da teoria de Maxwell que descreve interações em duas outras forças, chamadas de nuclear fraca e nuclear forte. Entretanto, as flutuações do estado fundamental apresentam um efeito muito mais sério numa teoria da gravitação quântica. Mais uma vez, cada comprimento de onda teria uma energia de estado fundamental. Como não existe limite para quão baixo o comprimento de onda do campo de Maxwell pode ser, há um número infinito de diferentes comprimentos de onda em qualquer região do espaço-tempo e uma quantidade infinita de energia de estado fundamental. Uma vez que a densidade da energia é, assim como a matéria, uma fonte de gravidade, essa densidade de energia infinita deve significar que há atração gravitacional suficiente no universo para enrolar o espaço-tempo em um único ponto, coisa que obviamente não aconteceu.

Poderíamos esperar resolver o problema dessa contradição aparente entre a observação e a teoria afirmando que as flutuações do estado fundamental não apresentam efeito gravitacional, mas isso não funcionaria. É possível detectar a energia das flutuações do estado fundamental por meio do efeito Casimir. Se colocamos um par de placas metálicas paralelas entre si e bem próximas, o efeito disso é a ligeira redução no número de comprimentos de onda que cabem entre elas em relação aos comprimentos de onda do lado de fora. Isso significa que a densidade da energia das flutuações do estado fundamental entre as placas, embora ainda infinita, é menor do que a densidade da energia exterior por um valor finito (Figura 2.11). Essa diferença na densidade da energia dá origem a uma força que pressiona as placas uma contra a outra, e essa força foi observada em experimentos. As forças são uma fonte de gravidade na relatividade geral, assim como a matéria, de modo que não seria coerente ignorar o efeito gravitacional dessa diferença de energia.


Comprimentos de onda fora dos limites das placas
Número reduzido de comprimentos de onda que podem caber entre as placas
A densidade de energia das flutuações de estado fundamental entre as placas é menor do que a densidade externa, fazendo as placas se atraírem.
A densidade de energia das flutuações de estado fundamental é maior no exterior das placas.

(FIG. 2.11)
EFEITO CASIMIR

A existência de flutuações de estado fundamental foi confirmada experimentalmente pelo efeito Casimir, uma leve força entre placas metálicas paralelas.

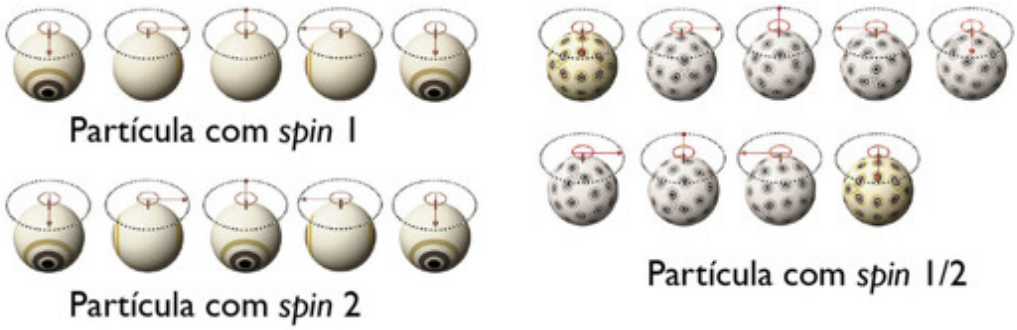


(FIG. 2.12) *SPIN*

Todas as partículas possuem uma propriedade chamada *spin*, que tem a ver com a aparência da partícula vista de diferentes direções. Podemos ilustrar isso com um baralho de cartas. Considere primeiro o ás de espadas. Ele parece ser o mesmo apenas se você o gira até obter uma revolução completa, de 360 graus. Desse modo, dizemos ter *spin* 1.

Por outro lado, a rainha de copas tem duas cabeças. Ela é, portanto, a mesma sob apenas meia revolução, de 180 graus. Dizemos que tem *spin* 2. Do mesmo modo, poderíamos imaginar objetos com spin 3 ou maior que pareceriam os mesmos sob frações menores de uma revolução.

Quanto mais elevado o *spin*, menor a fração de uma revolução completa necessária para fazer a partícula parecer a mesma. Mas o fato notável é que há partículas que parecem iguais apenas se as giramos por duas revoluções completas. Dizemos que tais partículas têm *spin* 1/2.



Outra solução possível pode ser a suposição de que havia uma constante cosmológica como a introduzida por Einstein numa tentativa de obter um modelo estático do universo. Se essa constante tivesse um valor negativo infinito, poderia anular de forma exata o valor positivo infinito das energias do estado fundamental no espaço livre, mas essa constante cosmológica parece muito *ad hoc* e teria de ser ajustada com uma precisão extraordinária.

NÚMEROS COMUNS

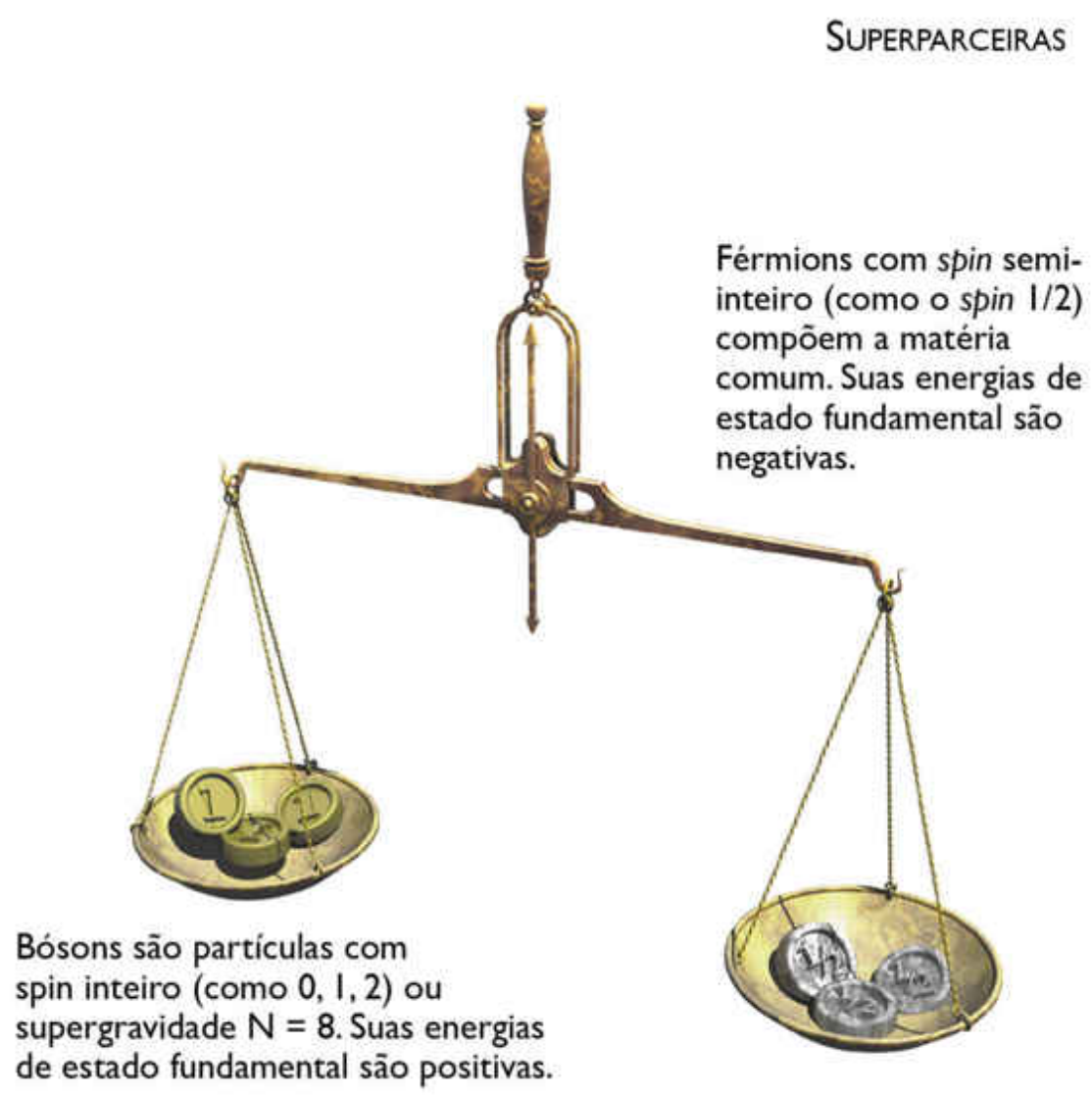
$$A \times B = B \times A$$

NÚMEROS DE GRASSMANN

$$A \times B = -B \times A$$

Todavia, nos anos 1970 foi descoberto um tipo totalmente novo de simetria que fornece um mecanismo físico natural para anular os infinitos que se originam das flutuações do estado fundamental. A supersimetria é um aspecto de nossos modelos matemáticos modernos que pode ser descrito de diversas formas; uma é dizer que o espaço-tempo possui dimensões extras além das que vivenciamos. Elas são chamadas de dimensões de Grassmann, pois são medidas em números conhecidos como variáveis de Grassmann, não em números reais comuns. Estes têm propriedades comutativas, ou seja, não importa a ordem em que você os multiplica: 6 vezes 4 é o mesmo que 4 vezes 6. Porém, as variáveis de Grassmann apresentam anticomutação: x vezes y é o mesmo que –y vezes x.

A princípio, cogitou-se a supersimetria para eliminar infinitos em campos de matéria e em campos de Yang-Mills num espaço-tempo em que tanto as dimensões dos números comuns quanto as dimensões de Grassmann fossem planas, não curvas. Mas foi natural estender aos números comuns e às dimensões de Grassmann que eram curvos. Esse fato levou a uma série de teorias chamadas de supergravidade, com diferentes valores de supersimetria. Uma consequência da supersimetria é que todo campo ou partícula deve ter um "superparceiro" ou "superparceira" com um *spin* que seja 1/2 maior ou 1/2 menor do que o seu (Figura 2.12).



(FIG. 2.13)

Todas as partículas conhecidas no universo pertencem a um entre dois grupos: férmions ou bósons. Férmions são partículas com *spin* semi-inteiro (como o *spin* 1/2) e compõem a matéria comum. Suas energias de estado fundamental são negativas.

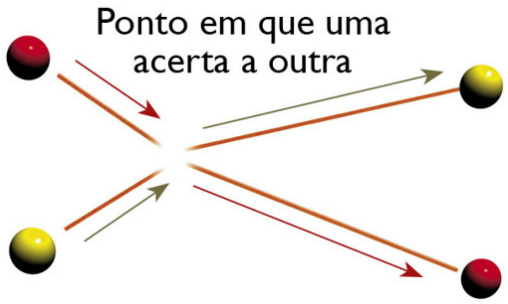
Bósons são partículas com *spin* inteiro (como 0, 1, 2) e dão origem a forças entre os férmions, como a força gravitacional e a luz. Suas energias de estado fundamental são positivas. A teoria da supergravidade considera que todo férmion e todo bóson possuem uma superparceira com *spin* 1/2 maior ou menor do que o seu. Por exemplo, um fóton (que é um bóson) tem *spin* 1. Seu estado de energia fundamental é positivo. A superparceira do fóton, o fotino, tem *spin* 1/2, o que faz dele um férmion. Portanto, sua energia de estado fundamental é negativa.

Nesse esquema de supergravidade, terminamos com números iguais de bósons e férmions. Com as energias de estado fundamental dos bósons pesando no lado positivo e os férmions pesando no lado negativo, as energias de estado fundamental se

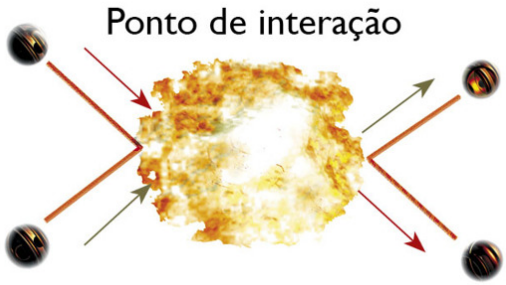
anulam mutuamente, eliminando os maiores infinitos.

MODELOS DE COMPORTAMENTO DE PARTÍCULAS

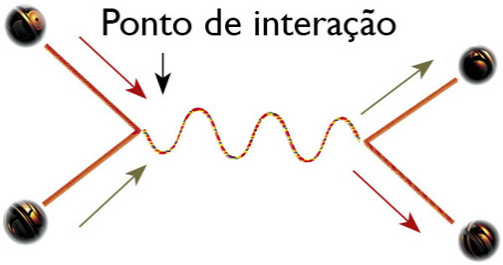
1 Se partículas pontuais de fato existirem como elementos discretos, como bolas de bilhar, então, quando colidirem, suas trajetórias serão desviadas para duas novas trajetórias.



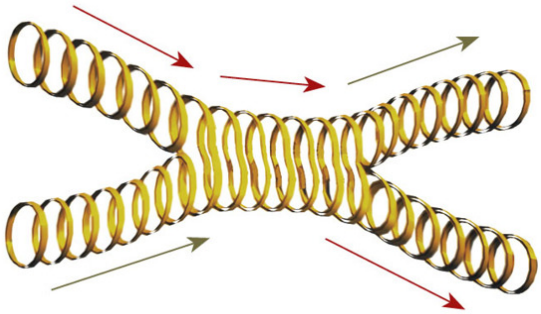
2 Isso é o que parece acontecer quando duas partículas interagem, embora o efeito seja muito mais dramático.



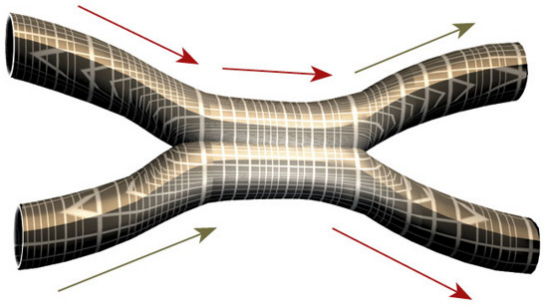
3 A teoria de campo quântico mostra duas partículas, como um elétron e sua antipartícula, um pósitron, colidindo. Ao fazê-lo, elas se aniquilam brevemente numa frenética explosão de energia, criando um fóton. Ele então libera sua energia, produzindo mais um par elétron-pósitron. Continua a parecer que as partículas apenas desviaram por novas trajetórias.



4 Se as partículas não forem pontos de dimensão zero, mas cordas unidimensionais em que loops oscilantes vibram como um elétron e um pósitron, então, quando colidem e se aniquilam mutuamente, elas criam uma nova corda com diferente padrão de vibração. Liberando energia, ela se divide em duas novas cordas continuando por novas trajetórias.



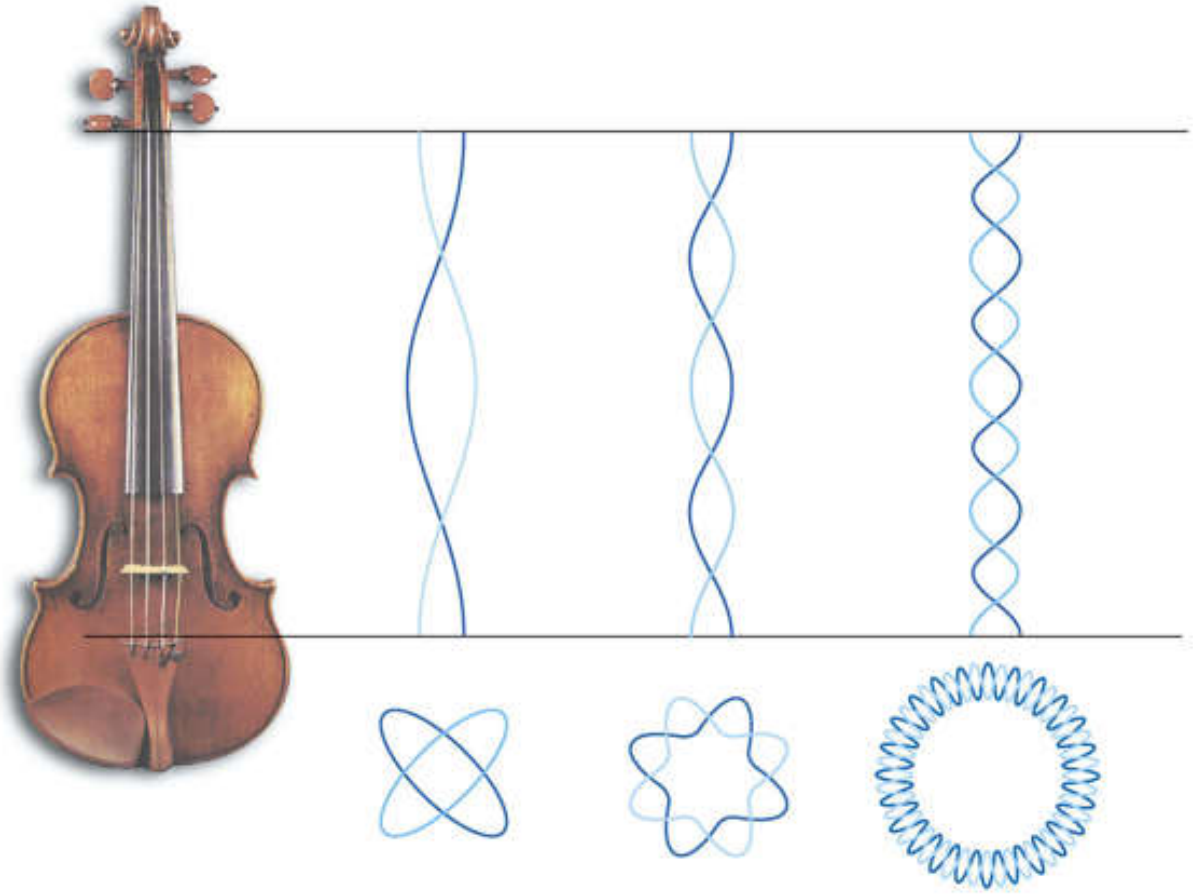
5 Se essas cordas originais forem vistas não como momentos discretos, mas como uma história ininterrupta no tempo, então as cordas resultantes serão vistas como uma membrana-mundo de cordas.



As energias do estado fundamental dos bósons, campos cujo *spin* é um número inteiro (0, 1, 2 etc.), são positivas. Por outro lado, as energias do

estado fundamental dos férmions, campos cujo *spin* é um número semi-inteiro (1/2, 3/2 etc.), são negativas. Como há números iguais de bósons e férmions, os maiores infinitos se anulam em teorias da supergravidade (ver Figura 2.13).

Restava a possibilidade de haver quantidades menores, mas ainda assim infinitas. Ninguém tinha a paciência necessária para calcular se essas teorias eram de fato completamente finitas. Calculou-se que um bom aluno levaria duzentos anos para fazer isso, e como poderíamos saber se ele não havia cometido um erro na segunda página? Mesmo assim, até 1985 a maioria das pessoas acreditava que a maioria das teorias de supergravidade supersimétricas estaria livre de infinitos.



(FIG. 2.14)
OSCILAÇÕES DE CORDA
Na teoria das cordas, os objetos básicos não são partículas, que ocupam um único ponto no espaço, mas cordas unidimensionais. Essas cordas podem ter extremidades ou se juntar a elas

mesmas em loops fechados.

Assim como as cordas de um violino, as cordas na teoria das cordas sustentam certos padrões de vibração, ou frequências ressonantes, cujos comprimentos de onda se encaixam precisamente entre as duas extremidades.

Mas, enquanto as diferentes frequências de ressonância das cordas de um violino dão origem a diferentes notas musicais, as diferentes oscilações de uma corda dão origem a diferentes massas e cargas de força, que são interpretadas como partículas fundamentais. Falando de forma geral, quanto mais curto o comprimento de onda da oscilação na corda, maior a massa da partícula.

Então, de repente, a moda mudou. As pessoas declararam que não havia motivo para esperar infinitos nas teorias de supergravidade, e isso foi interpretado como significando que elas eram fatalmente falhas como teorias. Em vez disso, alegou-se que uma teoria chamada teoria das cordas supersimétrica era o único modo de combinar a gravidade com a teoria quântica. As cordas, como suas homônimas na experiência cotidiana, são objetos estendidos unidimensionais. Elas possuem apenas comprimento. As cordas na teoria das cordas se deslocam por um espaço-tempo de fundo. Ondulações nas cordas são interpretadas como partículas (Figura 2.14).

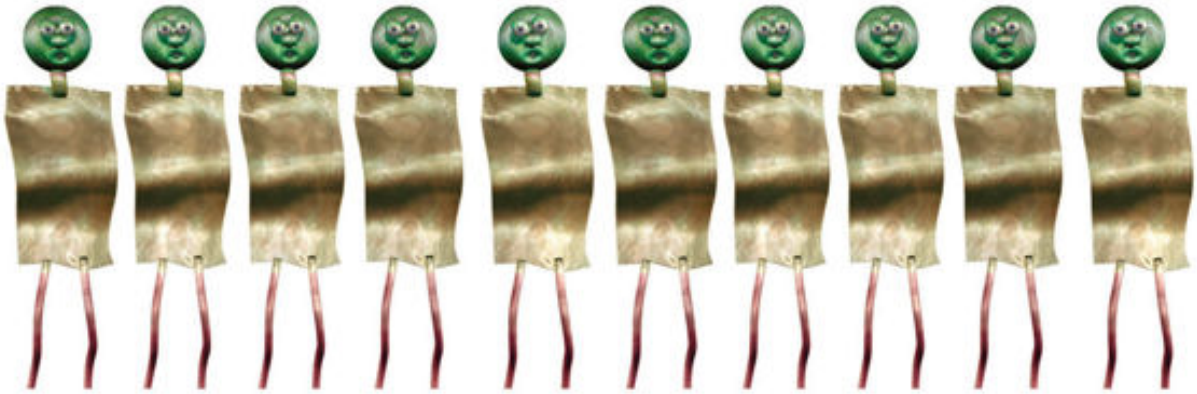
Se as cordas têm tanto as dimensões de Grassmann como suas dimensões de número comum, as ondulações correspondem a bósons e férmions. Nesse caso, as energias do estado fundamental positivas e negativas se anularão de forma tão exata que não haverá infinitos, nem mesmo os menores possíveis. A teoria das supercordas, alegou-se, era a Teoria de Tudo.

Os historiadores da ciência no futuro acharão interessante mapear a maré inconstante das opiniões entre os físicos teóricos. Por alguns anos, as cordas reinaram supremas e a supergravidade foi menosprezada como uma teoria aproximativa, válida para energias baixas. A qualificação de "energia baixa" foi considerada particularmente condenatória, ainda que nesse contexto energias baixas significassem partículas com energias um bilhão de bilhão de vezes menores do que as de partículas numa explosão de dinamite. Se a supergravidade era apenas uma aproximação de energia baixa, ela não poderia reivindicar o posto de teoria fundamental do universo. Em vez disso, supôs-se que a teoria subjacente fosse uma entre

cinco possíveis teorias das supercordas. Mas quais das cinco teorias das cordas descreviam nosso universo? E como a teoria das cordas podia ser formulada, além da aproximação em que as cordas eram retratadas como superfícies com uma dimensão espacial e uma dimensão temporal movendo-se por um espaço-tempo plano como fundo? Será que as cordas não curvariam o tecido do espaço-tempo?

Nos anos posteriores a 1985, aos poucos ficou óbvio que a teoria das cordas não representava um quadro completo. Para começar, percebeu-se que as cordas são apenas um componente de uma vasta classe de objetos que podem ser estendidos em mais de uma dimensão. Paul Townsend, que, como eu, é membro do Departamento de Matemática Aplicada e Física Teórica em Cambridge, e que realizou grande parte do trabalho fundamental sobre esses objetos, deu-lhes o nome de "p-branas". Uma p-brana tem comprimento em p direções. Desse modo, uma brana p = 1 é uma corda, uma brana p = 2 é uma superfície ou membrana e assim por diante (Figura 2.15). Parece não haver motivo para favorecer o caso da corda p = 1 em detrimento de outros valores possíveis de p. Em vez disso, deveríamos adotar o princípio da democracia p-brana: todas as p-branas são criadas iguais.

Todas as p-branas poderiam ser vistas como soluções para as equações das teorias da supergravidade em dez ou onze dimensões. Embora dez ou onze dimensões não pareçam exatamente o espaço-tempo vivenciado por nós, a ideia é que as demais seis ou sete dimensões são recurvadas em uma escala tão reduzida que não as notamos; só estamos cientes das quatro dimensões grandes e quase planas restantes.



Consideramos essas verdades evidentes por si mesmas. Todas as p-branas são criadas iguais!

(FIG. 2.15) P-BRANAS

P-branas são objetos dotados de extensão em p dimensões. Casos especiais são as cordas, com p = 1, e as membranas, com p = 2, mas valores de p mais elevados são possíveis em um espaço-tempo de dez ou onze dimensões. Muitas vezes, algumas ou todas as p dimensões são recurvadas como um toro.

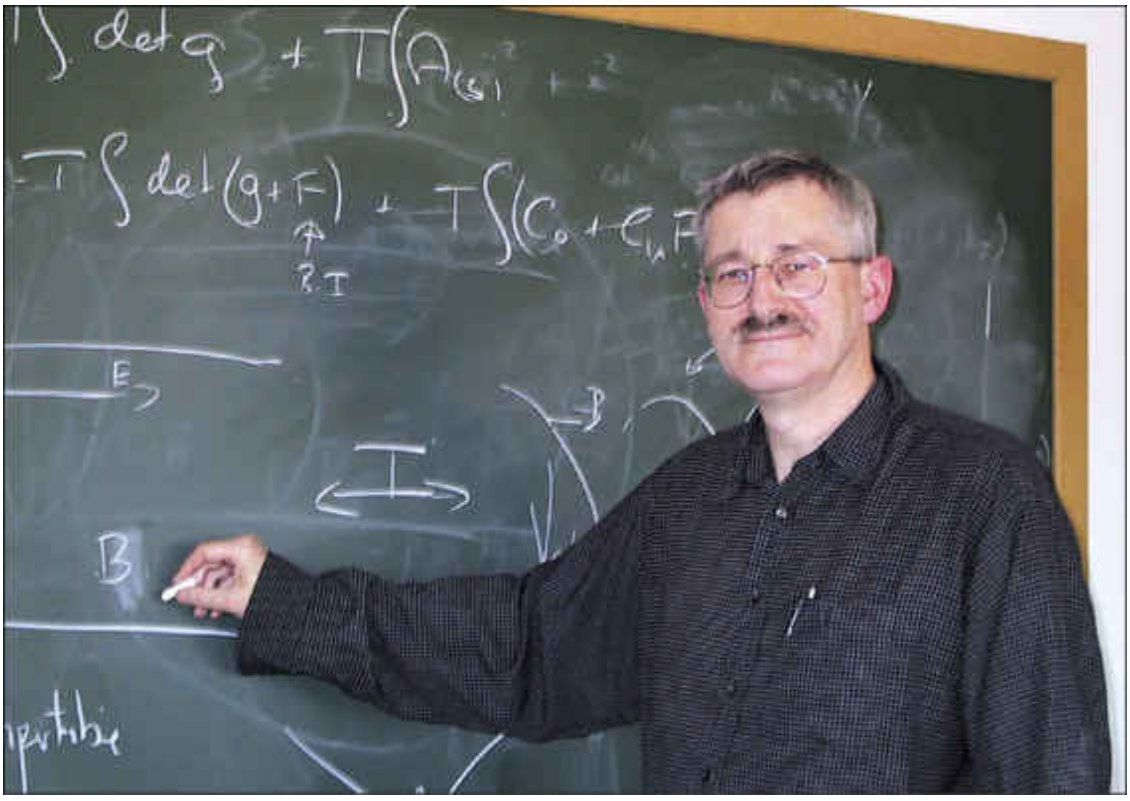


IMAGEM **H**: *Paul Townsend, o cérebro por trás das p-branas.*



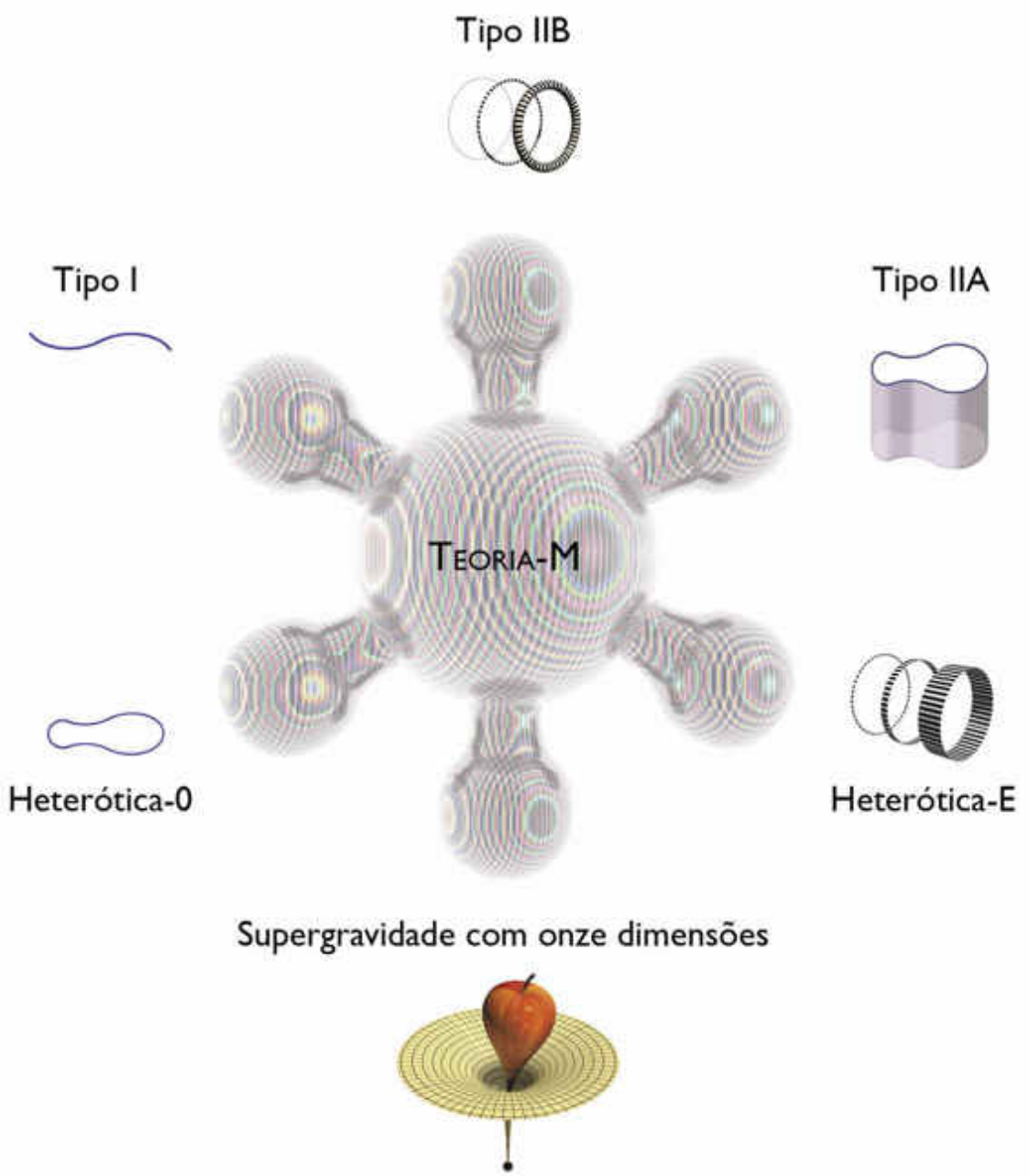
O tecido espacial de nosso universo deve compreender tanto dimensões estendidas quanto enroladas. As membranas podem ser mais visíveis se estiverem enroladas.

Uma 1-brana, ou corda enrolada.

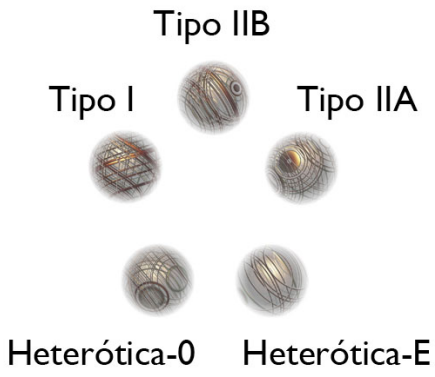
Uma superfície 2-brana enrolada em toro.

Devo dizer pessoalmente que relutei em acreditar em dimensões extras. Porém, como sou positivista, a pergunta "Será que dimensões extras de fato existem?" não tem significado. Só o que podemos nos perguntar é se modelos matemáticos com dimensões extras fornecem uma boa descrição do universo. Ainda não dispomos de nenhuma observação que exija dimensões extras para ser explicada. Contudo, há uma possibilidade de que as observemos no Grande Colisor de Hádrons em Genebra. Mas o que convenceu muitas pessoas, inclusive a mim, de que devemos levar a sério os modelos com dimensões extras é que existe uma rede de relações inesperadas, chamadas dualidades, entre os modelos. Essas dualidades mostram que os modelos são todos essencialmente equivalentes — ou seja, são apenas aspectos diferentes da mesma teoria subjacente, que recebeu o nome de teoria-M. Não tomar essa rede de dualidades como um sinal de que estamos no caminho certo seria um pouco como acreditar que Deus pôs fósseis nas rochas para tapear Darwin acerca da evolução da vida.

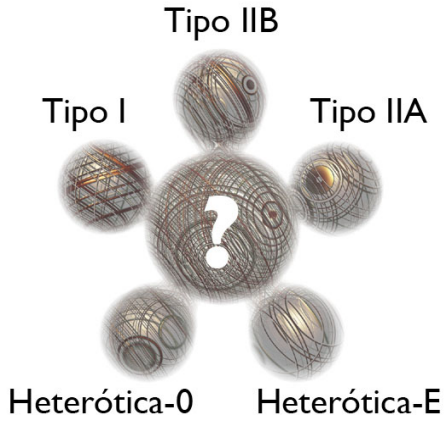
(FIG. 2.16) UMA ESTRUTURA ÚNICA?



Há uma rede de relações, assim chamadas dualidades, que conectam todas as cinco teorias, bem como a supergravidade de onze dimensões. As dualidades sugerem que as diferentes teorias das cordas são apenas expressões diferentes da mesma teoria subjacente, que foi chamada de teoria-M.



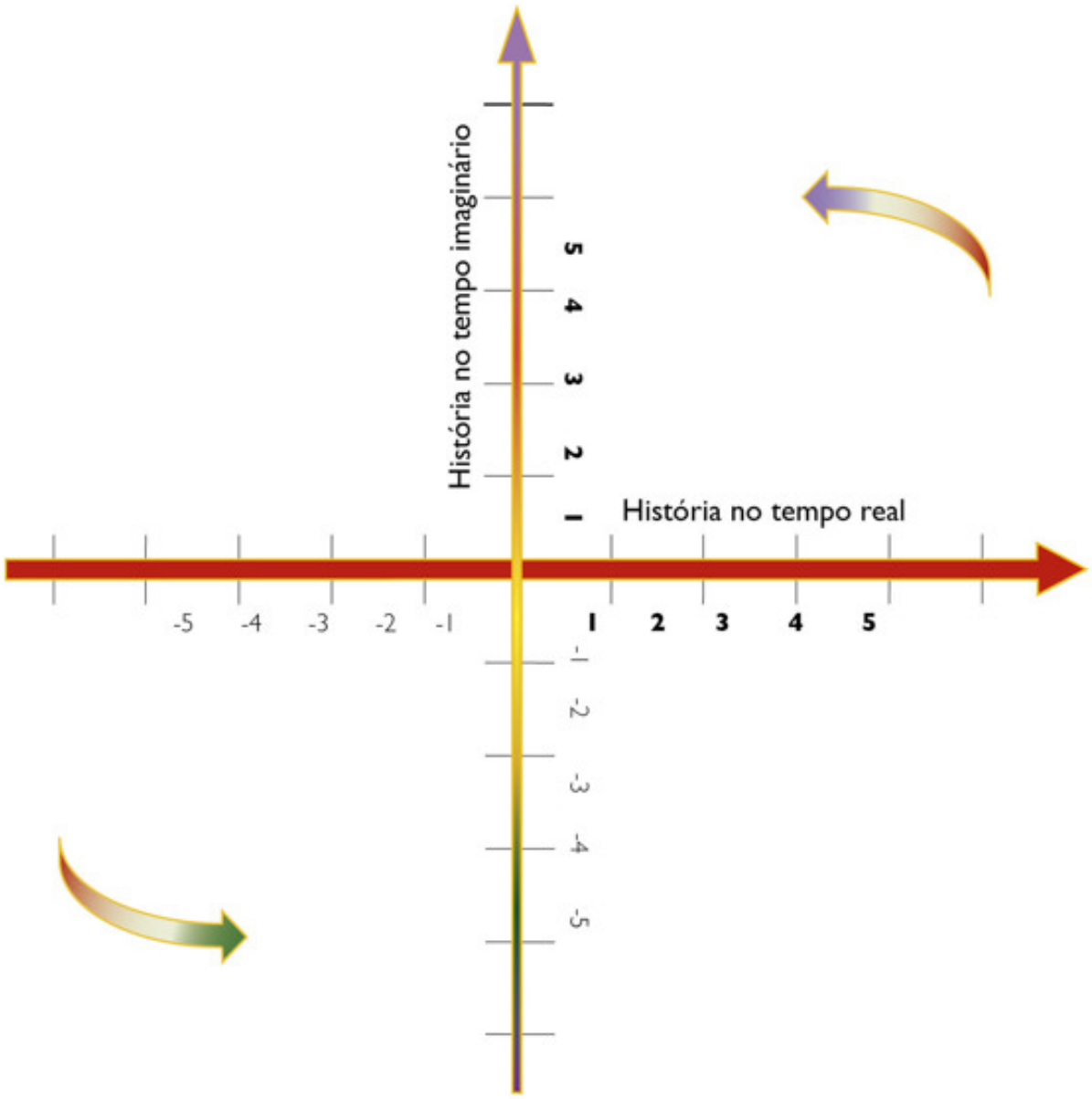
Antes de meados da década de 1990, parecia haver cinco teorias das cordas diferentes, todas elas separadas e sem conexão.



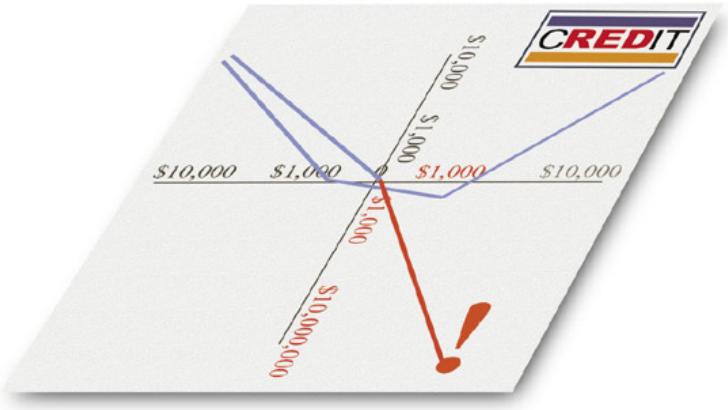
A teoria-M unifica as cinco teorias das cordas em uma única estrutura teórica, mas muitas de suas propriedades ainda estão por ser compreendidas.

Essas dualidades revelam que todas as cinco teorias das supercordas descrevem a mesma física e que elas são também equivalentes à supergravidade (Figura 2.16). Não podemos afirmar que as supercordas sejam mais fundamentais do que a supergravidade, ou vice-versa. Antes, são expressões diferentes da mesma teoria subjacente, todas elas úteis para cálculos em diferentes tipos de situações. Como não têm infinitos, as teorias das cordas são boas para calcular o que acontece quando algumas partículas de energia elevada colidem e se dispersam. No entanto, não são de grande utilidade para descrever como a energia de um número de

partículas muito grande curva o universo ou forma um estado ligado, como um buraco negro. Para essas situações, precisamos da supergravidade, que é basicamente a teoria de Einstein do espaço-tempo curvo com alguns tipos extras de matéria. É um cenário que usarei sobretudo no que vem a seguir.



(FIG. 2.17)
Podemos construir um modelo matemático em que há uma direção no tempo imaginário perpendicular ao tempo real comum. O modelo tem regras que determinam a história no tempo imaginário em termos da história no tempo real, e vice-versa.



(FIG. 2.18)

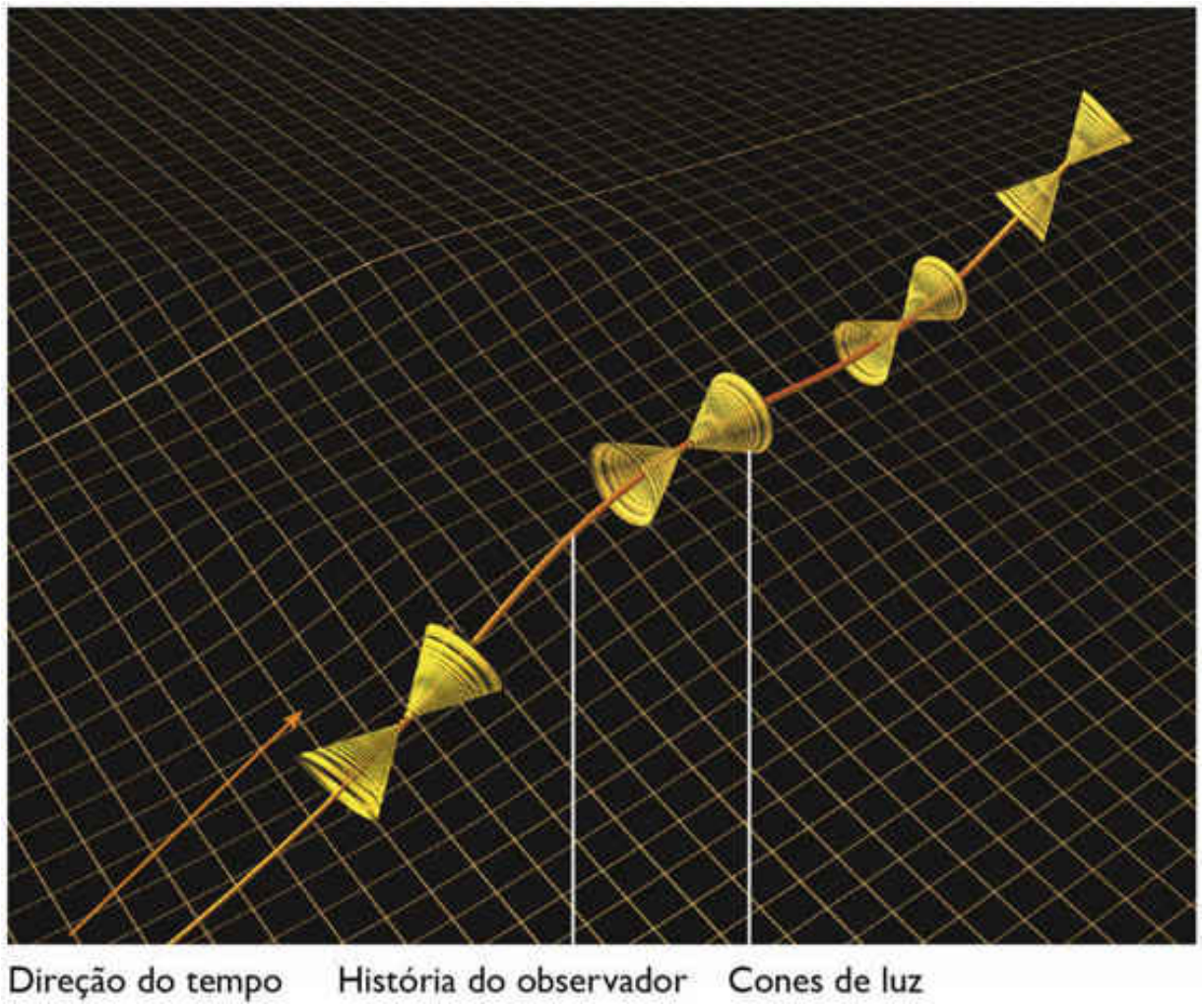
Os números imaginários são um constructo matemático. Não podemos ter um cartão de crédito com números imaginários.

Para descrever até que ponto a teoria quântica dá forma ao tempo e ao espaço, é útil introduzir a ideia de tempo imaginário. Tempo imaginário soa um pouco como ficção científica, mas é um conceito matemático bem definido: o tempo medido no que são chamados de números imaginários. Podemos pensar em números reais comuns como 1, 2, –3,5 e assim por diante como correspondendo a posições numa linha que se estende da esquerda para a direita: o zero no meio, números reais positivos à direita e números reais negativos à esquerda (Figura 2.17).

Os números imaginários podem ser representados como correspondendo a posições em uma linha vertical: o zero novamente no meio, números imaginários positivos demarcados para cima e números imaginários negativos assinalados para baixo. Assim, podemos pensar em números imaginários como um novo tipo de números perpendiculares aos números reais comuns. Como são um constructo matemático, não precisam de concretude física — não se pode obter um número imaginário de laranjas ou ter um cartão de crédito com números imaginários (Figura 2.18).

Alguém poderia achar que isso significa que números imaginários são apenas um jogo matemático sem nenhuma relação com o mundo real. Do ponto de vista da filosofia positivista, porém, não é possível determinar o que é real. Só o que podemos fazer é descobrir quais modelos matemáticos

descrevem o universo em que vivemos. Acontece que um modelo matemático envolvendo o tempo imaginário prevê não só os efeitos já observados, mas também os efeitos que não fomos ainda capazes de medir e nos quais, ainda assim, acreditamos por outros motivos. Então o que é real e o que é imaginário? A distinção está apenas em nossas mentes?



(FIG. 2.19)

No espaço-tempo em tempo real da relatividade geral clássica, o tempo é distinto das direções espaciais porque aumenta apenas durante a história de um observador, ao contrário das direções espaciais, que podem aumentar ou diminuir ao longo dessa história. A direção do tempo imaginário da teoria quântica, por outro lado, é como outra direção espacial, de modo que pode aumentar ou diminuir.

A teoria da relatividade geral de Einstein clássica (isto é, não quântica) combinava o tempo real e as três dimensões do espaço em um espaço-tempo quadridimensional. Entretanto, a direção do tempo real era distinta das três direções espaciais. A linha-mundo ou história de um observador sempre aumentava na direção do tempo real (ou seja, o tempo sempre se movia do passado para o futuro), mas ela podia aumentar *ou diminuir* em qualquer uma das três direções espaciais. Em outras palavras, era possível reverter a direção no espaço, mas não no tempo (Figura 2.19).



(FIG. 2.20) TEMPO IMAGINÁRIO

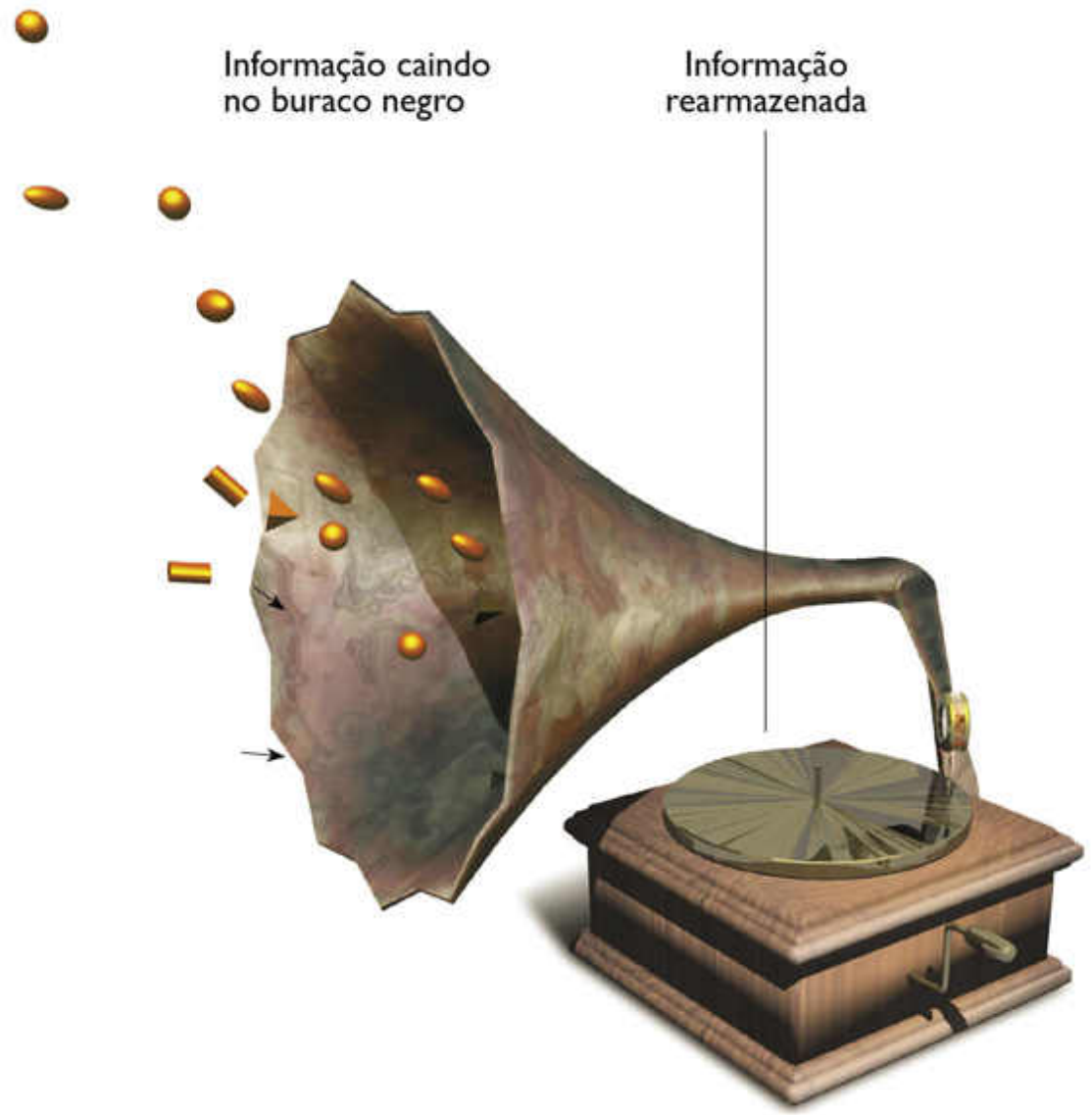
Em um espaço-tempo imaginário que é uma esfera, a direção do tempo imaginário poderia representar a distância do polo Sul. À medida que se avança para o norte, os círculos de latitude em distâncias constantes do polo Sul se tornam maiores, correspondendo ao universo que se expande no tempo imaginário. O universo atingiria tamanho máximo no equador e depois voltaria a se contrair com o aumento do tempo imaginário em um único ponto, no polo Norte. Ainda que o universo tivesse tamanho zero nos polos, esses pontos não seriam singularidades, assim como os polos Norte e Sul na superfície terrestre são pontos perfeitamente regulares. Isso sugere que a origem do universo no tempo imaginário pode ser um ponto regular no espaço-tempo.



Tempo imaginário como graus de longitude
que se encontram nos polos Norte e Sul

(FIG. 2.21)

Em vez de graus de latitude, a direção do tempo imaginário em um espaço-tempo que é uma esfera poderia também corresponder a graus de longitude. Como todas as linhas de longitude se encontram nos polos Norte e Sul, o tempo é imóvel nos polos; um aumento do tempo imaginário deixa a pessoa parada no mesmo lugar, assim como se mover para oeste no polo Norte terrestre não significa se afastar do polo Norte.



A fórmula da área para a entropia — ou número de estados internos — de um buraco negro sugere que a informação sobre o que cai no buraco negro pode ser armazenada como em um disco e reproduzida quando o buraco negro evapora.

Por outro lado, como o tempo imaginário é perpendicular ao tempo real, ele se comporta como uma quarta direção espacial. Dessa forma, pode apresentar uma gama de possibilidades muito mais rica do que a linha ferroviária do tempo real comum, que só pode ter um início ou um fim ou andar em círculos. É nesse sentido imaginário que o tempo tem uma forma.

Para enxergar algumas das possibilidades, considere um espaço-tempo de tempo imaginário que seja uma esfera, como a superfície da Terra. Suponha que o tempo imaginário seja graus de latitude (ver Figura 2.20). Então a história do universo no tempo imaginário começaria no polo Sul. Não faria sentido perguntar "O que aconteceu antes do início?". Tais épocas simplesmente não são definidas, assim como não há pontos ao sul do polo Sul. O polo Sul é um ponto perfeitamente regular da superfície da Terra e as mesmas leis imperam ali, bem como em outros pontos. Isso sugere que o início do universo no tempo imaginário pode ser um ponto regular do espaço-tempo e que as mesmas leis podem imperar tanto no início como no restante do universo. (A origem quântica e a evolução do universo serão discutidas no próximo capítulo.)

$$S = \frac{Ak c^3}{4 \hbar G}$$

FÓRMULA DA ENTROPIA DO BURACO NEGRO

A
área do horizonte de eventos do buraco negro

$\hbar$
constante de Planck

k
constante de Boltzmann

G
constante gravitacional de Newton

c
velocidade da luz

S
entropia

Outro comportamento possível é ilustrado tomando-se o tempo imaginário como graus de longitude na Terra. Todas as linhas de longitude se encontram nos polos Norte e Sul (ver Figura 2.21). Assim, o tempo fica parado ali, no sentido de que um aumento do tempo imaginário ou dos graus de longitude deixa a pessoa no mesmo ponto. Isso é muito semelhante ao modo como o tempo comum parece permanecer imóvel no horizonte de um buraco negro. Identificamos que essa imobilidade do tempo real e imaginário (ou ambos estão imóveis, ou nenhum deles está) significa que o espaço-tempo tem uma temperatura, como descobri no caso dos buracos negros. O buraco negro não só apresenta temperatura, mas também se comporta como se tivesse uma grandeza chamada entropia. A entropia é a medida do número de estados internos (as formas como ele poderia ser configurado por dentro) que o buraco negro poderia ter sem parecer nem um pouco diferente para o espectador externo, que pode observar apenas sua massa, sua rotação e sua carga. Essa entropia do buraco negro é dada por uma fórmula muito simples que descobri em 1974. Ela iguala a área do horizonte do buraco negro: há um pouquinho de informação sobre o estado interno do buraco negro para cada unidade fundamental de área do horizonte. Isso mostra que existe uma profunda conexão entre a gravidade quântica e a termodinâmica, a ciência do calor (que inclui o estudo da entropia). Sugere também que a gravidade quântica pode apresentar o que é chamado de holografia (Figura 2.22).

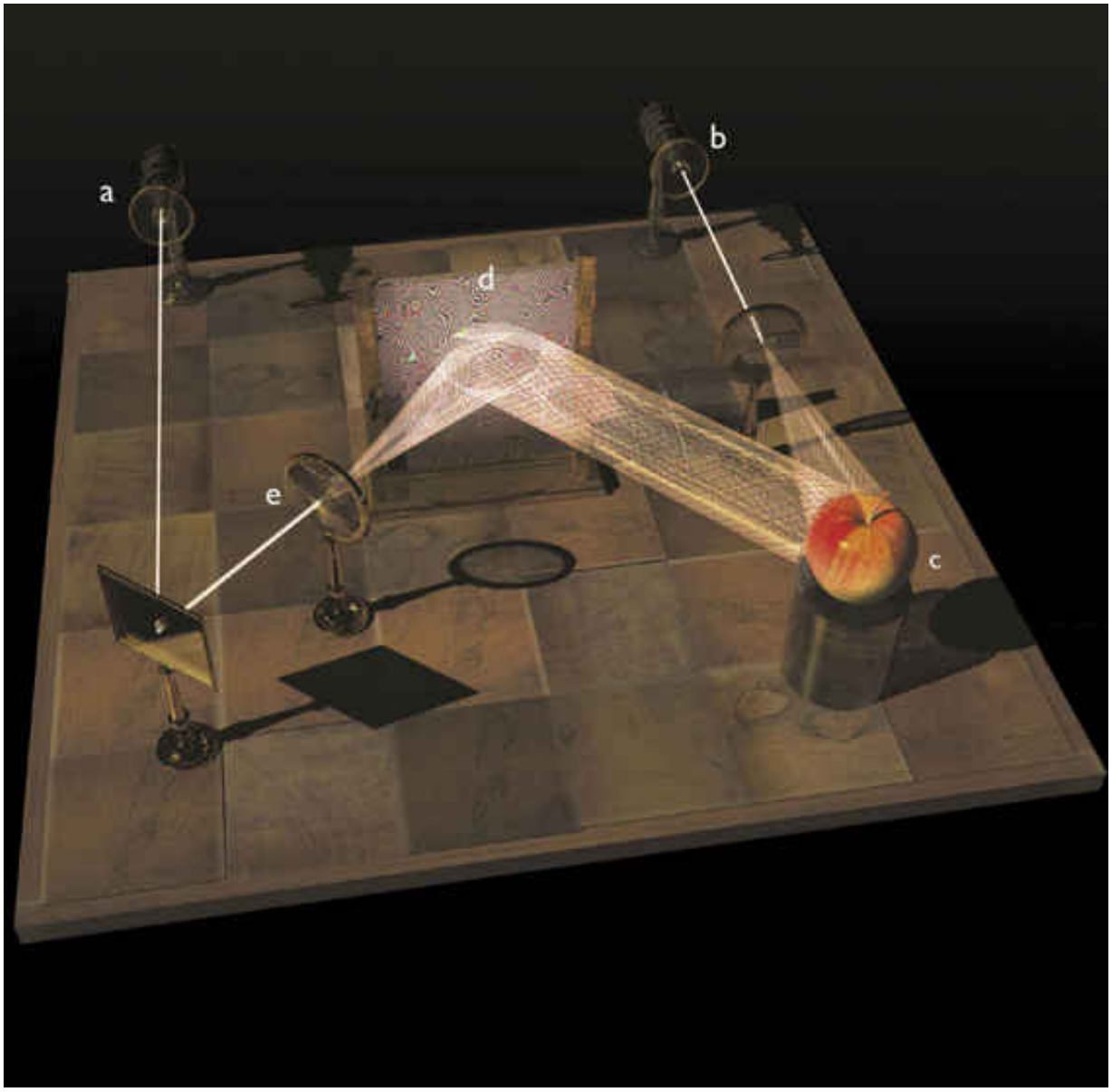


O PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO

A descoberta de que a área de superfície do horizonte cercando um buraco negro mede a entropia do buraco negro levou alguns a defender que a máxima entropia de qualquer região fechada do espaço nunca pode exceder um quarto da área da superfície que a circunscreve. Como a entropia nada mais é que uma medida da informação total contida em um sistema, isso sugere que a informação associada a todos os fenômenos no mundo tridimensional pode ser armazenada em seu contorno bidimensional, como uma imagem holográfica. Em certo sentido, o mundo seria bidimensional.

A informação sobre os estados quânticos numa região do espaço-tempo pode, de algum modo, ser codificada no contorno da região, que possui duas dimensões a menos. Isso é parecido com a maneira como um holograma exibe uma imagem tridimensional sobre uma superfície bidimensional. Se a gravidade quântica incorpora o princípio holográfico, talvez signifique que podemos acompanhar o que há dentro dos buracos negros — o que é essencial se queremos ser capazes de prever a radiação emitida pelos buracos negros. Se não pudermos fazer isso, não conseguiremos prever o futuro tão plenamente quanto imaginávamos. Essa questão é discutida no Capítulo 4. A holografia é discutida outra vez no Capítulo 7. É possível que estejamos vivendo em uma 3-brana — uma

superfície quadridimensional (três espaciais mais uma temporal) que é o contorno de uma região pentadimensional, com as dimensões restantes recurvadas a uma escala muito reduzida. O estado do mundo em uma brana codifica o que está acontecendo na região pentadimensional.



(FIG. 2.22) A holografia é essencialmente um fenômeno de interferência em padrões de onda. Hologramas são criados quando a luz de um único laser é dividida em dois feixes separados (a) e (b). Um deles (b) rebate no objeto (c) e incide sobre uma placa fotossensível (d). O outro (a) passa através de uma lente (e) e colide com a luz refletida de (b), criando um padrão de interferência na placa.

Quando um laser é irradiado na placa revelada, surge uma imagem completamente tridimensional do objeto original. Um observador pode se mover em torno dessa imagem holográfica, sendo capaz de ver todas as faces ocultas que uma foto normal não mostraria.

A superfície bidimensional da placa à esquerda, ao contrário de uma foto normal, tem a propriedade notável de qualquer minúsculo fragmento de sua superfície conter toda a informação necessária para reconstruir a imagem completa.

CAPÍTULO 3

O UNIVERSO NUMA CASCA DE NOZ

O universo tem múltiplas histórias, cada uma determinada por uma minúscula noz.





IMAGEM **I**: *Manutenção da lente e dos espelhos do telescópio espacial Hubble realizada por uma missão do ônibus espacial. A Austrália é visível, abaixo.*

Eu poderia ficar encerrado numa casca de noz
*e me considerar rei do espaço infinito…**
Shakespeare,
Hamlet, ato 2, cena 2



IMAGEM **J**: *Prometeu.*
Pintura em vaso etrusco,
século VI a.C.

