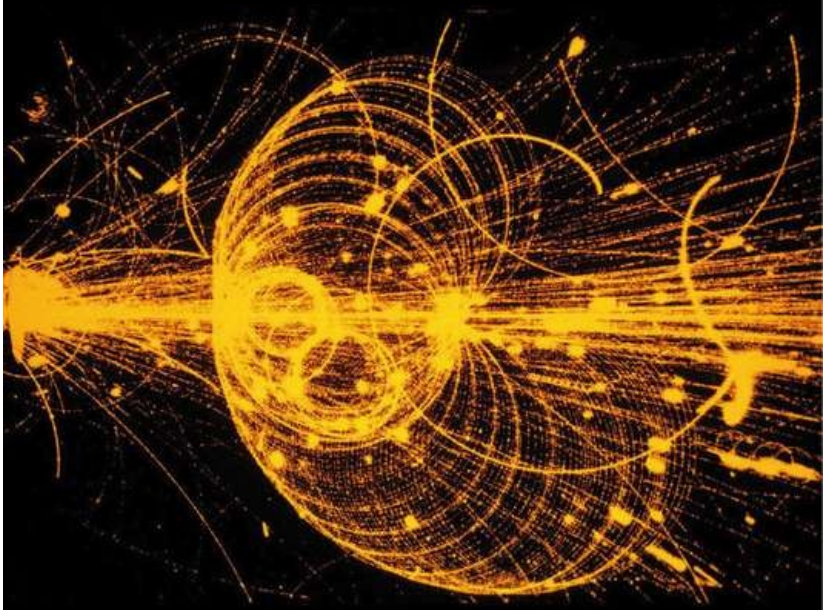
Lisa Randall

Universos ocultos

Un viaje a las dimensiones extras del cosmos



El universo tiene sus secretos. Podría incluso ocultar dimensiones extras, diferentes de todo lo imaginado hasta ahora. Conocemos mucho más sobre el mundo que hace unos pocos años, y sin embargo estamos menos seguros que nunca de cuál es la auténtica naturaleza del universo. ¿Habremos alcanzado un punto tan avanzado en los descubrimientos científicos que las leyes de la física tal como las conocemos sencillamente no son suficientes? ¿Tendremos que aceptar explicaciones que hasta ahora se habían quedado en el reino de la ciencia ficción?

Universos ocultos proporciona una estimulante visión de conjunto que sigue la pista a los descubrimientos de la física desde principios del siglo XX hasta el filo de la física de partículas y la teoría de cuerdas de hoy, destejiendo los actuales debates sobre relatividad, mecánica cuántica y gravedad. Lisa Randall ilumina con un estilo diáfano la ciencia y desenreda con seducción los misterios de las miríadas de mundos que pueden existir justo al lado del que solamente ahora estamos empezando a conocer.



Lisa Randall

Universos ocultos

Un viaje a las dimensiones extras del cosmos

ePub r1.2

Titivillus 08.11.2017

Título original: *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*

Lisa Randall, 2005

Traducción: Eugenio Jesús Gómez Ayala

Editor digital: Titivillus

Primer editor digital: koothrapali

Corrección de erratas: Mozartillo, el nota

ePub base r1.2



PRÓLOGO Y AGRADECIMIENTOS

Cuando era niña, me gustaban mucho los juegos intelectuales y de entretenimiento que aparecían en los problemas matemáticos o en libros como *Alicia en el país de las maravillas* . Pero, aunque leer era una de mis aficiones favoritas, los libros sobre ciencia solían parecerme más remotos o menos incitantes: nunca me sentí suficientemente involucrada o desafiada por ellos. El tono parecía siempre un tanto condescendiente con los lectores, demasiado laudatorio con los científicos, o aburrido. Me daba la impresión de que los autores más bien envolvían de misterio los resultados o que glorificaban a los hombres que los descubrieron, en vez de describir la ciencia tal como es, así como el proceso mediante el cual los científicos realizaron sus conexiones. Y era ésta, precisamente, la parte que de verdad me interesaba conocer.

Con el paulatino aprendizaje de la ciencia, ésta llegó a gustarme. No siempre fui consciente de que con el tiempo me convertiría en física y de que algún día pensaría así; ninguna de las personas que conocía cuando era joven estudió ciencias. Pero ocuparse de lo desconocido tiene un atractivo irresistible. Me pareció fascinante encontrar conexiones entre fenómenos aparentemente dispares y resolver problemas y predecir propiedades sorprendentes de nuestro mundo. Como física, ahora comprendo que la ciencia es un ente vivo que continúa evolucionando. Y a la ciencia la hacen interesante no sólo las respuestas que da, sino también los juegos y los enigmas, así como la participación que promueve.

Cuando decidí embarcarme en este proyecto, planeaba escribir un libro que me hiciera compartir con el lector la atracción que siento por mi trabajo, sin comprometer por ello la calidad de la presentación de la ciencia. Esperaba conseguir transmitir mi fascinación por la física teórica sin simplificar el asunto de un modo decepcionante y sin presentarlo como una colección de monumentos acabados e inmutables a los que hay que admirar pasivamente. La física es mucho más creativa y divertida de lo que la gente suele reconocer. Quería compartir estos aspectos de la física con las personas que no hubieran llegado necesariamente a esta conclusión por sus propios medios.

Hay una nueva visión del mundo que nos reclama imperativamente. Las dimensiones extras han cambiado a los físicos su modo de pensar sobre el universo. Las conexiones de las dimensiones extras con el mundo podrían chocar con muchas ideas mejor establecidas de la física, y por ello dichas dimensiones son un buen medio para abordar por caminos nuevos e intrigantes hechos más antiguos y ya verificados sobre el universo.

Algunas de las ideas que he incluido en el libro son abstractas y especulativas, pero no hay ninguna razón para que no resulten comprensibles para cualquier persona curiosa. Decidí dejar que la fascinación de la física teórica hablase por sí sola y opté por no enfatizar demasiado la historia o las

personalidades que la pueblan. No quería transmitir la impresión equivocada de que todos los físicos están modelados según un único arquetipo o de que solamente un tipo particular de persona podría interesarse por la física. Basándome en mi experiencia y en las conversaciones que he mantenido, estoy segura de que son muchos los lectores inteligentes que sienten interés por el tema y que, con la mente abierta, desean saber cómo son, de verdad, las cosas.

En el libro no se escatiman las ideas teóricas más avanzadas e intrigantes, pero en la medida de lo posible he intentado hacerlo autosuficiente. He incluido en él tanto los avances conceptuales claves como los fenómenos físicos a los que éstos se aplican. Los capítulos se han organizado de modo que los lectores puedan adaptar el libro a sus intereses y conocimientos previos. Para facilitar este proceso, he realizado listas con los puntos a los que me referiré más tarde al presentar ideas más recientes sobre las dimensiones extras. Asimismo, me he valido de listas al final de los capítulos sobre las dimensiones extras para aclarar qué distingue a cada una de las posibles opciones para los universos extradimensionales.

Como probablemente la idea de las dimensiones extras sea nueva para muchos lectores, en los primeros capítulos he explicado lo que quiero decir cuando uso estas palabras y por qué las dimensiones extras pueden existir pero ser invisibles e intangibles. Al fin y al cabo, si he delineado los métodos teóricos con los que los físicos de partículas abordan su trabajo, ha sido con el fin de aclarar el tipo de razonamiento que está presente en estas investigaciones, que todos consideran sumamente especulativas.

Los trabajos recientes sobre las dimensiones extras dependen, para motivar las cuestiones a las que responden y sus métodos, de conceptos de la física teórica tanto tradicionales como modernos. Con el fin de explicar qué es lo que motiva tales investigaciones, he incluido un extenso análisis de la física del siglo XX. Quien quiera saltarse esta parte es muy libre de hacerlo, pero ¡se perderá cosas muy buenas!

Este análisis comienza con la relatividad general y la mecánica cuántica para pasar después a la física de partículas y a los conceptos más importantes que los físicos de partículas emplean hoy día. He presentado algunas ideas muy abstractas que suelen dejarse de lado (a causa, en parte, de lo abstractas que son), pero estos conceptos están ahora confirmados por los experimentos y forman parte de todas las investigaciones que hacemos en la actualidad. Aunque no todo este material es esencial para entender las ideas que veremos más tarde sobre las dimensiones extras, considero que a muchos lectores les agradará disponer de una visión más completa.

A continuación he descrito algunas nociones más recientes y especulativas, estudiadas en los últimos treinta años: la supersimetría y la teoría de cuerdas. Tradicionalmente, la física ha requerido una interacción entre teoría y experimento. La supersimetría es una extensión de los conceptos conocidos de la física de partículas y son muchas las probabilidades de que se la verifique en próximos experimentos. El caso de la teoría de cuerdas es diferente. Se basa únicamente en ideas y cuestiones teóricas y ni siquiera ha sido formulada matemáticamente por entero, así que todavía no podemos

estar seguros de sus predicciones. En lo que a mí respecta, soy agnóstica en este asunto: no sé cómo quedará la teoría de cuerdas en última instancia, ni si resolverá las cuestiones de mecánica cuántica que pretende abordar. Pero la teoría de cuerdas ha sido una rica fuente de ideas nuevas, algunas de las cuales yo misma he explotado en mis investigaciones sobre las dimensiones extras del espacio. Estas ideas existen independientemente de la teoría de cuerdas, pero la teoría de cuerdas nos da una buena razón para pensar que algunas de sus suposiciones subyacentes podrían ser ciertas.

Una vez establecido el contexto, volveré finalmente a los múltiples y fascinantes nuevos desarrollos de las dimensiones extras. Éstos nos dicen cosas notables, como que las dimensiones extras pueden ser de tamaño infinito y, sin embargo, permanecer invisibles, o que quizá vivamos en una sima tridimensional dentro de un universo de dimensión superior. Asimismo, hay razones para pensar que pueden existir mundos paralelos nunca vistos, con propiedades muy diferentes de las que posee el nuestro.

A lo largo del texto he explicado los conceptos físicos sin usar ecuaciones. Pero he incluido un apéndice matemático para aquellos que tengan interés en los detalles matemáticos. En el propio texto he tratado de ampliar el abanico de las metáforas que se utilizan para explicar conceptos científicos. Buena parte del vocabulario descriptivo que todos usamos proviene de analogías espaciales, pero éstas suelen fallar en el diminuto reino de las partículas elementales y en el espacio con dimensiones extras, tan difícil de retratar. Me pareció que algunas metáforas menos convencionales, sacadas incluso del mundo del arte, de la gastronomía y de las relaciones personales, podrían funcionar igual de bien a la hora de explicar ideas abstractas.

A fin de efectuar la transición a las ideas nuevas comprendidas en cada uno de los capítulos, éstos comienzan con una breve historia en la que se aísla un concepto clave, usando un contexto y unas metáforas más familiares. Me lo he pasado muy bien con estas historias, así que, si el lector quiere, puede volver atrás después de haber leído el capítulo, para ver si capta las alusiones. Podríamos pensar que las historias forman una narración bidimensional, que van «hacia abajo» en cada capítulo y «horizontalmente» a lo largo del libro. O se las podría considerar como una especie de divertido repaso que le permite a uno estimar cuándo ha asimilado bien las ideas contenidas en el capítulo.

Muchos amigos y colegas me ayudaron a cumplir los objetivos que me planteé con este libro. Aunque a menudo sabía lo que buscaba, no siempre sabía si había acertado o no. Son varias las personas con las que estoy en deuda por la generosidad con la que me dedicaron su tiempo, por los ánimos que me infundieron y por la fascinación y curiosidad por las ideas que describo.

Algunos amigos brillantes merecen un agradecimiento especial por sus valiosos comentarios sobre el manuscrito, en sus diversas etapas. Anna Christina Büchmann, una escritora maravillosa, me hizo preciosos comentarios detallados que me ayudaron a aprender a completar las historias que contaba, del mundo de la física y del mundo en general. Me brindó también inestimables consejos para escribir bien, sazonados siempre con frases de aliento. Polly Shulman, otra amiga llena de talento, leyó y comentó atentamente cada capítulo. Admiro su mente lógica y chispeante, y he tenido

mucha suerte al disponer de su ayuda. Luboš Motl, un físico brillante y un comunicador científico entregado a su tarea (cuyas especiosas ideas sobre las mujeres que se dedican a la ciencia pasaremos aquí por alto), lo leyó todo, antes incluso de que fuera legible, y me dio consejos extraordinariamente útiles y ánimos en todas las etapas de la confección del libro. Tom Lewenson me ofreció la importante asesoría que solamente un experimentado escritor de temas científicos como él podría proporcionar y contribuyó con algunas sugerencias de un peso crucial. Michael Gordin aportó la perspectiva del historiador de la ciencia y del conocedor experto de este tipo de literatura. Jamie Robins hizo penetrantes comentarios sobre varias versiones del manuscrito. Esther Chiao me ofreció útiles comentarios sobre el manuscrito, así como la perspectiva, en extremo provechosa, de una lectora inteligente y motivada, con una formación ajena a las ciencias. Y me gustó mucho que Cormack McCarthy aportase su valioso impulso y sus provechosas sugerencias en las etapas finales de la redacción del libro.

Otras personas me proporcionaron historias y observaciones interesantes que me ayudaron en las primeras etapas de este proyecto. Massimo Porrati es una auténtica mina de hechos fascinantes, algunos de los cuales aparecen aquí. Los puntos de vista de Gerald Holton sobre la física de principios del siglo XX enriquecieron mis ideas sobre la mecánica cuántica y la relatividad. Jochen Brocks me dio fructíferas opiniones sobre lo que le gustaba en la literatura sobre ciencia y estimuló algunas ideas útiles para la escritura. Las conversaciones que mantuve con Chris Haskett y Andy Singleton me ayudaron a comprender qué es lo que pueden desear aprender quienes no son físicos. Albion Lawrence hizo contribuciones valiosas que me ayudaron a resolver ciertos capítulos difíciles. Y John Swain me proporcionó un par de elegantes maneras de presentar el material.

Numerosos colegas me hicieron comentarios y sugerencias estimables. Entre otros muchos a los que estoy agradecida, Bob Cahn, Csaba y Zsusanna Csaki, Paolo Creminelli, Joshua Erlich, Ami Katz y Neil Weiner leyeron todos partes sustanciales del libro y aportaron comentarios pertinentes. Doy también las gracias a Allan Adams, Nima Arkani-Hamed, Martin Gremm, Jonathan Flynn, Melissa Franklin, David Kaplan, Andreas Karch, Joe Lykken, Peter Lu, Ann Nelson, Amanda Peet, Riccardo Rattazzi, Dan Shrag, Lee Smolin y Darien Wood; todos ellos me ofrecieron consejos y comentarios útiles. Howard Georgi nos asesoró, a mí y a muchos de los físicos mencionados más arriba, sobre el punto de vista de la teoría efectiva que se abraza en este libro. Mi agradecimiento también para Peter Bohacek, Wendy Chun, Paul Graham, Victoria Gray, Paul Moorhouse, Curt McMullen, Liam Murphy, Jeff Mrugan, Sesha Pretap, Dana Randall, Enrique Rodríguez y Judith Surkis, que aportaron críticas, sugerencias y frases de ánimo muy provechosas. Gracias asimismo a Marjorie Caron, Tony Caron, Barry Ezarsky, Josh Feldman, Marsha Rosenberg y otros miembros de la familia por ayudarme a entender mejor a mi público.

Greg Elliott y Jonathan Flynn realizaron los bonitos dibujos que ilustran este libro, y les estoy sumamente agradecida por su importante contribución. Agradezco a Rob Meyer y a Laura Van Wyck el haberme ayudado a conseguir los permisos para las abundantes citas que aparecen en el libro. He hecho todo el esfuerzo posible para reconocer debidamente mis fuentes. Si alguien

piensa que no ha sido debidamente reconocido, le ruego que, por favor, me lo haga saber.

Deseo también expresar mi agradecimiento a los colaboradores de mi labor investigadora, que describo en este libro, especialmente a Raman Sundrum y a Andreas Karch, con quienes fue fabuloso trabajar. Y me gustaría reconocer las contribuciones de los numerosos físicos que han reflexionado sobre estas ideas y otras semejantes, incluidas aquellas que no he discutido aquí por falta de espacio.

Querría también expresar mi aprecio hacia mi editor de Ecco Press, Dan Halpern, mis editores de Penguin, Stefan McGrath y Will Goodlad, y mis correctores de estilo en Estados Unidos e Inglaterra, Lyman Lyons y John Woodruff, por sus muchas sugerencias provechosas y por su apoyo en la preparación de este libro. Y deseo dar las gracias a mi agente literario, John Brockman, y también a Katinka Matson, por sus importantes comentarios y consejos, y por su inestimable ayuda en el lanzamiento del libro. Estoy también agradecida a la Universidad de Harvard y al Instituto Radcliffe de Estudios Avanzados por concederme tiempo para concentrarme en este libro, y al MIT, a Princeton, a Harvard, a la Fundación Nacional por la Ciencia, al Departamento de Energía y a la Fundación Alfred P. Sloan por subvencionar mi labor investigadora.

Quiero, finalmente, dar las gracias a mi familia: a mis padres, Richard y Gladys, y a mis hermanas, Barbara y Dana, por respaldar mi carrera científica, por compartir conmigo su buen humor y sus comentarios y por haberme animado todos estos años. Lynn Festa, Beth Lyman, Gene Lyman y Jen Sacks me apoyaron sobremanera y les doy las gracias a todos ellos por sus maravillosos consejos y sugerencias a lo largo del camino. Y, para terminar, estoy enormemente agradecida a Stuart Hall por su penetrante perspectiva, sus provechosos comentarios y su desinteresado apoyo.

Os doy las gracias a todos y espero que penséis que vuestras contribuciones han merecido la pena.

LISA RANDALL

Cambridge, Massachusetts

Abril de 2005

INTRODUCCIÓN

Got to be good looking

Cause he’s so hard to see.

[Tiene que ser guapo | porque es muy difícil de ver].

THE BEATLES

El universo tiene sus secretos. Las dimensiones extras del espacio podrían ser uno de ellos. Si es así, el universo ha estado ocultando esas dimensiones, protegiéndolas, guardándolas tímidamente entre envoltorios. Al echar una ojeada descuidada, uno no hubiera sospechado nunca tal cosa.

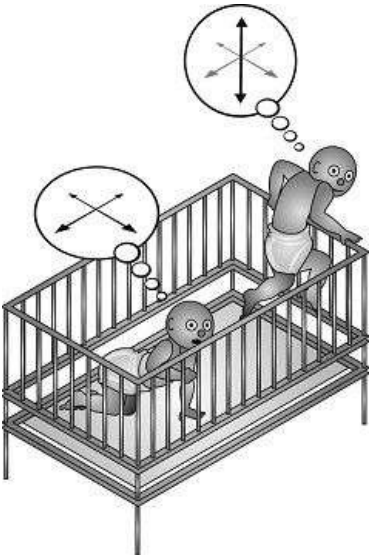


FIGURA 1. El mundo tridimensional del bebé.

La campaña de desinformación empezó en la cuna, que fue la que nos presentó por primera vez las tres dimensiones espaciales. Éstas eran las dos dimensiones en las que gateábamos, más la restante en cuya dirección trepábamos. Desde entonces, las leyes físicas —por no hablar del sentido común— han reforzado la creencia en la existencia de tres dimensiones, sofocando cualquier sospecha de que pudiera haber más.

Pero el espacio-tiempo podría ser drásticamente diferente de todo lo que hemos imaginado hasta ahora. No conocemos ninguna teoría física que dicte que deba haber sólo tres dimensiones espaciales. Descartar la posibilidad de las dimensiones extras antes de considerar siquiera su existencia podría ser

muy prematuro. Igual que «arriba-abajo» es una dirección diferente de la dirección «izquierda-derecha» o «adelante-atrás», podrían existir otras direcciones completamente nuevas en nuestro cosmos. Aunque no podamos verlas con los ojos o tocarlas con los dedos, las dimensiones adicionales del espacio constituyen una posibilidad lógica.

Dichas dimensiones hipotéticas nunca vistas carecen todavía de nombre. Pero en el caso de que existieran, serían direcciones nuevas a lo largo de las cuales se podría viajar. Por eso, algunas veces, cuando necesite poner un nombre a una dimensión extra, la llamaré *pasillo* . Y cuando discuta explícitamente las dimensiones extras, en el título del capítulo aparecerá la palabra *pasillo* .

Estos pasillos podrían ser planos, como las dimensiones a las que estamos acostumbrados. O podrían ser arqueados, como las reflexiones en una barraca de espejos deformantes. Podrían ser diminutos, mucho más pequeños que un átomo; hasta hace poco, esto es lo que suponían todos los que creían en las dimensiones extras. Pero nuevos trabajos han mostrado que las dimensiones extras podrían ser también grandes, incluso de tamaño infinito, y, sin embargo, muy difíciles de ver. Nuestros sentidos registran sólo tres dimensiones grandes, de modo que una dimensión extra infinita podría resultar increíble. Pero la existencia de una dimensión infinita invisible es una de las muchas posibilidades raras de lo que podría existir en el cosmos, y en este libro veremos por qué.

Las investigaciones sobre las dimensiones extras han conducido también a otros conceptos notables —conceptos que bien podrían colmar la fantasía de un adicto a la ciencia ficción—, como los universos paralelos, la geometría arqueada y las simas tridimensionales. Me temo que estas ideas puedan sonar más propias de los parajes de los novelistas y de los lunáticos que del objeto de estudio de la auténtica pesquisa científica. Pero a pesar de lo descabellados que puedan parecer en estos momentos, se trata de contextos científicos genuinos que podrían surgir en un mundo extradimensional. (No hay que preocuparse si a uno no le resultan familiares todavía estas palabras o estas ideas, ya que más tarde las presentaremos y las investigaremos).

¿Por qué pensar en dimensiones nunca vistas?

Aunque la física con dimensiones extras permita concebir estos panoramas intrigantes, podría seguir asombrándonos que los físicos, cuya misión es hacer predicciones sobre los fenómenos observables, se preocupen de tomárselos en serio. La respuesta es tan radical como la idea misma de dimensión extra. Algunos avances recientes sugieren que las dimensiones extras, no detectadas y no comprendidas del todo aún, podrían sin embargo resolver algunos de los misterios más básicos de nuestro universo. Las dimensiones extras podrían tener implicaciones en el mundo que vemos, y las ideas sobre ellas podrían revelar en última instancia conexiones que no percibimos en el espacio tridimensional.

No podríamos comprender por qué los esquimales y los chinos comparten rasgos físicos si dejáramos de tener en cuenta la dimensión temporal que nos permite reconocer sus antepasados comunes. De igual modo, las conexiones que pueden darse con dimensiones adicionales del espacio podrían iluminar

aspectos desconcertantes de la física de partículas, arrojando luz sobre misterios que llevan décadas sin resolverse. Relaciones entre las propiedades y las fuerzas de las partículas que parecían inexplicables cuando el espacio estaba encadenado a tres dimensiones parecen encajar de un modo elegante en un mundo con más dimensiones espaciales.

¿Creo yo en las dimensiones extras? Confieso que sí. En el pasado, he mirado siempre las especulaciones que se hacen en física yendo más allá de lo que se está midiendo —incluidas mis propias ideas— con fascinación pero también con cierto grado de escepticismo. Me gusta pensar que esto me mantiene interesada, pero cabal. A veces, sin embargo, parece que una idea contiene sin duda un germen de verdad. Un día, hace unos cinco años, yendo a trabajar, al cruzar el puente sobre el río Charles por el que se llega a Cambridge, me di cuenta de repente de que creía verdaderamente que han de existir algunas formas de dimensiones extras. Miré a mi alrededor y contemplé las múltiples dimensiones que no podía ver. Experimenté la misma conmoción de sorpresa ante mi nueva visión del mundo que el día en el que yo, nacida en Nueva York, me vi animando a los Red Sox de Boston durante un partido de desempate contra los Yankees, algo que en la vida hubiera previsto que iba a hacer alguna vez.

Una mayor familiaridad con las dimensiones extras ha hecho que aumente incluso mi convicción de su existencia. Los argumentos en contra de ésta tienen demasiadas grietas como para que resulten fiables y las teorías físicas sin dimensiones extras dejan muchas cuestiones sin contestar. Es más, al explorar las dimensiones extras durante estos últimos años, hemos ampliado el abanico de posibles universos multidimensionales que pueden remedar el nuestro, lo cual insinúa que sólo hemos identificado la punta del iceberg. Incluso en el caso de que las dimensiones extras no se ajusten precisamente al panorama que voy a presentar, pienso que es muy probable que estén ahí, de una u otra forma, y que sus implicaciones serán seguramente sorprendentes y admirables.

Seguro que nos sorprende descubrir que podría haber un vestigio de las dimensiones extras escondido en nuestra despensa: en la sartén antiadherente que está revestida con *cuasicristales* . Los cuasicristales son estructuras fascinantes cuyo orden subyacente sale a la luz sólo con las dimensiones extras. Un cristal es un retículo muy simétrico de átomos y moléculas con un elemento básico que se repite muchas veces. Sabemos qué estructuras pueden formar los cristales en tres dimensiones y cuáles son los patrones posibles. Sin embargo, la disposición de los átomos y de las moléculas en los cuasicristales no se ajusta a ninguno de estos patrones.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de patrón cuasicristalino. Carece de la regularidad precisa que veríamos en un auténtico cristal, que se parecería más a la de un tipo de rejilla propia de un papel cuadriculado. La manera más elegante de explicar la disposición de moléculas en estos extraños materiales consiste en recurrir a una proyección —una especie de sombra tridimensional — de una estructura cristalina de dimensión superior, que revela la simetría de la estructura en un espacio de dimensión superior. Lo que parecía un patrón completamente inexplicable en tres dimensiones refleja una estructura ordenada en un mundo de dimensión superior. Las sartenes antiadherentes

revestidas de cuasicristales explotan las diferencias estructurales entre las proyecciones de los cristales multidimensionales en el revestimiento de la sartén y la estructura más mundana de la comida ordinaria tridimensional. Las diferentes disposiciones de los átomos, que les impiden pegarse unos a otros, son una insinuación seductora de que las dimensiones extras existen y explican algunos fenómenos físicos observables.

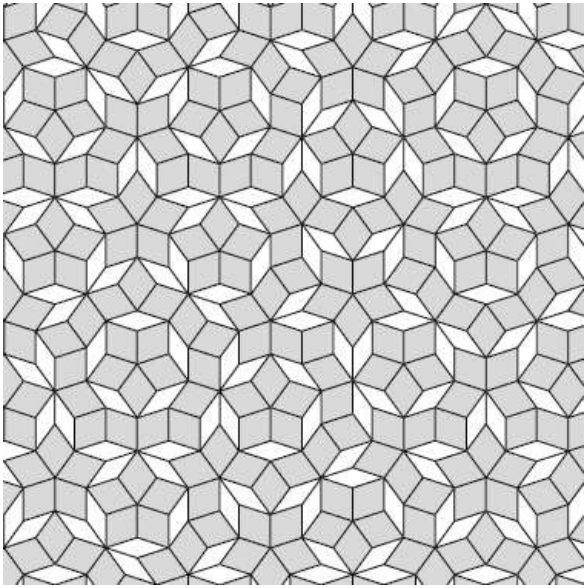


FIGURA 2. He aquí un «mosaico de Penrose». Es una proyección en dos dimensiones de una estructura cristalina de cinco dimensiones.

Una visión de conjunto

Así como las dimensiones extras nos ayudan a entender la disposición confusa de las moléculas de un cuasicristal, los físicos especulan hoy sobre la posibilidad de que las teorías de las dimensiones extras iluminen también algunas conexiones en la física de partículas y en cosmología, conexiones que son difíciles de comprender con sólo tres dimensiones.

Durante treinta años, los físicos han confiado en una teoría llamada el modelo estándar de la física de partículas, que nos habla de la naturaleza fundamental de la materia y de las fuerzas por medio de las cuales interactúan sus constituyentes elementales[1] . Los físicos han puesto a prueba el modelo estándar creando partículas que no han vuelto a estar presentes en nuestro mundo desde los primeros instantes del universo, y han visto que el modelo estándar describe sumamente bien muchas de sus propiedades. Aun así, el modelo estándar deja algunas cuestiones fundamentales sin contestar, cuestiones tan básicas que su solución promete nuevas ideas penetrantes sobre los ladrillos constitutivos de nuestro mundo y sobre sus interacciones.

Este libro habla de cómo yo misma y otros investigadores nos pusimos a

buscar respuestas a los enigmas del modelo estándar y nos encontramos sumidos en mundos extradimensionales. Los nuevos desarrollos de las dimensiones extras acabarán por acaparar el centro del escenario, pero presentaré primero a los actores secundarios: los avances revolucionarios de la física del siglo XX. Las ideas recientes que discutiré más tarde se basan en estos formidables progresos.

Los temas que encontraremos en este examen se reparten, en términos generales, en tres categorías: física de principios del siglo XX, física de partículas y teoría de cuerdas. Investigaremos las ideas clave de la relatividad y de la mecánica cuántica, así como el estado actual de la física de partículas y los problemas que las dimensiones extras podrían abordar. También consideraremos los conceptos que yacen bajo la teoría de cuerdas, que muchos físicos piensan que es la primera pretendiente a la hora de encarnar una teoría que incorpore tanto la mecánica cuántica como la gravedad. La teoría de cuerdas, que postula que las unidades más básicas de la naturaleza no son partículas, sino cuerdas oscilantes fundamentales, ha proporcionado gran parte del estímulo que empujó al estudio de las dimensiones extras, ya que requiere más de tres dimensiones espaciales. Y describiré también el papel de las branas, objetos semejantes a membranas que aparecen en la teoría de cuerdas y que son tan esenciales en esta teoría como las cuerdas mismas. Consideraremos tanto los éxitos de estas teorías como las cuestiones que dejan abiertas, que son las que motivan las investigaciones en curso.

Uno de los principales misterios es por qué la gravedad es tan débil en relación con las otras fuerzas conocidas. La gravedad puede que no parezca débil cuando estamos subiendo una montaña, pero eso es porque la Tierra entera está tirando de nosotros. Un pequeño imán puede levantar un sujetapapeles aunque toda la masa de la Tierra esté tirando de él en la dirección opuesta. ¿Por qué está la gravedad tan indefensa ante el pequeño tirón de un imán diminuto? En la física de partículas tridimensional convencional, la debilidad de la gravedad es un gran enigma. Pero las dimensiones extras podrían dar una respuesta a este enigma. En 1998, Raman Sundrum, mi colaborador, y yo presentamos una razón por la que podría ocurrir esto.