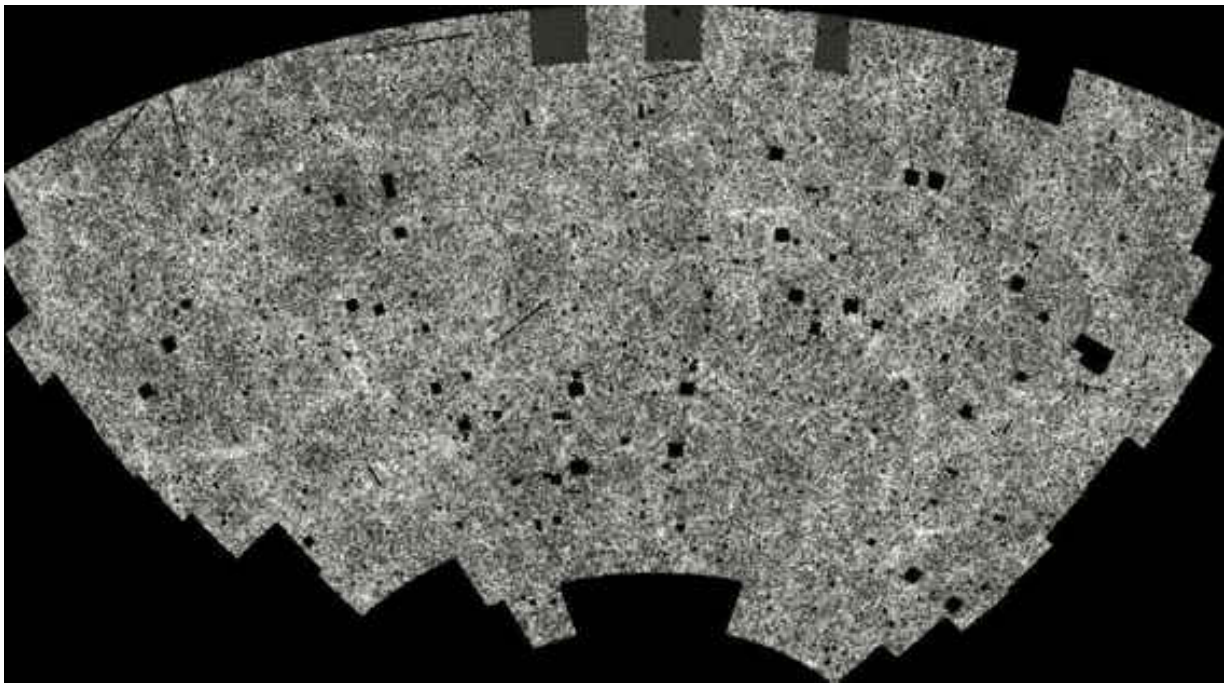
HAMLET TALVEZ QUISESSE dizer que, embora os seres humanos tenham muitas limitações físicas, nossas mentes são livres para explorar o universo todo, audaciosamente indo aonde mesmo a *Jornada nas Estrelas* teme ir — os sonhos ruins o permitam.**

O universo é realmente infinito ou apenas muito grande? E é eterno ou apenas de longa duração? Como nossas mentes finitas abrangem um universo infinito? Não é presunção de nossa parte até mesmo tentar fazê-lo? Corremos o risco de conhecer o mesmo destino de Prometeu, que na mitologia clássica roubou o fogo de Zeus para dá-lo aos humanos e foi punido por sua temeridade sendo acorrentado a uma rocha para uma águia bicar seu fígado?

A despeito da moral dessa história, acredito que podemos e devemos tentar compreender o universo. Já fizemos notáveis progressos na compreensão do cosmos, em particular nos últimos anos. Ainda não temos um retrato completo, mas talvez ele não esteja tão longe.



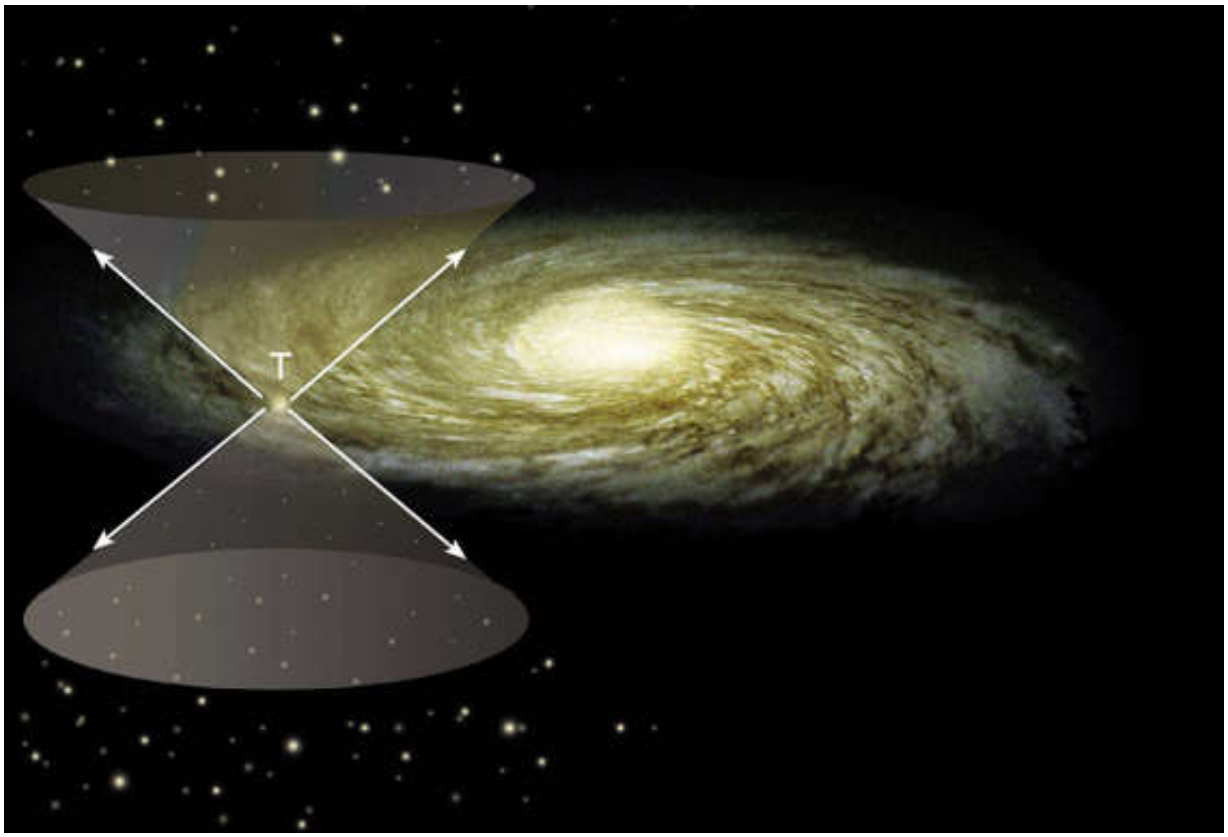
IMAGEM **K** (esquerda): *Galáxia espiral NGC 4414*. IMAGEM **L** (centro): *Galáxia espiral barrada NGC 4314*. IMAGEM **M** (direita): *Galáxia elíptica NGC 147*.



(FIG. 3.1) Quando olhamos para as profundezas do universo, vemos bilhões e bilhões de galáxias.
As galáxias podem ter várias formas e tamanhos; podem ser elípticas ou espirais, como nossa Via Láctea.

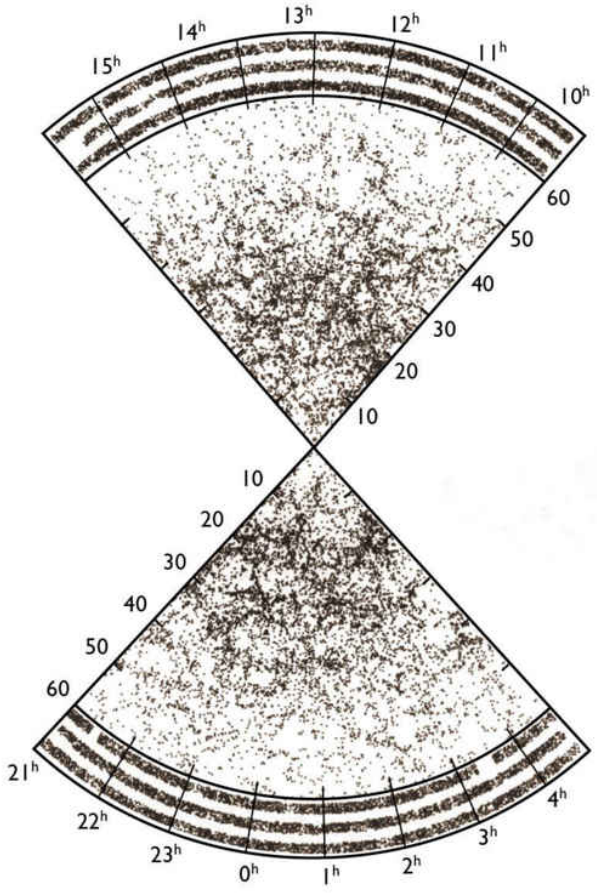
A coisa mais óbvia sobre o espaço é que ele prossegue indefinidamente. Isso foi confirmado pelos instrumentos modernos, como o telescópio Hubble, que nos permite sondar as profundezas do espaço. O que vemos são bilhões e bilhões de galáxias de formas e tamanhos variados (ver Figura 3.1). Cada galáxia contém incontáveis bilhões de estrelas, muitas das quais possuem planetas em sua órbita. Vivemos em um planeta

orbitando uma estrela em um braço exterior da Via Láctea, uma galáxia espiral. A poeira nos braços da espiral bloqueia nossa visão do universo em relação ao plano da galáxia, mas temos uma linha de visão desimpedida em cones nas direções de ambos os lados do plano e podemos mapear as posições de galáxias distantes (Figura 3.2). Descobrimos que as galáxias estão distribuídas, *grosso modo*, de maneira uniforme por todo o espaço, com algumas concentrações e vazios. A densidade das galáxias parece decrescer em distâncias muito grandes, mas isso provavelmente ocorre porque elas estão tão distantes e são tão tênues que não podemos divisá-las. Até onde podemos dizer, o universo se estende pelo espaço para sempre (ver Figura 3.3).



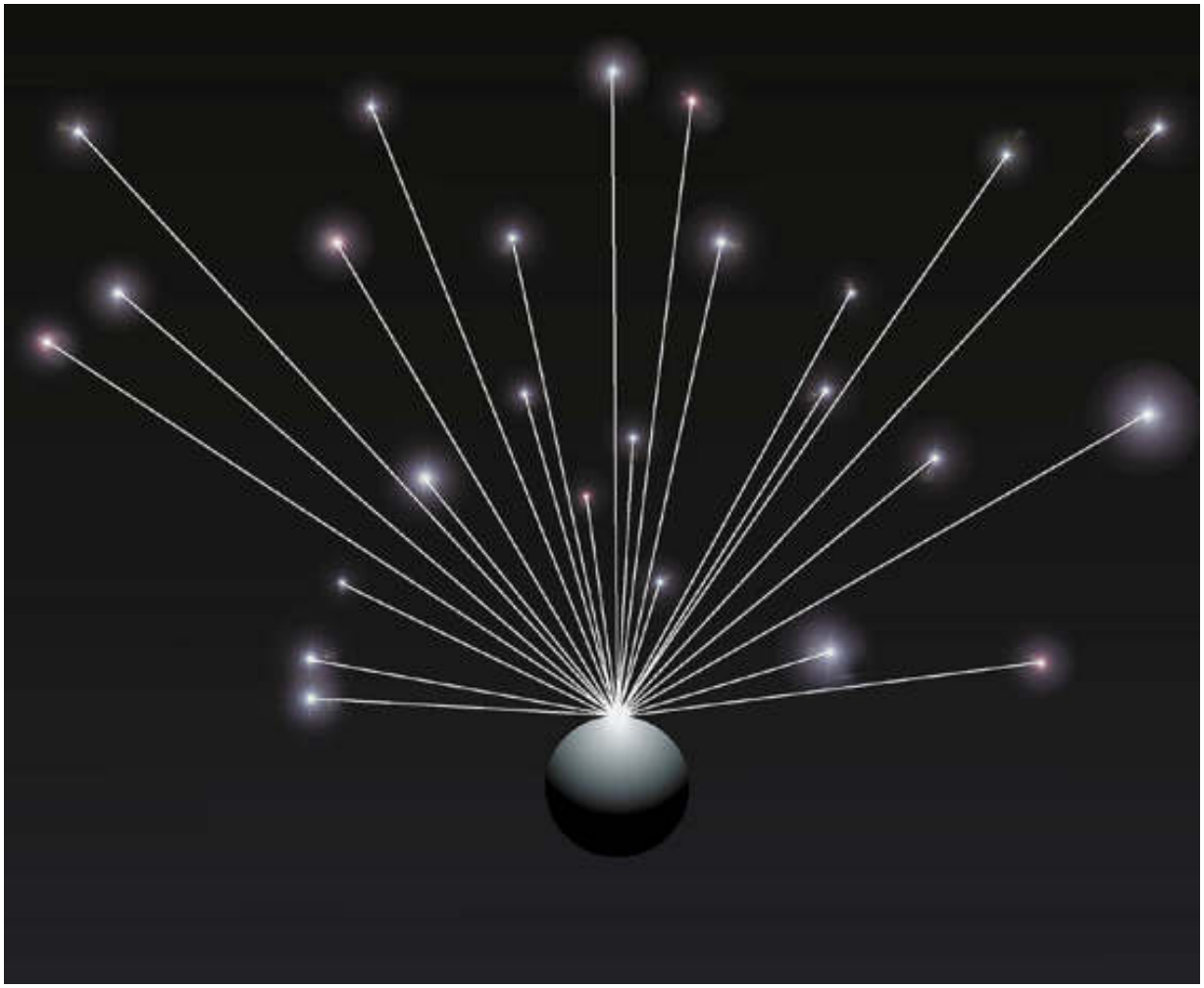
(FIG. 3.2)
Nosso planeta Terra (T) orbita o Sol na região externa da galáxia espiral Via Láctea. O pó estelar nos braços da espiral bloqueia nossa visão no plano da galáxia, mas temos a vista desimpedida em ambos os lados do plano.

Embora o universo pareça ser em grande parte igual em todas as posições do espaço, ele está definitivamente mudando no tempo. Isso só foi percebido nos primeiros anos do século XX. Até então, acreditava-se que o universo fosse essencialmente constante no tempo. Talvez ele tenha existido por um tempo infinito, mas isso pareceu levar a conclusões absurdas. Se as estrelas tivessem irradiado sua luz por um tempo infinito, teriam aquecido o universo à temperatura delas. Mesmo à noite, o céu todo seria tão brilhante quanto o Sol, pois todas as linhas de visão terminariam em uma estrela ou em uma nuvem de poeira que fora aquecida até ficar tão quente quanto as estrelas (Figura 3.4).



(FIG. 3.3)
À parte algumas concentrações locais, descobrimos que as galáxias estão distribuídas mais ou menos uniformemente por todo o espaço.

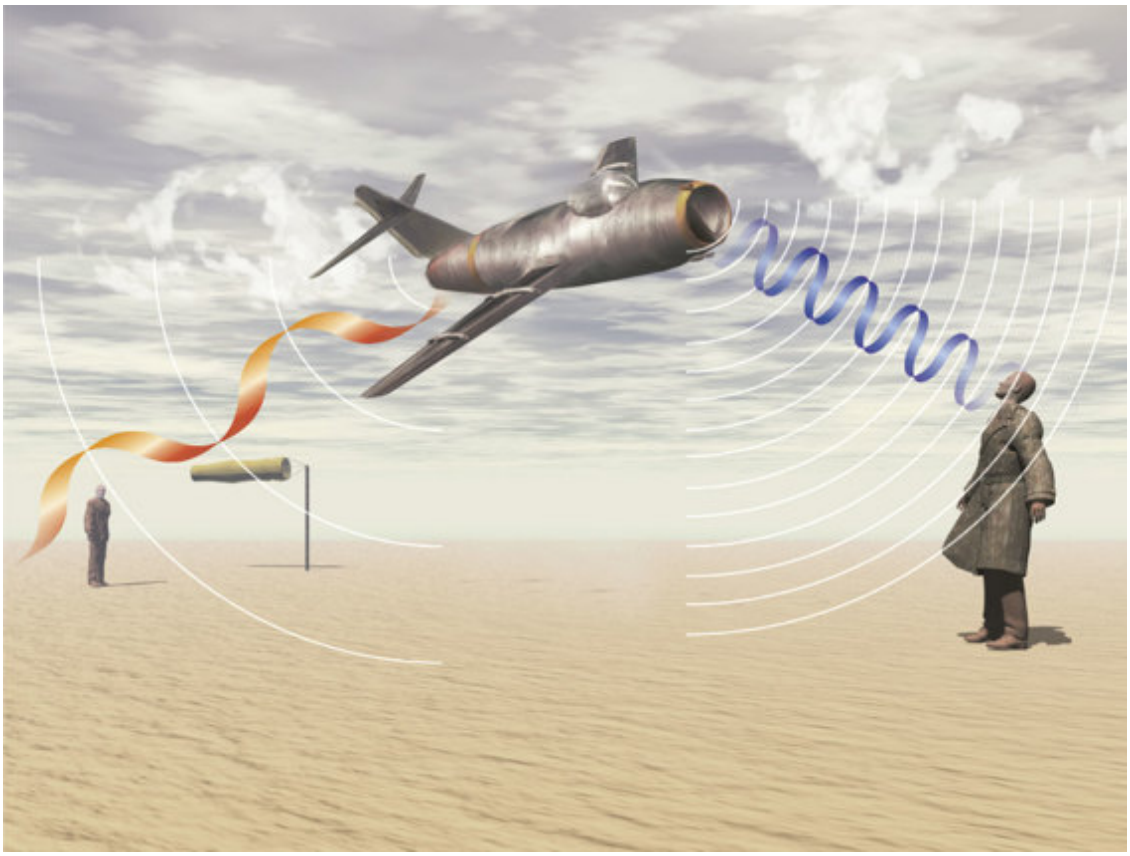
A observação que todos fazemos, de que o céu à noite é escuro, é muito importante. Ela implica que o universo não pode ter existido para sempre no estado em que o vemos hoje. Algo deve ter acontecido no passado para fazer as estrelas se acenderem em um tempo finito anterior, o que significa que a luz das estrelas muito distantes ainda não teve tempo de chegar até nós. Isso explicaria por que o céu noturno não brilha em todas as direções.



(FIG. 3.4)
Se o universo fosse estático e infinito em todas as direções, todas as linhas de visão terminariam em uma estrela, o que deixaria o céu noturno tão brilhante quanto o Sol.

Se as estrelas tivessem estado ali desde sempre, por que se acenderam de repente há alguns bilhões de anos? Qual foi o relógio que informou a

elas que tinha chegado a hora de brilhar? Como vimos, isso intrigou alguns filósofos, como Immanuel Kant, que acreditava que o universo sempre existira. No entanto, para a maioria das pessoas, o fato era compatível com a ideia de que o universo fora criado — em grande parte como é hoje — apenas alguns milhares de anos no passado.



O EFEITO DOPPLER

A relação entre a velocidade e o comprimento de onda, que é chamada de efeito Doppler, é uma experiência cotidiana.

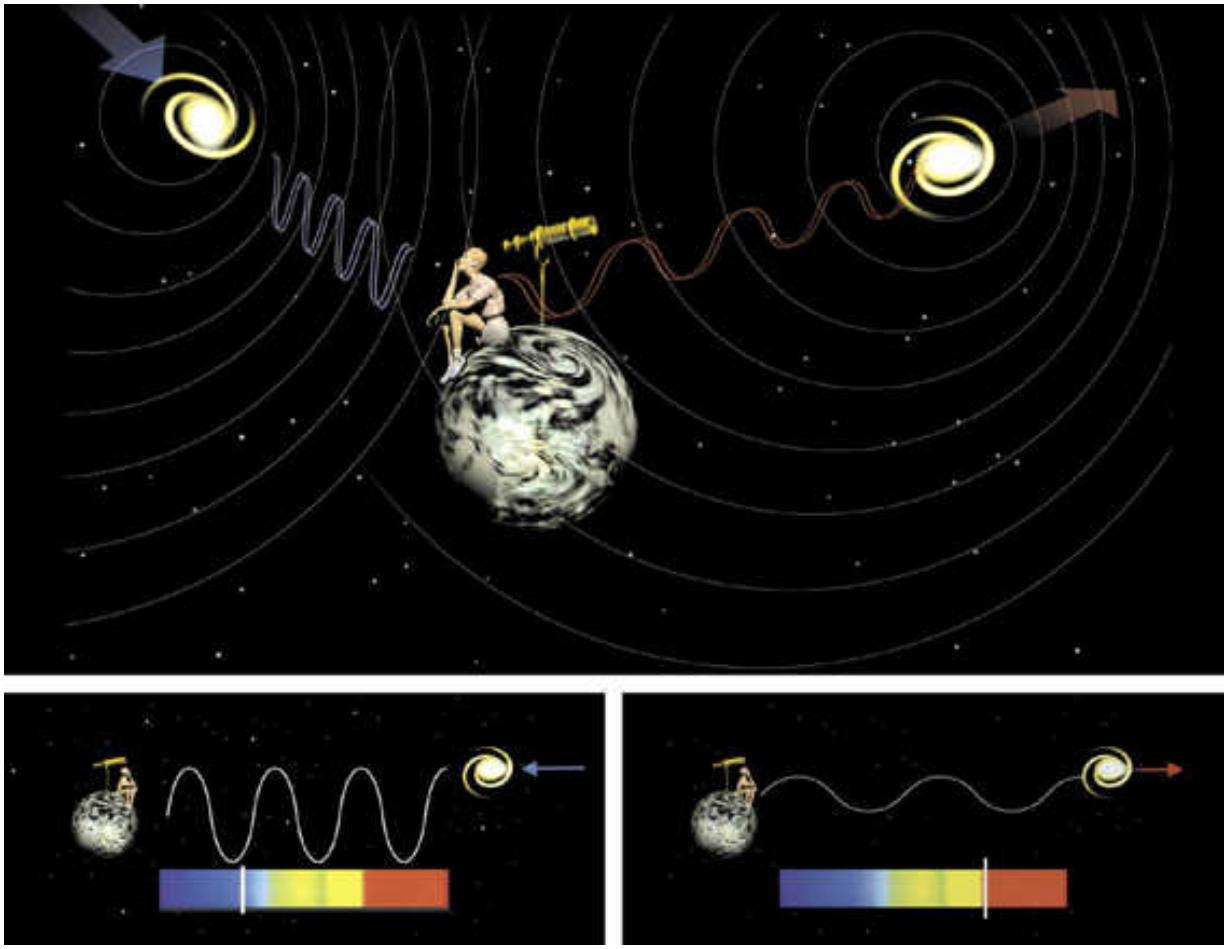
Quando escutamos um avião se aproximar no céu, o som de suas turbinas parece ficar mais agudo, e, quando ele passa e vai embora, o som é mais grave.

O tom mais agudo corresponde às ondas sonoras com comprimento de onda mais curto (a distância entre uma crista de onda e a seguinte) e uma frequência mais elevada (o número de ondas por segundo).

Isso acontece porque, à medida que o avião se move em nossa direção, ele fica mais próximo de nós ao emitir a crista de onda seguinte, diminuindo a distância entre as cristas de onda.

Do mesmo modo, quando o avião se afasta, os comprimentos de onda aumentam e o

som que escutamos é mais grave.



(FIG. 3.5)
O efeito Doppler também é verdadeiro para as ondas luminosas. Se uma galáxia permanecesse a uma distância constante da Terra, linhas características no espectro pareceriam em uma posição normal ou padrão. Entretanto, se a galáxia estiver se afastando de nós, as ondas aparentarão ser alongadas ou esticadas e as linhas características apresentarão um desvio para o vermelho (*à direita*). Se a galáxia estiver se movendo em nossa direção, as ondas vão parecer comprimidas e as linhas apresentarão desvio para o azul (*à esquerda*).

Entretanto, essa ideia começou a apresentar discrepâncias com as observações de Vesto Slipher e Edwin Hubble na segunda década do século XX. Em 1923, Hubble descobriu que muitas manchas tênues de luz, chamadas nebulosas, eram na verdade outras galáxias, vastas coleções de estrelas como nosso Sol, mas a uma grande distância. Para que elas

parecessem tão pequenas e fracas, as distâncias tinham de ser tamanhas que a luz delas teria levado milhões ou até bilhões de anos para chegar até nós. Isso indicava que o início do universo não poderia ter ocorrido apenas alguns milhares de anos antes.

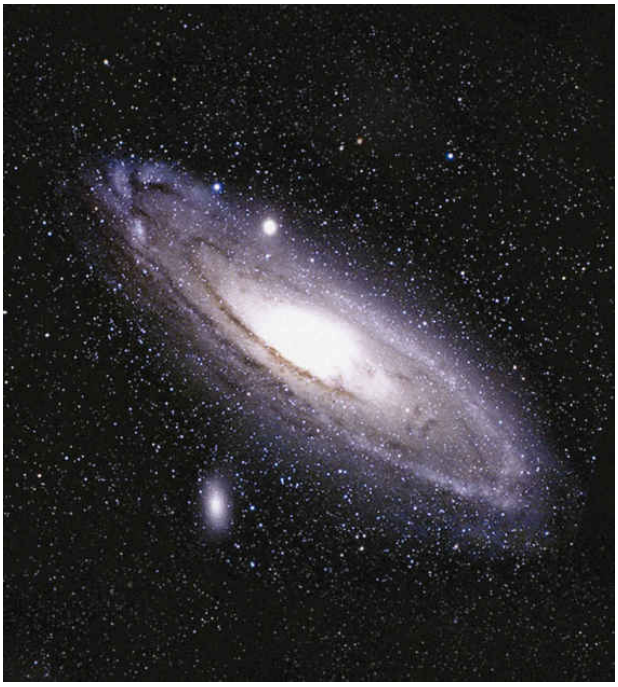


IMAGEM **N**: *Nossa galáxia vizinha, Andrômeda, medida por Hubble e Slipher.*

CRONOLOGIA DE DESCOBERTAS FEITAS POR SLIPHER E HUBBLE ENTRE 1910 E 1930

1912 — Slipher mediu a luz de quatro nebulosas, descobrindo que três delas apresentavam desvio para o vermelho, mas Andrômeda, para o azul. Sua interpretação foi a de que Andrômeda estava se movendo em nossa direção, enquanto as outras nebulosas, se afastando.
1912-1914 — Slipher mediu mais doze nebulosas.
Todas, exceto uma, com desvio para o vermelho.
1914 — Slipher apresentou suas descobertas à Sociedade Astronômica Americana. Hubble assistiu à apresentação.
1918 — Hubble começou a investigar as nebulosas.
1923 — Hubble determinou que as nebulosas espirais (incluindo Andrômeda) eram outras galáxias.
1914-1925 — Slipher e outros continuaram a medir desvios de Doppler. O placar em 1925 estava em 43 desvios para o vermelho contra dois desvios para o azul.
1929 — Hubble e Milton Humason, após continuarem a medir os desvios de Doppler e descobrirem que em grande escala as galáxias parecem estar todas se afastando entre si, anunciaram sua descoberta de que o universo está em expansão.

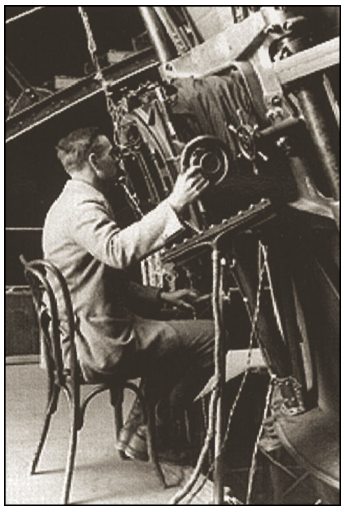


IMAGEM **O**: *Edwin Hubble no telescópio de 2,5 metros de Monte Wilson, 1930.*

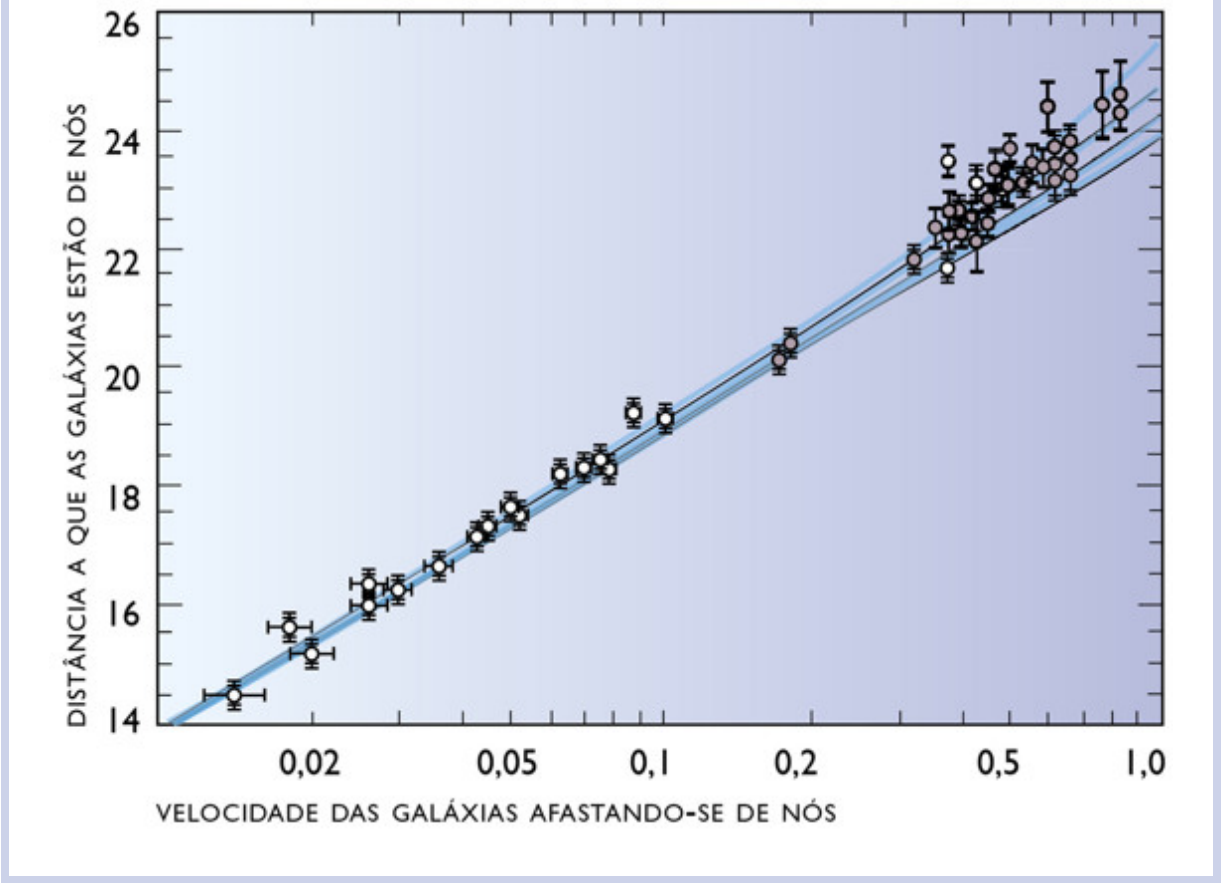
(FIG. 3.6) LEI DE HUBBLE

Analisando a luz de outras galáxias, Edwin Hubble descobriu, na década de 1920, que quase todas as galáxias estão se distanciando de nós, a uma velocidade V que é proporcional a sua distância R da Terra, de modo que $V = H \times R$.

Essa importante observação, conhecida como lei de Hubble, determinou que o universo está se expandindo, com a constante de Hubble, H, estabelecendo a taxa da expansão.

O gráfico abaixo mostra as observações recentes do desvio para o vermelho das galáxias, confirmando a lei de Hubble para vastas distâncias de nós.

A ligeira curvatura para cima no gráfico para longas distâncias indica que a expansão é acelerada, o que pode se dever à energia do vácuo.



No entanto, o segundo achado de Hubble foi ainda mais notável. Os astrônomos tinham percebido que com a análise da luz de outras galáxias era possível medir se elas estão se aproximando ou se afastando de nós (Figura 3.5). Para sua grande surpresa, haviam descoberto que quase todas as galáxias estão se afastando. Além disso, quanto mais longe estão de nós, mais rapidamente se movem. Foi Hubble que notou as drásticas implicações dessa descoberta: em grande escala, todas as galáxias estão se afastando umas das outras. O universo está em expansão (Figura 3.6).


Singularidade do Big Bang
Era de Planck. Leis da física exóticas e desconhecidas
10^{-43} segundos
Era da Teoria da Grande Unificação (GUT). O equilíbrio entre matéria/antimatéria pende em favor da matéria.
10^{-35} segundos
Era eletrofraca, dominada por quarks e antiquarks.
10^{-10} segundos
Era hadrônica-leptônica. Quarks confinados na formação de prótons, nêutrons, mésons e bárions.
1 segundo
Prótons e nêutrons ligados como núcleos de hidrogênio, hélio, lítio e deutério.
3 minutos
Matéria e radiação se juntam e os primeiros núcleos estáveis se formam.
300.000 anos
Separação entre matéria e energia. O universo opticamente denso se torna transparente para a radiação cósmica de fundo.
1.000 milhões de anos
Aglomerados de matéria formam quasares, estrelas e protogaláxias. As estrelas começam a sintetizar núcleos mais pesados.
15.000 milhões de anos
Novas galáxias se formam com sistemas solares se condensando em torno de estrelas. Átomos se ligam para formar moléculas complexas de formas de vida.

BIG BANG QUENTE

Se a relatividade geral estiver correta, o universo começou com temperatura e densidade infinitas na singularidade do Big Bang. À medida que o universo se expandiu, a temperatura da radiação diminuiu. Cerca de um centésimo de segundo após o Big Bang, a temperatura teria sido de cem bilhões de graus e o universo teria contido na maior parte fótons, elétrons e neutrinos (partículas extremamente leves), bem como suas antipartículas, junto com alguns prótons e nêutrons. Pelos três minutos seguintes, à medida que o universo esfriava para cerca de um bilhão de graus, os prótons e nêutrons teriam começado a se combinar para formar o núcleo do hélio, hidrogênio e outros elementos leves.

Centenas de milhares de anos depois, com a temperatura em alguns milhares de graus, os elétrons teriam desacelerado tanto que puderam ser capturados pelos núcleos leves para formar átomos. Entretanto, os elementos mais pesados de que somos feitos, como carbono e oxigênio, não se formariam senão bilhões de anos mais tarde, com a queima do hélio no centro das estrelas.

O cenário de um estágio primordial denso e quente do universo foi proposto pela primeira vez pelo cientista George Gamow, em 1948, em um artigo que ele escreveu com Ralph Alpher, fazendo a notável previsão de que a radiação desse estágio inicial muito quente devia continuar presente até hoje. A previsão de Gamow e Alpher foi confirmada em 1965, quando os físicos Arno Penzias e Robert Wilson detectaram a radiação cósmica de fundo em micro-ondas.

A descoberta da expansão do universo foi uma das grandes revoluções intelectuais do século XX. Representou uma surpresa total e transformou por completo a discussão sobre a origem do universo. Se as galáxias estão se afastando umas das outras, devem ter sido mais próximas no passado. Com base na taxa de expansão atual, podemos estimar que devem ter estado de fato muito próximas há cerca de dez ou quinze bilhões de anos. Como descrito no capítulo anterior, Roger Penrose e eu conseguimos demonstrar que a teoria da relatividade geral de Einstein levava a crer que o universo e o próprio tempo deviam ter tido início numa tremenda explosão. Aí estava a explicação para o céu ser escuro à noite: nenhuma estrela podia ter começado a brilhar mais do que dez a quinze bilhões de anos antes, o tempo transcorrido desde o Big Bang.



Estamos acostumados à ideia de que os eventos são causados por eventos anteriores, que por sua vez são causados por outros ainda mais antigos. Há uma cadeia de causalidade que se estende até o passado. Mas suponhamos que essa cadeia tenha um início. Consideremos que tenha havido um primeiro evento. O que o causou? Essa não era uma pergunta a que muitos cientistas desejavam tentar responder. Eles buscavam evitá-la, fosse alegando, como os russos, que o universo não tivera um início, fosse afirmando que a questão da origem do universo não pertencia ao domínio da ciência, mas cabia à metafísica ou à religião. Na minha opinião, não é essa a postura que um verdadeiro cientista deve assumir. Se as leis da ciência forem suspensas para o início do universo, elas não podem falhar também em outros momentos? Uma lei não é uma lei se a sua vigência for apenas esporádica. *Devemos tentar compreender o início do universo com base na ciência. Talvez seja uma tarefa além da nossa capacidade, mas devemos ao menos fazer a tentativa*.

Embora os teoremas demonstrados por Penrose e por mim revelassem que o universo deve ter tido um início, não forneciam grande informação sobre a natureza desse princípio. Nossos teoremas indicavam que o universo começou em um Big Bang, um momento onde o universo todo, e tudo que nele existe, estava esmagado em um único ponto de densidade infinita. Nesse ponto, a teoria da relatividade geral de Einstein teria deixado de funcionar; logo, ela não pode ser usada para prever de que maneira o universo começou. Ficamos com a impressão de que a origem do universo parece estar além do escopo da ciência.

Essa não era uma conclusão com a qual os cientistas deviam estar satisfeitos. Como observado nos Capítulos 1 e 2, o motivo para a

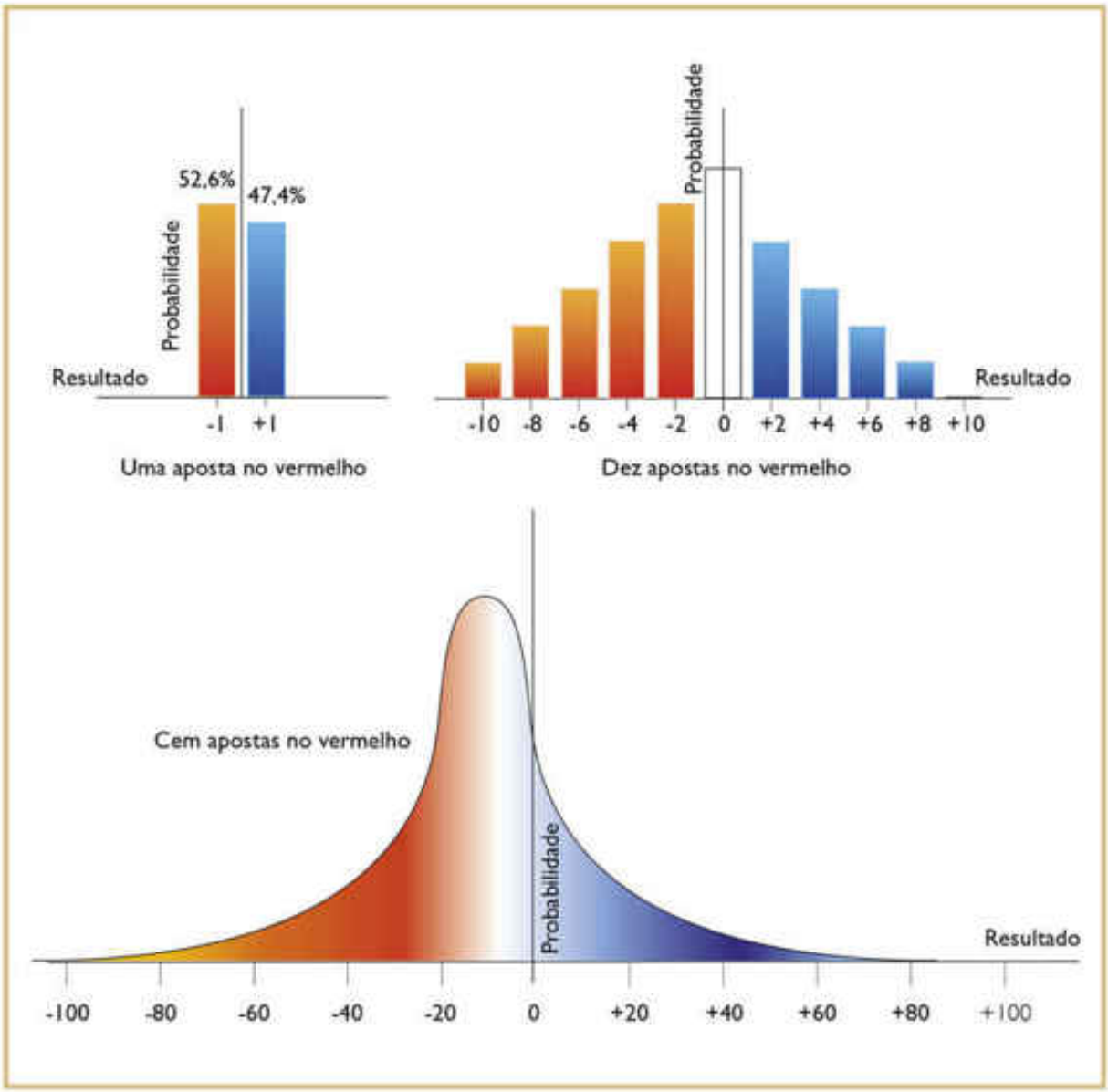
relatividade geral deixar de funcionar perto do Big Bang é que a teoria não incorporou o princípio da incerteza, o elemento aleatório da teoria quântica que Einstein contestara afirmando que Deus não joga dados. Contudo, todas as evidências apontam para um Deus bastante afeito a uma jogatina. Podemos pensar no universo como um cassino gigante, com os dados rolando ou as roletas girando a todo momento (Figura 3.7). Talvez pensemos que operar um cassino é um negócio muito incerto, pois a casa se arrisca a perder dinheiro toda vez que os dados são lançados ou a roleta é girada. Mas, no decorrer de um grande número de apostas, a média dos ganhos e perdas se traduz em um resultado que *pode* ser previsto, ainda que o resultado de uma aposta particular não possa (Figura 3.8). Os donos de cassino se asseguram de que a média das probabilidades opere em seu favor. É por isso que proprietários de cassino são tão ricos. A única chance de levarmos a melhor contra eles é apostando todo o nosso dinheiro em alguns lances de dados ou giros da roleta.



(FIG. 3.7, acima, e FIG. 3.8, a seguir)
Se um jogador aposta no vermelho para um grande número de giros da roleta, podemos prever com razoável precisão quanto ele vai ganhar, pois os resultados dos giros isolados têm uma média.

Por outro lado, é impossível prever o resultado de uma dada aposta particular.




52,6%
47,4%
Probabilidade
Resultado
-1 +1
Uma aposta no vermelho
Probabilidade
Resultado
-10 -8 -6 -4 -2 0 +2 +4 +6 +8 +10
Dez apostas no vermelho
Cem apostas no vermelho
Probabilidade
Resultado
-100 -80 -60 -40 -20 0 +20 +40 +60 +80 +100

O mesmo se dá com o universo. Quando o universo é grande, como acontece hoje, há um número muito elevado de lances de dados e a média dos resultados é algo que se pode prever. É por isso que as leis clássicas funcionam para grandes sistemas. Mas quando o universo é muito pequeno, como era o caso perto do Big Bang, há apenas um pequeno número de lances de dados e o princípio da incerteza é de grande importância.

Como o universo continua a jogar os dados para ver o que acontece em seguida, ele não possui uma única história, como poderíamos pensar. Em vez disso, o universo deve ter tido todas as histórias possíveis, cada uma com sua própria probabilidade. Deve ter havido uma história do universo em que Belize ganhou todas as medalhas de ouro nos Jogos Olímpicos, embora talvez a probabilidade disso seja baixa.

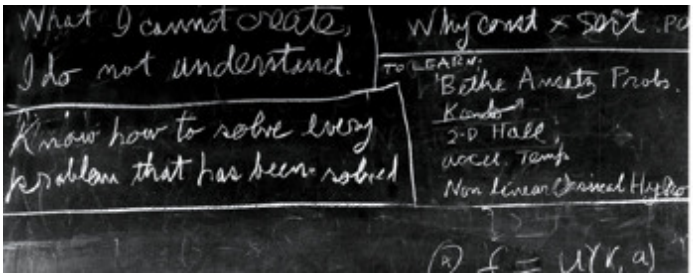
A ideia de que o universo tem múltiplas histórias pode soar como ficção científica, mas hoje é aceita como um fato. Ela foi formulada por Richard Feynman, um grande cientista e uma figura e tanto.

Hoje trabalhamos para combinar a teoria da relatividade geral de Einstein com a ideia de Feynman sobre as múltiplas histórias em uma teoria unificada completa capaz de descrever tudo que acontece no universo. Essa teoria unificada nos possibilitará calcular de que maneira o universo vai se desenvolver caso saibamos como as histórias começaram. Mas a teoria unificada em si mesma não nos dirá como o universo começou ou qual foi seu estado inicial. Para isso, precisamos do que é chamado de condições de contorno, regras que nos informam o que acontece nas fronteiras do universo, nos limites do espaço e do tempo.

Se o contorno do universo fosse apenas um ponto normal do espaço e do tempo, poderíamos ir além dele e decretar esse território como parte do universo. Já se fosse uma borda irregular onde o espaço e o tempo estivessem esmagados e a densidade fosse infinita, seria muito difícil definir condições de contorno significativas.



Se o contorno do espaço-tempo fosse simplesmente um ponto de espaço-tempo, poderíamos continuar a estender as fronteiras.



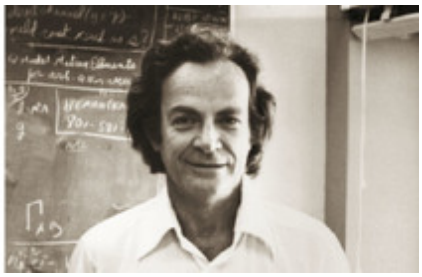


IMAGEM **P** (à esquerda): O quadro-negro do Caltech na época em que Feynman morreu, em 1988.

IMAGEM **Q** (à direita): Richard Feynman.

HISTÓRIAS DE FEYNMAN

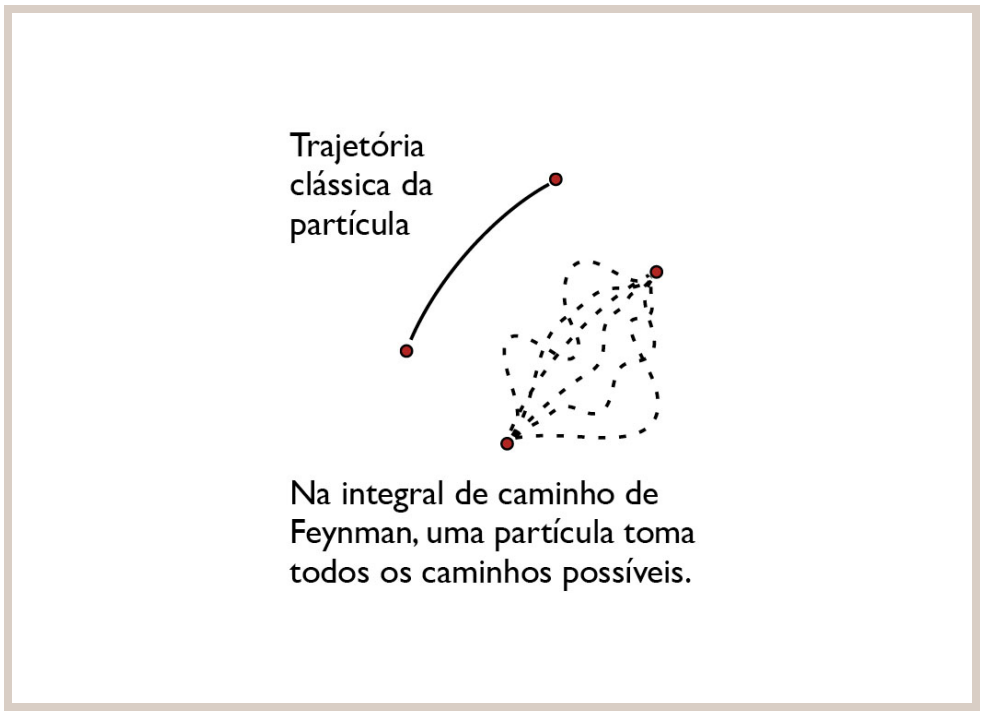
Nascido no Brooklyn, Nova York, em 1918, Richard Feynman completou seu doutorado sob a orientação de John Wheeler, na Universidade Princeton, em 1942.

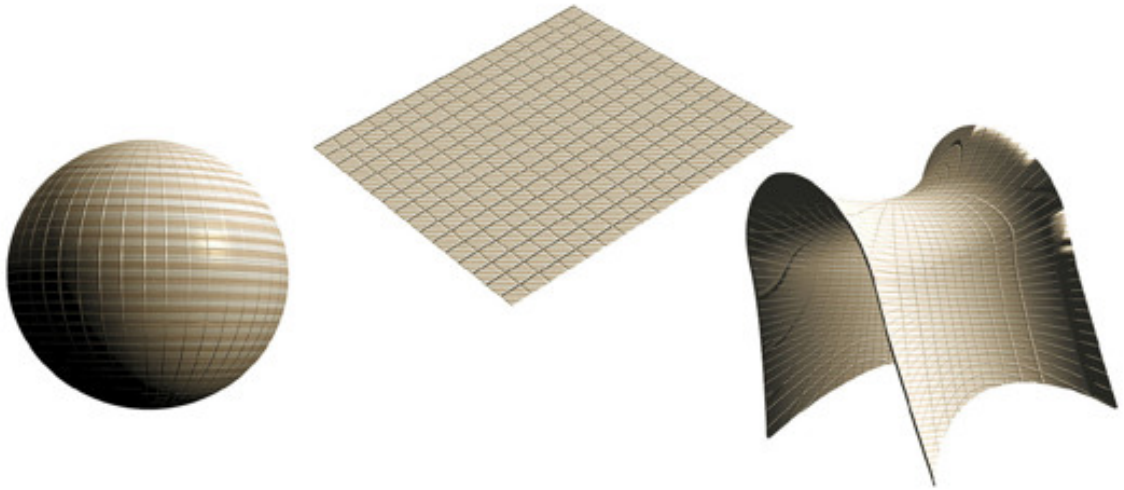
Pouco depois, ele foi atraído pelo Projeto Manhattan. Ali ficou conhecido tanto por sua personalidade exuberante como pelas travessuras — nos laboratórios de Los Alamos, ele costumava desvendar a combinação dos cofres com materiais ultrassecretos —, mas também por ser um físico excepcional: sua contribuição foi fundamental para a teoria da bomba atômica. A incansável curiosidade sobre o mundo de Feynman estava na raiz de sua existência. Não só foi o segredo de seu sucesso científico, como também o levou a inúmeros feitos impressionantes, como decifrar hieroglifos maias.

Nos anos que se seguiram à Segunda Guerra Mundial, Feynman descobriu um novo e poderoso modo de pensar sobre a mecânica quântica, pelo qual recebeu o Prêmio Nobel em 1965. Ele desafiou o pressuposto clássico básico de que cada partícula tem uma história particular. Em vez disso, sugeriu que as partículas viajam de um lugar para outro ao longo de toda trajetória possível do espaço- tempo. A cada trajetória, Feynman associou dois números, um para o tamanho — a amplitude — de uma onda e outro para sua fase — se ela está numa crista ou num vale. A probabilidade de uma partícula ir de A a B é definida pela soma das ondas associadas a cada trajetória possível que passa por A e B.

Todavia, no mundo cotidiano, parece-nos que os objetos seguem uma única trajetória entre sua origem e seu destino final. Isso está de acordo com as histórias múltiplas de Feynman (ou soma das histórias), porque para grandes objetos sua regra de atribuição de números a cada trajetória assegura que todas, exceto uma, cancelem-se quando suas contribuições são combinadas. Apenas uma em meio à infinidade de trajetórias é que importa em relação ao movimento dos objetos macroscópicos, e essa trajetória é precisamente a que emerge das leis do movimento clássicas de Newton.

Entretanto, Jim Hartle e eu notamos que havia uma terceira possibilidade. Talvez no universo não exista fronteira no espaço e tempo. À primeira vista, isso parece contradizer os teoremas demonstrados por Penrose e por mim, que mostravam que o universo deve ter tido um início. Porém, como explicado no Capítulo 2, há outro tipo de tempo, o tempo imaginário, perpendicular ao tempo real comum que percebemos transcorrer. A história do universo em tempo real determina sua história no tempo imaginário e vice-versa, mas os dois tipos de histórias podem ser bem diferentes. O universo não precisa ter um início ou fim no tempo imaginário. O tempo imaginário se comporta como outra direção no espaço. Assim, podemos pensar nas histórias do universo no tempo imaginário como superfícies curvas, como uma bola, um plano ou uma sela, mas com quatro dimensões em vez de duas (ver Figura 3.9).





(FIG 3.9) Se as histórias do universo seguissem para o infinito como uma sela, teríamos o problema de especificar quais seriam as condições de contorno no infinito. Se todas as histórias do universo no tempo imaginário fossem superfícies fechadas como a da Terra, não precisaríamos especificar nenhuma condição de contorno.

LEIS DE EVOLUÇÃO E CONDIÇÕES INICIAIS

As leis da física determinam como um estado inicial evolui com o tempo. Por exemplo, se jogamos uma pedra no ar, as leis da gravidade determinam acertadamente o movimento subsequente da pedra.

Mas não podemos prever onde a pedra vai aterrissar só com base nessas leis. Para isso, devemos saber também sua velocidade e direção ao partir de nossa mão. Em outras palavras, devemos saber as condições iniciais — as condições de contorno — do movimento da pedra.

A cosmologia tenta descrever a evolução de todo o universo usando essas leis da física. Por isso, devemos nos perguntar quais eram as condições iniciais do universo às quais poderemos aplicar essas leis.

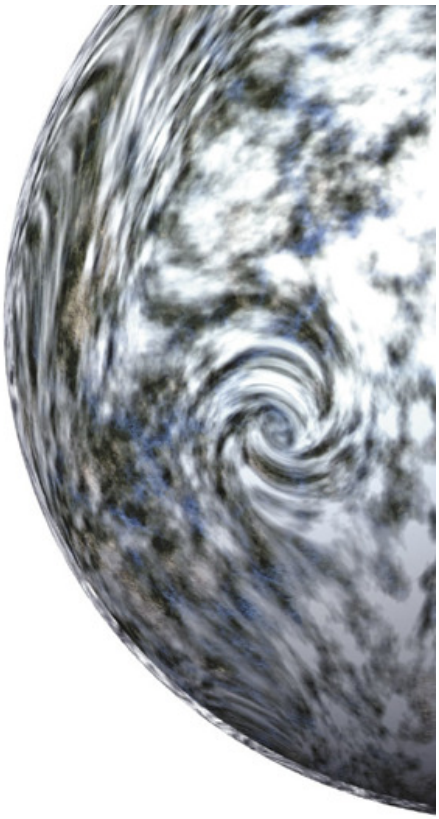
O estado inicial deve ter tido um profundo impacto nas características básicas do universo, talvez até nas propriedades das partículas elementares e nas forças que foram cruciais para o desenvolvimento da vida biológica. Uma proposta é a condição sem contorno, a proposição de que o tempo e o espaço são finitos, formando uma superfície fechada sem contorno, assim como a superfície da Terra é finita em tamanho mas não possui limite. A proposta da condição sem contorno está baseada na ideia da história múltipla de Feynman, mas a história de uma partícula na soma de Feynman foi substituída hoje por um espaço-tempo completo que representa a história do universo todo. A condição sem contorno é precisamente a restrição sobre as histórias possíveis do universo para aqueles espaços- tempos sem contorno no tempo imaginário. Em outras palavras, a condição de contorno do universo é a de que ele não tem contorno.

Hoje os cosmologistas estão investigando a probabilidade de que as configurações iniciais que são favorecidas pela proposição sem contorno, talvez junto com argumentos antrópicos fracos, evoluam para um universo como este que observamos.

Se as histórias do universo prosseguissem infinitamente como uma sela ou um plano, nosso problema seria especificar quais foram as condições de contorno no infinito. Contudo, podemos evitar a necessidade de especificar as condições de contorno se as histórias do universo no tempo imaginário forem superfícies fechadas, como a da Terra. A superfície terrestre não possui contornos ou limites. Não existem relatos confiáveis de gente caindo para fora do planeta.

Se as histórias do universo no tempo imaginário são de fato superfícies fechadas, como Hartle e eu propusemos, haveria implicações fundamentais para a filosofia e para a imagem que temos sobre o lugar de onde viemos. O universo seria inteiramente contido em si mesmo, não precisaria de nada fora dele para pôr seu mecanismo em movimento. Em vez disso, tudo seria determinado pelas leis da ciência e por lances de dados dentro do universo. Pode soar presunção, mas é nisso que eu e muitos outros cientistas acreditamos.

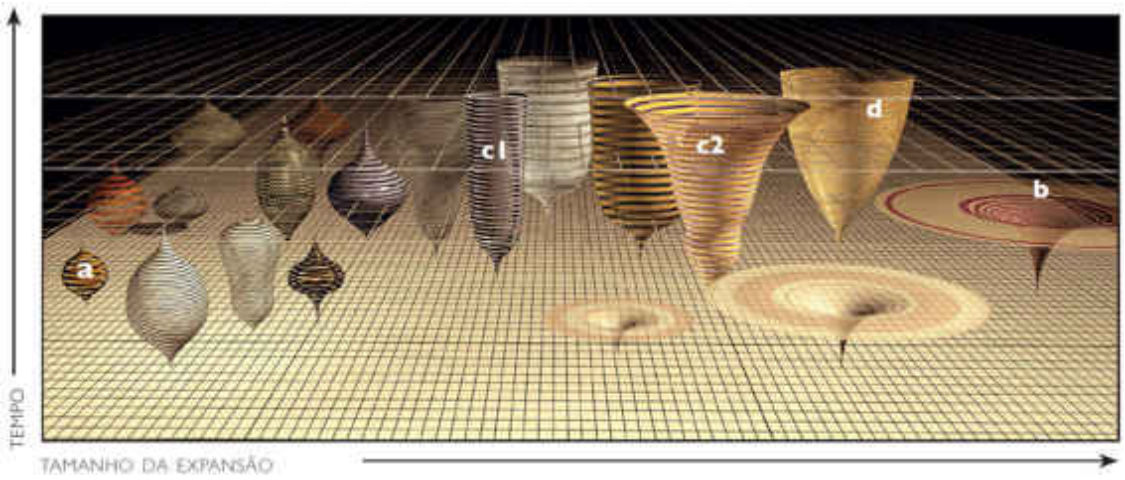




A superfície da Terra não tem nenhum limite ou borda. Relatos de pessoas despencando pela beirada parecem exagerados.







(FIG. 3.10)

No canto esquerdo da ilustração estão os universos (a) que entraram em colapso, tornando-se fechados. No canto direito, os universos abertos (b) que continuarão a se expandir para sempre.

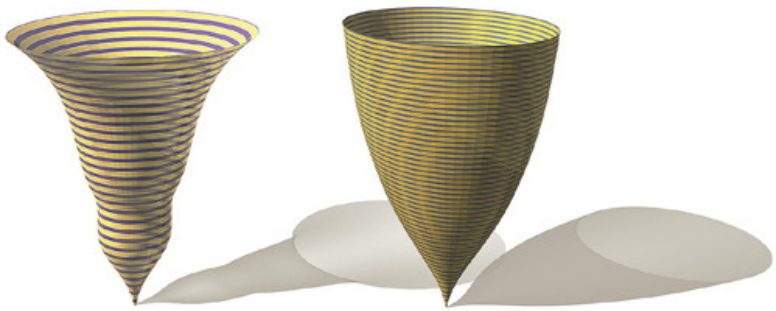
Esses universos críticos que atingiram um equilíbrio entre desabar sobre si mesmos e continuar a se expandir como (c1) ou a inflação dupla de (c2) podem abrigar vida inteligente. Nosso universo (d) está balanceado de modo a continuar se expandindo, por ora.

O PRINCÍPIO ANTRÓPICO

Falando de uma forma geral, o princípio antrópico sustenta que vemos o universo do modo como é, ao menos em parte, porque existimos. É uma perspectiva diametralmente oposta ao sonho de uma teoria inteiramente preditiva, unificada, em que as leis da natureza são completas e o mundo é do jeito que é porque não poderia ser de outro modo. Existem diferentes versões do princípio antrópico, indo das que são tão fracas a ponto de serem triviais às que são tão fortes que soam absurdas. Embora a maioria dos cientistas relute em adotar uma versão forte do princípio antrópico, poucas pessoas questionariam a utilidade de alguns argumentos antrópicos fracos.

O princípio antrópico fraco procura explicar quais das diversas possíveis eras ou partes do universo poderíamos habitar. Por exemplo, o motivo para o Big Bang ter ocorrido há cerca de dez bilhões de anos é que o universo deve ser antigo o suficiente para que algumas estrelas tenham completado sua evolução de modo a produzir elementos como oxigênio e carbono, dos quais somos feitos, e jovem o bastante para que algumas estrelas continuem a fornecer a energia que sustenta a vida.

Dentro do cenário da proposta sem contorno, podemos usar a regra de Feynman de atribuição de números a cada história do universo para descobrir quais propriedades do universo têm a maior probabilidade de ocorrer. Nesse contexto, o princípio antrópico entra em vigor devido à exigência de que as histórias contenham vida inteligente. Ficaríamos mais satisfeitos com o princípio antrópico, é claro, se pudéssemos demonstrar a probabilidade de que uma série de diferentes configurações iniciais para o universo evoluiu para produzir um universo como o que observamos. Isso significaria que o estado inicial da parte do universo que habitamos não precisou ser escolhida com grande cuidado.



A inflação dupla poderia abrigar vida inteligente (esquerda). A inflação de nosso universo continua a se expandir, por enquanto (direita).

Mesmo se a condição de contorno do universo for que ele não possui contorno, o universo não terá uma única história. Ele terá múltiplas histórias, como sugerido por Feynman. Haverá uma história no tempo imaginário correspondendo a toda superfície fechada possível, e todas as histórias no tempo imaginário determinarão a história no tempo real. Assim, temos uma superabundância de possibilidades para o universo. O que diferencia o universo em que vivemos do conjunto de todos os universos possíveis? Um ponto a observar é que muitas das histórias possíveis do universo não passam pela sequência de galáxias e estrelas se formando, algo essencial para o nosso desenvolvimento. Embora possa

acontecer de seres inteligentes se desenvolverem sem galáxias e estrelas, isso parece improvável. Assim, o mero fato de sermos capazes de fazer a pergunta “Por que o universo é do jeito que é?” constitui uma restrição à história na qual vivemos. Significa que ela é uma na minoria de histórias contendo galáxias e estrelas. É um exemplo do que chamamos de princípio antrópico. O princípio antrópico diz que o universo tem de ser mais ou menos como o vemos, pois, se fosse diferente, não haveria ninguém aqui para observá-lo (Figura 3.10). Muitos cientistas repudiam o princípio antrópico porque ele parece um tanto vago e aparentemente não guarda grande poder de previsão. No entanto, o princípio antrópico pode receber uma formulação precisa, e ela parece ser essencial quando estamos lidando com a origem do universo. A teoria-M, descrita no Capítulo 2, admite um número muito grande de histórias possíveis para o universo. A maioria dessas histórias não é propícia ao desenvolvimento da vida inteligente: são histórias vazias, duram muito pouco tempo, são recurvadas demais ou são inadequadas de algum outro modo. Contudo, segundo a ideia das múltiplas histórias de Richard Feynman, essas histórias não habitadas podem ter uma probabilidade muito alta (ver Figura 3.9).



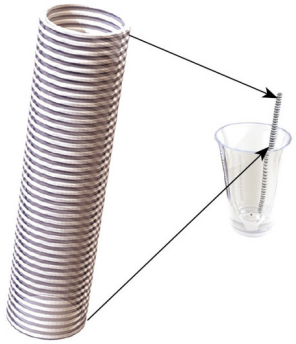
Na verdade, não importa realmente quantas histórias podem existir sem conter seres inteligentes. Estamos interessados apenas no subconjunto de

histórias em que a vida inteligente se desenvolve. Essa vida inteligente não precisa se parecer em nada com a humana. Pequenos alienígenas verdes funcionariam perfeitamente. Na realidade, podem vir a se sair bem melhor, pois a raça humana não tem um histórico muito bom de comportamento inteligente.





Como exemplo do poder do princípio antrópico, considere o número de direções no espaço. É uma questão da experiência cotidiana o fato de vivermos no espaço tridimensional. Ou seja, podemos representar a posição de um ponto no espaço com três números, como latitude, longitude e altura acima do nível do mar. Mas por que o espaço é tridimensional? Por que não possui duas, quatro ou algum outro número de dimensões, como na ficção científica? Na teoria-M, o espaço tem nove ou dez dimensões, mas acredita-se que seis ou sete sejam enroladas em escalas muito pequenas, restando três dimensões grandes e aproximadamente planas (Figura 3.11).



(FIG. 3.11)
De longe, um canudo de refrigerante parece uma linha unidimensional.

Por que não vivemos em uma história na qual oito dimensões sejam recurvadas em pequena escala, deixando apenas duas dimensões observáveis? Um animal bidimensional passaria por maus bocados para digerir sua comida. Se ele tivesse um sistema digestivo que o percorresse de ponta a ponta, suas entranhas o cortariam em dois e a pobre criatura se desmancharia. Assim, duas direções planas não são suficientes para algo tão complicado quanto a vida inteligente. Por outro lado, se houvesse quatro ou mais direções quase planas, a força gravitacional entre dois corpos aumentaria mais rápido à medida que se aproximassem um do outro. Isso significaria que os planetas não teriam órbitas estáveis em torno de seus sóis. Eles cairiam no sol (Figura 3.12A) ou escapariam para a escuridão e o frio exteriores (Figura 3.12B).

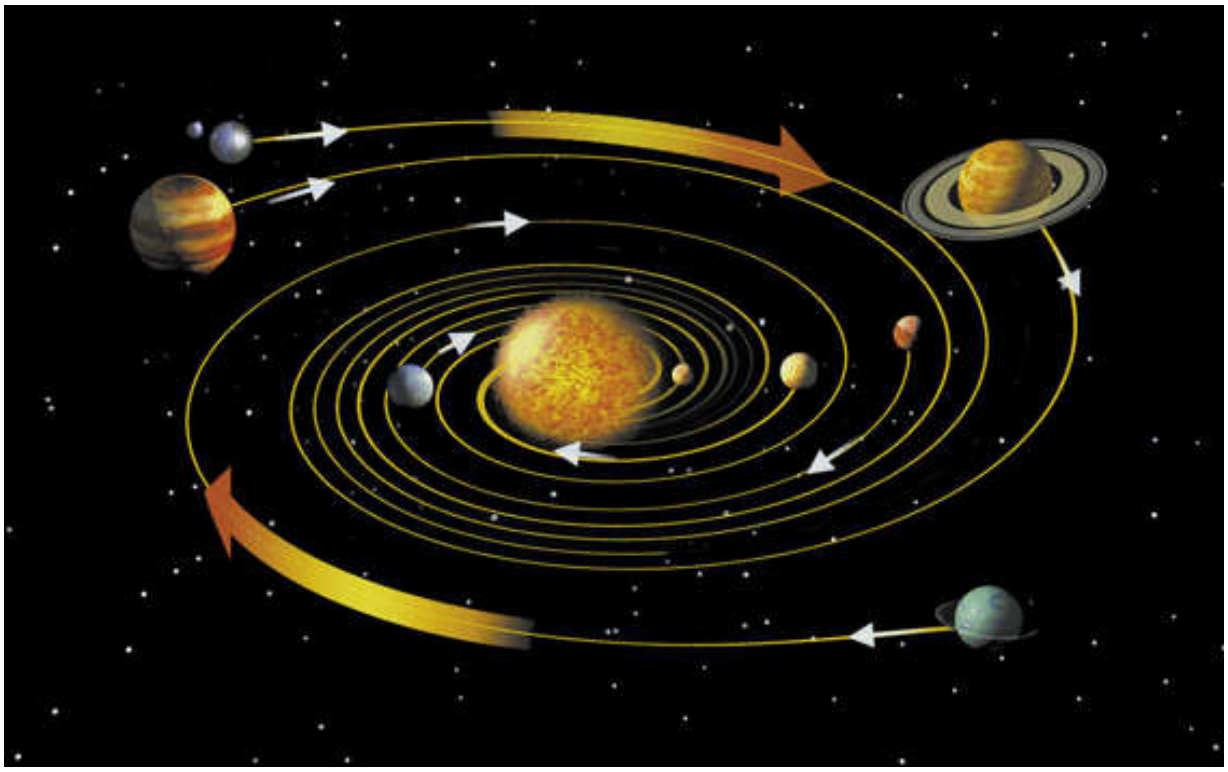


FIG. 3.12A

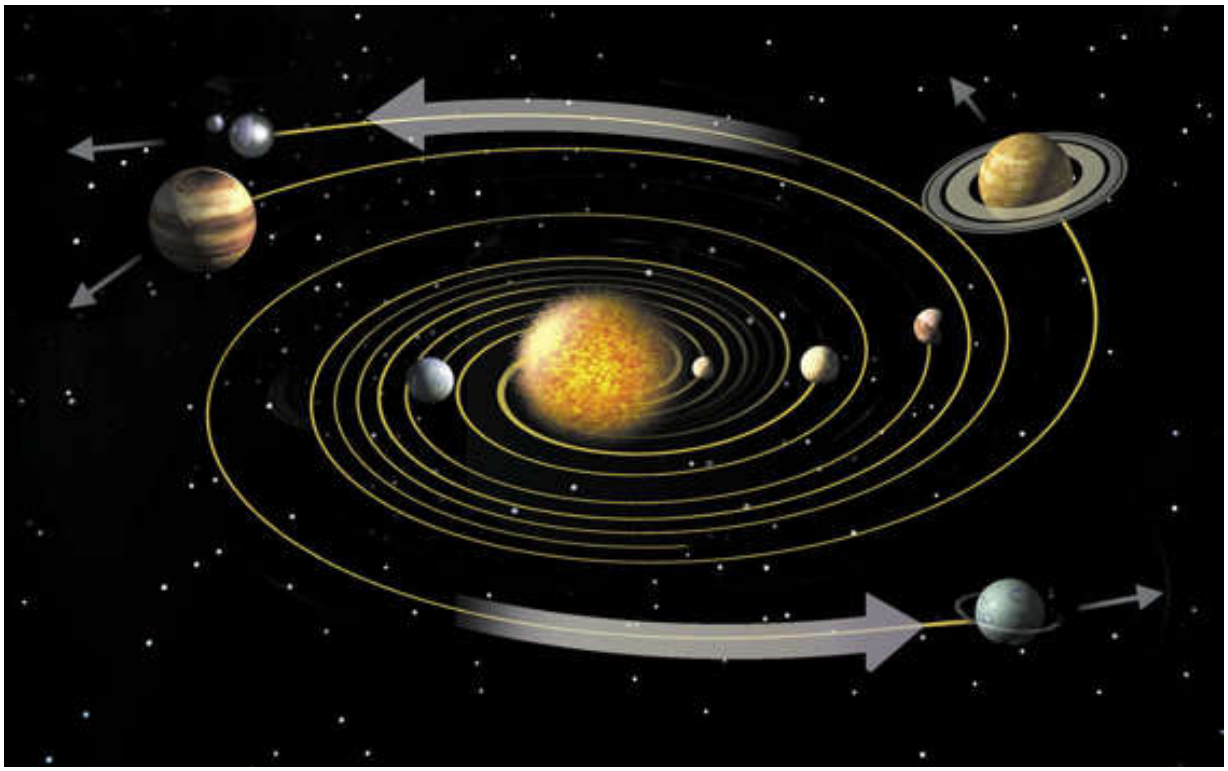


FIG. 3.12B



(FIG. 3.13)
A mais simples história no tempo imaginário sem contorno é uma esfera.
Isso determina uma história no tempo real que se expande de modo inflacionário.

Da mesma forma, as órbitas dos elétrons nos átomos não seriam estáveis, e a matéria tal como a conhecemos não existiria. Assim, embora a ideia de múltiplas histórias permitisse qualquer número de direções quase planas, apenas histórias com três direções planas conterão seres inteligentes. Apenas em tais histórias será feita a pergunta "Por que o espaço tem três dimensões?".

A história mais simples do universo no tempo imaginário é uma esfera redonda, como a superfície da Terra, mas com duas dimensões extras (Figura 3.13). Ela determina uma história do universo no tempo real vivenciado por nós, na qual o universo é o mesmo em todos os pontos do espaço e está se expandindo no tempo. Nesses aspectos, é como o universo em que vivemos. Contudo, a taxa de expansão é muito rápida — e vai ficando cada vez mais rápida. Essa expansão em aceleração é chamada de

inflação, pois é semelhante ao modo como os preços sobem sem parar a uma taxa cada vez maior.

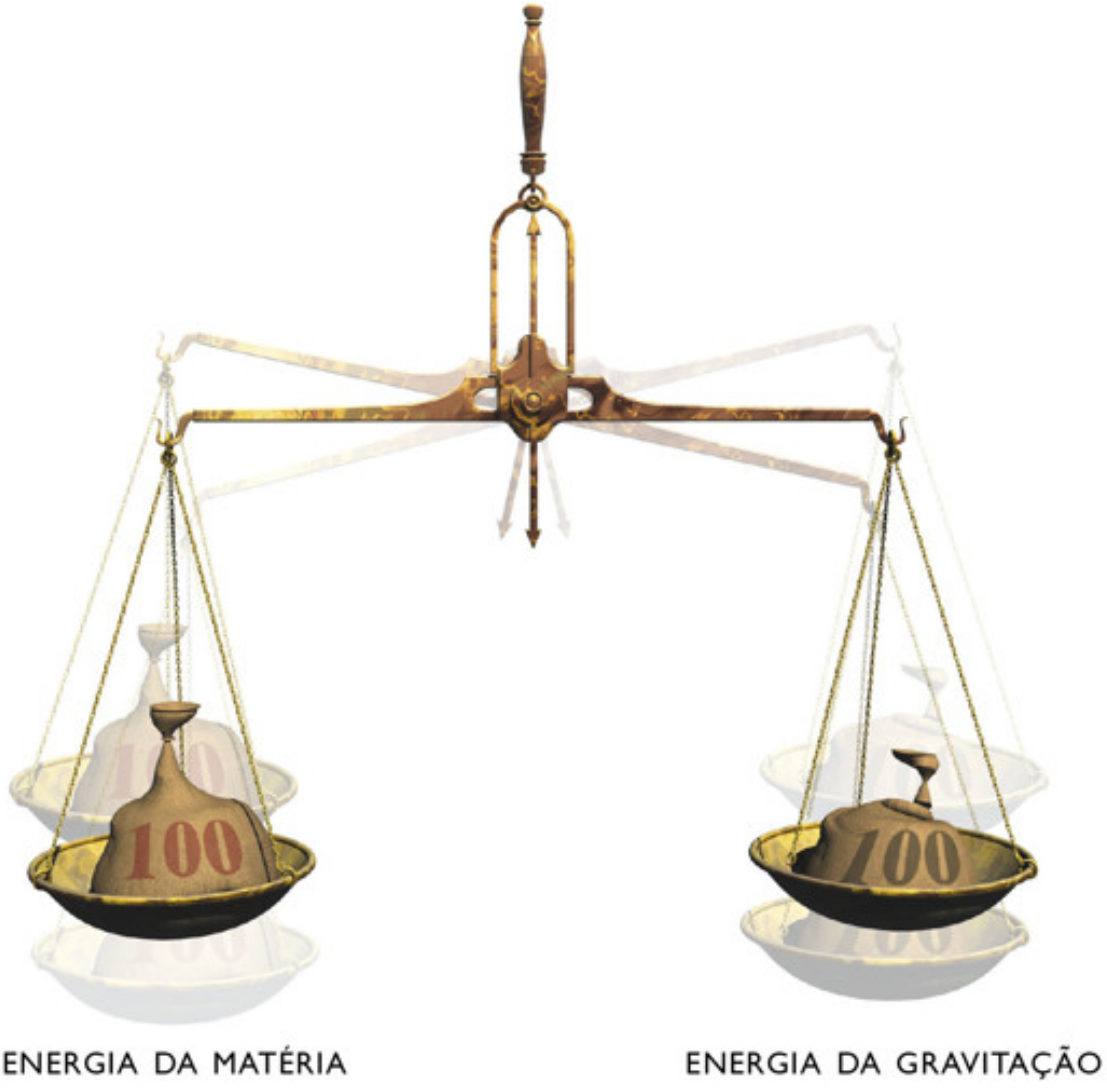
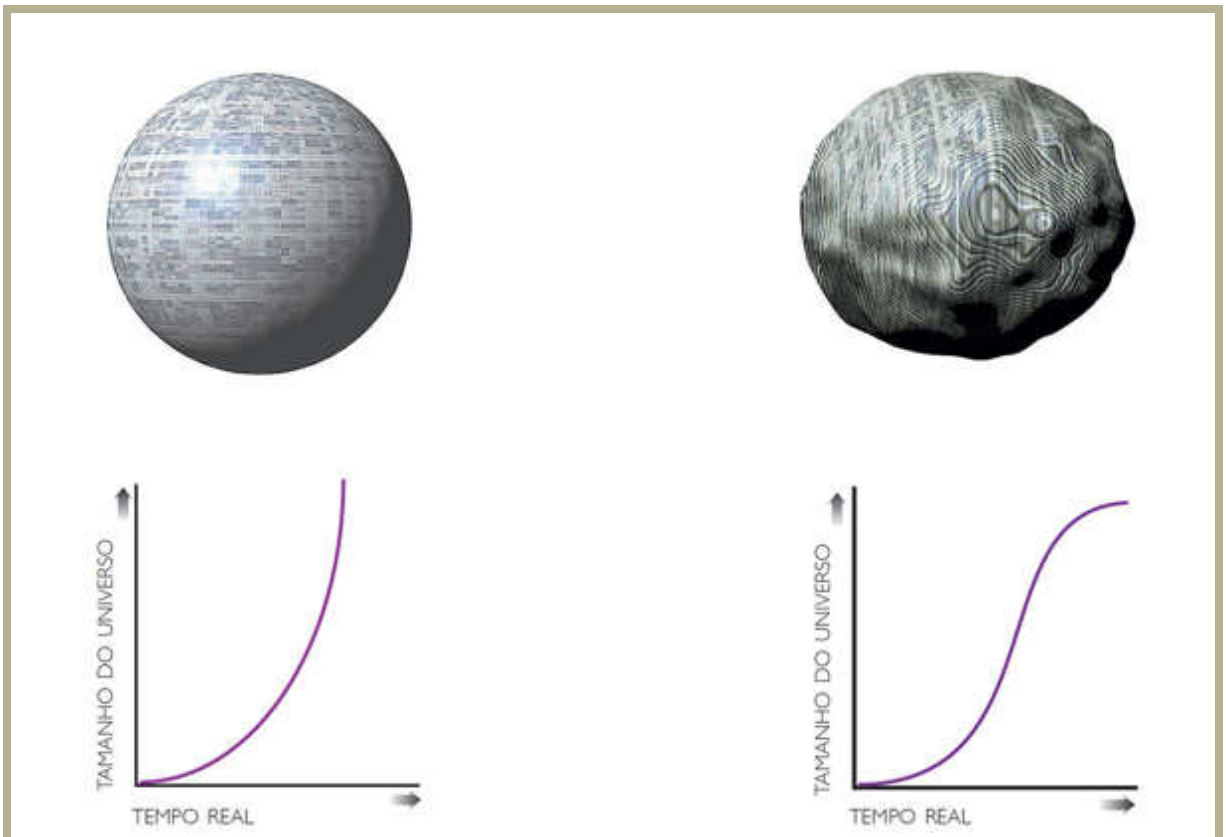


FIG. 3.14

A inflação nos preços de modo geral é vista como uma coisa ruim, mas no caso do universo ela é muito benéfica. A grande quantidade de expansão suaviza quaisquer protuberâncias e inchaços que possa ter havido no universo primitivo. À medida que o universo se expande, ele toma emprestada a energia do campo gravitacional para criar mais

matéria. A energia da matéria, positiva, é contrabalançada de forma precisa pela energia gravitacional, negativa, e assim a energia total é zero. Quando o universo dobra de tamanho, a matéria e as energias gravitacionais também dobram — de modo que duas vezes zero continua sendo zero. Quem dera o sistema bancário mundial fosse assim tão simples (Figura 3.14).



(FIG. 3.15) O UNIVERSO INFLACIONÁRIO

No modelo do Big Bang quente, não havia tempo suficiente no universo primitivo para o calor fluir de uma região a outra. Entretanto, observamos que, a despeito da direção em que olhemos, a temperatura da radiação de fundo em micro-ondas é a mesma. Isso significa que o estado inicial do universo deve ter tido exatamente a mesma temperatura em toda parte.

Na tentativa de encontrar um modelo em que muitas configurações iniciais poderiam ter evoluído para algo como o presente universo, foi sugerido que o universo primitivo talvez tenha passado por um período de expansão muito rápida. Dizemos que essa expansão é inflacionária, ou seja, ela ocorre a uma taxa cada vez maior, e não na taxa de expansão decrescente que observamos hoje. Uma fase inflacionária como essa poderia fornecer a explicação para o problema de por que o universo

parece o mesmo em todas as direções, pois haveria tempo suficiente para que a luz viajasse de uma região a outra no universo primitivo.

A história correspondente no tempo imaginário de um universo que continua a se expandir de maneira inflacionária para sempre é uma esfera perfeitamente redonda. Contudo, em nosso universo a expansão inflacionária diminuiu após uma fração de segundo e as galáxias puderam se formar. No tempo imaginário, isso significa que a história de nosso universo é uma esfera com o polo Sul ligeiramente achatado.

Se a história do universo no tempo imaginário fosse uma esfera perfeitamente redonda, a história correspondente no tempo real seria um universo que continuou a se expandir de modo inflacionário para sempre. Enquanto o universo fosse inflacionário, a matéria não poderia cair e se juntar para formar galáxias e estrelas, e tampouco a vida, muito menos vida inteligente, como nós, poderia se desenvolver. Assim, embora as histórias do universo no tempo imaginário que são esferas perfeitamente redondas sejam admitidas pelo conceito de histórias múltiplas, elas não despertam grande interesse. Entretanto, histórias do tempo imaginário que são ligeiramente achatadas no polo Sul das esferas têm mais relevância (Figura 3.15).

ÍNDICE DE PREÇOS NO ATACADO — INFLAÇÃO E HIPERINFLAÇÃO

Julho de 1914	1,0
Janeiro de 1919	2,6
Julho de 1919	3,4
Janeiro de 1920	12,6
Janeiro de 1921	14,4
Julho de 1921	14,3
Janeiro de 1922	36,7
Julho de 1922	100,6
Janeiro de 1923	2.785,0
Julho de 1923	194.000,0
Novembro de 1923	726.000.000.000,0



1 marco alemão em 1914



10 mil marcos em 1923



2 milhões de marcos em 1923



10 milhões de marcos em 1923



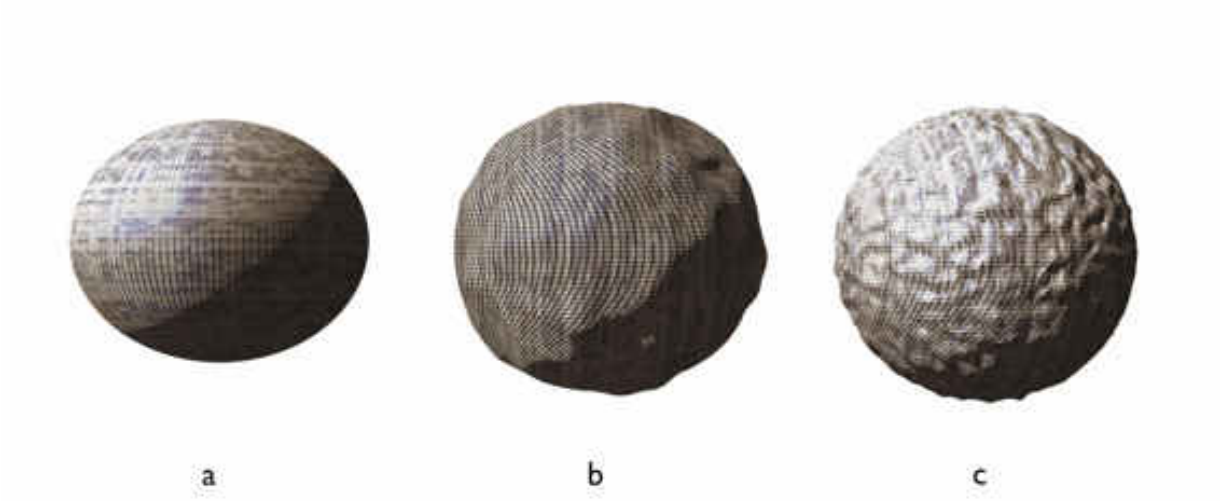
1 bilhão de marcos em 1923

(FIG. 3.16)

A INFLAÇÃO PODE SER UMA LEI DA NATUREZA

A inflação na Alemanha aumentou no pós-guerra até que, em fevereiro de 1920, o nível dos preços estava cinco vezes mais elevado do que em 1918. Após julho de 1922, a fase da hiperinflação começou. Toda confiança no dinheiro evaporou e o índice de preços subiu cada vez mais rápido por quinze meses, superando a capacidade das prensas, que não conseguiram produzir dinheiro na velocidade com que ele era desvalorizado. No fim de 1923, trezentas fábricas de papel operavam na capacidade máxima e 150 gráficas mantinham duas mil impressoras rodando dia e noite para produzir cédulas.

Nesse caso, a história correspondente no tempo real se expandirá de maneira acelerada, inflacionária, no início. Mas depois a expansão começará a diminuir e galáxias podem se formar. Para que a vida inteligente consiga se desenvolver, o achatamento do polo Sul deve ser muito leve. Isso significará que o universo vai se expandir inicialmente em enorme escala. O nível recorde de inflação monetária ocorreu na Alemanha no período entreguerras, quando os preços subiram bilhões de vezes — mas a escala da inflação que deve ter ocorrido no universo é no mínimo um bilhão de bilhão de bilhão de vezes isso (Figura 3.16).



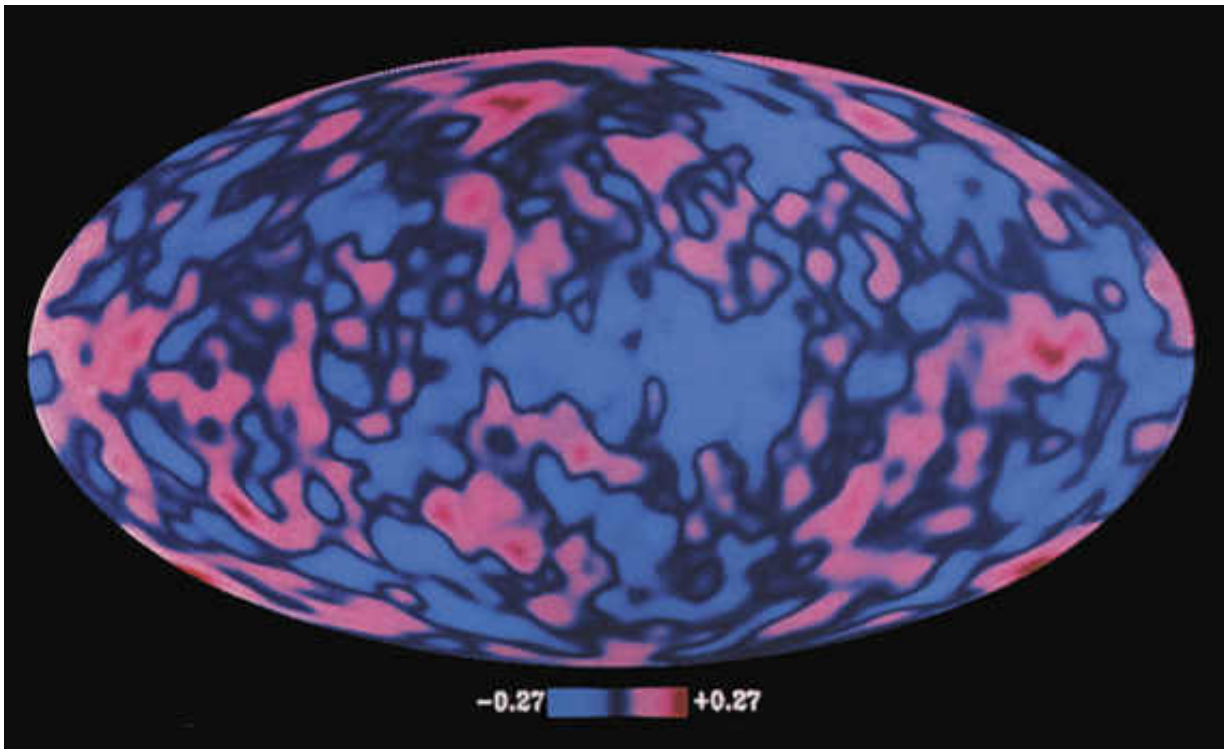
(FIG. 3.17)
HISTÓRIAS PROVÁVEIS E IMPROVÁVEIS
Histórias lisas como (a) são as mais prováveis, embora haja apenas um pequeno número delas.

Ainda que as histórias ligeiramente irregulares (b) e (c) sejam menos prováveis, existe um número tão grande delas que as histórias prováveis do universo apresentarão pequenos desvios do estado liso.

Devido ao princípio da incerteza, não haverá uma única história do universo capaz de conter vida inteligente. Na verdade, as histórias no tempo imaginário serão toda uma família de esferas ligeiramente deformadas, cada uma correspondendo a uma história no tempo real em que o universo é inflacionado por um longo tempo, mas não de maneira indefinida. Podemos então nos perguntar qual dessas histórias admissíveis é a mais provável. Acontece que as histórias mais prováveis não são de todo lisas, mas apresentam pequenos altos e baixos (Figura 3.17). As ondulações nas histórias mais prováveis de fato são minúsculas. Os desvios da condição de lisura são da ordem de uma parte por cem mil. Não obstante, embora sejam extremamente pequenas, conseguimos observá-las como pequenas variações nas micro-ondas que nos chegam de diferentes direções no espaço. O satélite Cosmic Background Explorer [Explorador do Fundo Cósmico, também conhecido como Cobe] foi lançado em 1989 e obteve um mapa do céu em micro-ondas.

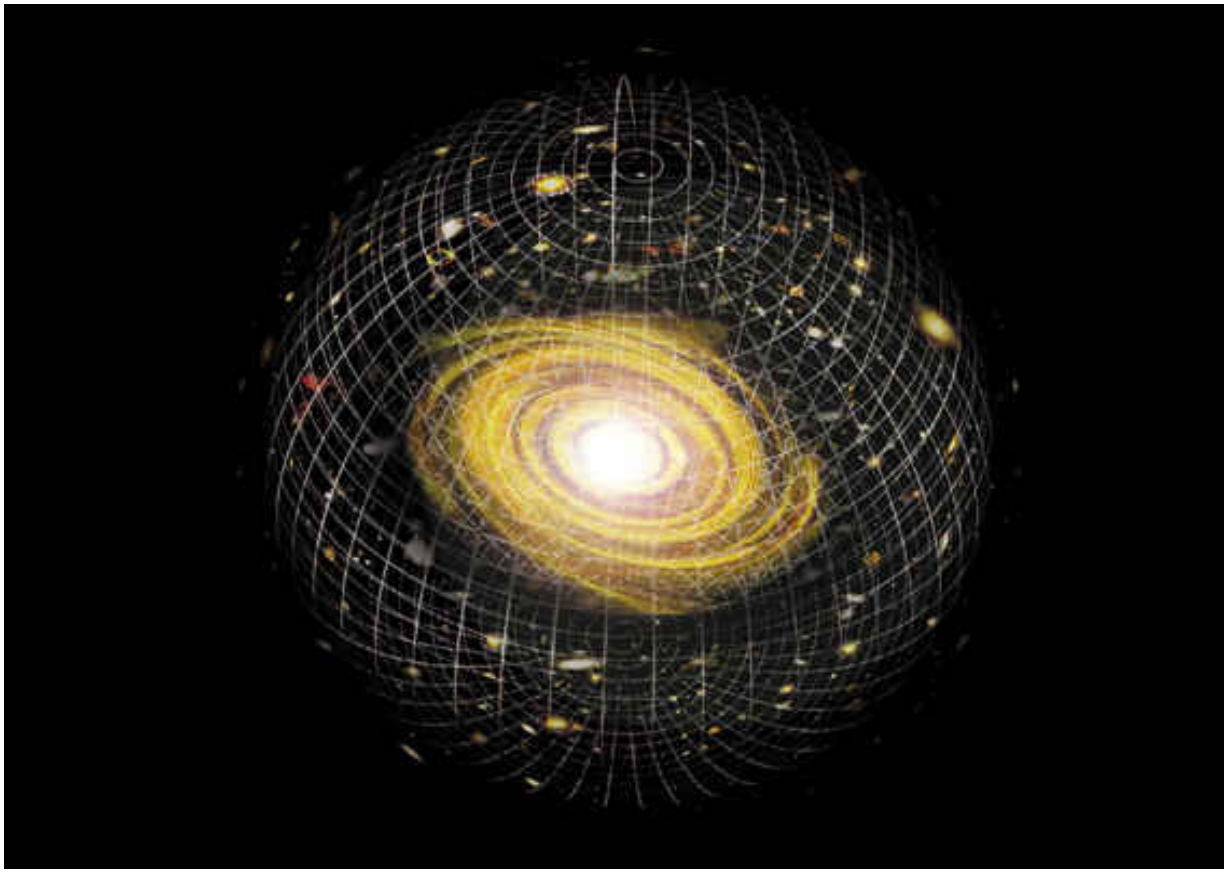
As cores diferentes indicam diferentes temperaturas, mas o espectro total do vermelho ao azul é de apenas cerca de um décimo de milésimo de

grau. Contudo, essa variação entre as diferentes regiões do universo primitivo é suficiente para que a atração gravitacional extra nas regiões mais densas acabe por impedi-las de se expandir e as leve a ceder novamente sob o peso da própria gravidade para formar as galáxias e estrelas. Assim, ao menos em princípio, o mapa do Cobe é a planta baixa de todas as estruturas existentes no universo.



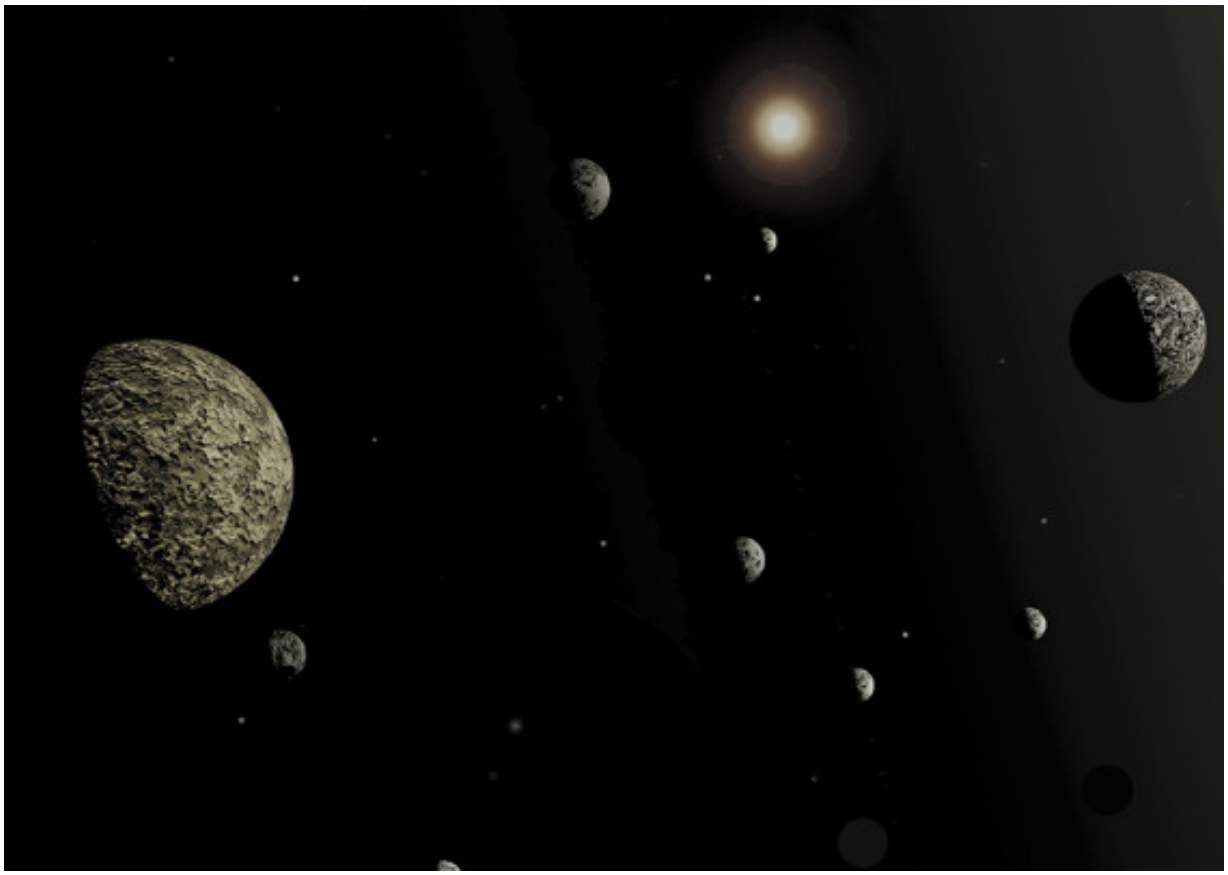
O mapa completo do céu feito pelo instrumento DMR do satélite Cobe, mostrando evidências de rugosidades no tempo.

Como se comportarão no futuro as histórias mais prováveis do universo que são compatíveis com o surgimento da vida inteligente? Parece haver diversas possibilidades, dependendo da quantidade de matéria no universo. Se houver mais do que uma determinada quantidade crítica, a atração gravitacional entre as galáxias vai diminuir sua velocidade e acabará por deter seu afastamento. Elas começarão a despencar umas sobre as outras e se esmagarão num grande colapso, o Big Crunch, que significará o fim da história do universo no tempo real (ver Figura 3.18).



(FIG. 3.18)
Um possível fim do universo é o Big Crunch, em que toda matéria será sugada em um vasto poço gravitacional cataclísmico.

Se a densidade do universo estiver abaixo do valor crítico, a gravidade será fraca demais para impedir as galáxias de se afastarem eternamente. Todas as estrelas vão se extinguir e o universo ficará cada vez mais vazio e frio. Assim, mais uma vez, as coisas chegarão ao fim, mas de maneira menos dramática. De um modo ou de outro, o universo ainda tem alguns bilhões de anos pela frente (Figura 3.19).



(FIG. 3.19)
O longo e frio lamento em que tudo desaba e as derradeiras estrelas se apagam, após terem exaurido seu combustível.

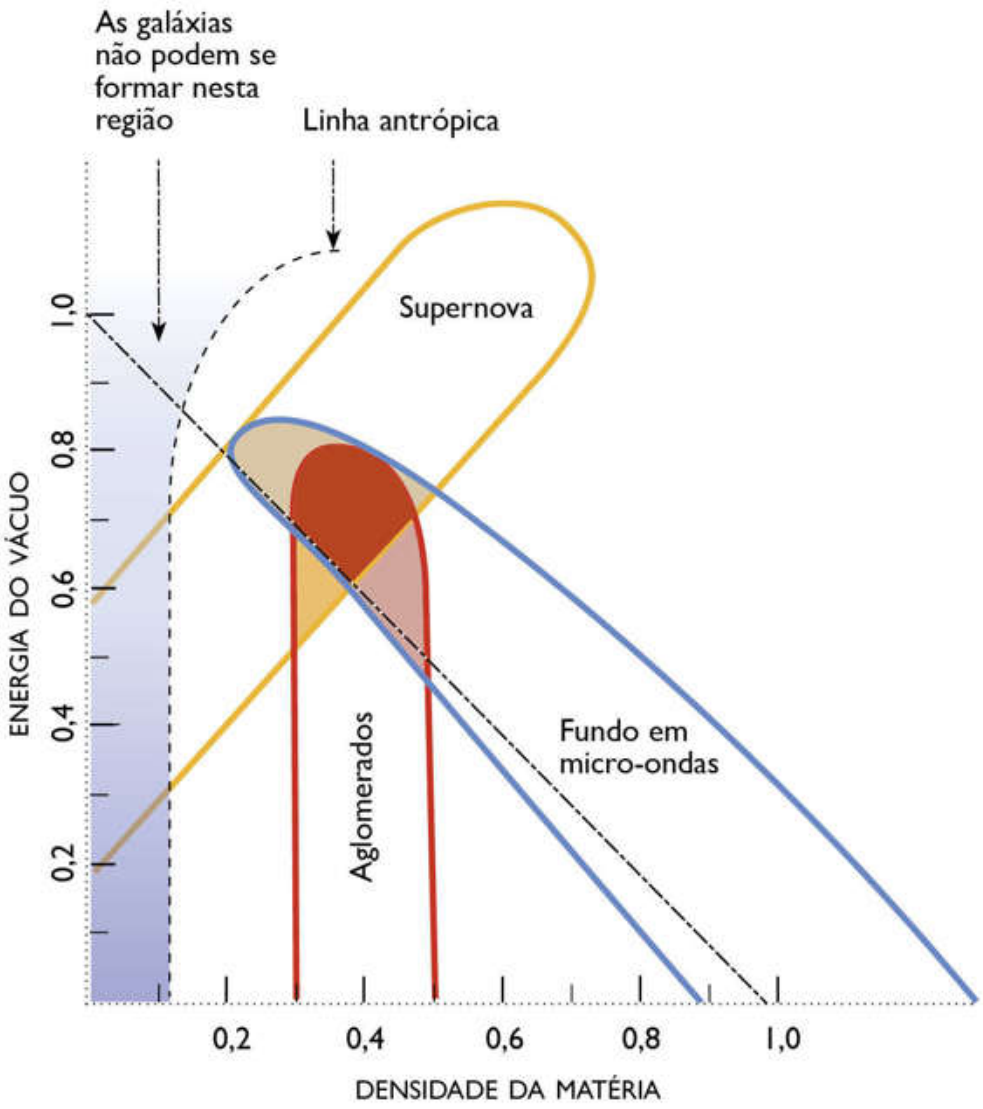
Além da matéria, o universo deve conter o que chamamos de "energia do vácuo", uma energia que está presente até no espaço aparentemente vazio. Segundo a famosa equação $E = mc^2$ de Einstein, essa energia do vácuo possui massa. Isso significa que ela exerce um efeito gravitacional sobre a expansão do universo. Mas, de maneira bastante notável, o efeito da energia do vácuo é oposto ao da matéria. A matéria leva a expansão a diminuir e pode terminar por detê-la e revertê-la. Por outro lado, a energia do vácuo leva a expansão a acelerar, como na inflação. De fato, a energia do vácuo atua exatamente como a constante cosmológica mencionada no Capítulo 1, que Einstein adicionou a suas equações originais em 1917, quando percebeu que elas não admitiam uma solução representando um universo estático. Depois que Hubble descobriu que o universo estava em expansão, essa motivação para acrescentar um termo às equações

desapareceu, e Einstein rejeitou a constante cosmológica como sendo um erro.

A
CONSTANTE
COSMOLÓGICA
FOI MEU
MAIOR
EQUÍVOCO?

Albert Einsten

Porém, talvez ela não tenha sido erro algum. Como descrito no Capítulo 2, hoje entendemos que segundo a teoria quântica o espaço-tempo é cheio de flutuações quânticas. Em uma teoria supersimétrica, as energias positiva e negativa infinitas dessas flutuações do estado fundamental são anuladas entre partículas de *spin* diferente. Mas não se espera que as energias positiva e negativa se anulem tão completamente que não reste uma quantidade pequena e finita de energia do vácuo, pois o universo não se encontra em estado supersimétrico. A única surpresa é que a energia do vácuo é tão próxima de zero que, algum tempo atrás, ela não era óbvia. Talvez isso seja mais um exemplo do princípio antrópico. Uma história com uma energia do vácuo maior não teria formado as galáxias, e assim não conteria seres capazes de fazer a pergunta “Por que a energia do vácuo tem o valor que observamos?”.



(FIG. 3.20)
Ao combinar observações de supernovas distantes, da radiação cósmica de fundo em micro-ondas e da distribuição da matéria no universo, podemos calcular com razoável precisão a energia do vácuo e a densidade da matéria.

Podemos determinar as quantidades de matéria e energia do vácuo no universo a partir de várias observações. Podemos mostrar os resultados em um diagrama no qual a densidade da matéria é a direção horizontal e a energia do vácuo é a direção vertical. A linha tracejada mostra o limite da região em que a vida inteligente pode se desenvolver (Figura 3.20).

Eu poderia ficar encerrado numa casca de noz
e me considerar rei do espaço infinito…

Shakespeare,
Hamlet, ato 2, cena 2



Observações de supernovas, aglomerados de galáxias e da radiação de fundo em micro-ondas delineiam as regiões nesse diagrama. Felizmente, todas as três regiões têm uma interseção comum. Se a densidade da matéria e a energia do vácuo residirem nessa interseção, isso significará que a expansão do universo começou a se acelerar outra vez, após um longo período de desaceleração. Ao que parece, a inflação é uma lei da natureza.

Neste capítulo, vimos como o comportamento do vasto universo pode ser compreendido em termos de sua história no tempo imaginário, que é uma esfera minúscula, ligeiramente achatada. Ela é como a casca de noz de Hamlet, contudo, essa noz codifica tudo que ocorre no tempo real. Logo, Hamlet tinha razão. Poderíamos estar encerrados em uma casca de noz e ainda assim nos considerarmos reis do espaço infinito.

---

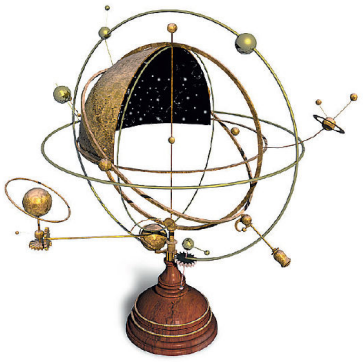
* *"I could be bounded in a nutshell/ and count myself a king of infinite space…"* Vale lembrar aqui que a expressão idiomática *"in a nutshell"* no título deste livro significa também "em suma". (N.T.)

** O autor se refere à continuação da fala de Hamlet: *"were it not that I have bad dreams"* (não fosse o fato de ter sonhos ruins). (N.T.)

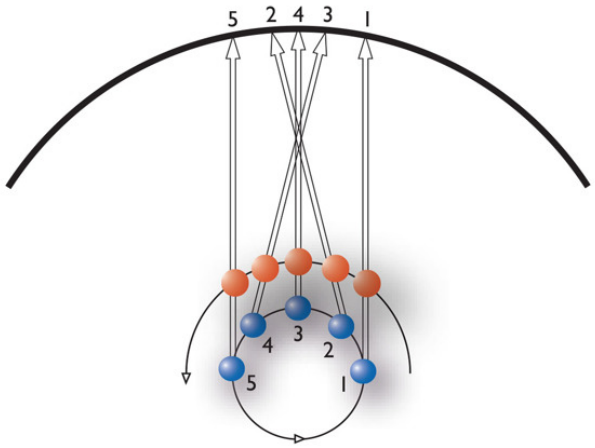
CAPÍTULO 4

PREVENDO O FUTURO

Como a perda de informação nos buracos negros pode reduzir nossa capacidade de prever o futuro.



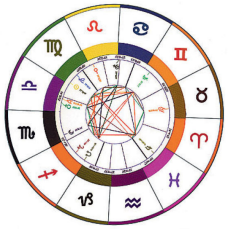




(FIG. 4.1)
Um observador na Terra (azul) orbitando o Sol vê Marte (vermelho) contra um fundo de constelações.

O complicado movimento aparente dos planetas no céu pode ser explicado pelas leis de Newton e não tem a menor influência nos destinos pessoais.

A ESPÉCIE HUMANA sempre quis controlar o futuro, ou ao menos prever o que vai acontecer. Por isso a astrologia é tão popular. A astrologia afirma que os eventos na Terra estão relacionados aos movimentos dos planetas através do céu. É uma hipótese cientificamente testável, ou seria, se os astrólogos se arriscassem a fazer previsões conclusivas que pudessem ser testadas. Entretanto, bastante ajuizadamente, seus prognósticos são tão vagos que podem ser aplicados a qualquer resultado. É impossível testar e demonstrar o erro de afirmações como “As relações pessoais devem ficar intensas” ou “Você vai ter uma oportunidade financeira recompensadora”.

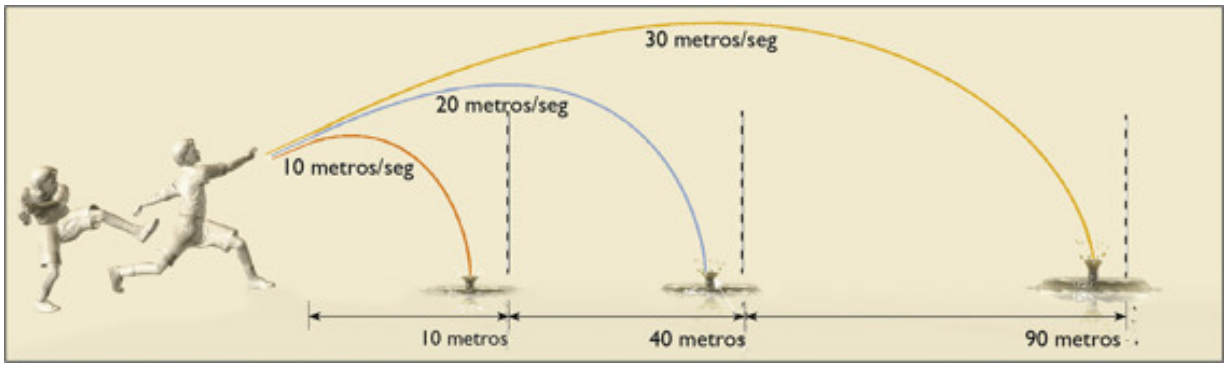


"Marte está em Sagitário neste mês e para você será um período de buscar autoconhecimento. Marte lhe pede para viver a vida segundo o que você acredita, e não fazendo o que os outros acham correto. E isso vai acontecer.

No dia 20, Saturno entra na área de seu mapa ligada ao compromisso e à carreira, e você estará aprendendo a assumir responsabilidades e lidar com relacionamentos difíceis.

Porém, na época da Lua cheia, você terá uma maravilhosa revelação e uma visão em perspectiva de toda sua vida que irão transformar você."

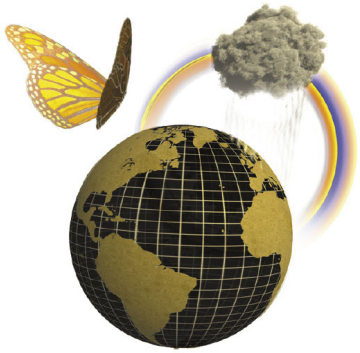
Porém, o motivo real para a maioria dos cientistas duvidar da astrologia não é a evidência científica, ou a falta dela, mas o fato de a astrologia não ser consistente com outras teorias que foram testadas pela experimentação. Quando Copérnico e Galileu descobriram que os planetas orbitam o Sol, não a Terra, e Newton descobriu as leis que governam seus movimentos, a astrologia se tornou extremamente implausível. Por que as posições dos demais planetas contra o fundo celeste, tal como visto da Terra, teriam qualquer correlação com as macromoléculas de um planeta menor que se autodenominam vida inteligente (Figura 4.1)? Contudo, é isso que a astrologia quer nos fazer crer. É verdade que não há mais evidência experimental para algumas das teorias descritas neste livro do que há para a astrologia, mas acreditamos nelas porque são consistentes com as teorias que sobreviveram ao teste.



(FIG. 4.2)
Se sabemos onde e a que velocidade uma bola de beisebol é atirada, podemos prever para onde ela vai.

O sucesso das leis de Newton e de outras teorias físicas levou à ideia do determinismo científico, que foi expresso pela primeira vez no início do

século XIX pelo cientista francês marquês de Laplace. Laplace sugeriu que, se soubéssemos as posições e velocidades de todas as partículas do universo a um dado momento, as leis da física nos permitiriam prever qual seria o estado do universo a qualquer outro dado momento no passado ou no futuro (Figura 4.2).



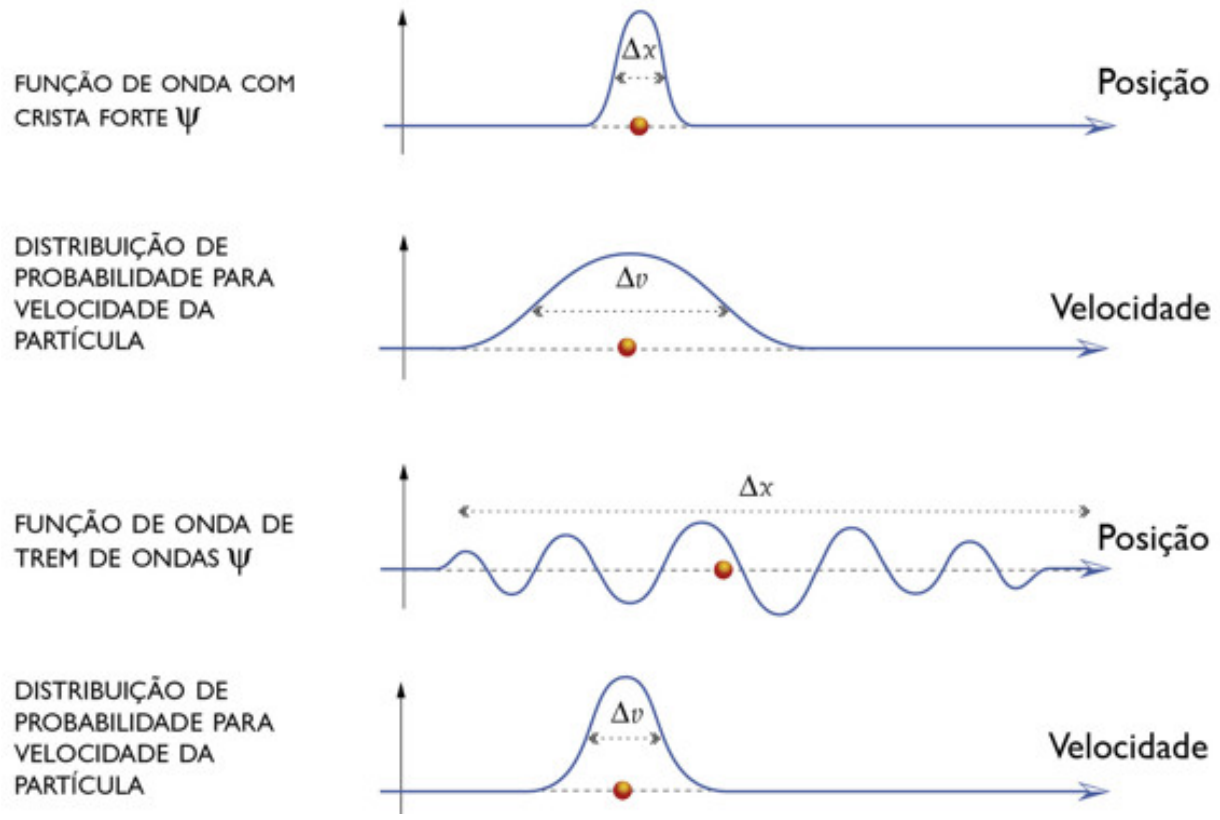
(FIG. 4.3)

Em outras palavras, se o determinismo científico fosse válido, deveríamos em princípio ser capazes de prever o futuro e não precisaríamos da astrologia. É claro que, na prática, mesmo algo tão simples quanto a teoria da gravidade de Newton gera equações que não podem ser solucionadas para mais do que duas partículas. Além disso, as equações muitas vezes apresentam uma propriedade conhecida como caos, de modo que uma pequena mudança na posição ou na velocidade a um dado momento pode levar a um comportamento completamente diferente em momentos posteriores. Como quem assistiu a *Jurassic Park*, de 1993,bem sabe, uma pequena perturbação num local pode causar uma grande mudança em outro. Uma borboleta batendo asas em Tóquio pode provocar chuva no Central Park, em Nova York (Figura 4.3). O problema é que a sequência de eventos não pode ser repetida. Da próxima vez que a borboleta bater asas, uma infinidade de outros fatores será diferente e também influenciará o clima. É por isso que previsões meteorológicas são tão pouco confiáveis.

Assim, embora em princípio as leis da eletrodinâmica quântica devam possibilitar que calculemos tudo em química e biologia, não temos tido grande sucesso em prever o comportamento humano a partir de equações matemáticas. Não obstante, apesar dessas dificuldades práticas, a maioria dos cientistas busca conforto na ideia de que, mais uma vez em princípio, o futuro pode ser previsto.



À primeira vista, o determinismo também pareceria ameaçado pelo princípio da incerteza, que diz que não podemos medir com precisão ao mesmo tempo a posição e a velocidade de uma partícula a um dado momento. Quanto mais precisa for a medição da posição, menos precisa será a determinação da velocidade, e vice-versa. A versão de Laplace do determinismo científico sustentava que, se soubéssemos as posições e velocidades das partículas a um dado momento, poderíamos determinar suas posições e velocidades a qualquer momento no passado ou no futuro. Mas como podemos começar a fazer isso se o princípio da incerteza nos impede de saber com precisão as posições e as velocidades a um dado momento? Por melhor que seja nosso computador, se o alimentarmos com dados precários, receberemos previsões precárias.



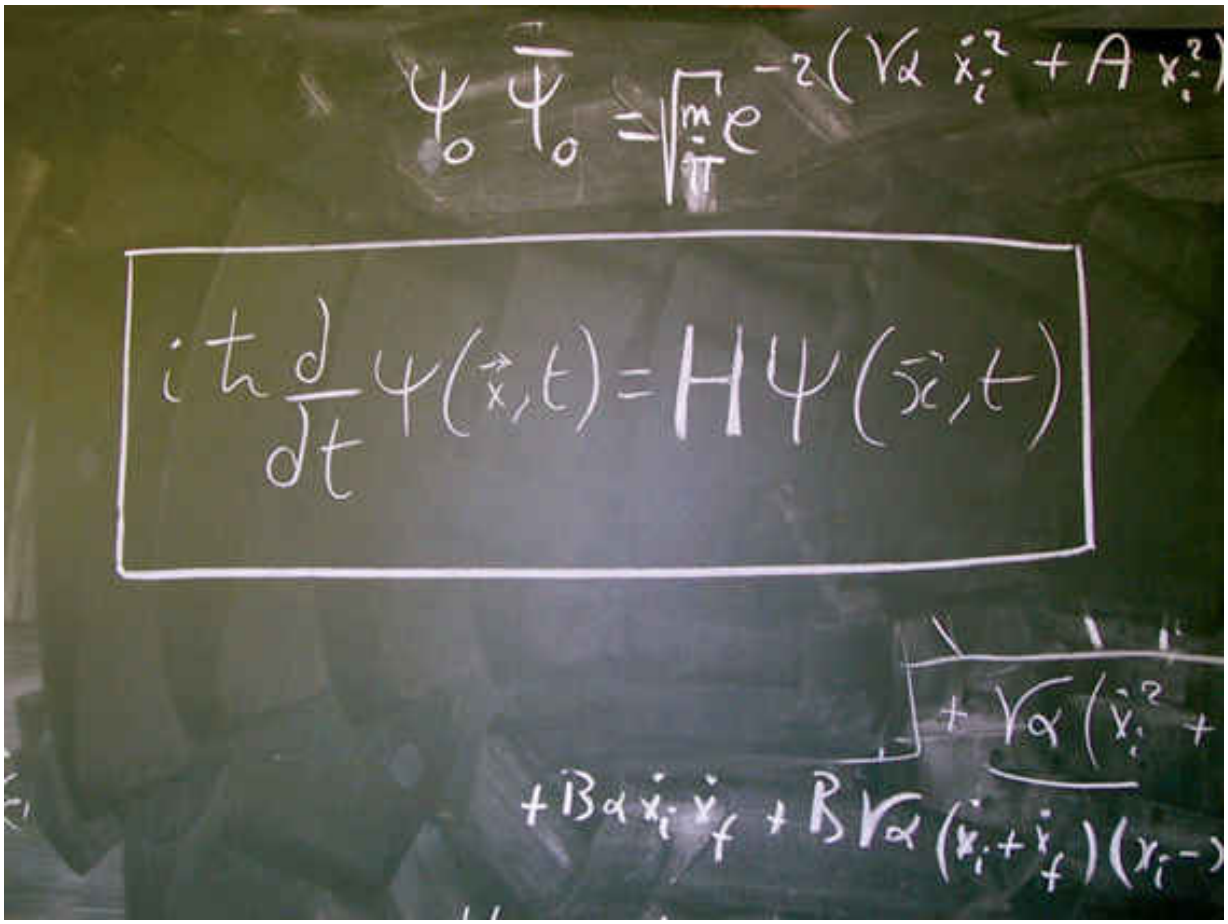
(FIG. 4.4)

A função de onda determina as probabilidades de que a partícula tenha diferentes posições e velocidades de tal maneira que Δx e Δv obedeçam ao princípio da incerteza.

No entanto, o determinismo *foi* resgatado de forma modificada em uma nova teoria chamada mecânica quântica, que incorporou o princípio da incerteza. Na mecânica quântica, é possível, *grosso modo*, prever com precisão metade do que poderíamos esperar prever sob o ponto de vista clássico de Laplace. Na mecânica quântica, uma partícula não tem posição ou velocidade bem definida, mas seu estado *pode* ser representado pelo que chamamos de função de onda (Figura 4.4).

Função de onda é um número em cada ponto do espaço que fornece a probabilidade de que a partícula seja encontrada nessa posição. A taxa à qual a função de onda muda de um ponto para outro indica quão prováveis são as diferentes velocidades da partícula. Algumas funções de onda apresentam crista acentuada em um ponto específico no espaço. Nesses casos, há apenas uma pequena dose de incerteza quanto à posição da

partícula. Mas no diagrama podemos ver também que em tais casos a função de onda muda rapidamente perto do ponto, subindo de um lado e descendo do outro. Isso significa que a distribuição de probabilidade para a velocidade está disseminada por uma ampla faixa. Em outras palavras, a incerteza na velocidade é grande. Considere, por outro lado, uma sequência contínua de ondas. Agora há uma incerteza grande na posição, mas uma incerteza pequena na velocidade. Assim, a descrição de uma partícula por uma função de onda não tem posição ou velocidade bem definida. Isso satisfaz o princípio da incerteza. Percebemos agora que a função de onda é *tudo* que pode ser bem definido. Não podemos nem mesmo supor que a partícula tenha uma posição e uma velocidade que sejam conhecidas por Deus, mas ocultas de nós. Tais teorias de "variáveis ocultas" preveem resultados que não condizem com a observação. Nem mesmo Deus escapa das restrições impostas pelo princípio da incerteza, e a posição e a velocidade estão além de Seu alcance. Só o que Ele pode saber é a função de onda.



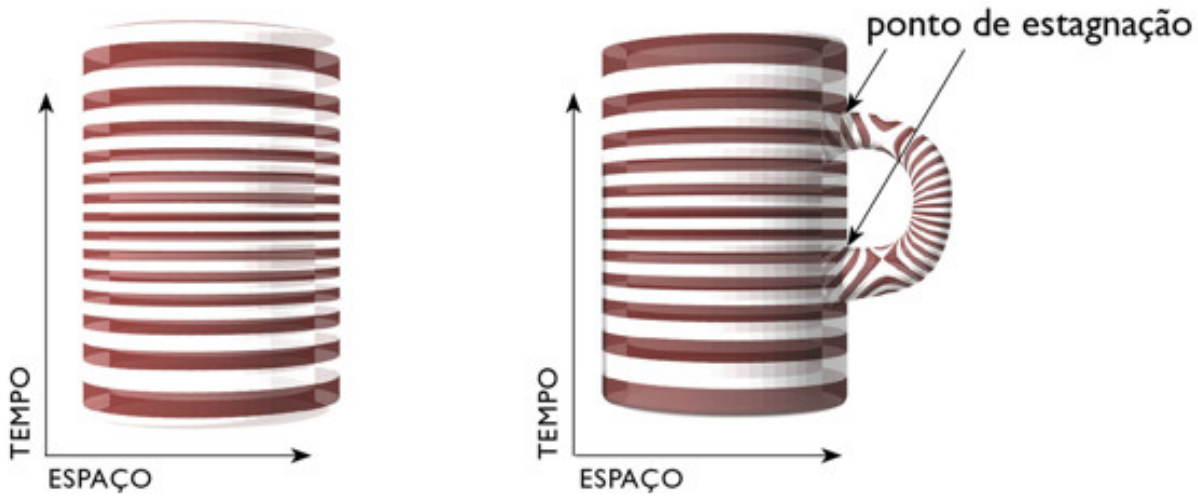
(FIG. 4.5)
A EQUAÇÃO DE SCHRÖDINGER
A evolução no tempo da função de onda ψ é determinada pelo operador hamiltoniano H, que está associado à energia do sistema físico considerado.