Nuestra propuesta se basa en la geometría arqueada, una noción que surge en la teoría de la relatividad general de Einstein. Según esta teoría, el espacio y el tiempo se integran en una estructura única de espacio-tiempo que es distorsionada o arqueada por la materia y la energía. Raman y yo aplicamos esta teoría en un contexto extradimensional nuevo. Descubrimos una configuración en la que el espacio-tiempo se comba de un modo tan intenso que, aunque la gravedad sea fuerte en una región del espacio, es sin embargo débil en todas las demás.

Y encontramos también algo todavía más notable. Aunque los físicos han supuesto durante ochenta años que las dimensiones extras han de ser diminutas para explicar por qué no las hemos visto, en 1999 Raman y yo descubrimos que el espacio arqueado no sólo puede explicar la debilidad de la gravedad, sino también que una dimensión extra invisible puede extenderse hasta el infinito, siempre y cuando sufra una distorsión adecuada en un espacio-tiempo curvado. Una dimensión extra puede ser infinita en cuanto a

tamaño y, sin embargo, permanecer oculta. (No todos los físicos aceptaron de inmediato nuestra propuesta. Pero mis amigos que no son físicos se convencieron antes de la posibilidad de que yo hubiese descubierto algo importante, no porque dominasen al dedillo la física, sino porque, en un congreso al que asistí, al dirigirme a la cena oficial después de hablar sobre mi trabajo, descubrí que Stephen Hawking me había reservado un asiento a su lado).

Explicaré los principios físicos que laten bajo estos y otros desarrollos teóricos y las nuevas nociones sobre el espacio que los hacen concebibles. Y más tarde nos encontraremos con una posibilidad todavía más extraña, que el físico Andreas Karch y yo descubrimos un año después: podríamos estar viviendo en una sima tridimensional del espacio, aunque el resto del universo se comporte como si fuera de dimensión superior. Este resultado ofrece multitud de nuevas posibilidades para la estructura del espacio-tiempo, que podría consistir en distintas regiones, y que cada una contuviera aparentemente un número diferente de dimensiones. No sólo no estamos en el centro del universo, como Copérnico sugirió hace quinientos años, conmocionando al mundo, sino que bien podríamos estar viviendo en un suburbio aislado con tres dimensiones espaciales y que forma parte de un cosmos de dimensión superior.

Los objetos semejantes a membranas que llamamos branas y que han sido estudiados recientemente son componentes importantes de los ricos paisajes de dimensión superior. Si las dimensiones extras son el patio donde juegan los físicos, los *mundos brana* —universos hipotéticos en los que vivimos en una brana— son como esos seductores entramados, con múltiples niveles y caras, que suele haber en los parques para que trepen los niños. Este libro llevará al lector a los mundos brana y a universos con dimensiones enrolladas, arqueadas, extensas e infinitas, algunos de los cuales contienen una sola brana y otros múltiples branas que albergan mundos nunca vistos. Todos ellos están en el reino de lo posible.

La fascinación de lo desconocido

Los hipotéticos mundos brana constituyen un acto de fe teórico y las ideas que contienen son especulativas. Sin embargo, tal como sucede en el mercado financiero, las opciones más arriesgadas pueden fallar, pero también pueden recompensarnos con mayores beneficios.

Imaginemos la visión de la nieve desde el asiento del telesilla el primer día de sol después de una tormenta, con la impoluta nieve en polvo tentándonos desde allá abajo. Sabemos que, pase lo que pase, una vez que nos posemos sobre la nieve, comenzará un gran día. Algunas rutas serán escarpadas y estarán llenas de baches, otras serán deliciosos cruceros y las habrá que constituirán sendas tortuosas entre árboles. Pero, aunque a veces tomemos el camino equivocado, la mayor parte del día resultará gratamente provechosa.

Para mí, la construcción de modelos —que así es como los físicos llaman a la búsqueda de teorías que podrían servir de base a las observaciones en curso — tiene este mismo atractivo irresistible. La construcción de modelos es un viaje de aventuras por los conceptos y las ideas. A veces las ideas nuevas son

obvias y otras veces son difíciles de encontrar y de gestionar. Sin embargo, incluso cuando no sabemos hacia dónde apuntan, los nuevos modelos interesantes suelen explorar un delicioso territorio virgen.

No sabremos inmediatamente cuáles de las teorías dan cuenta correcta de nuestro lugar en el universo. En lo que respecta a algunas de ellas, a lo mejor nunca lo sabremos. Pero, increíblemente, éste no es el caso de ninguna de las teorías de dimensiones extras. El rasgo más atractivo de cualquiera de las teorías de dimensiones extras es que, si ésta es correcta, pronto lo sabremos. En los próximos cinco años, los experimentos que estudian las partículas de alta energía podrían descubrir pistas que apoyen estas propuestas y las dimensiones extras que contienen, tan pronto como esté terminado y funcionando el Gran Acelerador de Hadrones (LHC, según sus siglas en inglés), un gran acelerador de partículas de alta energía que hay cerca de Ginebra.

Este acelerador, que empezará a funcionar en 2007, va a hacer que, con una tremenda energía, choquen entre sí partículas, que podrían así convertirse en nuevos tipos de materia que no hemos visto nunca antes. Si alguna de estas teorías extradimensionales es correcta, podría dejar signos visibles en el LHC. Las pistas podrían incluir unas partículas que se llaman *modos de Kaluza-Klein* , que viajan en las dimensiones extras pero que dejan trazas de su existencia aquí, en las tres dimensiones familiares. Los modos de Kaluza-Klein serían huellas dactilares de las dimensiones extras en nuestro mundo tridimensional. Y si hay mucha suerte, los experimentos registrarán además otras pistas, quizá incluso agujeros negros de dimensión superior.

Los detectores que registrarán estos objetos serán enormes e impresionantes, hasta el extremo de que para trabajar en ellos se requieren equipos de escalador, como arneses y cascos. De hecho, yo hice uso de estos equipos una vez que fui a caminar por un glaciar que hay en Suiza, cerca del Organismo Europeo para la Investigación de Partículas (CERN, según sus siglas en inglés), el centro de física que albergará el LHC. Estos enormes detectores registrarán las propiedades de las partículas que los físicos usarán para reconstruir lo que pasó por allí.

Hay que reconocer que las pistas de las dimensiones extras serán algo indirectas, y que tendremos que recomponer diversas claves. Pero esto es así en casi todos los descubrimientos recientes de la física. Según la evolución de la física en el siglo XX, ésta pasó de cosas que pueden observarse directamente a simple vista a cosas que sólo pueden «verse» con mediciones asociadas a una serie de elaboraciones teóricas lógicas. Por ejemplo, los quarks, los componentes del protón y del neutrón que nos son familiares por la física del colegio, nunca aparecen aislados; los encontramos al seguir el reguero de pistas que dejan tras de sí al alterar otras partículas. Pasa lo mismo con esos tipos intrigantes de materia que se llaman energía oscura y materia oscura. No sabemos de dónde viene la mayor parte de la energía del universo, ni cuál es la naturaleza de la mayor parte de la materia que éste contiene. Sin embargo, sabemos que la materia oscura y la energía oscura existen en el universo, no porque las hayamos detectado directamente, sino porque tienen efectos detectables en la materia que las rodea. Como los quarks, la materia oscura o la energía oscura, cuya existencia comprobamos

sólo indirectamente, las dimensiones extras no aparecerán directamente ante nosotros. En todo caso, las firmas de las dimensiones extras, aunque sean indirectas, podrían revelar en definitiva su existencia.

Digamos desde el principio que obviamente no todas las ideas nuevas se acaban confirmando y que muchos físicos son escépticos a la hora de evaluar las teorías nuevas. Las teorías que presento aquí no son la excepción de esta regla. Pero la especulación es el único camino para progresar en nuestra comprensión. Aunque resulte que los detalles no coincidan todos con la realidad, una idea teórica nueva puede, sin embargo, iluminar los principios físicos que operan en la auténtica teoría del cosmos. Estoy segura de que las ideas sobre las dimensiones extras que encontraremos en este libro contienen más de un germen de verdad.

Al ocuparme de lo desconocido y trabajar con ideas especulativas, encuentro reconfortante recordar que el descubrimiento de estructuras fundamentales ha llegado siempre por sorpresa y que se ha topado con el escepticismo y la resistencia. Y, lo que resulta todavía más raro, no sólo el público en general, sino a veces incluso las mismas personas que han insinuado la existencia de estructuras subyacentes han sido reacias al principio a creer en ellas.

Por ejemplo, James Clerk Maxwell, que desarrolló la teoría clásica de la electricidad y el magnetismo, no creyó en la existencia de una unidad fundamental de carga como el electrón. George Stoney, que propuso a finales del siglo XIX el electrón como unidad fundamental de carga, no creyó que los científicos lograran alguna vez aislar a los electrones de los átomos de los que forman parte. (De hecho, lo único que se necesita para conseguir esto es calor o un campo eléctrico). Dmitri Mendeleiev, el creador de la tabla periódica de los elementos, opuso resistencia a la noción de valencia, que su tabla precisamente codificaba. Max Planck, que propuso que la energía que transportaba la luz era discontinua, no creyó en la realidad de los cuantos de luz que están implícitos en su propia idea. Albert Einstein, que sugirió la existencia de estos cuantos de luz, no supo que sus propiedades mecánicas permitirían que se los identificara como partículas: los fotones, lo que ahora sabemos que son. Sin embargo, no todos los que han tenido ideas nuevas correctas han negado su conexión con la realidad. Muchas ideas, ya se creyera en ellas, ya inspiraran desconfianza, resultaron ser ciertas.

¿Quedan todavía cosas que descubrir? Para contestar esta pregunta recurro a las palabras, inevitablemente caducas, de George Gamow, el destacado físico nuclear y divulgador de la ciencia. En 1945 escribió: «En vez de un número bastante grande de “átomos indivisibles”, ahora tenemos solamente tres entidades esencialmente diferentes: los nucleones, los electrones y los neutrinos [...]. Parece así que hemos tocado techo en nuestra búsqueda de los elementos básicos de los que está formada la materia». Cuando Gamow escribió esto no tenía ni idea de que los nucleones están compuestos de quarks, como se descubrió ¡treinta años después!

¿No sería extraño que resultara que fuésemos nosotros las primeras personas para las que dejara de ser fructífera la búsqueda de más estructuras subyacentes? ¿Tan extraño, de hecho, que resulta apenas creíble? Las inconsistencias que hay en las teorías existentes nos dicen que éstas no

pueden ser la última palabra. Las generaciones pasadas no dispusieron ni de las herramientas ni de las motivaciones de las que disponen los físicos de hoy para explorar los panoramas multidimensionales que este libro describirá. Las dimensiones extras, o lo que sea que yace bajo el modelo estándar de la física de partículas, serían un descubrimiento de la máxima importancia.

En lo que atañe al mundo que nos rodea, ¿hay otra opción que no sea la de explorarlo?

1

PASILLOS DE ENTRADA:

ACLARACIÓN SOBRE LAS DIMENSIONES

You can go your own way.

Go your own way.

[Puedes seguir tu propio camino | Sigue tu propio camino].

FLEETWOOD MAC

—Ike, no estoy muy satisfecha con el relato que estoy escribiendo. Estaba pensando en añadirle más dimensiones. ¿Qué te parece la idea?

—Atenea, tu hermano mayor no sabe casi nada sobre cómo contar bien una historia. Pero me parece que, en todo caso, añadirle más dimensiones no le hará daño. ¿Piensas agregar más personajes o dar un poco más de cuerpo a los que ya tienes?

—Ninguna de las dos cosas; no me refería a eso. Pretendo introducir dimensiones nuevas, como las dimensiones nuevas del espacio.

—Hablas en plan alegórico, ¿no? ¿Vas a escribir sobre realidades alternativas, por ejemplo, sobre sitios donde la gente vive experiencias espirituales alternativas o donde va al morir, o sobre cuando tienen experiencias al borde de la muerte[2] ? Nunca pensé que te fueras a meter en este tipo de asuntos.

—Vamos, Ike, ya sabes que no. Estoy hablando de dimensiones espaciales diferentes, no de planos espirituales diferentes.

—Pero ¿cómo las dimensiones espaciales diferentes van a hacer que cambie algo? ¿Qué diferencia hay entre usar papel de un tamaño o de otro, por ejemplo, holandesas en vez de folios?

—Deja de reírte de mí. Tampoco estoy hablando de eso. Lo que pretendo, en realidad, es introducir dimensiones nuevas, como las dimensiones que vemos, pero en direcciones completamente nuevas.

—¿Dimensiones que no vemos? Creía que sólo había tres dimensiones.

—Déjalo, Ike. Pronto hablaremos de eso.

La palabra *dimensión* , como la mayor parte de los vocablos que describen el espacio o el movimiento a través de él, tiene muchas interpretaciones. Y creo

que, a estas alturas, yo ya las he oído todas. Como vemos las cosas en imágenes espaciales, tendemos a describir muchos conceptos, incluso el tiempo y el pensamiento, en términos espaciales. Esto implica que muchas de las palabras que guardan relación con el espacio tienen múltiples significados. Y cuando empleamos estas palabras con propósitos técnicos, los usos alternativos de las palabras pueden hacer que sus definiciones resulten confusas.

La frase *dimensiones extras* es especialmente desconcertante, ya que incluso cuando aplicamos estas palabras al espacio, ese espacio está más allá de nuestra experiencia sensible. Las cosas que son difíciles de visualizar resultan en general todavía más difíciles de explicar. Sencillamente, no estamos diseñados desde el punto de vista fisiológico para procesar más de tres dimensiones espaciales. La luz, la gravedad y todos los instrumentos que tenemos para hacer observaciones presentan un mundo que parece contener solamente tres dimensiones espaciales.

Como, aunque existan, no percibimos directamente las dimensiones extras, algunas personas temen que, al tratar de captarlas, les dé dolor de cabeza. Por lo menos esto es lo que me dijo un presentador de la BBC en una entrevista. En todo caso, lo que amenaza con ser molesto no es pensar sobre las dimensiones extras, sino tratar de pintarlas. El intento de dibujar un mundo de dimensión superior conlleva inevitablemente complicaciones.

El pensar sobre las dimensiones extras es una cosa completamente distinta. Somos perfectamente capaces de considerar su existencia. Y cuando mis colegas y yo usamos las palabras *dimensiones* y *dimensiones extras* , tenemos en mente ideas muy precisas. Así que antes de dar un paso más o de explorar cómo algunas ideas nuevas se adaptan muy bien a nuestra visión del universo (nótense las expresiones espaciales), explicaré las palabras *dimensiones* y *dimensiones extras* y lo que querré decir con ellas cuando las use más adelante.

Pronto veremos que, cuando hay más de tres dimensiones, las palabras (y las ecuaciones) pueden valer más que mil imágenes.

¿Qué son las dimensiones?

El manejar espacios que tienen muchas dimensiones es, de hecho, algo que todo el mundo hace a diario, aunque es verdad que la mayoría de nosotros no lo interpretamos así. Pero consideremos, por ejemplo, la cantidad de dimensiones que intervienen en los cálculos que hacemos cuando tenemos que tomar una decisión importante, como comprar una casa. Podemos sopesar su tamaño, los colegios que hay cerca, la cercanía a lugares de interés, la arquitectura, el nivel de ruido…, y la lista continúa. Hay que elegir la mejor opción en un contexto multidimensional, enumerando todos los deseos y necesidades.

El número de dimensiones es el número de magnitudes que necesitamos conocer para fijar completamente un punto en un espacio. El espacio multidimensional podría ser abstracto, como el espacio de cualidades que uno busca en una casa, o podría ser concreto, como el espacio físico real que

vamos a considerar dentro de un momento. Pero al comprar una casa, podemos pensar que el número de dimensiones es el número de magnitudes que reflejaríamos en las entradas de una base de datos, es decir, el número de magnitudes que consideramos merecedoras de ser investigadas.

Un ejemplo más frívolo aplica el concepto de dimensiones a las personas. Cuando tildamos a alguien de unidimensional, de hecho, tenemos en mente algo muy concreto: que a esa persona sólo le interesa una cosa. Por ejemplo, podemos describir a Sam, que no hace otra cosa sino ver programas deportivos en la televisión, con un único dato. Si quisiéramos, podríamos representar este dato señalando un punto en una gráfica unidimensional: la afición de Sam a ver programas deportivos, por ejemplo. Al dibujar esta gráfica tendríamos que especificar las unidades para que los demás comprendan qué significa la distancia a lo largo de este único eje. La figura 3 representa una escala en la que Sam está representado con un punto sobre este eje horizontal. Esta escala representa el número de horas que Sam pasa cada semana viendo deportes en la televisión. (Por fortuna, Sam no va a sentirse ofendido con este ejemplo, ya que no está entre los lectores multidimensionales de este libro).

FIGURA 3. La escala unidimensional de Sam.

Exploremos esta noción un poco más. Ícaro Rushmore III (Ike en el diálogo de antes), vecino de Boston, es una personalidad más compleja. De hecho, es tridimensional. Ike tiene veintiún años, conduce coches rápidos y gasta dinero en Wonderland, una ciudad que hay cerca de Boston y que tiene un canódromo. He representado a Ike en la figura 4. Aunque he dibujado la gráfica en la superficie bidimensional de una hoja de papel, los tres ejes nos dicen que Ike es decididamente tridimensional[3] .

FIGURA 4. La gráfica tridimensional de Ike. Las líneas gruesas continuas son los ejes de coordenadas de la gráfica tridimensional. El punto que está etiquetado como «Ike» corresponde a un chico de 21 años que gasta 24 dólares todos los meses en Wonderland y que conduce su deportivo 3,3 veces de media a la semana.

Sin embargo, al describir a la mayor parte de la gente solemos asignarle más de una característica, e incluso más de tres. Atenea, la hermana de Ike, es una niña de once años que lee con avidez, que sobresale en las matemáticas, que está al corriente de todas las noticias y que cuida lechuzas como mascotas. A lo mejor querríamos representar también este caso (aunque no sé muy bien con qué objeto). Entonces Atenea tendría que estar representada como un punto en un espacio de cinco dimensiones, con los ejes correspondientes a la edad, al número de libros leídos por semana, a la nota media sobre cien de los exámenes de matemáticas, al número de minutos dedicados cada día a la lectura del periódico y al número de lechuzas que posee. Sin embargo, tengo problemas para dibujar una gráfica así. Para hacerlo se precisaría un espacio de cinco dimensiones, que es muy difícil de dibujar. Hasta los programas de ordenador tienen solamente gráficas en tres dimensiones.

No obstante, en un sentido abstracto, sí que existe un espacio de dimensión cinco con una colección de cinco números, como (11, 3, 100, 45, 4), que nos dice que Atenea tiene once años, que lee tres libros de media a la semana, que nunca hace mal los problemas de matemáticas, que todos los días se pasa cuarenta y cinco minutos leyendo el periódico y que tiene ahora cuatro lechuzas. Con estos cinco números he descrito a Atenea. El que la conozca podría reconocerla a partir de este punto en cinco dimensiones.

El número de dimensiones de cada una de las personas anteriores era el número de atributos que he usado para identificarlas: uno en el caso de Sam, tres en el de Ike y cinco en el de Atenea. Las personas de carne y hueso resultan, en general, por supuesto, mucho más difíciles de representar con tan pocos datos.

En los capítulos siguientes no vamos a usar la dimensionalidad para explorar a la gente, sino para explorar el espacio mismo. La palabra *espacio* refiere para mí a la región en la que existe la materia y en la que tienen lugar los procesos físicos. *Un espacio de tal o cual dimensión* es un espacio que requiere tal o cual número de magnitudes para determinar un punto. En una dimensión, sería un punto sobre una gráfica con sólo un eje x; en dos dimensiones, un punto sobre una gráfica con un eje x y un eje y; en tres dimensiones, un punto sobre una gráfica con un eje x, un eje y y un eje z [M1] .' [4] Mostramos estos ejes en la figura 5.

FIGURA 5. Los tres ejes de coordenadas que usamos para representar el espacio tridimensional.

En el espacio tridimensional, sólo se necesitan tres números para conocer en cualquier caso nuestra localización precisa. Los números que demos pueden ser la latitud, la longitud y la altitud; o el largo, el ancho y el alto; o podríamos tener otros modos diferentes de escoger esos tres números. El quid de la cuestión es que tres dimensiones implican que se precisan justamente tres números. En el espacio bidimensional se precisan dos números y en el espacio de más dimensiones se precisan más.

Más dimensiones significan más libertad para moverse en un número mayor de direcciones completamente diferentes. Un punto en un espacio de dimensión cuatro requiere simplemente un eje adicional, que resulta de nuevo difícil de dibujar. Pero no debería ser difícil de imaginar su existencia. Vamos a pensar sobre él utilizando las palabras y los términos matemáticos.

La teoría de cuerdas insinúa la existencia de más dimensiones todavía: esta teoría postula seis o siete dimensiones espaciales extras, lo cual significa que se necesitan seis o siete coordenadas adicionales para determinar un punto. Y algunos avances muy recientes de la teoría de cuerdas han mostrado que podría haber incluso más dimensiones todavía. En este libro dejo mi mente abierta y juego con la posibilidad de que exista un número cualquiera de dimensiones extras. Es demasiado pronto para decir cuántas dimensiones contiene de verdad el universo. Muchos de los conceptos sobre las dimensiones extras que describiré en este libro son válidos para cualquier número de dimensiones. En los casos raros en los que esto deja de ser cierto,

procuraré asegurarme de que esta circunstancia quede clara.

Sin embargo, para describir el espacio físico se precisa algo más que la mera identificación de los puntos. Es necesario precisar también una *métrica* que establezca la escala de medida, o sea, la distancia física entre dos puntos. Éste es el papel que desempeñan las marcas señaladas en los ejes de una gráfica. No es suficiente saber que la distancia entre dos puntos es 17, a menos que sepamos también si ese 17 se refiere a 17 centímetros, a 17 kilómetros o a 17 años luz. Se precisa una métrica que nos diga cómo se miden las distancias, o sea, a qué corresponde la distancia entre dos puntos de una gráfica en el mundo que la gráfica representa. Una métrica proporciona una vara de medir que pone de manifiesto la elección que hemos hecho de las unidades que establecen la escala, igual que en un mapa, en el que un centímetro puede representar un kilómetro, o como en el sistema decimal, que nos da un patrón de medida que todos aceptamos.

Pero la métrica especifica además otras cosas. También nos dice si el espacio se dobla o se abarquilla, como la superficie de un globo cuando se hincha y adopta la forma de una esfera. La métrica contiene toda la información sobre la forma del espacio. La métrica de un espacio curvado nos informa sobre las distancias y también sobre los ángulos. Igual que un centímetro puede representar diferentes distancias, un ángulo puede corresponder a formas diferentes. Trataré de esto más adelante, cuando exploremos la conexión entre el espacio curvado y la gravedad. Digamos por ahora que la superficie de una esfera no es lo mismo que la superficie de una hoja plana de papel. Los triángulos sobre una de ellas no son lo mismo que los triángulos sobre la otra, y la diferencia entre estos dos espacios bidimensionales puede verse en sus métricas[M2] .

La información recogida en la métrica ha ido evolucionando al mismo tiempo que la física. Cuando Einstein desarrolló su teoría de la relatividad, se dio cuenta de que hay una cuarta dimensión, el tiempo, que es inseparable de las tres dimensiones espaciales. Como el tiempo también necesita una escala, Einstein formuló la gravedad utilizando una métrica para el espacio-tiempo tetradimensional, añadiendo una dimensión temporal a las tres dimensiones espaciales.

Y desarrollos más recientes han puesto de manifiesto que podrían también existir dimensiones espaciales adicionales. En ese caso, la auténtica métrica del espacio-tiempo involucrará más de tres dimensiones espaciales. El número de dimensiones y la métrica para ellas son las claves para describir semejante espacio multidimensional. Pero antes de ponernos a explorar con más detalle las métricas, y especialmente las métricas de los espacios multidimensionales, pensemos un poco más sobre el significado de la expresión *espacio multidimensional* .

Pasillos festivos hacia las dimensiones extras

En el libro de Roald Dahl *Charlie y la fábrica de chocolate* , Willy Wonka enseñaba a los visitantes su «Wonkavator». En sus propias palabras, «un ascensor solamente puede subir y bajar, pero un Wonkavator puede ir hacia

los lados, en diagonal, hacia delante, hacia atrás, al frente, en cuadrados y en cualquier dirección que uno pueda imaginar [...]»[5] . En realidad lo que tenía era un dispositivo que se movía en cualquier dirección, siempre y cuando ésta fuera una dirección en las tres dimensiones que conocemos. Era una idea bonita e imaginativa.

No obstante, el Wonkavator no se movía en cualquier dirección «que uno pueda imaginar». Willy Wonka no era consciente de que había ignorado los pasillos extradimensionales. Las dimensiones extras son direcciones completamente distintas. Son difíciles de describir, pero son fáciles de comprender por analogía.

En 1884, para explicar la noción de dimensiones extras, el matemático británico Edwin A. Abbott escribió una novela titulada *Planilandia* [6] . La acción transcurre en un universo bidimensional ficticio —la Planilandia del título—, en el que residen ciertos seres bidimensionales de diversas formas geométricas. Abbott nos muestra por qué los habitantes de Planilandia, que viven toda su vida en dos dimensiones, tienen tan mitificadas las tres dimensiones como las personas de este mundo tenemos mitificada la idea de la cuarta dimensión.

Para nosotros, asimilar más de tres dimensiones requiere una extensión de la imaginación, pero en Planilandia las tres dimensiones están fuera del alcance de la comprensión de sus habitantes. Todo el mundo piensa que es obvio que el universo no tiene más que las dos dimensiones que ellos perciben. Los habitantes de Planilandia son tan recalcitrantes al sostener esta opinión como la mayoría de nosotros al sostener la existencia exclusiva de las tres dimensiones.

Al narrador del libro, A. Square (el tocayo del autor, Edwin A^2 [7]), se le presenta la oportunidad de descubrir la existencia de una tercera dimensión. En la primera etapa de su educación, cuando él está todavía confinado en Planilandia, ve una serie de discos que primero aumentan y luego disminuyen de tamaño, que son las rodajas de la esfera que se ven al pasar ésta por el plano de A. Square (véase la figura 6).

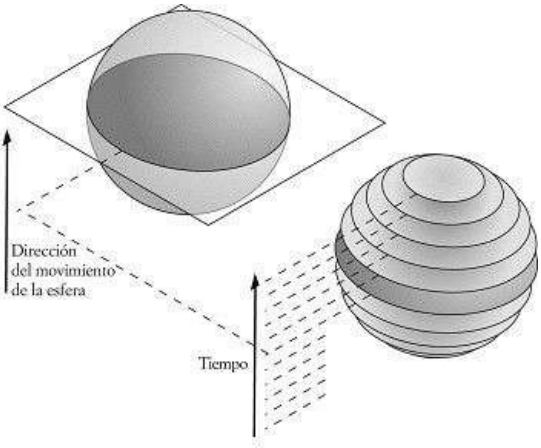


FIGURA 6. Si una esfera atravesara un plano, un observador bidimensional vería un disco. La sucesión de discos que el observador ve a lo largo del tiempo recompone la esfera.

Al principio, esto resulta desconcertante para el narrador bidimensional, que nunca ha imaginado más de dos dimensiones y que nunca ha contemplado un objeto tridimensional, como una esfera. A. Square era incapaz de imaginarse una esfera, hasta que se le sacó de Planilandia y pudo ver a su alrededor el mundo tridimensional. Desde su nueva perspectiva, reconoce a la esfera como la forma que se construye ensamblando las diferentes rodajas bidimensionales que contempló en su momento. Incluso en su mundo bidimensional, A. Square podría haber dibujado los discos que ve en función del tiempo (como en la figura 6) para construir la esfera. Pero, hasta que su viaje por la tercera dimensión no le abrió los ojos, no pudo comprender de verdad la esfera y su tercera dimensión espacial.

Por analogía, sabemos que si una *hiperesfera* (una esfera con cuatro dimensiones espaciales) pasara por nuestro universo, se presentaría ante nosotros como una serie de esferas tridimensionales que aumentarían primero y luego disminuirían de tamaño[M3] . Por desgracia, no tenemos la oportunidad de viajar por una dimensión extra. Nunca veremos una hiperesfera estática entera. No obstante, podemos hacer deducciones sobre el aspecto que presentan los objetos en espacios de diferentes dimensiones, incluso en dimensiones que no vemos. Podemos deducir con seguridad que nuestra percepción de una hiperesfera que pasa por tres dimensiones coincidiría con una serie de esferas tridimensionales.

Pongamos otro ejemplo. Imaginemos la construcción de un *hipercubo* , una generalización del cubo a más de tres dimensiones. Un segmento de dimensión uno consiste en dos puntos unidos por una línea recta unidimensional. Podemos generalizar esto en dos dimensiones y pasar a un cuadrado, partiendo de uno de estos segmentos, colocando otro igual más arriba y uniéndolos con otros dos segmentos más. Y podemos generalizarlo más, en tres dimensiones, y pasar a un cubo, que podemos construir colocando dos cuadrados bidimensionales, uno encima del otro, y unirlos mediante cuatro cuadrados adicionales, uno en cada lado de los cuadrados originales (véase la figura 7).

FIGURA 7. Cómo ensamblar objetos de cierta dimensión para construir otros de dimensión superior. Unimos dos puntos para construir un segmento, dos segmentos para construir un cuadrado, dos cuadrados para construir un cubo, y (esto no se ha reproducido porque es demasiado difícil de dibujar) dos cubos para construir un hipercubo.

Podemos generalizar el cubo para pasar a un hipercubo en cuatro dimensiones y a algo para lo que todavía no tenemos nombre en cinco dimensiones. Aunque los mortales tridimensionales no hayamos visto nunca ninguno de estos dos objetos, podemos generalizar el proceso que ha funcionado en dimensiones inferiores. Para construir un hipercubo (también llamado *teseracto*), hay que poner un cubo encima de otro y unir ambos por medio de otros seis cubos que conecten entre sí las caras de los dos cubos

originales. Esta construcción es una abstracción y resulta difícil de dibujar, pero esto no implica que el hipercubo sea menos real.

Cuando estaba en el colegio pasé un verano en un campamento en el que se realizaban actividades matemáticas, lo que resultó mucho más entretenido de lo uno podría figurarse, y allí nos pusieron una versión cinematográfica de *Planilandia* [8] .