(FIG. 4.6)

No espaço-tempo plano da relatividade restrita, os observadores se movendo a velocidades diferentes terão medições de tempo diferentes, mas podemos usar a equação de Schrödinger em qualquer um desses momentos para prever qual será a função de onda no futuro.

A taxa à qual a função de onda muda com o tempo é dada pelo que chamamos de equação de Schrödinger (Figura 4.5). Se conhecemos a função de onda a um dado momento, podemos usar a equação de Schrödinger para calculá-la a qualquer outro dado momento, passado ou futuro. Logo, continua a existir determinismo na teoria quântica, mas numa escala reduzida. Em vez de sermos capazes de prever tanto as posições quanto as velocidades, podemos prever apenas a função de onda. Isso pode permitir a previsão precisa ou das posições ou das velocidades, mas não das duas coisas com precisão. Assim, na teoria quântica a capacidade de fazer previsões exatas corresponde apenas à metade do que ocorria na visão de mundo clássica de Laplace. Mesmo assim, nesse sentido restrito continua a ser possível alegar que o determinismo existe.

Entretanto, o uso da equação de Schrödinger para evoluir a função de onda no tempo (ou seja, prever o que acontecerá em momentos futuros) pressupõe implicitamente que o tempo transcorre de maneira regular em toda parte e por todo o sempre. Isso com certeza era verdade na física newtoniana. Presumia-se que o tempo é absoluto, significando que todo evento na história do universo era rotulado por um número chamado tempo e que uma série de rótulos temporais transcorria de forma regular do passado infinito ao futuro infinito. Isso é o que podemos chamar de senso comum sobre o tempo e é a visão que a maioria das pessoas e até a maioria dos físicos, lá no fundo, têm. Porém, em 1905, como vimos, o conceito de tempo absoluto foi derrubado pela teoria da relatividade restrita, segundo a qual o tempo não era mais uma grandeza independente em si mesma, mas apenas uma direção num continuum quadridimensional chamado espaço-tempo. Na relatividade restrita, observadores diferentes viajando a velocidades diferentes se deslocam através do espaço-tempo por trajetórias diferentes. Cada observador tem sua própria medição do tempo ao longo da trajetória que está seguindo, e observadores diferentes medirão intervalos de tempo diferentes entre os eventos (Figura 4.6).



(FIG. 4.7) O TEMPO FICA PARADO

Uma medição do tempo teria necessariamente pontos de estagnação em que a alça se une ao cilindro principal: neles o tempo permanece imóvel. Nesses pontos, o tempo não cresceria em nenhuma direção. Logo, não poderíamos usar a equação de Schrödinger para prever qual será a função de onda no futuro.

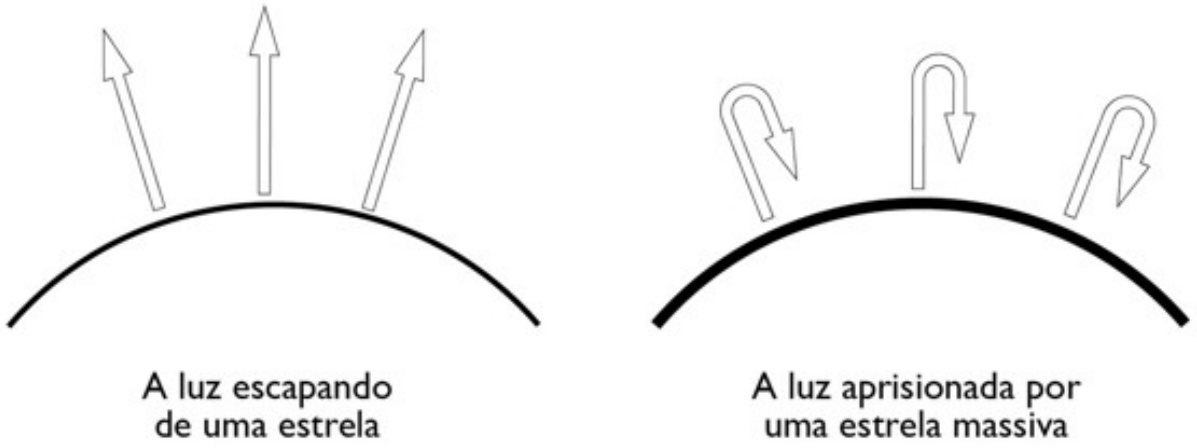
Assim, na relatividade restrita, não existe um único tempo absoluto que possamos usar para rotular os eventos. Mas o espaço-tempo da relatividade restrita é plano. Isso significa que na relatividade restrita o tempo medido por qualquer observador movendo-se livremente progride de maneira regular no espaço-tempo de menos infinito no passado infinito para mais infinito no futuro infinito. Podemos usar qualquer uma dessas medições do tempo na equação de Schrödinger para evoluir a função de onda. Na relatividade restrita, portanto, continuamos a ter a versão quântica do determinismo.

A situação era diferente na teoria da relatividade geral, em que o espaço-tempo não era plano, mas curvo, e distorcido pela matéria e energia que há nele. Em nosso Sistema Solar, a curvatura do espaço-tempo é tão pequena, ao menos numa escala macroscópica, que não interfere em nossa ideia usual do tempo. Nessa situação, ainda poderíamos usar esse tempo na equação de Schrödinger para obter uma evolução determinística da função de onda. Contudo, uma vez que admitamos o espaço-tempo como sendo curvo, a porta se abre para a possibilidade de haver uma estrutura que não permite um tempo progredindo de forma regular para

todo observador, como seria de se esperar em uma medição razoável do tempo. Por exemplo, suponhamos que o espaço-tempo fosse como um cilindro vertical (Figura 4.7).



(FIG. 4.8)



(FIG. 4.9)

Subir pelo cilindro seria uma medida do tempo que aumentaria para todo observador e transcorreria de menos infinito para o mais infinito. Mas imagine que, em vez disso, o espaço-tempo fosse como um cilindro com uma alça (ou um "buraco de minhoca") que brotasse dele e depois voltasse a se unir a ele. Nesse caso, qualquer medição do tempo necessariamente teria pontos de estagnação em que a alça se uniu ao cilindro principal: pontos em que o tempo permaneceu imóvel. Em tais pontos, o tempo não progrediria para qualquer observador. Em um espaço-tempo como esse, não poderíamos usar a equação de Schrödinger para obter uma evolução determinista da função de onda. Cuidado com os buracos de minhoca: nunca se sabe o que pode sair deles.

É por causa dos buracos negros que achamos que o tempo não aumenta para todo observador. A primeira discussão sobre buracos negros ocorreu em 1783. Um antigo decano de Cambridge, John Michell, apresentou o seguinte argumento: se alguém dispara uma partícula, como uma bala de canhão, na direção vertical, sua ascensão será interrompida pela gravidade e, no fim, a partícula deixará de se mover para cima e acabará caindo de volta (Figura 4.8); entretanto, se a velocidade de subida inicial for maior do que certo valor crítico chamado velocidade de escape, a gravidade nunca será forte o bastante para deter a partícula, que ficará livre. A velocidade de escape é de cerca de doze quilômetros por segundo para a Terra e de cerca de 618 quilômetros por segundo para o Sol.

O BURACO NEGRO DE SCHWARZSCHILD

Em 1916, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild encontrou uma solução para a teoria da relatividade de Einstein que representa um buraco negro esférico. O trabalho de Schwarzschild revelou uma surpreendente implicação da relatividade geral. Ele mostrou que, se a massa de uma estrela está concentrada em uma região pequena o suficiente, o campo gravitacional na superfície da estrela se torna tão forte que nem mesmo a luz consegue escapar. Isso é o que hoje chamamos de buraco negro, uma região do espaço-tempo contornada pelo assim chamado horizonte de eventos, de onde é impossível que qualquer coisa, inclusive a luz, chegue a um observador distante.

Por um longo tempo os físicos, incluindo Einstein, se mantiveram céticos quanto a se tais configurações extremas da matéria poderiam de fato ocorrer no universo real.

Entretanto, hoje compreendemos que, quando qualquer estrela sem rotação pesada o suficiente exaure seu combustível nuclear — por mais complicadas que sejam sua forma e sua estrutura interna —, ela por consequência entra em colapso para formar um buraco negro de Schwarzschild perfeitamente esférico. O raio (R) do horizonte de eventos do buraco negro depende apenas de sua massa; ele é dado pela fórmula:

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

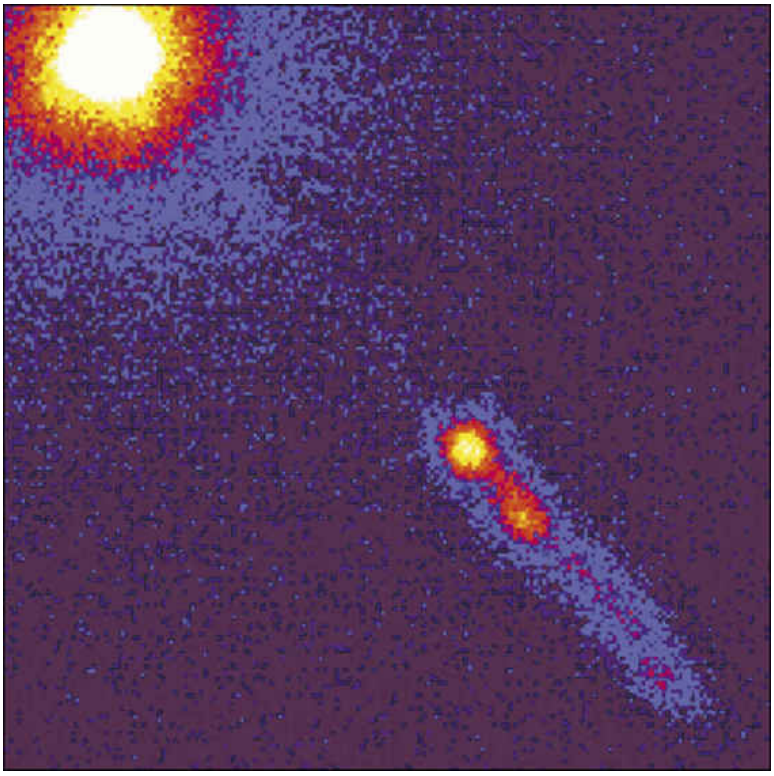
Nessa fórmula, o símbolo (c) representa a velocidade da luz, (G) a constante de Newton e (M) a massa do buraco negro. Um buraco negro com a mesma massa do Sol, por exemplo, teria um raio de apenas três quilômetros!

Essas duas velocidades de escape são muito mais elevadas do que a velocidade de balas de canhão reais, mas são pequenas em comparação com a velocidade da luz, que é de trezentos mil quilômetros por segundo. Assim, a luz pode escapar da Terra ou do Sol sem grande dificuldade. Contudo, Michell argumentou que haveria estrelas muito mais massivas do que o Sol com velocidades de escape maiores do que a velocidade da luz (Figura 4.9). Não seríamos capazes de ver essas estrelas, pois qualquer luz que emitissem seria arrastada de volta por sua gravidade. Assim, elas seriam o que Michell chamou de estrelas escuras e que hoje chamamos de buracos negros.



O conceito de Michell sobre as estrelas escuras se baseava na física newtoniana, na qual o tempo era absoluto e avançava independentemente do que acontecesse. Portanto, elas não afetavam nossa capacidade de predizer o futuro no cenário newtoniano clássico. Mas a situação era bem diferente na teoria da relatividade geral, em que corpos massivos curvam o espaço-tempo.

Em 1916, pouco depois de a teoria ter sido formulada, Karl Schwarzschild (que morreu logo após adoecer no front russo na Primeira Guerra Mundial) encontrou uma solução para as equações de campo da relatividade geral que representava um buraco negro. O que Schwarzschild havia descoberto não foi compreendido nem teve sua importância reconhecida durante muitos anos. O próprio Einstein nunca acreditou em buracos negros, e sua posição era partilhada pela maioria da velha guarda da relatividade geral. Lembro-me de ir a Paris para dar uma palestra sobre minha descoberta de que a teoria quântica indica que buracos negros não são completamente negros. Minha palestra foi um grande fracasso, porque na época quase ninguém em Paris acreditava em buracos negros. Os franceses também achavam que a tradução do nome entre eles, *trou noir*, tinha ambíguas conotações sexuais e devia ser substituída por *astre occlu*, ou "astro oculto". Porém nem esse nem nenhum outro nome sugerido captou a imaginação do público como a expressão *black hole*, que foi introduzida por Archibald Wheeler, o físico americano que inspirou grande parte do trabalho moderno nesse campo.



(FIG. 4.10)
O quasar 3C273, a primeira fonte de rádio quase estelar a ser descoberta, produz uma grande quantidade de energia numa pequena região. A matéria caindo em um buraco negro parece ser o único mecanismo capaz de explicar uma luminosidade tão forte.

JOHN WHEELER

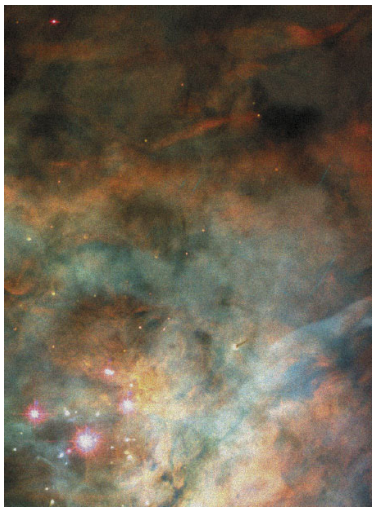
John Archibald Wheeler nasceu em 1911, em Jacksonville, Flórida. Ele obteve seu doutorado na Universidade Johns Hopkins em 1933 por seu trabalho com o espalhamento da luz pelo átomo de hélio. Em 1938, trabalhou com o físico dinamarquês Niels Bohr para desenvolver a teoria da fissão nuclear. Durante algum tempo depois disso, Wheeler, junto com seu aluno de graduação Richard Feynman, concentrou-se no estudo da eletrodinâmica, mas pouco após a entrada dos Estados Unidos na Segunda Guerra Mundial ambos contribuíram para o Projeto Manhattan.

No início da década de 1950, inspirado pelo trabalho de Robert Oppenheimer em 1939 sobre o colapso gravitacional de uma estrela massiva, Wheeler voltou sua atenção para a teoria da relatividade geral de Einstein. Nessa época, a maioria dos físicos estava envolvida no estudo da física nuclear e a relatividade geral não era realmente encarada como relevante para o mundo físico. Porém, quase sem ajuda, Wheeler transformou esse campo, tanto por meio de sua pesquisa quanto ministrando o primeiro curso sobre relatividade de Princeton.

Muito mais tarde, em 1969, ele cunhou o termo buraco negro para o estado da matéria em colapso, que poucos ainda acreditavam ser verdadeiro. Inspirado no trabalho de Werner Israel, conjecturou que os buracos negros não têm cabelos, ou seja, o estado colapsado de qualquer estrela massiva sem rotação podia de fato ser

descrito pela solução de Schwarzschild.

A descoberta dos quasares em 1963 suscitou uma enxurrada de trabalhos teóricos sobre buracos negros e de tentativas de observá-los diretamente (Figura 4.10). Eis a imagem que emergiu. Considere a história de uma estrela com massa vinte vezes superior à do Sol, tal como acreditamos que seria. Essas estrelas se formam a partir de nuvens de gás, como as existentes na nebulosa de Órion (Figura 4.11). À medida que as nuvens gasosas se contraem sob o peso da própria gravidade, o gás se aquece e acaba ficando quente o bastante para iniciar a reação de fusão nuclear que converte hidrogênio em hélio. O calor gerado por esse processo cria uma pressão que sustenta a estrela contra sua própria gravidade e a impede de se contrair mais. Uma estrela permanecerá nesse estado por muito tempo, queimando hidrogênio e irradiando luz para o espaço.



(FIG. 4.11)
As estrelas se formam em nuvens de gás e poeira como a nebulosa de Órion.

O campo gravitacional da estrela afetará a trajetória dos raios luminosos que partem dela. Podemos desenhar um diagrama com o tempo traçado para cima e a distância desde o centro da estrela traçada na

horizontal (ver Figura 4.12). Nesse diagrama, a superfície da estrela é representada por duas linhas verticais, uma de cada lado do centro. Podemos determinar que o tempo seja medido em segundos e a distância em segundos-luz — a distância que a luz percorre em um segundo. Quando usamos essas unidades, a velocidade da luz é um; ou seja, a velocidade da luz é de um segundo-luz por segundo. Isso quer dizer que, longe da estrela e de seu campo gravitacional, a trajetória de um raio luminoso no diagrama é uma linha a um ângulo de 45 graus com a vertical. Porém, mais perto da estrela, a curvatura do espaço-tempo produzida pela massa da estrela mudará a trajetória dos raios luminosos e os levará a ficar em um ângulo menor em relação à vertical.

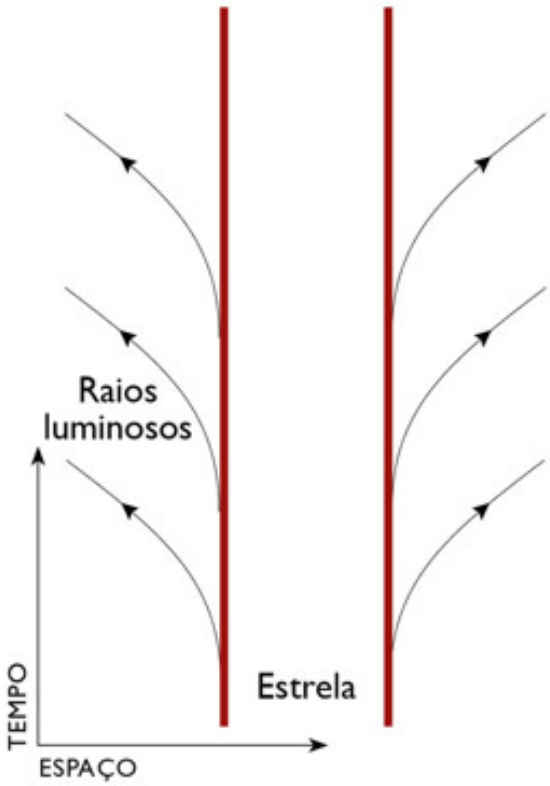


FIG. 4.12

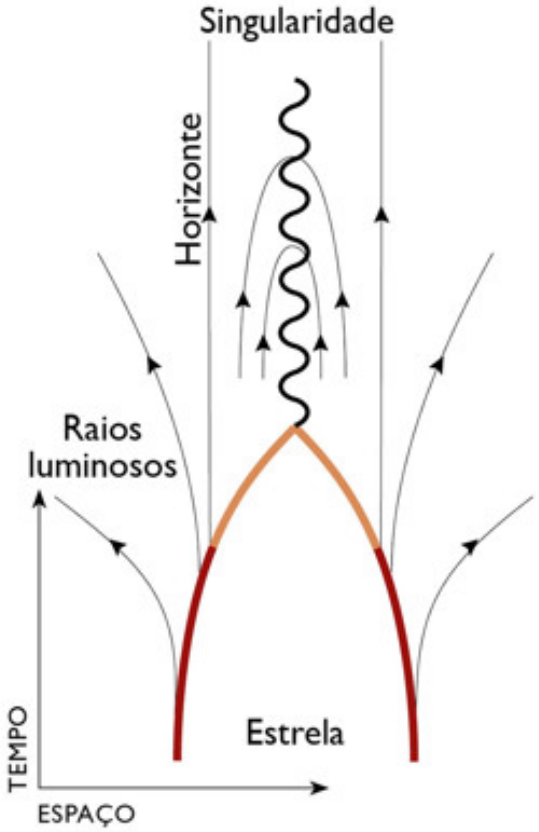
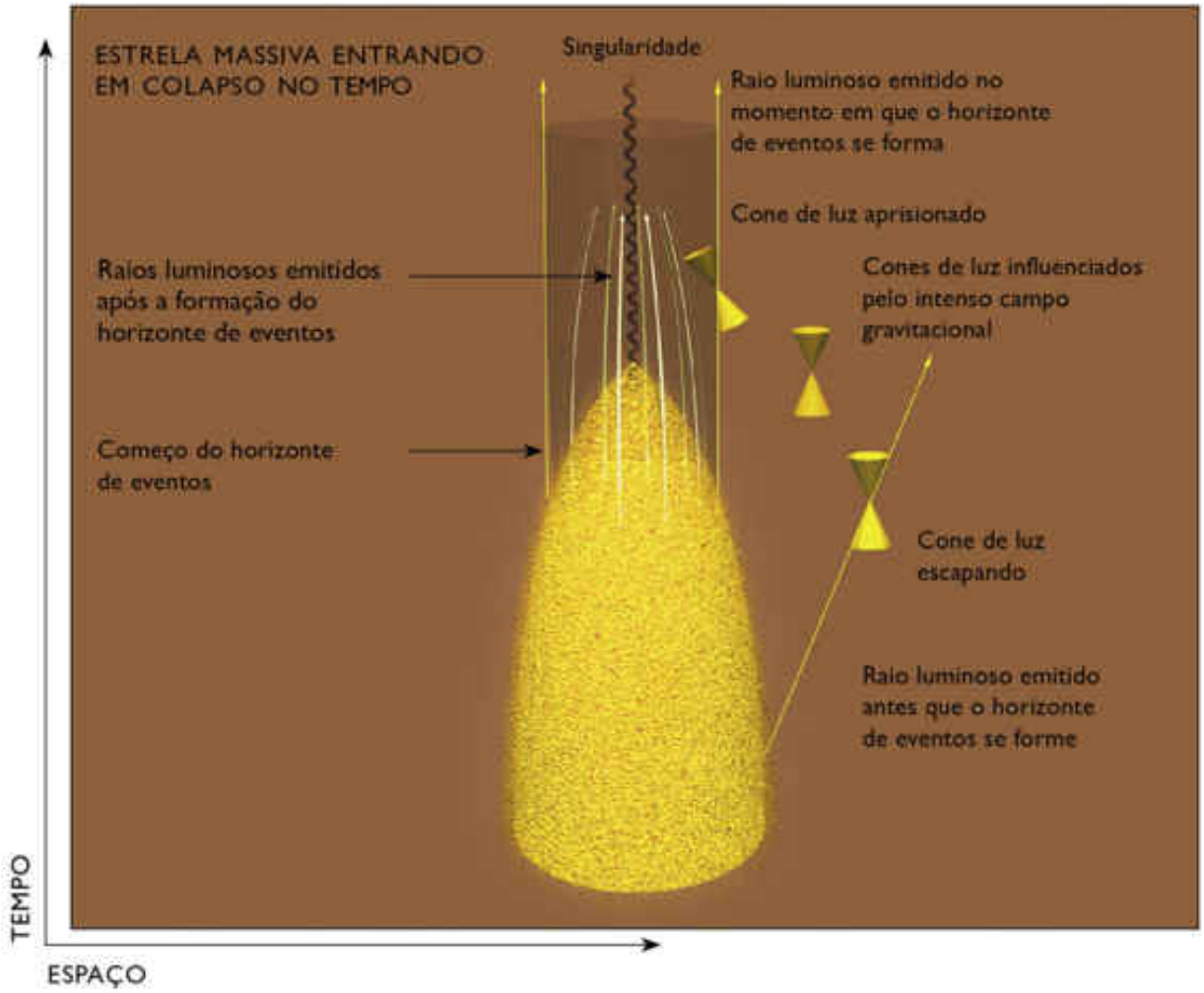


FIG. 4.13

(FIG. 4.12) O espaço-tempo em torno de uma estrela que não colapsou. Os raios luminosos podem escapar da superfície da estrela (as linhas verticais vermelhas). Longe da estrela, os raios luminosos ficam a 45 graus em relação à vertical, mas perto dela a deformação do espaço-tempo pela massa da estrela diminui o ângulo entre os raios luminosos e a vertical.

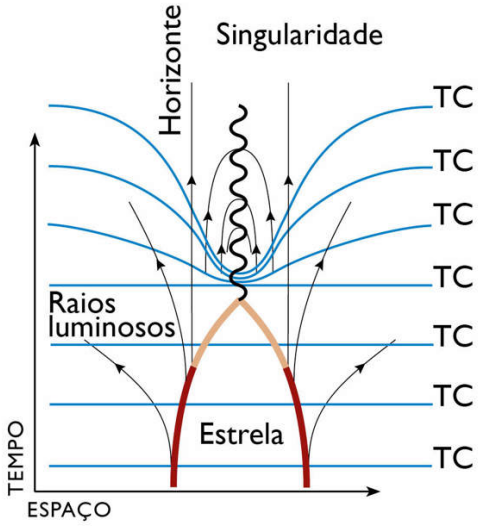
(FIG. 4.13) Se a estrela entra em colapso (as linhas vermelhas se encontrando em um ponto), a deformação é tão grande que os raios luminosos perto da superfície movem-se para dentro. Um buraco negro se forma, uma região do espaço-tempo da qual a luz não consegue escapar.

Estrelas massivas queimarão hidrogênio e formarão hélio muito mais depressa do que o Sol. Isso significa que podem esgotar seu hidrogênio em um prazo curto como algumas centenas de milhões de anos. Depois disso, essas estrelas enfrentam uma crise. Elas podem queimar o hélio para produzir elementos mais pesados, como carbono e oxigênio, mas essas reações nucleares liberam pouca energia, de modo que as estrelas perdem calor e a pressão térmica que as sustenta contra a gravidade. Assim, começam a encolher. Se tiverem mais ou menos duas vezes a massa do Sol, a pressão nunca será suficiente para deter a contração. Serão reduzidas até um tamanho zero e uma densidade infinita, formando o que chamamos de singularidade (Figura 4.13). No diagrama do tempo em função da distância desde o centro, à medida que a estrela encolhe, as trajetórias dos raios luminosos partindo de sua superfície começam a assumir ângulos cada vez mais fechados em relação à vertical. Quando a estrela atingir determinado raio crítico, a trajetória será vertical no diagrama, o que significa que a luz irá pairar a uma distância constante do centro da estrela, para jamais escapar. Essa trajetória luminosa crítica tangenciará uma superfície chamada horizonte de eventos, que separa as regiões do espaço-tempo de onde a luz pode e não pode escapar. Toda luz emitida pela estrela após ela passar pelo horizonte de eventos se dobrará para dentro pela curvatura do espaço-tempo. A estrela terá se tornado uma das estrelas escuras de Michell ou, como dizemos hoje, um buraco negro.



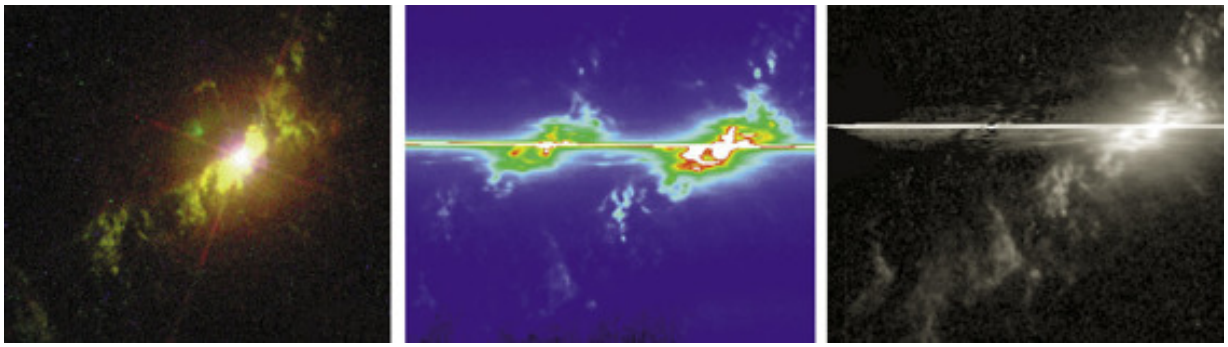
O horizonte, limite externo de um buraco negro, é formado pelos raios luminosos que por pouco não escaparam do buraco negro, mas permanecem pairando a uma distância constante do centro.

Como podemos detectar um buraco negro se nenhuma luz pode ser emitida dele? A resposta é que um buraco negro continua a exercer a mesma atração gravitacional sobre os objetos na proximidade do corpo que entrou em colapso. Se o Sol fosse um buraco negro e tivesse conseguido se tornar um sem perder nada de sua massa, os planetas continuariam a orbitá-lo como fazem agora.



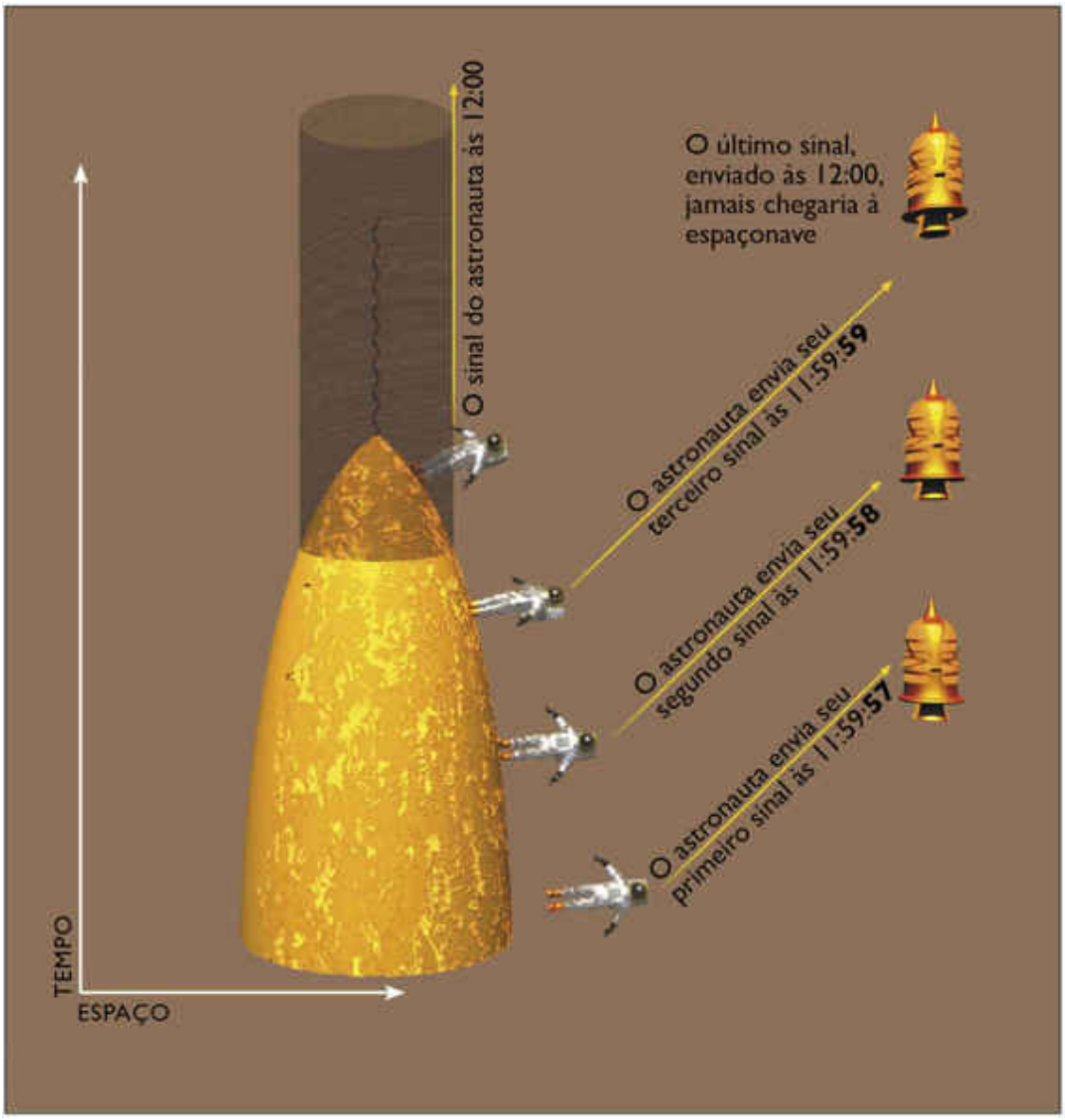
(FIG. 4.14)

Portanto, uma das maneiras de procurar um buraco negro é procurar alguma matéria orbitando o que parece ser um objeto massivo e compacto invisível. Diversos sistemas assim já foram observados. Talvez os mais impressionantes de todos sejam os buracos negros gigantes que há no centro das galáxias e dos quasares (Figura 4.15).



(FIG. 4.15)
UM BURACO NEGRO NO CENTRO DE UMA GALÁXIA
À esquerda: A galáxia NGC 4151 revelada pela câmera planetária e de campo amplo.
Centro: A linha horizontal passando pela imagem deriva da luz gerada pelo buraco negro no centro da 4151.
À direita: Imagem mostrando a velocidade das emissões de oxigênio. Todas as evidências indicam que a NGC 4151 contém um buraco negro com cerca de cem milhões de vezes a massa do Sol.

As propriedades dos buracos negros discutidas até aqui não trazem nenhum grande problema para o determinismo. O tempo chegará ao fim para um astronauta que cai no buraco negro e atinge a singularidade. Porém, na relatividade geral, somos livres para medir o tempo a diferentes taxas em diferentes lugares. Poderíamos desse modo acelerar o relógio do astronauta à medida que ele se aproximasse da singularidade, de modo que continuasse a registrar um intervalo de tempo infinito. No diagrama de tempo e distância (Figura 4.14), as superfícies de valores constantes desse novo tempo estariam todas amontoadas no centro, abaixo do ponto no qual surgiu a singularidade. Mas estariam de acordo com a medição do tempo habitual no espaço-tempo quase plano distante do buraco negro.



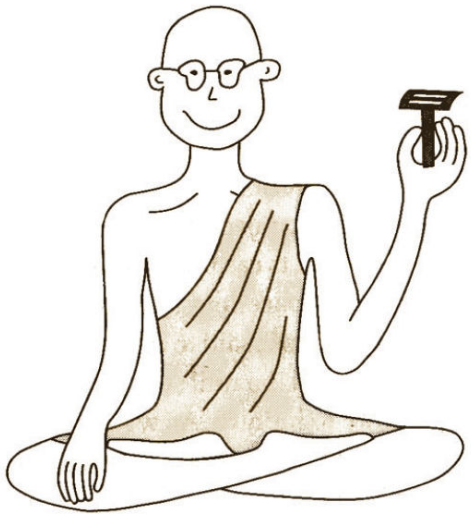
A ilustração acima mostra um astronauta que aterrissa numa estrela em colapso às 11:59:57 e se une à estrela à medida que ela encolhe sob o raio crítico no qual a gravidade é tão forte que nenhum sinal pode escapar. Ele envia sinais de seu relógio para uma espaçonave orbitando a estrela a intervalos regulares.

Uma pessoa observando a estrela de longe jamais a verá cruzando o horizonte de eventos e entrando no buraco negro. Na verdade, a estrela parecerá pairar pouco além do raio crítico, e um relógio na superfície da estrela dará a impressão de andar devagar e parar.

Podemos usar esse tempo na equação de Schrödinger e calcular a função de onda em momentos posteriores se a conhecermos inicialmente. Desse modo, o determinismo continua a vigorar. Mas vale notar que em momentos posteriores parte da função de onda está dentro do buraco negro, onde não pode ser observada por alguém do lado de fora. Assim, um observador sensato o bastante para não cair em um buraco negro é incapaz de resolver a equação de Schrödinger de trás para a frente e calcular a função de onda em momentos precedentes. Para isso, a pessoa teria de saber a parte da função de onda que está dentro do buraco negro. É onde está contida a informação sobre o que caiu ali. Possivelmente, é uma quantidade muito grande de informação, pois um buraco negro pode ser formado a partir de um número muito grande de diferentes conjuntos de partículas e não depende da natureza do corpo que o formou. John Wheeler chamou esse resultado de "buracos negros não têm cabelos". Para os franceses, isso apenas confirmou o que já suspeitavam.

A dificuldade para o determinismo surgiu quando descobri que buracos negros não são negros por completo. Como vimos no Capítulo 2, a teoria quântica sugere que os campos não podem ser exatamente nulos nem mesmo no que chamamos de vácuo. Se fossem iguais a zero, teriam tanto um valor ou posição exato em zero quanto uma taxa de variação ou velocidade exata também zero. Isso seria uma violação do princípio da incerteza, que afirma que a posição e a velocidade não podem ambas ser bem definidas. Todos os campos devem, em vez disso, ter determinada quantidade de flutuações do vácuo (da mesma forma que o pêndulo no Capítulo 2 devia ter flutuações de ponto zero). As flutuações do vácuo podem ser interpretadas de diversas formas que parecem diferentes, mas são na verdade matematicamente equivalentes. De um ponto de vista positivista, a pessoa é livre para usar qualquer cenário que seja mais útil para o problema em questão. Nesse caso, convém pensar nas flutuações do vácuo como pares de partículas virtuais que surgem juntas em algum ponto do espaço-tempo, afastam-se e voltam a se juntar para aniquilar uma a outra. Chamá-las de "virtuais" significa afirmar que essas partículas não podem ser observadas diretamente, mas que seus efeitos indiretos *podem*

ser medidos e que eles condizem com as previsões teóricas com um grau notável de precisão (Figura 4.16).



Resultado sem cabelos.

TEMPERATURA DO BURACO NEGRO

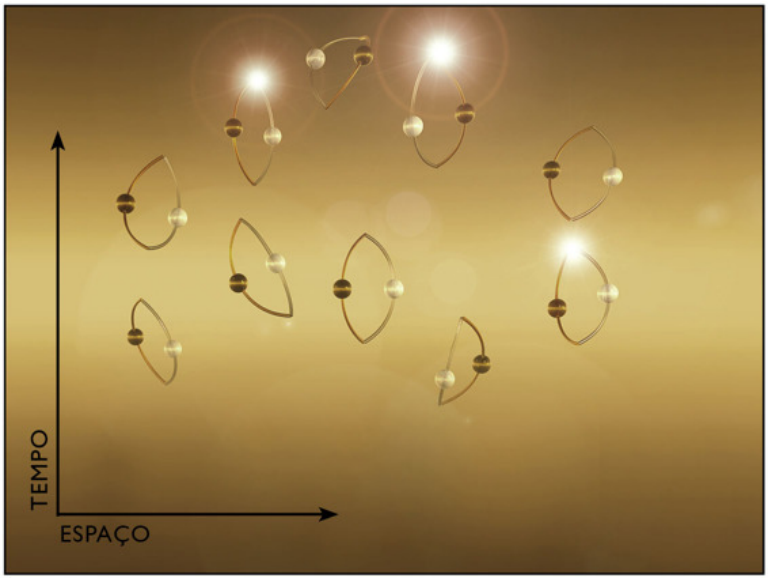
O buraco negro emite radiação como se fosse um corpo quente com uma temperatura (T) que depende apenas de sua massa. Mais precisamente, a temperatura é dada pela seguinte fórmula:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi\ k\ G\ M}$$

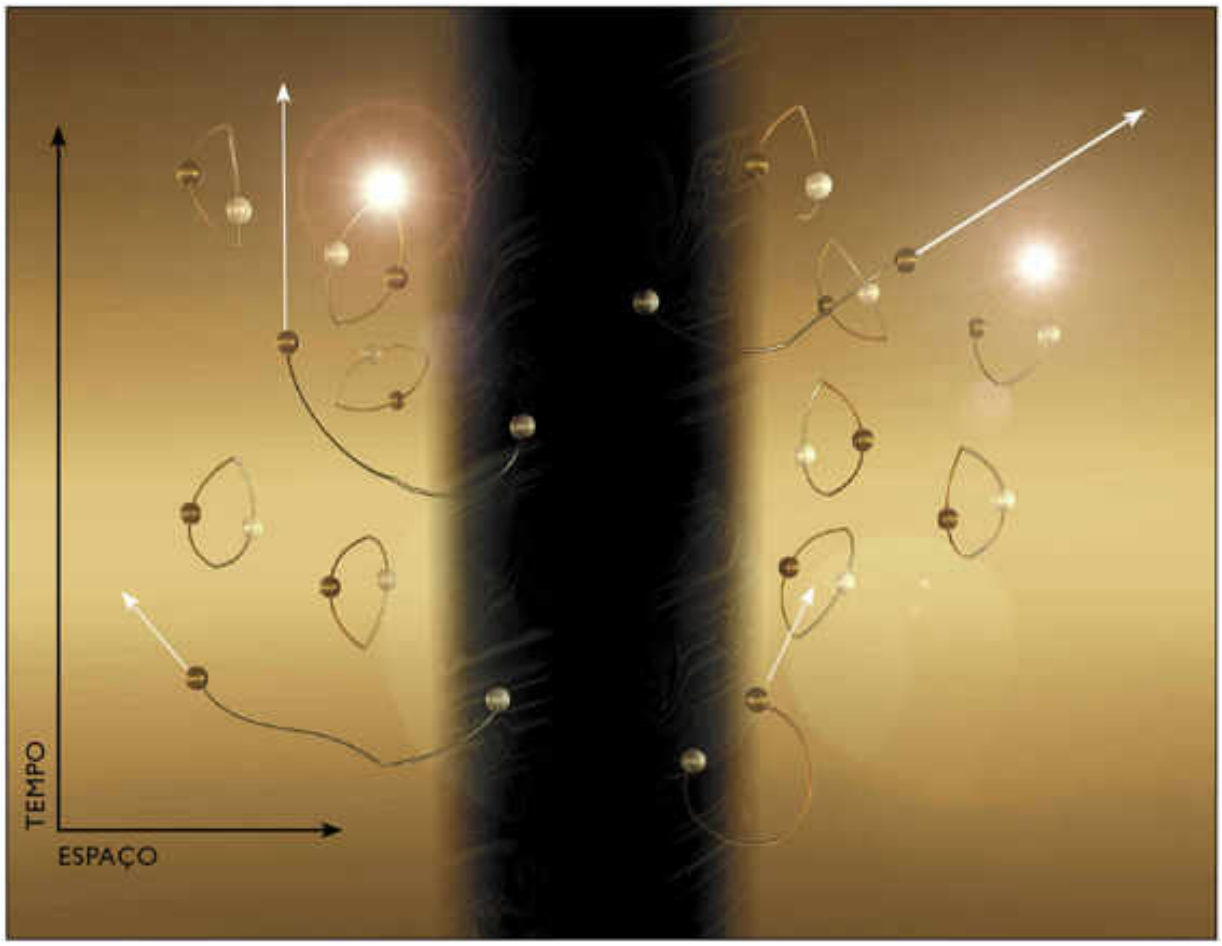
Nessa fórmula, o símbolo (c) representa a velocidade da luz; ($\hbar$), a constante de Planck; (G), a constante gravitacional de Newton; e (k), a constante de Boltzmann. Finalmente, (M) representa a massa do buraco negro, de modo que, quanto menor o buraco negro, mais elevada é a temperatura. Essa fórmula nos diz que a temperatura de um buraco negro com massa equivalendo algumas vezes à do Sol está apenas cerca de um milionésimo de grau acima do zero absoluto.

Se um buraco negro estiver por perto, um membro de um par de partículas pode cair nele, e o outro escaparia rumo ao infinito (Figura 4.17). Para alguém longe do buraco negro, as partículas que escapam parecem ter se irradiado dele. O espectro de um buraco negro é o que

esperaríamos de um corpo quente, com a temperatura proporcional ao campo gravitacional no horizonte do buraco negro. Ou seja, a temperatura de um buraco negro depende de seu tamanho.



(FIG. 4.16)
No espaço vazio, os pares de partículas surgem, levam uma breve existência e depois se aniquilam.

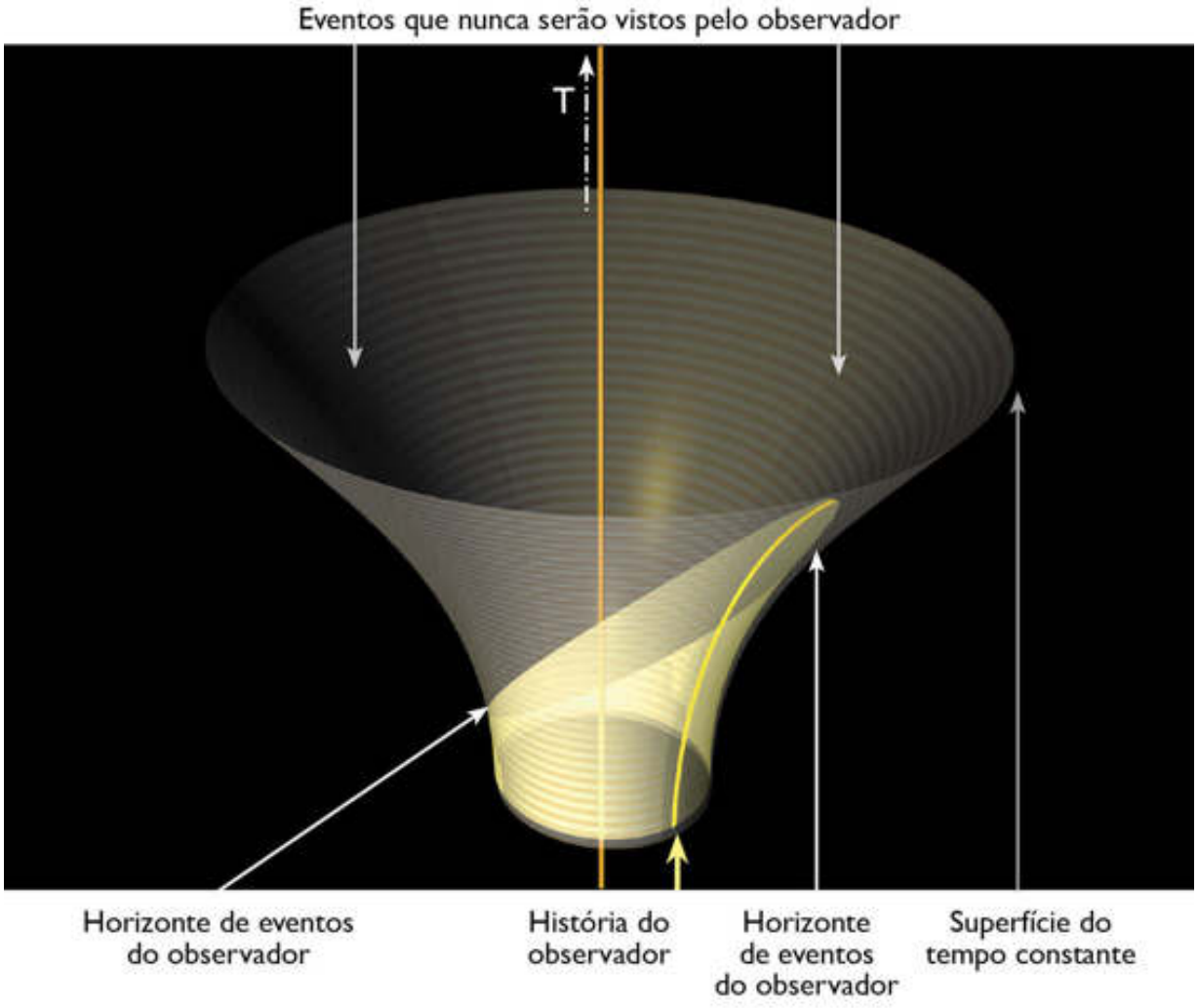


(FIG. 4.17)
Partículas virtuais aparecendo e se aniquilando mutuamente próximas ao horizonte de eventos de um buraco negro.

Um membro do par de partículas cai no buraco negro, enquanto sua gêmea está livre para escapar. Fora do horizonte de eventos, parece que o buraco negro está irradiando a partícula que escapou.

Um buraco negro com algumas vezes a massa do Sol teria uma temperatura de cerca de um milionésimo de grau acima do zero absoluto, e um buraco negro maior teria uma temperatura ainda mais baixa. Assim, qualquer radiação quântica de tais buracos negros seria completamente encoberta pela radiação de 2,7 graus restante do Big Bang quente — a radiação cósmica de fundo discutida no Capítulo 2. Seria possível detectar a radiação de buracos negros bem menores e mais quentes, mas não parece haver muitos deles por aí. É uma pena. Se fosse descoberto um, eu ganharia um Prêmio Nobel. Porém, temos evidência observável indireta

dessa radiação, e ela vem do universo primitivo. Como descrito no Capítulo 3, acredita-se que muito cedo na história o universo passou por um período inflacionário durante o qual se expandiu a uma taxa cada vez maior. A expansão durante esse período teria sido tão rápida que alguns objetos estariam distantes demais para que sua luz chegasse até nós; o universo teria se expandido demais e muito rapidamente enquanto essa luz viajava em nossa direção. Assim, haveria um horizonte no universo semelhante ao horizonte de um buraco negro, separando a região de onde a luz pode chegar até nós da região de onde a luz não pode chegar (Figura 4.18).



(FIG. 4.18)

A solução de De Sitter para as equações da relatividade geral representa um universo que se expande de maneira inflacionária. No diagrama, o tempo é mostrado para cima, e o tamanho do universo, na direção horizontal. As distâncias espaciais aumentam tão rapidamente que a luz de galáxias distantes nunca chega até nós e há um horizonte de eventos, um contorno da região que não podemos observar, como em um buraco negro.

Argumentos muito parecidos mostram que deve haver radiação térmica proveniente desse horizonte, como existe no horizonte de um buraco negro. Na radiação térmica, aprendemos a esperar por um espectro característico de flutuações de densidade. Nesse caso, essas flutuações de densidade teriam se expandido com o universo. Quando a escala de comprimento dessas flutuações se tornou mais longa do que o tamanho do horizonte de eventos, elas teriam ficado congeladas, de modo que podemos observá-las hoje como pequenas variações na temperatura da radiação cósmica de fundo remanescentes do universo primitivo. As observações dessas variações condizem com as previsões das flutuações térmicas com grau notável de precisão.

Mesmo que a evidência observável para a radiação de um buraco negro seja um pouco indireta, todo mundo que estudou o problema concorda que ela deve ocorrer para ser consistente com outras teorias testadas pela observação. Isso teve importantes implicações para o determinismo. A radiação de um buraco negro levará energia consigo, o que deve significar que o buraco negro perderá massa e ficará menor. Por sua vez, isso significará que sua temperatura vai subir, e a taxa de radiação, aumentar. O buraco negro acabará por atingir massa zero. Não sabemos como calcular o que acontece nesse ponto, mas o único resultado natural e razoável parece ser que o buraco negro desaparece por completo. Nesse caso, fica a pergunta: o que acontece com a parte da função de onda no interior do buraco negro e com a informação que ela contém sobre o que havia caído ali dentro? A primeira conjectura pode ser que essa parte da função de onda e a informação que ela carrega emergiriam quando o buraco negro enfim desaparecesse. Entretanto, transmissão de informação não é algo gratuito, como percebemos ao receber a conta do telefone.



Transmitir informação exige energia, e resta pouca energia disponível nos estágios finais de um buraco negro. O único modo plausível para a informação conseguir sair seria se ela emergisse continuamente com a radiação, em vez de esperar por esse estágio final. Porém, segundo o cenário em que um membro de um par de partículas virtuais cai ali dentro e o outro escapa, não esperaríamos que a partícula que escapou estivesse relacionada com a que caiu, ou transmitisse informação sobre ela. Assim, ao que parece, a única resposta seria que a informação na parte da função de onda dentro do buraco negro se perde (Figura 4.19).



(FIG. 4.19)
A energia positiva transportada pela radiação termal de seu horizonte reduz a massa do buraco negro. À medida que ele perde massa, a temperatura do buraco negro sobe e sua taxa de radiação aumenta, de modo que ele perde massa cada vez mais rápido. Não sabemos o que acontecerá se a massa se tornar extremamente pequena, mas o resultado mais provável parece ser que o buraco negro desapareceria por completo.

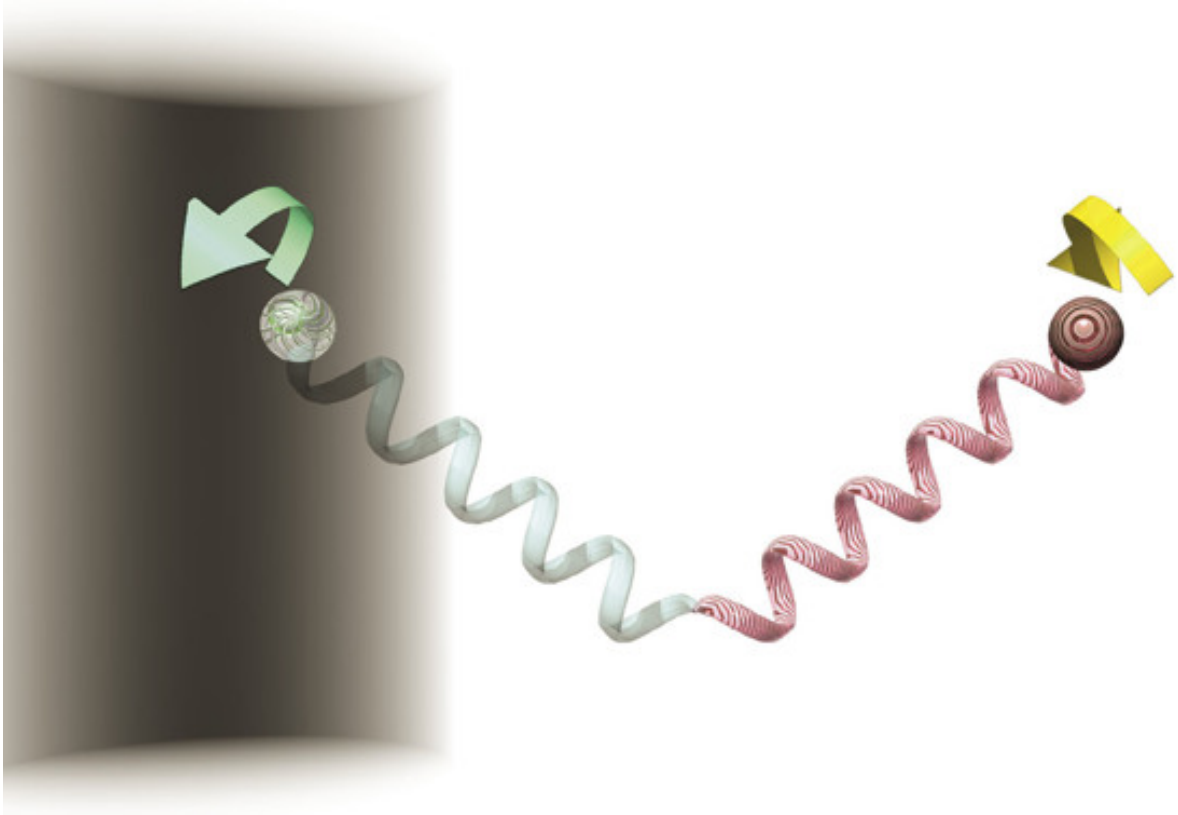
Tal perda de informação teria importantes implicações para o determinismo. Para começar, notamos que, mesmo que fosse conhecida a função de onda após o buraco negro ter desaparecido, não poderíamos resolver a equação de Schrödinger de trás para a frente e calcular qual era a função de onda antes de o buraco negro se formar. Esse valor dependeria, em parte, do pedaço da função de onda que se perdeu dentro do buraco negro. Estamos acostumados a achar que podemos conhecer o passado com exatidão. Entretanto, se há perda de informação dentro de buracos negros, esse não é o caso. Qualquer coisa poderia ter acontecido.



(FIG. 4.20)
No experimento mental de Einstein-Podolsky-Rosen, o observador que mediu o *spin* de uma partícula saberá a direção do *spin* da segunda partícula.

Em geral, porém, astrólogos e aqueles que recorrem a eles estão mais interessados em prever o futuro do que em retroceder ao passado. À primeira vista, pode parecer que a perda de parte da função de onda dentro do buraco negro não nos impediria de prever a função de onda do lado de fora. Mas acontece que essa perda de fato interfere na previsão, como podemos ver ao considerar um experimento mental proposto por Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen na década de 1930.

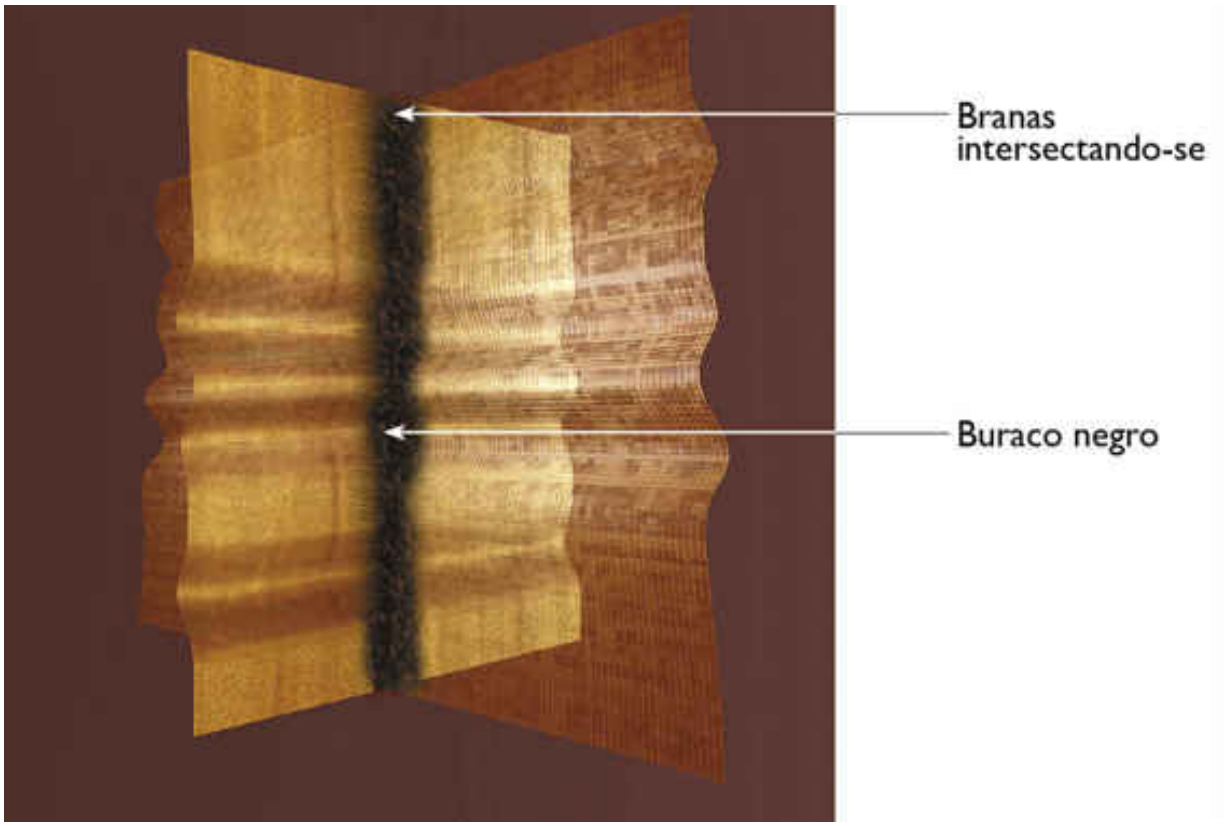
Imagine que um átomo radioativo se decompõe e emite duas partículas em direções opostas e com *spins* opostos. Um observador que olha apenas para uma partícula não pode prever se ela vai girar para a direita ou a esquerda. No entanto, se após a medição ele verificar que a partícula gira para a direita, poderá prever com certeza que a outra partícula estará girando para a esquerda, e vice-versa (Figura 4.20). Einstein achava que isso era uma prova de como a teoria quântica era ridícula: a outra partícula podia estar do outro lado da galáxia a essa altura e, ainda assim, saberíamos instantaneamente para que lado ela girava. Mas a maioria dos outros cientistas concorda que a confusão foi de Einstein, não da teoria quântica. O experimento mental Einstein-Podolsky-Rosen não mostra que somos capazes de enviar informação mais rápido do que a luz. Essa seria a parte ridícula. O observador não pode *decidir* que a medição de sua partícula será para a direita e, portanto, não pode determinar que a partícula distante deve estar girando para a esquerda.



(FIG. 4.21)
Um par de partículas virtuais tem função de onda que prevê que ambas as partículas assumirão *spins* opostos. Mas, se uma partícula cai no buraco negro, é impossível prever com certeza o *spin* da partícula restante.