Al final, el narrador intentaba, con un delicioso acento británico, llamar la atención sobre la tercera dimensión, que era inaccesible a los habitantes de Planilandia, diciendo «Hacia arriba, no hacia el norte». Por desgracia, nosotros sufrimos la misma frustración si intentamos llamar la atención sobre una cuarta dimensión espacial, un pasillo. Pero así como los habitantes de Planilandia no la vieron ni viajaron por la tercera dimensión, aunque sí que existía en el relato de Abbott, el hecho de que nosotros no hayamos visto otra dimensión no quiere decir que ésta no exista. Así, y aunque todavía no la hayamos observado ni hayamos transitado por una tal dimensión, el texto subyacente a lo largo de *Pasillos arqueados* será «Hacia el norte no, sino hacia delante por un pasillo». ¿Quién puede saber qué es lo que existe y que todavía no hemos visto?

Tres a partir de dos

En el resto de este capítulo, más que pensar en espacios que tienen más de tres dimensiones, hablaré sobre cómo nos las arreglamos para, con nuestra limitada capacidad visual, pensar y dibujar en tres dimensiones utilizando imágenes bidimensionales. Comprender cómo realizamos esta traslación de las imágenes bidimensionales a la realidad tridimensional será útil después, a la hora de interpretar «ilustraciones» en dimensión inferior de mundos de dimensión superior. Esta sección puede considerarse como un ejercicio de precalentamiento para ir adaptando la mente a las dimensiones extras. Sería bueno recordar que en nuestra vida cotidiana estamos todo el tiempo inmersos en el concepto de dimensión y que en realidad éste es mucho más familiar de lo que parece.

A menudo lo único que vemos de las cosas es parte de su superficie, y la superficie es sólo el exterior. El exterior tiene dos dimensiones, aunque se vaya combando en el espacio tridimensional, ya que sólo se precisan dos números para identificar un punto. Deducimos que la superficie no es tridimensional porque carece de espesor.

Cuando miramos fotos, películas, pantallas de ordenador o las ilustraciones de este libro, generalmente estamos mirando representaciones bidimensionales, y no tridimensionales. Pero, sin embargo, podemos deducir la realidad tridimensional que retratan.

Podemos usar información bidimensional para construir tres dimensiones. Hacer representaciones bidimensionales implica suprimir información, a la vez que se intenta conservar la información suficiente para reproducir elementos esenciales del objeto original. Pensemos ahora en los métodos que solemos usar para reducir objetos de dimensión superior a dimensiones más

bajas —la sección, la proyección, la holografía y a veces simplemente obviar la dimensión— y cómo hacemos el camino de vuelta para deducir los objetos representados.

El método menos complicado de ver más allá de la superficie es hacer rodajas. Cada rodaja es bidimensional, pero la combinación de las rodajas forma un objeto real tridimensional. Por ejemplo, cuando uno pide jamón en la charcutería, el pedazo tridimensional de jamón acaba pronto convertido en un montón de lonchas bidimensionales[9] . Pegando de nuevo todas las lonchas podríamos reconstruir la forma tridimensional entera.

Este libro es tridimensional. Sin embargo, sus páginas tienen sólo dos dimensiones. La unión de las páginas bidimensionales constituye el libro[10] . Podríamos ilustrar esta unión de páginas de muchas maneras. Una de ellas aparece en la figura 8, que muestra el borde de un libro. En esta ilustración hemos jugado de nuevo con la idea de dimensión, ya que cada línea representa una página. Desde el momento en que todos sabemos que las líneas representan páginas bidimensionales, esta ilustración debería estar clara. Más adelante usaremos una simplificación análoga para describir objetos en mundos multidimensionales.

FIGURA 8. Un libro tridimensional está hecho de hojas bidimensionales.

Cortar en rodajas es solamente una de las maneras que hay de remplazar dimensiones superiores por otras inferiores. La *proyección* , un término técnico tomado prestado de la geometría, es otra. La proyección da una receta precisa para crear una representación en dimensión inferior de un objeto. La sombra sobre una pared es un ejemplo de una proyección bidimensional de un objeto tridimensional. La figura 9 ilustra cómo se pierde información cuando uno (o un conejo) realiza una proyección. Los puntos de la sombra quedan identificados con sólo dos coordenadas, derecha-izquierda o arriba-abajo, sobre la pared. Pero el objeto proyectado tiene también una tercera dimensión espacial que la proyección no retiene.

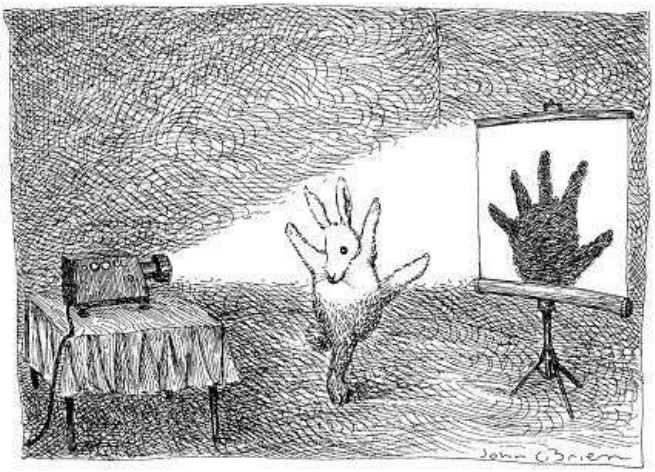


FIGURA 9. Una proyección transmite menos información que el objeto tridimensional.

El modo más sencillo de realizar una proyección es simplemente olvidarse de una dimensión. Por ejemplo, la figura 10 muestra un cubo de tres dimensiones proyectado en dos dimensiones. Las proyecciones pueden adoptar muchas formas, la más sencilla de las cuales es un cuadrado.

FIGURA 10. Proyecciones de un cubo. Obsérvese que la proyección puede ser un cuadrado, como vemos en el diagrama central, pero que también puede adoptar otras formas.

Volviendo a los ejemplos anteriores de las gráficas que representaban a Ike y a Atenea, podríamos hacer una representación bidimensional de Ike dejando de lado su afición a conducir deportivos. Y a lo mejor no nos interesa realmente saber cuántas lechuzas cuida Atenea y preferimos hacer una representación de dimensión cuatro en vez de dimensión cinco. Olvidarse de las lechuzas de Atenea es hacer una proyección.

Una proyección descarta información del objeto original de dimensión superior (véase la figura 9). Sin embargo, cuando hacemos una representación de dimensión inferior por medio de una proyección, a veces incluimos información para ayudar a retener algo de lo que se pierde. La información adicional puede ser el sombreado o el color, como en una pintura o en una fotografía. Podría ser también un número, como se hace en los mapas topográficos para indicar la altura. O podría ser también que no hubiera ningún tipo de etiqueta, y en ese caso lo que ocurre simplemente es que la caracterización bidimensional ofrece menos información.

Sin los dos ojos, que trabajan juntos para permitirnos reconstruir las tres dimensiones, todo lo que veríamos serían proyecciones. La percepción de la profundidad es más penosa cuando cerramos un ojo. Un solo ojo construye una proyección bidimensional de la realidad tridimensional. Necesitamos los dos ojos para reproducir las tres dimensiones.

Yo veo bien de cerca con un ojo y con el otro veo bien de lejos, así que no combino apropiadamente las imágenes de los dos ojos, a menos que lleve gafas, y las llevo raramente. Aunque me dijeron que podría tener problemas para reconstruir las tres dimensiones, normalmente no noto ningún problema: las cosas siguen pareciéndome tridimensionales. Esto es así porque me apoyo en el sombreado y la perspectiva (y en mi familiaridad con el mundo) para reconstruir las imágenes tridimensionales.

Pero un día un amigo y yo estábamos en el desierto tratando de llegar hasta unos riscos lejanos. Mi amigo repetía que podíamos seguir el camino recto hasta ellos y yo no podía entender por qué insistía tanto en que teníamos que seguir recto atravesando un bloque de roca. Resultó que la roca que yo pensé que estaba directamente pegada a la pared de los riscos, de modo que bloqueaba completamente nuestro camino, estaba de hecho situada mucho más cerca de nosotros, frente a los riscos. La roca que yo había pensado que obstruiría nuestra marcha no estaba, de hecho, pegada a la pared de los

riscos. Este malentendido se produjo porque estábamos cerca de la pared y era casi medianoche, de modo que no había sombras, y no tuve manera de construir la tercera dimensión, que me hubiera dicho cómo estaban alineados los riscos distantes y la roca. Realmente no tuve conciencia de mi estrategia compensatoria de usar las sombras y la perspectiva hasta entonces, el día en que falló.

El arte de la pintura y del dibujo siempre ha obligado a los artistas a reducir lo que ven a imágenes proyectadas. El arte medieval hacía esto del modo más sencillo posible. La figura 11 muestra un mosaico que presenta una proyección bidimensional de una ciudad. Este mosaico no nos dice nada sobre una tercera dimensión; no hay ni etiquetas ni indicación ninguna de su existencia.



FIGURA 11. Un mosaico medieval bidimensional.

Desde los tiempos medievales, los artistas han desarrollado métodos para hacer proyecciones que restablezcan parcialmente la pérdida en la pintura de una dimensión. Un enfoque que se opone al aplastamiento medieval del espacio es el método usado por los cubistas en el siglo XX. Una pintura cubista (por ejemplo el *Retrato de Dora Maar* de Picasso, figura 12) presenta varias proyecciones simultáneamente, cada una desde un ángulo diferente, y sugiere así la tridimensionalidad del tema.



FIGURA 12. *Retrato de Dora Maar* , pintura cubista de Picasso.

Sin embargo, la mayoría de los pintores occidentales han usado la perspectiva y el sombreado para crear la ilusión de una tercera dimensión. Una de las técnicas esenciales de la pintura consiste en la destreza a la hora de reducir un mundo tridimensional a una representación bidimensional de éste, de manera tal que permita al observador invertir el proceso y reconstruir la escena o el objeto tridimensional inicial. Nuestra cultura nos ha entrenado

para saber cómo descodificar las imágenes, aunque no tengamos toda la información tridimensional.

Los artistas han tratado incluso de representar objetos de dimensión superior en superficies bidimensionales. Por ejemplo, la *Crucifixión (Corpus Hypercubus)* de Salvador Dalí (véase la figura 13) muestra la cruz como un hipercubo desplegado. Un hipercubo consiste en ocho cubos ensamblados en un espacio de dimensión cuatro. Éstos son los cubos que él ha dibujado. En la figura 14 muestro algunas proyecciones de un hipercubo.

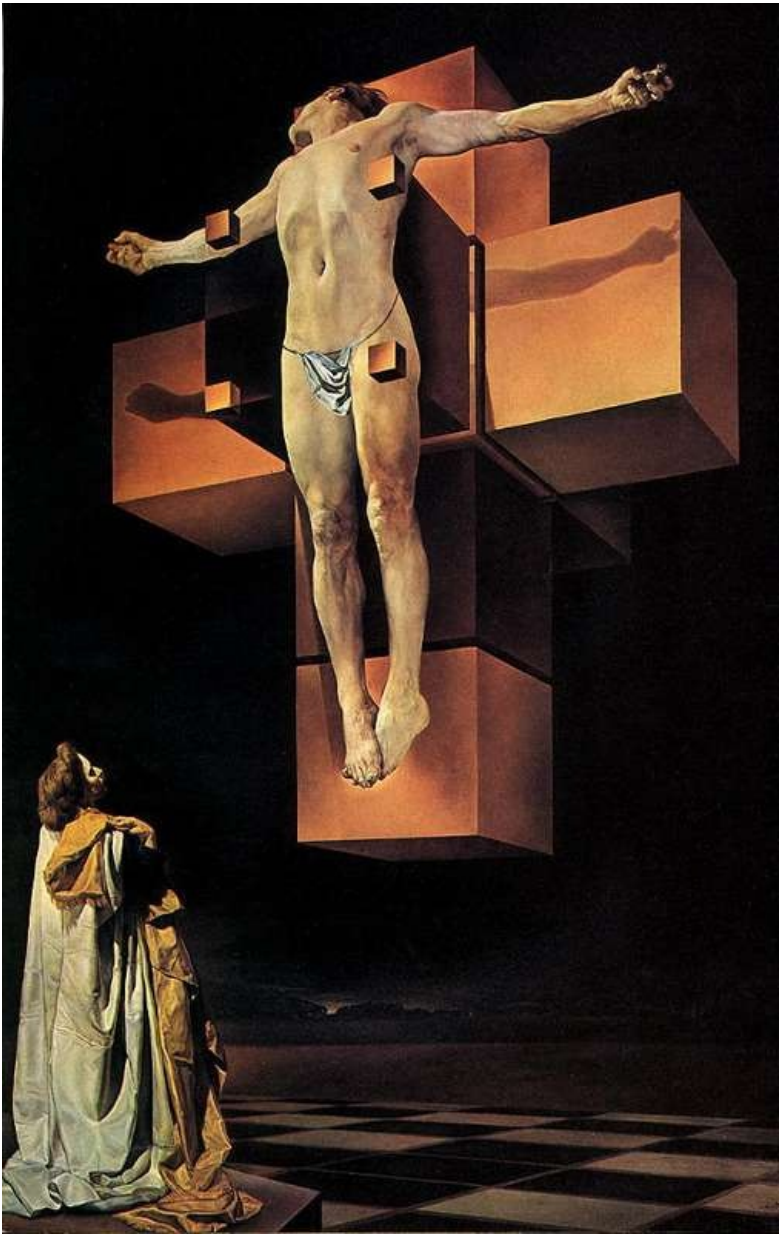


FIGURA 13. *Crucifixión (Corpus Hypercubus)* , de Dalí.

Ya he mencionado antes un ejemplo en el mundo de la física: los cuasicristales, que son como la proyección de un cristal de dimensión superior en nuestro mundo tridimensional. Las proyecciones también pueden utilizarse con fines prácticos, no sólo artísticos. En la medicina hay muchos ejemplos en los que se proyectan objetos tridimensionales en dos dimensiones. Las exploraciones de la tomografía asistida por ordenador (CAT, según sus siglas en inglés) combinan múltiples imágenes obtenidas por rayos X para reconstruir una representación tridimensional que aporta más información. Con radiografías tomadas desde un número suficiente de ángulos distintos se puede utilizar la interpolación para construir imágenes tridimensionales completas. Y una exploración realizada por medio de una resonancia magnética (MRI, según sus siglas en inglés) reconstruye un objeto tridimensional a partir de rebanadas.

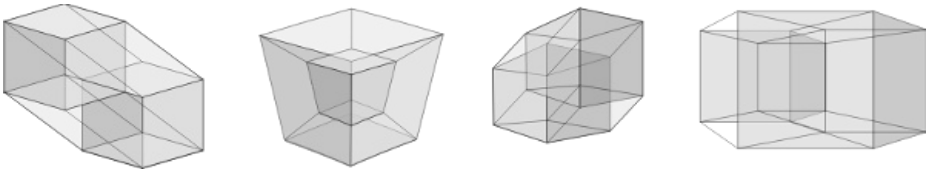


FIGURA 14. Proyecciones de un hipercubo.

La imagen holográfica es otro medio de registrar tres dimensiones sobre una superficie bidimensional. Aunque una imagen holográfica esté registrada en una superficie de dimensión inferior, de hecho, transmite toda la información del espacio de dimensión superior original. Probablemente todos llevemos un ejemplo de esta técnica en la billetera: la imagen que hay en la tarjeta de crédito, que parece tridimensional, es un holograma.

Una imagen holográfica recoge relaciones entre la luz en diferentes puntos, de modo que pueda recuperarse la imagen completa de dimensión superior. Este principio es casi el mismo que utiliza un buen aparato estéreo, que nos permite oír cómo estaban distribuidos los instrumentos cuando se llevó a cabo la grabación. Con la información almacenada en un holograma, el ojo puede reconstruir de verdad el objeto tridimensional que aquél representa.

Estos métodos nos muestran cómo podríamos obtener más información a partir de una imagen de dimensión inferior. Pero puede ser que lo que de verdad necesitemos es menos información. A veces ni siquiera nos preocupamos de las tres dimensiones. Por ejemplo, algo puede ser tan fino en la tercera dimensión que en esta dirección no pasa nada interesante: aunque la tinta que impregna este papel es realmente tridimensional, no perdemos nada si la consideramos bidimensional. A menos que observemos la página bajo la lente de un microscopio, sencillamente carecemos de la resolución necesaria para ver el espesor de la tinta. Un alambre parece unidimensional, aunque al examinarlo más atentamente veamos que tiene una sección y que, en definitiva, es también tridimensional.

No pasa nada si ignoramos una dimensión extra que no vemos porque es muy pequeña. Normalmente podemos pasar por alto no sólo los efectos visuales, sino también los efectos físicos de algunos procesos minúsculos e imposibles de detectar. Los científicos, cuando formulan sus teorías o plantean sus cálculos, suelen pensar que sus efectos se compensan entre sí o incluso llegan a ignorar del todo (a veces sin ser conscientes de ello) procesos físicos que ocurren a escalas inconmensurablemente pequeñas. Las leyes del movimiento de Newton funcionan a distancias y velocidades que él mismo pudo observar. No precisó los detalles de la teoría de la relatividad para hacer predicciones acertadas. Cuando los biólogos estudian una célula, no necesitan saber nada sobre los quarks que hay dentro del protón.

Seleccionar la información relevante y suprimir los detalles es el tipo de arreglo práctico que todos hacemos a diario. Es un modo de enfrentarse al exceso de información. Con casi todo lo que vemos, oímos, degustamos, olemos o tocamos, podemos elegir entre examinar los detalles, escrutándolos muy atentamente, u otearlo «por encima» con las otras prioridades que esto implica. Da lo mismo que estemos contemplando una pintura, degustando un vino, leyendo un texto de filosofía o planificando nuestro próximo viaje, siempre parcelamos nuestros pensamientos en categorías de interés, ya sean tamaños, aromas o ideas, y en categorías irrelevantes por el momento. Cuando resulta apropiado, ignoramos algunos detalles para poder concentrarnos en los puntos de interés sin que éstos resulten oscurecidos por culpa de los detalles innecesarios.

Este proceso de despreciar información a pequeña escala debería resultarnos familiar, ya que es un paso conceptual que la gente da constantemente. Pensemos, por ejemplo, en la gente de Nueva York. Los neoyorquinos que viven en el fragor de la ciudad ven los detalles y las variaciones que hay dentro de Manhattan. Para ellos, el centro es más afroamericano y más viejo, con calles más estrechas y tortuosas. La parte residencial, así como el Central Park y la mayoría de los museos, está realmente urbanizada y ha sido diseñada para que allí vivan, en efecto, seres humanos. Aunque estas distinciones resulten borrosas vistas desde lejos, dentro de la ciudad son muy reales.

Pero pensemos ahora cómo ve Nueva York la gente de muy lejos. Para ellos, es un punto en el mapa. Un punto importante quizá, un punto con un carácter distintivo; pero, desde fuera de Nueva York, un punto al fin y al cabo. A pesar de su gran variedad, los neoyorquinos forman una sola categoría vistos desde el Medio Oeste o desde Kazajistán, por ejemplo. Cuando mencioné esta analogía a un primo mío que vive en el centro de Nueva York (en el West Village, más concretamente), éste confirmó mi punto de vista al resistirse a asimilar a los neoyorquinos que viven en el barrio residencial de la ciudad con los que viven en el centro. No obstante, como podría confirmárselo cualquiera que no sea neoyorquino, las distinciones son demasiado sutiles como para que cuenten para la gente que no vive sumida en ellas.

En física constituye una práctica muy común formalizar esta intuición y

organizar categorías en función de la distancia o la energía que es relevante. Los físicos aceptan esta práctica y le han dado un nombre: *teoría efectiva* . La teoría efectiva se concentra en las partículas y fuerzas que tienen «efectos» a la distancia en cuestión. Más que describir partículas e interacciones en términos de parámetros que no pueden medirse y que describen el comportamiento a muy altas energías, formulamos observaciones en términos de las cosas que son de verdad relevantes en las escalas que podríamos detectar. La teoría efectiva a una distancia dada no entra en los detalles de una teoría física subyacente a una distancia más corta; sólo se pregunta sobre cosas que podríamos medir o ver. Si algo está más allá de la resolución de las escalas con las que estamos trabajando, no necesitamos conocer su estructura detallada. Esta práctica no es un fraude científico, sino una manera de dejar a un lado una masa confusa de información superflua. Es una manera «efectiva» de obtener respuestas exactas de modo eficiente.

A todos, incluidos los físicos, nos satisface volver a un universo tridimensional cuando los detalles de dimensión superior están más allá de nuestra resolución. Al igual que los físicos solemos tratar un cable como si fuera unidimensional, asimismo podemos describir un universo de dimensión superior en términos de dimensiones inferiores cuando las dimensiones extras son minúsculas y los detalles en dimensión superior son demasiado pequeños como para tener importancia. Una descripción así, en términos de dimensión inferior, resumiría los efectos observables de todas las posibles teorías en dimensión superior, en las que las dimensiones extras son tan diminutas que ni se ven. Para muchos fines, semejante descripción en dimensión inferior resulta adecuada independientemente del número, del tamaño y de la forma de las dimensiones adicionales.

Las magnitudes en dimensión inferior no proporcionan la descripción fundamental, pero son un modo conveniente de organizar las observaciones y las predicciones. Si conocemos los detalles a corta distancia o la microestructura de una teoría, podemos utilizarlos para deducir las magnitudes que aparecen en la descripción a baja energía. De no ser así, esas magnitudes son como incógnitas que hay que determinar experimentalmente.

El capítulo siguiente elabora estas ideas y examina las consecuencias de las dimensiones extras diminutas que están enrolladas. Las dimensiones que consideraremos primero son minúsculas, demasiado pequeñas como para producir alguna diferencia. Más tarde, cuando volvamos a las dimensiones extras, exploraremos también las dimensiones grandes e infinitas que recientemente han transformado por completo esta visión de las cosas.

2

PASILLOS RESTRINGIDOS:

LAS DIMENSIONES EXTRAS ENROLLADAS

No way out

None whatsoever.

[No hay salida. | Ninguna en absoluto].

JEFFERSON STARSHIP

Atenea se despertó sobresaltada. El día anterior había estado leyendo Alicia en el país de las maravillas y Planilandia, en busca de inspiración para las dimensiones. Pero esa noche tuvo un sueño de lo más extraño, que, estando ya consciente, atribuyó al hecho de haber leído los dos libros el mismo día[11].

Atenea soñó que se había convertido en Alicia, que había caído en una madriguera, que se había encontrado con el Conejo que vivía allí, el cual la había conducido a un mundo insólito. Ella pensaba que éste era un modo un tanto rudo de tratar a una invitada. Aun así, esperaba ávidamente el momento de vivir las inminentes aventuras del país de las maravillas.

Atenea sufrió, sin embargo, una decepción. El Conejo de la madriguera, que era aficionado a los juegos de palabras, la había mandado a Unidilandia, un mundo unidimensional extraño y no tan maravilloso. Atenea miró a su alrededor —o mejor dicho, a izquierda y a derecha— y descubrió que sólo veía dos puntos, uno a su izquierda y otro a su derecha («Éste de color más bonito», pensó).

En Unidilandia, todos los habitantes unidimensionales, con sus posesiones unidimensionales, se encontraban alineados a lo largo de esta única dimensión, como si fueran cuentas finas y largas ensartadas en un hilo. A pesar de lo limitado que era el campo que abarcaba su vista, Atenea supo que en Unidilandia tenía que haber más cosas que las que percibían sus ojos a causa del escandaloso estrépito que llegaba hasta sus oídos. Había una Reina Roja oculta tras un punto, pero Atenea no podía evitar oír sus estridentes gritos: «¡Éste es el tablero de ajedrez más ridículo que he visto en mi vida! ¡No puedo mover ninguna pieza, ni siquiera la torre!». Atenea se tranquilizó al percatarse de que su existencia unidimensional la protegía de las iras de la Reina Roja.

Pero el confortable universo de Atenea no duró mucho. Al deslizarse por un agujero de Unidilandia, volvió al mundo de ensueño de la madriguera, donde

había un ascensor que podía llevarla a otros universos hipotéticos con otras dimensiones. Casi de inmediato, el Conejo anunció: «Próxima parada: Bidilandia, un mundo bidimensional». A Atenea no le pareció que Bidilandia fuera un nombre muy bonito que digamos, pero entró allí de todos modos, con prudencia.

No había motivos para que Atenea se mostrase tan indecisa. Casi todo en Bidilandia parecía tener el mismo aspecto que en Unidilandia. Pero sí que vio una diferencia: un frasco con una etiqueta que decía «Bébeme». Aburrida de una dimensión, Atenea obedeció esa orden enseguida. Se encogió rápidamente hasta alcanzar un tamaño diminuto y, a medida que se encogía, iba apareciendo una segunda dimensión. Esta segunda dimensión no era muy grande; estaba enrollada en un círculo bastante pequeño. Lo que la rodeaba parecía ahora la superficie de un tubo larguísimo. Un Dodo corría por esta dimensión circular, pero quería detenerse. Así que le ofreció a Atenea, que parecía muy hambrienta, un trozo de tarta.

En cuanto Atenea dio un bocado a la onírica tarta del Dodo, empezó a crecer. Después de unos pocos mordiscos (de eso estaba segura, porque seguía teniendo mucha hambre), el trozo de tarta casi desapareció; sólo quedaba una diminuta miga. O por lo menos eso es lo que creyó Atenea, que sólo pudo distinguirla entrecerrando con mucho esfuerzo los ojos. Y la tarta no era lo único que se había esfumado de la vista: cuando Atenea volvió a su tamaño habitual, la segunda dimensión había desaparecido por entero.

«La verdad es que Bidilandia es muy rara. Mejor me vuelvo a casa», pensó para sí. Su viaje de vuelta no transcurrió sin que se presentaran nuevas aventuras, cuya narración dejaremos para otra ocasión.

Aunque no sepamos *por qué* las tres dimensiones del espacio resultan tan especiales, podemos, sin embargo, preguntarnos *cómo* . ¿Cómo es posible que pueda parecer que el universo tiene sólo tres dimensiones espaciales si el espacio-tiempo fundamental subyacente contiene más? Si Atenea está en un mundo bidimensional, ¿por qué a veces ve sólo una dimensión? Si la teoría de cuerdas es la descripción correcta de la naturaleza, y hay nueve dimensiones espaciales (más una temporal), ¿qué ha pasado con las seis dimensiones espaciales que faltan? ¿Por qué no son visibles? ¿Producen algún impacto discernible en el mundo que vemos?

Las tres últimas preguntas son cruciales en este libro. No obstante, el primer paso de este asunto consiste en determinar si hay o no una vía que permita ocultar las pruebas de la existencia de las dimensiones extras, de modo que el mundo bidimensional de Atenea pudiera presentarse tranquilamente como unidimensional, o un universo con dimensiones extras como si tuviera la estructura tridimensional que vemos a nuestro alrededor. Si vamos a aceptar la idea de un mundo con dimensiones extras, sea cual sea la teoría de donde provenga, ha de haber una buena explicación de por qué no hemos detectado todavía ni la más leve traza de su existencia.

Este capítulo trata de las dimensiones sumamente pequeñas que están *compactadas* , enrolladas o hechas un ovillo. No se extienden para siempre, como las tres dimensiones familiares; por el contrario, enseguida se vuelven

sobre sí mismas, como en una bobina de hilo fuertemente enrollada. Dos objetos no podrían alejarse mucho el uno del otro a lo largo de una dimensión compactada; por el contrario, cualquier intento de hacer una excursión de larga distancia acabaría en un viaje en el que se dieran vueltas y más vueltas, como en el caso del Dodo. Esas dimensiones compactadas podrían ser tan pequeñas que nunca notáramos su existencia. De hecho, veremos que si existen estas diminutas dimensiones enrolladas, será un auténtico reto detectarlas.

Dimensiones enrolladas en la física

La teoría de cuerdas, la candidata más prometedora para encarnar una teoría que combine la mecánica cuántica y la gravedad, da una razón concreta para pensar en las dimensiones extras: las únicas versiones coherentes de la teoría de cuerdas que conocemos van cargadas con estos sorprendentes accesorios. Sin embargo, aunque la llegada de la teoría de cuerdas al mundo de la física hizo aumentar la respetabilidad de las dimensiones extras, la idea sobre éstas surgió mucho antes.

Más atrás, a principios del siglo XX, la teoría de la relatividad de Einstein abrió una puerta a la posibilidad de que existieran dimensiones espaciales extras. Su teoría de la relatividad describe la gravedad, pero no nos dice por qué experimentamos este tipo concreto de gravedad. La teoría de Einstein no favorece ningún número concreto de dimensiones espaciales. Funciona igualmente bien para tres, para cuatro o para diez. ¿Por qué parece entonces que hay sólo tres?

En 1919, pisándole los talones a la teoría de la relatividad general de Einstein (completada en 1915), el matemático polaco Theodor Kaluza reconoció esta posibilidad en la teoría de Einstein y propuso valientemente una cuarta dimensión espacial, una nueva dimensión nunca vista del espacio[12] . Insinuó que la dimensión extra podría distinguirse en cierto modo de las tres dimensiones infinitas usuales, pero no concretó cómo. El propósito de Kaluza al introducir esta dimensión extra era unificar las fuerzas de la gravedad y del electromagnetismo. Aunque los detalles de este intento fracasado de unificación son irrelevantes aquí, la dimensión extra que tan atrevidamente introdujo sí que es, en cambio, muy relevante.

Kaluza escribió su artículo en 1919. Einstein, que era el encargado de evaluarlo para su publicación en una revista científica, vaciló sobre los méritos de la idea. Einstein demoró durante dos años la publicación del artículo de Kaluza, pero finalmente reconoció su originalidad. Sin embargo, Einstein siguió deseando saber qué era esta dimensión. ¿Dónde estaba y por qué era diferente? ¿Hasta dónde se extendía?

Éstas son las preguntas obvias que uno se haría. Podrían muy bien ser las mismas cuestiones que preocupan al lector. Nadie respondió a Einstein hasta 1926, año en el que el matemático sueco Oskar Klein abordó sus preguntas. Klein propuso que la dimensión extra podría estar enrollada en forma de círculo, y que sería extremadamente pequeña, de sólo 10^{-33} cm[13] , la milésima parte de la millonésima parte de la billonésima parte de la

billonésima parte de un centímetro. Esta diminuta dimensión enrollada estaría en todas partes: cada punto del espacio tendría su propio círculo minúsculo, con un tamaño de 10^{-33} cm.

Esta pequeña magnitud representa la longitud de Planck, una magnitud que será relevante después, cuando discutamos la gravedad con más detalle. Klein tomó la longitud de Planck porque es la única longitud que podría aparecer de modo natural en una teoría cuántica de la gravedad, y la gravedad está conectada con la forma del espacio. Por ahora, todo lo que el lector necesita saber sobre la longitud de Planck es que es extraordinariamente pequeña, fantasmalmente pequeña, muchísimo más pequeña que cualquier cosa que alguna vez tengamos la oportunidad de detectar. Es más o menos de un orden de magnitud[14] veinticuatro veces más pequeño que un átomo y diecinueve veces más pequeño que un protón. Es fácil que pase desapercibido algo tan minúsculo como eso.

Hay muchos ejemplos en la vida cotidiana de objetos cuyo tamaño en una de las tres dimensiones usuales es demasiado pequeño como para ser detectado. La pintura que cubre la pared, o la cuerda de tender la ropa, cuando se ven desde lejos, son ejemplos de cosas que parecen desplegarse en menos de tres dimensiones. Pasamos por alto la profundidad de la pintura y el espesor de la cuerda de tender. Para un observador ocasional, la pintura parece tener sólo dos dimensiones y la cuerda de tender sólo una, aunque sabemos que ambas tienen, de hecho, tres. El único modo de ver la estructura tridimensional de estas cosas es mirarlas de cerca, o con una resolución suficientemente fina. Si estirásemos una manguera de regar a lo largo de un campo de fútbol americano y la mirásemos desde un helicóptero, como ilustra la figura 15, la manguera parecería unidimensional. Pero, de cerca, podemos distinguir las dos dimensiones de la superficie de la manguera y las tres dimensiones del volumen que encierra.

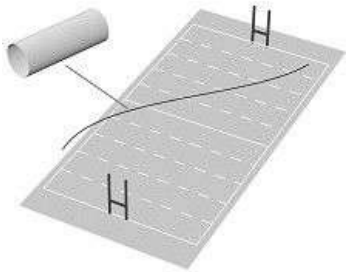


FIGURA 15. Cuando vemos desde arriba una manguera extendida sobre un campo de fútbol americano, parece que tiene una dimensión. Pero cuando la miramos de cerca, vemos que su superficie tiene dos dimensiones y que el volumen que encierra tiene tres.

Para Klein, sin embargo, lo que era tan pequeño que resultaba indiscernible no era el espesor de un objeto, sino la propia dimensión. Pero ¿qué significa que una dimensión sea pequeña? ¿Qué aspecto presentaría un universo con

una dimensión enrollada para alguien que viviera dentro de él? De nuevo la respuesta a estas cuestiones depende enteramente del tamaño de la dimensión enrollada. Consideremos un ejemplo para ver cómo les parecería el mundo a seres conscientes que fueran pequeños o grandes en relación al tamaño de la dimensión extra enrollada. Como es imposible dibujar cuatro o más dimensiones espaciales, la primera imagen que presentaré de un universo con una dimensión pequeña compactada tendrá sólo dos dimensiones, con una de ellas enrollada sobre sí misma apretadamente hasta ocupar muy poco espacio (véase la figura 16).

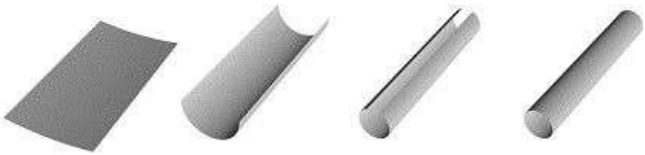


FIGURA 16. Cuando una dimensión se enrolla sobre sí misma, un universo bidimensional parece unidimensional.

Imaginemos de nuevo la manguera de un jardín, que uno puede suponer que es una larga lámina de goma enrollada formando un tubo con una sección circular pequeña. Ahora vamos a pensar que la manguera es el universo entero y no un objeto dentro del universo[15] . Si el universo contara con la misma forma que esa manguera de jardín, tendríamos una dimensión muy larga y otra, enrollada, muy pequeña: justo lo que queremos.

A una criatura pequeña —por ejemplo, un escarabajo— que viviera en el universo de la manguera de riego, el universo le parecería bidimensional. (En esta situación, nuestro escarabajo tiene que pegarse a la superficie de la manguera; el universo bidimensional no incluye el interior, que es tridimensional). El escarabajo podría avanzar en dos direcciones: a lo largo de la manguera o alrededor de ella. Como el Dodo, que podía dar vueltas en su universo bidimensional, un escarabajo que echara a andar en algún punto de la manguera podría avanzar por ahí y volver ocasionalmente al punto de donde partió. Puesto que la segunda dimensión es pequeña, cabe la posibilidad de que el escarabajo no se vaya muy lejos antes de volver al punto de partida.

Si una población de escarabajos que viviera en la manguera experimentase fuerzas, como la fuerza eléctrica o la gravedad, esas fuerzas podrían atraer o repeler a los escarabajos en cualquier dirección sobre la superficie de la manguera. Los escarabajos podrían repelerse unos a otros siguiendo la longitud de la manguera o alrededor de la circunferencia de su sección, y sentirían cualquier fuerza que estuviera presente en la manguera. Una vez que hay resolución suficiente para distinguir distancias tan pequeñas como el diámetro de la manguera, las fuerzas y los objetos exhiben las dos dimensiones que en realidad poseen.

Sin embargo, si nuestro escarabajo pudiera observar su entorno, se daría cuenta de que las dos dimensiones son muy diferentes. La que se extiende a lo largo de la manguera sería muy grande. Podría incluso ser infinitamente

larga. La otra dimensión, en cambio, sería muy pequeña. Dos escarabajos nunca podrían alejarse mucho el uno del otro en la dirección que rodea la manguera. Y un escarabajo que tratara de hacer un largo viaje en esa dirección volvería rápidamente al punto de partida. Un escarabajo reflexivo al que le gustara estirar las piernas sabría que su universo es bidimensional, y que una dimensión se extiende en un largo camino mientras que la otra es muy pequeña y está enrollada, formando una circunferencia.

Pero la perspectiva del escarabajo no se parece en nada a la que tendrían criaturas como nosotros en el universo de Klein, en el que la dimensión extra está enrollada en un espacio extremadamente pequeño, 10^{-33} cm. Al contrario que el escarabajo, nosotros no somos tan pequeños como para detectar una dimensión de un tamaño tan diminuto, y mucho menos como para viajar por ella.

Así que, para completar nuestra analogía, supongamos que algo mucho más grande que un escarabajo, que dispusiera solamente de una resolución mucho más grosera y, por lo tanto, fuera incapaz de detectar objetos o estructuras pequeñas, viviera en el universo de la manguera de regar. Como las lentes a través de las cuales este ser más grande ve el mundo desdibujan los detalles que son igual de pequeños que el diámetro de la manguera, desde la posición ventajosa de este ser más grande las dimensiones extras serían invisibles. Vería sólo una única dimensión. Solamente alguien que tuviera una visión lo suficientemente aguda como para registrar algo tan pequeño como la anchura de la manguera vería que el universo de la manguera tiene más de una dimensión. Si su visión es demasiado borrosa como para distinguir esa anchura, lo único que verá será una línea.

Además, los efectos físicos no revelarían la existencia de la dimensión extra. Los seres más grandes del universo de la manguera llenarían por completo la segunda dimensión, la pequeña, y no sabrían nunca que esta dimensión estaba ahí. Sin la capacidad de detectar estructuras o variaciones a lo largo de la dimensión extra, como contoneos u ondulaciones de materia o energía, no podrían nunca registrar su existencia. Cualquier variación a lo largo de la segunda dimensión pasaría completamente desapercibida, al igual que cualquier variación en el espesor de una hoja de papel a la escala de su estructura atómica es algo que ni siquiera notamos.

El mundo bidimensional en el que se encontró la Atenea durmiente se parecía mucho al universo de la manguera de riego. Como Atenea tuvo ocasión de ser grande y de ser pequeña en relación a la anchura de Bidilandia, pudo observar este universo desde la perspectiva de alguien más grande que su segunda dimensión y también desde la perspectiva de alguien más pequeño que su segunda dimensión. Para la Atenea grande, Bidilandia y Unidilandia eran iguales a todos los efectos. Solamente la Atenea pequeña pudo distinguir la diferencia. Del mismo modo, en el universo de la manguera, un ser desconocería la existencia de una dimensión espacial adicional si ésta fuera tan pequeña que no pudiera verla.

Volvamos ahora al universo de Kaluza-Klein, que tiene las tres dimensiones espaciales que conocemos, más una dimensión extra que no se ve. Podemos usar de nuevo la figura 16 para imaginarnos esta situación. Lo ideal sería que

dibujase las cuatro dimensiones espaciales, pero por desgracia esto no es posible (ni siquiera en un libro con desplegables en tres dimensiones). Sin embargo, como las tres dimensiones infinitas que constituyen nuestro espacio son todas cualitativamente iguales, en realidad sólo necesito dibujar una que represente a las tres. Esto me permite usar la otra dimensión para representar la dimensión extra que no es visible. La otra dimensión que se muestra aquí es la que está enrollada, la que es fundamentalmente diferente de las otras tres.

Igual que en nuestro universo bidimensional de la manguera, en un universo de Kaluza-Klein tetradimensional con una única dimensión enrollada, diminuta, nos parecería que hay una dimensión menos de las cuatro que realmente tiene. Como no podríamos saber nada sobre la dimensión espacial adicional, a menos que pudiéramos detectar evidencias de estructura a su diminuta escala, el universo de Kaluza-Klein parecería tridimensional. Las dimensiones extras compactadas o enrolladas nunca serán detectadas si son lo suficientemente pequeñas. Más adelante investigaremos cuán pequeñas son, pero por ahora podemos tener la seguridad de que la longitud de Planck está muy por debajo del umbral de detección.

En la vida, y en la física, sólo registramos los detalles que de hecho nos afectan. Si no podemos observar una estructura detallada, tanto da suponer que no existe. En física, el descarte de los detalles locales queda englobado en la idea de las teorías efectivas del capítulo anterior. En una teoría efectiva, lo único que cuenta son las cosas que de hecho podemos percibir. En el ejemplo de antes, usaríamos una teoría efectiva tridimensional en la que está ausente la información sobre las dimensiones extras.

Aunque la dimensión enrollada del universo de Kaluza-Klein no está lejos, es tan pequeña que cualquier variación que se produzca en ella resulta imperceptible. Igual que las diferencias entre los habitantes de Nueva York no le interesan realmente a la gente de fuera, la estructura en las dimensiones extras del universo es irrelevante cuando sus detalles varían en una escala tan minúscula. Incluso si fundamentalmente resulta que hay muchas más dimensiones que las que reconocemos en nuestra vida cotidiana, todo lo que vemos puede ser descrito sólo en términos de las dimensiones que observamos. Las dimensiones extras extremadamente pequeñas no cambian nada nuestro modo de ver el mundo, ni tampoco nuestro modo de llevar a cabo la mayoría de los cálculos propios de la física. Aunque existan dimensiones adicionales, si somos incapaces de verlas o de sentirlas de alguna forma, podemos ignorarlas y seguir, sin embargo, describiendo correctamente lo que vemos. Más tarde introduciremos modificaciones a esta descripción simplificada en las que esto no siempre será cierto, pero dichas modificaciones involucrarán suposiciones adicionales.

Podemos comprender otro aspecto más de una dimensión enrollada observando la figura 17, que ilustra la manguera o universo unidimensional, enrollado siguiendo un círculo. Fijémonos en cualquier punto a lo largo de la dimensión infinita. Obsérvese que en todos y en cada uno de los puntos reposa el espacio compacto entero, o sea, el círculo. La manguera consiste en todos estos círculos pegados entre sí, como las rodajas de las que hablé en el primer capítulo.

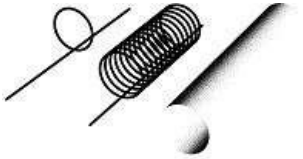


FIGURA 17. En un universo bidimensional, cuando se enrolla una dimensión hay un círculo en cada punto a lo largo de la dimensión infinita del espacio.

La figura 18 presenta un ejemplo diferente: aquí hay dos dimensiones infinitas en vez de una, más otra dimensión adicional rizada en forma de círculo. En este caso, hay un círculo en todos y en cada uno de los puntos del espacio bidimensional. Y si hubiera tres dimensiones infinitas, existirían dimensiones enrolladas en cada punto del espacio tridimensional. Podríamos comparar los puntos en el espacio extradimensional con las células de nuestro cuerpo, cada una de las cuales contiene nuestra secuencia completa de ADN. Análogamente, cada punto de nuestro espacio tridimensional podría alojar un círculo compactado entero.

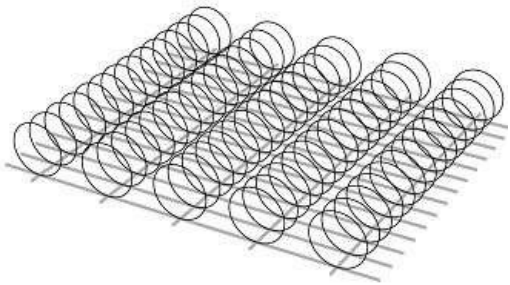


FIGURA 18. En un universo tridimensional, si se enrolla una de las tres dimensiones, tenemos un círculo en cada punto del plano.

Hasta ahora sólo hemos considerado una única dimensión adicional, que se encuentra enrollada formando un círculo. Pero todo lo que hemos dicho resulta válido aunque la dimensión enrollada tenga alguna otra forma (de hecho, cualquier otra forma). Y sería cierto también si hubiera dos o más dimensiones enrolladas diminutas de cualquier otra forma. Todas las dimensiones que fueran suficientemente pequeñas serían completamente invisibles para nosotros.

Consideremos un ejemplo con dos dimensiones enrolladas. Estas dos dimensiones enrolladas podrían adoptar muchas formas distintas. Escogeremos un *toro* , que es la figura en forma de rosquilla en la que las dos dimensiones adicionales están enrolladas simultáneamente, formando un círculo. Esto está ilustrado en la figura 19. Si ambos círculos, el que pasa transversalmente por el agujero de la rosquilla y el que rodea a la rosquilla misma, son suficientemente pequeños, las dos dimensiones enrolladas adicionales nunca se verían.



FIGURA 19. Cuando dos de las cuatro dimensiones se enrollan formando una rosquilla, tenemos una rosquilla en cada punto del espacio.

Pero éste es sólo un ejemplo. Con más dimensiones hay un número enorme de espacios compactos concebibles; los espacios compactos son espacios con dimensiones enrolladas que se distinguen entre sí por el modo preciso en el que esas dimensiones están enrolladas. Una categoría de espacios compactos que es importante en la teoría de cuerdas la constituyen las *variedades de Calabi-Yau* , que reciben este nombre en honor del matemático italiano Eugenio Calabi, que fue el primero en proponer estas formas concretas, y del matemático de Harvard, nacido en China, Shing-Tung Yau, que mostró que son matemáticamente posibles. Estas formas geométricas enrollan y entrelazan las dimensiones extras de un modo muy especial. Las dimensiones están ovilladas en un espacio pequeño, como en todas las compactaciones, pero están anudadas de una manera que es más complicada y más difícil de dibujar[M4] .

Independientemente de la forma que adopten las dimensiones extras y de lo pequeñas que éstas sean, en cada punto a lo largo de las dimensiones infinitas habría un pequeño espacio compacto que contendría todas las dimensiones que están enrolladas. Así, por ejemplo, si los especialistas en cuerdas están en lo cierto, en cada punto del espacio visible —ya sea en la punta de la nariz, en el Polo Norte de Venus o en el punto situado sobre el campo de tenis donde nuestra raqueta golpeó la pelota la última vez que sacamos— habría una variedad de Calabi-Yau de un tamaño tan diminuto que resulta invisible. La geometría de dimensión superior estaría presente en cada punto del espacio.

Los especialistas en cuerdas suelen insinuar —como hizo Klein— que las dimensiones enrolladas son igual de pequeñas que la longitud de Planck, 10^{-33} cm. Las dimensiones compactas del tamaño de la longitud de Klein estarían extraordinariamente bien escondidas; es casi seguro que no hay forma de que nosotros detectemos algo tan pequeño. Por lo tanto, es muy probable que las dimensiones extras del tamaño de la longitud de Planck no dejen ningún rastro visible de su existencia. Así que, aunque vivamos en un universo con dimensiones extras del tamaño de la escala de Planck, seguiremos registrando solamente las tres dimensiones familiares. El universo podría tener muchas de estas dimensiones diminutas, pero es posible que nunca tengamos el poder de resolución suficiente para distinguirlas.

La ley de la gravitación de Newton con dimensiones extras

Es bonito disponer de una explicación descriptiva e ilustrada de las razones por las que las dimensiones extras se encuentran ocultas cuando están compactadas o enrolladas en un espacio muy pequeño. Pero es buena idea también comprobar que las leyes de la física concuerdan con esta intuición.

Echemos una mirada a la ley de la gravitación de Newton, la forma hoy bien establecida de la ley de la fuerza de gravitación que Newton propuso en el siglo XVII. Esta ley nos dice cómo depende la fuerza gravitatoria de la distancia entre dos objetos masivos[16] . Se conoce como la *ley del cuadrado del inverso* , lo que significa que la fuerza de la gravedad decrece con la distancia proporcionalmente a la distancia al cuadrado. Por ejemplo, si se duplica la distancia entre dos objetos, la fuerza de su atracción gravitatoria decrece en un factor de cuatro. Si la separación se aumenta tres veces en relación a su valor original, la atracción gravitatoria decrece en un factor de nueve. La ley del cuadrado del inverso referida a la gravedad es una de las leyes más antiguas y más importantes de la física. Entre otras cosas, es la razón por la que los planetas tienen el tipo de órbitas que tienen. Cualquier teoría física de la gravedad viable ha de reproducir la ley del cuadrado del inverso o estaría abocada al fracaso.

El modo en el que la fuerza gravitatoria depende de la distancia, que está codificado en la ley del cuadrado del inverso de Newton, está íntimamente ligado con el número de dimensiones espaciales. Esto es así porque el número de dimensiones espaciales determina cuán rápidamente se difunde la gravedad al extenderse por el espacio.

Reflexionemos sobre esta relación, que será muy importante más tarde, cuando consideremos las dimensiones extras. Lo haremos imaginando una toma que suministra agua, bien a través de una manguera, bien mediante un aspersor. Supondremos que por la manguera y por el aspersor pasa la misma cantidad de agua y que con ambos se puede regar una flor de un jardín (véase la figura 20). Cuando el agua llega a través de la manguera y ésta apunta hacia la flor, la flor recibe toda el agua. La distancia que hay desde la boquilla de la manguera hasta el punto donde el chorro cae sobre la flor es irrelevante, ya que toda el agua ha de terminar en la flor, independientemente de lo lejos que esté la manguera.

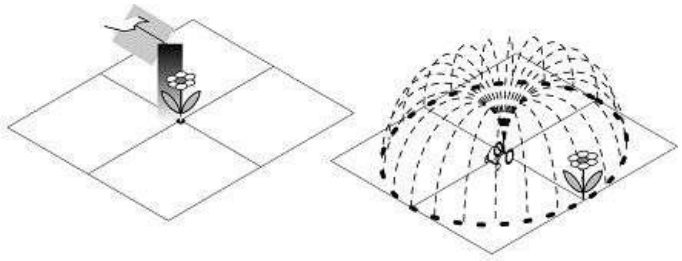


FIGURA 20. La cantidad de agua que, trazando un círculo, un aspersor proporciona a una flor es inferior a la que, de manera directa, le proporciona una manguera.

Sin embargo, supongamos que, en cambio, enviamos la misma cantidad de agua a través de un aspersor que riega simultáneamente muchas flores. En este caso, el aspersor envía agua en un círculo y alcanza a las flores a una cierta distancia. Como ahora el agua se reparte sobre todo lo que hay a esa distancia, la flor original ya no recibirá toda el agua. Además, cuanto más lejos esté la flor de la fuente, más césped regará el aspersor y el agua estará repartida de un modo más disperso (véase la figura 21). Esto es porque podemos colocar más plantas en un círculo con tres metros de circunferencia, por ejemplo, que en un círculo con sólo un metro de circunferencia. Al estar el agua repartida de un modo más disperso, una flor que está más lejos recibe menos agua.

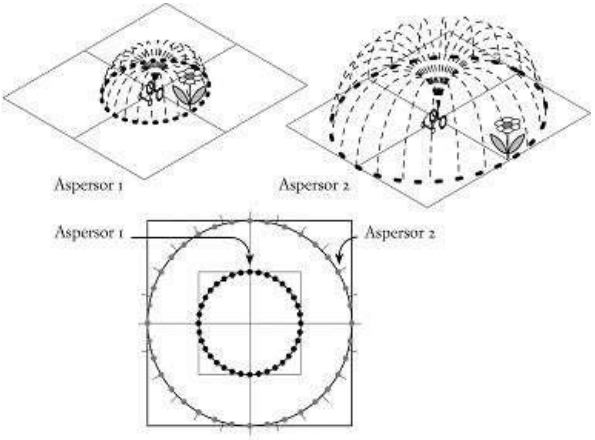


FIGURA 21. Cuando un aspersor reparte agua en un círculo de radio más grande, el agua se dispersa más y la flor recibe menos agua.

Análogamente, sea lo que sea que haya que repartir uniformemente en más de una dirección tendrá un impacto menor en cualquier cosa concreta que esté apartada, ya sea una flor o, como pronto veremos, un objeto que sienta la fuerza de la gravedad. La gravedad, como el agua, se reparte de un modo más disperso cuando se está lejos.

Con este ejemplo podemos ver también por qué la distribución depende tan marcadamente del número de dimensiones por las que se extiende el agua (o la gravedad). El agua del aspersor bidimensional se dispersa con la distancia, no como el agua que sale de la manguera unidimensional, que no se dispersa. Imaginemos ahora un aspersor que distribuya el agua sobre la superficie de una esfera y no sólo sobre un círculo. (Un aspersor así se parecería a un diente de león convertido en semilla). Aquí, el agua se dispersaría con la distancia mucho más rápidamente.

Apliquemos ahora este razonamiento a la gravedad y deduzcamos la dependencia precisa de la fuerza gravitatoria en tres dimensiones en función de la distancia. La ley de gravitación de Newton resulta de dos hechos: el hecho de que la gravedad actúa igual en todas las direcciones y el hecho de que hay tres dimensiones en el espacio. Imaginemos ahora un planeta, que

atrae a cualquier masa que esté a su alrededor. Como la fuerza gravitatoria es la misma en todas las direcciones, la fuerza de la atracción gravitatoria que el planeta ejerce sobre otro objeto con masa —una luna, por ejemplo— no dependerá de la dirección, sino de la distancia entre ellos.

Para representar gráficamente la intensidad de la fuerza gravitatoria, el dibujo de la parte izquierda de la figura 22 muestra líneas radiales que nacen del centro del planeta, de un modo que recuerda el agua que brota de un aspersor. La densidad de estas líneas determina la intensidad de la atracción gravitatoria que el planeta ejerce sobre cualquier cosa que se encuentre en las proximidades. Cuantas más líneas de fuerza pasen por un objeto, más intensa será la fuerza de atracción gravitatoria que este objeto sufra, y cuantas menos líneas de fuerza pasen por él, menos intensa será la fuerza de atracción gravitatoria.

Obsérvese que un mismo número de líneas de fuerza atraviesan un casquete esférico dibujado a cualquier distancia, ya sea ésta pequeña o grande (dibujo central y dibujo de la parte derecha de la figura 22). El número de líneas de fuerza no cambia. Pero como las líneas de fuerza están repartidas por todos los puntos de la superficie de la esfera, a una distancia mayor, la fuerza es necesariamente más débil. El factor preciso de dispersión está determinado por la medida cuantitativa de cuán repartidas están las líneas de fuerza a una distancia dada.

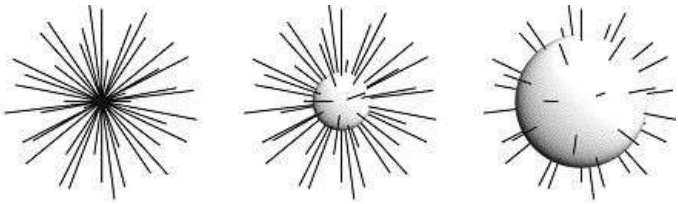


FIGURA 22. Líneas de fuerza gravitatoria emitidas por un objeto con masa, como un planeta. Un mismo número de líneas atraviesa una esfera de radio cualquiera, de modo que las líneas de fuerza son más difusas y la gravedad es más débil cuanto más alejado se encuentra uno del objeto con masa que hay en el centro.

Hay un número fijo de líneas de fuerza que pasan por la superficie de una esfera, sea cual sea su distancia a la masa. El área de esa esfera es proporcional a su radio al cuadrado: el área de la superficie es igual a un número multiplicado por el cuadrado del radio. Como el número fijo de líneas de fuerza gravitatoria se encuentra repartido por la superficie de la esfera, la fuerza gravitatoria tiene que decrecer el cuadrado del radio. Esta dispersión del campo gravitatorio es el origen de la ley del cuadrado del inverso para la gravedad.

La ley de Newton con dimensiones compactas

Sabemos entonces ahora que en tres dimensiones la gravedad tiene que obedecer una ley del cuadrado del inverso. Obsérvese que el argumento

parece depender de un modo crucial del hecho de que hay tres dimensiones espaciales. Si hubiera habido sólo dos dimensiones, la gravedad se habría repartido sobre un círculo y la fuerza de la gravedad habría decrecido más lentamente en función de la distancia. Si hubiera habido más de tres dimensiones, el área superficial de la hiperesfera habría crecido mucho más rápido al separarse el planeta y su luna, y la fuerza habría decaído en proporción mucho más rápidamente. Parece que sólo las tres dimensiones espaciales producen la dependencia según el cuadrado del inverso de la distancia. Pero si esto es así, ¿cómo pueden las teorías con dimensiones extras producir la ley del cuadrado del inverso de Newton para la gravedad?

Es muy interesante ver cómo las dimensiones compactadas resuelven este conflicto en potencia. La esencia del razonamiento es que las líneas de fuerza no pueden desplegarse a distancias arbitrariamente largas en las dimensiones compactas porque estas dimensiones tienen tamaño finito. Aunque las líneas de fuerza se desplieguen al principio en todas las dimensiones, cuando ya se han desplegado hasta los límites de las dimensiones extras no les queda más remedio que desplegarse solamente en las direcciones de las dimensiones infinitas.

Podemos ilustrar esto de nuevo con el ejemplo de la manguera. Imaginemos que el agua entra en la manguera a través de un pequeño orificio practicado en un tapón que cierre la boquilla de la manguera (véase la figura 23). El agua que entra siguiendo la dirección fijada por el orificio no continúa de modo inmediato trasladándose en la misma dirección por el interior de la manguera, sino que primero se extiende por la sección transversal del tubo. No obstante, debería quedar claro que si uno estuviera al otro extremo de la manguera, regando la flor, el modo en que entró el agua en la manguera no se notaría en absoluto. Aunque el agua se expanda primero en más de una dirección, pronto alcanzará la superficie interna de la manguera y fluirá otra vez como si hubiera una sola dirección. Esto es, esencialmente, lo que les pasa a las líneas del campo gravitatorio en dimensiones pequeñas compactas.



FIGURA 23. El agua que entra en una manguera a través de un orificio de su boquilla se expande primero en tres dimensiones antes de trasladarse sólo a lo largo de la única dimensión larga de la manguera.

Como antes, podemos imaginarnos un número fijo de líneas de fuerza emanando de una esfera con masa. A una distancia más corta que el tamaño de las dimensiones extras, estas líneas de fuerza se expandirán igualmente en todas las direcciones. Si pudiéramos medir la gravedad a una escala tan pequeña, mediríamos las consecuencias de la gravedad en dimensión superior. Las líneas de fuerza se expandirían del mismo modo que el agua al entrar en la manguera a través del orificio y repartirse por todo el interior de la manguera.

Sin embargo, a distancias más grandes que el tamaño de las dimensiones extras, las líneas de fuerza solamente pueden expandirse a lo largo de las direcciones infinitas (véase la figura 24). En las dimensiones pequeñas compactas, las líneas de fuerza chocan contra el borde del espacio y por ese camino no pueden extenderse más. Tienen que combarse y el único camino por el que pueden ir corre en la dirección de las dimensiones grandes. Así pues, a una distancia superior a los tamaños de las dimensiones extras, es como si éstas no existieran, y la ley de la fuerza vuelve a ser la ley del cuadrado del inverso de Newton, la que observamos. Esto significa que, incluso desde un punto de vista cuantitativo, nunca sabremos que hay dimensiones extras si medimos la fuerza gravitatoria sólo entre objetos que están separados por una distancia superior al tamaño de las dimensiones que están enrolladas. La dependencia de la distancia refleja las dimensiones extras solamente en la diminuta región que ocupa el espacio compacto.

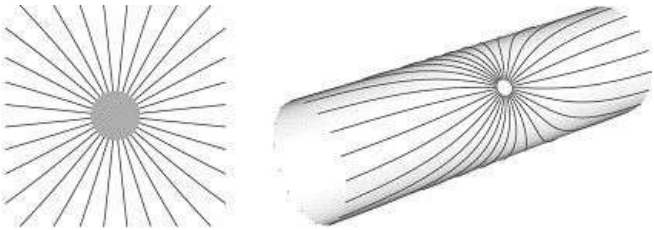


FIGURA 24. Las líneas de fuerza emitidas por un objeto con masa cuando hay una dimensión enrollada. Las líneas de fuerza se expanden radialmente a distancias cortas, pero a larga distancia se expanden solamente a lo largo de la dimensión infinita.

¿Hay otros modos de acotar las dimensiones?

Ha quedado entonces establecido que, cuando las dimensiones extras son suficientemente pequeñas, son invisibles y no tienen consecuencias detectables en la longitud de escala que observamos. Durante mucho tiempo los especialistas de teoría de cuerdas supusieron que las dimensiones extras eran dimensiones que existían al nivel de la escala de Planck, pero recientemente algunos de nosotros hemos cuestionado esta suposición.