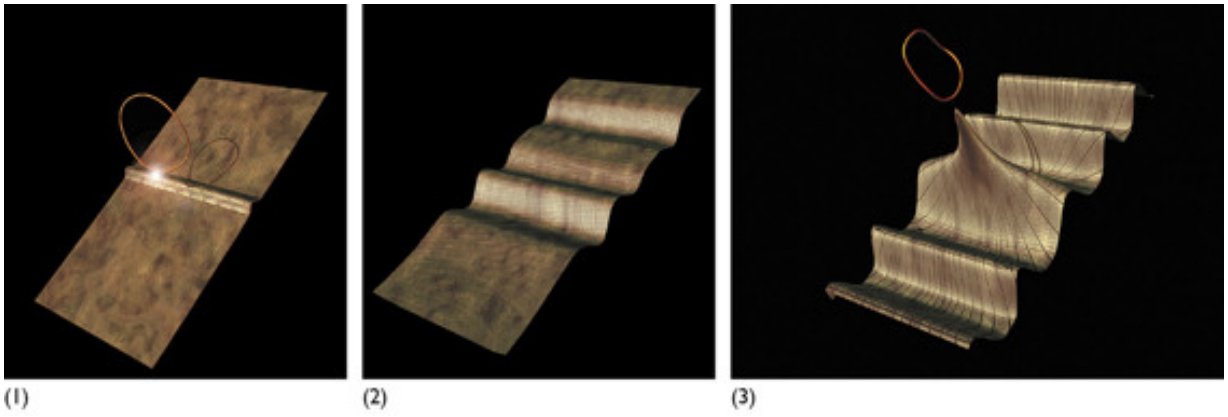
Na verdade, esse experimento mental é exatamente o que acontece com a radiação do buraco negro. O par de partículas virtuais terá uma função de onda que prevê que os dois membros definitivamente terão *spins* opostos (Figura 4.21). O que gostaríamos de fazer é prever o *spin* e a função de onda da partícula que se afasta, algo que poderíamos fazer se conseguíssemos observar a partícula que caiu ali dentro. Mas agora essa partícula está no interior do buraco negro, onde seu *spin* e sua função de onda não podem ser medidos. Devido a isso, não é possível prever o *spin* ou a função de onda da partícula que escapa. Ela pode ter *spins* diferentes e funções de onda distintas, com várias probabilidades, mas não possui um único *spin* ou função de onda única. Desse modo, aparentemente, nosso poder de prever o futuro ficaria ainda mais reduzido. A clássica ideia de Laplace de que poderíamos prever tanto as posições como as velocidades

das partículas teve de ser modificada quando o princípio da incerteza mostrou que não podemos medir com precisão as posições e as velocidades. No entanto, ainda assim poderíamos medir a função de onda e usar a equação de Schrödinger para prever o que ela deve ser no futuro. Isso nos permitiria prever com certeza uma combinação de posição e velocidade — o que é metade do que poderíamos prever segundo as ideias de Laplace. Podemos prever com certeza que as partículas têm *spins* opostos, mas, se uma partícula cai no buraco negro, não há previsão que possamos fazer com certeza sobre a partícula remanescente. Isso significa que não existe *nenhuma* medida fora do buraco negro que possa ser prevista com certeza: nossa capacidade de fazer previsões precisas ficaria reduzida a zero. Assim, no que diz respeito à previsão do futuro, talvez a astrologia não seja pior do que as leis da ciência.



(FIG. 4.22)
Podemos pensar nos buracos negros como interseções de p-branas nas dimensões extras do espaço-tempo. A informação sobre os estados internos dos buracos negros seria armazenada como ondas nas p-branas.

Muitos físicos não apreciaram essa redução no determinismo e por isso sugeriram que a informação sobre o que está dentro pode de algum modo sair do buraco negro. Por anos, isso não passou de uma vã esperança de que encontraríamos um modo de salvar a informação. Mas em 1996 Andrew Strominger e Cumrun Vafa fizeram um importante avanço. Eles decidiram considerar que o buraco negro era constituído de inúmeros blocos de construção, chamados p-branas (ver capítulo 2, Figura 2.15).



(FIG. 4.23)
Podemos pensar numa partícula que cai num buraco negro como um loop fechado de corda atingindo uma p-brana (1). Ela vai provocar ondas na p-brana (2). As ondas podem se juntar e levar parte da p-brana a se partir como uma corda fechada (3). Ela seria uma partícula emitida pelo buraco negro.

Lembre-se de que uma das maneiras de pensar sobre as p-branas é como folhas que se movem pelas três dimensões do espaço e também pelas sete dimensões extras que não notamos (ver Figura 4.22). Em certos casos, podemos mostrar que o número de ondas nas p-branas é equivalente à quantidade de informação que esperaríamos que um buraco negro contivesse. Se as partículas atingem as p-branas, estimulam ondas extras nas branas. Do mesmo modo, se ondas se movendo em diferentes direções nas p-branas se unem em algum ponto, podem criar uma crista tão grande que um pedaço da p-brana se desprende e vai embora como uma partícula. Assim, as p-branas podem absorver e emitir partículas como buracos negros (Figura 4.23).



Podemos encarar as p-branas como uma teoria eficaz — ou seja, embora não precisemos acreditar que há literalmente pequenas folhas se movendo por um espaço-tempo plano, buracos negros podem se comportar como se fossem compostos dessas folhas. É como a água, que é feita de bilhões e bilhões de moléculas de H_2O com complicadas interações. Mas um fluido homogêneo é um modelo muito eficaz. O modelo matemático de buracos negros compostos por p-branas fornece resultados semelhantes ao cenário do par de partículas virtuais descrito antes. Logo, de uma perspectiva positivista, é um modelo igualmente bom, ao menos para certas classes de buraco negro. Para essas classes, o modelo de p-brana prevê exatamente a mesma taxa de emissão prevista pelo modelo do par de partículas virtuais. Porém, há uma importante diferença: no modelo da p-brana, a informação sobre o que cai no buraco negro será armazenada na função de onda para as ondas das p-branas. As p-branas são vistas como folhas em um espaço-tempo *plano* e, por esse motivo, o tempo fluirá para a frente de forma suave, as trajetórias dos raios luminosos não serão curvadas e a informação nas ondas não se perderá. Em vez disso, a informação acabará emergindo do buraco negro na radiação das p-branas. Desse modo, segundo o modelo da p-brana, podemos usar a equação de Schrödinger para calcular qual vai ser a função de onda em momentos posteriores. Nada será perdido, e o tempo transcorrerá suavemente. Teremos o determinismo completo no sentido quântico.



Então qual desses cenários é o correto? Será que parte da função de onda se perde nos buracos negros ou toda a informação volta a sair, como sugere o modelo da p-brana? Essa é uma das perguntas sem resposta na física teórica atual. Muitas pessoas acreditam que as pesquisas recentes mostram que a informação não se perde. O mundo é seguro e previsível, e nada inesperado vai acontecer. Mas isso não está claro. Se levamos a sério a teoria da relatividade geral de Einstein, temos de admitir a possibilidade de que o espaço-tempo se amarre em um nó e a informação seja perdida nas dobras. Quando a espaçonave *Enterprise* passou por um buraco de minhoca, aconteceu uma coisa inesperada. Sei disso porque eu estava a bordo, jogando pôquer com Newton, Einstein e Data. Tive uma grande surpresa. Olhem só quem apareceu em meu colo.



Cortesia da Paramount Pictures.
STAR TREK. THE NEXT GENERATION
Copyright © 2001 by Paramount Pictures.Todos os Direitos Reservados.

CAPÍTULO 5

PROTEGENDO O PASSADO

A viagem no tempo é possível?
Uma civilização avançada poderia voltar e mudar o passado?



Considerando que Stephen W. Hawking (tendo perdido uma aposta anterior relativa a esse assunto por não reclamar seu caráter genérico) ainda acredita firmemente que singularidades nuas são uma aberração e devem ser proibidas pelas leis da física clássica,

E considerando que John Preskill e Kip Thorne (tendo vencido a aposta anterior) ainda encaram singularidades nuas como objetos gravitacionais quânticos que podem existir, desvestidos por horizontes, para que o universo inteiro veja,

Desse modo Hawking propõe, e Preskill/Thorne aceitam, uma aposta de que

> *Quando qualquer forma clássica de matéria ou campo incapaz de se tornar singular no espaço-tempo plano for ligada à relatividade geral via equações clássicas de Einstein, então*

Uma evolução dinâmica das condições iniciais genéricas *(isto é, de um conjunto aberto de dados iniciais)* **jamais pode produzir uma singularidade nua** *(geodésica nula de passado incompleto de I+).*

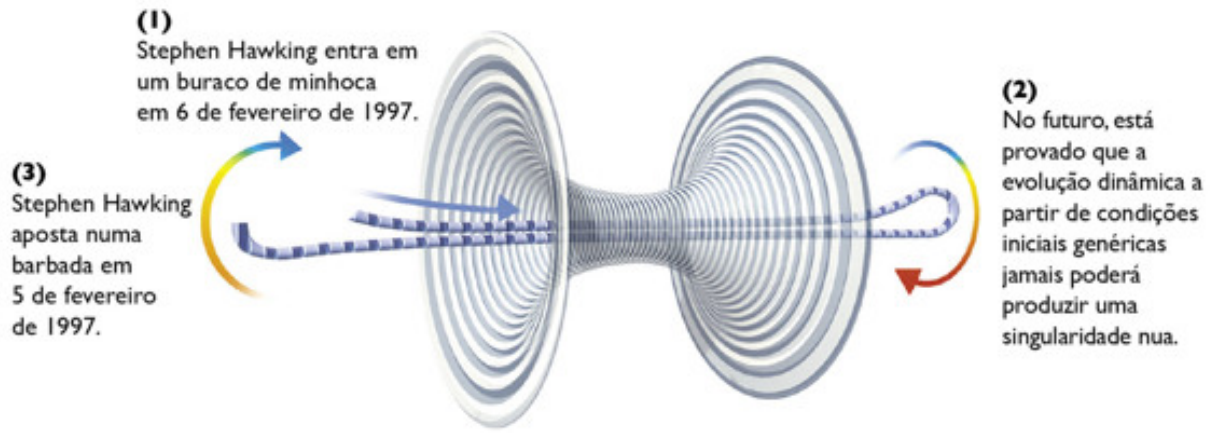
O perdedor recompensará o ganhador com uma roupa para cobrir a nudez do ganhador. A roupa deve ser bordada com uma mensagem adequada, que realmente faça a concessão.





Stephen W. Hawking **John P. Preskill & Kip S. Thorne**

Pasadena, Califórnia, 5 de fevereiro de 1997



MEU AMIGO E colega de profissão Kip Thorne, com quem já fiz uma série de apostas (à esquerda), não é de seguir a linha aceita da física só porque todo mundo segue. Isso o levou a ter a coragem de ser o primeiro cientista sério a discutir viagem no tempo como uma possibilidade prática.



IMAGEM **R**:
Kip Thorne

Especular abertamente sobre viagem no tempo é um pouco complicado. Corre-se o risco de ouvir um clamor contra o gasto de dinheiro público em algo tão ridículo ou uma exigência de que a pesquisa seja confidencial por

motivos militares. Afinal, como poderíamos nos proteger de alguém com uma máquina do tempo? A pessoa poderia mudar a história e dominar o mundo. Poucos entre nós são temerários o suficiente para trabalhar em um assunto tão politicamente incorreto nos círculos da física. Disfarçamos o fato usando termos técnicos que correspondem a falar em código sobre viagem no tempo.

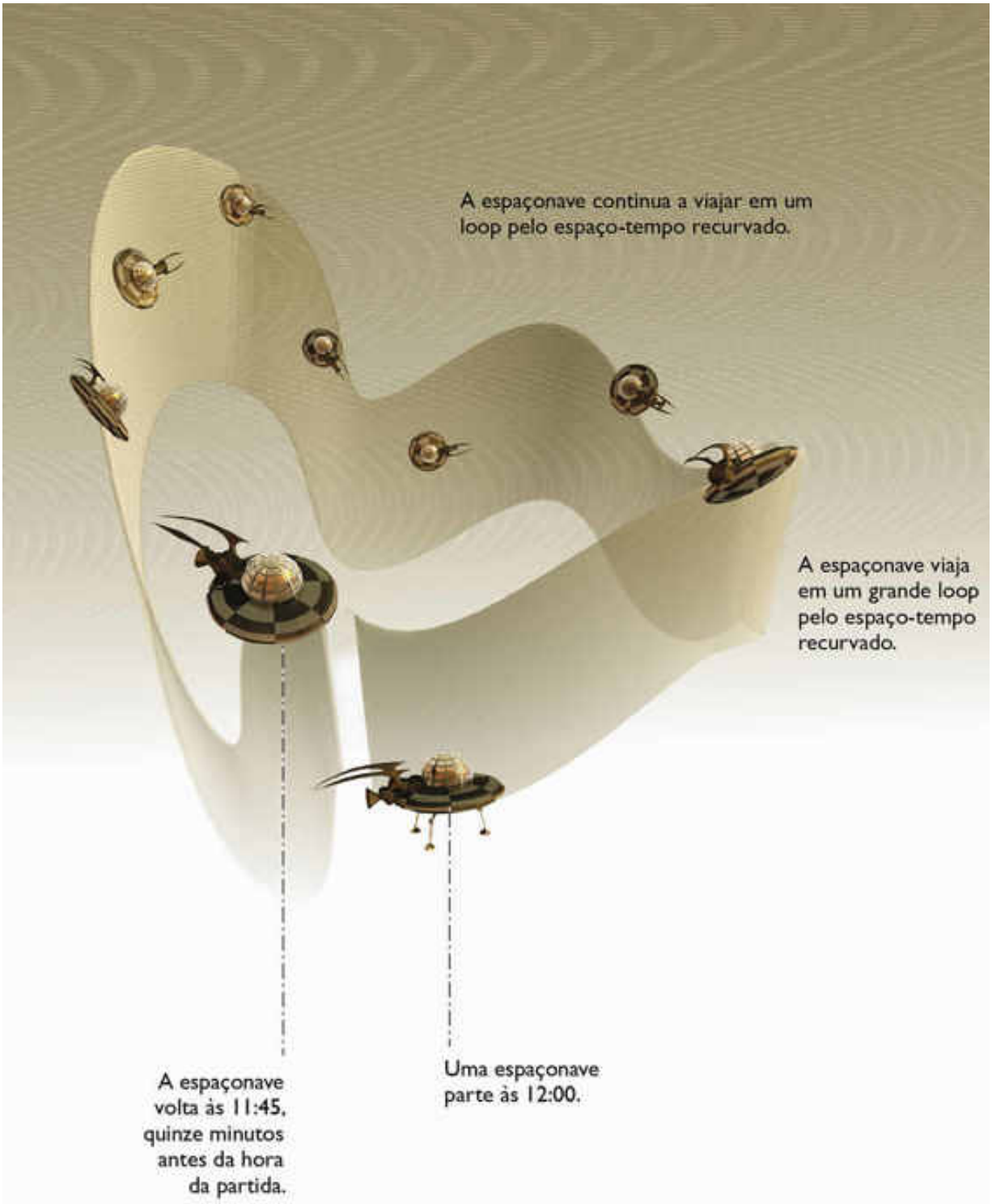
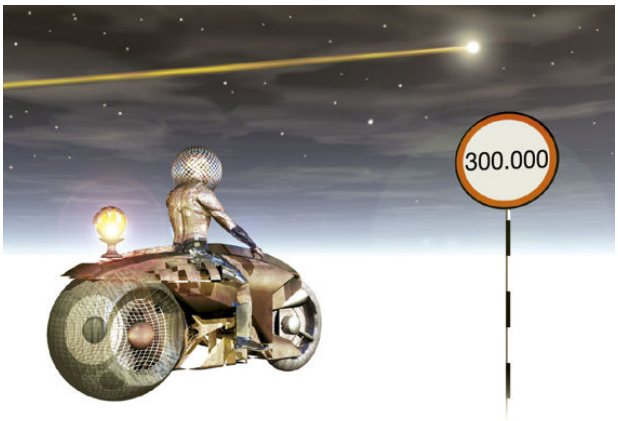

A espaçonave continua a viajar em um loop pelo espaço-tempo recurvado.
A espaçonave viaja em um grande loop pelo espaço-tempo recurvado.
A espaçonave volta às 11:45, quinze minutos antes da hora da partida.
Uma espaçonave parte às 12:00.

FIG. 5.1



A base para todas as discussões modernas da viagem no tempo é a teoria da relatividade geral de Einstein. Como vimos em capítulos anteriores, as equações de Einstein tornaram o espaço e o tempo dinâmicos ao descreverem como eles são curvos e distorcidos pela matéria e pela energia no universo. Na relatividade geral, o tempo pessoal de alguém medido por seu relógio de pulso sempre aumentaria, assim como acontecia na teoria newtoniana do espaço-tempo plano da relatividade restrita. Mas agora havia a possibilidade de que o espaço-tempo viesse a ser dobrado a tal ponto que você poderia partir numa espaçonave e voltar antes de ter saído (Figura 5.1).



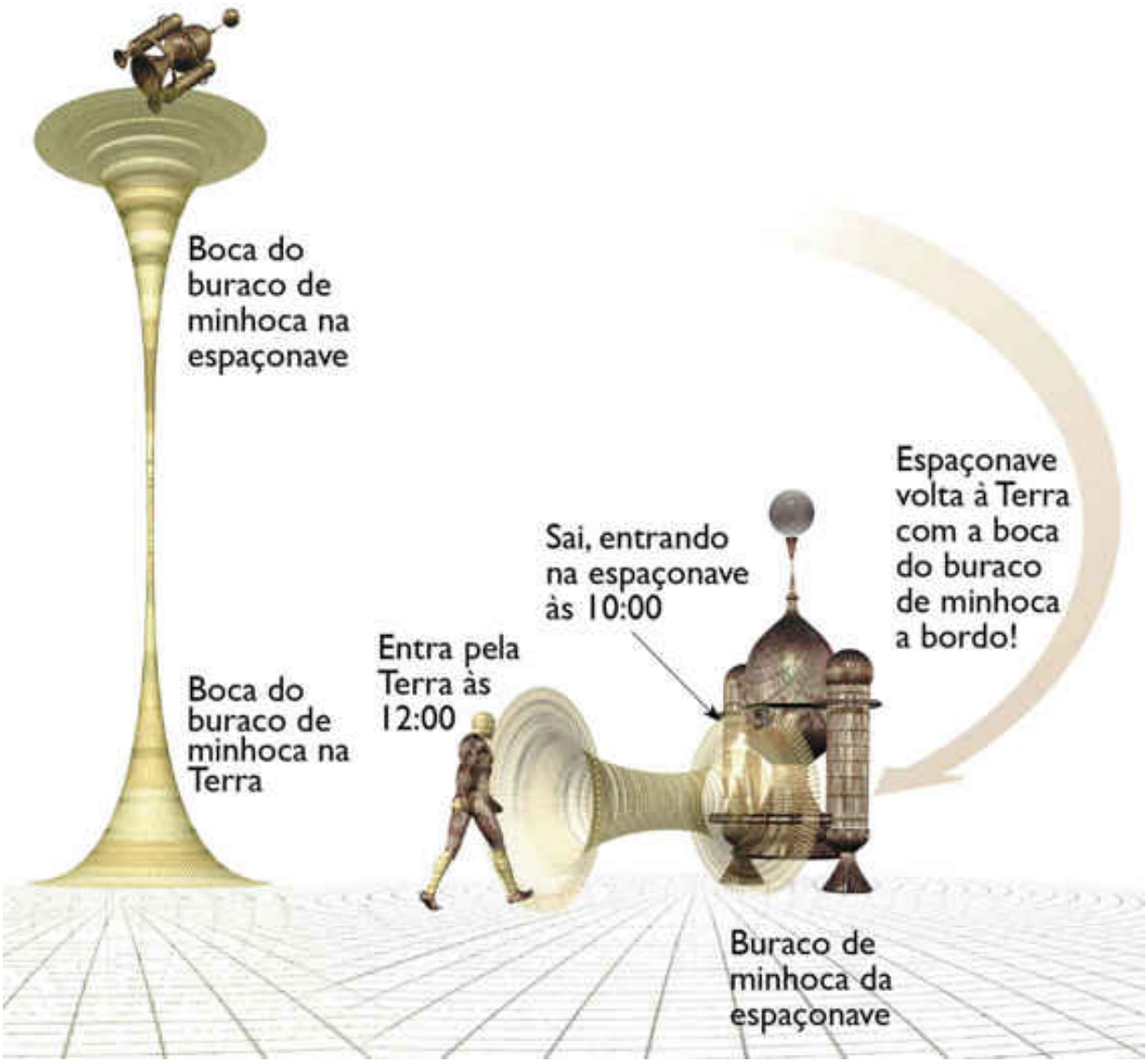
Uma forma de isso acontecer seria com buracos de minhoca, tubos do espaço-tempo mencionados no Capítulo 4 que ligam diferentes regiões do espaço e do tempo. A ideia é entrar com a espaçonave em uma abertura do buraco de minhoca e sair pela outra em um lugar diferente e em um momento diferente (Figura 5.2).

Buracos de minhoca, se existirem, seriam a solução para o problema do limite de velocidade no espaço: levaria dezenas de milhares de anos para atravessarmos a galáxia em uma espaçonave que viajasse abaixo da velocidade da luz, como exige a relatividade. Mas poderíamos atravessar um buraco de minhoca até o outro lado da galáxia e estar de volta a tempo para o jantar. Entretanto, é possível demonstrar que, se buracos de minhoca existem, também poderíamos usá-los para voltar antes de ter partido. Assim, talvez você pense que poderia fazer algo como explodir o foguete na plataforma de lançamento e impedir sua partida. Essa é uma variação do paradoxo do avô: o que acontece se você volta e mata seu avô antes de seu pai ter sido concebido? (Ver Figura 5.3.)



(FIG. 5.2) UMA SEGUNDA VARIAÇÃO DO PARADOXO DOS GÊMEOS

(1)
Se houvesse um buraco de minhoca com as duas pontas próximas, você poderia caminhar através do buraco negro e sair ao mesmo tempo.

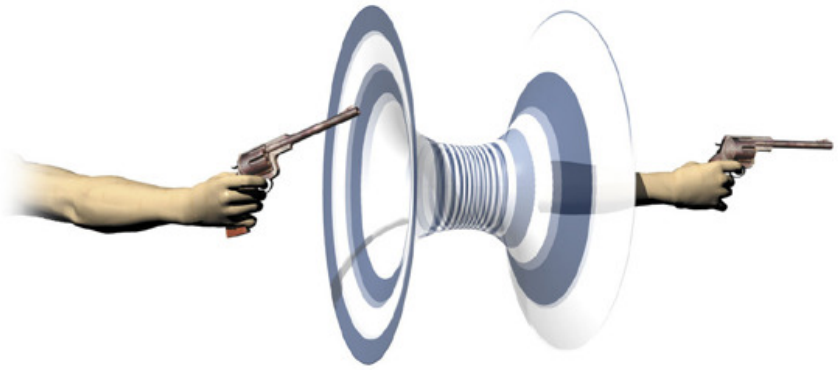


(2)
É possível imaginar que entramos em uma ponta do buraco de minhoca em uma longa viagem numa espaçonave enquanto a outra ponta permanece na Terra.

(3)
Devido ao efeito do paradoxo dos gêmeos, quando a espaçonave volta, menos tempo se passou para a boca que ela contém do que para a boca que fica na Terra. Isso significaria que, ao entrarmos na boca da Terra, poderíamos sair da espaçonave em um momento anterior.

Claro, isso é um paradoxo apenas se você acredita em seu livre-arbítrio de fazer o que quiser quando voltar no tempo. Este livro não entrará numa

discussão filosófica sobre o livre-arbítrio. Em vez disso, vai se concentrar em verificar se as leis da física permitem que o espaço-tempo seja tão dobrado a ponto de que um corpo macroscópico como uma espaçonave possa voltar para seu próprio passado. Segundo a teoria de Einstein, uma espaçonave necessariamente viaja abaixo da velocidade da luz e segue o que chamamos de trajetória do tipo tempo através do espaço-tempo. Assim, podemos formular a pergunta em termos técnicos: o espaço-tempo admite curvas do tipo tempo que sejam fechadas — isto é, que voltem ao ponto de partida repetidas vezes? Vou me referir a tais trajetórias como "loops temporais".



(FIG. 5.3)
Uma bala disparada através de um buraco de minhoca em um momento anterior pode afetar quem a dispara?

CORDAS CÓSMICAS

Cordas cósmicas são objetos longos e pesados com uma seção transversal minúscula que pode ter sido produzida durante os estágios iniciais do universo. Uma vez formadas, as cordas cósmicas foram ainda mais esticadas pela expansão do universo e hoje uma única corda cósmica poderia cobrir toda a extensão de nosso universo observável.

A ocorrência de cordas cósmicas é sugerida pela moderna teoria de partículas, que prevê que nos estágios iniciais e quentes do universo a matéria se encontrava em fase simétrica, mais como água líquida — que é simétrica: a mesma em todo ponto e em todas as direções — do que como cristais de gelo, que possuem uma estrutura discreta.

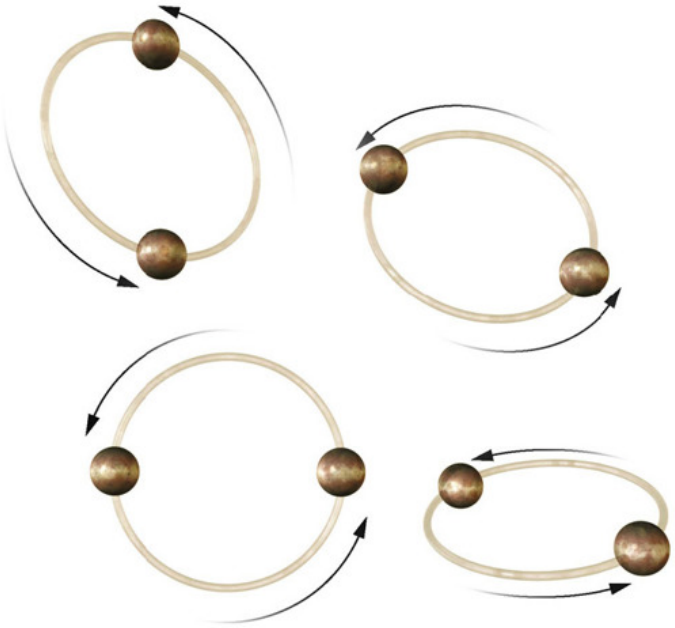
Quando o universo esfriou, a simetria da fase inicial pode ter sido quebrada de formas diferentes em regiões distantes. Consequentemente, a matéria cósmica teria se estabilizado em diferentes estados fundamentais nessas regiões. Cordas cósmicas são as configurações da matéria nas fronteiras entre essas regiões. A formação delas foi desse

modo inevitável, uma consequência do fato de que os estados fundamentais de diferentes regiões não puderam se harmonizar.

Existem três níveis em que podemos tentar responder a essa pergunta. O primeiro é a teoria da relatividade geral de Einstein, que presume que o universo tem uma história bem definida, sem qualquer incerteza. Para essa teoria clássica, temos um quadro razoavelmente completo. Porém, como vimos, essa teoria não pode estar de todo correta, pois observamos que a matéria está sujeita à incerteza e às flutuações quânticas.

Podemos, desse modo, fazer a pergunta sobre a viagem no tempo em um segundo nível, o da teoria semiclássica. Nela, consideramos que a matéria se comporta segundo a teoria quântica, com a incerteza e as flutuações quânticas, mas com o espaço-tempo bem definido e nos moldes clássicos. Aqui o quadro é menos completo, mas ao menos temos uma ideia de como prosseguir.

Por fim, existe a teoria da gravitação quântica completa, seja ela o que for. Nessa teoria, em que não apenas a matéria como também o tempo e o espaço são incertos e flutuantes, não fica claro sequer como fazer a pergunta sobre a viabilidade da viagem no tempo. Talvez o melhor que podemos fazer seja perguntar como as pessoas em regiões onde o espaço-tempo é quase clássico e livre de incerteza interpretariam suas medições. Será que pensariam que a viagem no tempo teve lugar em regiões de forte gravidade e grandes flutuações quânticas?



(FIG. 5.4)
O espaço-tempo admite curvas tipo tempo fechadas, voltando ao ponto de partida repetidas vezes?

TEOREMA DA INCOMPLETUDE DE GÖDEL

Em 1931, o matemático Kurt Gödel demonstrou seu famoso teorema da incompletude acerca da natureza da matemática. O teorema afirma que dentro de qualquer sistema formal de axiomas, como a matemática atual, sempre persistem questões que não podem ser demonstradas nem refutadas com base nos axiomas que definem o sistema. Em outras palavras, Gödel mostrou que há problemas que não podem ser resolvidos por nenhum conjunto de leis ou procedimentos.

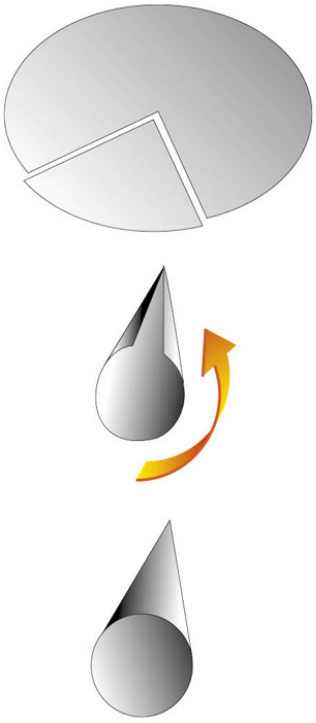
O teorema de Gödel estabeleceu os limites fundamentais da matemática. Foi um grande choque para a comunidade científica, uma vez que acabou com a crença disseminada de que a matemática era um sistema coerente e completo baseado numa fundação lógica única. O teorema de Gödel, o princípio da incerteza de Heisenberg e a impossibilidade prática de acompanhar a evolução até de um sistema determinista que se torna caótico formam um conjunto central de limitações para o conhecimento científico que só veio a ser apreciado no decorrer do século XX.

Para começar pela teoria clássica: o espaço-tempo plano da relatividade restrita (a relatividade sem a gravidade) não admite a viagem no tempo,

tampouco os espaços-tempos curvos que eram conhecidos anteriormente. Logo, foi um grande choque para Einstein quando, em 1949, Kurt Gödel, do teorema de Gödel (ver boxe), descobriu um espaço-tempo que era um universo preenchido por matéria em rotação, com loops temporais em cada ponto (Figura 5.4).

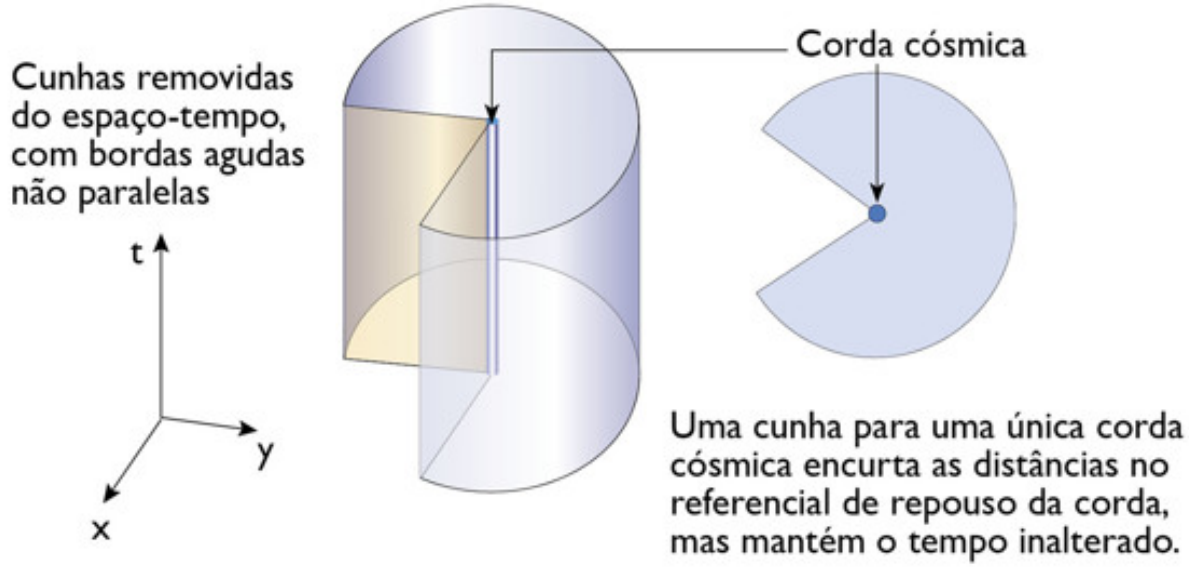
A solução de Gödel exigia uma constante cosmológica, que pode ou não existir na natureza, porém mais tarde foram encontradas soluções sem uma constante cosmológica. Um caso particularmente interessante é aquele em que duas cordas cósmicas passam em alta velocidade uma pela outra.

Cordas cósmicas não devem ser confundidas com as cordas da teoria das cordas, embora guardem alguma relação. São objetos dotados de comprimento, mas cuja seção transversal é minúscula. Sua ocorrência está prevista em algumas teorias de partículas elementares. O espaço-tempo fora de uma corda cósmica isolada é plano, mas com a figura de uma cunha recortada, tendo a extremidade aguda da cunha junto à corda. É como um cone: pegue um círculo de papel e corte uma cunha com a quina no centro do círculo. Depois, descarte o pedaço que você recortou e cole as bordas do pedaço restante formando um cone. Isso representa o espaço-tempo em que a corda cósmica existe (Figura 5.5).



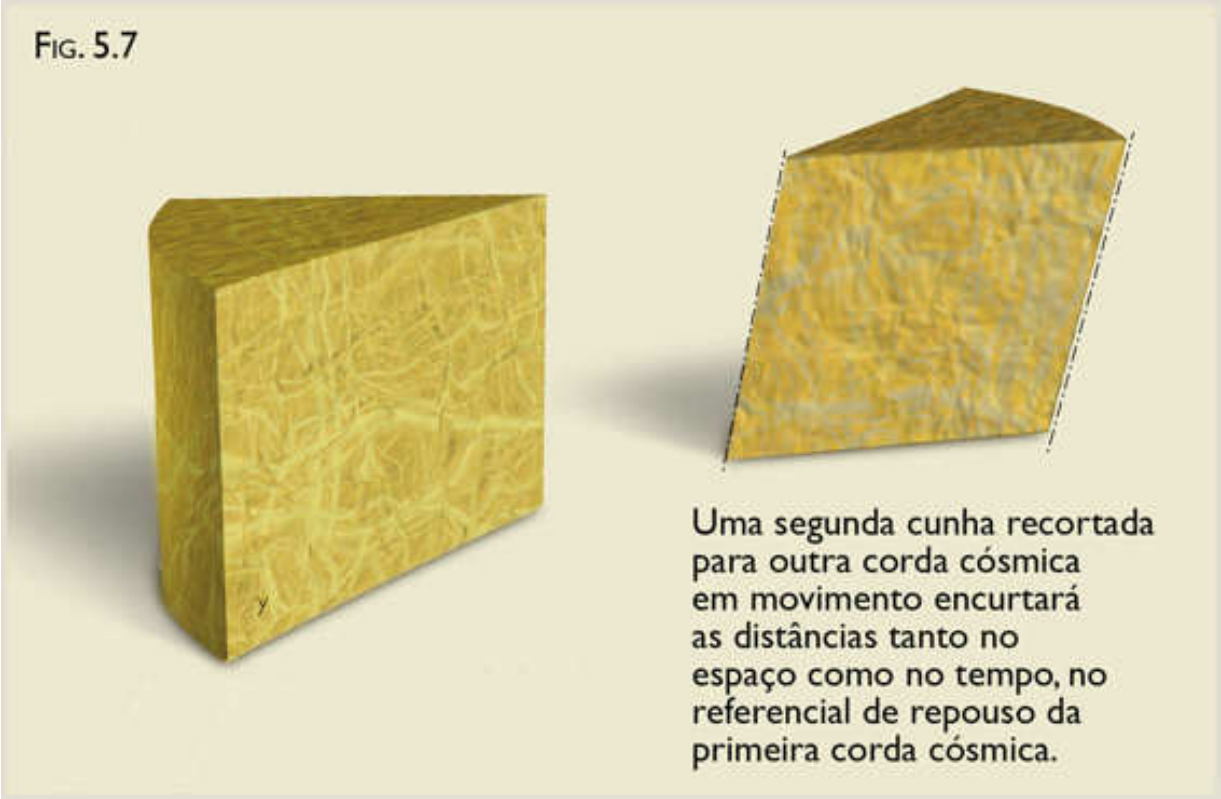
(FIG. 5.5)

Observe que, como a superfície do cone é a mesma folha de papel plana com a qual você começou (sem a cunha), ela ainda pode ser chamada de "plana", a não ser no vértice. Podemos perceber que há uma curvatura no vértice pelo fato de que um círculo em torno dele será menor do que um círculo traçado à mesma distância em torno do centro da folha de papel redonda original. Em outras palavras, um círculo em torno do vértice é mais curto do que se esperaria para um círculo desse raio no espaço plano, devido ao segmento que falta (Figura 5.6).



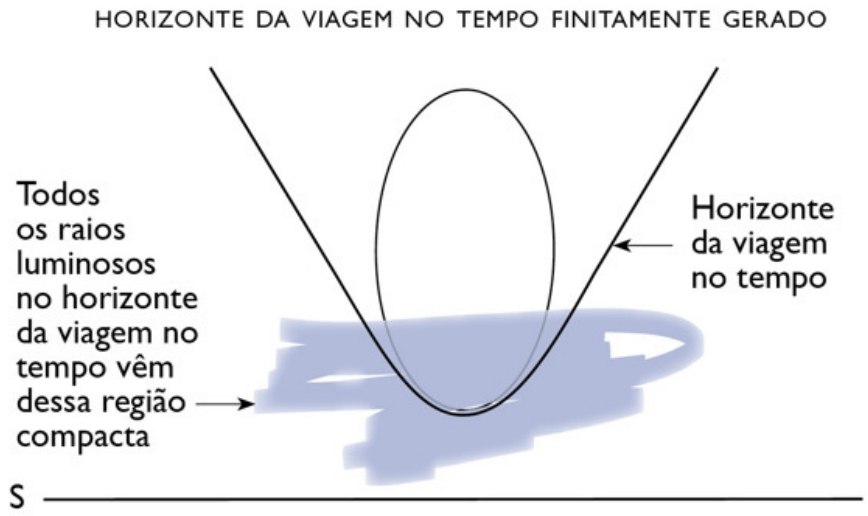
(FIG. 5.6)

Do mesmo modo, no caso de uma corda cósmica, a cunha removida do espaço-tempo plano encurta os círculos em torno da corda, mas não afeta o tempo ou as distâncias ao longo dela. Isso significa que o espaço-tempo em torno de uma única corda cósmica não contém nenhum loop temporal, portanto não é possível viajar para o passado. Entretanto, se há uma segunda corda cósmica movendo-se em relação à primeira, sua direção no tempo será uma combinação das direções do tempo e do espaço da primeira. Isso significa que a cunha cortada para a segunda corda encurtará tanto distâncias no espaço como intervalos de tempo, como vistos por alguém movendo-se com a primeira corda (Figura 5.7). Se as cordas cósmicas estiverem se movendo próximas à velocidade da luz relativamente uma à outra, a economia de tempo que ocorre em torno das duas cordas poderá ser tão grande que a pessoa chegaria antes de ter partido. Em outras palavras, há loops temporais que podemos tomar para viajar ao passado.



O espaço-tempo das cordas cósmicas contém matéria dotada de densidade de energia positiva e é consistente com a física que conhecemos. Porém a curvatura que produz loops temporais se estende ao infinito no espaço e retrocede infinitamente ao passado. Assim, esses espaços-tempos foram criados com a viagem do tempo intrínseca a eles. Não temos motivo para achar que nosso próprio universo tenha sido criado dessa forma recurvada e não obtivemos nenhuma evidência confiável de visitantes do futuro. (Não estou levando em consideração aqui a teoria da conspiração de que os Ovnis vêm do futuro e que o governo sabe disso e encobre a verdade. O histórico de acobertamento da verdade não é tão bom assim.) Devo, portanto, presumir que não houve loops temporais no passado distante ou, mais precisamente, no passado de alguma superfície através do espaço-tempo que chamarei de S. A questão então é a seguinte: poderia uma civilização avançada construir uma máquina do tempo? Ou seja, ela seria capaz de modificar o espaço-tempo para o futuro de S (acima da superfície S no diagrama), de modo que os loops temporais

aparecessem numa região finita? Digo região finita porque, a despeito de quão avançada uma civilização venha a ser, presumivelmente ela poderia controlar apenas uma parte finita do universo.



(FIG. 5.8)
Mesmo a civilização mais avançada só poderia curvar o espaço-tempo numa região finita. O horizonte da viagem no tempo, o contorno da parte do espaço-tempo em que é possível viajar para o passado, seria formado pelos raios luminosos que emergem de regiões finitas.

Na ciência, encontrar a formulação correta de um problema costuma ser a chave para resolvê-lo, e esse foi um bom exemplo. Para definir o que eu queria dizer com máquina do tempo finita, recorri a alguns antigos trabalhos meus. A viagem no tempo é possível numa região do espaço-tempo em que há loops temporais, trajetórias que se movem a uma velocidade inferior à da luz, mas que mesmo assim conseguem retroceder ao lugar e ao momento em que começaram, devido à curvatura do espaço-tempo. Uma vez que parti do pressuposto de que não havia loops temporais no passado distante, deve haver o que chamo de "horizonte" da viagem no tempo, uma fronteira separando as regiões com e sem loops temporais (Figura 5.8).

Horizontes da viagem no tempo são como horizontes de buracos negros. Enquanto o horizonte de um buraco negro é formado pelos raios luminosos que escapam por pouco de cair no buraco negro, um horizonte

de viagem no tempo é formado por raios luminosos prestes a se encontrarem com eles mesmos. Desse modo, assumo como meu critério para uma máquina do tempo o que chamo de horizonte finitamente gerado — ou seja, um horizonte formado por raios luminosos que emergem todos de uma região delimitada. Em outras palavras, eles não provêm do infinito ou de uma singularidade, mas se originam de uma região finita que contém loops temporais — o tipo de região que se supõe que nossa civilização avançada pode criar.



A questão então é: uma civilização avançada seria capaz de construir uma máquina do tempo?

Ao adotar essa definição como o vestígio de uma máquina do tempo, temos a vantagem de ser capazes de usar o maquinário que Roger Penrose e eu desenvolvemos para estudar singularidades e buracos negros. Mesmo sem utilizar as equações de Einstein posso mostrar que, em geral, um horizonte finitamente gerado conterá um raio luminoso que de fato se encontra consigo mesmo — isto é, um raio luminoso que continua a voltar ao mesmo ponto repetidas vezes. A cada aproximação, a luz exibiria mais e mais um desvio para o azul, de modo que as imagens seriam cada vez mais azuis. As cristas de onda de um pulso luminoso ficarão cada vez mais próximas e a luz dará a volta a intervalos cada vez mais curtos de seu tempo. Na verdade, uma partícula de luz teria apenas uma história finita, como definida por sua própria medida de tempo, ainda que ela desse voltas e mais voltas em uma região finita e não atingisse uma singularidade de curvatura.

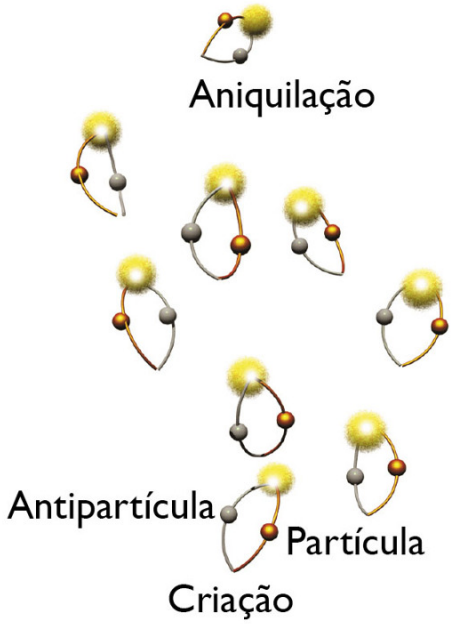
Poderíamos não nos importar se uma partícula de luz completasse sua história em um tempo finito. Contudo, posso provar também que haveria trajetórias se movendo a uma velocidade inferior à da luz dotadas de duração apenas finita. Essas seriam as histórias de observadores que estariam presos em uma região finita antes do horizonte e dariam voltas e mais voltas cada vez mais rápido até atingirem a velocidade da luz em um tempo finito. Assim, se uma linda alienígena num disco voador convidar você para dar uma voltinha com ela em sua máquina do tempo, pense duas vezes. Você poderá ficar aprisionado numa dessas histórias repetitivas de duração apenas finita (Figura 5.9).



(FIG. 5.9)
O perigo da viagem no tempo.

Esses resultados não dependem das equações de Einstein — apenas do modo como o espaço-tempo teria de se dobrar para produzir loops temporais em uma região finita. Entretanto, hoje podemos nos perguntar que tipo de matéria uma civilização avançada precisaria usar para dobrar o espaço-tempo de modo a construir uma máquina do tempo de tamanho finito. Poderia ela ter densidade de energia positiva por toda parte, como no espaço-tempo de cordas cósmicas que descrevi anteriormente? O espaço-tempo de cordas cósmicas não satisfaz minha exigência de que os loops temporais surjam em uma região finita. Porém, alguém poderia pensar que isso ocorria apenas porque as cordas cósmicas eram infinitamente longas. Poderíamos imaginar que alguém seria capaz de

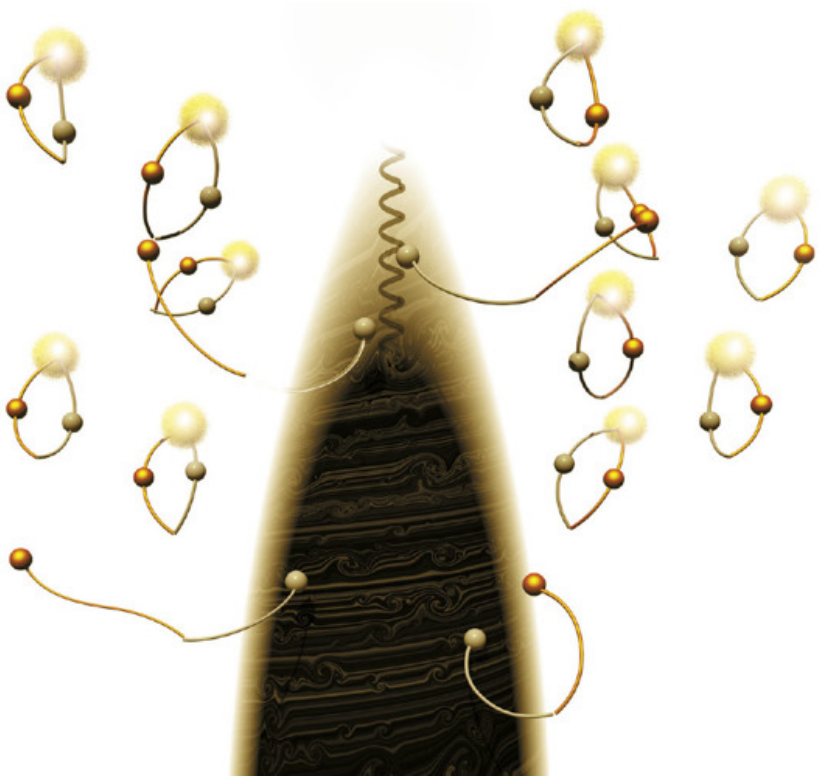
construir uma máquina do tempo finita usando loops finitos de cordas cósmicas e obter a densidade de energia positiva por toda parte. É uma pena desapontar pessoas como Kip, que querem voltar ao passado, mas isso não pode ser feito com densidade de energia positiva por toda parte. Eu posso demonstrar que para construir uma máquina do tempo finita precisaríamos de energia negativa.



(FIG. 5.10)
A previsão de que buracos negros emitem radiação e perdem massa implica que a teoria quântica faz a energia negativa fluir para o buraco negro através do horizonte. Para o buraco negro encolher, a densidade de energia no horizonte deve ser negativa, sinal exigido para a construção de uma máquina do tempo.

A densidade de energia é sempre positiva na teoria clássica, de modo que máquinas do tempo de tamanho finito estão descartadas nesse nível. Entretanto, a situação é diferente na teoria semiclássica, em que consideramos a matéria se comportando segundo a teoria quântica, mas o espaço-tempo sendo bem definido e clássico. Como vimos, o princípio da incerteza da teoria quântica significa que os campos estão sempre flutuando para cima e para baixo, mesmo no espaço aparentemente vazio, e têm uma densidade de energia que é infinita. Desse modo, temos de

subtrair uma quantidade infinita para obter a densidade de energia finita que observamos no universo. Essa subtração pode tornar negativa a densidade de energia, ao menos em âmbito local. Mesmo no espaço plano, podemos encontrar estados quânticos em que a densidade de energia é negativa localmente, embora a energia total seja positiva. Poderíamos nos perguntar se esses valores negativos de fato levam o espaço-tempo a se curvar do modo apropriado para construir uma máquina do tempo finita, mas pelo jeito eles devem fazer isso. Como vimos no Capítulo 4, as flutuações quânticas significam que mesmo o espaço aparentemente vazio é cheio de pares de partículas virtuais que surgem juntas, afastam-se e depois voltam a se unir para aniquilar uma à outra (Figura 5.10). Um membro de um par de partículas terá energia positiva, e o outro, energia negativa. Quando um buraco negro está presente, o membro de energia negativa pode cair ali dentro e o de energia positiva pode escapar, aparentando ser a radiação que transporta a energia positiva para longe do buraco negro. As partículas negativas em queda fazem o buraco negro perder massa e evaporar, com seu horizonte de eventos diminuindo de tamanho (Figura 5.11).



(FIG. 5.11)

A matéria comum com densidade de energia positiva tem um efeito gravitacional atrativo e dobra o espaço-tempo de modo a curvar os raios luminosos em direção uns aos outros — assim como a bola no lençol de borracha do Capítulo 2 sempre faz as esferas de rolimã se curvarem em sua direção, nunca o contrário.

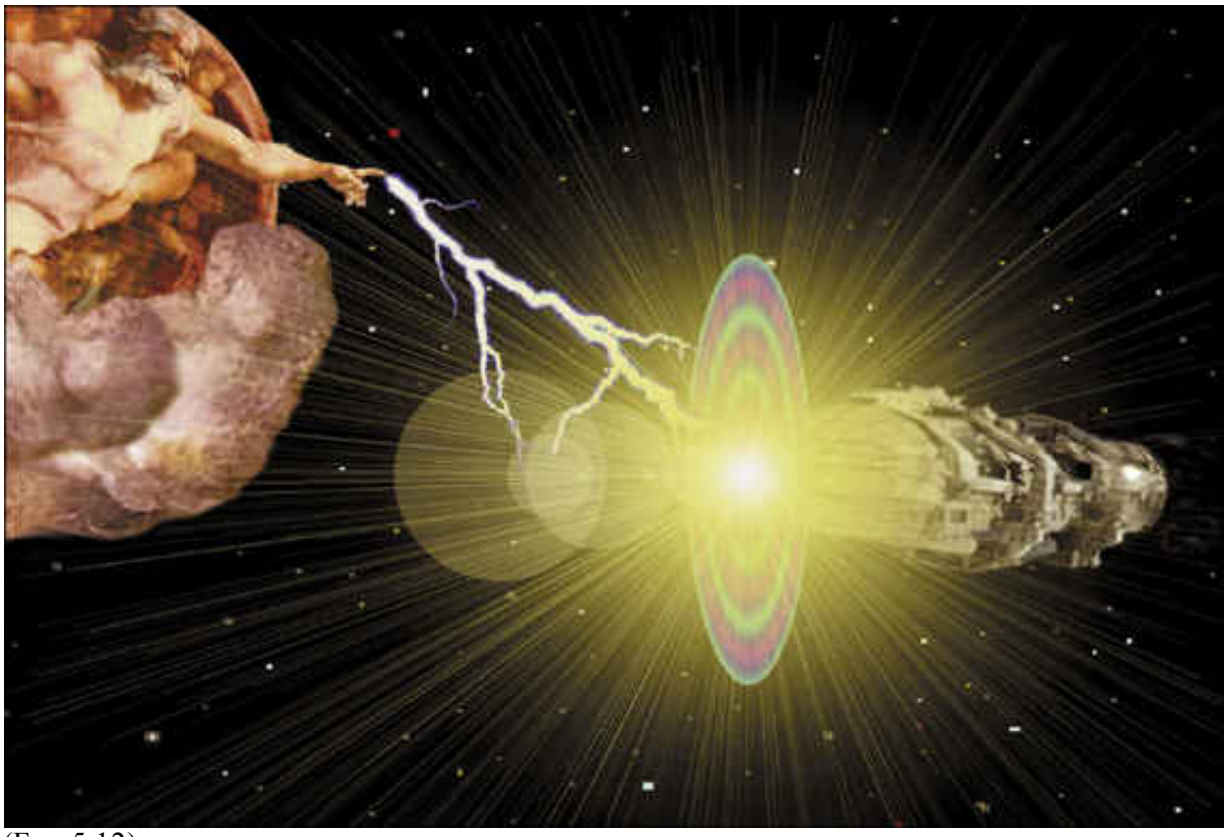
Isso sugere que a área do horizonte de um buraco negro pode apenas aumentar com o tempo, nunca encolher. Para que o horizonte de um buraco negro diminua de tamanho, a densidade de energia no horizonte deve ser negativa e dobrar o espaço-tempo para fazer os raios luminosos divergirem uns dos outros. Foi algo que percebi pela primeira vez quando me preparava para dormir, pouco após o nascimento de minha filha. Não vou dizer há quanto tempo foi isso, mas hoje tenho um neto.



Meu neto, William Mackenzie Smith.

A evaporação dos buracos negros mostra que, no nível quântico de energia, a densidade às vezes pode ser negativa e dobrar o espaço-tempo na direção que seria necessária para construir uma máquina do tempo. Assim, podemos imaginar que uma civilização muito avançada conseguiria fazer com que a densidade de energia fosse suficientemente negativa para produzir uma máquina do tempo que pudesse ser usada por objetos macroscópicos como espaçonaves. Porém, há uma diferença importante entre um horizonte de buraco negro, que é formado por raios luminosos que apenas continuam a avançar, e o horizonte de uma máquina do tempo, que contém raios luminosos fechados que seguem dando voltas e mais voltas. Uma partícula virtual se movendo numa trajetória fechada como essa levaria sua energia de estado fundamental de volta ao mesmo ponto vez após outra. Desse modo, seria de se esperar que a densidade de energia fosse infinita no horizonte — a fronteira da máquina do tempo, a região em que podemos viajar para o passado. Isso é demonstrado por cálculos explícitos em algumas situações que são simples o suficiente para cálculos exatos. Significaria que uma pessoa em uma sonda espacial que tentasse atravessar o horizonte para chegar à máquina do tempo seria aniquilada por um disparo de radiação (Figura 5.12). Logo, o futuro parece negro para a viagem no tempo — ou será que deveríamos dizer branco e ofuscante?

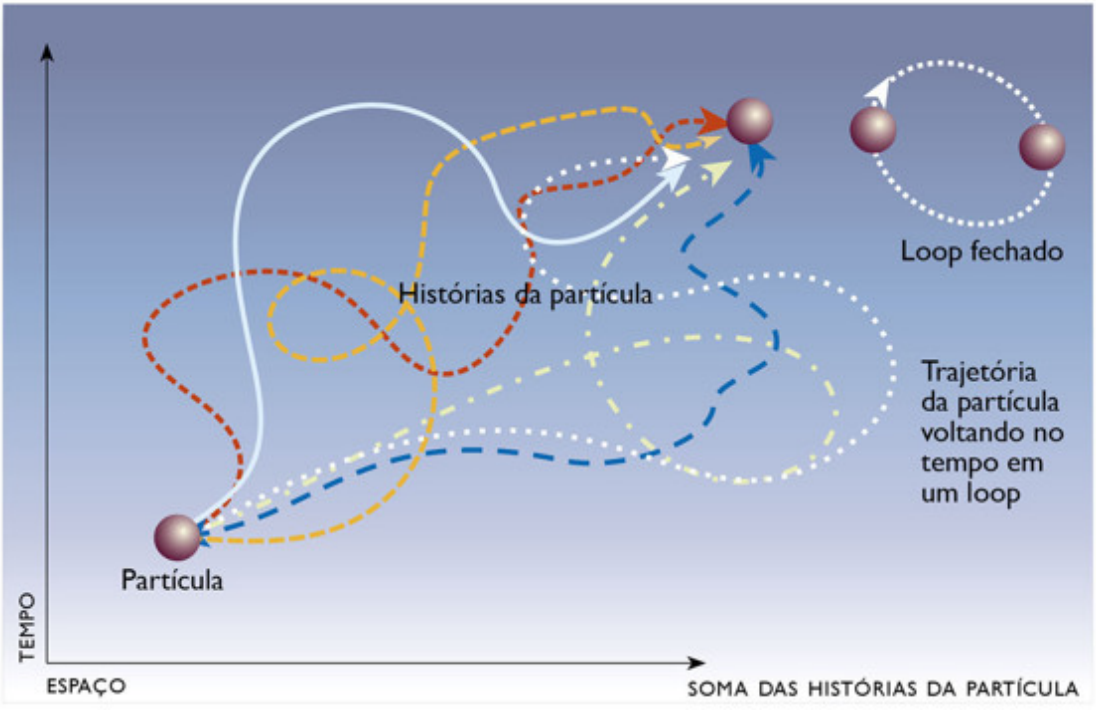
A densidade de energia da matéria depende do estado em que ela está; assim, é possível que uma civilização avançada seja capaz de tornar a densidade de energia finita na fronteira da máquina do tempo "congelando" ou removendo as partículas virtuais que a contornam incessantemente num loop fechado. Não está claro, contudo, se uma máquina do tempo como essa seria estável: a mínima perturbação, como alguém atravessando o horizonte para entrar na máquina do tempo, pode levar à circulação de partículas virtuais e ao disparo de um raio. Essa é uma questão que os físicos devem ser livres para discutir sem virar alvo de piadas. Mesmo que se descubra que a viagem no tempo é impossível, seria importante compreender por que ela é impossível.



(FIG. 5.12)
Podemos ser destruídos por uma descarga de radiação ao cruzar o horizonte da viagem no tempo.

Para responder a essa questão em definitivo, precisamos considerar flutuações quânticas não apenas de campos de matéria, mas também do

próprio espaço-tempo. Seria de se esperar que elas causassem certa vagueza nas trajetórias dos raios luminosos e em todo o conceito de ordenação do tempo. De fato, podemos considerar a radiação dos buracos negros um vazamento, pois as flutuações quânticas do espaço-tempo significam que o horizonte não é exatamente bem definido. Como ainda não dispomos de uma teoria completa da gravitação quântica, é difícil dizer quais devem ser os efeitos das flutuações do espaço-tempo. Não obstante, podemos esperar obter alguns indícios com a soma das histórias de Feynman, descrita no Capítulo 3.



(FIG. 5.13)
A soma das histórias de Feynman precisa incluir histórias em que as partículas voltam no tempo e até histórias que são loops fechados no tempo e no espaço.

Cada história será um espaço-tempo curvo contendo campos de matéria. Uma vez que devemos somar todas as histórias possíveis, não

apenas as que satisfazem algumas equações, a soma deve incluir espaços-tempos que são dobrados o bastante para viajar ao passado (Figura 5.13). Logo, a questão é: por que a viagem no tempo não está acontecendo por toda parte? A resposta é que ela de fato está ocorrendo em escala microscópica, mas não a notamos. Se aplicamos a ideia da soma das histórias de Feynman a uma partícula, temos de incluir histórias em que a partícula viaja mais rápido do que a luz e até para trás no tempo. Em particular, haverá histórias em que a partícula dá voltas e mais voltas num loop fechado no tempo e no espaço. Poderia ser como no filme *Feitiço do Tempo*, em que um repórter é obrigado a reviver o mesmo dia repetidas vezes (Figura 5.14).

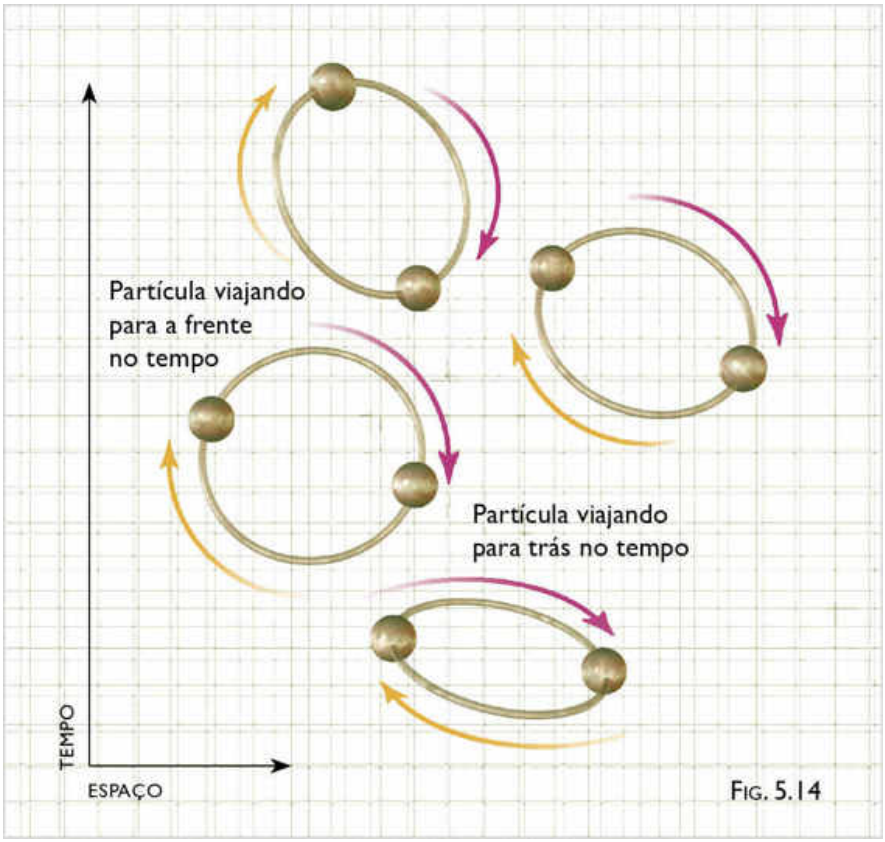
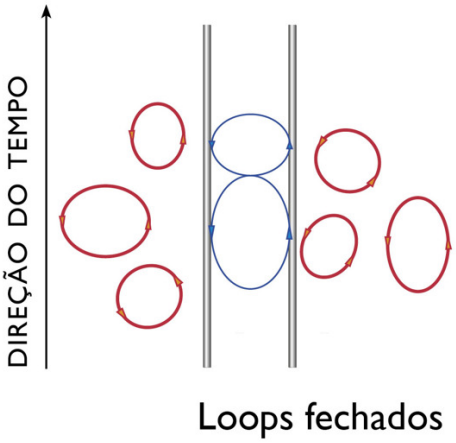


FIG. 5.14

Não podemos observar diretamente tais partículas com histórias em loops fechados usando um detector de partículas. Porém, seus efeitos indiretos já foram medidos numa série de experimentos. Um deles é um

pequeno desvio na luz emitida por átomos de hidrogênio, causado por elétrons movendo-se em loops fechados. Outro é uma pequena força entre placas metálicas paralelas, provocado pelo fato de que há ligeiramente menos histórias em loops fechados capazes de caber entre as placas do que na região externa — outra interpretação equivalente do efeito Casimir. Assim, a existência de histórias em loops fechados é confirmada por experimentos (Figura 5.15).