Nadie comprende la teoría de cuerdas lo suficientemente bien como para estar en condiciones de decir, en definitiva, cuáles serán los tamaños de las dimensiones extras. Los tamaños comparables a la escala de Planck son posibles, pero cualquier dimensión tan pequeña que no pueda verse es también una posible candidata. La escala de Planck es tan minúscula que dimensiones enrolladas considerablemente más grandes podrían muy bien pasar desapercibidas. Una cuestión importante para el estudio de las dimensiones extras es, precisamente, cuán grandes pueden ser estas dimensiones, dado que todavía no las hemos visto.

Las cuestiones que abordaremos en este libro incluyen la de saber cuán grandes pueden ser las dimensiones extras, si estas dimensiones producen o

no algún efecto discernible en las partículas elementales y cómo podrían detectarse experimentalmente. Veremos que la existencia de dimensiones extras puede cambiar significativamente las reglas que ahora asumimos en la teoría de partículas y que, además, estos cambios tendrían consecuencias observables experimentalmente.

Investigaremos asimismo la cuestión, todavía más radical, de si las dimensiones adicionales han de ser pequeñas o no. No vemos las dimensiones diminutas, pero ¿las dimensiones han de ser pequeñas para ser invisibles? ¿Podría, quizá, una dimensión extra extenderse hasta el infinito sin que nosotros la veamos? Si es así, las dimensiones extras tendrían que ser muy diferentes a las dimensiones que hemos considerado. Hasta ahora solamente he presentado la posibilidad más sencilla. Más tarde veremos por qué no podemos excluir tampoco la posibilidad radical de una dimensión extra infinita, si ésta es suficientemente diferente de las tres dimensiones infinitas que nos son familiares.

El capítulo próximo abordará, además, otra cuestión que podría habérsele presentado al lector: ¿por qué las dimensiones extras pequeñas no pueden ser sencillamente intervalos, y no estar enrolladas en una bola, sino acotadas entre dos «paredes»? A nadie se le ocurrió esta posibilidad de buenas a primeras, pero ¿por qué no? La razón es que imaginar una terminación del espacio trae consigo saber qué es lo que pasa allí. ¿Se caerían las cosas al terminarse el universo, como parecía que pasaba en las viejas ilustraciones de una Tierra plana? ¿Rebotarían? ¿O sería imposible que llegaran hasta allí? La necesidad de concretar lo que pasaría al final del universo significa que tenemos que conocer lo que los científicos llaman *condiciones de frontera* . Si el espacio termina, ¿dónde y en qué termina?

Las branas —objetos semejantes a membranas en el espacio de dimensión superior— proporcionan las condiciones de frontera necesarias para los mundos que «terminan». Como veremos en el próximo capítulo, las branas pueden traer novedades que son todo un mundo (o muchos mundos).

3

PASILLOS EXCLUSIVOS:

LAS BRANAS, LOS MUNDOS BRANA Y EL BULTO

I’m gonna stick like glue.

Stick, because I’m stuck on you.

[Estoy prendido, pegado con cola. | Prendido, porque estoy prendado de ti].

ELVIS PRESLEY

Al contrario que Atenea, que era muy estudiosa, Ike casi nunca leía un libro. Normalmente prefería divertirse con juegos, aparatos y coches. Pero Ike aborrecía conducir por Boston, donde los conductores eran imprudentes, las carreteras estaban mal señalizadas y las autopistas se hallaban constantemente en obras. Ike terminaba siempre metido en algún embotellamiento, y esto le resultaba todavía más frustrante cuando veía que por encima de él pasaba una autovía casi vacía. Y aunque la carretera vacía resultara tentadora, Ike no tenía manera de llegar rápidamente a ella, porque, al contrario que las lechuzas de Atenea, él no sabía volar. A Ike, atrapado en las carreteras lentas de Boston, la tercera dimensión no le servía para nada.

Hasta no hace mucho, pocos físicos serios pensaban que mereciera la pena cavilar sobre las dimensiones extras. Era un tema especulativo y extraño: nadie sabía decir algo definitivo sobre ellas. Pero, en los últimos años, las dimensiones extras han visto cómo cambiaba su suerte para mejor. Han pasado de ser rehuidas como unas descaradas indeseables a convertirse en compañía estimulante y muy buscada. Deben su respetabilidad recién adquirida a las branas y a las muchas posibilidades teóricas auténticamente nuevas introducidas por estas construcciones.

Las branas tomaron la comunidad física por asalto en 1995, cuando el físico Joe Polchinski del Instituto Kavli de Física Teórica (KITP), en Santa Bárbara, estableció que resultaban esenciales en la teoría de cuerdas. Pero, incluso antes, los físicos habían propuesto objetos parecidos a las branas. Un ejemplo de éstos eran las p-branas (llamadas así por p-rofesores p-arlanchines), objetos que se extienden hasta el infinito solamente en algunas dimensiones y que los físicos dedujeron matemáticamente usando la teoría de la relatividad general de Einstein. La física de partículas había propuesto también mecanismos para confinar partículas en superficies parecidas a las branas. Pero las branas de la teoría de cuerdas fueron el primer tipo conocido de brana que podía atrapar fuerzas además de partículas y pronto veremos que esto es parte de lo que las hace tan interesantes. Como Ike, atascado en una carretera bidimensional en el espacio de tres dimensiones, las partículas y las

fuerzas pueden quedar retenidas en unas superficies de dimensión inferior que llamamos branas, aunque el universo tenga otras muchas dimensiones que explorar. Si la teoría de cuerdas describe correctamente el mundo en el que vivimos, a los físicos no les queda más remedio que aceptar la existencia potencial de estas branas.

El mundo de las branas supone un panorama nuevo y fascinante que ha revolucionado nuestra comprensión de la gravedad, de la física de partículas y de la cosmología. Las branas podrían existir realmente en el cosmos y no hay ninguna razón convincente que impida que estemos viviendo en una de ellas. Las branas podrían incluso desempeñar un papel importante a la hora de determinar las propiedades físicas de nuestro universo y de explicar, en definitiva, los fenómenos observables. De ser así, las branas y las dimensiones extras han venido para quedarse.

Las branas como rebanadas

En el capítulo primero examinamos una manera de considerar el mundo bidimensional de Planilandia: como una rebanada bidimensional de un espacio tridimensional. En la novela de Abbott, el personaje A. Square hizo un viaje a la tercera dimensión, más allá de la Planilandia bidimensional, y se dio cuenta de que Planilandia no era más que una mera rebanada de un mundo tridimensional mayor.

Al volver, A. Square sugirió, con bastante lógica, que el mundo tridimensional que había visto podría ser a su vez una mera rebanada: una rebanada tridimensional de un espacio con más dimensiones. Por «rebanada» entiendo, por supuesto, no solamente una membrana bidimensional, fina como un papel, sino la extensión lógica de algo así: una membrana generalizada, si se quiere. Podríamos pensar en las rebanadas tridimensionales que sugirió A. Square como pedazos tridimensionales del espacio tetradimensional.

Pero su guía tridimensional descartó inmediatamente la especulación de A. Square sobre las rebanadas tridimensionales. Como casi todas las personas que conocemos, este habitante en tres dimensiones, falto de imaginación, creía sólo en las tres dimensiones del espacio que podía ver y ni siquiera era capaz de contemplar la existencia de una cuarta.

Las branas han introducido en la física nociones matemáticas similares a las descritas en Planilandia hace un siglo. Los físicos han vuelto ahora a la idea de que el mundo tridimensional que nos rodea podría ser una rebanada tridimensional de un mundo de dimensión superior. Una brana es una región determinada del espacio-tiempo que se extiende sólo en una rebanada (posiblemente multidimensional) del espacio. La palabra *membrana* motivó la elección de la palabra *brana* porque las membranas, como las branas, son láminas que o bien rodean o bien pasan a través de una sustancia. Algunas branas son «rebanadas» que están dentro del espacio, mientras que otras son «rebanadas» que acotan el espacio, como las rebanadas de pan de un bocadillo.

En todo caso, una brana es un dominio que tiene menos dimensiones que el

espacio total de dimensión superior que lo rodea o lo limita[M5] . Obsérvese que las membranas cuentan con dos dimensiones, mientras que las branas pueden tener cualquier número de dimensiones. Aunque las branas que más van a interesarnos tienen tres dimensiones espaciales, la palabra *brana* se refiere a todas las «rebanadas» de este tipo; algunas branas tienen tres dimensiones espaciales, pero otras branas tienen más (o menos[M6]). Usaremos el término *3-branas* para referirnos a las branas con tres dimensiones, *4-branas* para referirnos a las branas con cuatro dimensiones, y así sucesivamente.

Branas confinantes y branas sumergidas

En el capítulo anterior he explicado por qué es posible que no podamos ver las dimensiones extras. Podrían estar enrolladas en espacios tan pequeños que nunca aparecerían pruebas de su existencia. El punto clave era que las dimensiones extras serían pequeñas. Ninguna de las razones de la invisibilidad de las dimensiones extras invocaba el hecho de que estuvieran enrolladas.

Esto sugiere una posibilidad alternativa: quizá las dimensiones no estén enrolladas, sino que sencillamente se terminan a una distancia finita. Como las dimensiones que se desvanecen en la nada son peligrosas en potencia —no queremos que haya trozos del universo que se caigan al terminarse éste—, tiene que haber fronteras para las dimensiones finitas que les digan dónde y cómo terminar. La cuestión es: ¿qué les pasa a las partículas y a la energía cuando alcanzan estos límites?

La respuesta es que encuentran una brana. En un mundo de dimensión superior, las branas serían las fronteras del espacio total de dimensión superior, que se conoce como el *bulto* (*bulk* , en inglés). Al contrario que las branas, el bulto se extiende en todas direcciones. El bulto cubre todas las dimensiones, tanto dentro de la brana como fuera de ella (véase la figura 25). El bulto es, por lo tanto, «abultado», mientras que, en comparación, la brana es plana (en algunas dimensiones), como una torta. Si las branas bordearan el bulto en ciertas direcciones, algunas de las dimensiones del bulto serían paralelas a la brana, mientras que otras dimensiones partirían de ella. Si la brana es la frontera, las dimensiones que salen de la brana se extenderían solamente a partir de uno de los lados.

FIGURA 25. Una brana es una superficie de dimensión inferior con direcciones sobre ella y direcciones que parten de ella, adentrándose en el bulto de dimensión superior.

Para comprender la naturaleza de las dimensiones finitas que terminan en branas, consideremos una cañería muy larga y muy fina. Dentro de la cañería hay tres dimensiones: una larga y dos cortas. Para establecer una analogía más directa con las branas planas, imaginemos que nuestra cañería tiene su sección transversal cuadrada. Una cañería infinitamente larga de este tipo tendría cuatro tabiques rectos infinitamente largos. Si la cañería fuese un universo por derecho propio, se trataría de un universo con tres dimensiones, dos de las cuales estarían acotadas en cada lado por tabiques y otra que se

extendería infinitamente lejos.

Sabemos que una cañería larga y fina, cuando la vemos desde lejos o sin la resolución suficiente, parece unidimensional, como la manguera del capítulo anterior. Pero podemos preguntarnos también, como hicimos en el caso del universo de la manguera, cómo sería el universo de la cañería —consistente en la cañería y su interior— para un ser consciente que viviera dentro de él.

Como podemos suponer, todo dependerá de la resolución de este ser. Una mosca que se pudiera mover libremente dentro de la cañería cuadrada experimentaría este universo como un universo tridimensional. Al contrario de lo que supusimos en el ejemplo bidimensional de la manguera, estamos imaginando ahora que la mosca puede moverse dentro de la cañería y no sólo sobre su superficie. No obstante, como en la manguera, la mosca sentiría que la única dimensión larga es distinta de las otras dos. La mosca podría ir arbitrariamente lejos en una dirección (si suponemos que la cañería es muy larga o infinita), mientras que en las otras dos direcciones la mosca podría tan sólo recorrer una corta distancia, la anchura de la cañería.

Pero hay una diferencia entre el universo de la manguera y el universo de la cañería, aparte del número de dimensiones que presenta cada uno de ellos. Al contrario que el escarabajo del capítulo anterior, la mosca de la cañería puede viajar por el interior de ésta. De modo que a veces la mosca encuentra tabiques. Puede ir hacia delante o hacia atrás, hacia arriba o hacia abajo, y llegar a una linde. El escarabajo de la manguera, sin embargo, nunca llegaría a una linde así: en vez de eso, lo que haría es dar vueltas y más vueltas.

Ha de haber reglas que dicten qué le sucederá a la mosca cuando llegue a la frontera de su universo de la cañería. Los tabiques de la cañería determinan lo que va a pasar. La mosca podría chocar con el tabique y quedarse allí aplastada; o la cañería podría ser reflectante, de modo que la mosca rebotase. Si la cañería fuese un auténtico universo limitado por branas, entonces las branas, que serían bidimensionales, determinarían qué es lo que ocurriría si una partícula, o cualquier otra cosa que pueda portar energía, llegase hasta ellas.

Cuando las cosas llegan a una brana confinante, rebotan hacia atrás, exactamente igual a como lo hacen las bolas de billar al llegar al borde de la mesa o la luz al incidir en un espejo. Esto es un ejemplo de lo que los físicos llaman una *condición de frontera reflexiva* . Si las cosas rebotan al llegar a una brana, no se pierde energía; ésta no es absorbida por la brana ni se desvanece en la nada. Nada pasa más allá de la brana. Las branas confinantes son los «confines del mundo».

En un universo multidimensional, las branas representan el papel de los tabiques fronterizos del ejemplo anterior del universo de la cañería. Como los tabiques, estas branas tendrían una dimensión inferior a la del espacio total; un tabique siempre tiene una dimensión inferior a la del objeto que delimita. Esto es igual de cierto para la frontera del espacio como lo es para la corteza que constituye la frontera de una hogaza de pan. Es también cierto para los tabiques de nuestra casa, que tienen una dimensión inferior a la de la habitación que delimitan; la habitación es tridimensional, mientras que

cualquier tabique individual se extiende solamente en dos dimensiones (si ignoramos su grosor).

Aunque hasta ahora en esta sección solamente he considerado branas que hacen de fronteras, las branas no siempre se sitúan en el borde del bulto. Podrían existir, en principio, en cualquier parte del espacio. En particular, las branas podrían estar separadas de la frontera, en el interior del espacio. Si una brana confinante es como una fina corteza en la que termina una hogaza de pan, una brana no confinante sería como una fina rebanada de pan dentro de la misma hogaza. Una brana que no es confinante seguiría siendo un objeto con dimensión inferior, como las que hemos considerado hasta ahora. Pero las branas no confinantes tendrían un bulto de dimensión superior a ambos lados.

En la sección siguiente veremos que sea cual sea el número de dimensiones del bulto o de la brana, y ya estén las branas dentro del espacio o en sus orillas, las branas pueden atrapar partículas y fuerzas en ellas. Esto hace que la región del espacio que ocupan sea muy especial.

Atrapados en las branas

Es muy poco probable que alguno de nosotros explore todo el espacio que está a su alcance. Existen seguramente lugares que nos gustaría haber visitado y viajes que nunca emprenderemos, por ejemplo al espacio estelar o al fondo del mar. Nunca hemos estado en estos sitios, pero en principio podríamos visitarlos. No hay ninguna ley física que lo haga imposible.

No obstante, si viviéramos dentro de un agujero negro, nuestras oportunidades de viajar estarían limitadas mucho más drásticamente, más restringidas incluso que las de las mujeres de Arabia Saudí. El agujero negro (hasta que fuera desintegrándose) nos retendría (o más bien retendría nuestras versiones mutiladas del mundo del agujero negro) atrapándonos en su interior y nunca podríamos escapar.

Hay ejemplos mucho más familiares de cosas con una libertad de movimientos limitada para las que existen regiones del espacio que son realmente inaccesibles. La carga eléctrica de un cable o la cuenta de un ábaco son dos objetos que viven en un mundo tridimensional, pero que se desplazan sólo en una de sus dimensiones. Hay también cosas muy comunes que se encuentran confinadas en superficies bidimensionales. Las gotas de agua que han salpicado la cortina de baño se desplazan sólo a lo largo de la superficie bidimensional de la cortina (véase la figura 26). Las bacterias atrapadas entre dos placas de microscopio también experimentan solamente movimientos bidimensionales. Otro ejemplo es el juego de Sam Loyd de los quince cuadritos, ese juego inquietante que consiste en un marquito de plástico con fichas que llevan letras y que hay que ir desplazando hasta que queden ordenadas de manera correcta en el cuadrado y pueda leerse algo así como «MIRA/YAES/TÁHE/CHO» (véase la figura 27). Si no hacemos trampa, las letras permanecen todo el tiempo dentro de su marco de plástico y nunca pueden moverse en una tercera dimensión.

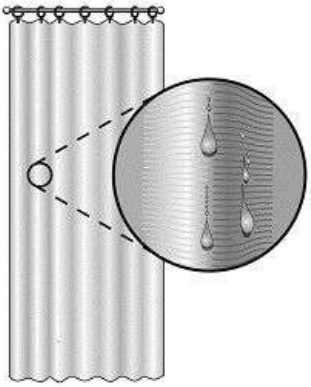


FIGURA 26. Las gotas de agua adheridas a una cortina de baño bidimensional en una estancia tridimensional.

Las branas, como las cortinas de baño y el juego de Loyd de los quince cuadritos, atrapan cosas en superficies de dimensión inferior. Introducen la posibilidad de que en un mundo con dimensiones adicionales no toda la materia sea libre para desplazarse a cualquier sitio. Así como las gotas de agua sobre la cortina están confinadas en una superficie bidimensional, las partículas o las cuerdas pueden estar confinadas en una brana tridimensional situada en un mundo de dimensión superior. Pero, al contrario de lo que sucede con las gotas de la cortina, ellas sí que están de verdad atrapadas. Y a diferencia del juego de los quince cuadritos, las branas no son arbitrarias. Son actrices naturales en un mundo de dimensión superior.



FIGURA 27. El juego de los quince cuadritos de Sam Loyd.

Las partículas confinadas en las branas están de verdad atrapadas en esas branas por las leyes físicas. Los objetos acotados por una brana nunca se aventuran a salir a las dimensiones extras que se extienden fuera de aquélla. No todas las partículas van a estar atrapadas en las branas; algunas podrían ser libres para desplazarse por el bulto. Pero lo que distingue a las teorías con branas de las teorías multidimensionales sin ellas son las partículas que viven

en las branas, las que no se desplazan en todas las dimensiones.

En principio, las branas y el bulto podrían tener cualquier número de dimensiones, aunque la brana nunca tiene más dimensiones que el bulto. *La dimensionalidad de una brana* es el número de dimensiones en las que las partículas confinadas en la brana tienen permitido desplazarse. Aunque hay muchas posibilidades, las branas que nos resultarán más interesantes posteriormente son las tridimensionales. No sabemos por qué las tres dimensiones son, en apariencia, tan especiales. Pero las branas con tres dimensiones espaciales acaso sean relevantes para nuestro mundo, llegado el caso de que puedan extenderse a lo largo de las tres dimensiones espaciales que conocemos. Estas branas podrían aparecer en un bulto con cualquier número de dimensiones que sea superior a tres: cuatro, cinco o más dimensiones.

Aunque el universo tuviera muchas dimensiones, si las partículas y las fuerzas con las que estamos familiarizados están atrapadas en una brana que se extiende en tres dimensiones, se comportarían de todos modos como si vivieran solamente en tres dimensiones. Las partículas confinadas en la brana se desplazarían solamente a lo largo de ésta. Y si la luz estuviera también atrapada en la brana, los rayos de luz se propagarían sólo a lo largo de la brana. En una brana tridimensional, la luz se comportaría exactamente igual que en un universo de verdad tridimensional.

Además, las fuerzas atrapadas en una brana solamente ejercen su influencia sobre las partículas que están confinadas en esa misma brana. El material del que estamos compuestos, como los núcleos y los electrones, y las fuerzas con las que interactúan estos ladrillos constitutivos, como la fuerza eléctrica, podrían estar confinados en una brana tridimensional. Las fuerzas confinadas en la brana se propagarían solamente a lo largo de la brana, y las partículas confinadas en la brana se intercambiarían y se desplazarían únicamente a lo largo de las dimensiones de la misma.

De modo que si viviéramos en una brana tridimensional así, podríamos desplazarnos libremente a lo largo de sus dimensiones, lo mismo que hacemos ahora en tres dimensiones. Todo lo que esté confinado en una brana tridimensional tendría el mismo aspecto si el mundo fuera de verdad tridimensional. Las otras dimensiones existirían adyacentes a la brana, pero las cosas atrapadas en una brana tridimensional nunca penetrarían en el bulto circundante de dimensión superior.

Pero aunque las fuerzas y la materia puedan estar atrapadas en una brana, los mundos brana son interesantes precisamente porque sabemos que no todo está confinado en una única brana. La gravedad, por ejemplo, nunca está confinada en una brana. Según la relatividad general, la gravedad está entrelazada en el marco del espacio y del tiempo. Esto significa que la gravedad debe ejercerse por todo el espacio y en todas las dimensiones. Si pudiera confinarse en una sola brana, nos veríamos obligados a abandonar la relatividad general.

Afortunadamente, éste no es el caso. Aunque existan las branas, la gravedad se sentirá en todas partes, dentro y fuera de las branas. Esto es importante

porque implica que los mundos brana han de interactuar con el bulto, aunque sólo sea a través de la gravedad. Como la gravedad se extiende al bulto y todo interactúa a través de ella, los mundos brana siempre estarán conectados con las dimensiones extras. Los mundos brana no existen aislados: son parte de una totalidad más grande con la que interactúan. Es concebible que puedan existir, además de la gravedad, otras partículas y fuerzas en el bulto. Si existieran, estas partículas podrían también interactuar con las partículas confinadas en una brana y conectar así las partículas confinadas por la brana con el bulto de dimensión superior.

Las branas de la teoría de cuerdas que consideraremos brevemente más adelante tienen propiedades específicas, además de las que ya he mencionado: pueden llevar ciertas cargas y pueden responder en cierto modo cuando algo las estimula. Sin embargo, insistiré rara vez en estas propiedades detalladas cuando hable más tarde de las branas. Será suficiente conocer las propiedades que he considerado en este capítulo: las branas son superficies de dimensión inferior que pueden alojar fuerzas y partículas, y pueden ser también las fronteras del espacio de dimensión superior.

Los mundos brana: estampas de una estructura gimnástica de branas

Como las branas podrían atrapar la mayor parte de las partículas y fuerzas, el universo en el que vivimos podría estar alojado en principio en una brana tridimensional que esté flotando en un océano extradimensional. La gravedad se extendería también por las dimensiones extras, pero las estrellas, los planetas, la gente y todo lo demás que vemos podría estar confinado en una brana tridimensional. Estaríamos viviendo entonces en una brana. Nuestro hábitat podría ser una brana. El concepto de mundo brana se basa en esta suposición (véase la figura 28).

FIGURA 28. Podríamos estar viviendo en una brana. O sea, la materia de la que estamos hechos, los fotones y las demás partículas del modelo estándar pueden estar todos en la brana. Pero la gravedad está siempre en todas partes, en la brana y en el bulto, como ilustran las líneas rizadas.

Si puede haber una brana suspendida en un espacio-tiempo de dimensión superior, no se puede negar la posibilidad de que haya muchas más. Las hipótesis que trabajan con mundos brana suelen involucrar más de una sola brana. Todavía no sabemos ni el número ni los tipos de branas que podrían estar presentes en el cosmos. A veces a las teorías con más de una brana se las vincula a la palabra *multiverso* (véase la figura 29). La gente suele usar esta palabra para describir un cosmos con trozos que no interactúan entre sí o que interactúan muy débilmente.

FIGURA 29. El universo puede contener múltiples branas que interactúan sólo a través de la gravedad o que no interactúan absolutamente nada. Estos mundos hipotéticos se llaman a veces multiversos.

A mí el término *multiverso* me parece un poco extraño, ya que por definición un universo es una totalidad que está constituida por la unión de sus partes. Es posible, sin embargo, tener diferentes branas que están tan separadas que ni siquiera pueden comunicarse entre ellas, o que pueden hacerlo sólo

débilmente, mediante partículas mediadoras que se trasladan entre ellas. Las partículas de branas distantes resultarían influenciadas entonces por fuerzas totalmente diferentes y las partículas confinadas en una brana nunca tendrían contacto directo con las partículas confinadas en otras branas. Así que cuando haya varias branas con ninguna fuerza en común salvo la gravedad, me referiré ocasionalmente al universo que las cobija con el término *multiverso* .

Al pensar en las branas se da uno cuenta de lo poco que sabemos sobre el espacio en el que vivimos. El universo podría ser una composición magnífica que enlazase branas intermitentes. Aunque conozcamos los ingredientes básicos, en un multiverso poblado por más de una brana son concebibles nuevas perspectivas exóticas tocantes a la geometría del espacio, así como miríadas de posibilidades para explicar el modo en el que las partículas que conocemos y las que no conocemos se reparten entre ellas. Un solo mazo de naipes puede producir muchas manos diferentes. Hay montones de posibilidades.

Otras branas podrían ser paralelas a la nuestra y albergar mundos paralelos. Pero podrían existir también otros tipos de mundos brana. Las branas podrían cortarse entre sí y las partículas podrían quedar atrapadas en las intersecciones. Las branas podrían tener distintas dimensiones. Podrían curvarse. Podrían moverse. Podrían enrollarse a lo largo de dimensiones invisibles. Podemos dejar volar la imaginación y pintar la escena que queramos. No es imposible que exista una geometría así en el cosmos.

En un mundo en el que las branas están inmersas en un bulto de dimensión superior, podría haber partículas que exploran las dimensiones superiores y otras que permanecen atrapadas en las branas. Si el bulto separa una brana de otra, unas partículas pueden estar en la primera brana, otras en la segunda y otras en medio. Hay teorías que nos describen las múltiples maneras posibles de distribuirse las partículas y las fuerzas por las diversas branas y el bulto. Incluso para las branas que se deducen de la teoría de cuerdas, no sabemos todavía por qué la teoría de cuerdas opta por una distribución concreta de partículas y fuerzas. Los mundos brana introducen nuevas perspectivas físicas que podrían describir el mundo que creemos conocer y también otros mundos que no conocemos en otras branas que tampoco conocemos, separadas de nuestro mundo en dimensiones ocultas.

Podrían existir nuevas fuerzas confinadas en branas distantes. En estas otras branas podrían, quizá, propagarse nuevas partículas con las que nunca lograremos interactuar directamente. Podría haber un relleno adicional distribuido por diferentes branas, o incluso por el bulto y por otras branas, que diera cuenta de la materia oscura y de la energía oscura, que son la materia y la energía que conjeturamos partiendo de sus efectos gravitatorios, pero cuya identidad es un misterio. Y la gravedad podría incluso tener un efecto distinto sobre las partículas al pasar de una brana a la siguiente.

Si existe vida en otra brana, lo más probable es que esos seres, aprisionados en un entorno completamente diferente, sientan fuerzas completamente distintas que serían detectadas por sentidos distintos. Nuestros sentidos están adaptados a la química, a la luz y al sonido que nos rodea. Como es

probable que las fuerzas y las partículas fundamentales sean distintas, las criaturas de otras branas, si existieran, no tendrían, posiblemente, mucho parecido con la vida de nuestra brana. Las otras branas serán seguramente muy distintas a la nuestra. La única fuerza que han de compartir es la gravedad, e incluso la influencia de la gravedad puede cambiar.

Las consecuencias de un mundo brana dependerán del número y de los tipos de branas, así como de dónde están localizadas. Por desgracia para los curiosos, las partículas y las fuerzas confinadas en branas distantes no tienen por qué influir sobre nosotros muy intensamente. Podrían determinar simplemente lo que se traslada en el bulto, y emitir señales débiles que a lo mejor no llegan nunca hasta nosotros. Por lo tanto, muchos de los mundos brana concebibles, aunque existan, serán muy difíciles de detectar. En definitiva, la gravedad es la única interacción que sin duda comparte el bulto de nuestra brana con el bulto de cualquier otra brana, y la gravedad es una fuerza en extremo débil. Sin pruebas directas, las demás branas se quedarán enclaustradas en el reino de la teoría y de la conjetura.

Pero algunos de los mundos brana que voy a presentar sí podrían conducir a señales detectables. Los mundos brana detectables son los que tienen consecuencias en los rasgos físicos de nuestro mundo. Aunque la proliferación de mundos brana posibles resulte frustrante en algunos aspectos, es realmente muy estimulante. Las branas podrían servir no sólo para resolver algunos problemas de la física de partículas que están pendientes desde hace tiempo, sino que, además, con un poco de suerte, si una de las posibilidades que voy a describir es cierta, muy pronto aparecerían pruebas de los mundos brana en los experimentos de la física de partículas elementales. Podríamos estar viviendo realmente en una brana, y podríamos, de hecho, saberlo con certeza dentro de una década.

Por ahora ignoramos cuál de las posibilidades, de las muchas que hay, es la auténtica descripción del universo. Dejaré abiertas, por lo tanto, todas las opciones, para no omitir nada interesante. Sean cuales sean los factores que describan nuestro mundo, las opciones que voy a presentar involucran ideas nuevas y fascinantes cuya posibilidad nadie se habría atrevido a defender anteriormente.

4

PLANTEAMIENTOS DE LA FÍSICA TEÓRICA

She’s a model and she’s looking good.

[Es una modelo y tiene buen aspecto].

KRAFTWERK

—Oye, Atenea, ¿eso que estás viendo es Casablanca?

—Claro. ¿Quieres quedarte? Esta escena es muy bonita.

Recuerda esto que te digo,

un beso es sólo un beso,

un suspiro es sólo un suspiro.

Las cosas importantes cuentan sólo el tiempo que duran.

—Espera, Ike. ¿No crees que ese último verso es un poco raro? Se supone que es una escena romántica, pero eso suena casi como si se tratase de una clase de física.

—Pues si eso te parece tan extraño, tienes que oír lo que dicen los primeros versos del original:

Estos tiempos que vivimos,

son motivo de aprensión,

con sus apuros e inventos nuevos,

y cosas como la cuarta dimensión,

todavía nos cansa un poquito

la teoría del señor Einstein…

—¿No pensarás que voy a creerme eso, verdad? Ya sé lo que me vas a decir ahora: ¡que Rick e Ilsa se escapan a la séptima dimensión! ¿Por qué no nos olvidamos de lo que te he dicho y seguimos viendo la película?

Einstein presentó la teoría de la relatividad general a principios del siglo XX, y hacia 1931 Rudy Vallee había grabado ya la versión de Ike (que es

auténtica) de la canción de Herman Hupfeld. Sin embargo, cuando Sam tocaba esta melodía en Casablanca, la letra omitida —y también la ciencia del espacio-tiempo— hacía ya mucho que había caído en el olvido para la cultura popular. Y aunque Theodor Kaluza había vuelto a introducir la idea de una dimensión extra en 1919[17] , los físicos no se tomaron demasiado en serio la idea hasta hace muy poco.

Ahora que hemos visto *qué* son las dimensiones y *cómo* podrían escapar a nuestra percepción, estamos preparados para preguntarnos qué es lo que provocó este interés renovado hacia las dimensiones extras. ¿Por qué los físicos habrían de creer que podrían, de hecho, existir en el mundo físico real? Esto va a requerir una explicación bastante más larga, que involucra algunos de los desarrollos más significativos de la física del siglo pasado. En los próximos capítulos, antes de lanzarme a una descripción de los posibles universos extradimensionales, revisaré estos desarrollos y explicaré por qué sirven como precursores de teorías más recientes. Revisaremos los principales cambios de paradigma que se produjeron a principios del siglo XX (la mecánica cuántica, la relatividad general), la esencia de la física de partículas actual (el modelo estándar, la simetría, la ruptura de la simetría, el problema de la jerarquía) y las nuevas ideas que tratan de abordar los problemas que hoy día están sin resolver (la supersimetría, la teoría de cuerdas, las dimensiones extras y las branas).

Sin embargo, antes de sumergirnos en estos asuntos, en este capítulo realizaremos un breve viaje por el interior de la materia para dejar instalado el escenario físico. Y como comprender hacia dónde nos encaminamos exige también cierta familiaridad con los tipos de razonamiento que emplean hoy los físicos teóricos, consideraremos los planteamientos teóricos que son fundamentales en los avances más recientes.

Al principio pensé que «las cosas importantes cuentan» era una cita de una canción muy bien elegida. Pero después de pensarlo mejor, las palabras sonaban tanto a física que decidí comprobar que la memoria no me estaba engañando, como pasa a veces con las letras de las canciones, incluso con las que uno piensa que tiene grabadas en la cabeza. Me quedé muy sorprendida (y encantada) cuando descubrí que la canción hundía sus raíces en la física más de lo que yo había imaginado. Lo que desde luego no había comprendido es que «el tiempo que duran» se refería ¡a la cuarta dimensión!

Las ideas físicas pueden funcionar como este descubrimiento; unos indicios insignificantes revelan a veces conexiones imprevistas. Con suerte, lo que encontramos es mejor que lo que buscábamos, pero tenemos que buscar en el sitio adecuado. En física, una vez que descubrimos relaciones, a veces siguiendo pistas muy tenues, buscamos su significado de la manera que mejor nos parece. Ésta puede consistir a veces en conjeturas ortodoxas o en intentos de deducir las consecuencias matemáticas de una teoría en la que creemos que podemos confiar.

En la siguiente sección consideraremos los métodos modernos que se usan para seguir esas pistas: la construcción de modelos (mi fuerte) y el planteamiento alternativo de la física fundamental de altas energías, la teoría de cuerdas. Los especialistas de la teoría de cuerdas tratan de deducir

predicciones universales a partir de una teoría precisa, mientras que los constructores de modelos procuran encontrar caminos para resolver problemas físicos concretos y construir luego teorías en función de estos puntos de partida. Tanto los constructores de modelos como los especialistas en teoría de cuerdas buscan teorías más amplias que tengan más capacidad explicativa. Se proponen responder a las mismas cuestiones, pero las abordan de modo diferente. La investigación implica a veces conjeturas ortodoxas, como en el caso de la construcción de modelos, y otras, la deducción de consecuencias lógicas de la teoría establecida que pensamos de antemano que es correcta, como en el caso de la teoría de cuerdas. Pronto veremos que las investigaciones recientes sobre las dimensiones extras combinan con éxito elementos de ambos métodos.

La construcción de modelos

Aunque en un principio me sentí atraída hacia las matemáticas y las ciencias por la certeza que prometían, hoy considero las cuestiones sin contestar y las conexiones inesperadas casi igual de atractivas. Los principios contenidos en la mecánica cuántica, en la relatividad y en el modelo estándar ensanchan la imaginación, pero apenas arañan la superficie de las extraordinarias ideas que hoy absorben a los físicos. Sabemos que se precisa algo nuevo por las deficiencias que presentan las ideas existentes. Esos déficit son el presagio de fenómenos físicos novedosos que surgirán cuando hagamos experimentos más precisos.

La física de partículas trata de encontrar las leyes de la naturaleza que explican cómo se comportan las partículas elementales. Estas partículas, y las leyes físicas que obedecen, son componentes de lo que los físicos llaman una *teoría* , un conjunto acabado de elementos y principios con reglas y ecuaciones para predecir cómo interactúan esos elementos. Cuando hable de teorías en este libro, siempre usaré la palabra en este sentido; nunca me referiré a «meras especulaciones», como podría ocurrir al usar la palabra en estilo coloquial.

Idealmente, los físicos querrían encontrar una teoría capaz de explicar todas las observaciones, que usase un conjunto de reglas lo más austero posible y el menor número posible de ingredientes fundamentales. El propósito último de algunos físicos es encontrar una teoría unificadora, sencilla y elegante que pueda emplearse para predecir el resultado de cualquier experimento de la física de partículas.

La búsqueda de una teoría unificadora así es una tarea ambiciosa y algunos dirían que audaz. Pero en varios aspectos refleja la búsqueda de la simplicidad, que comenzó hace mucho tiempo. En la antigua Grecia, Platón imaginó formas perfectas, como figuras geométricas y seres ideales, a las que los objetos terrenales simplemente se aproximan. Aristóteles también creyó en las formas ideales, pero pensó que solamente las observaciones pueden revelar los ideales a los que se parecen los objetos físicos. Las religiones también suelen postular un estado más perfecto o unificado que se encuentra separado de la realidad, pero que a veces tiene conexiones con ella. La historia de la caída en el Jardín del Edén supone la existencia de un mundo previo idealizado. Aunque las cuestiones y métodos de la física moderna son

muy diferentes de los de nuestros ancestros, los físicos también están buscando un universo más sencillo, no en la filosofía o en la religión, sino en los ingredientes fundamentales que constituyen nuestro mundo.

Sin embargo, existe un impedimento obvio para encontrar una teoría elegante con la que podamos conectar nuestro mundo: cuando miramos a nuestro alrededor, vemos muy poco de la simplicidad que una teoría semejante debería encarnar. El problema es que el mundo es complejo. Cuesta mucho trabajo conectar una formulación simple y parca con el mundo real, que es mucho más complicado. Una teoría unificada, siendo sencilla y elegante, tiene, sin embargo, que contener una estructura suficiente para explicar las observaciones. Nos gustaría creer que existe una perspectiva desde la cual todo es elegante y predecible. Sin embargo, el universo no es tan puro, sencillo y ordenado como las teorías con las cuales pretendemos describirlo.

Los físicos de partículas gestionan el terreno que conecta la teoría y las observaciones con dos metodologías distintas. Por un lado, algunos teóricos siguen un planteamiento que va «de arriba abajo»: parten de las teorías que creen que son correctas —por ejemplo, los especialistas en teoría de cuerdas parten de la teoría de cuerdas— y tratan de deducir sus consecuencias de modo que se puedan conectar con el mundo que observamos, que es mucho más desordenado. Por otro lado, los constructores de modelos siguen un planteamiento que va «de abajo arriba»: tratan de deducir una teoría subyacente, estableciendo conexiones entre las partículas elementales observadas y sus interacciones. Buscan claves en los fenómenos físicos. Construyen modelos, que son teorías de prueba que pueden resultar correctas o no. Ambos enfoques tienen sus méritos y sus deficiencias, y la mejor ruta hacia el progreso no siempre es evidente.

El conflicto entre estos dos enfoques científicos es interesante porque refleja dos modos muy diferentes de cultivar la ciencia. Esta división es la última reencarnación de un largo debate de la historia de la ciencia. ¿Seguimos el planteamiento de Platón, que trata de conseguir ideas a partir de verdades más fundamentales, o el de Aristóteles, enraizado en las observaciones empíricas? ¿Tomamos el camino que va de arriba abajo o el que va de abajo arriba?

El dilema podría también expresarse con el rótulo de «El viejo Einstein frente al joven Einstein». Cuando Einstein era joven basaba su trabajo en los experimentos y en la realidad física. Hasta ciertos experimentos que hizo, y que suelen calificarse de experimentos mentales, estaban basados en situaciones físicas. Einstein cambió su punto de vista después de comprender el valor de las matemáticas al desarrollar la teoría de la relatividad general. Descubrió que los avances matemáticos eran cruciales para completar su teoría, lo cual lo condujo a usar métodos más teóricos durante el resto de su carrera. Sin embargo, fijarse en Einstein no resolverá el problema. A pesar del éxito que tuvo con la aplicación de las matemáticas a la relatividad general, su búsqueda matemática posterior de una teoría unificada nunca dio frutos.

Como mostraron las investigaciones de Einstein, hay diferentes tipos de verdad científica y diferentes modos de encontrarlos. Uno, se basa en las

observaciones; así es como descubrimos los cuásares y los púlsares, por ejemplo. El otro se basa en principios abstractos y en la lógica: por ejemplo, Karl Schwarzschild vio en primera instancia que los agujeros negros eran una consecuencia matemática de la relatividad general. A la postre, lo que nos gustaría es que estos dos tipos de verdad convergieran —la existencia de los agujeros negros se ha deducido ahora tanto a partir de la descripción matemática de las observaciones como de la teoría pura—, pero, en las primeras fases de la investigación, los avances que se consiguen con cada uno de los dos tipos de verdad raramente coinciden. Y en el caso de la teoría de cuerdas, los principios y las ecuaciones no están tan bien asentados como los de la relatividad general, y esto torna mucho más difícil la deducción de sus consecuencias.

Cuando la teoría de cuerdas saltó a la fama, dividió limpiamente el mundo de la física de partículas. Yo era estudiante predoctoral a mitad de los años ochenta, cuando la «revolución de las cuerdas» hizo pedazos el mundo de la física de partículas. En aquel momento, una comunidad de físicos decidió entregarse en cuerpo y alma al etéreo reino matemático de la teoría de cuerdas.

La premisa básica de la teoría de cuerdas es que las cuerdas —y no las partículas— son los objetos más fundamentales de la naturaleza. Las partículas que observamos en el mundo que nos rodea son meras consecuencias de las cuerdas: surgen de los distintos modos de vibración de una cuerda oscilatoria, así como las diferentes notas musicales surgen de una cuerda vibrante de violín. La teoría de cuerdas ganó adeptos porque los físicos buscaban una teoría que incluyera de modo consistente la mecánica cuántica y la relatividad general, y que permitiera hacer predicciones a escalas de distancia lo más diminutas que se pudiese concebir. A muchos les pareció que la teoría de cuerdas era la candidata más prometedora para encarnar dicha teoría.

Sin embargo, otro grupo de físicos decidió seguir en contacto con el mundo de las energías relativamente bajas que podía ser explorado con los experimentos. Yo estaba entonces en Harvard, y los físicos de partículas de allí —entre los que figuraban Howard Georgi y Sheldon Glashow, excelentes constructores de modelos, y muchos otros brillantes colegas postdoctorales y estudiantes— estuvieron entre los incondicionales que continuaron fieles al enfoque de la construcción de modelos.

Pronto las pugnas entre los méritos de los dos puntos de vista opuestos —la teoría de cuerdas y la construcción de modelos— fueron feroces; cada bando reclamaba para sí la posesión de fundamentos más firmes en el camino hacia la verdad. Los constructores de modelos pensaban que los especialistas de la teoría de cuerdas vivían en un país de ensueños matemáticos, mientras que los consagrados a la teoría de cuerdas consideraban que los constructores de modelos estaban perdiendo el tiempo y dando la espalda a la verdad.

En parte, porque en Harvard había muchos brillantes constructores de modelos y, en parte, porque a mí me encantaba el reto de la construcción de modelos, cuando entré en el mundo de la física de partículas me quedé en este bando. La teoría de cuerdas es una teoría magnífica que ha conducido ya

al descubrimiento de ideas físicas y matemáticas profundas, y que muy bien podría contener los ingredientes correctos para terminar describiendo la naturaleza. Pero encontrar la conexión entre la teoría de cuerdas y el mundo real es una tarea intimidante. El problema es que la teoría de cuerdas se encuentra definida en una escala de energías que es diez mil billones de veces más grande que la que podemos explorar experimentalmente con los instrumentos actuales. Todavía no sabemos siquiera lo que puede pasar cuando la energía de los aceleradores de partículas se multiplique ¡por un factor de diez!

Un enorme abismo teórico separa la teoría de cuerdas, tal y como ahora se entiende, de las predicciones que describen nuestro mundo. Las ecuaciones de la teoría de cuerdas describen objetos que son tan increíblemente minúsculos y que poseen una energía tan extraordinariamente elevada que cualquier detector imaginable que pudiéramos construir con tecnologías concebibles posiblemente no podría ni siquiera verlos. El problema no es sólo que resulta un desafío matemático tremendo deducir las predicciones y las consecuencias de la teoría de cuerdas, sino que ni siquiera está siempre claro cómo organizar los ingredientes de la teoría de cuerdas y determinar el problema matemático que hay que resolver. Es demasiado fácil perderse en este bosque de detalles.

La teoría de cuerdas puede conducir a toda una plétora de predicciones posibles a las distancias que de hecho podemos ver, ya que las partículas que se predicen dependen de la configuración de ingredientes fundamentales de la teoría que están todavía sin determinar. Sin algunas suposiciones especulativas, parece que la teoría de cuerdas contiene una mayor cantidad de partículas, fuerzas y dimensiones que las que vemos en nuestro mundo. Necesitamos saber qué es lo que mantiene separadas las partículas, las fuerzas y las dimensiones extras de las visibles. Todavía desconocemos qué propiedades físicas, si las hay, son las que favorecen una configuración entre todas, y ni siquiera sabemos cómo encontrar una sola manifestación de la teoría de cuerdas que concuerde con nuestro mundo. Nos haría falta mucha suerte para obtener todos los principios físicos correctos que hagan que las predicciones de la teoría de cuerdas concuerden con lo que vemos.

Por ejemplo, las dimensiones extras invisibles de la teoría de cuerdas tienen que ser diferentes de las tres que vemos. La gravedad de la teoría de cuerdas es más compleja que la gravedad que vemos a nuestro alrededor, la fuerza que hizo que la manzana de Newton cayera sobre su cabeza. En contraste, la gravedad de la teoría de cuerdas opera en seis o siete dimensiones adicionales del espacio. Por fascinante y notable que sea la teoría de cuerdas, sus propiedades desconcertantes, como las dimensiones extras, enturbian su conexión con el universo visible. ¿Qué es lo que distingue esas dimensiones extras de las visibles? ¿Por qué no son todas iguales? El descubrir el cómo y el porqué la naturaleza oculta esas dimensiones extras de la teoría de cuerdas sería un logro fenomenal, que haría que mereciera la pena investigar todas las posibles maneras en las que esto puede ocurrir.

Hasta ahora, sin embargo, todos los intentos para hacer realista la teoría de cuerdas han tenido visos de operación de cirugía estética. Para hacer que sus predicciones concuerden con nuestro mundo, los teóricos deben encontrar

modos de descartar piezas que no tendrían que estar ahí, de quitar partículas y de esconder con recato las dimensiones que sobran. Aunque los conjuntos resultantes de partículas se parezcan de un modo seductor al conjunto correcto, podemos, sin embargo, decir que no están del todo bien. La elegancia bien podría ser el sello de garantía de una teoría correcta, pero realmente sólo podemos juzgar la belleza de una teoría una vez que hemos comprendido por completo todas sus consecuencias. La teoría de cuerdas es cautivadora al principio, pero los especialistas que se dedican a su estudio tendrán que abordar en algún momento estos problemas fundamentales.

Cuando exploramos un territorio montañoso sin un mapa, rara vez podemos decir cuál será el camino más corto para llegar a nuestro destino. En el mundo de las ideas, como en terrenos complicados, el mejor camino que seguir no siempre está claro al principio. Aunque la teoría de cuerdas logre unificar finalmente todas las fuerzas y las partículas conocidas, no sabemos todavía si contiene un solo pico que represente un conjunto concreto de partículas, fuerzas e interacciones, o un paisaje más complejo con muchas implicaciones posibles. Si los caminos consistieran en retículos llanos y bien señalizados, encontrar la ruta sería muy sencillo. Pero este caso se presenta rara vez.

Así pues, el procedimiento para avanzar más allá del modelo estándar en el que haré hincapié es la construcción de modelos. El término *modelo* podría evocar un barco de guerra o un castillo a pequeña escala, de los que construíamos cuando éramos niños. O podríamos pensar en simulaciones numéricas hechas por un ordenador con el fin de reproducir algún proceso dinámico conocido: cómo crece, por ejemplo, una población o cómo se mueve el agua del mar. El modelado en la física de partículas no es lo mismo que lo que sugiere cualquiera de estas definiciones. Sin embargo, no es del todo diferente de lo que sugiere el uso de la palabra en las revistas o en los desfiles de moda: los modelos, tanto en las pasarelas como en la física, muestran creaciones imaginativas y se presentan bajo una gran variedad de versiones y formas. Y los que son bonitos atraen toda la atención.

No es preciso añadir que los parecidos terminan aquí. Los modelos de la física de partículas son conjeturas de teorías físicas alternativas que podrían constituir el fundamento del modelo estándar. Si pensamos en una teoría unificada como si fuera la cumbre de una montaña, los constructores de modelos serían los pioneros que tratan de encontrar el camino que conecta la tierra sólida de abajo, hecha con las teorías físicas bien establecidas, con el pico: el camino que por fin atará juntas las nuevas ideas. Aunque los constructores de modelos reconocen la fascinación de la teoría de cuerdas y la posibilidad de que ésta resulte cierta, a diferencia de los especialistas en la teoría de cuerdas, no están tan seguros de saber qué teoría encontrarán si alguna vez llegan a la cumbre.

Como veremos en el capítulo 7, el modelo estándar es una teoría física precisa con un conjunto fijo de partículas y de fuerzas que viven en un mundo de dimensión cuatro. Los modelos que van más allá del modelo estándar incorporan los ingredientes de este último y remedan sus consecuencias en energías que han sido ya exploradas, pero también contienen fuerzas, partículas e interacciones nuevas que pueden verse sólo a distancias más

cortas. Los físicos proponen estos modelos para abordar los enigmas actuales. Los modelos podrían insinuar comportamientos diferentes de las partículas conocidas o conjeturadas, comportamientos determinados por un nuevo conjunto de ecuaciones que sale de las suposiciones de un modelo dado. O podrían también insinuar un nuevo marco espacial, como los que exploraremos con dimensiones extras o branas.

Incluso en los casos en los que comprendemos plenamente una teoría y sus consecuencias, esa teoría puede implementarse de diferentes maneras, que podrían tener consecuencias físicas distintas en el mundo real en el que vivimos. Por ejemplo, aunque sepamos en principio cómo interactúan las partículas y las fuerzas, necesitamos también saber qué partículas y qué fuerzas concretas existen en el mundo real. Los modelos nos permiten poner a prueba las posibilidades existentes.

Las teorías se distinguen entre sí por las distintas suposiciones y conceptos físicos que asumen, fijando, por ejemplo, las escalas de distancia o energía para las que los principios de la teoría resultan válidos. Los modelos constituyen un camino para ir directos al núcleo de esas propiedades específicas. Nos permiten explorar las consecuencias potenciales de una teoría. Si pensamos que una teoría es como la guía de instrucciones generales para hacer un bizcocho, un modelo sería una receta precisa. La teoría diría que pongamos azúcar, pero el modelo precisaría si hay que poner media taza o dos. La teoría diría que se pueden añadir pasas, pero el modelo nos recomendaría ser sensatos y renunciar a ellas.

Los constructores de modelos examinan los aspectos que están sin resolver del modelo estándar y tratan de usar ingredientes teóricos conocidos para corregir sus insuficiencias. El enfoque de la construcción de modelos se alimenta de la percepción de que las energías para las cuales la teoría de cuerdas hace predicciones precisas están demasiado alejadas de las que podemos observar. Los constructores de modelos tratan de ver las cosas en su conjunto, de modo que les sea posible encontrar las piezas que podrían ser relevantes para nuestro mundo.

Los constructores de modelos admitimos con sentido pragmático que no somos capaces de deducirlo todo de inmediato. En vez de tratar de deducir las consecuencias de la teoría de cuerdas, intentamos distinguir qué ingredientes de la teoría física subyacente explicarán las observaciones conocidas y revelarán las relaciones entre los descubrimientos experimentales. Las hipótesis de un modelo podrían ser parte de la teoría subyacente definitiva, o podrían iluminar nuevas relaciones incluso antes de que comprendamos sus apuntalamientos teóricos más profundos.

La física siempre procura predecir el mayor número de magnitudes físicas a partir del más pequeño número de suposiciones, pero esto no significa que consigamos siempre identificar a primera vista las teorías más fundamentales. Los avances suelen llegar antes de que todo esté entendido a los niveles más profundos. Por ejemplo, los físicos comprendieron las nociones de «temperatura» y «presión» y las emplearon en termodinámica y en el diseño de máquinas mucho antes de que alguien hubiera explicado estas ideas a un nivel microscópico más fundamental como el resultado del

movimiento aleatorio de un gran número de átomos y moléculas.

Al estar los modelos relacionados con los «fenómenos» físicos (o sea, con las observaciones experimentales), a los constructores de modelos que están más próximos a los experimentos se los llama, a veces, «fenomenólogos». La elección de la palabra *fenomenología* es, sin embargo, muy pobre. No hace justicia al análisis de datos, que, en el complejo mundo científico de hoy, se encuentra firmemente incrustado en la teoría. La construcción de modelos está mucho más vinculada a la interpretación y al análisis matemático de lo que sugiere la palabra *fenomenología* , en la acepción filosófica del término.

Los mejores modelos sí tienen, sin embargo, una propiedad inestimable. Producen predicciones precisas para los fenómenos físicos, procurando así a los experimentadores un método para verificar o contradecir las afirmaciones de un modelo. Los experimentos en altas energías no son meramente útiles para buscar nuevas partículas: son también modelos de prueba y sirven para encontrar pistas para mejorarlos. Cualquier modelo que se proponga en la física de partículas conllevará nuevos principios físicos y nuevas leyes físicas, aplicables a las energías medibles. Predecirá, por lo tanto, nuevas partículas y relaciones comprobables entre ellas. El posible descubrimiento de estas partículas y la posible medida de sus propiedades puede confirmar o descartar ideas propuestas. El objetivo de los experimentos en altas energías es arrojar luz sobre las leyes físicas subyacentes y sobre el marco conceptual que les confiere su poder explicativo.

Sólo algunos modelos resultarán correctos, pero los modelos son el mejor modo de investigar las posibilidades que hay y de construir un almacén de ingredientes obligatorios. Y si la teoría de cuerdas es correcta, podríamos descubrir finalmente cómo algunos modelos surgen como consecuencia de ella, del mismo modo que la termodinámica se explicó basándose en la teoría atómica. Sin embargo, durante aproximadamente diez años las dos comunidades se mantuvieron firmemente separadas. Como me comentó hace poco Albion Lawrence, un joven de la Universidad Brandeis que se dedica a la teoría de cuerdas, cuando estábamos discutiendo sobre este cisma: «Una de las tragedias es que la teoría de cuerdas y la construcción de modelos eran disciplinas intelectuales distintas. Los constructores de modelos y los especialistas en teoría de cuerdas estuvieron sin hablarse durante años. Yo siempre he pensado que la teoría de cuerdas es la abuela de todos los modelos».

Tanto los físicos que se dedican a la teoría de cuerdas como los constructores de modelos van en busca de una ruta elegante y manejable que conecte la teoría con el mundo observado. Una teoría será realmente fuerte y tendrá posibilidades de ser cierta sólo si este camino, y no únicamente la vista desde arriba, manifiesta esta elegancia. Los constructores de modelos, que parten de abajo, corren el riesgo de hacer salidas en falso, pero los especialistas en teoría de cuerdas, que parten de arriba, corren el riesgo de encontrarse al borde de una roca aislada rodeada de precipicios, demasiado remota como para poder encontrar el camino de vuelta al campamento base.

Podríamos decir que todos estamos buscando el lenguaje del universo. Pero mientras los especialistas en teoría de cuerdas se concentran en la lógica

interna de la gramática, los constructores de modelos hacen lo propio en los nombres y en las frases que piensan que pueden resultar más útiles. Si los físicos de partículas estuvieran estudiando italiano en Florencia, los constructores de modelos sabrían cómo pedir alojamiento y cómo adquirir el vocabulario esencial para desenvolverse bien, pero quizá hablarían con giros graciosos y nunca acabarían de comprender bien el «Inferno». Los que se dedican a la teoría de cuerdas, por el contrario, podrían aspirar a dominar las sutilezas de la literatura italiana, ¡pero correrían el riesgo de morirse de hambre antes de aprender a encargar la cena!

Por fortuna, ahora las cosas han cambiado. Hoy día, la teoría y los fenómenos en baja energía se apoyan mutuamente en sus progresos, y muchos de nosotros pensamos actualmente a la vez en la teoría de cuerdas y en la física basada en los experimentos. Yo he continuado siguiendo el enfoque de la construcción de modelos en mis investigaciones, pero ahora incorporo también en ellas ideas de la teoría de cuerdas. Pienso que, a la larga, son más las probabilidades de que avancemos si combinamos lo mejor de ambos métodos.

Albion señala que «la distinción se está volviendo borrosa otra vez, catalizada en gran parte por el estudio de las dimensiones extras. La gente ahora habla entre sí». Las comunidades ya no están tan rígidamente definidas y hay más terreno común. Ha habido una convergencia renovada en el campo de los propósitos y de las ideas. Tanto en el aspecto científico como en el social, ahora hay fuertes intereses comunes entre los constructores de modelos y los especialistas en teoría de cuerdas.

Uno de los aspectos bonitos de las teorías extradimensionales que describiré es que, para producirlas, las ideas de los dos campos acabaron por converger. Puede que las dimensiones extras de la teoría de cuerdas sean una molestia, pero también es posible que constituyan una oportunidad para encontrar nuevas maneras de abordar viejos problemas. Podemos preguntar, ciertamente, dónde están las dimensiones extras y por qué no las hemos visto. Pero también podríamos preguntar si estas dimensiones nunca vistas tienen o no algún significado para nuestro mundo. Estas dimensiones podrían ayudar a explicar relaciones subyacentes que son relevantes para los fenómenos observados. A los constructores de modelos les encanta el reto de conectar nociones como las dimensiones extras con magnitudes observables como las relaciones entre las masas de las partículas. Y con suerte, las ideas basadas en los modelos extradimensionales podrían abordar con éxito uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la teoría de cuerdas: su inaccesibilidad experimental. Los constructores de modelos han usado elementos teóricos tomados de la teoría de cuerdas para atacar cuestiones de la teoría de partículas. Y esos modelos, incluidos los que tienen dimensiones extras, tendrán consecuencias verificables.

Cuando investiguemos más adelante los modelos extradimensionales, veremos que el planteamiento de la construcción de modelos, conjugado con la teoría de cuerdas, ha generado nuevas ideas muy importantes en la física de partículas, la evolución del universo, la gravedad y la propia teoría de cuerdas. Con el conocimiento de la gramática del especialista en teoría de cuerdas y con el vocabulario del constructor de modelos, los dos juntos han

empezado a escribir un diccionario de frases más que razonable.

El corazón de la materia

En el fondo, las ideas que vamos a considerar abarcan el universo entero. Sin embargo, estas ideas están arraigadas en la física de partículas y en la teoría de cuerdas, que son teorías que aspiran a describir los componentes más pequeños de la materia. Así que antes de emprender el viaje al territorio teórico extremo que abordan estas teorías, haremos ahora una breve excursión a las partes más pequeñas de la materia. Tomaremos nota, en esta visita guiada por el átomo, de los ladrillos básicos de la materia y del tamaño de los objetos de los que se ocupan las diferentes teorías físicas. Ellos deberán proporcionarnos unos cuantos hitos que podremos usar para orientarnos más adelante y que nos ayudarán a reconocer los componentes de los que se ocupan las distintas áreas de la física.

La premisa básica en casi toda la física es que las partículas elementales constituyen los ladrillos de la materia. Si levantamos todas las capas, en el fondo no encontraremos siempre más que partículas elementales. Los físicos de partículas estudian un universo en el que estos objetos son los elementos más pequeños. La teoría de cuerdas asume esta hipótesis con un paso más y postula que esas partículas son las oscilaciones de las cuerdas elementales. Pero hasta los especialistas de la teoría de cuerdas piensan que la materia está compuesta de partículas, las entidades irrompibles que forman su esencia.

Podría ser difícil creer que todo está compuesto de partículas; éstas no son, desde luego, evidentes a simple vista. Pero esto se debe al grosero poder de resolución de nuestros sentidos, que no son capaces de detectar en ninguna parte nada que sea del diminuto tamaño de un átomo. No obstante, aunque no podamos verlas directamente, las partículas elementales son los ladrillos fundamentales de la materia. Al igual que las imágenes de la pantalla del ordenador o del televisor están hechas de puntos diminutos aunque éstos presentan imágenes que parecen continuas, la materia está compuesta de átomos, que, a su vez, están compuestos de partículas elementales. Los objetos físicos que nos rodean parecen ser continuos y uniformes, pero en realidad no lo son.

Antes de que los físicos pudieran mirar dentro de la materia y deducir su composición, necesitaron avances tecnológicos para crear instrumentos de medida muy sensibles. Pero cada vez que desarrollaban útiles tecnológicos más exactos, surgía más *estructura* , esto es, constituyentes más elementales. Y cada vez que los físicos tenían acceso a instrumentos que podían sondear distancias todavía más pequeñas, seguían descubriendo más ingredientes fundamentales: *subestructura* , constituyentes de los elementos estructurales previamente conocidos.

El objetivo de la física de partículas es descubrir los constituyentes básicos de la materia y las leyes físicas fundamentales que obedecen dichos constituyentes. Estudiamos escalas de pequeñas distancias porque es ahí donde interactúan las partículas elementales, y así resulta más fácil discernir las fuerzas fundamentales. A escalas grandes, los ingredientes básicos están

integrados en objetos compuestos, lo cual dificulta el discernimiento de las leyes físicas fundamentales y, por lo tanto, hace que éstas resulten más confusas. Las escalas de pequeñas distancias son interesantes porque en ellas aparecen nuevos principios y conexiones.