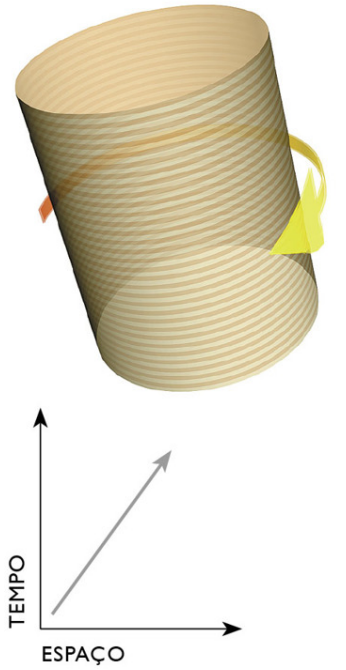
(FIG. 5.15)

Poderíamos discutir se as histórias das partículas de loop fechado têm alguma coisa a ver com a curvatura do espaço-tempo, pois elas ocorrem mesmo em fundos fixos como o espaço plano. Mas nos últimos anos descobrimos que os fenômenos na física muitas vezes possuem descrições duais igualmente válidas. Pode-se também dizer com propriedade que uma partícula se move em um loop fechado em um dado fundo fixo ou que a partícula permanece fixa e o espaço e o tempo flutuam em volta dela. É apenas uma questão de fazer a soma das trajetórias das partículas primeiro e depois a soma dos espaços-tempos curvos, ou vice-versa.

Parece, portanto, que a teoria quântica permite a viagem no tempo em escala microscópica. Contudo, isso não é de grande utilidade para fins de ficção científica, como voltar no tempo e matar seu avô. Logo, a questão é: a probabilidade da soma sobre as histórias pode formar um pico em torno de espaços-tempos com loops temporais macroscópicos?

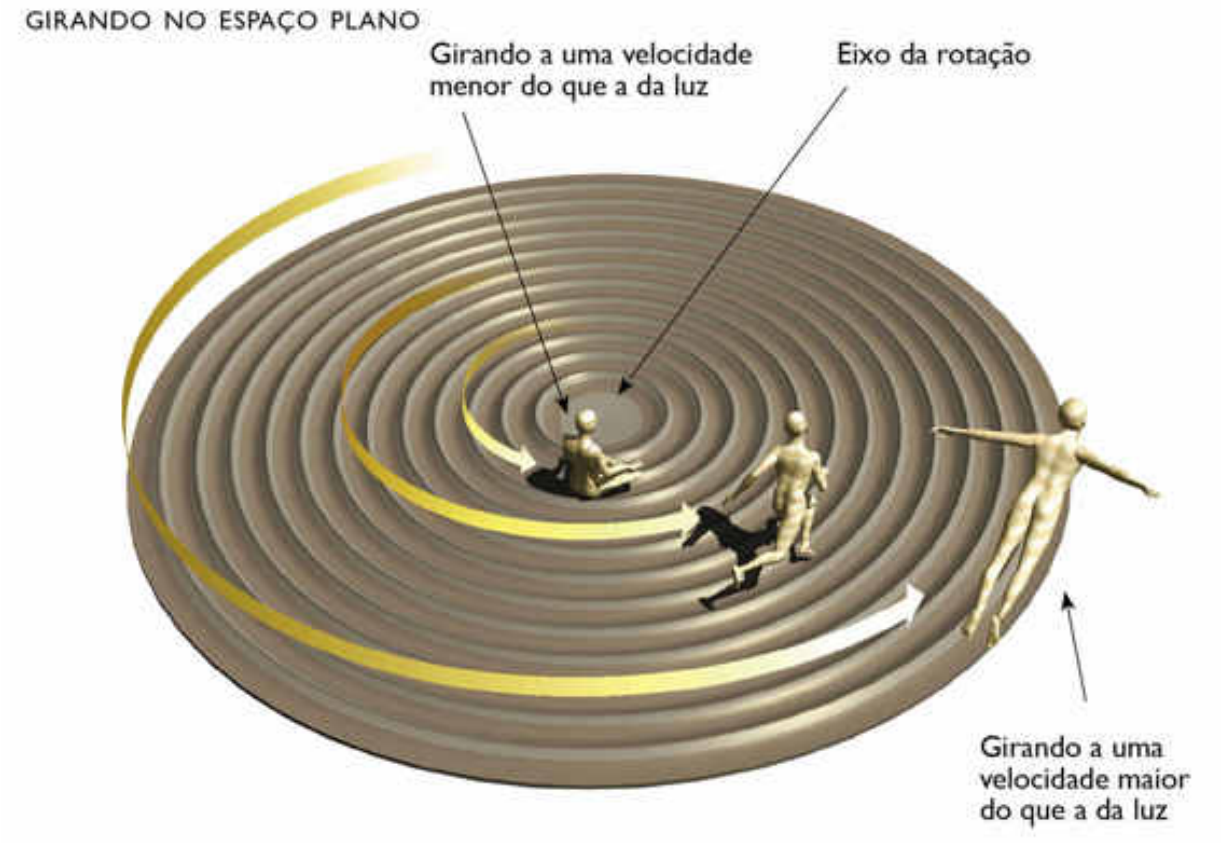
Podemos investigar essa questão estudando a soma sobre as histórias em campos de matéria numa série de espaços-tempos de fundo que fiquem cada vez mais próximos de admitir loops temporais. Seria de se esperar que algo dramático ocorresse quando os loops temporais surgissem, e isso é demonstrado por um exemplo simples que estudei com meu aluno Michael Cassidy.

Os espaços-tempos de fundo nas séries estudadas por nós estavam estreitamente relacionados ao que é chamado de universo de Einstein, o espaço-tempo que Einstein propôs quando acreditava que o universo era estático e imutável no tempo, sem se expandir nem se contrair (ver Capítulo 1). No universo de Einstein, o tempo corre do passado infinito para o futuro infinito. No entanto, as direções espaciais são finitas e fechadas em si mesmas, como a superfície da Terra, só que com uma dimensão extra. Podemos imaginar o espaço-tempo como um cilindro com o eixo longo sendo a direção do tempo e a seção transversal sendo as três direções espaciais (Figura 5.16).



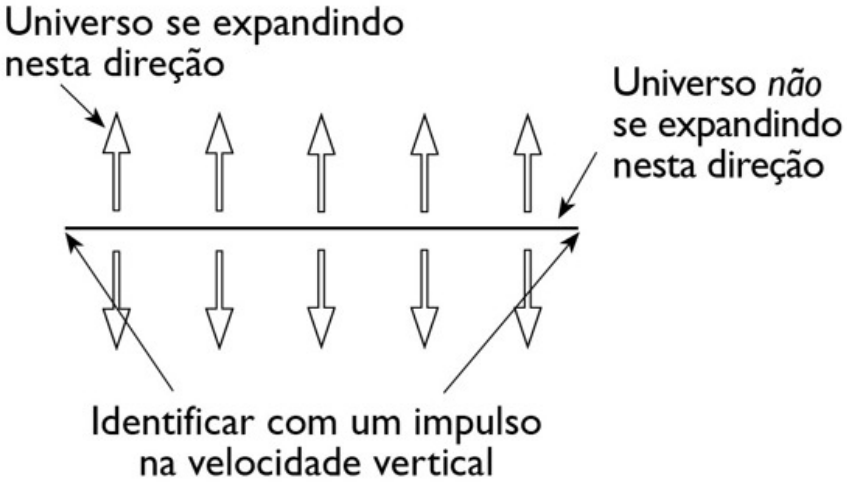
(FIG. 5.16)
O universo de Einstein é como um cilindro: é finito no espaço e constante no tempo. Devido ao seu tamanho finito, pode girar a uma velocidade menor do que a da luz por toda parte.

O universo de Einstein não representa o universo em que vivemos porque ele não está se expandindo. Mesmo assim, é um fundo conveniente para usar quando discutimos viagem no tempo, pois é simples o suficiente para que possamos fazer a soma das histórias. Esquecendo a viagem no tempo por ora, considere a matéria em um universo de Einstein que esteja girando em torno de um eixo qualquer. Se você estivesse no eixo, poderia permanecer no mesmo ponto do espaço, assim como faz quando está parado no centro de um carrossel. Mas, se não estivesse no eixo, estaria se movendo pelo espaço à medida que girasse em torno do eixo. Quanto mais longe do eixo estivesse, mais rápido estaria se movendo (Figura 5.17). Assim, se o universo fosse infinito no espaço, pontos suficientemente distantes do eixo deveriam estar girando mais rápido do que a luz. Porém, como o universo de Einstein é finito nas direções espaciais, há uma taxa de rotação crítica abaixo da qual nenhuma parte do universo está girando mais rápido do que a luz.



(FIG. 5.17)
No espaço plano, uma rotação rígida se moverá mais rápido do que a velocidade da luz longe do eixo.

Agora considere a soma das histórias das partículas em um universo de Einstein em rotação. Quando a rotação é lenta, há muitas trajetórias que uma partícula pode assumir usando uma dada quantidade de energia. Desse modo, a soma das histórias de todas as partículas nesse fundo proporciona uma grande amplitude. Isso significa que a probabilidade desse fundo seria alta na soma de todas as histórias no espaço-tempo curvo — ou seja, ele está entre as histórias mais prováveis. Entretanto, à medida que a taxa de rotação do universo de Einstein se aproxima do valor crítico, de modo que suas bordas externas estão se movendo a uma velocidade próxima à da luz, há uma única trajetória de partícula que é classicamente admissível nessa borda, a saber, a que está se movendo na velocidade da luz. Isso significa que a soma das histórias das partículas será pequena. Logo, a probabilidade desses fundos será baixa na soma de todas as histórias do espaço-tempo curvo. Ou seja, eles são os menos prováveis.



(FIG. 5.18) FUNDO COM CURVAS TIPO TEMPO FECHADAS

O que universos de Einstein em rotação têm a ver com viagem no tempo e loops temporais? A resposta é que eles são o equivalente

matemático de outros fundos que admitem loops temporais. Esses outros fundos são universos que estão se expandindo em duas direções espaciais. Os universos não estão se expandindo na terceira direção espacial, que é periódica. Isso significa dizer que, se você percorre certa distância nessa direção, volta ao ponto onde começou. Entretanto, cada vez que você completa um circuito na terceira direção espacial, sua velocidade na primeira ou na segunda direção aumenta (Figura 5.18).



Se o impulso for pequeno, não haverá loops temporais. Entretanto, considere uma sequência de fundos com impulsos crescentes de velocidade. Em um determinado impulso crítico, surgirão loops temporais. Não é de se surpreender que esse impulso crítico corresponda à taxa de rotação crítica dos universos de Einstein. Uma vez que os cálculos de soma sobre as histórias nesses fundos são matematicamente equivalentes, podemos concluir que a probabilidade desses fundos cai a zero à medida que eles se aproximam da curvatura necessária para os loops temporais. Em outras palavras, a probabilidade de haver curvatura suficiente para uma máquina do tempo é nula. Isso sustenta o que chamei de Conjectura de Proteção da Cronologia: que as leis da física conspiram para impedir a viagem no tempo de objetos macroscópicos.

Embora os loops temporais sejam admissíveis pela soma sobre as histórias, as probabilidades são baixíssimas. Baseando-me nos argumentos da dualidade mencionados antes, estimo a probabilidade de Kip Thorne conseguir voltar no tempo e matar seu avô como menos de uma em dez seguido de um trilhão de trilhão de trilhão de trilhão de trilhão de zeros.

Essa é uma probabilidade muito pequena, mas se você olhar com atenção para a foto de Kip vai notar uma ligeira vagueza nas bordas. Isso corresponde à débil possibilidade de que algum tratante do futuro tenha voltado para matar seu avô, fazendo com que ele não esteja realmente aqui.

Por gostarmos de uma aposta, Kip e eu jogamos com probabilidades como essa. O problema é que não podemos apostar um contra o outro pois agora estamos no mesmo time. Por outro lado, não existe ninguém mais com quem eu apostaria minhas fichas. Ele pode ser do futuro e saber que a viagem no tempo funcionou.

Talvez você ache que este capítulo é parte de uma conspiração do governo para acobertar as viagens no tempo. Talvez você tenha razão.

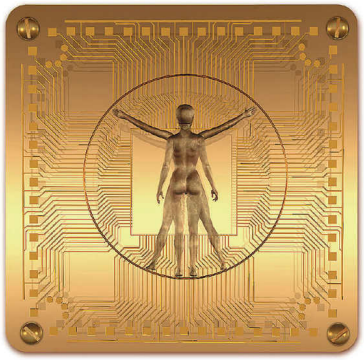


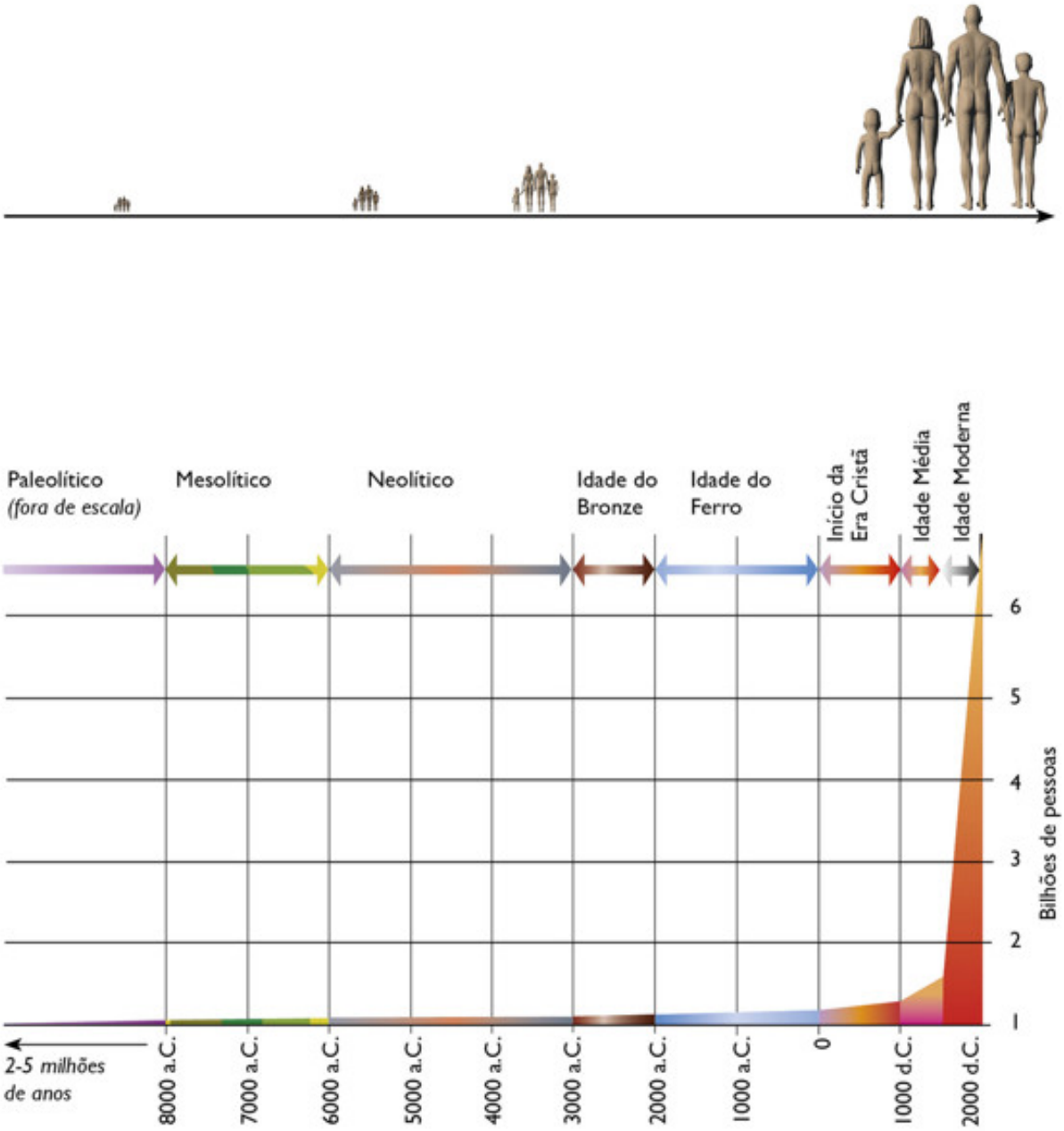
IMAGEM **S**: A probabilidade de que Kip possa voltar e matar seu avô é de $1/^{10^{10^{60}}}$. Em outras palavras, menos de uma em dez — seguido de um trilhão de trilhão de trilhão de trilhão de trilhão de zeros.

CAPÍTULO 6

NOSSO FUTURO?
JORNADA NAS ESTRELAS OU NÃO?

Como as vidas biológica e eletrônica continuarão a ganhar complexidade a uma taxa cada vez maior.





(FIG. 6.1) CRESCIMENTO POPULACIONAL



Newton, Einstein, comandante Data e eu jogando pôquer numa cena de Jornada nas Estrelas.

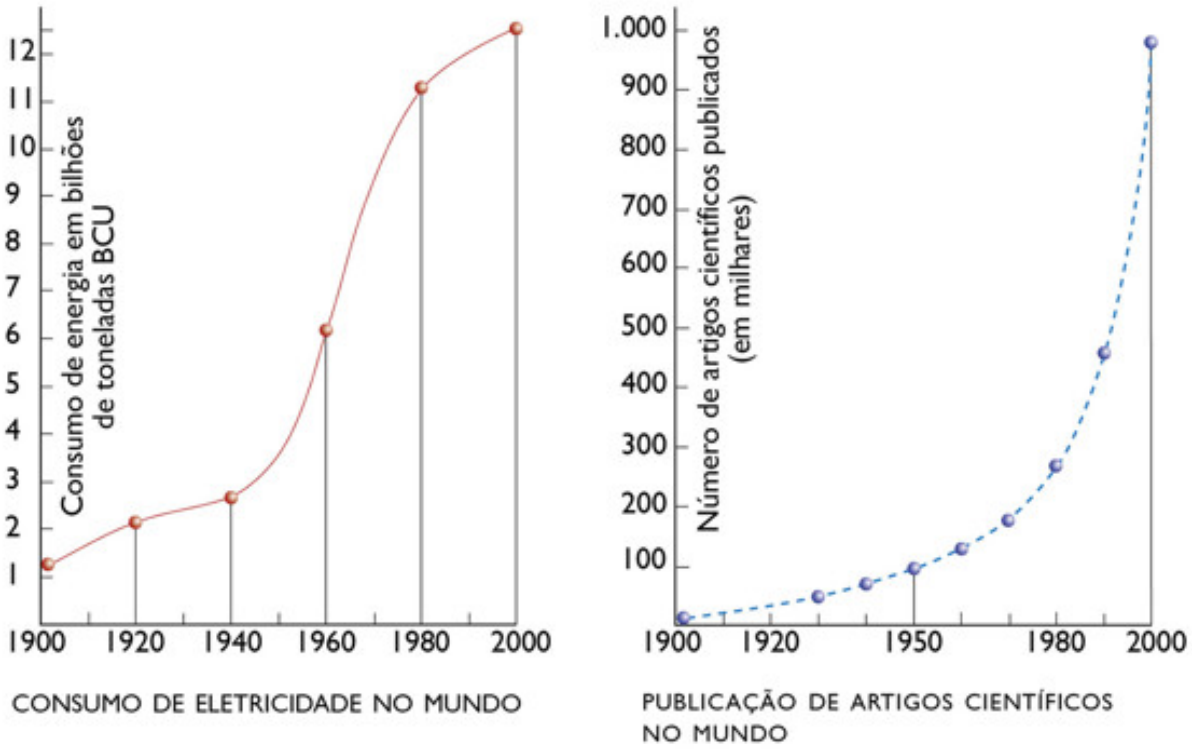
Cortesia da Paramount Pictures. STAR TREK. THE NEXT GENERATION
Copyright © 2001 by Paramount Pictures. Todos os Direitos Reservados.

A RAZÃO DA popularidade de *Jornada nas Estrelas* é sua visão segura e reconfortante do futuro. Como também sou fã da série, fui facilmente convencido a participar de um episódio em que jogava pôquer com Newton, Einstein e o comandante Data. Ganhei de todos eles, mas, infelizmente, houve um alerta vermelho, então nunca pude descontar minhas fichas.

Jornada nas Estrelas mostra uma sociedade muito mais avançada do que a nossa na ciência, na tecnologia e na organização política. (Nesse último aspecto, não deve ser difícil.) Pode ter havido grandes mudanças, com as tensões e os problemas que as acompanham, no tempo transcorrido de hoje até então, mas no período representado a ciência, a tecnologia e a organização da sociedade supostamente atingiram um nível de quase perfeição.

Quero questionar esse cenário e perguntar se algum dia chegaremos a um estado estacionário final na ciência e na tecnologia. Em nenhum

momento nos cerca de dez mil anos desde a última era do gelo a espécie humana experimentou um estado de conhecimento imutável e tecnologia estagnada. Houve retrocessos, como a Idade das Trevas após a queda do Império Romano. Porém, a população mundial, que é uma medida de nossa capacidade tecnológica para preservar a vida humana e obter alimento, cresceu regularmente, com apenas alguns reveses, como a Peste Negra (Figura 6.1).



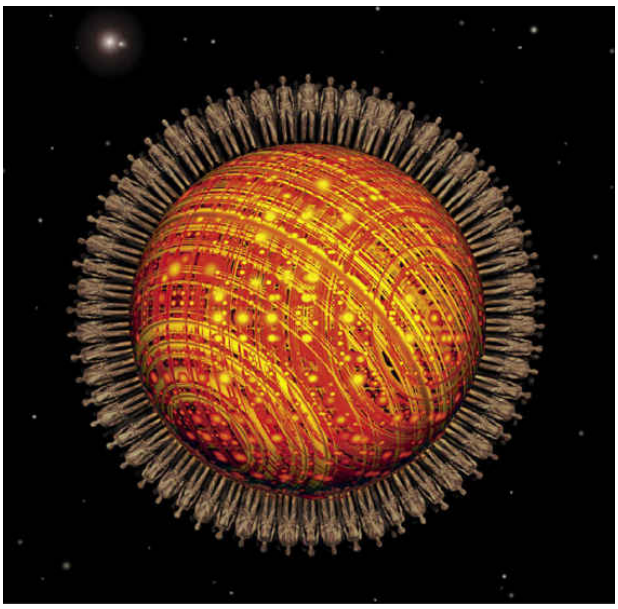
(FIG. 6.2)
Esquerda: O consumo de energia mundial total em bilhões de toneladas BCU (Bituminous Coal Unit), onde 1 tonelada ~Unidade de Carvão Betuminoso = 8,13 MW-hr.

Direita: O número de artigos científicos publicados todo ano. A escala vertical está em milhares. Em 1900 havia nove mil. Em 1950 havia noventa mil, e no ano de 2000 havia novecentos mil.

Nos últimos duzentos anos, o crescimento da população passou a ser exponencial, ou seja, a população aumenta a uma mesma porcentagem todo ano. No momento [2001], essa taxa é de cerca de 1,9% ao ano. Pode

não parecer muita coisa, mas significa que a população mundial duplica a cada quarenta anos (Figura 6.2).

Outras formas de medir o desenvolvimento tecnológico em tempos recentes são o consumo de eletricidade e o número de artigos científicos. Eles também revelam crescimento exponencial, duplicando a intervalos inferiores a quarenta anos. Não há indícios de que o desenvolvimento científico e tecnológico venha a diminuir e parar no futuro próximo — certamente não na época em que se passa *Jornada nas Estrelas*, que não está tão distante assim no futuro. Mas, se o crescimento da população e o aumento no consumo de eletricidade continuarem no ritmo atual, em 2600 a população mundial viverá em uma enorme aglomeração, e o uso da eletricidade deixará a Terra com um brilho incandescente (ver ilustração ao lado).



No ano de 2600, a população mundial estaria toda espremida e o consumo de eletricidade faria a Terra brilhar com um vermelho incandescente.

Se enfileirássemos todos os novos livros publicados um após o outro, teríamos de nos deslocar a quase 150 quilômetros por hora só para acompanhar o fim da fila. Obviamente, no ano de 2600 as novas obras artísticas e científicas virão mais na forma eletrônica do que em livros e

artigos físicos. Mesmo assim, a continuar o crescimento exponencial, surgiriam dez artigos por segundo no meu campo de física teórica e não haveria tempo para lê-los.

É claro que o crescimento exponencial de hoje não pode seguir indefinidamente. Então o que vai acontecer? Uma possibilidade é que seremos exterminados por algum desastre, como uma guerra nuclear. Há uma piada de mau gosto que diz que o motivo para não termos sido contatados por extraterrestres é que, ao atingir nosso estágio de desenvolvimento, uma civilização se torna instável e se autodestrói. Porém, sou um otimista. Não acredito que a espécie humana tenha chegado tão longe para se aniquilar bem quando as coisas estão ficando interessantes.

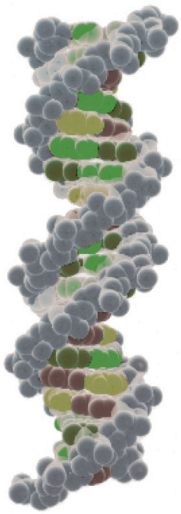


(FIG. 6.3)
O enredo de *Jornada nas Estrelas* depende de a *Enterprise*, e espaçonaves como a da imagem acima, ser capaz de viajar em velocidade de dobra, que é muito maior do que a da luz. Entretanto, se a conjectura de proteção da cronologia estiver correta, deveremos explorar a galáxia usando espaçonaves movidas por foguete, que viajam mais devagar do que a luz.

A visão de *Jornada nas Estrelas* para o futuro — de que atingimos um nível avançado, mas essencialmente estático — talvez se concretize em relação ao nosso conhecimento das leis básicas que governam o universo. Como descreverei no próximo capítulo, talvez haja uma teoria final à espera de ser descoberta por nós em um futuro não tão distante. Essa teoria final, se existir, determinará se o sonho da velocidade de dobra de *Jornada nas Estrelas* pode ser concretizado. Segundo as ideias atuais, a exploração da galáxia se dará de forma lenta e tediosa, com o uso de espaçonaves que viajam mais devagar do que a luz. Mas, como ainda não dispomos de uma teoria unificada completa, não podemos descartar inteiramente a dobra espacial (Figura 6.3).

A visão de para o futuro — de que atingimos um nível avançado, mas essencialmente estático — talvez se concretize em relação ao nosso conhecimento das leis básicas que governam o universo. Como descreverei no próximo capítulo, talvez haja uma teoria final à espera de ser descoberta por nós em um futuro não tão distante. Essa teoria final, se existir, determinará se o sonho da velocidade de dobra de pode ser concretizado. Segundo as ideias atuais, a exploração da galáxia se dará de forma lenta e tediosa, com o uso de espaçonaves que viajam mais devagar do que a luz. Mas, como ainda não dispomos de uma teoria unificada completa, não podemos descartar inteiramente a dobra espacial (Figura 6.3).

Por outro lado, já conhecemos as leis vigentes em todas as situações, exceto as mais extremas: as leis que governam a tripulação da *Enterprise*, quando não a própria espaçonave. Contudo, parece que jamais atingiremos um estado estacionário nos usos que fazemos dessas leis ou na complexidade dos sistemas que podemos produzir por meio delas. É sobre essa complexidade que o restante deste capítulo diz respeito.

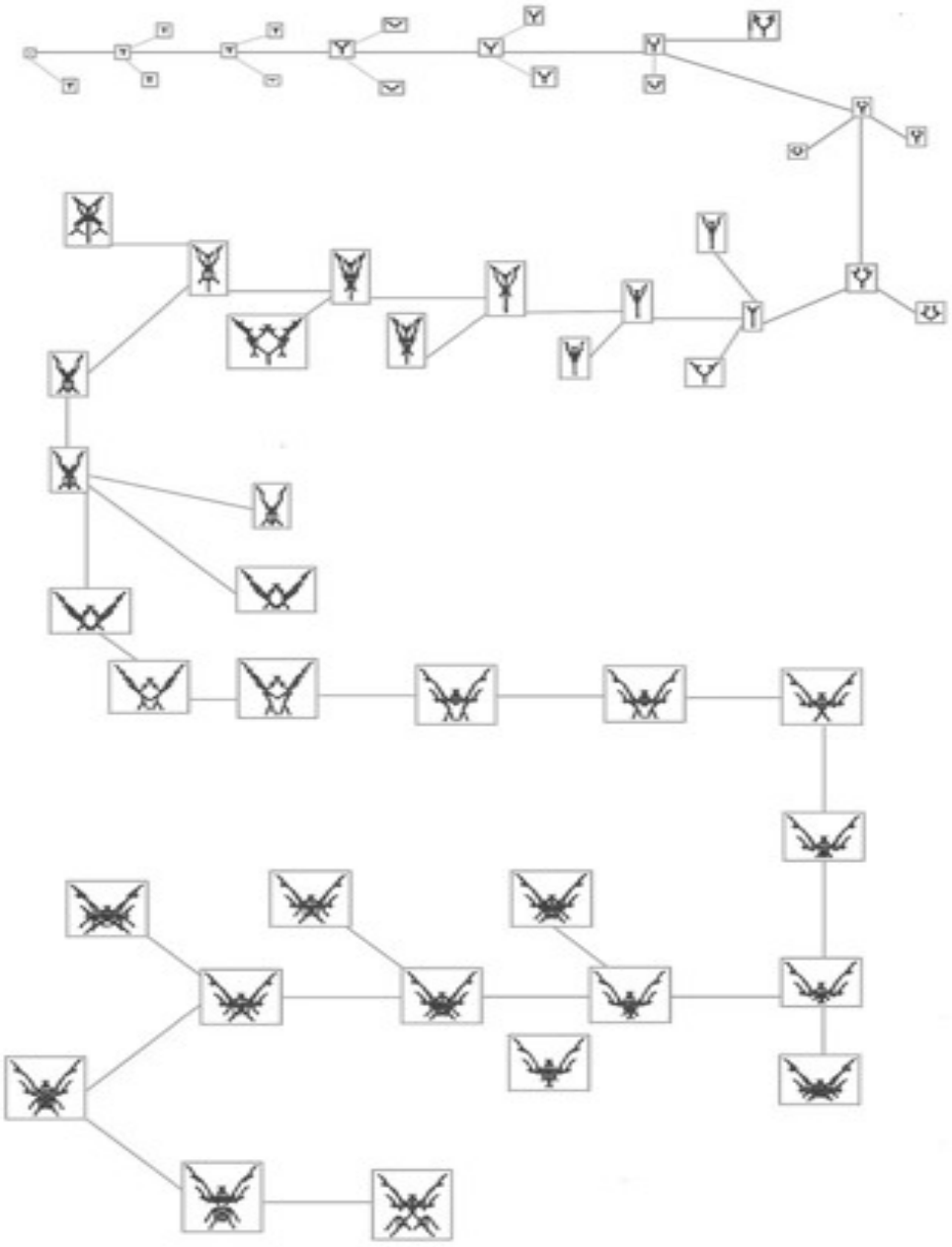


Sem dúvida os sistemas mais complexos que temos são nossos corpos. A vida parece ter se originado nos oceanos primordiais que cobriam a Terra há quatro bilhões de anos. Não sabemos como isso aconteceu. Pode ser que colisões aleatórias entre átomos tenham criado macromoléculas capazes de se reproduzir entre si e se rearranjar em estruturas mais complicadas. Porém, sabemos que por volta de 3,5 bilhões de anos atrás a molécula altamente complexa do DNA surgiu.

O DNA é a base de toda a vida na Terra. Sua estrutura em forma de dupla hélice, como uma escada de caracol, foi descoberta por Francis Crick e James Watson no laboratório Cavendish, em Cambridge, em 1953. As duas fitas da dupla hélice estão ligadas por pares de bases, como degraus numa escada de caracol. Há quatro bases num DNA: adenina, guanina, timina e citosina. A ordem em que ocorrem ao longo da escada de caracol contém a informação genética que possibilita ao DNA montar um organismo em torno de si e se reproduzir. À medida que ele faz cópias de si mesmo, ocorrem erros ocasionais na proporção ou na ordem das bases ao longo da espiral. Na maioria dos casos, os erros na replicação impossibilitam ou reduzem a probabilidade de que o DNA se reproduza, significando que esses erros genéticos — ou mutações, como são chamados — desaparecerão. Mas, em alguns casos, o erro ou mutação aumentará as chances de reprodução e sobrevivência do DNA. Essas mudanças no código genético serão favorecidas. É assim que a informação

contida na sequência do DNA aos poucos evolui e ganha complexidade (ver Figura 6.4).



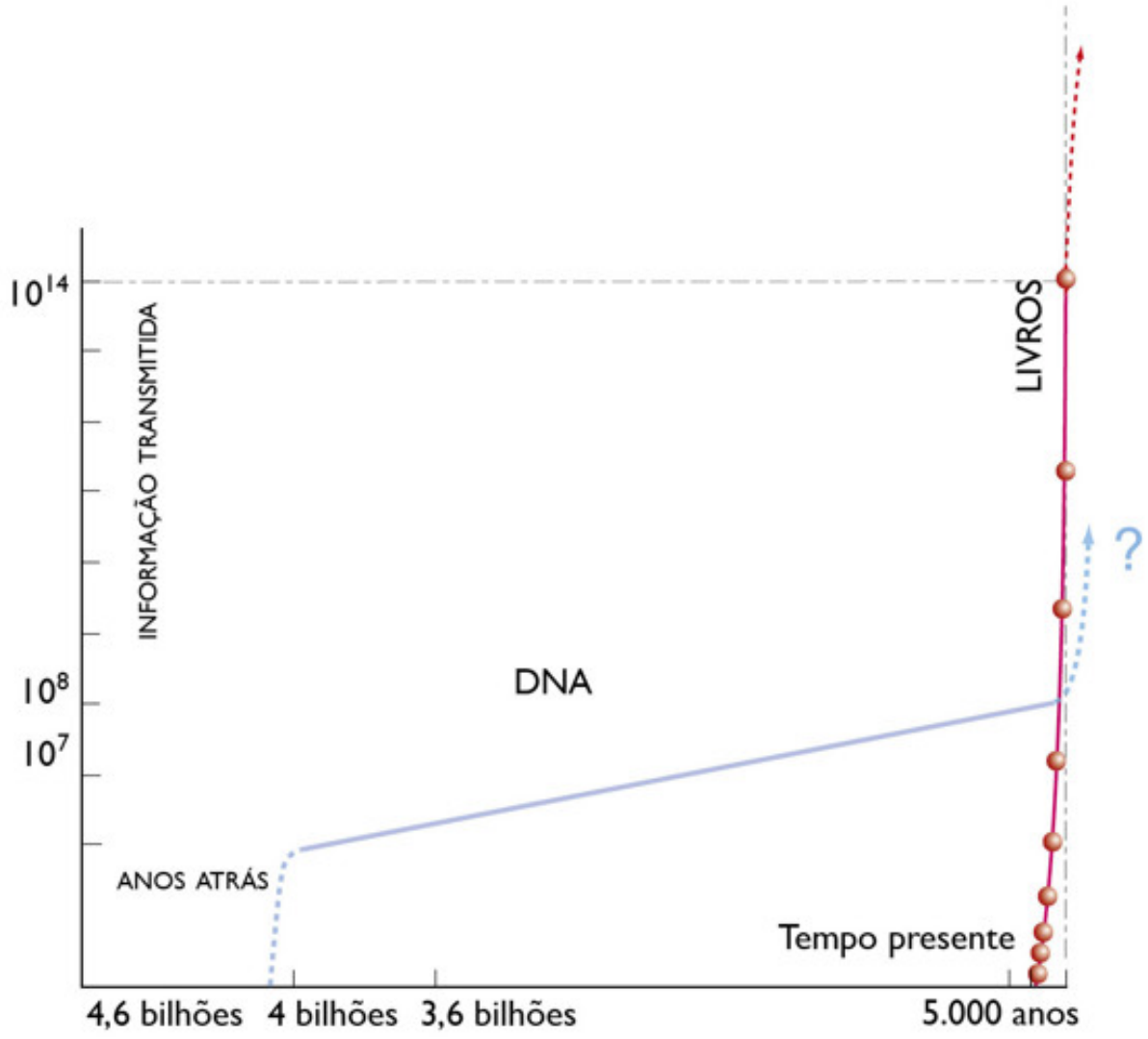


(FIG. 6.4) A EVOLUÇÃO EM AÇÃO

Biomorfos gerados por computador, que evoluíram em um programa criado pelo biólogo Richard Dawkins.

A sobrevivência de uma cepa particular dependia de qualidades simples como ser "interessante", "diferente" ou "semelhante a inseto".

Começando de um único pixel, as gerações aleatórias primitivas se desenvolveram por um processo semelhante à seleção natural. Dawkins gerou uma forma semelhante a inseto em incríveis 29 gerações (com uma série de becos sem saída evolutivos).



O desenvolvimento da complexidade desde a formação da Terra (fora de escala).

Como a evolução biológica é basicamente um caminho aleatório no espaço de todas as possibilidades genéticas, ela sempre foi muito lenta. A

complexidade, ou o número de bits de informação, que está codificada no DNA é, *grosso modo*, o número de bases na molécula. Durante os primeiros dois bilhões de anos ou algo assim, a taxa de aumento da complexidade deve ter sido da ordem de um bit de informação a cada cem anos. A taxa de aumento da complexidade do DNA gradualmente subiu para cerca de um bit por ano ao longo dos últimos milhões de anos. Mas então, há cerca de seis a oito mil anos, uma nova e grande mudança ocorreu: desenvolvemos a linguagem escrita. Isso significou que a informação pôde ser passada de uma geração para a seguinte sem termos de esperar pelo lentíssimo processo das mutações aleatórias e da seleção natural para codificá-la na sequência do DNA. A quantidade de complexidade aumentou muito. Um único romance em brochura poderia conter tanta informação quanto a diferença genética entre macacos e seres humanos, e uma enciclopédia em trinta volumes poderia descrever a sequência completa do DNA humano (Figura 6.5).



(FIG. 6.5)

Ainda mais importante, a informação em livros pode ser atualizada rapidamente. A presente taxa em que o DNA humano está sendo

atualizado pela evolução biológica é de cerca de um bit por ano. Por outro lado, duzentos mil livros inéditos são publicados todo ano, uma taxa de informação nova de mais de um milhão de bits por segundo. Claro, a maior parte dessa informação é lixo, mas, ainda que apenas um bit em um milhão seja útil, isso é cem mil vezes mais rápido do que a evolução biológica.



Cultivar embriões fora do corpo humano permitirá o aumento do cérebro e da inteligência.

Essa transmissão de dados por meios não biológicos levou a espécie humana a dominar o mundo e a ter uma população com crescimento exponencial. Porém agora estamos no início de uma nova era, em que seremos capazes de aumentar a complexidade de nosso DNA sem ter de

esperar pelo vagaroso processo da evolução biológica. Não houve mudança significativa no DNA humano nos últimos dez mil anos, mas é provável que sejamos capazes de redesenhá-lo por completo nos próximos mil. É claro que muitos vão dizer que a engenharia genética de humanos deve ser proibida, mas dificilmente seremos capazes de impedi-la. A engenharia genética de plantas e animais será permitida por motivos econômicos, e alguém com certeza a tentará em humanos. A menos que tenhamos uma ordem mundial totalitária, alguém em algum lugar vai projetar humanos melhores.

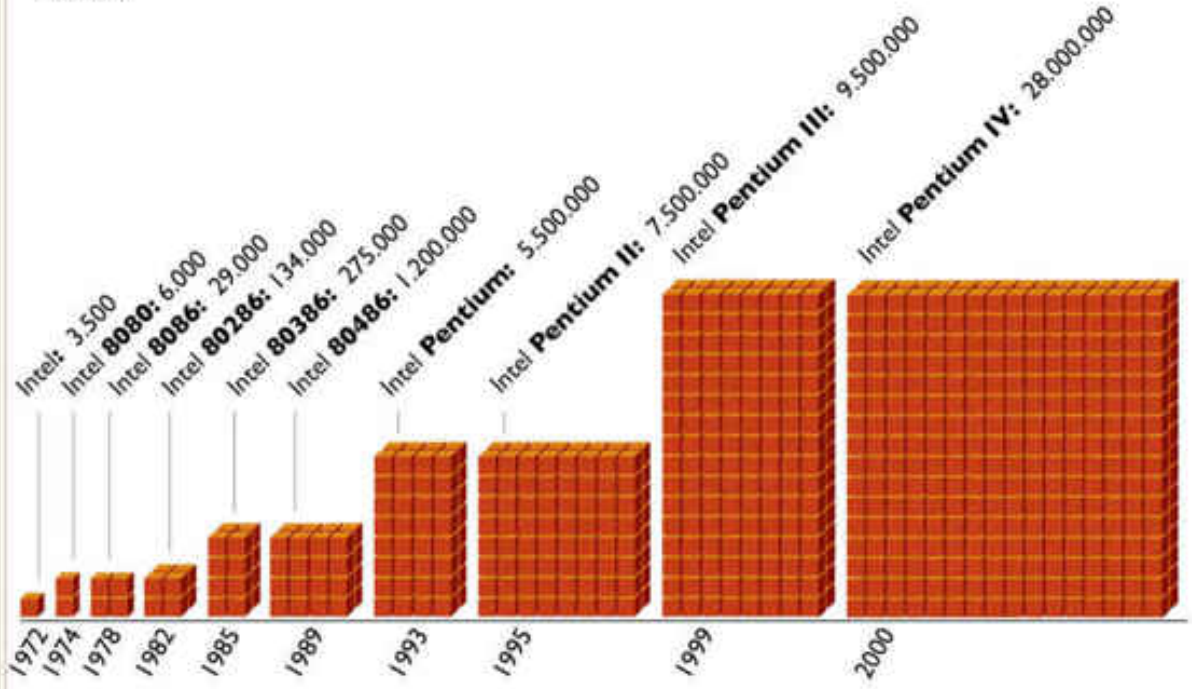
Sem dúvida, criar humanos aperfeiçoados acarretará problemas sociais e políticos maiores com relação aos humanos não melhorados. Minha intenção não é defender a engenharia genética humana como um avanço desejável, mas dizer apenas que é provável que aconteça, queiramos ou não. É por esse motivo que não acredito em ficções científicas como *Jornada nas Estrelas*, em que pessoas quatrocentos anos no futuro são essencialmente as mesmas que somos hoje. Acho que a espécie humana e seu DNA ganharão complexidade muito rápido. Devemos admitir que isso é um acontecimento provável e refletir sobre como vamos lidar com ele.



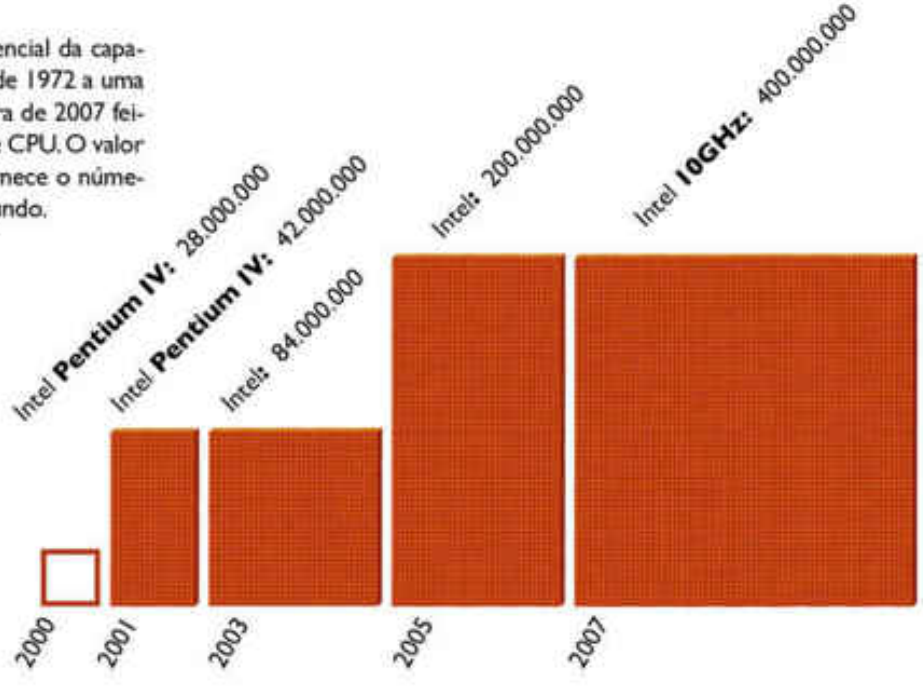
Os computadores atuais são suplantados em capacidade computacional pelo cérebro de uma humilde minhoca.

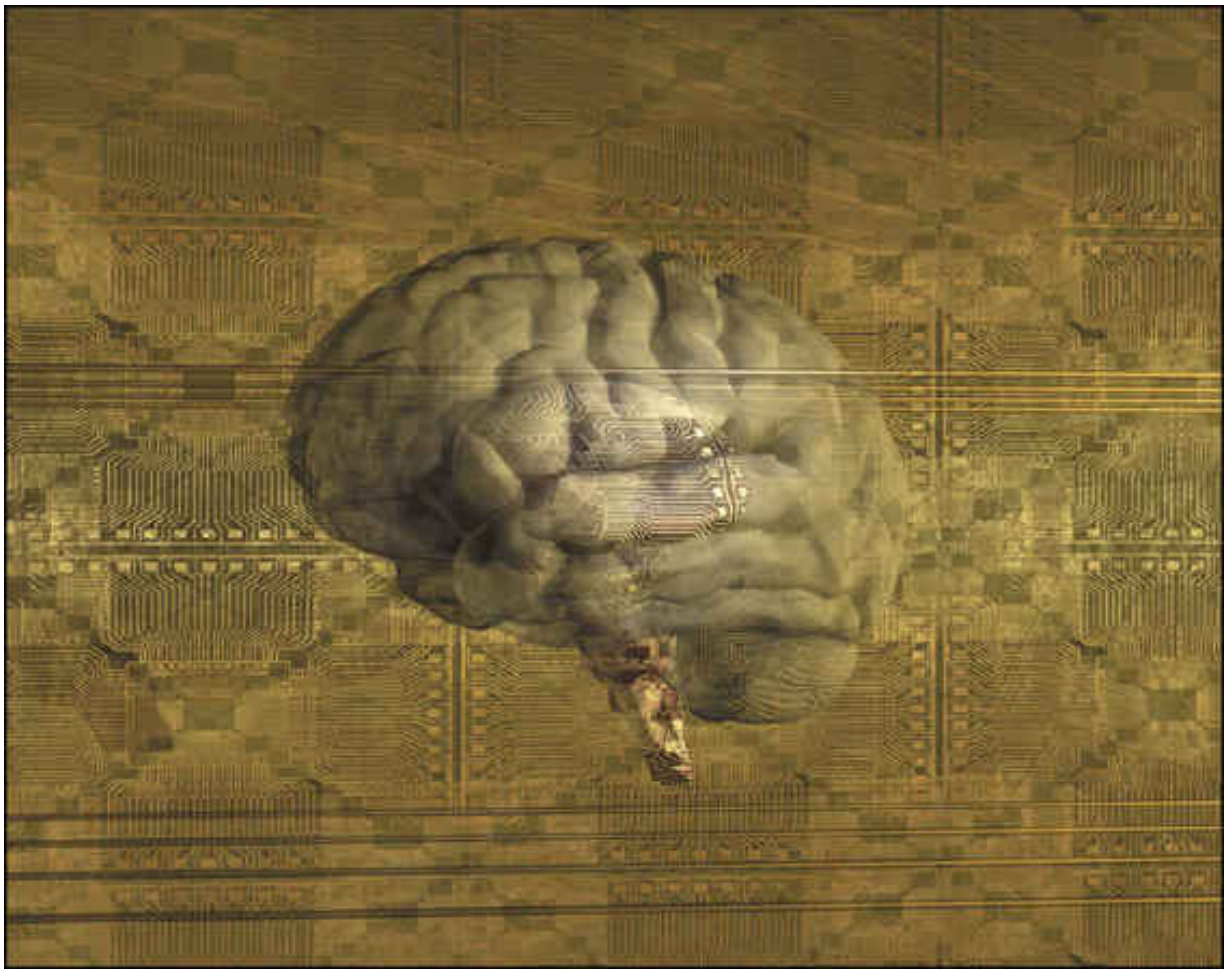
De certa forma, a espécie humana necessita aperfeiçoar suas qualidades mentais e físicas se pretende lidar com o mundo cada vez mais complexo à sua volta e enfrentar novos desafios, como a viagem espacial. Também precisamos aumentar nossa complexidade se quisermos que os sistemas biológicos permaneçam à frente dos eletrônicos. Os computadores atuais têm a vantagem da velocidade, mas não exibem nenhum sinal de inteligência. Isso não causa surpresa, pois eles são menos complexos do que o cérebro de uma minhoca, espécie que está longe de se distinguir por suas faculdades intelectuais.

FIG. 6.6



O crescimento exponencial da capacidade computacional de 1972 a uma estimativa conservadora de 2007 feita por um fabricante de CPU. O valor diante de cada chip fornece o número de cálculos por segundo.



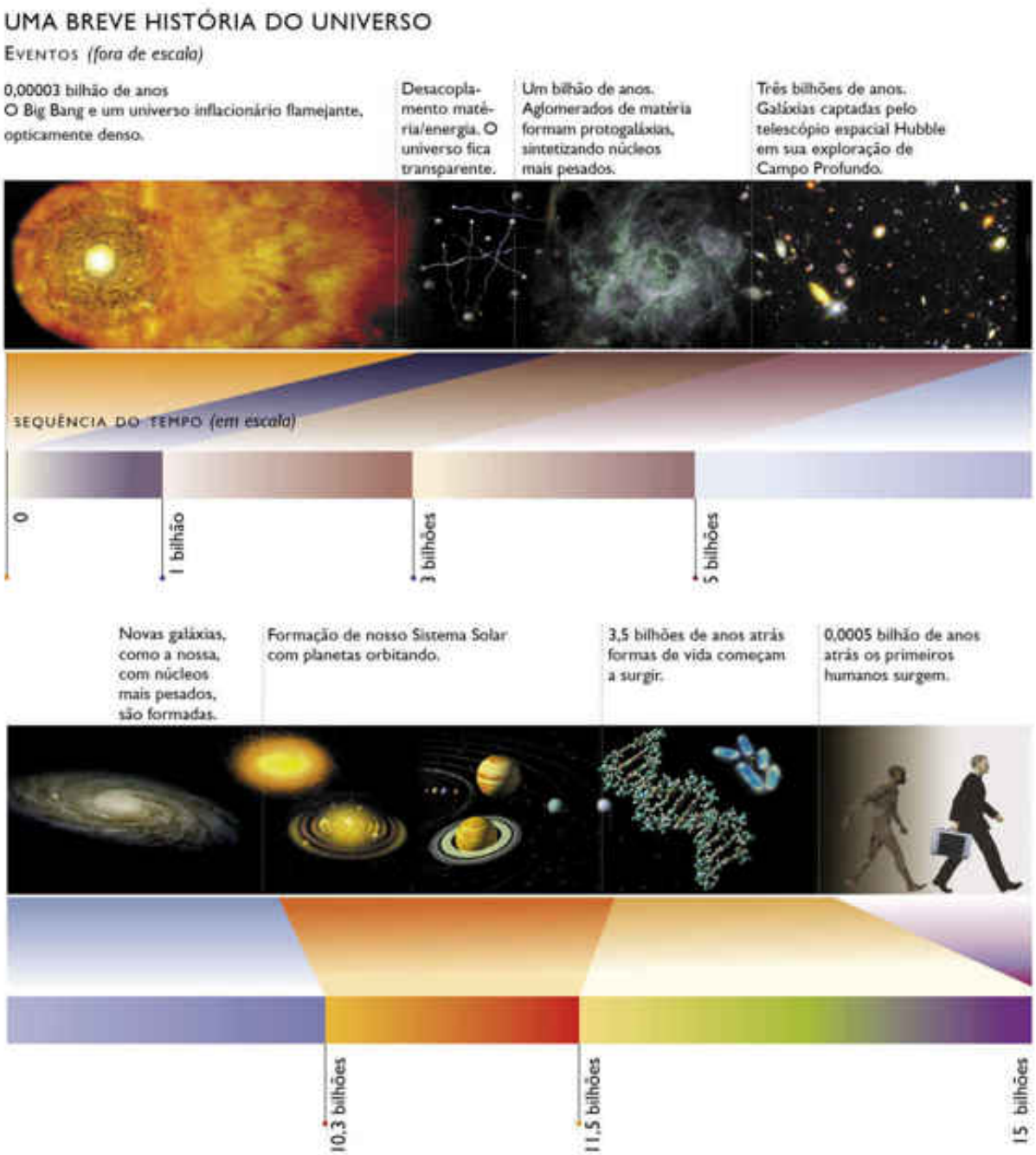


Implantes neurais oferecerão aumento na capacidade de memória e pacotes completos de informação, como toda uma língua ou o conteúdo deste livro absorvido em questão de minutos. Os humanos aperfeiçoados serão pouco parecidos conosco.

No entanto, os computadores obedecem ao que é conhecido como lei de Moore: a velocidade e a complexidade deles duplicam a cada dezoito meses (Figura 6.6). É um desses crescimentos exponenciais que claramente não podem continuar de maneira indefinida. Porém, ele continuará até os computadores terem uma complexidade semelhante à do cérebro humano. Há quem defenda que eles jamais poderão mostrar inteligência genuína, seja lá o que isso for. Mas me parece que, se moléculas químicas muito complicadas podem operar em humanos para torná-los inteligentes, então circuitos eletrônicos igualmente complicados também podem fazer computadores agir de maneira inteligente. E, se

forem inteligentes, podemos presumir que serão capazes de projetar computadores dotados de complexidade e inteligência ainda maiores.

Será que esse crescimento da complexidade biológica e eletrônica continuará para sempre ou existe um limite natural? Pelo lado biológico, o limite da inteligência humana até o momento tem sido determinado pelo tamanho do cérebro que passará pelo canal de parto. Após assistir ao parto dos meus três filhos, sei como é difícil para a cabeça sair. Mas nos próximos cem anos acredito que seremos capazes de criar bebês fora do corpo humano, de tal forma que esse limite será eliminado. Contudo, os incrementos no tamanho do cérebro humano mediante a engenharia genética esbarrarão no problema de que os mensageiros químicos do corpo responsáveis por nossa atividade mental se movem relativamente devagar. Isso significa que incrementos posteriores na complexidade do cérebro serão obtidos em detrimento da velocidade. Podemos ser dotados de uma inteligência rápida ou muito grande, mas não as duas coisas. Mesmo assim, acredito que podemos nos tornar bem mais inteligentes do que a maioria das pessoas em *Jornada nas Estrelas*, não que isso seja tão difícil.



(FIG. 6.7)
A espécie humana existe por apenas uma minúscula fração da história do universo. (Se este gráfico estivesse em escala e a extensão da existência humana fosse por volta de sete centímetros, a história completa do universo ficaria em mais de um quilômetro.) Qualquer vida alienígena que porventura encontrarmos será muito mais primitiva ou muito mais avançada do que a nossa.

Circuitos eletrônicos têm o mesmo problema de complexidade *versus* velocidade que o cérebro humano. Nesse caso, porém, os sinais são elétricos, não químicos, e viajam na velocidade da luz, que é muito mais alta. Todavia, a velocidade da luz já constitui um limite prático no projeto de computadores mais rápidos. Podemos melhorar a situação tornando os circuitos menores, mas, no fim das contas, haverá um limite imposto pela natureza atômica da matéria. Mesmo assim, ainda temos um bom caminho pela frente antes de nos depararmos com essa barreira.

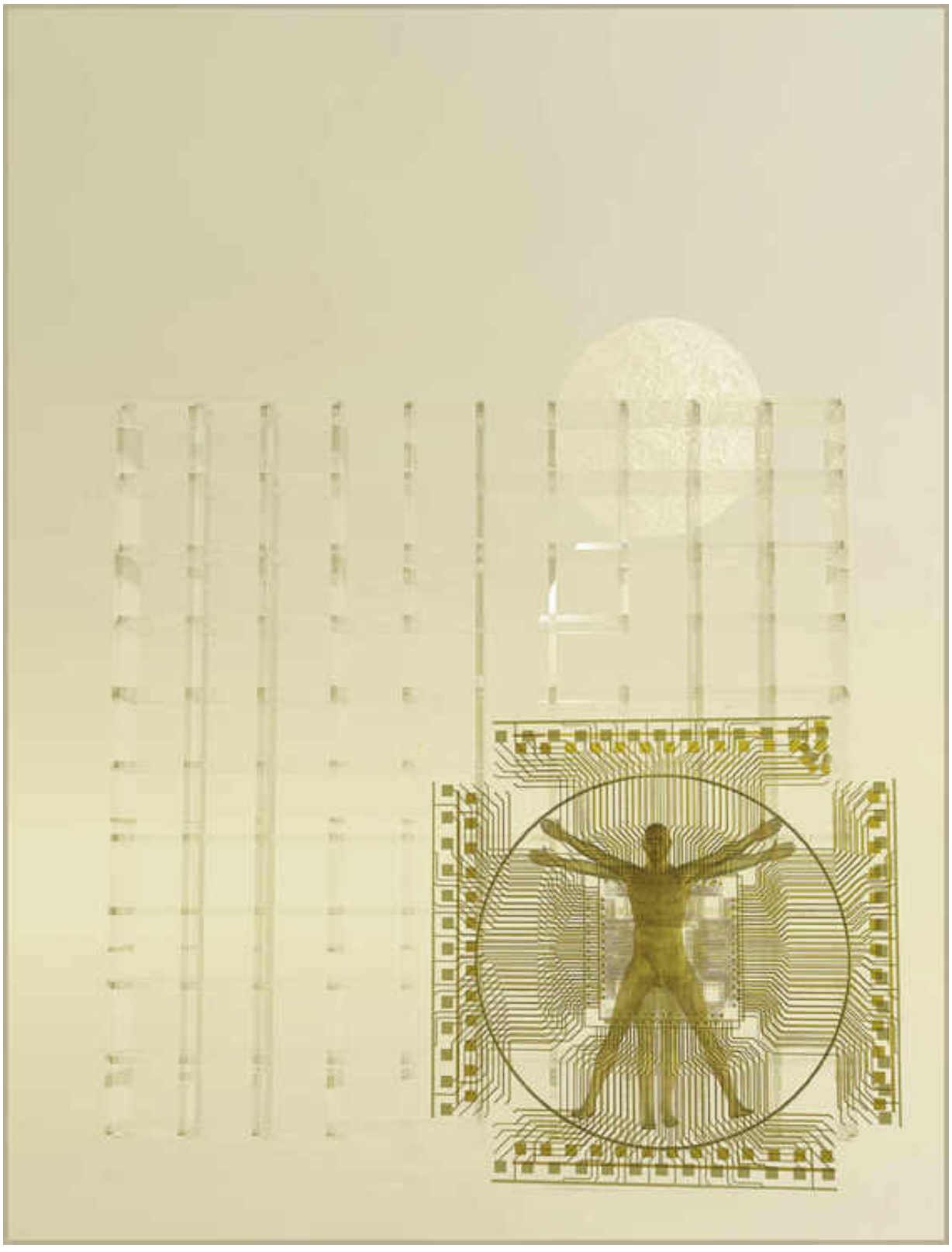


IMAGEM **T**

Outro modo pelo qual os circuitos eletrônicos podem aumentar sua complexidade ao mesmo tempo que mantêm a velocidade é copiando o cérebro humano. O cérebro não possui uma única CPU — a unidade de processamento central — que processe cada comando na sequência. Antes, tem milhões de processadores trabalhando juntos ao mesmo tempo. Esse processamento maciçamente paralelo será o futuro também da inteligência eletrônica.

Presumindo que não venhamos a nos destruir nos próximos cem anos, é provável que nos espalhemos primeiro para os planetas do Sistema Solar e depois para as estrelas próximas. Mas não será como em *Jornada nas*

Estrelas ou *Babylon 5*, com uma nova espécie de seres quase humanos em praticamente todo sistema estelar. A espécie humana tem estado em sua presente forma por apenas dois milhões de anos dos cerca de quinze bilhões de anos transcorridos desde o Big Bang (Figura 6.7).



A INTERFACE BIOLÓGICA-ELETRÔNICA

Dentro de duas décadas, um computador de mil dólares pode ser tão complexo quanto o cérebro humano. Processadores em paralelo poderiam imitar o modo como nosso cérebro funciona e fazer os computadores agirem de forma inteligente e consciente.

Implantes neurais talvez permitam uma interface muito mais rápida entre o cérebro e os computadores, apagando a distância entre a inteligência biológica e a eletrônica.

Num futuro próximo, a maioria das transações comerciais provavelmente será feita entre ciberpersonalidades, pela internet.

Dentro de uma década, muitos de nós talvez até possam decidir viver toda uma existência virtual na internet, fazendo ciberamigos e tendo ciber-relacionamentos.

Nossa compreensão do genoma humano irá sem dúvida gerar grandes avanços médicos, mas também nos capacitará a aumentar a complexidade da estrutura do DNA humano de forma significativa. Nas próximas centenas de anos, a engenharia genética humana poderá substituir a evolução biológica, redesenhando a raça humana e colocando questões éticas inteiramente novas.

É provável que a viagem espacial além de nosso Sistema Solar venha a exigir humanos geneticamente projetados ou sondas não tripuladas controladas por computador.