La materia no es simplemente una muñeca rusa con copias más pequeñas de entidades similares en su interior. Las distancias más pequeñas revelan fenómenos realmente novedosos. Incluso el funcionamiento del cuerpo humano —el corazón y la circulación de la sangre, por ejemplo— fue interpretado erróneamente hasta que científicos como William Harvey abrieron en canal a la gente hacia 1600 y miraron lo que había dentro de ella. Algunos experimentos recientes han hecho lo mismo con la materia, explorando distancias más cortas donde nuevos mundos operan siguiendo leyes físicas más fundamentales. Y así como la circulación de la sangre tiene consecuencias importantes para todas las actividades humanas, las leyes físicas fundamentales tienen consecuencias importantes para nosotros a escalas más grandes.

Sabemos ahora que toda la materia está hecha de *átomos* , que se combinan mediante procesos químicos para formar *moléculas* . Los átomos son muy pequeños, del tamaño aproximado de un angstrom, es decir, la centésima parte de una millonésima de centímetro. Pero los átomos no son fundamentales: consisten en un *núcleo* central cargado positivamente y que está rodeado de *electrones* cargados negativamente (véase la figura 30). El núcleo es mucho más pequeño que el átomo, ya que ocupa sólo más o menos la cien milésima parte del tamaño del átomo. Y el núcleo, con su carga positiva, es él mismo un compuesto: está hecho de *protones* cargados positivamente y *neutrones* neutros (sin carga), conocidos colectivamente como *nucleones* , que no son mucho más pequeños que el mismo núcleo. Ésta era la descripción de la materia que defendían los científicos antes de 1960 y posiblemente la estampa que nos presentaron en el colegio.

FIGURA 30. El átomo consiste en electrones que circulan en torno a un pequeño núcleo. El núcleo está compuesto de protones cargados positivamente y de neutrones sin carga.

Esta plantilla del átomo es correcta, aunque, como veremos más adelante, la mecánica cuántica da una descripción de las órbitas de un electrón más interesante que cualquiera que podamos dibujar. Pero ahora sabemos, además, que ni el protón ni el neutrón son fundamentales. Al contrario de lo señalado en la cita de Gamow de la «Introducción», el protón y el neutrón contienen subestructura, ingredientes más fundamentales que reciben el nombre de *quarks* . El protón contiene dos *quarks up* y un *quark down* , mientras que el neutrón contiene dos *quarks down* y un *quark up* (véase la figura 31). Estos quarks están unidos entre sí por una fuerza nuclear que se llama fuerza fuerte. El electrón, el otro componente del átomo, es diferente. Por lo que sabemos, es fundamental: el electrón no puede dividirse en partículas más pequeñas y no contiene subestructura en su interior.

FIGURA 31. El protón y el neutrón están compuestos de partículas más elementales, llamadas quarks, unidas entre sí por la fuerza fuerte.

El físico Stephen Weinberg, ganador del Premio Nobel, acuñó el término *modelo estándar* para designar la teoría bien establecida de la física de partículas que describe las interacciones de estos ladrillos fundamentales de la materia —el electrón, el quark up y el quark down—, así como otras partículas fundamentales que conoceremos dentro de un momento. El modelo estándar también describe tres de las cuatro fuerzas mediante las cuales interactúan las partículas elementales: el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte (suele omitirse la gravedad).

Aunque la gravedad y el electromagnetismo eran conocidos desde hace siglos, nadie comprendió las otras dos fuerzas, menos familiares, hasta la segunda mitad del siglo XX. Estas fuerzas débil y fuerte actúan sobre las partículas fundamentales y son importantes para los procesos nucleares. Permiten a los quarks permanecer juntos y a los núcleos desintegrarse, por ejemplo.

Si quisiéramos, podríamos también incluir a la gravedad en el modelo estándar. Sin embargo, normalmente no lo hacemos, porque la gravedad es una fuerza demasiado débil como para producir consecuencias a las escalas de distancias que son relevantes para la física de partículas, a energías que son accesibles experimentalmente. A energías muy altas y distancias muy cortas, nuestras nociones usuales sobre la gravedad fallan; esto es relevante para la teoría de cuerdas, pero no lo es a escalas de distancias medibles. Al estudiar las partículas elementales, la gravedad es importante sólo en ciertas extensiones del modelo estándar, entre las que están los modelos extradimensionales que consideraremos más adelante. Para todas las demás predicciones sobre las partículas elementales, podemos olvidarnos de la gravedad.

Ahora que hemos entrado ya en el mundo de las partículas fundamentales, miremos un poco a nuestro alrededor y hagamos el inventario de nuestros vecinos. El quark up, el quark down y el electrón están en lo más íntimo de la materia. Sin embargo, sabemos ahora que existen también otros quarks adicionales más pesados y otras partículas parecidas a los electrones, más pesadas que éstos, que no se encuentran en ninguna parte de la materia ordinaria.

Por ejemplo, mientras el electrón posee una masa más o menos equivalente a la mitad de una milésima de la masa del protón, una partícula que se llama *muón* , con exactamente la misma carga que el electrón, posee una masa que es doscientas veces más grande que la del electrón. Una partícula que se llama *tau* , que tiene también la misma carga, posee una masa que es incluso diez veces más grande. Y los experimentos en los aceleradores de alta energía han descubierto en los últimos treinta años partículas todavía más pesadas. Para producirlas, los físicos han necesitado la enorme cantidad de energía muy concentrada que pueden crear hoy día los aceleradores de partículas de alta energía.

Soy consciente de que esta sección fue anunciada como un recorrido por el interior de la materia, pero las partículas de las que estoy hablando ahora no están dentro de los objetos estables del mundo material. Aunque toda la materia conocida consiste en partículas elementales, las partículas

elementales más pesadas no son constituyentes de la materia. No las encontraremos en los cordones de los zapatos, ni en el tablero de la mesa, ni en Marte, ni en ningún otro objeto físico que conozcamos. Pero estas partículas se crean hoy rutinariamente en los experimentos de los aceleradores de alta energía, y formaron parte del universo primitivo inmediatamente después del Big Bang.

No obstante, estas partículas pesadas son componentes esenciales del modelo estándar. Interactúan mediante las mismas fuerzas que las partículas más familiares y desempeñarán posiblemente un papel en una comprensión más profunda de las leyes físicas más básicas de la materia. He hecho una lista de las partículas del modelo estándar en las figuras 32 y 33. He incluido los neutrinos y los bosones gauge portadores de fuerza, sobre los cuales contaré más cosas en el capítulo 7, cuando discuta todos los elementos del modelo estándar en detalle.

FIGURA 32. Las partículas de materia del modelo estándar y sus masas. Las partículas de una misma columna tienen cargas idénticas pero masas diferentes.

FIGURA 33. Los bosones portadores de fuerza del modelo estándar, sus masas y las fuerzas que comunican.

Nadie sabe por qué existen las partículas pesadas del modelo estándar. Las cuestiones sobre su finalidad, sobre el papel que desempeñan en la teoría subyacente última y sobre el motivo por el cual sus masas son tan diferentes de las de los constituyentes de la materia más familiar son algunos de los mayores misterios a los que se enfrenta el modelo estándar. Y éstos son sólo algunos de los enigmas que el modelo estándar deja sin resolver. ¿Por qué, por ejemplo, hay cuatro fuerzas, y no más? ¿Podría haber otras que todavía no hemos detectado? ¿Y por qué la gravedad es mucho más débil que las otras fuerzas conocidas?

El modelo estándar deja abierta también una cuestión más teórica, la que la teoría de cuerdas pretende abordar: ¿cómo reconciliamos la mecánica cuántica y la gravedad de modo consistente a todas las escalas de distancias? Esta cuestión difiere de las otras en que no concierne a fenómenos actualmente visibles, sino que es, por el contrario, una cuestión sobre las limitaciones intrínsecas de la física de partículas.

Ambos tipos de cuestiones sin responder —las que conciernen a fenómenos visibles y las que atañen a fenómenos puramente teóricos— nos dan motivos para mirar más allá del modelo estándar. A pesar del poder y del éxito del modelo estándar, estamos seguros de que hay una estructura más fundamental esperando a que la descubramos y que la búsqueda de principios más fundamentales resultará gratificante. Como dijo elegantemente el compositor Steve Reich en *The New York Times* (al establecer una analogía con una pieza que había escrito), «Primero sólo había átomos, luego había protones y neutrones, luego había quarks, y ahora estamos hablando de la teoría de cuerdas. Parece como si cada veinte, treinta, cuarenta o cincuenta años se abriera una trampilla y apareciera otro nivel de la realidad»[18] .

Los experimentos que se están haciendo en los actuales aceleradores, y los que se harán en el futuro, ya no buscan ingredientes del modelo estándar, puesto que ya han aparecido todos. El modelo estándar organiza muy bien estas partículas de acuerdo con sus interacciones, y ahora se conoce el complemento completo de las partículas del modelo estándar. Actualmente, los experimentadores buscan, en cambio, partículas que serían todavía más interesantes. Los modelos teóricos actuales incluyen los ingredientes del modelo estándar, pero añaden nuevos elementos para abordar algunas de las cuestiones que el modelo estándar deja sin resolver. Esperamos que los experimentos actuales y los futuros proporcionen pistas que nos permitan distinguir entre ellos y descubrir la auténtica naturaleza subyacente de la materia.

Aunque tengamos indicios experimentales y teóricos sobre la naturaleza de una teoría más fundamental, es poco probable que sepamos cuál es la descripción correcta de la naturaleza hasta que los experimentos a altas energías (que sondean distancias más cortas) proporcionen la respuesta. Como veremos más adelante, hay claves teóricas que nos dicen que los experimentos de la próxima década descubrirán casi seguro algo nuevo. Probablemente no aparecerán pruebas definitivas de la teoría de cuerdas, que serán muy difíciles de descubrir, pero quizá podrían aparecer cosas tan exóticas como relaciones nuevas en el espacio-tiempo, o dimensiones extras nuevas y nunca vistas: nuevos fenómenos que figuren en la teoría de cuerdas y también en otras teorías de la física de partículas. Y a pesar del amplio alcance de nuestra imaginación colectiva, estos experimentos también tienen en potencia la capacidad de revelar algo en lo que nadie haya pensado nunca. Mis colegas y yo sentimos mucha curiosidad por saber en qué consistirá eso.

Un adelanto

Sabemos cosas sobre la estructura de la materia como las que acabamos de ver gracias a los desarrollos cruciales de la física en el siglo pasado. Estos avances fabulosos son esenciales para cualquier teoría más completa del mundo a la que podamos llegar y también fueron grandes logros en sí mismos.

En el próximo capítulo empezaremos a examinar estos desarrollos. Las teorías surgen de las observaciones y deficiencias de las teorías progenitoras, y podemos apreciar mejor el papel de los avances más recientes familiarizándonos con estos notables desarrollos anteriores. La figura 34 indica algunos de los caminos a través de los cuales se comunican entre sí las teorías que discutiremos. Veremos cómo se elaboró cada una de estas teorías, valiéndose de las lecciones de las más antiguas, y cómo las teorías nuevas repararon las grietas que sólo se descubrieron una vez completadas las teorías antiguas. Comenzaremos con las dos ideas revolucionarias de principios del siglo XX: la relatividad y la mecánica cuántica, mediante las cuales descubrimos la forma del universo y de los objetos que contiene, así como la composición y la estructura del átomo. Presentaremos el modelo estándar de la física de partículas, que se desarrolló en los años sesenta y setenta para predecir las interacciones de las partículas elementales que acabábamos de descubrir. También consideraremos los principios y conceptos más importantes de la física de partículas: la simetría, la ruptura de la

simetría y la dependencia de la escala de las magnitudes físicas, mediante las cuales hemos aprendido mucho sobre la manera en que los componentes más elementales de la materia crean las estructuras que vemos.

FIGURA 34. Las ramas de la física que encontraremos y cómo están relacionadas.

Sin embargo, a pesar de sus muchos éxitos, el modelo estándar de la física de partículas deja algunas cuestiones fundamentales sin contestar, cuestiones tan básicas que su resolución promete producir nuevas ideas sobre los ladrillos constituyentes de nuestro mundo. El capítulo 10 presenta uno de los aspectos más interesantes y más misteriosos del modelo estándar: el origen de las masas de las partículas elementales. Veremos que es casi seguro que necesitaremos una teoría física más profunda que el modelo estándar si queremos explicar las masas de las partículas conocidas y la debilidad de la gravedad.

Los modelos extradimensionales tratan este tipo de problemas de la física de partículas, pero también usan ideas de la teoría de cuerdas. Después de discutir los aspectos básicos de la física de partículas, presentaremos la motivación fundamental y los conceptos de la teoría de cuerdas. No deduciremos ningún modelo directamente de la teoría de cuerdas, pero dicha teoría contiene algunos de los elementos que se usan al desarrollar los modelos extradimensionales.

Este examen abarca un amplio terreno porque las investigaciones sobre las dimensiones extras entrelazan muchos avances teóricos de las dos corrientes principales de la física de partículas: la construcción de modelos y la teoría de cuerdas. Cierta familiaridad con muchos de los desarrollos recientes más interesantes de estos campos ayudará al lector a comprender mejor la motivación y los métodos que están en la base del desarrollo de los modelos extradimensionales.

Sin embargo, para los que quieran saltarse algo, terminaré cada uno de los capítulos de este examen con una lista de conceptos vitales, a los que nos referiremos posteriormente cuando volvamos a la construcción de modelos extradimensionales. Estas listas, destacadas por medio de viñetas, servirán como un atajo, un resumen, para los que deseen saltarse un capítulo o concentrarse sobre el material al que volveremos más adelante. Podría referirme ocasionalmente a puntos que no están señalados con viñetas, pero mediante éstas destacaré las ideas claves que son esenciales para los resultados principales de la última parte del libro.

En el capítulo 17 comenzaremos a explorar los mundos brana extradimensionales, que son las teorías que proponen que la materia de la que se compone nuestro universo está confinada a una brana. Las ideas sobre los mundos brana han proporcionado un conocimiento más profundo de la relatividad general, de la física de partículas y de la teoría de cuerdas. Los diferentes mundos brana que presentaré adoptan suposiciones diferentes y explican fenómenos diferentes. Resumiré también las propiedades características de cada modelo con viñetas al final de cada uno de estos capítulos. Todavía no sabemos cuáles de estas ideas describen correctamente

la naturaleza, si es que alguna lo hace. Pero es perfectamente concebible que descubramos finalmente que las branas forman parte del cosmos y que nosotros —junto con otros universos paralelos— estamos confinados en ellas.

Una cosa que he aprendido de estas investigaciones es que el universo suele tener más imaginación que nosotros. A veces sus propiedades son tan inesperadas que tropezamos con ellas sólo por casualidad. Descubrir estas sorpresas puede resultar asombroso. Nuestras leyes físicas conocidas llegan a tener consecuencias muy llamativas.

Comencemos ahora a explorar en qué consisten esas leyes.

5

RELATIVIDAD:

LA EVOLUCIÓN DE LA GRAVEDAD DE EINSTEIN

The laws of gravity are very, very strict.

And you’re always bending them

for your own benefit.

[Las leyes de la gravedad son muy, muy estrictas. | Y tú las estás forzando | en beneficio propio].

BILLY BRAGG

Ícaro (Ike) Rushmore III estaba impaciente por enseñar a Dieter su nuevo Porsche. Pero, aunque se sentía muy orgulloso de su coche, estaba todavía más entusiasmado con su sistema de localización global (GPS), que acababa de diseñar e instalar él mismo.

Ike quería impresionar a Dieter, así que lo convenció para que fuera con él al circuito de pruebas de la ciudad. Subieron al coche, Ike programó el destino al que querían dirigirse y partieron los dos hacia allí. Pero, para disgusto de Ike, llegaron a otro sitio distinto: el sistema GPS no había funcionado tan bien como él esperaba. Lo primero que pensó Dieter es que su amigo había cometido algún error ridículo, como confundir metros con pies. Pero éste no se creía capaz de incurrir en un error tan tonto y le aseguró que ése no era el problema.

Al día siguiente, ambos intentaron detectar el fallo. Pero, para su consternación, cuando salieron a la carretera el GPS funcionó todavía peor que antes. Volvieron a buscar dónde estaba el problema y finalmente, después de una semana frustrante, Dieter tuvo una iluminación. Hizo un cálculo rápido y llegó a la sorprendente conclusión de que, si no se tenía en cuenta la relatividad general, el sistema GPS de Ike generaría errores a un ritmo de más de 10 km diarios. Ike no pensaba que su Porsche fuera tan veloz como para justificar cálculos relativistas, pero Dieter le explicó que las señales del GPS —y no el coche— viajan a la velocidad de la luz. Dieter modificó la programación para que ésta considerara el campo gravitatorio variable que las señales del GPS tenían que atravesar. De esa manera, el sistema de Ike comenzó a funcionar igual de bien que el modelo comercial entonces disponible. Aliviados, Ike y Dieter se pusieron a planear un viaje en coche.

A principios del siglo pasado, el físico británico lord Kelvin dijo: «Ahora ya no hay nada nuevo por descubrir en la física. Lo único que queda es realizar

medidas cada vez más precisas»[19] . Lord Kelvin se hizo famoso por este error de apreciación: al poco tiempo de pronunciar estas palabras, la relatividad y la mecánica cuántica revolucionaron la física y dieron lugar a las diferentes áreas de la física en las que la gente trabaja hoy. Sin embargo, otra afirmación más profunda de lord Kelvin, «la riqueza científica tiende a acumularse según la ley del interés compuesto»[20] , es ciertamente correcta y especialmente apropiada para estos desarrollos revolucionarios.

Este capítulo explora la ciencia de la gravedad, y explica cómo evolucionó desde el éxito impresionante de las leyes de Newton hasta los avances revolucionarios de la teoría de la relatividad de Einstein. Las leyes del movimiento de Newton son las leyes físicas clásicas que usaron los científicos durante siglos para calcular los movimientos mecánicos, incluidos los producidos por la gravedad. Las leyes de Newton son magníficas y nos permiten hacer predicciones sobre el movimiento que funcionan extraordinariamente bien: todo lo bien que se precisa para enviar hombres a la Luna y para poner los satélites en órbita, para mantener a los trenes de alta velocidad europeos sobre los raíles al recorrer una curva y para promover la búsqueda del octavo planeta, Neptuno, basándose en las peculiaridades de la órbita de Urano. Pero, ¡ay!, no todo lo bien que se precisa para que funcione correctamente el sistema GPS.

De manera increíble, el sistema GPS en uso actualmente requiere la teoría de la relatividad de Einstein para conseguir una precisión de menos de un metro de error. Las determinaciones de las variaciones del espesor de la nieve en Marte, que utilizan bases de datos obtenidos con láser desde naves orbitales, también hacen uso de la relatividad general, y proporcionan valores con una precisión increíble de 10 cm. Ciertamente, en la época en que se desarrolló, nadie —ni siquiera el propio Einstein— anticipó estas aplicaciones prácticas de una teoría tan abstracta como la relatividad general.

Este capítulo explorará la teoría de la gravedad de Einstein, una teoría espectacularmente precisa, que se aplica a un amplio abanico de sistemas. Empezaremos repasando brevemente la teoría de la gravitación de Newton, que funciona perfectamente con las energías y velocidades que encontramos en la vida cotidiana. Después nos dirigiremos a los límites extremos en los que falla, que son los que involucran velocidades muy altas (próximas a la velocidad de la luz) y energías o masas muy grandes. En estos límites, la teoría de la relatividad de Einstein desbanca a la teoría de la gravedad newtoniana. Con la relatividad general de Einstein, el espacio (y el espacio-tiempo) evolucionó desde un escenario estático hasta una unidad dinámica que puede moverse y curvarse y que tiene una rica vida propia. Consideraremos esta teoría, las pistas que condujeron a su desarrollo y algunas de las pruebas experimentales que convencen a los físicos de que es correcta.

La gravedad newtoniana

La gravedad es la fuerza que mantiene nuestros pies sobre la tierra y es la fuente de la aceleración que devuelve a la Tierra una pelota lanzada al aire. A finales del siglo XVI, Galileo probó que esta aceleración es la misma para

todos los objetos que hay en la superficie de la Tierra, sean cuales sean sus masas.

Sin embargo, esta aceleración sí que depende de lo lejos que esté el objeto del centro de la Tierra. Más generalmente, la fuerza de la gravedad depende de la distancia entre las dos masas: el tirón de la gravedad es más débil cuanto más separados están los objetos. Y cuando lo que crea la atracción gravitatoria no es la Tierra, sino otro objeto cualquiera, la fuerza de la gravedad dependerá de la masa de ese objeto.

Isaac Newton desarrolló la ley de la fuerza gravitatoria que resume cómo depende la gravedad de las masas y de la distancia. La ley de Newton dice que la fuerza de la gravedad entre dos objetos es proporcional a las masas de cada uno de ellos. Podrían ser cualquier cosa: la Tierra y una pelota, el Sol y Júpiter, un balón de baloncesto y uno de fútbol, o cualquier par de objetos que queramos. Cuanta más masa tengan los objetos, más fuerte será la atracción gravitatoria.

La ley de la fuerza gravitatoria de Newton también dice cómo depende la fuerza gravitatoria de la distancia entre los dos objetos. Como se discutió en el capítulo 2, la ley dice que la fuerza entre dos objetos es proporcional al cuadrado del inverso de la distancia que los separa. En esta ley del cuadrado del inverso es donde hizo su aparición la famosa manzana[21] . Newton pudo deducir la aceleración producida por el tirón gravitatorio de la Tierra sobre una manzana situada cerca de la superficie del planeta y compararla con la aceleración inducida sobre la Luna, que está situada a una distancia del centro de la Tierra sesenta veces más grande que la distancia que hay desde el centro de la Tierra hasta su superficie. La aceleración de la Luna producida por la gravedad de la Tierra es 3.600 veces más pequeña (3.600 es el cuadrado de 60) que la aceleración de la manzana. Esto está de acuerdo con el hecho de que la fuerza gravitatoria decrece según el cuadrado de la distancia al centro de la Tierra[M7] .

Sin embargo, aunque sepamos que la atracción gravitatoria depende de la masa y de la distancia, necesitamos otro dato más para poder determinar la intensidad total de la atracción gravitatoria. El dato que falta es un número, que se llama *constante gravitatoria de Newton* , que aparece como factor en el cálculo de cualquier fuerza gravitatoria clásica. La gravedad es muy débil y esto se refleja en la pequeñez de la constante de Newton, a la que todos los efectos gravitatorios son proporcionales.

El tirón gravitatorio de la Tierra o la atracción gravitatoria entre el Sol y los planetas podría parecer bastante fuerte. Pero esto es así sólo porque la Tierra, el Sol y los planetas tienen unas masas enormes. La constante de Newton es muy pequeña y la atracción gravitatoria entre las partículas elementales es una fuerza en extremo débil. Esta debilidad de la gravedad es, en sí misma, un gran enigma al que volveremos más adelante.

Aunque su teoría era correcta, Newton demoró su publicación durante veinte años, hasta 1687, mientras trataba de justificar una hipótesis crucial de su teoría: que el tirón gravitatorio de la Tierra se ejercía como si toda su masa

estuviera concentrada en el centro. Mientras Newton trabajaba intensamente, desarrollando el cálculo, para resolver este problema, Edmund Halley, Christopher Wren, Robert Hooke y el mismo Newton hicieron tremendos progresos en la determinación de la ley de la fuerza gravitatoria, analizando el movimiento de los planetas, cuyas órbitas había calculado Johannes Kepler y que resultaron ser elípticas.

Todos estos hombres hicieron importantes contribuciones al problema del movimiento planetario, pero es a Newton a quien se le reconoce la autoría de la ley del cuadrado del inverso. Esto es así porque Newton probó en definitiva que las órbitas elípticas surgirían como resultado de una fuerza central (la del Sol) solamente si era cierta la ley del cuadrado del inverso, y demostró con el cálculo que la masa de un cuerpo esférico actuaba de hecho como si estuviera concentrada en el centro. Newton reconoció, sin embargo, el peso de la contribución de otros con estas palabras: «Si yo he visto más lejos, es porque me he apoyado en los hombros de gigantes[22] » (sin embargo, corre el rumor de que dijo esto únicamente guiado por su antipatía hacia Hooke, que era muy bajo).

En la física que se estudia en el colegio aprendimos las leyes de Newton y calculamos el comportamiento de algunos sistemas interesantes (aunque algo forzados). Recuerdo la indignación que sentí cuando nuestro profesor, el señor Baumel, nos dijo que la teoría de la gravitación que acabábamos de aprender era errónea. ¿Por qué nos enseñaban una teoría que sabíamos que era incorrecta? Con mi visión del mundo correspondiente a los años de colegio, todo el mérito de la ciencia consistía en que podía ser cierta y fiable, y en que era capaz de hacer predicciones correctas y objetivas.

Pero el señor Baumel estaba simplificando las cosas, quizá para conseguir un efecto dramático. La teoría de Newton no era incorrecta: era, sencillamente, una aproximación, que funciona increíblemente bien en la mayoría de las circunstancias. Para un gran abanico de parámetros (velocidad, distancia, masa y demás), predice las fuerzas gravitatorias con mucha exactitud. La teoría subyacente más precisa es la relatividad, y con la relatividad sólo hacemos predicciones diferentes que sean distinguibles al medirlas cuando se trata de velocidades extremadamente altas o de grandes cantidades de masa o energía. La ley de Newton predice el movimiento de una pelota admirablemente bien, porque no estamos en el caso de ninguno de los dos criterios anteriores. Utilizar la relatividad para predecir el movimiento de una pelota sería pura tontería.

De hecho, el propio Einstein consideró al principio que la relatividad especial era meramente un perfeccionamiento de la física de Newton, no un cambio radical de paradigma. Esto, por supuesto, minimiza burdamente el significado último de su obra.

Relatividad especial

Algo muy razonable que podemos esperar de las leyes físicas es que sean las mismas para todos. Nadie podría criticarnos por cuestionar su validez si la gente de distintos países o que estuviera en un tren en marcha o en un avión

en vuelo experimentara leyes físicas distintas. Las leyes físicas habrían de ser fundamentales y cumplirse para cualquier observador. Cualquier diferencia en los cálculos debería provenir de diferencias achacables al entorno y no a las propias leyes físicas. Realmente sería muy extraño tener leyes físicas universales que requirieran un punto de vista privilegiado concreto. Las magnitudes concretas que podamos medir quizá dependen del sistema de referencia, pero las leyes que gobiernan estas magnitudes no deberían estar supeditadas a dicho sistema. La formulación que hizo Einstein de la relatividad especial asegura que esto es realmente así.

De hecho, resulta algo irónico que el trabajo de Einstein sobre la gravedad sea conocido como «la teoría de la relatividad». El punto esencial que puso en marcha tanto la relatividad especial como la general fue que las leyes físicas deberían ser válidas para todos, independientemente del sistema de referencia. De hecho, Einstein hubiera preferido el término *Invariantentheorie* [23] . En una carta que Einstein escribió en 1921 en respuesta a un corresponsal que había propuesto reconsiderar el nombre, admitió que el término *relatividad* no era afortunado[24] . Pero entonces el término estaba ya muy bien atrincherado como para que Einstein intentara cambiarlo.

La primera idea de Einstein sobre los sistemas de referencia y la relatividad surgió al pensar sobre el electromagnetismo. La muy conocida teoría decimonónica del electromagnetismo se basaba en las leyes de Maxwell, que describen el comportamiento del electromagnetismo y de las ondas electromagnéticas. Las leyes daban resultados correctos, pero todos interpretaron al principio incorrectamente las predicciones en términos del movimiento del *éter* , una hipotética sustancia invisible cuyas vibraciones se suponía que eran las ondas electromagnéticas. Einstein cayó en la cuenta de que, si el éter existía, entonces habría también una posición ventajosa o sistema de referencia privilegiado para la observación: aquél en el que el éter está en reposo. Razonó que las mismas leyes físicas deberían ser válidas para una persona que se mueve con velocidad vectorial[25] constante, o bien con respecto a otra persona que también se mueve, o bien con respecto a otra persona que está en reposo, esto es, en sistemas de referencia que los físicos llaman inerciales. Al exigir que *todas* las leyes físicas, incluidas las del electromagnetismo, sean válidas para los observadores de todos los sistemas inerciales, Einstein se vio obligado a abandonar la idea del éter y, en definitiva, a formular la relatividad especial.

La teoría de la relatividad especial de Einstein, con su revisión radical de los conceptos de espacio y tiempo, supuso un vuelco tremendo. Peter Galison[26] , físico e historiador de la ciencia, insinúa que no fue sólo la teoría del éter lo que puso a Einstein sobre la pista correcta, sino también el trabajo que desempeñaba entonces. Galison argumenta que Einstein, que creció en Alemania y trabajó en la oficina de patentes de Berna, en Suiza, debió de tener en mente el tiempo y la coordinación del tiempo. Cualquiera que haya viajado por Europa sabe que en países como Suiza y Alemania se aprecia mucho la precisión, lo que trae como feliz consecuencia que los pasajeros puedan fiarse de los trenes para llegar a tiempo a su destino. Einstein trabajó en la oficina de patentes entre 1902 y 1905, durante una época en la que el

viaje en tren cobraba una creciente importancia y la coordinación del tiempo estaba en la vanguardia de la nueva tecnología. A principios del siglo XX era muy probable que Einstein estuviera pensando en problemas del mundo real, como el problema de cómo coordinar el tiempo en una estación de tren con el tiempo en otra.

Por supuesto, Einstein no necesitaba desarrollar la relatividad para resolver el problema de coordinar trenes reales. (A aquellos de nosotros que estamos acostumbrados a los trenes americanos, que se retrasan tantas veces, lo del tiempo coordinado podría sonarnos exótico, en cualquier caso[27]). Pero la coordinación del tiempo dio lugar a que se planteasen algunas cuestiones interesantes. La coordinación temporal de trenes que se mueven teniendo en cuenta la relatividad no es un problema de solución inmediata. Si tuviera que coordinar mi reloj con alguien que está en un tren en marcha, necesitaría tener en cuenta el tiempo que tarda una señal en viajar entre nosotros, ya que la luz tiene una velocidad finita. Coordinar mi reloj con el de la persona que está sentada a mi lado no sería lo mismo que coordinarlo con alguien que estuviera lejos[28] .