Assim, mesmo que a vida se desenvolva em outros sistemas estelares, as chances de alcançá-la em um estágio reconhecidamente humano são muito pequenas. É provável que qualquer vida alienígena que encontremos seja muito mais primitiva ou muito mais avançada. Se for mais avançada, por que não se disseminou pela galáxia e visitou a Terra? Se alienígenas tivessem passado por aqui, deveria ter ficado óbvio: estaria mais para *Independence Day* do que para *E.T. – O Extraterrestre*.



Será que a inteligência possui grande valor de sobrevivência a longo prazo?

Então como se explica nossa falta de visitantes extraterrestres? Poderia ser o caso de haver uma espécie avançada lá fora que está ciente de nossa existência, mas deixa que chafurdemos em nosso próprio pântano de primitivismo. Porém, dificilmente ela mostraria tamanha consideração com uma forma de vida inferior: por acaso a maioria de nós se preocupa com a quantidade de insetos e minhocas que esmagamos sob os pés? Uma explicação mais razoável é que há uma probabilidade muito baixa de que a vida evolua em outros planetas ou de que desenvolva inteligência. Como alegamos ser inteligentes, embora talvez sem muito fundamento, tendemos a ver a inteligência como uma consequência inevitável da evolução. No entanto, isso é questionável. Não está claro que a inteligência tem grande valor para a sobrevivência. As bactérias se saem perfeitamente bem sem ela e sobreviverão a nós se a nossa assim chamada inteligência nos levar à extinção em uma guerra nuclear. Então, à medida que exploramos a galáxia, pode ser que encontremos vida primitiva, mas é improvável que encontremos seres como nós.

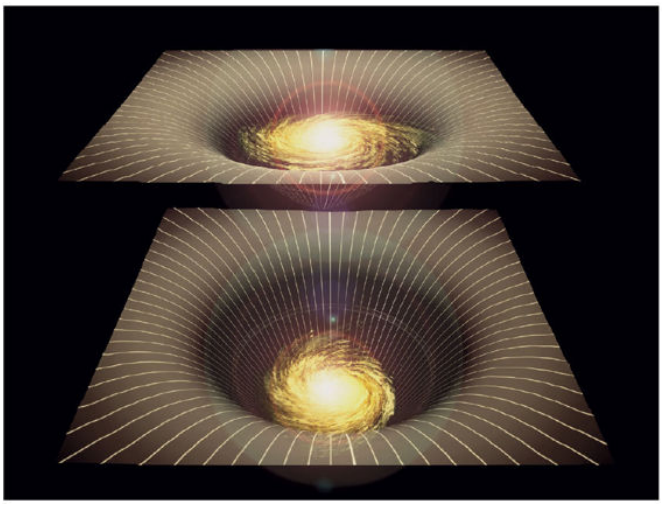
O futuro da ciência não será como o reconfortante cenário pintado em *Jornada nas Estrelas*, um universo povoado de inúmeras espécies humanoides, com ciência e tecnologia avançadas porém essencialmente estáticas. Em vez disso, acho que estaremos sozinhos, mas nos

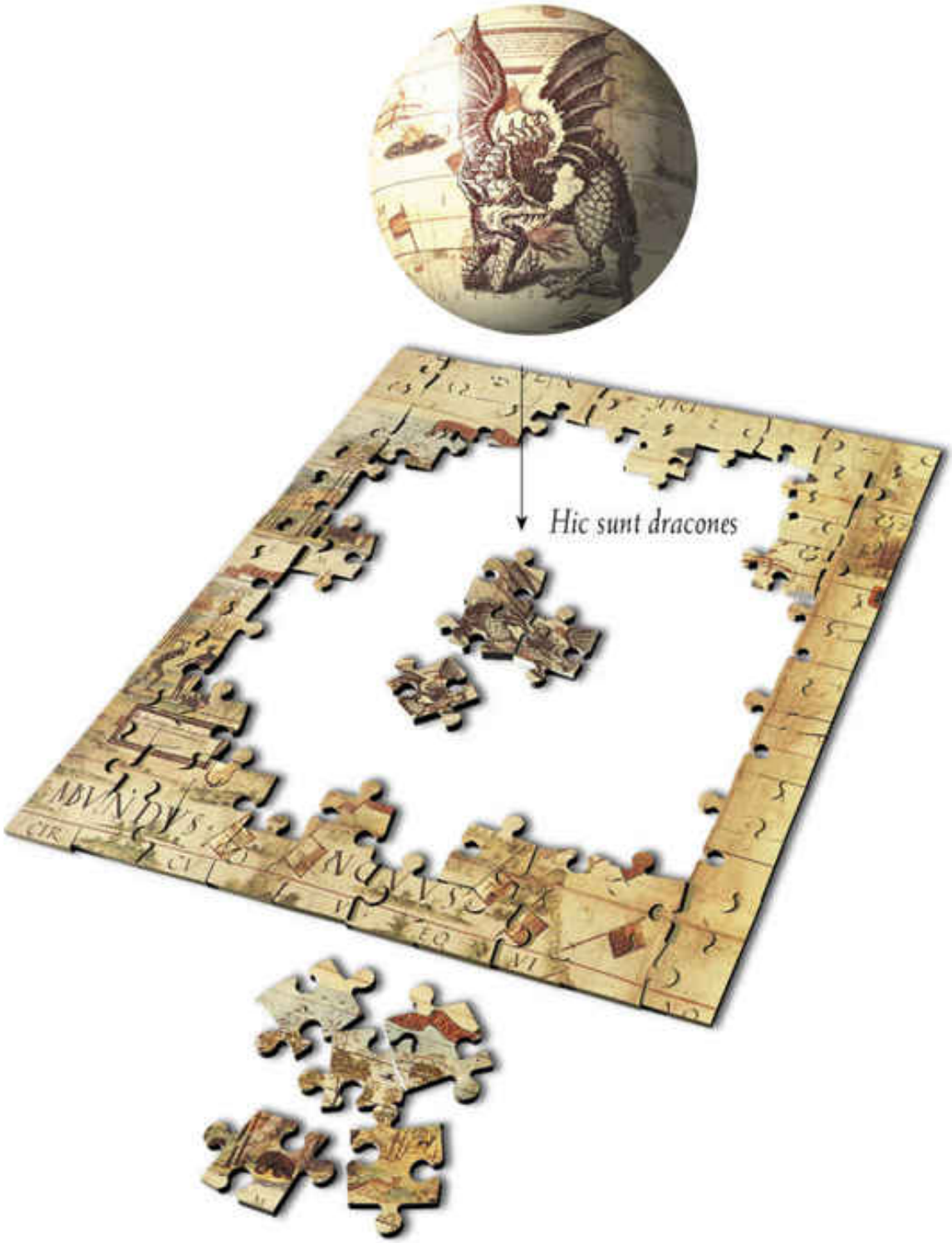
desenvolvendo rápido em termos de complexidade biológica e eletrônica. Nada disso acontecerá nos próximos cem anos, o que é tudo que podemos prever com confiança. Contudo, no fim do próximo milênio, se chegarmos lá, a diferença em relação a *Jornada nas Estrelas* será fundamental.

CAPÍTULO 7

ADMIRÁVEL MUNDO BRANA

Vivemos em uma brana ou não passamos de hologramas?





(FIG. 7.1)

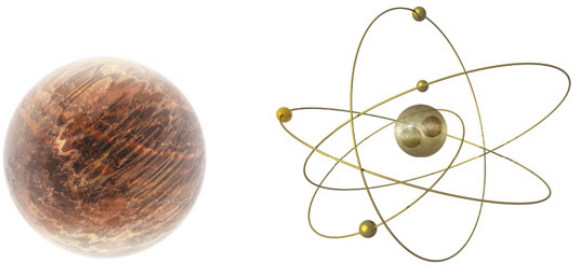
A teoria-M é como um quebra-cabeça. É fácil identificar e juntar as peças nas bordas, mas não temos muita ideia do que acontece no meio, onde não podemos fazer a aproximação de que uma quantidade ou outra será pequena.

COMO PROSSEGUIRÁ NOSSA jornada de descoberta no futuro? Teremos êxito em nossa busca de uma teoria unificada completa capaz de governar o universo e tudo que ele contém? Na verdade, como descrito no Capítulo 2, pode acontecer de já termos identificado a Teoria de Tudo como sendo a teoria-M. Ela não possui uma única formulação, pelo menos até onde sabemos. Em vez disso, descobrimos uma rede de teorias ao que tudo indica diferentes que parecem ser todas aproximações da mesma teoria fundamental subjacente em diferentes limites, assim como a teoria da gravitação de Newton é uma aproximação da teoria da relatividade geral de Einstein no limite em que o campo gravitacional é fraco. A teoria-M é como um quebra-cabeça: é mais fácil identificar e encaixar as peças nas bordas do quebra-cabeça, os limites da teoria-M onde uma ou outra quantidade é pequena. Hoje temos uma ideia razoavelmente boa dessas bordas, mas continua a haver um buraco abismal no centro do quebra-cabeça da teoria-M em que não sabemos o que está acontecendo (Figura 7.1). Não podemos de fato afirmar que encontramos a Teoria de Tudo até termos preenchido esse buraco.



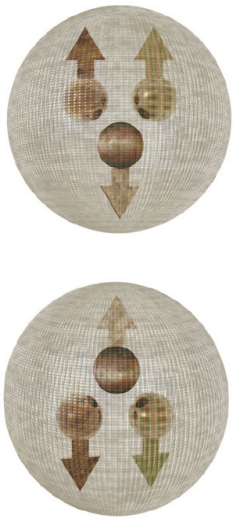
O que reside no centro da teoria-M? Será que vamos encontrar dragões (ou algo igualmente estranho), como em antigos mapas de terras inexploradas? Nossa experiência passada sugere que devemos encontrar

fenômenos novos e inesperados sempre que estendermos o leque de nossas observações para escalas menores. No início do século XX, compreendemos o funcionamento da natureza nas escalas da física clássica, que é válida das distâncias interestelares até cerca de um centésimo de milímetro. A física clássica presume que a matéria seja um meio contínuo com propriedades como elasticidade e viscosidade, porém começaram a surgir evidências de que a matéria não é contínua, mas granulada: ela é feita de minúsculos blocos de construção chamados átomos. A palavra átomo vem do grego e significa "indivisível"; contudo, logo se descobriu que átomos consistiam em elétrons orbitando um núcleo composto de prótons e nêutrons (Figura 7.2).



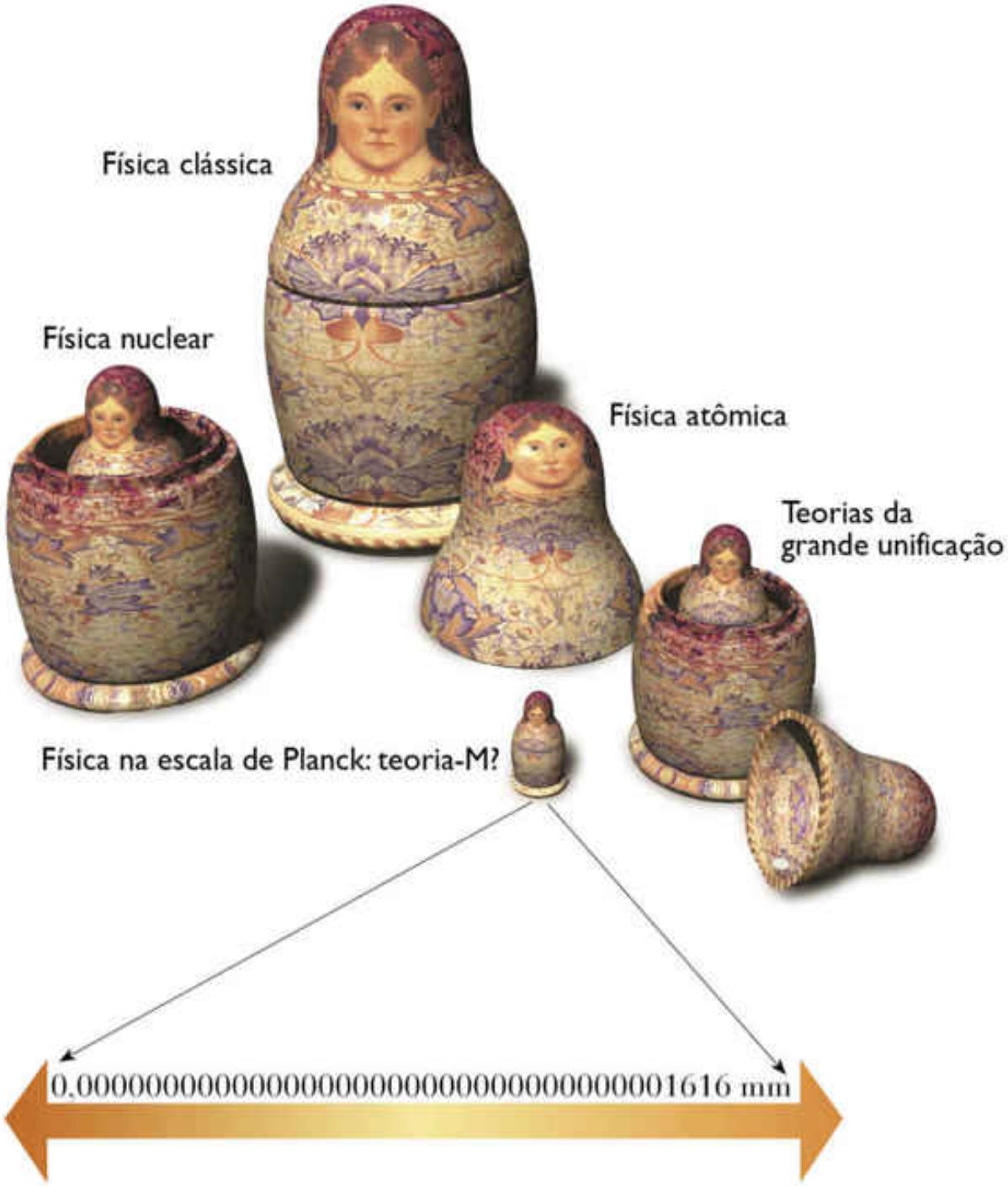
(FIG. 7.2)
À esquerda: O átomo indivisível clássico.
À direita: Um átomo com elétrons orbitando um núcleo de prótons e nêutrons.

O trabalho com a física atômica nos primeiros trinta anos do século conduziu nossa compreensão às dimensões de um milionésimo de milímetro. Depois descobrimos que prótons e nêutrons são feitos de partículas ainda menores chamadas quarks (Figura 7.3).



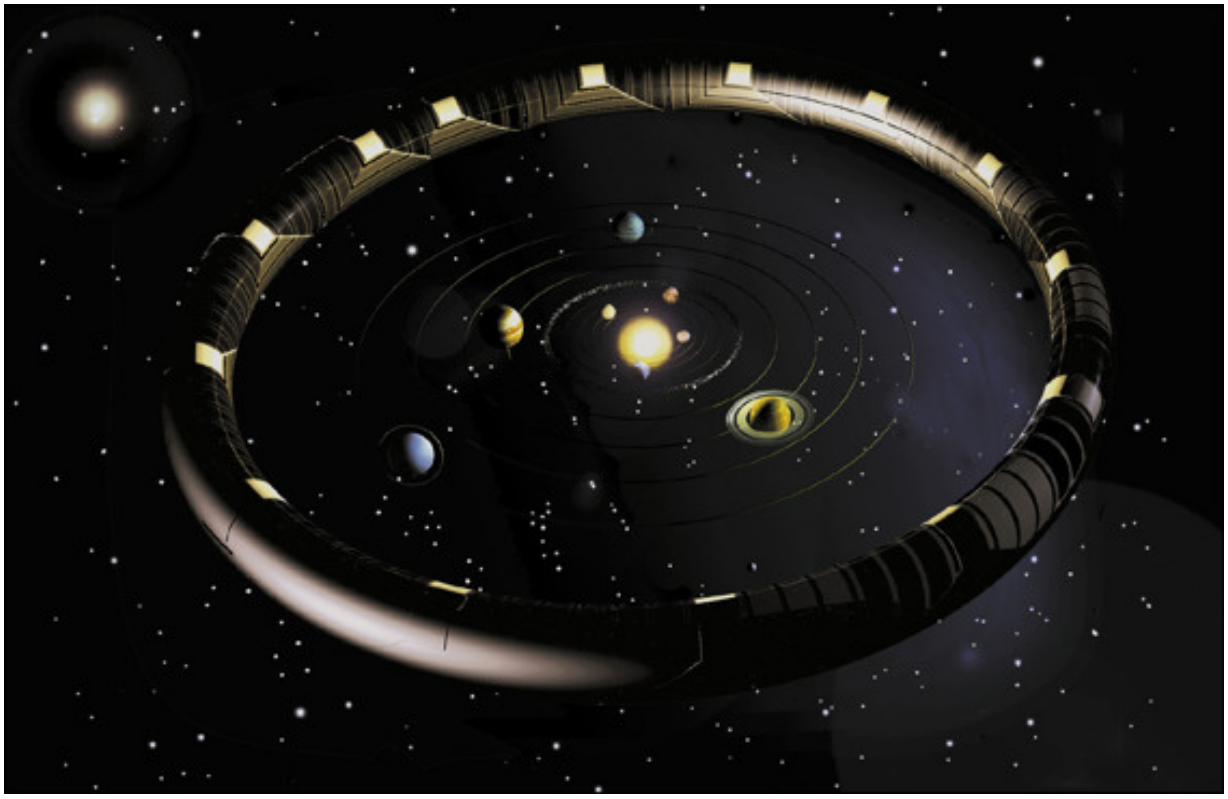
(FIG. 7.3)
No alto: Um próton consiste em dois quarks *up*, cada um com carga elétrica positiva de dois terços, e um quark *down*, tendo uma carga elétrica negativa de um terço.
Abaixo: Um nêutron consiste em dois quarks *down*, cada um com uma carga elétrica negativa de um terço, e um quark *up*, com carga elétrica positiva de dois terços.

As pesquisas recentes da física nuclear e alta energia nos levaram a escalas ainda menores, da ordem de um bilionésimo de milímetro. Talvez pareça que poderíamos continuar para sempre, descobrindo estruturas em escalas de comprimento cada vez mais reduzidas. Porém, há um limite para esse progresso, mais ou menos como ocorre com uma série de bonecas russas, umas dentro das outras (Figura 7.4).



(FIG. 7.4) Cada boneca representa uma compreensão teórica da natureza descendo a uma determinada escala de comprimento. Cada uma delas contém uma boneca menor, que corresponde a uma teoria que descreve a natureza em escalas mais curtas. Mas na física existe um comprimento fundamental menor do que todos, o comprimento de Planck, escala em que a natureza talvez possa ser descrita pela teoria-M.

No fim, acabamos chegando à menor boneca de todas, que não pode mais ser aberta. Em física, essa boneca menor é chamada de comprimento de Planck. Sondar distâncias mais curtas exigiria partículas de energia tão elevada que estariam dentro de buracos negros. Não sabemos exatamente qual é o comprimento de Planck fundamental na teoria-M, mas pode ser da ordem de um milímetro dividido por cem mil bilhões de bilhões de bilhões. Não possuímos aceleradores de partículas capazes de investigar distâncias tão reduzidas. Eles teriam de ser maiores do que o Sistema Solar, e, na atual situação econômica, é pouco provável que alguém forneça a verba para construí-los (Figura 7.5).

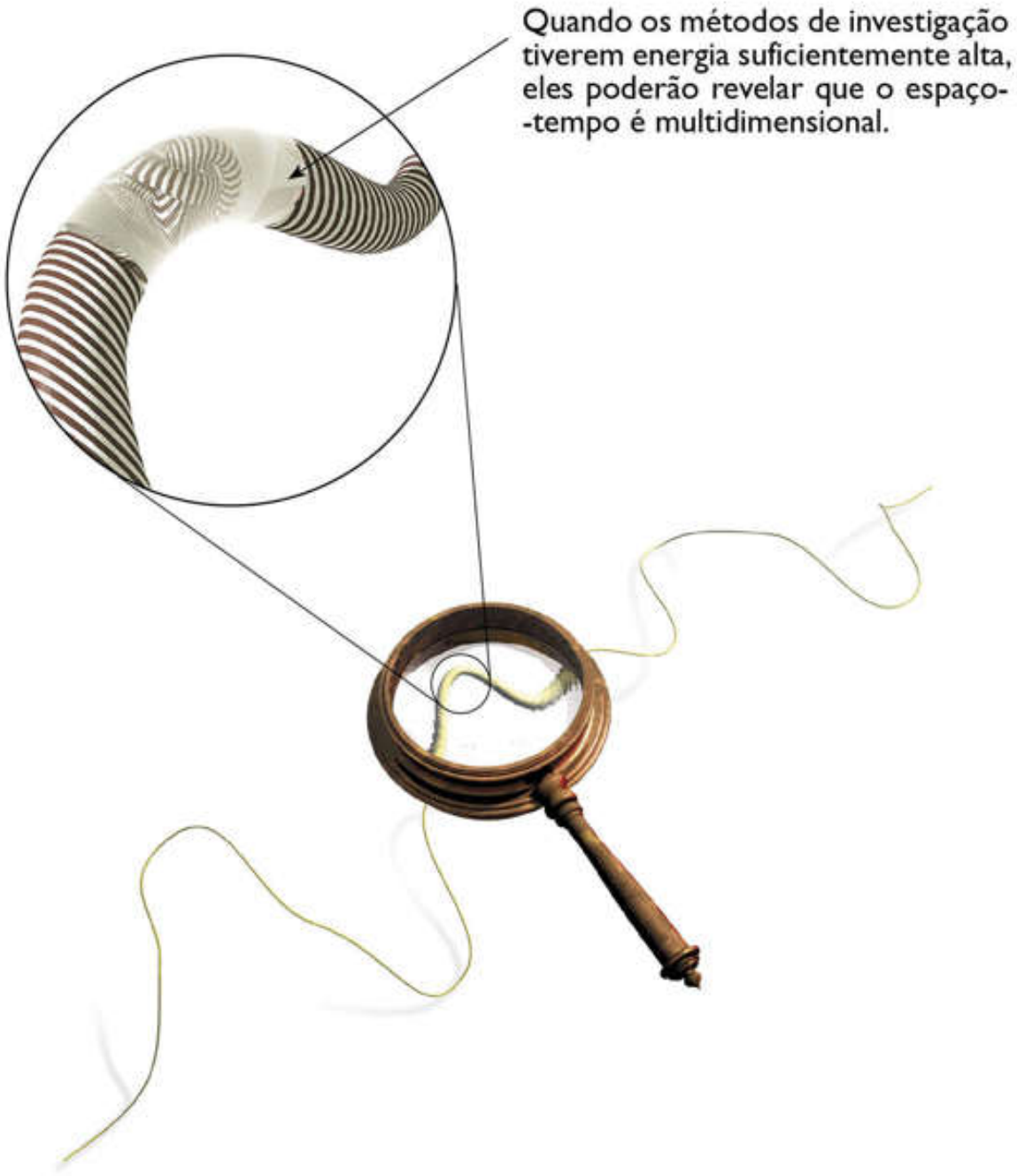


(FIG. 7.5)
Um acelerador necessário para investigar distâncias tão pequenas quanto um comprimento de Planck teria um diâmetro maior do que o Sistema Solar.

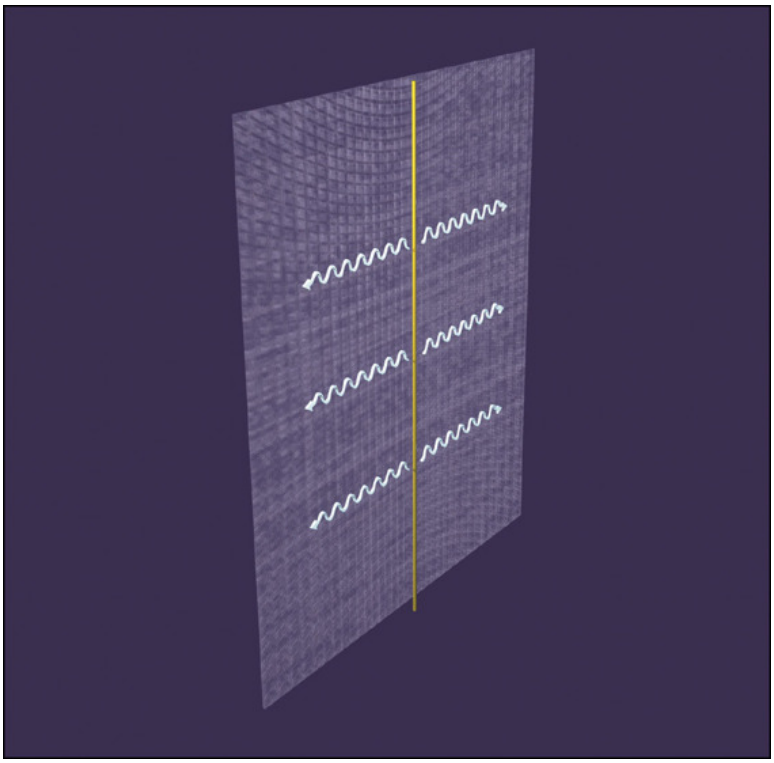
Entretanto, um empolgante novo avanço pode permitir a descoberta de ao menos alguns dragões da teoria-M de um modo mais fácil (e barato). Como explicado nos Capítulos 2 e 3, na rede de modelos matemáticos da

teoria-M o espaço-tempo possui dez ou onze dimensões. Até recentemente se acreditava que as seis ou sete dimensões extras estariam recurvadas numa escala muito reduzida. Seria como um fio de cabelo humano (Figura 7.6).

Se olhamos para um fio de cabelo humano sob a lente de aumento, podemos ver que ele possui espessura, mas a olho nu parece uma linha, dotado de comprimento apenas e nenhuma outra dimensão. O espaço-tempo pode ser semelhante: nas escalas de comprimento humana, atômica ou mesmo da física nuclear, pode parecer quadridimensional e quase plano. Por outro lado, se investigarmos em distâncias muito curtas usando partículas de energia extremamente alta, é possível que vejamos que o espaço-tempo tem dez ou onze dimensões.



(FIG. 7.6)
A olho nu, um fio de cabelo é como uma linha; sua única dimensão parece ser o comprimento. Do mesmo modo, o espaço-tempo pode ter aparência quadridimensional, mas aparecer com dez ou onze dimensões quando investigado com partículas de energia muito elevada.



(FIG. 7.7) MUNDOS-BRANAS

A força elétrica ficaria confinada à brana e diminuiria à taxa correta para que elétrons tivessem órbitas estáveis em torno do núcleo dos átomos.

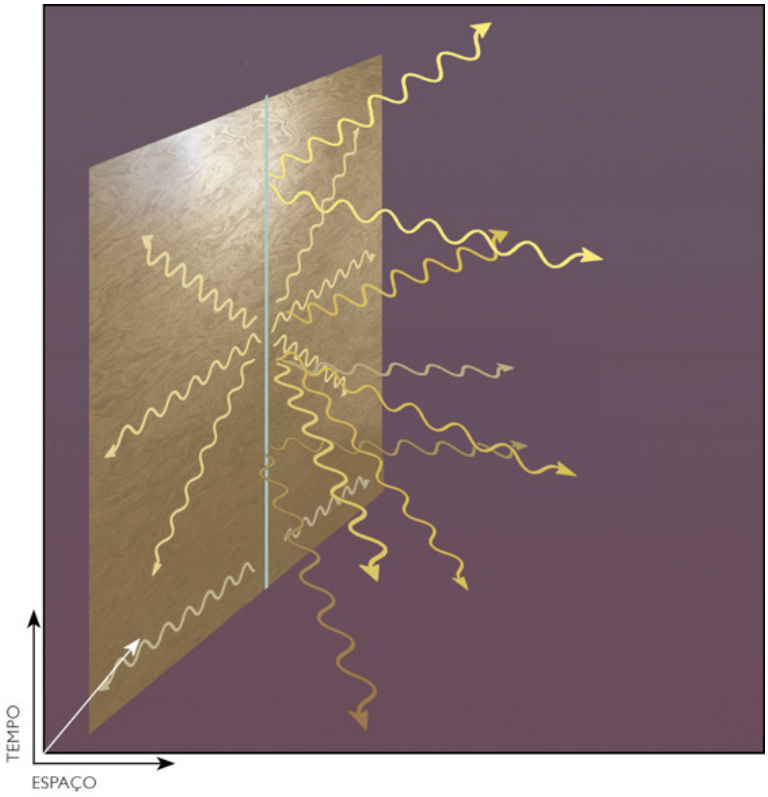
Se todas as dimensões adicionais fossem muito pequenas, seria bem difícil observá-las. Porém, há pouco tempo foi sugerido que uma ou mais dimensões extras podem ser comparativamente grandes ou até infinitas. Essa ideia tem a grande vantagem (ao menos para um positivista como eu) de poder ser testável para a próxima geração de aceleradores de partículas ou para as medições sensíveis de curto alcance da força gravitacional. Essas observações poderiam tanto falsear a teoria como confirmar experimentalmente a presença de outras dimensões.

Grandes dimensões extras são um avanço novo e empolgante em nossa busca por um modelo ou teoria final. Elas significariam que vivemos em um mundo-brana, uma superfície ou brana quadridimensional em um espaço-tempo de dimensionalidade mais elevada.

A matéria e as forças não gravitacionais, como a força elétrica, estariam confinadas à brana. Assim, tudo que não envolve a gravidade se comportaria como se estivesse em quatro dimensões. Em particular, a

força elétrica entre o núcleo de um átomo e os elétrons orbitando em torno dele cairia de acordo com a distância à taxa correta para que os átomos fossem estáveis, isto é, sem os elétrons caírem no núcleo (Figura 7.7).

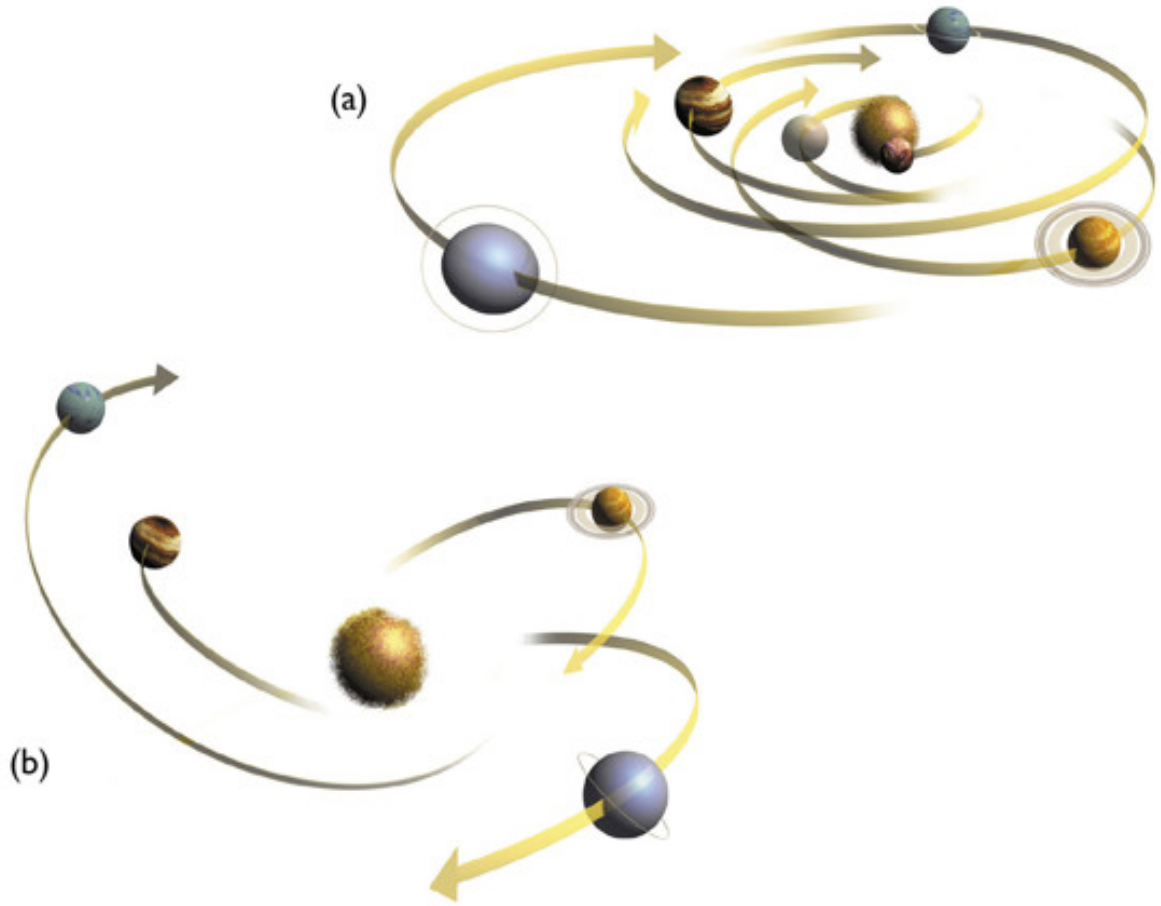
Isso condiria com o princípio antrópico de que o universo deve ser adequado para a vida inteligente: se os átomos não fossem estáveis, não estaríamos aqui para observar o universo e nos perguntar por que ele parece quadridimensional.



(FIG. 7.8)
A gravidade se difundiria pelas dimensões extras, além de atuar ao longo da brana, e cairia mais rápido com a distância do que o faria em quatro dimensões.

Por outro lado, a gravidade na forma do espaço curvo permearia a totalidade do espaço-tempo de dimensionalidade mais elevada. Isso significa que a gravidade se comportaria de forma diferente das outras forças vivenciadas por nós: como a gravidade se propagaria pelas dimensões extras, ela diminuiria mais rápido com a distância do que seria de se esperar (Figura 7.8).

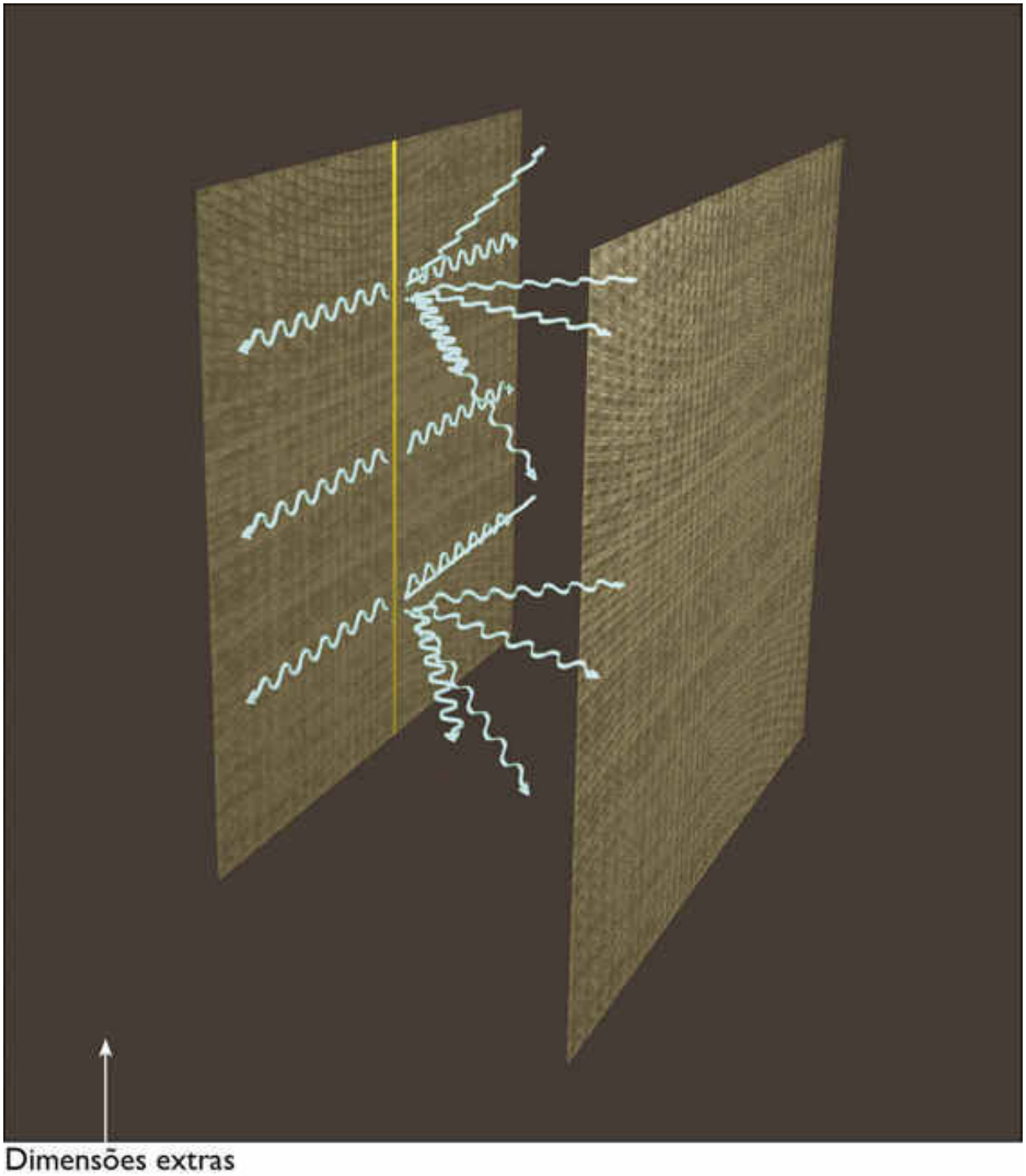
Se essa queda mais rápida da força gravitacional se estendesse a distâncias astronômicas, teríamos notado seu efeito nas órbitas dos planetas. Na verdade, eles seriam instáveis, como foi observado no Capítulo 3: cairiam no Sol ou escapariam para a escuridão e o frio do espaço interestelar (Figura 7.9).



(FIG. 7.9)
Uma queda mais acentuada da força gravitacional em grandes distâncias significaria que as órbitas planetárias seriam instáveis. Os planetas cairiam no Sol (a) ou escapariam completamente de sua atração (b).

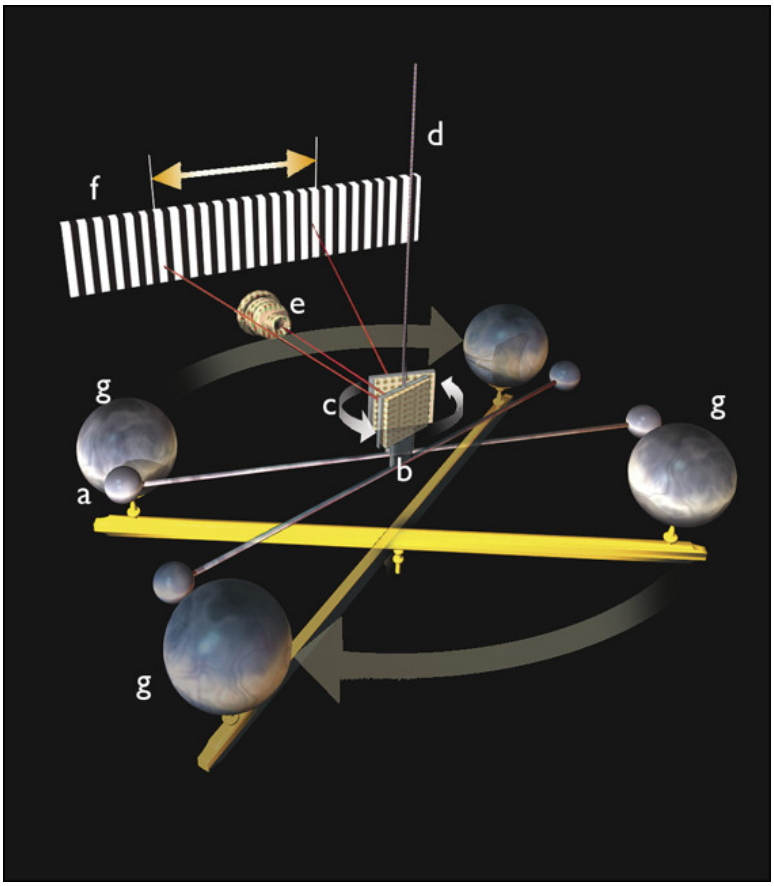
Entretanto, isso não aconteceria se as dimensões extras terminassem em outra brana não tão distante daquela em que vivemos. Nesse caso, para distâncias maiores do que a separação das branas, a gravidade não seria capaz de se propagar livremente, mas ficaria de fato confinada à brana,

como as forças elétricas, caindo à taxa certa para as órbitas planetárias (Figura 7.10).



(FIG. 7.10) Uma segunda brana perto de nosso mundo-brana impediria a gravidade de se difundir muito além pelas dimensões extras e implicaria que, para distâncias maiores do que a separação entre as branas, a gravidade cairia à taxa que seria de se esperar para quatro dimensões.

Por outro lado, para distâncias inferiores à separação das branas, a gravidade iria variar mais rapidamente. A força gravitacional muito pequena entre objetos pesados foi medida com precisão no laboratório, mas ao que tudo indica os experimentos até agora não detectaram os efeitos de branas separadas por menos do que alguns milímetros. Novas medições estão sendo feitas em distâncias mais curtas (Figura 7.11).

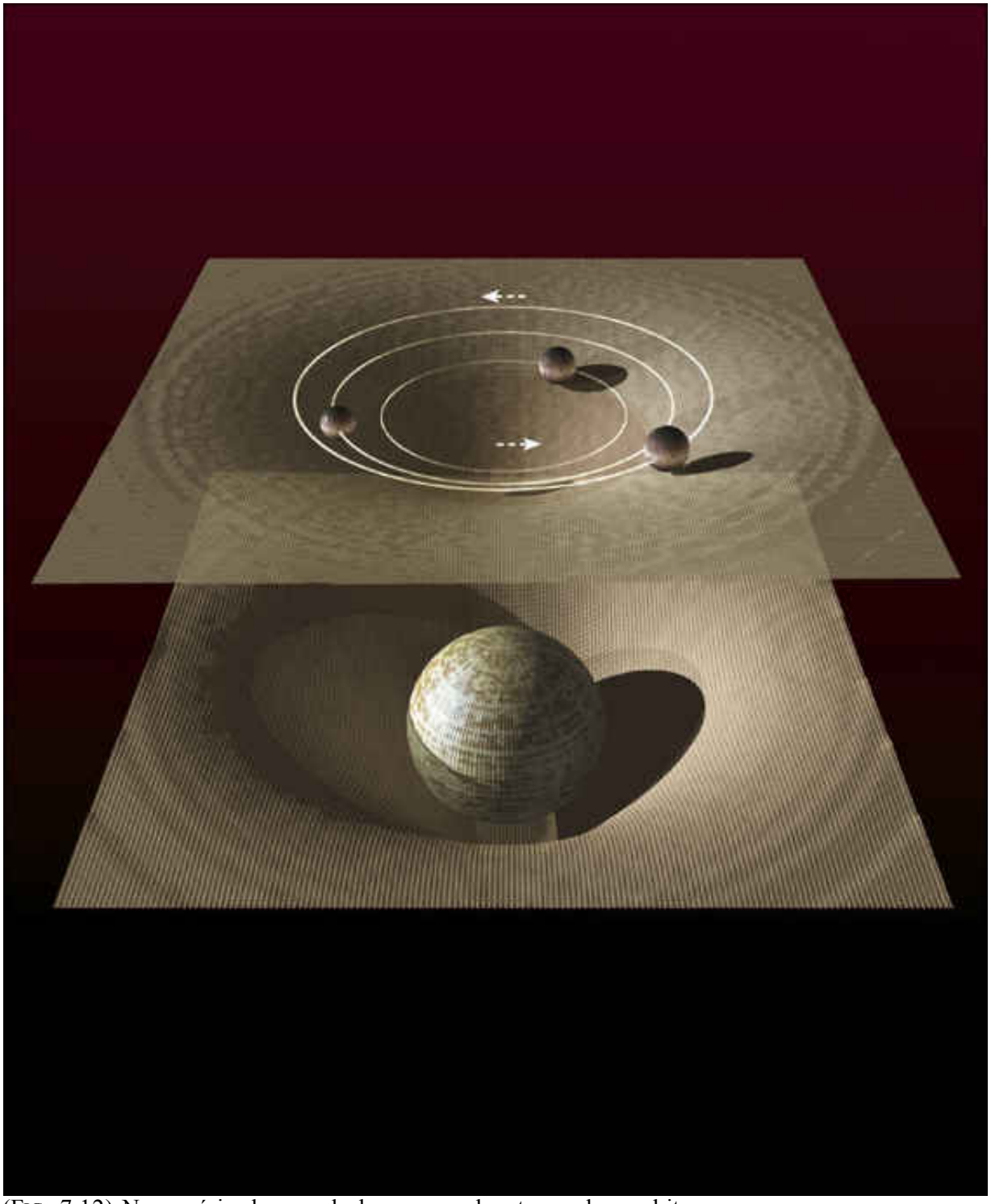


(FIG. 7.11)
O EXPERIMENTO DE CAVENDISH
Um feixe de laser (e) indica qualquer torção do haltere ao ser projetado em uma tela calibrada (f). Duas pequenas esferas de chumbo (a) ligadas ao haltere (b) com um pequeno espelho (c) ficam livremente suspensas por uma fibra de torção.

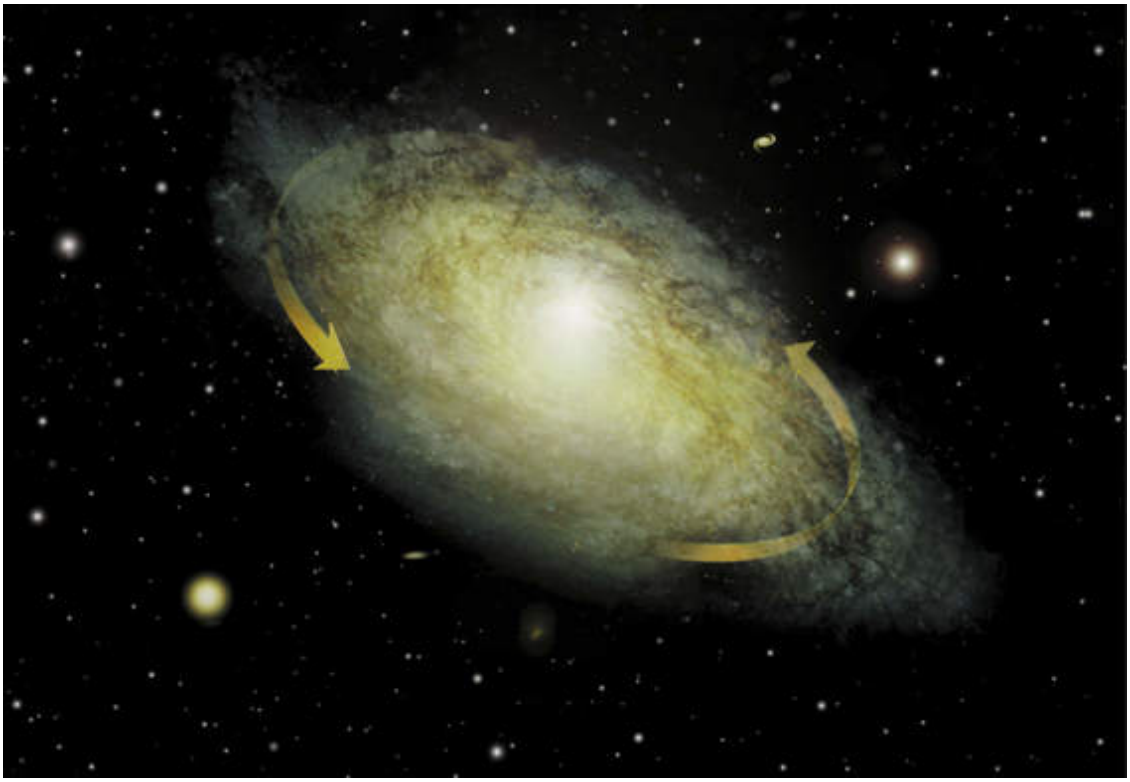
Duas esferas de chumbo grandes (g) são colocadas perto das menores em uma barra que gira. Quando as esferas de chumbo maiores giram para a posição oposta, o haltere oscila e depois se acomoda em uma nova posição.

Nesse mundo-brana, viveríamos em uma brana, mas haveria outra brana "paralela" nas proximidades. Como a luz estaria confinada às branas

e não se propagaria pelo espaço entre elas, não veríamos o mundo paralelo. Contudo, sentiríamos a influência gravitacional da matéria na brana paralela. Em nossa brana, tais forças gravitacionais pareceriam produzidas por fontes que fossem verdadeiramente “escuras”, na medida em que o único modo de detectá-las seria por sua gravidade (Figura 7.12). Na verdade, para explicar a taxa à qual as estrelas orbitam o centro de nossa galáxia, parece haver mais massa do que o total de matéria observável.



(FIG. 7.12) No cenário do mundo-brana, os planetas podem orbitar uma massa escura em uma brana paralela, pois a força gravitacional se propaga pelas dimensões extras.

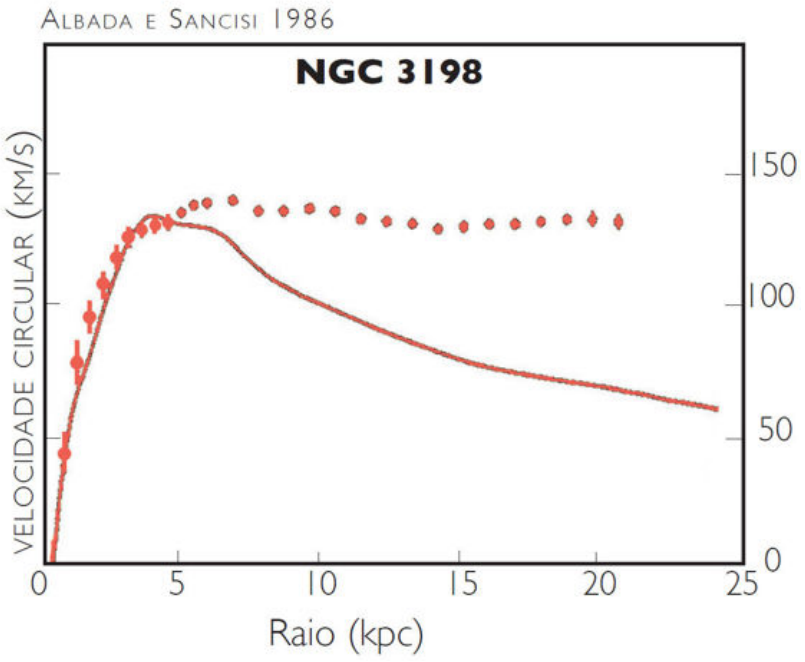


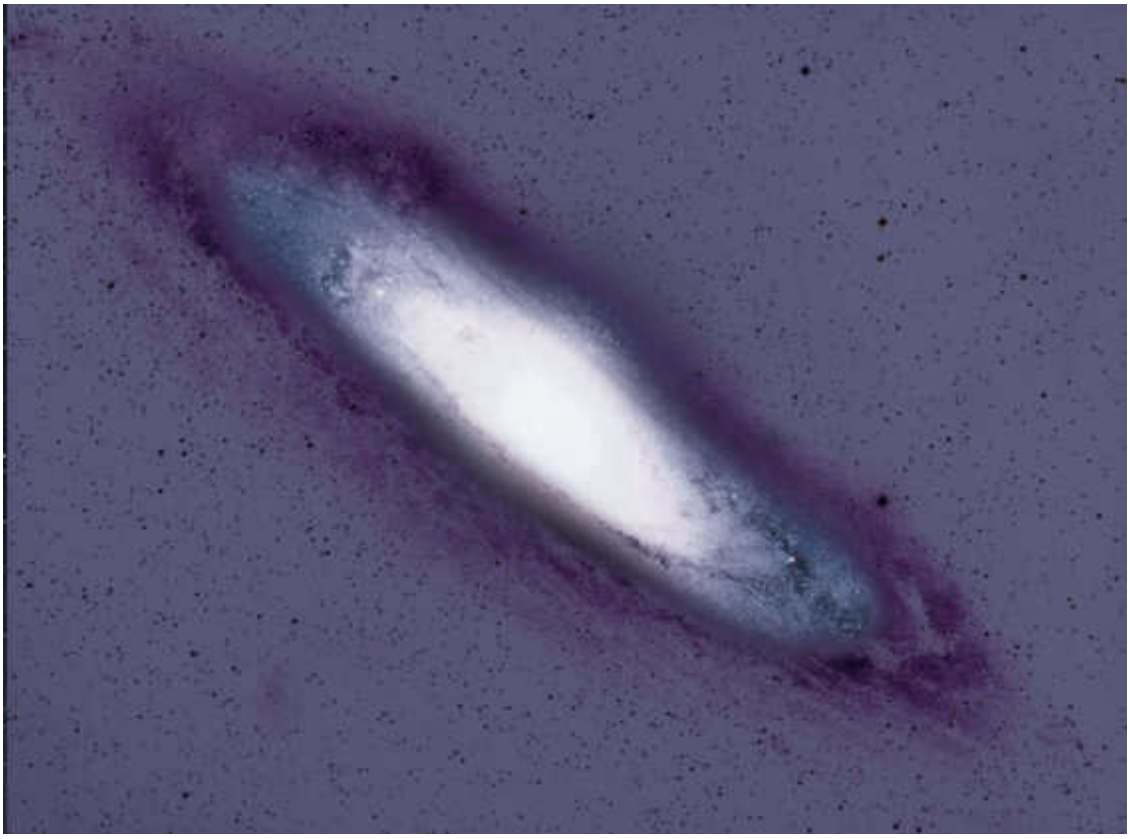
EVIDÊNCIA DE MATÉRIA ESCURA

Diversas observações cosmológicas sugerem fortemente que haveria muito mais matéria em nossa galáxia e outras galáxias do que a matéria visível. A mais convincente dessas observações é a de que as estrelas na periferia das galáxias espirais, como nossa Via Láctea, têm órbita rápida demais para se manterem orbitando apenas pela atração gravitacional de todas as estrelas que observamos (ver abaixo).

Sabemos desde a década de 1970 que há uma discrepância entre as velocidades de rotação observadas das estrelas nas regiões mais externas das galáxias espirais (indicada pelos pontos no diagrama) e as velocidades orbitais que seriam esperadas segundo as leis de Newton a partir da distribuição das estrelas visíveis na galáxia (a curva sólida no diagrama). Essa discrepância indica que deveria haver muito mais matéria nas partes exteriores das galáxias espirais.

CURVA DE ROTAÇÃO PARA A
GALÁXIA ESPIRAL NGC 3198

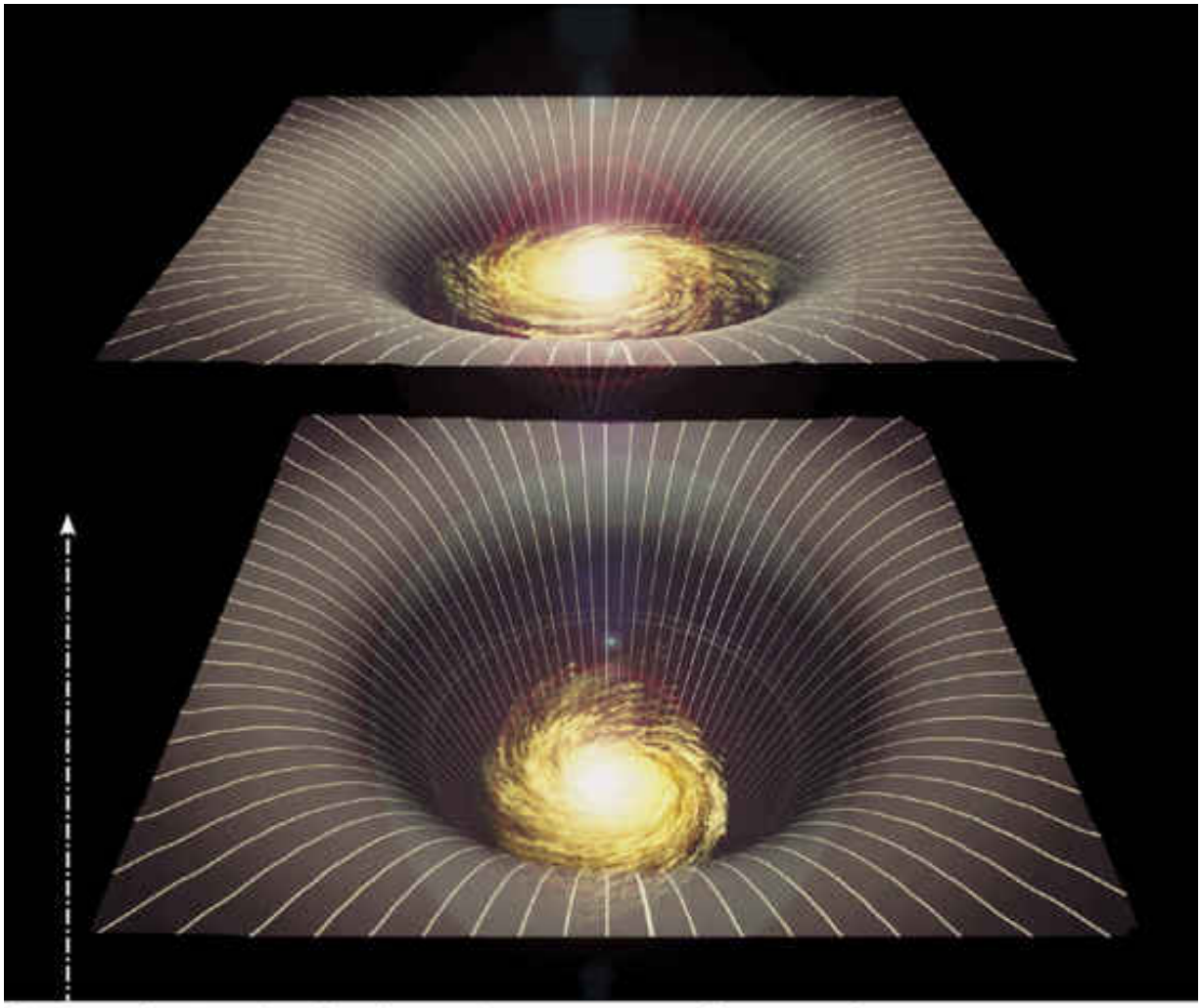




A NATUREZA DA MATÉRIA ESCURA

Os cosmólogos hoje acreditam que, embora as regiões centrais das galáxias espirais consistam em grande parte em estrelas comuns, suas bordas externas são dominadas por matéria escura, que não podemos ver diretamente. Mas um dos problemas fundamentais é descobrir a natureza da forma dominante de matéria escura nessas regiões exteriores das galáxias. Antes da década de 1980, em geral se presumia que essa matéria escura fosse matéria comum composta de prótons, nêutrons e elétrons em uma espécie de forma não prontamente detectável, talvez nuvens gasosas ou MACHOs — "*massive compact halo objects*", ou objetos compactos massivos do halo, como anãs brancas ou estrelas de nêutrons, ou ainda buracos negros.

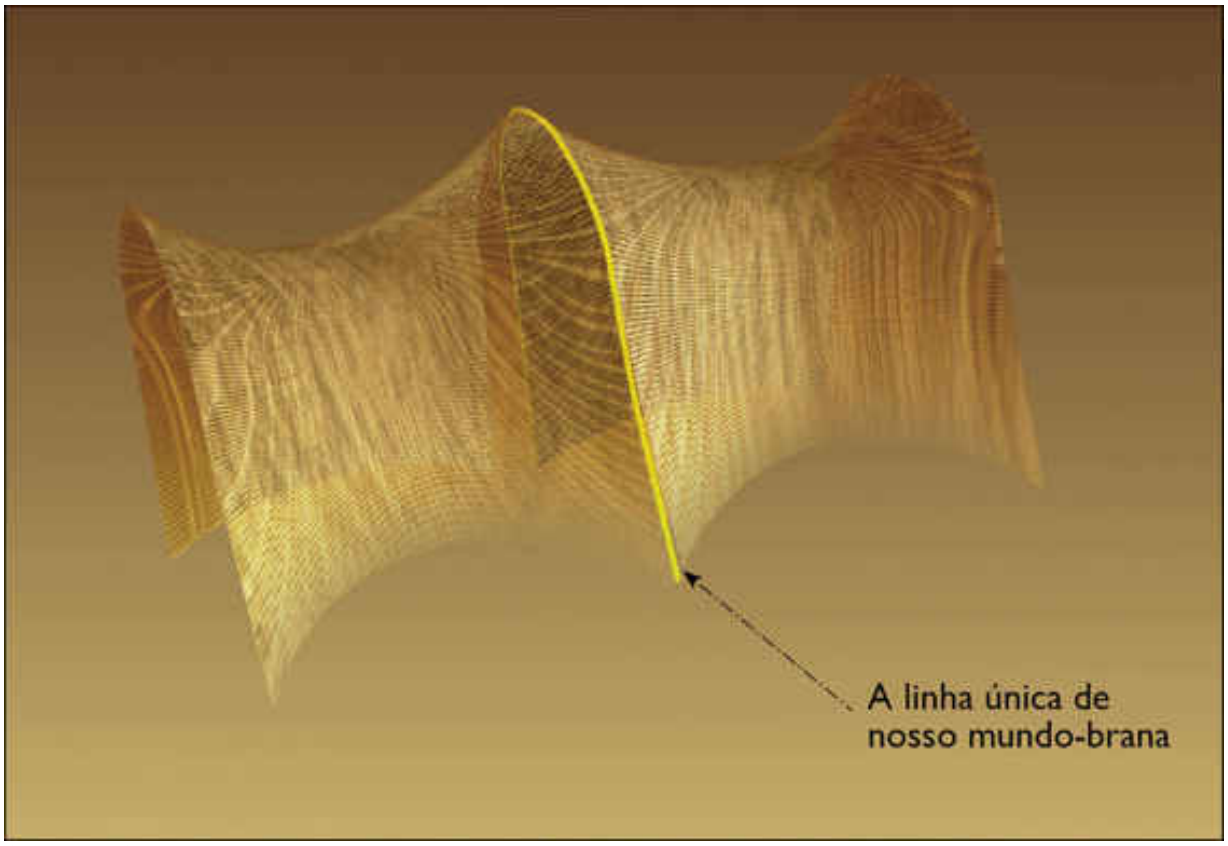
Entretanto, estudos recentes da formação de galáxias levaram os cosmólogos a crer que uma fração significativa da matéria escura deve estar em uma forma diferente da matéria comum. Talvez ela surja das massas de partículas elementares muito leves, como áxions ou neutrinos. Ela pode consistir até em espécies mais exóticas de partículas, como WIMPs — partículas massivas fracamente interagentes —, que são previstas pelas modernas teorias de partículas elementares, mas ainda não foram detectadas por experimentos.



A terra de ninguém das dimensões extras que fica entre branas.

(FIG. 7.13)
Nós não veríamos uma galáxia paralela sobre uma brana paralela porque a luz não se propagaria pelas dimensões extras. Mas a gravidade sim, de modo que a rotação de nossa galáxia seria afetada pela matéria escura, matéria que não podemos ver.

A massa faltante pode se originar de alguma espécie de partícula exótica em nosso mundo, como WIMPs (*weakly interacting massive particles*, partículas massivas fracamente interagentes) ou áxions (partículas elementares muito leves). Mas a massa que falta poderia também ser prova da existência de um mundo paralelo com matéria. Talvez ele contenha seres humanos rasos perguntando-se sobre a massa que parece estar faltando em seu mundo para explicar as órbitas das estrelas paralelas em torno do centro da galáxia paralela (Figura 7.13).

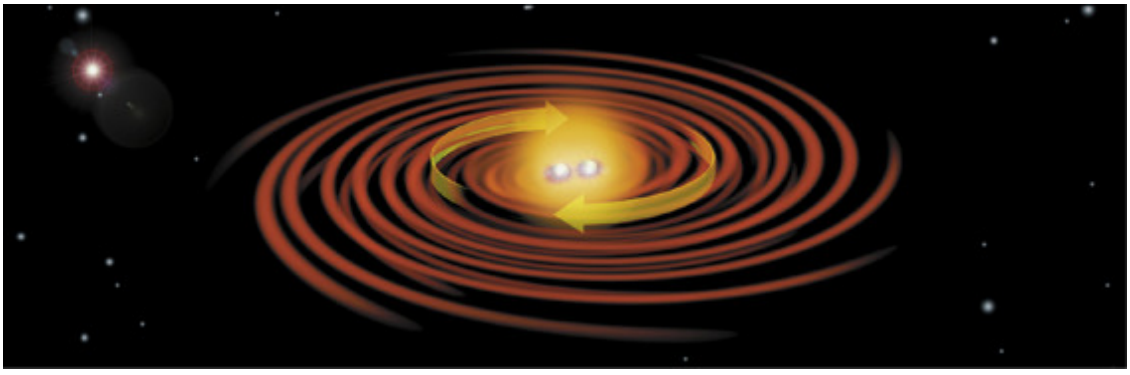


(FIG. 7.14)
No modelo de Randall-Sundrum, há apenas uma brana (mostrada aqui em uma única dimensão). As dimensões extras se estendem ao infinito, mas são recurvadas como uma sela. Essa curvatura impede o campo gravitacional de matéria na brana de se disseminar muito além pelas dimensões extras.

Em vez das dimensões extras terminando em uma segunda brana, outra possibilidade é que elas sejam infinitas, mas altamente curvadas, como uma sela (Figura 7.14). Lisa Randall e Raman Sundrum mostraram que esse tipo de curvatura atuaria mais como uma segunda brana: a influência gravitacional de um objeto na brana ficaria confinada a uma pequena vizinhança desta, e não propagada ao infinito nas dimensões extras. Como no modelo da brana paralela, o campo gravitacional cairia a longas distâncias do modo correto para explicar as órbitas planetárias e medições em laboratório da força gravitacional, mas a gravidade iria variar mais rapidamente em distâncias curtas.

No entanto, há uma importante diferença entre o modelo de Randall-Sundrum e o modelo da brana paralela. Corpos que se movem sob a

influência da gravidade produzirão ondas gravitacionais, ondulações de curvatura que viajam pelo espaço-tempo à velocidade da luz. Como as ondas eletromagnéticas da luz, esperava-se que as ondas gravitacionais transportassem energia, uma previsão que foi confirmada por observações do pulsar binário PSR1913+16.



Duas estrelas de nêutrons compactas espiralando em direção uma à outra

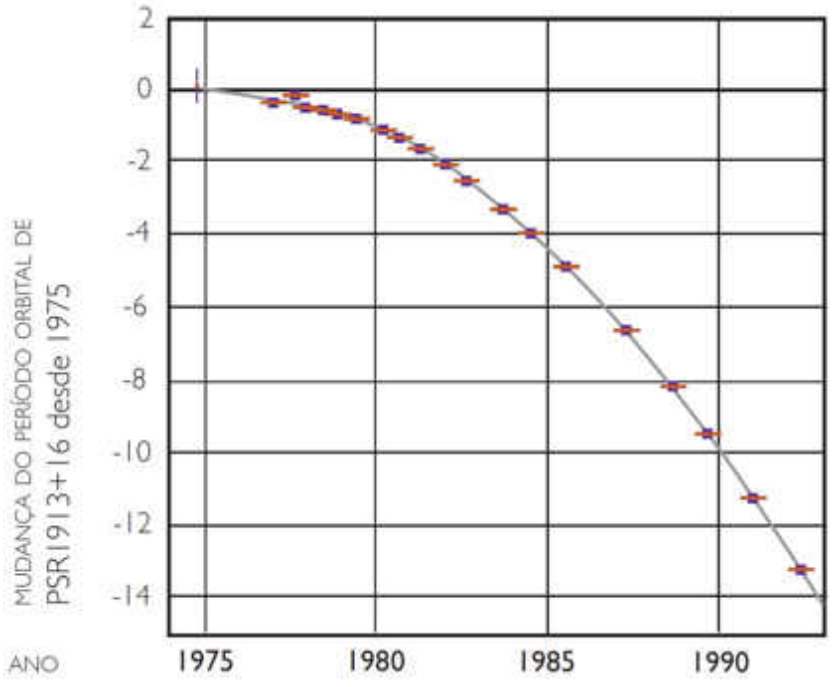


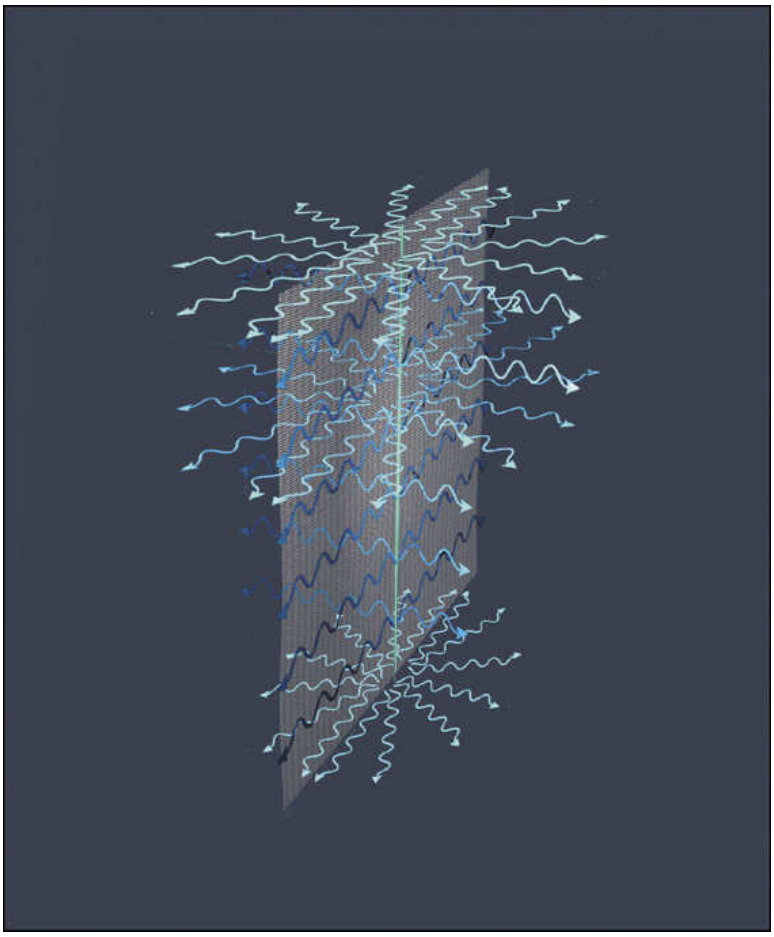
Gráfico do pulsar binário PSR1913+16 desde 1975

PULSARES BINÁRIOS

A relatividade geral prevê que corpos pesados movendo-se sob a influência da gravidade emitem ondas gravitacionais. Como ondas luminosas, as ondas gravitacionais transportam energia dos objetos que as emitem. Porém, a taxa da perda de energia em geral é muito baixa e, por isso, bastante difícil de observar. Por exemplo, a emissão de ondas gravitacionais está fazendo a Terra espiralar lentamente em direção ao Sol, só que levaria mais 10^{27} anos para que ambos colidissem!

Mas em 1975 Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram o pulsar binário PSR1913+16, um sistema consistindo em duas estrelas de nêutrons compactas orbitando-se mutuamente com uma separação máxima de apenas um raio solar. Segundo a relatividade geral, o movimento rápido significa que o período orbital desse sistema deveria diminuir em uma escala de tempo muito mais curta, devido à emissão de um forte sinal de onda gravitacional. A alteração prevista pela relatividade geral bate de forma notável com as cuidadosas observações dos parâmetros orbitais feitas por Hulse e Taylor, que indicam que desde 1975 o período encurtou em mais de dez segundos. Em 1993, eles ganharam o Prêmio Nobel por essa confirmação da relatividade geral.

Se de fato vivemos em uma brana em um espaço-tempo com dimensões extras, as ondas gravitacionais geradas pelo movimento dos corpos na brana viajariam para outras dimensões. Se houvesse uma segunda brana paralela, as ondas gravitacionais seriam refletidas de volta e ficariam aprisionadas entre as duas branas. Por outro lado, se houvesse apenas uma brana e as dimensões extras continuassem eternamente, como no modelo Randall-Sundrum, as ondas gravitacionais poderiam escapar por completo e transportar a energia de nosso mundo-brana (Figura 7.15).



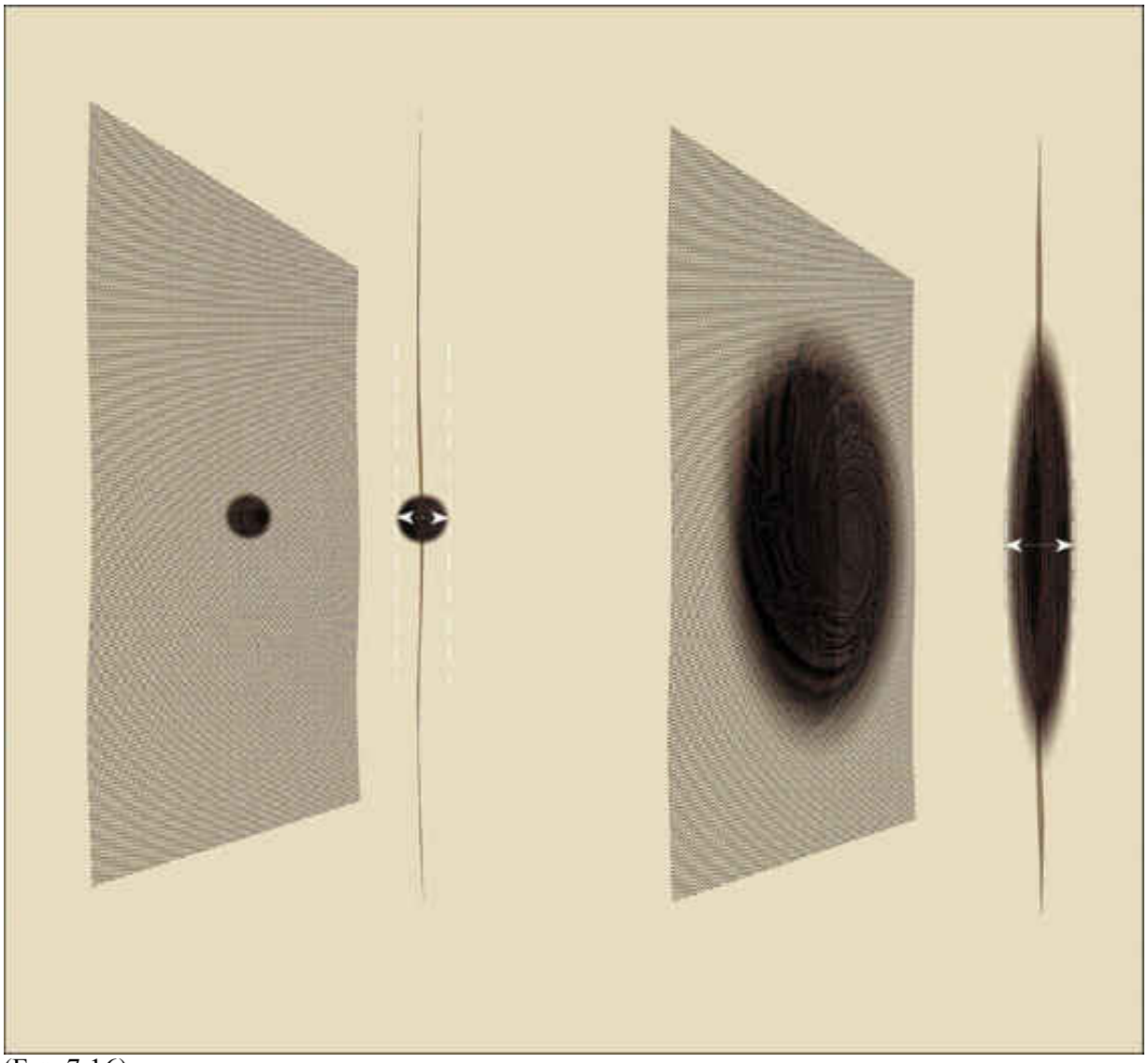
(FIG. 7.15)
No modelo de Randall-Sundrum, ondas gravitacionais com comprimento de onda curto podem transportar energia de fontes na brana, ocasionando uma aparente violação da lei da conservação da energia.

Isso aparentemente violaria um dos princípios fundamentais da física: a lei da conservação da energia. A quantidade total de energia permanece a mesma. Contudo, parece ser uma violação apenas porque nossa visão do que está acontecendo é restrita à brana. Um anjo que pudesse enxergar as dimensões extras saberia que a energia era a mesma, apenas mais espalhada.

As ondas gravitacionais produzidas por duas estrelas em órbita recíproca teriam um comprimento de onda que seria muito mais longo do que o raio da curvatura em forma de sela nas dimensões extras. Isso significa que tenderiam a ficar confinadas a uma pequena vizinhança da brana — como a força gravitacional — e não se propagariam muito nas

dimensões extras nem transportariam muita energia da brana. Já ondas gravitacionais que fossem mais curtas do que a escala em que as dimensões extras são curvas escapariam facilmente das proximidades da brana.

As únicas fontes de quantidades significativas de ondas gravitacionais curtas são provavelmente os buracos negros. Um buraco negro na brana se estenderá como um buraco negro nas dimensões extras. Se o buraco negro for pequeno, será quase redondo — ou seja, seu alcance nas dimensões extras corresponderá a seu tamanho na brana. Por outro lado, um buraco negro grande na brana se estenderá como uma "panqueca negra", que está confinada à proximidade da brana e tem espessura muito menor (nas dimensões extras) do que largura (na brana) (Figura 7.16).



(FIG. 7.16)
Um buraco negro em nosso mundo na brana se estenderia às dimensões extras. Se o buraco negro fosse pequeno, seria quase redondo, mas um buraco negro grande na brana se estenderia para formar um buraco negro em forma de panqueca na dimensão extra.

Como expliquei no Capítulo 4, a teoria quântica significa que os buracos negros não seriam completamente negros: eles emitiriam partículas e radiação de todo tipo, como corpos quentes. A luz com propriedades de radiação e as partículas seriam emitidas ao longo da brana porque a matéria e as forças não gravitacionais, como a eletricidade, ficariam confinadas a ela. Entretanto, os buracos negros também emitem ondas gravitacionais. Estas não ficariam confinadas à brana, mas

viajariam também na dimensão extra. Se o buraco negro for extenso e semelhante a uma panqueca, as ondas gravitacionais permanecerão junto à brana. Isso significaria que o buraco negro perderia energia (e portanto massa, pois $E = mc^2$) a uma taxa que seria de se esperar para um buraco negro no espaço-tempo quadridimensional. O buraco negro iria, desse modo, evaporar e encolher aos poucos até se tornar menor do que o raio da curvatura das dimensões extras semelhantes a uma sela. Nesse ponto, as ondas gravitacionais emitidas pelo buraco negro começariam a escapar livremente para as dimensões extras. Para alguém na brana, o buraco negro — ou estrela escura, como chamou Michell (ver Capítulo 4) — pareceria emitir radiação escura, uma radiação que não é observável diretamente na brana, mas cuja existência poderia ser inferida do fato de que o buraco negro estava perdendo massa.



(FIG. 7.17) A formação de um mundo-brana poderia ser como a formação de uma bolha de vapor na água fervente.

Isso significaria que a explosão final de radiação de um buraco negro evaporando pareceria menos potente do que de fato é. Talvez seja por isso que nunca observamos explosões de raios gama atribuíveis a buracos negros moribundos, embora outra explicação, mais prosaica, seria que não há muitos buracos negros com massa suficientemente baixa para evaporar na idade do universo até o momento.

A radiação dos buracos negros do mundo-brana surge das flutuações quânticas das partículas na brana e fora dela, mas as branas, como tudo mais no universo, também estarão sujeitas às flutuações quânticas, que podem levá-las a aparecer e desaparecer de maneira espontânea. A criação quântica de uma brana seria um pouco como a formação de bolhas de vapor na água fervente. A água líquida consiste em bilhões e bilhões de moléculas de H_2O muito aglomeradas com acoplamentos entre as vizinhas mais próximas. À medida que a água é aquecida, as moléculas se movem cada vez mais rápido e ricocheteiam umas nas outras. Ocasionalmente, essas colisões proporcionarão velocidades tão altas às moléculas que um grupo se libertará de sua ligação para formar uma pequena bolha de vapor cercada por água. A bolha então se expandirá ou encolherá de maneira aleatória, com mais moléculas do líquido se unindo ao vapor, ou vice-versa. A maioria das pequenas bolhas de vapor entrará em colapso para se liquefazer outra vez, mas algumas crescerão até certo tamanho crítico além do qual as bolhas quase certamente continuarão a crescer. São essas grandes bolhas em expansão que observamos quando a água ferve (Figura 7.17).



O comportamento dos mundos-branas seria semelhante. O princípio da incerteza permitiria aos mundos-branas surgir do nada como bolhas, com a brana formando sua superfície e o interior sendo o espaço de dimensionalidade mais elevada. Bolhas muito pequenas tenderiam a entrar em colapso outra vez rumo ao nada, porém uma bolha que crescesse por meio de flutuações quânticas além de certo tamanho crítico provavelmente continuaria a crescer. Pessoas (como nós) que vivessem na brana, a superfície da bolha, pensariam que o universo está em expansão. Seria como pintar galáxias na superfície de um balão e soprá-lo. As galáxias se afastariam, mas nenhuma delas poderia ser escolhida como o centro da expansão. Vamos torcer para que não haja ninguém com um alfinete cósmico pronto para furar a bolha.

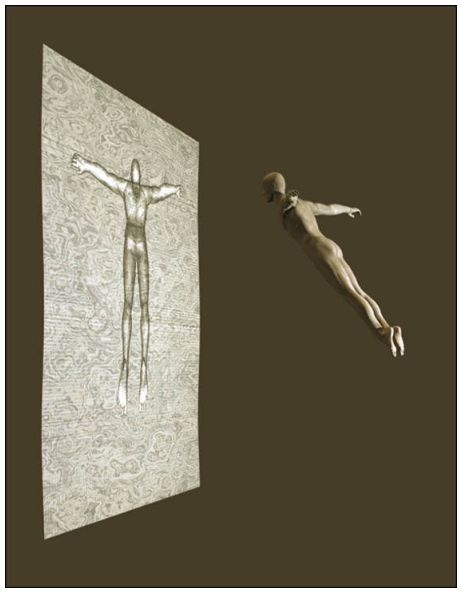
Segundo a proposição do universo sem contorno descrita no Capítulo 3, a criação espontânea de um mundo-brana teria uma história no tempo imaginário que seria como uma casca de noz: ou seja, uma esfera quadridimensional, como a superfície da Terra, mas com duas dimensões extras. A diferença importante é que a casca de noz descrita no Capítulo 3 era essencialmente oca: a esfera quadridimensional não teria sido o contorno de nada, e as outras seis ou sete dimensões do espaço-tempo previstas pela teoria-M estariam todas recurvadas numa escala ainda menor do que a casca de noz. No novo cenário de mundo-brana, contudo, a casca de noz estaria cheia: a história no tempo imaginário da brana onde vivemos seria uma esfera quadridimensional que constituiria o contorno de uma bolha pentadimensional com as cinco ou seis dimensões restantes recurvadas em uma escala muito pequena (Figura 7.18).



(FIG. 7.18)
O cenário de mundo-brana da origem do universo difere do que é discutido no Capítulo 3, pois a esfera quadridimensional ligeiramente achatada, ou casca de noz, não é mais oca, mas preenchida pela quinta dimensão.

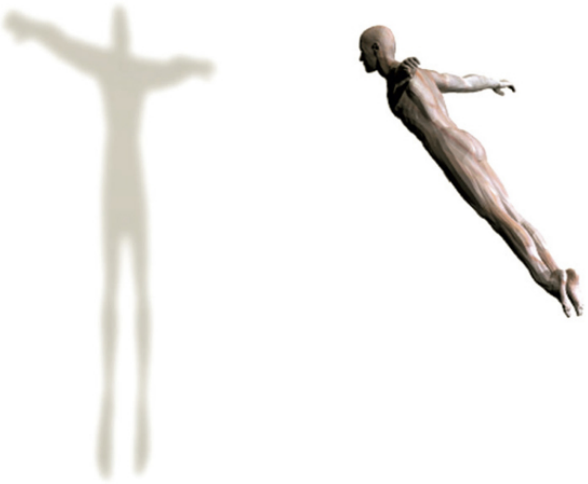
Essa história da brana no tempo imaginário determinaria sua história no tempo real. No tempo real, a brana se expandiria de uma maneira inflacionária acelerada tal como descrita no Capítulo 3. Uma casca de noz perfeitamente lisa e redonda seria a história mais provável da bolha no tempo imaginário. Entretanto, corresponderia a uma brana que se expande

para sempre de um modo inflacionário no tempo real. Numa brana como essa, não haveria formação de galáxias e portanto a vida inteligente jamais se desenvolveria. Por outro lado, histórias do tempo imaginário que não forem perfeitamente lisas e redondas teriam de algum modo probabilidades menores, porém poderiam corresponder a um comportamento no tempo real em que a brana teve uma fase de expansão inflacionária a princípio acelerada, mas que depois começou a diminuir. Durante essa expansão em desaceleração, as galáxias poderiam ter se formado e a vida inteligente ter se desenvolvido. Assim, segundo o princípio antrópico descrito no Capítulo 3, apenas as cascas de noz ligeiramente imperfeitas serão observadas por seres inteligentes se perguntando por que a origem do universo não foi perfeitamente lisa.



HOLOGRAFIA

A holografia codifica a informação em uma região do espaço sobre uma superfície com uma dimensão a menos. Parece ser uma propriedade da gravidade, tal como mostrado pelo fato de que a área do horizonte de eventos mede o número de estados internos de um buraco negro. Em um modelo de mundo-brana, a holografia seria uma correspondência biunívoca entre estado em nosso mundo quadridimensional e estados em dimensões mais elevadas. De um ponto de vista positivista, não se pode distinguir qual descrição é mais fundamental.

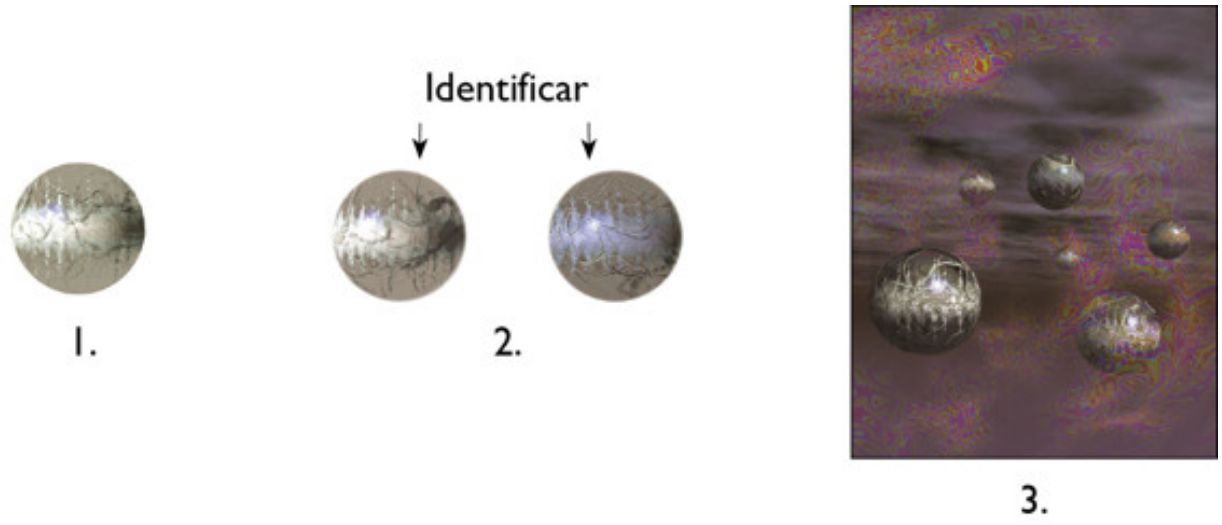


À medida que a brana se expandisse, o volume do espaço de dimensionalidade mais elevada dentro dela aumentaria. No fim, haveria uma enorme bolha cercada pela brana em que vivemos. Mas será que vivemos de fato na brana? Segundo a ideia da holografia descrita no Capítulo 2, a informação sobre o que acontece em uma região do espaço-tempo pode ser codificada em seu contorno. Assim, talvez acreditemos viver em um mundo quadridimensional por sermos as sombras lançadas na brana pelo que está acontecendo no interior da bolha. Entretanto, de um ponto de vista positivista, é impossível perguntar: qual é a realidade, a brana ou a bolha? As duas são modelos matemáticos que descrevem as observações. A pessoa é livre para utilizar o modelo que julgar mais conveniente. O que existe fora da brana? Há inúmeras possibilidades (Figura 7.19):

1. Talvez não haja nada lá fora. Embora uma bolha de vapor tenha água em seu exterior, isso não passa de uma analogia para nos ajudar a visualizar a origem do universo. Poderíamos imaginar um modelo matemático que fosse apenas uma brana com um espaço de dimensão mais elevada dentro, mas absolutamente nada do lado externo, nem mesmo espaço vazio. Podemos calcular o que o modelo matemático prevê sem fazer referência ao que existe do lado de fora.

2. Poderíamos ter um modelo matemático em que o lado externo de uma bolha estivesse colado ao lado externo de uma bolha similar. Esse modelo é na verdade matematicamente equivalente à possibilidade discutida acima de que não há nada do lado de fora da bolha, porém a diferença é psicológica: as pessoas se sentem mais confortáveis sendo situadas no centro do espaço-tempo, não na sua margem, mas, para um positivista, as possibilidades 1 e 2 são a mesma.

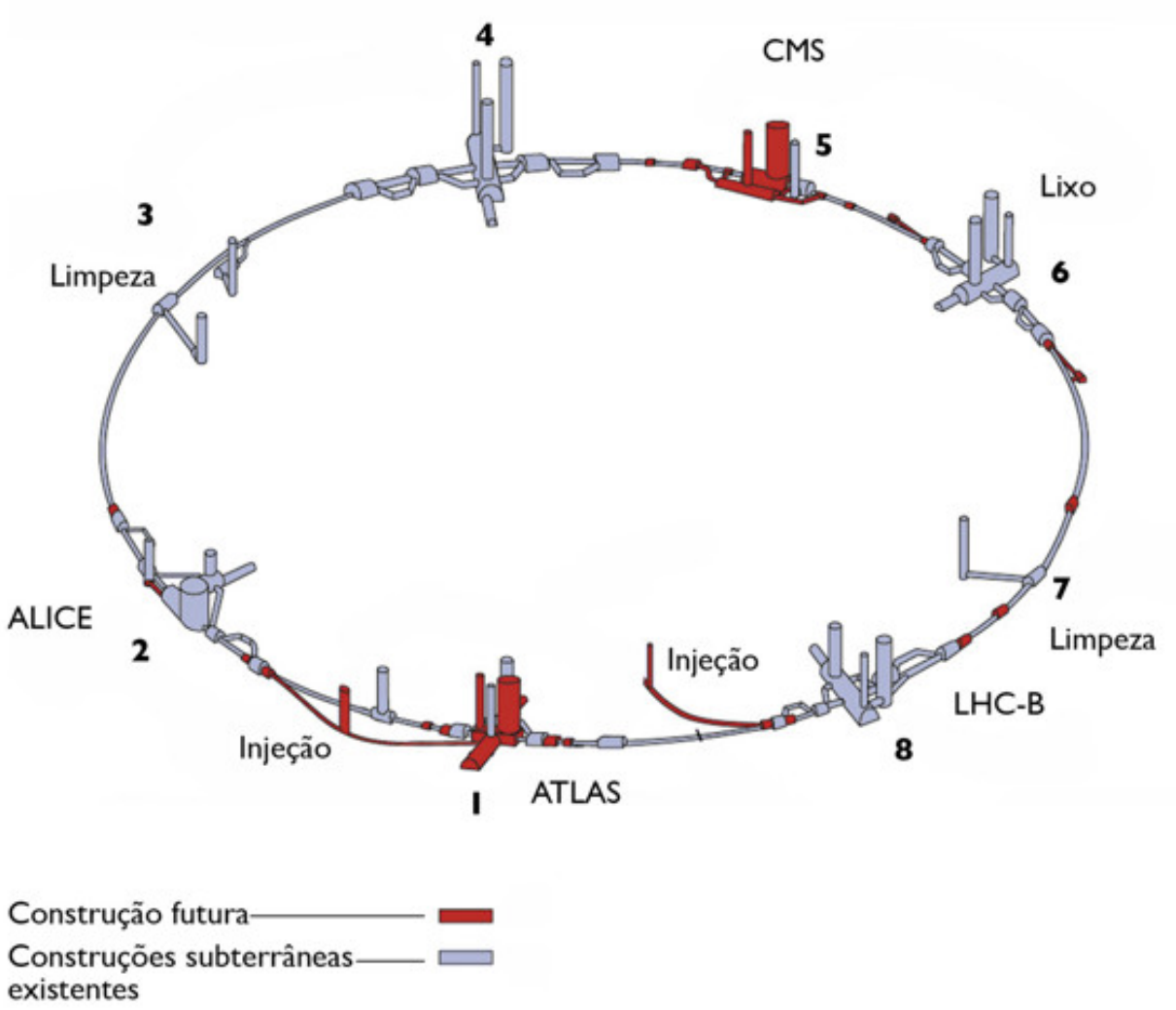
3. A bolha poderia se expandir em um espaço que não fosse uma imagem espelhada do que havia dentro da bolha. Essa possibilidade é diferente das duas discutidas acima e está mais para o caso da água fervendo. Outras bolhas poderiam se formar e se expandir. Se colidissem e se fundissem com a bolha em que vivemos, os resultados poderiam ser catastróficos. Já se sugeriu até que o próprio Big Bang pode ter sido originado por uma colisão de branas.



(FIG. 7.19)
1. Uma bolha/brana com espaço de dimensionalidade mais elevada dentro e nada no exterior.
2. Uma possibilidade em que o exterior de uma bolha/brana está colado ao exterior de outra bolha.
3. Uma bolha/brana se expande em um espaço que não é a imagem espelhada do que está dentro. Outras bolhas poderiam se formar e se expandir em tal cenário.

Modelos de mundo-brana como esses constituem um tema de ponta de pesquisa. Eles são altamente especulativos, mas oferecem novos tipos de

comportamento que podem ser testados pela observação. Poderiam explicar por que a gravidade parece tão fraca. A gravidade pode ser bem forte na teoria fundamental, mas a propagação da força gravitacional nas dimensões extras significaria que ela seria fraca para grandes distâncias na brana em que vivemos.



(FIG. 7.20)
Desenho do túnel LEP mostrando a infraestrutura existente e a futura construção do Grande Colisor de Hádrons em Genebra, Suíça.

Uma consequência disso seria o comprimento de Planck — a menor distância que podemos investigar sem criar um buraco negro — ser bem maior do que pareceria sob a fraqueza da gravidade em nossa brana

quadridimensional. A menor boneca russa não seria tão minúscula, afinal, e talvez esteja ao alcance dos aceleradores de partícula no futuro. Na verdade, poderíamos já ter encontrado a menor boneca, o comprimento de Planck fundamental, se os Estados Unidos não tivessem sofrido um complexo de pobreza em 1994 e cancelado o SSC (Supercolisor Supercondutor), mesmo estando construído pela metade. Outros aceleradores de partículas, como o LHC (Grande Colisor de Hádrons), em Genebra, estão sendo construídos (Figura 7.20).* Com eles, e com outras observações, como a radiação cósmica de fundo em micro-ondas, talvez sejamos capazes de determinar se vivemos ou não em uma brana. Em caso afirmativo, será presumivelmente porque o princípio antrópico escolhe modelos de brana no vasto zoológico de universos admitidos pela teoria-M. Poderíamos muito bem parafrasear Miranda em *A tempestade*, de Shakespeare:

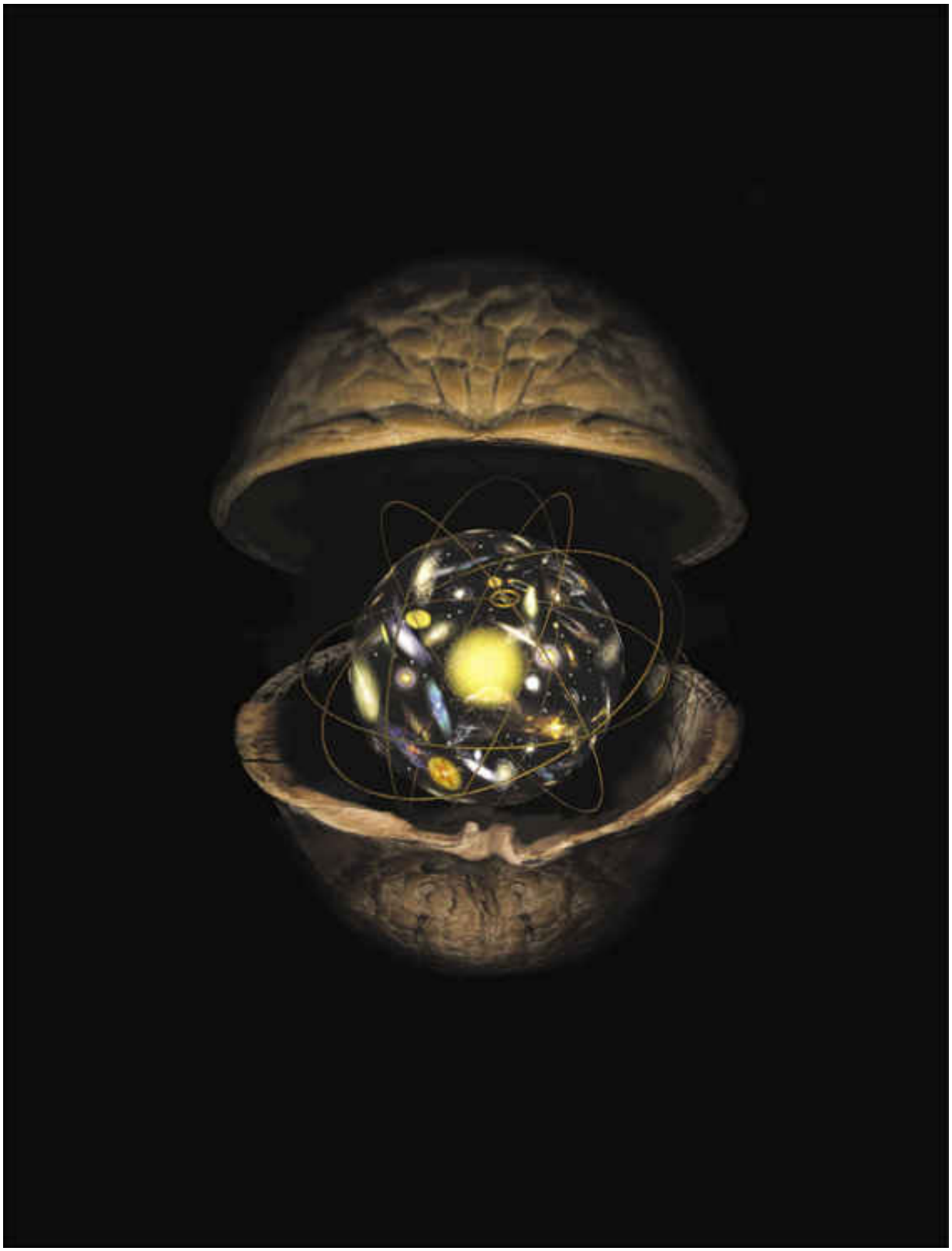
Oh, admirável mundo brana
*Que encerra tais criaturas.***

Isso, em suma, é o universo.

---

* A informação está desatualizada. O Grande Colisor de Hádrons não só opera desde 2008, como também foi responsável pela confirmação do bóson de Higgs. (N.T.)

** No original, *"O brane new world/ That has such creatures in't"*: a passagem muito conhecida também serviu de título para o famoso livro de Aldous Huxley, *Admirável mundo novo*. Hawking faz um trocadilho entre *brave* (admirável) e *brane* (brana). (N.T.)



Glossário

Abordagem positivista
: Ideia de que uma teoria científica é um modelo matemático que descreve e codifica as observações que fazemos.

Aceleração
: Mudança na velocidade ou direção de um objeto. Ver também Velocidade.

Acelerador de partículas
: Máquina que pode acelerar partículas carregadas em movimento, aumentando sua energia.

Amplitude
: A altura máxima de uma crista de onda ou a profundidade máxima de um vale de onda.

Ano-luz
: Distância viajada pela luz em um ano.

Antipartícula
: Todo tipo de partícula material possui uma antipartícula correspondente. Quando uma partícula colide com sua antipartícula, elas se aniquilam, restando apenas energia.

Átomo
: A unidade básica de matéria comum, composta de um núcleo minúsculo (consistindo em prótons e nêutrons) cercado por elétrons em órbita.

Big Bang
: A singularidade no início do universo, há cerca de quinze bilhões de anos.

Big Crunch
: O nome dado a um possível cenário do fim do universo, em que todo o espaço e a matéria se esmagarão (crunch), formando uma singularidade.

Bóson
: Partícula ou padrão de vibrações de uma corda cujo *spin* é um número inteiro.

Brana
: Objeto, aparentemente ingrediente fundamental da teoria-M, que pode ter uma variedade de dimensões espaciais. Em geral, uma p-brana tem comprimento em p direções, uma 1-brana é uma corda, uma 2-brana é uma superfície ou membrana etc.

Buraco de minhoca
: Tubo fino de espaço-tempo conectando regiões distantes do universo. Buracos de minhoca também devem se ligar a universos paralelos ou universos-bebês e talvez constituam uma possibilidade de viagem no tempo.

Buraco negro

Região do espaço-tempo de onde nada, nem mesmo a luz, consegue escapar, devido à gravidade ser tão forte.

Buraco negro primordial

Buraco negro criado no universo primitivo.

Campo

Algo que existe por todo o espaço e tempo, por oposição a uma partícula, que existe apenas em um ponto de cada vez.

Campo de força

O meio pelo qual uma força comunica sua influência.

Campo de Maxwell

Síntese da eletricidade, magnetismo e luz em campos dinâmicos que podem oscilar e se mover através do espaço.

Campo gravitacional

Meio pelo qual a gravidade comunica sua influência.

Campo magnético

Campo responsável pelas forças magnéticas.

Carga elétrica

Propriedade de uma partícula pela qual ela pode repelir (ou atrair) outras partículas que tenham carga de mesmo sinal (ou oposto).

Comprimento de onda

Para uma onda, a distância entre dois vales adjacentes ou duas cristas adjacentes.

Comprimento de Planck

Cerca de 10-35 centímetros. O tamanho de uma corda típica na teoria das cordas.

Condição sem contorno

Ideia de que o universo é finito, mas destituído de contorno no tempo imaginário.

Condições de contorno

Estado inicial de um sistema físico ou, de modo mais geral, o estado de um sistema em um limite no tempo ou no espaço.

Condições iniciais

Estado de um sistema físico em seu início.

Cone de luz

Superfície no espaço-tempo que assinala a possível direção para os raios luminosos passando por um dado evento.

Conjectura de proteção da cronologia

A ideia de que as leis da física conspiram para impedir que objetos macroscópicos viajem no tempo.

Conservação da energia

Lei da ciência que afirma que a energia (ou seu equivalente em massa) não pode ser criada nem destruída.

Constante cosmológica

Artifício matemático usado por Einstein para dar ao universo uma tendência intrínseca a se expandir, permitindo à relatividade prever um universo estático.

Constante de Planck

Pedra angular do princípio da incerteza — o produto da incerteza na posição e na velocidade deve ser maior do que a constante de Planck. É representada pelo símbolo h–.

Contração de Lorentz

Redução de objetos em movimento ao longo de sua direção de movimento, conforme prevista pela relatividade restrita.

Corda

Objeto unidimensional fundamental na teoria das cordas que substitui o conceito de partículas elementares sem estrutura. Padrões de vibração diferentes em uma corda dão origem a partículas elementares com propriedades diferentes.

Corda cósmica

Objeto longo e pesado com seção transversal minúscula que pode ter sido produzido durante os primeiros estágios do universo. Hoje em dia uma única corda poderia se estender por todo o universo.

Corda fechada

Tipo de corda na forma de um loop.

Cosmologia

Estudo do universo como um todo.

Desvio para o azul

Encurtamento do comprimento de onda da radiação emitida por um objeto que está se movendo na direção de um observador, causado pelo efeito Doppler.

Desvio para o vermelho

Avermelhamento da radiação emitida por um objeto que está se distanciando do observador, causado pelo efeito Doppler.

Determinismo científico

Concepção mecânica do mundo em que o conhecimento completo do estado do universo possibilita ao estado completo ser previsto em momentos anteriores ou futuros, sugerida por Laplace.

Dilatação do tempo

Característica da relatividade restrita que prevê que o fluxo do tempo diminuirá para um observador em movimento ou na presença de um forte campo gravitacional.

Dimensão enrolada

Dimensão espacial recurvada em escala tão diminuta que pode escapar à detecção.

Dimensão espacial

Qualquer uma das três dimensões no espaço-tempo com propriedades espaciais.

DNA

Ácido desoxirribonucleico, composto de fosfato, um açúcar e quatro bases: adenina, guanina, timina e citosina. Dois filamentos de DNA formam uma estrutura de dupla hélice que se parece com uma escada de caracol. O DNA codifica toda a informação de que as células necessitam para se replicar e desempenha um papel vital na hereditariedade.

Dualidade

Correspondência entre teorias aparentemente diferentes que levam aos mesmos resultados físicos.

Dualidade onda/partícula

Conceito da mecânica quântica de que não há distinção entre ondas e partículas; às vezes as partículas podem se comportar como ondas, e vice-versa.

Eclipse solar

Período de escuridão que ocorre quando a Lua passa entre a Terra e o Sol, durando normalmente alguns minutos na Terra. Em 1919, um eclipse visto da África Ocidental comprovou a relatividade restrita para além de qualquer dúvida.

Efeito Casimir

A pressão atrativa entre duas placas metálicas planas e paralelas colocadas próximas no vácuo. A pressão se deve a uma redução no número usual de partículas virtuais no espaço entre as placas.

Efeito Doppler

Desvio de frequência e comprimento de onda das ondas sonoras ou luminosas que um observador percebe se a fonte estiver se movendo em relação ao observador.

Efeito fotoelétrico

O modo como certos metais emitem elétrons quando a luz incide sobre eles.

Elétron

Partícula com carga negativa que orbita o núcleo de um átomo.

Energia do vácuo

Energia que está presente até no espaço aparentemente vazio. Ao contrário da presença de massa, a presença da energia do vácuo teria a curiosa propriedade de provocar a expansão do universo e acelerá-lo.

Entropia

Medida da desordem de um sistema físico; o número de diferentes configurações microscópicas de um sistema que deixa sua aparência macroscópica inalterada.

Equação de Schrödinger

Equação que governa a evolução da função de onda na teoria quântica.

Espaço livre

Porção do espaço vazio completamente livre de campos, isto é, não influenciada por nenhuma força.

Espaço-tempo

Espaço quadridimensional cujos pontos são eventos.

Espectro

As frequências constituintes de uma onda. A parte visível do espectro solar às vezes pode ser vista como um arco-íris.

Estado estacionário

Estado que não sofre mudança com o tempo.

Estado fundamental

Estado de um sistema com mínima energia.

Éter

Meio imaterial hipotético que outrora se acreditava preencher todo o espaço. A ideia de que um meio assim seja necessário para a propagação da radiação eletromagnética não é mais defensável.

Evento

Ponto no espaço-tempo especificado por seu lugar e momento.

Férmion

Partícula ou padrão de vibração de corda cujo *spin* é a metade de um número inteiro.

Fissão nuclear

Processo pelo qual um núcleo é quebrado em dois núcleos menores, liberando energia.

Força eletromagnética

Força que se origina entre partículas com carga elétrica de mesmo sinal (ou oposto).

Força forte

A mais forte das quatro forças fundamentais, com o menor alcance de todas. Mantém os quarks unidos para formar prótons e nêutrons e essas partículas unidas para formar o núcleo atômico.

Força fraca

A segunda mais fraca das quatro forças fundamentais, com um alcance muito curto. Ela afeta todas as partículas de matéria, mas não as partículas mediadoras de força.

Força gravitacional

A mais fraca das quatro forças fundamentais da natureza.

Fóton

Um quantum de luz, o menor pacote do campo eletromagnético.

Frequência

Para uma onda, o número de ciclos completos por segundo.

Função de onda

Conceito fundamental em mecânica quântica, número existente em cada ponto do espaço associado a uma partícula, determinando a probabilidade de que a partícula seja encontrada nessa posição.

Fusão nuclear

Processo pelo qual dois núcleos colidem e se juntam para formar um núcleo maior e mais pesado.

Gravidade quântica

Teoria que funde a mecânica quântica e a relatividade geral.

Horizonte de eventos

A borda de um buraco negro, o contorno da região a partir da qual não é possível escapar para o infinito.

Infinito

Extensão ou número sem limite ou fim.

Inflação

Breve período de expansão acelerada durante o qual o próprio universo primitivo aumentou de tamanho por um enorme fator.

Kelvin

Escala em que as temperaturas são indicadas relativamente ao zero absoluto.

Lei de Moore

Lei que determina que a potência dos computadores dobra a cada dezoito meses. Algo que sem dúvida não pode continuar indefinidamente.

Leis do movimento de Newton

Leis que descrevem o movimento dos corpos, baseadas na concepção de espaço e tempo absolutos. Elas vigoraram até Einstein descobrir a relatividade restrita.

Loop temporal

Outro nome para uma curva do tipo tempo fechada.

Macroscópico

Grande o bastante para ser visto a olho nu, em geral usado para escalas abaixo de 0,01 milímetro. Escalas abaixo desse tamanho são consideradas microscópicas.

Massa

Quantidade de matéria em um corpo; sua inércia ou resistência à aceleração no espaço livre.

Matéria escura

Matéria nas galáxias e nos aglomerados, e possivelmente entre aglomerados, que não pode ser observada de forma direta, mas pode ser detectada por seu campo gravitacional. Pelo menos 90% da matéria do universo é matéria escura.

Mecânica quântica

Leis físicas que governam o domínio do muito pequeno, como átomos, prótons etc., desenvolvidas a partir do princípio quântico de Planck e do princípio da incerteza de Heisenberg.

Modelo de Randall-Sundrum

Teoria de que vivemos em uma brana num espaço pentadimensional infinito de curvatura negativa, como uma sela.

Modelo-padrão da cosmologia

A teoria do Big Bang junto com uma compreensão do modelo-padrão da física de partículas.

Modelo-padrão da física de partículas

Teoria unificadora para as três forças não gravitacionais e seus efeitos sobre a matéria.

Mundo-brana

Superfície ou brana quadridimensional em um espaço-tempo de dimensionalidade mais elevada.

Neutrino

Espécie de partícula sem carga sujeita apenas à força fraca.

Nêutron

Partícula sem carga, muito semelhante ao próton, que responde *grosso modo* por metade das partículas em um núcleo atômico. Composto de três quarks (2 *down*, 1 *up*).

Núcleo
: A parte central de um átomo, consistindo apenas em prótons e nêutrons unidos pela força forte.

Número de Grassmann
: Classe de números não comutativos. Em números reais comuns, não faz diferença em que ordem são multiplicados: A × B = C e B × A = C. Porém, os números de Grassmann são anticomutativos, então A × B é o mesmo que –B × A.

Número imaginário
: Constructo matemático abstrato. Podemos pensar em números reais e imaginários como o ato de rotular as posições e os pontos em um plano de modo que os números imaginários sejam perpendiculares aos números reais comuns.

Observador

: Pessoa ou equipamento que mede as propriedades físicas de um sistema.

Onda eletromagnética
: Perturbação ondulatória num campo elétrico. Todas as ondas do espectro eletromagnético viajam à velocidade da luz: por exemplo, luz visível, raios X, micro-ondas, infravermelho etc.

Onda gravitacional
: Perturbação ondulatória em um campo gravitacional.

P-brana

: Brana com p dimensões. Ver também Brana.

Padrão de interferência
: Padrão de onda que surge a partir da fusão de duas ou mais ondas que são emitidas de diferentes locais ou em diferentes momentos.

Partícula elementar
: Partícula que supostamente não pode ser dividida.

Partícula virtual
: Na mecânica quântica, partícula que não pode ser detectada diretamente, mas cuja existência sem dúvida tem efeitos mensuráveis. Ver também Efeito Casimir.

Peso
: Força exercida sobre um corpo por um campo gravitacional. É proporcional, mas não igual, à massa.

Pósitron
: Antipartícula positivamente carregada do elétron.

Princípio antrópico
: A ideia de que vemos o universo do modo como é, porque, se ele fosse diferente, não estaríamos aqui para vê-lo.

Princípio da exclusão
: A ideia de que duas partículas de *spin* idêntico –1/2 não podem ter (dentro dos limites do princípio da incerteza) mesma posição e mesma velocidade.

Princípio da incerteza

Princípio formulado por Heisenberg de que nunca podemos ter certeza exata acerca tanto da posição como da velocidade de uma partícula; quanto maior a precisão com que sabemos de uma, menor precisão poderemos ter da outra.

Princípio quântico de Planck
: Ideia de que as ondas eletromagnéticas (por exemplo, a luz) podem ser emitidas ou absorvidas apenas em quanta discretos.

Próton
: Partícula positivamente carregada, muito similar ao nêutron, que responde por mais ou menos metade da massa de um núcleo atômico. É composta de três quarks (2 *up* e 1 *down*).

Quantum (plural: quanta)

Unidade indivisível em que as ondas podem ser absorvidas ou emitidas.

Quark
: Partícula elementar carregada sensível à força forte. Os quarks vêm em seis "sabores": *up, down, strange, charmed, bottom* e *top*. E cada sabor tem três "cores": vermelho, verde e azul.

Radiação

Energia transmitida pelas ondas ou partículas através do espaço ou algum outro meio.

Radiação de fundo em micro-ondas
: Radiação originada no brilho do universo primitivo aquecido; hoje de tal forma desviada para o vermelho, é vista não como luz, mas como micro-ondas (ondas de rádio com comprimento de onda de alguns centímetros).

Radioatividade
: Desintegração espontânea de um tipo de núcleo atômico que origina outro.

Relatividade geral
: A teoria de Einstein baseada na ideia de que as leis da ciência devem ser as mesmas para todos os observadores, a despeito de como estejam se movendo. Ela explica a força da gravidade em termos de curvatura do espaço-tempo quadridimensional.

Relatividade restrita
: Teoria de Einstein baseada na ideia de que as leis da ciência devem ser as mesmas para todos os observadores, a despeito de como estejam se movendo, na ausência de campos gravitacionais.

Segunda lei da termodinâmica

Lei que afirma que a entropia só aumenta e nunca pode diminuir.

Segundo-luz
: Distância viajada pela luz em um segundo.

Singularidade
: Ponto no espaço-tempo em que a curvatura do espaço-tempo se torna infinita.

Singularidade nua

Uma singularidade no espaço-tempo, não cercada por um buraco negro, que é visível para um observador distante.

Spin
: Uma propriedade interna das partículas elementares, ligada, mas não idêntica, à noção comum de giro.

Supergravidade
: Conjunto de teorias unificando a relatividade geral e a supersimetria.

Supersimetria
: Princípio que relaciona as propriedades das partículas de *spin* diferente.

Tempo absoluto

: A ideia de que existe um relógio universal. A teoria da relatividade de Einstein mostrou que tal conceito não poderia existir.

Tempo de Planck
: Cerca de 10–43 segundos, tempo que leva para a luz viajar a distância do comprimento de Planck.

Tempo imaginário
: Tempo medido usando números imaginários.

Teorema da singularidade
: Teorema que mostra que uma singularidade, ponto no qual a relatividade geral deixa de vigorar, deve existir sob determinadas circunstâncias; em particular, que o universo deve ter começado com uma singularidade.

Teoria clássica
: Teoria baseada em conceitos estabelecidos antes da relatividade e da mecânica quântica. Presume que os objetos têm posições e velocidades bem definidas. Isso não é verdadeiro em escalas muito pequenas, como mostra o princípio da incerteza de Heisenberg.

Teoria da Grande Unificação
: Teoria que unifica a força eletromagnética, a força forte e a força fraca.

Teoria da gravitação universal de Newton
: Teoria de que a força de atração entre dois corpos depende da massa e da separação dos corpos; ela é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles.

Teoria das cordas
: Teoria da física na qual as partículas são descritas como ondas em cordas, unifica a mecânica quântica e a relatividade geral. Também conhecida como teoria das supercordas.

Teoria de Yang-Mills
: Ampliação da teoria do campo de Maxwell que descreve as interações entre as forças fraca e forte.

Teoria holográfica
: Ideia de que os estados quânticos de um sistema em uma região do espaço-tempo podem estar codificados no contorno dessa região.

Teoria-M
: Teoria que unifica todas as cinco teorias das cordas, bem como a supergravidade, dentro de uma única estrutura teórica, mas que ainda não é plenamente compreendida.

Teoria unificada
: Qualquer teoria que descreva todas as quatro forças e toda a matéria dentro de uma estrutura única.

Termodinâmica
: Estudo da relação entre energia, trabalho, calor e entropia em um sistema físico dinâmico.

Velocidade

: Número que descreve a velocidade e a direção do movimento de um objeto.

Zero absoluto

: A menor temperatura possível à qual as substâncias não contêm energia térmica, cerca de –273 graus centígrados ou 0 na escala Kelvin.

Sugestões de leitura

Existem muitos livros de divulgação científica, que vão do excelente, como *O universo elegante*, ao inane (que não vou identificar). Assim, restringi minha lista a autores que deram uma contribuição significativa a esse campo, de modo a transmitir a experiência genuína.

Peço desculpas aos que deixei de fora devido à minha ignorância. Uma segunda lista, "Mais técnicos", foi incluída para leitores que desejam ir atrás de textos mais avançados.

EINSTEIN, Albert. *The Meaning of Relativity*. Princeton: Princeton University Press, 5ª ed., 1966.

FEYNMAN, Richard. *Sobre as leis da física*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

GREENE, Brian. *O universo elegante: supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

GUTH, Alan H. *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. Nova York: Perseus Books Group, 2000.

REES, Martin J. *Our Cosmic Habitat*. Princeton: Princeton University Press, 2001.

_____. *Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe*. Nova York: Basic Books, 2000.

THORNE, Kip. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. Nova York: W.W. Norton & Company, 1994.

WEINBERG, Steven. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Nova York: Basic Books, 2ª ed., 1993.

Mais técnicos

HARTLE, James. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Longman, 2002.

LINDE, Andrei D. *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. Chur, Suíça: Harwood Academic Publishers, 1990.

MISNER, Charles W., Kip S. Thorne e John A. Wheeler. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973.

PEEBLES, P. J. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton, Nova Jersey: Princeton University Press, 1993.

POLCHINSKI, Joseph. *String Theory: An Introduction to the Bosonic String*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

WALD, Robert M. *General Relativity*. Chicago: University of Chicago Press, 1984.

Créditos das imagens

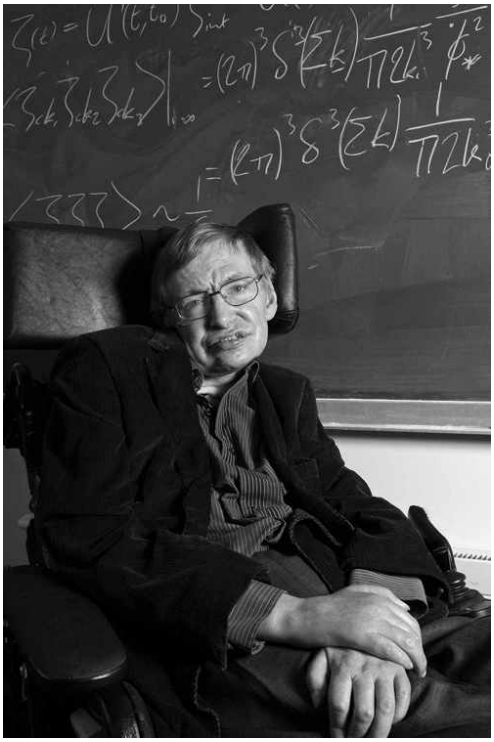
Imagens **A, D**: cortesia dos Arquivos do California Institute of Technology. Albert Einstein™ licenciada pela Universidade Hebraica de Jerusalém, representada pela Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; Imagem **B**: AKG Photo, Londres; Albert Einstein™ licenciada pela Universidade Hebraica de Jerusalém, representada pela Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; Imagem **C**: cortesia do Los Alamos National Laboratory; Imagem **E**: cortesia da Science Photo Library; Imagem **F**: Albert Einstein™ licenciada pela Universidade Hebraica de Jerusalém, representada pela Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; Imagem **G**: foto Harry Burnett/cortesia dos Arquivos, California Institute of Technology. Albert Einstein™ licenciada pela Universidade Hebraica de Jerusalém, representada pela Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; Imagem **H**: cortesia Neel Shearer; Imagem **I**: cortesia do Space Telescope Science Institute (STScI)/NASA; Imagem **J**: Prometeu acorrentado com a águia bicando seu fígado, pintura em vaso com figuras em preto, etrusco. Museus e galerias do Vaticano, cidade do Vaticano, Itália/Bridgeman Art Library; Imagens **K, L, M**: galáxia espiral NGC 4414, foto cortesia do Hubble Heritage Team, STScI/NASA; galáxia espiral barrada NGC 4314, foto cortesia da University of Texas et al., STScI/NASA; galáxia elíptica NGC 147, foto cortesia da STScI/NASA; Via Láctea, foto cortesia de S. J. Maddox, G. Efstathiou, W. Sutherland, J. Loveday, Department of Astrophysics, Oxford University; Imagem **N**: cortesia de Jason Ware, galaxyphoto.com; Imagem **O**: cortesia do The Observatories of the Carnegie Institution of Washington; Imagens **P, Q**: foto de Floyd Clark/cortesia Arquivos, California Institute of Technology; foto de Richard P. Feynman usada com

a autorização da Melanie Jackson Agency, LLC; Imagens **R, S**: copyright California Institute of Technology; Imagem **T**: "INDEPENDENCE DAY" © 1996 Twentieth Century Fox. Todos os direitos reservados; *still* do filme *E.T.*: copyright © 2001 by Universal Studios Publishing Rights, uma divisão da Universal Studios Licensing, Inc. Todos os direitos reservados; Imagem **U**: cortesia de Neel Shearer.

FIG 4.5: cortesia de Neel Shearer; FIG 4.10: cortesia de NASA/Chandra X-Ray Center/Smithsonian Astrophysical Observatory/H. Marshall et al.; FIG 4.11: cortesia de STScI/NASA; FIG 4.15: cortesia de STScI/NASA; FIG 5.12: cortesia de Neel Shearer; FIG 6.4: de *The Blind Watchmaker*, de Richard Dawkins, Nova York: W.W. Norton & Company, 1986; FIG 6.7: Hubble Deep Field cortesia de R. Williams, STScI/NASA;

Todas as ilustrações originais não creditadas acima foram criadas para este livro por Malcolm Godwin, da Moonrunner Design Ltd., UK.

Sobre o autor



STEPHEN HAWKING foi por trinta anos professor lucasiano da Universidade de Cambridge — uma das mais prestigiosas cátedras de matemática do mundo, já ocupada por Isaac Newton — e é considerado um dos físicos mais importantes da história. Recebeu inúmeros prêmios e honrarias, incluindo, mais recentemente, a Medalha Presidencial da Liberdade, a maior condecoração civil dos Estados Unidos. Além de *O universo numa casca de noz*, seus livros para o público geral incluem a autobiografia *Minha breve história* e os clássicos *Uma breve história do tempo, Uma nova história do tempo, O grande projeto* e *Buracos negros, universos-bebês.*

Conheça outros títulos do autor



Minha breve história



Uma breve história do tempo

Leia também



O colapso de tudo
John Casti



Por que o mundo existe?
Jim Holt



A busca
Daniel Yergin