La visión crucial de Einstein, la que lo condujo a la relatividad especial, es que había que reformular las ideas sobre el tiempo. Según Einstein, el espacio y el tiempo no podían seguir siendo considerados como entes independientes. Aunque no son lo mismo —el tiempo y el espacio son evidentemente distintos —, las magnitudes que medimos dependen de la velocidad a la que viajamos. La relatividad especial fue el resultado de esta idea.

Las novedosas consecuencias de la relatividad especial de Einstein, por estrafalarias que sean, pueden deducirse todas de dos postulados. Para enunciarlos, necesitamos comprender el significado de los *sistemas inerciales* , que son una categoría concreta de sistemas de referencia. Escojamos primero un sistema de referencia cualquiera que se mueva a un ritmo constante (en velocidad y en dirección); el sistema que está en reposo suele ser una buena elección. Los sistemas inerciales serían entonces los que se mueven con una velocidad vectorial constante con respecto al primero que fijamos: por ejemplo, alguien que corre o que va conduciendo a velocidad constante.

Los postulados de Einstein afirman entonces que:

Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas inerciales.

La velocidad de la luz,

c

, es la misma en cualquier sistema inercial.

Los dos postulados nos dicen que las leyes de Newton están incompletas. Una vez que admitimos los postulados de Einstein, no nos queda otra elección que reemplazar las leyes de Newton por nuevas leyes que sean consistentes con estas reglas[M8] . Las leyes de la relatividad especial que surgen así conducen

a las consecuencias sorprendentes de las que posiblemente alguna vez hemos oído hablar, como la dilatación del tiempo, el hecho de que la simultaneidad dependa del observador o la contracción de Lorentz de un objeto en movimiento. Las nuevas leyes han de parecerse mucho a las antiguas leyes físicas clásicas cuando se aplican a objetos que se mueven a velocidades que son pequeñas en comparación con la velocidad de la luz. Pero cuando se aplican a algo que se mueve muy deprisa, o con velocidad próxima a la de la luz, la diferencia entre las formulaciones de Newton y las de la relatividad especial se vuelve evidente.

Por ejemplo, en la mecánica de Newton las velocidades sencillamente se suman. Un coche que se cruza con el nuestro en la autovía se aproxima a una velocidad que es la suma de su velocidad y la nuestra. Análogamente, si alguien nos lanza una pelota desde el andén cuando estamos en un tren en marcha, la velocidad de la pelota parece ser la suma de la velocidad de la propia pelota y de la velocidad del tren en marcha. (Un antiguo alumno mío, Witek Skiba, puede atestiguar este hecho. Witek casi perdió el conocimiento cuando, en una ocasión, le golpeó una pelota que alguien lanzó sobre el tren en el que iba).

Según la física de Newton, la velocidad de un rayo de luz dirigido hacia un tren en marcha sería la suma de la velocidad de la luz y de la velocidad del tren en marcha. Pero esto no puede ser cierto si la velocidad de la luz es constante, como afirma el segundo postulado de Einstein. Si la velocidad de la luz es siempre la misma, entonces la velocidad del rayo dirigido al tren en marcha será idéntica a la velocidad de un rayo de luz que llegue a nosotros cuando estamos parados en tierra. Aunque el hecho vaya contra la intuición que hemos adquirido a partir de nuestra experiencia de las velocidades lentas que encontramos en la vida cotidiana, la velocidad de la luz es constante, y en la relatividad especial las velocidades no se suman simplemente como en la mecánica de Newton. Por el contrario, las velocidades se suman según una fórmula relativista que se deduce de los postulados de Einstein.

Muchas de las consecuencias de la relatividad especial no concuerdan con nuestras nociones familiares de tiempo y espacio. La relatividad especial trata el tiempo y el espacio de una forma diferente a la forma en que habían sido tratados hasta entonces en la mecánica de Newton, y esto es lo que hace que muchos de sus resultados vayan en contra la intuición. Las medidas del tiempo y del espacio dependen de la velocidad y se mezclan entre sí en los sistemas en los que uno se mueve en relación con el otro. No obstante, una vez que uno acepta los dos postulados, aparecen como una consecuencia inevitable nociones diferentes de espacio y tiempo, por sorprendentes que éstas sean.

He aquí un argumento que explica por qué. Imaginemos dos barcos idénticos con mástiles idénticos. Uno de los barcos está atracado en la orilla, mientras que el otro se aleja sobre el agua. Imaginemos también que los capitanes de ambos barcos han sincronizado sus relojes cuando partió el primero.

Supongamos ahora que los dos capitanes hacen algo bastante raro: ambos deciden medir el tiempo en su barco colocando un espejo en lo alto del mástil y un segundo espejo en su base, lanzando un rayo de luz del espejo de abajo

al espejo de arriba y contando el número de veces que la luz llega hasta el espejo y vuelve. En la práctica, esto sería absurdo, por supuesto, ya que la luz subiría y bajaría tantísimas veces que sería imposible contarlas. Pero tengamos un poco de paciencia e imaginemos que los capitanes saben contar a una velocidad increíble; voy a usar este ejemplo un poco artificial para argumentar que el tiempo ha de estirarse en el barco que está en movimiento.

Si ambos capitanes saben cuánto tarda la luz en recorrer un ciclo, pueden calcular el paso del tiempo multiplicando el tiempo que tarda la luz en recorrer un ciclo por el número de veces que la luz sube y baja entre los dos espejos. Supongamos ahora que, sin embargo, en vez de usar su propio reloj estático a base de espejos, el capitán del barco atracado mide el tiempo contando el número de veces que la luz del barco en movimiento llega hasta el espejo del mástil y regresa.

Desde el punto de vista del capitán del barco en movimiento, la luz simplemente sube y baja, siguiendo una trayectoria recta. Sin embargo, desde el punto de vista del capitán del barco atracado, la luz tiene que hacer un recorrido más largo, para cubrir la distancia que recorre el barco en movimiento (véase la figura 35). Pero —y ésta es la parte que va contra la intuición— la velocidad de la luz es constante. Es la misma para la luz lanzada al extremo del mástil del barco atracado y para la luz lanzada al extremo del mástil del barco en movimiento. Como la velocidad mide la distancia recorrida dividida por el tiempo, y la velocidad de la luz para el barco en movimiento es la misma que la velocidad de la luz para el que está en reposo, el reloj de los espejos en movimiento tiene que «andar» a un ritmo más lento para compensar la distancia más larga que debe recorrer la luz en movimiento. Esta conclusión tan opuesta a la intuición —que un reloj en movimiento y un reloj en reposo tienen que andar a ritmos diferentes— surge del hecho de que la velocidad de la luz en un sistema de referencia en movimiento es la misma que la velocidad de la luz en uno en reposo. Y aunque ésta es una manera un tanto rara de medir el tiempo, la misma conclusión —que los relojes en movimiento andan más despacio— sería válida con independencia de la manera en la que se mida el tiempo. Si los capitanes llevaran relojes puestos, observarían el mismo fenómeno (de nuevo con la salvedad de que, para velocidades normales, el efecto sería minúsculo).

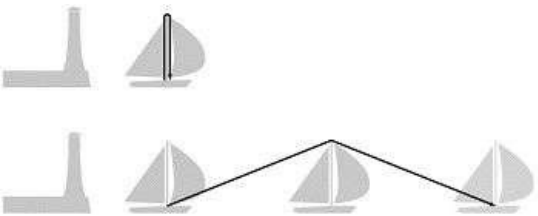


FIGURA 35. El camino seguido por un rayo de luz que rebota en lo alto del mástil de un barco en reposo y de uno en movimiento. Un observador estático (en una barca cerca de la playa o en un faro) vería un camino más largo en el segundo caso.

Aunque el ejemplo anterior sea artificial, el fenómeno descrito produce

efectos auténticamente detectables. Por ejemplo, la relatividad especial da lugar al tiempo distinto que experimentan los objetos que se mueven muy rápidamente: el fenómeno conocido como dilatación del tiempo.

Los físicos miden la dilatación del tiempo cuando estudian las partículas elementales generadas en los aceleradores o en la atmósfera, que se trasladan a velocidades relativistas, velocidades próximas a la velocidad de la luz. Por ejemplo, la partícula elemental llamada muón tiene la misma carga que el electrón, pero es más pesada y puede desintegrarse (o sea, puede convertirse en otras partículas más ligeras). La vida del muón, el tiempo que pasa hasta que se desintegra, es de sólo 2 microsegundos. Si un muón en movimiento tuviera la misma vida que uno en reposo, podría viajar solamente unos seiscientos metros antes de desaparecer. Pero los muones consiguen recorrer toda nuestra atmósfera y, en los aceleradores, llegar hasta los bordes de grandes detectores, porque su velocidad próxima a la de la luz hace que nos parezca que tienen una vida mucho más larga.

En la atmósfera, los muones viajan a una velocidad diez veces superior a la que les correspondería en un universo regido por principios newtonianos. El mero hecho de que veamos estos muones nos demuestra que la dilatación del tiempo (y la relatividad especial) produce efectos físicos auténticos.

La relatividad especial es importante porque supuso una desviación drástica de la física clásica y también porque fue esencial para el desarrollo de la relatividad general y la teoría cuántica de campos, teorías ambas que desempeñan un papel significativo en los desarrollos más recientes. Como no voy a utilizar predicciones específicas de la relatividad especial cuando discuta más adelante la física de partículas y los modelos extradimensionales, resistiré el vivo deseo de entrar a describir todas las fascinantes consecuencias de la relatividad especial, como ésa de que la simultaneidad depende de si el observador se mueve o no, o ésa de que el tamaño de un objeto en movimiento es distinto de su tamaño cuando está en reposo. En lugar de ello, ahondaremos en otro desarrollo crucial: la relatividad general, que será fundamental cuando consideremos más adelante la teoría de cuerdas y las dimensiones extras.

El principio de equivalencia: comienza la relatividad general

Einstein redactó su teoría de la relatividad especial en 1905. En 1907, mientras estaba trabajando en un artículo que resumía su trabajo reciente sobre el asunto, se vio ya preguntándose si la teoría podría aplicarse a todas las situaciones. Notó dos omisiones importantes. La primera, que las leyes físicas parecían las mismas solamente en ciertos sistemas de referencia inerciales especiales, los que se movían a una velocidad constante el uno respecto del otro.

En la relatividad especial, estos sistemas de referencia inerciales ocupaban una posición privilegiada. La teoría dejaba fuera cualquier sistema de referencia que se moviera aceleradamente. Si uno pisa el acelerador al conducir un coche, ya no estaría en uno de estos sistemas de referencia especiales en los que se cumple la relatividad especial. Esto es lo que significa la palabra *especial* en la relatividad especial: los sistemas inerciales

son solamente un pequeño subconjunto de todos los posibles sistemas de referencia. Para alguien que estaba convencido de que ningún sistema de referencia es especial, era un gran problema que la teoría privilegiara los sistemas de referencia inerciales.

La segunda inquietud de Einstein tenía que ver con la gravedad. Aunque había determinado cómo responden los objetos a la gravedad en algunas situaciones, todavía no había descubierto fórmulas para determinar en primera instancia el campo gravitatorio. La forma de la ley de la fuerza gravitatoria se conocía en algunas situaciones más sencillas, pero Einstein era todavía incapaz de deducir el campo para cualquier distribución posible de materia.

Entre 1905 y 1915, en una exploración que fue a veces penosa, Einstein abordó estos problemas. El resultado fue la relatividad general. Centró su nueva teoría en torno al *principio de equivalencia* , que afirma que los efectos de la aceleración no pueden distinguirse de los de la gravedad. Todas las leyes de la física parecerían las mismas a un observador sometido a una aceleración y a un observador en reposo, situado en un campo gravitatorio que acelera todas las cosas que hay en el sistema estacionario con una aceleración de la misma magnitud —pero de dirección contraria— que la aceleración del primer observador. En otras palabras, no habría modo de distinguir la aceleración uniforme del hecho de estar parado en un campo gravitatorio. Según el principio de equivalencia, no hay ninguna medida que pueda distinguir estas dos situaciones. Un observador no podría saber nunca en cuál de las dos situaciones se encuentra.

El principio de equivalencia proviene de la equivalencia entre la *masa inercial* y la *masa gravitatoria* , dos magnitudes que en principio podrían haber diferido. La masa inercial determina cómo responderá un objeto a la acción de una fuerza, o sea, cuánto se acelerará el objeto al aplicarle esa fuerza. El papel de la masa inercial queda resumido en la segunda ley del movimiento de Newton, $F = ma$, que dice que si aplicamos una fuerza de magnitud F a un objeto con masa m , produciremos una aceleración a . La famosa segunda ley de Newton dice que una fuerza dada produce una aceleración menor sobre un objeto que tiene una masa inercial superior, lo cual probablemente nos resulta muy familiar por experiencia. (Si empujamos un taburete, éste irá más lejos y más deprisa de lo que lo haría un piano si lo empujáramos con la misma fuerza). Obsérvese que esta ley se aplica a cualquier tipo de fuerza: la fuerza del electromagnetismo, por ejemplo. Puede aplicarse en situaciones que no tengan nada que ver en absoluto con la gravedad.

La masa gravitatoria, por otro lado, es la masa que entra en la ley de la fuerza gravitatoria y que determina la intensidad de la atracción gravitatoria. Como vimos, la intensidad de la fuerza gravitatoria newtoniana es proporcional a las dos masas que se atraen entre sí. Estas masas son masas gravitatorias. La masa gravitatoria y la masa inercial que entra en la segunda ley de la fuerza de Newton resultan ser la misma y por eso podemos darles sin peligro de confusión el mismo nombre: masa. Pero en principio podrían haber sido diferentes y habríamos tenido que llamar a la una «masa» y a la otra «asam». Por suerte, no es necesario hacer esto.

El misterioso hecho de que ambas masas sean la misma tiene implicaciones profundas, que precisaron de un Einstein para ser reconocidas y desarrolladas. La ley de la fuerza gravitatoria afirma que la intensidad de la gravedad es proporcional a la masa, y la ley de Newton nos dice cuánta aceleración sería generada por esa fuerza (o por cualquier otra). Como la intensidad de la gravedad es proporcional a la misma masa que determina ese valor de la aceleración, las dos leyes juntas nos dicen que, aunque la *fuerza* dependa de la masa según la ecuación $F = ma$, la aceleración inducida por la gravedad es enteramente independiente de la masa que sufre la aceleración.

La aceleración de la gravedad que cualquier objeto experimenta ha de ser la misma para cualquier persona o cosa que esté separada la misma distancia de otro objeto. Éste es el aserto que, según se cuenta, verificó Galileo al dejar caer objetos desde lo alto de la torre de Pisa[29] , demostrando que la Tierra induce la misma aceleración sobre todos los objetos, independientemente de su masa. Este hecho —el de que la aceleración es independiente de la masa del objeto acelerado— es exclusivo de la fuerza gravitatoria, ya que la intensidad de una fuerza depende de la masa sólo en el caso de la fuerza de la gravedad. Y como la ley de la fuerza gravitatoria y la ley del movimiento de Newton dependen de la masa del mismo modo, la masa se simplifica cuando se calcula la aceleración. La aceleración, por lo tanto, no depende de la masa.

Esta deducción relativamente clara tiene profundas consecuencias. Como todos los objetos tienen la misma aceleración en un campo gravitatorio uniforme, si esta aceleración *única* pudiera simplificarse, las pruebas de la presencia de la gravedad se desvanecerían también. Y esto es exactamente lo que ocurre en el caso en que un cuerpo cae libremente: sufre la aceleración justa para borrar las pruebas de la gravedad.

El principio de equivalencia dice que si nosotros y todo lo que nos rodea estuviéramos en caída libre, no tendríamos conciencia del campo gravitatorio. Nuestra aceleración compensaría la aceleración que de otro modo hubiera producido el campo gravitatorio. Este estado de ingravidez es ahora familiar gracias a las imágenes grabadas en los cohetes en órbita, en los que los astronautas y los objetos que los rodean no experimentan ningún tipo de gravedad.

Los libros de texto suelen ilustrar los efectos de la ausencia de gravedad (desde el punto de vista privilegiado de un observador que cae libremente) con un dibujo de alguien que suelta una pelota en un ascensor que cae libremente. En el dibujo se ve a la persona y a la pelota cayendo a la vez. La persona que va en el ascensor vería siempre la pelota a la misma altura sobre el suelo del ascensor. No vería caer la pelota (véase la figura 36).

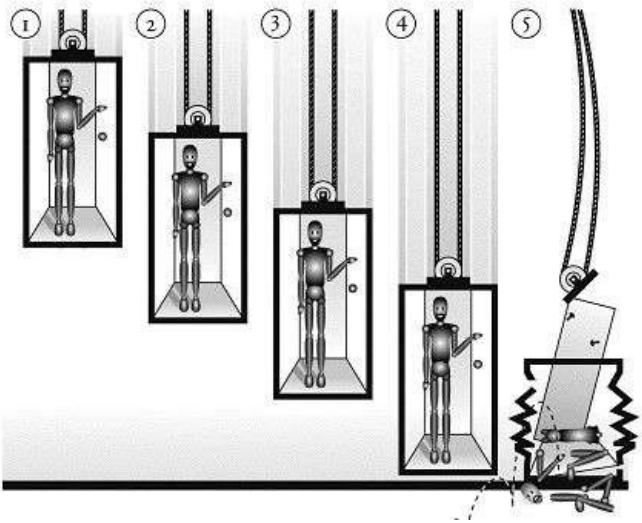


FIGURA 36. Un observador que, en un ascensor en caída libre, soltara una pelota no la vería caer. Sin embargo, cuando un ascensor en caída libre se encuentre con la Tierra, que está fija, el observador no va a sentirse muy bien.

Los textos de física siempre presentan el ascensor en caída libre como si fuera la cosa más natural del mundo que el observador que va dentro observase tranquilamente, con total ecuanimidad, que la pelota no cae, sin pensar en absoluto en su bienestar personal. Esto está en marcado contraste con las caras aterrorizadas que aparecen en las películas en las que alguien corta los cables de un ascensor y los actores se precipitan contra el suelo. ¿Por qué estas respuestas tan diferentes? Si todo estuviera en caída libre, no habría ningún motivo de alarma. Esta situación sería indistinguible de una situación en la que todo está en reposo, eso sí, en un entorno de gravedad cero. Pero si, como en las películas, alguien está cayendo y el suelo situado debajo de él sigue igual, hay buenas razones para que se sienta petrificado. Si alguien está en un ascensor en caída libre y la solidez del suelo le espera al final de su descenso, podemos estar seguros de que notará las consecuencias de la gravedad cuando termine su caída libre (como se ilustra en la última viñeta de la figura 36).

La conclusión de Einstein parece tan sorprendente y extraña debido al hecho de que haber crecido aquí, en la Tierra, con un planeta estático bajo nuestros pies, influye en nuestra intuición. Cuando la fuerza de la Tierra nos mantiene quietos sobre el suelo, notamos los efectos de la gravedad porque no seguimos el camino hacia el centro de la Tierra, que la gravedad nos habría hecho seguir. Sobre la Tierra, estamos acostumbrados a que la gravedad haga caer las cosas. Pero «caer» significa, en realidad, «caer en relación a nosotros». Si estuviéramos cayendo junto a una pelota suelta, como si estuviéramos en un ascensor en caída libre, la pelota no caería más deprisa que nosotros. Por lo tanto, no la veríamos caer.

En un sistema de referencia en caída libre, todas las leyes de la física coincidirían con las leyes de la física que se cumplirían si uno y todo lo que le rodea estuviera en reposo. Un observador en caída libre observaría que el movimiento viene descrito por las mismas ecuaciones, consistentes con la relatividad especial, que son válidas para un observador en un sistema de referencia inercial, o sea, sin aceleración. En el artículo que escribió Einstein en 1907, en el que pasaba revista a la relatividad, explica cómo el campo gravitatorio tiene sólo una existencia relativa, «porque, para un observador en caída libre desde el tejado de una casa, el campo gravitatorio —al menos en su entorno inmediato— no existe»[30] .

Ésta fue la idea más importante de Einstein. Las ecuaciones del movimiento para un observador en caída libre son las ecuaciones del movimiento para un observador en un sistema de referencia inercial. Un observador en caída libre no siente la fuerza de la gravedad: sólo los objetos que no están en caída libre experimentan una fuerza gravitatoria.

En la vida cotidiana no solemos encontrar ni personas ni cosas en caída libre. Cuando se produce una caída libre, se presenta como algo espantoso y muy peligroso. Pero, como le dijo un irlandés al físico Raphael Bousso cuando visitaba los acantilados de Moher, en Irlanda: «No es la caída lo que te mata, sino el %&!# choque cuando paras». Y en una ocasión en que me rompí varios huesos en un accidente que se produjo mientras escalaba y que me impidió ir a un congreso que yo misma había organizado, hubo un montón de chistes que explotaban la idea de que había intentado poner a prueba la teoría de la gravedad. Puedo afirmar con total seguridad que la aceleración gravitatoria concuerda con las predicciones.

Pruebas de la relatividad general

En la relatividad general hay más cosas; pronto llegaremos al resto, que costó bastante más tiempo desarrollar. Pero el principio de equivalencia explica él solo muchos resultados de la relatividad general. Una vez que Einstein hubo reconocido que la gravedad podía compensarse en un sistema de referencia acelerado, pudo calcular la influencia gravitatoria imaginando un sistema acelerado equivalente al de la gravedad. Esto le permitió calcular los efectos gravitatorios de algunos sistemas interesantes que otros podrían usar para comprobar sus conclusiones. Consideraremos ahora algunas de las pruebas experimentales más significativas.

La primera es el *desplazamiento gravitatorio de la luz hacia el rojo* . Un desplazamiento hacia el rojo hace que detectemos las ondas luminosas a una frecuencia más baja que la frecuencia a la que fueron emitidas. (Todos habremos experimentado probablemente un efecto análogo en las ondas sonoras, cuando nos ha adelantado una moto rugiente y las ondas sonoras subían y bajaban de tono).

Hay varias maneras de entender el origen del desplazamiento gravitatorio hacia el rojo, pero probablemente la más sencilla sea por medio de una analogía. Imaginemos que lanzamos una pelota al aire. La velocidad de la pelota se va aminorando a medida que sube, ya que se mueve en contra de la

fuerza de la gravedad. Pero la energía de la pelota no se pierde, a pesar de que ésta vaya deteniéndose. Se convierte en energía potencial, que es de nuevo liberada en forma de energía cinética, o energía del movimiento, cuando la pelota vuelve a caer.

El mismo razonamiento se aplica a la partícula de la luz, el fotón. Así como la pelota pierde velocidad cuando es lanzada al aire, el fotón pierde velocidad cuando escapa de un campo gravitatorio. Como con la pelota, esto significa que el fotón pierde energía cinética, pero gana energía potencial al esforzarse por salir del campo gravitatorio. Pero un fotón no puede ralentizar su movimiento como hace la pelota, ya que se desplaza siempre a la velocidad constante de la luz. Anticipándonos un poco, adelantemos que en el capítulo siguiente veremos que, como consecuencia de la mecánica cuántica, un fotón reduce su energía cuando reduce su frecuencia. Y esto es exactamente lo que le ocurre al fotón al atravesar el potencial gravitatorio cambiante. Para reducir su energía, el fotón reduce su frecuencia, y esta frecuencia más baja es el desplazamiento gravitatorio hacia el rojo.

Y viceversa, un fotón que se acerque hacia una fuente gravitatoria incrementará su frecuencia. En 1965, el físico Robert Pound, nacido en Canadá, y uno de sus estudiantes, Glen Rebka, midieron este efecto estudiando los rayos gamma emitidos por hierro radioactivo, que colocaron en lo alto de la torre del Laboratorio Jefferson de Harvard, el edificio donde ahora trabajo. (Se llama «la torre» a un ático que destaca del conjunto, así como a los pisos que hay debajo, aunque todo ello forme parte del edificio). Los campos gravitatorios en lo alto de la torre y en su base eran ligeramente diferentes, ya que lo alto de la torre está un poquito más lejos del centro de la Tierra. Una torre alta sería mejor para hacer esta medida, ya que haría máxima la diferencia de altura entre el punto desde el que se emitieron los rayos gamma (lo alto de la torre) y el punto en el que se detectaron (el suelo). Pero aunque la torre tenga sólo tres pisos, un ático y unas ventanas que se abren por encima de aquél —en total son 18 metros de altura—, Pound y Rebka consiguieron medir la diferencia de frecuencia entre los fotones emitidos y los absorbidos con una precisión increíble, de cinco partes en mil billones. Establecieron, por lo tanto, que las predicciones de la relatividad general para el desplazamiento de la luz hacia el rojo eran correctas con una precisión de al menos un uno por ciento.

Una segunda consecuencia observable experimentalmente del principio de equivalencia es el desvío de la luz. La gravedad puede atraer energía, además de masa. En definitiva, la famosa relación $E = mc^2$ significa que la energía y la masa están íntimamente ligadas. Si la masa experimenta la gravedad, la energía también habría de experimentarla. La gravedad del Sol influye sobre la masa y afecta igualmente a la trayectoria de la luz. La teoría de Einstein predecía exactamente cuánto se desviaría la luz bajo la influencia del Sol. Estas predicciones se confirmaron por primera vez durante el eclipse solar de 1919.

El científico inglés Arthur Eddington organizó expediciones a la isla del Príncipe, junto a la costa de África Occidental, y a Sobral, en Brasil, los sitios desde donde mejor se vería el eclipse. Su propósito era fotografiar las estrellas que estuvieran próximas al Sol eclipsado y comprobar si en la

fotografía aparecían o no desplazadas con respecto a sus posiciones usuales. Si las estrellas aparecieran desplazadas, eso significaría que la luz que emitían había seguido una trayectoria desviada. (Los científicos tuvieron que realizar las mediciones durante un eclipse, de modo que la luz solar no absorbiera por completo la luz mucho más pálida de las estrellas). Por supuesto, las estrellas aparecieron justo en los sitios «erróneos» esperados. La medida del ángulo correcto de desvío procuró una prueba muy sólida que corroboraba la teoría de la relatividad general de Einstein.

Increíblemente, el desvío de la luz está tan bien establecido y comprendido que es uno de los métodos que se ha usado para sondear la distribución de masa en el universo y para buscar materia oscura en forma de pequeñas estrellas apagadas, que ya no emiten luz. Como los gatos negros en una noche sin luna, estos objetos son muy difíciles de ver. La única manera de verlos es por medio de sus efectos gravitatorios.

El efecto de la lente gravitatoria es uno de los caminos por los cuales los astrónomos pueden descubrir la presencia de objetos oscuros; los objetos oscuros, como todo lo demás, interactúan por medio de la gravedad. Aunque las estrellas apagadas no emiten luz por sí mismas, pueden tener objetos brillantes detrás de ellas (desde nuestro punto de vista), cuya luz podemos ver. Si no hubiera ninguna estrella oscura cerca de su camino, la luz viajaría en línea recta. Pero la luz emitida por una estrella brillante se desviará al pasar cerca de la estrella oscura. La luz que pase por la izquierda se desviará en dirección opuesta a la luz que pase por la derecha, y la luz que pase por arriba se desviará en dirección opuesta a la luz que pase por debajo. Esto creará imágenes múltiples de un objeto brillante que esté detrás de una estrella oscura, y el efecto se llama *lente gravitatoria* . La figura 37 muestra un ejemplo de la imagen múltiple de una estrella que apareció cuando un objeto interpuesto y con mucha masa desvió los rayos de luz de la estrella en diferentes direcciones.

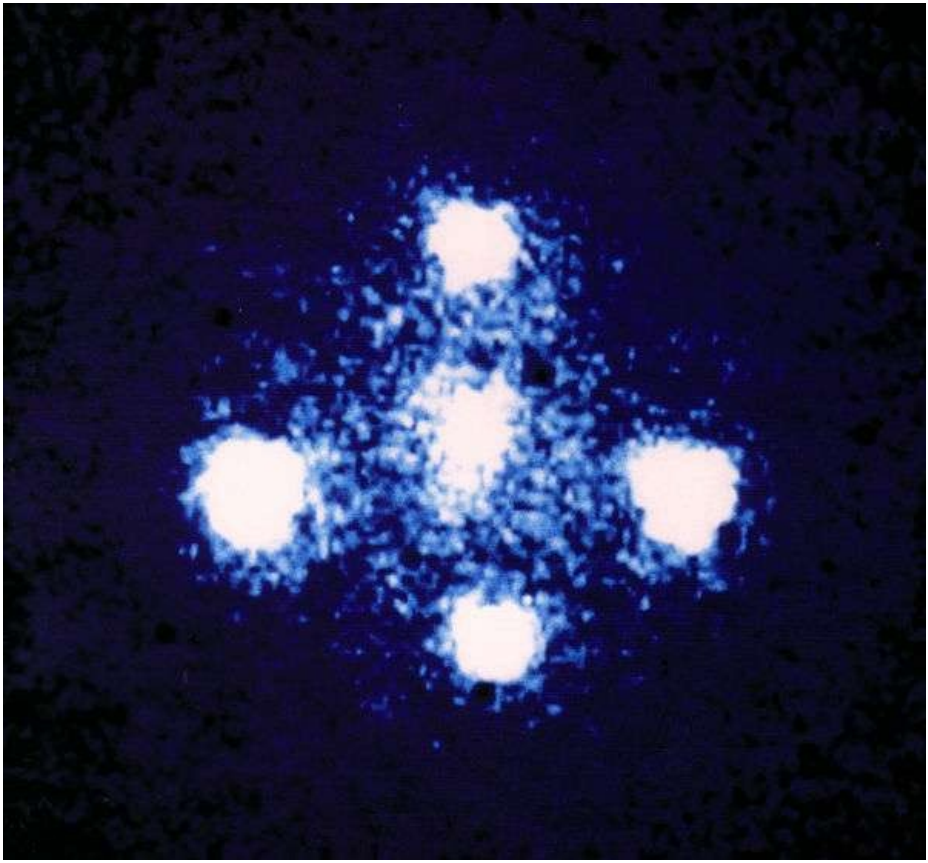


FIGURA 37. La «Cruz de Einstein» se constituye cuando se forman imágenes múltiples de un quásar brillante lejano, al desviarse la luz en diferentes direcciones al pasar por una galaxia con mucha masa interpuesta en su camino.

Las graciosas curvas del universo

El principio de equivalencia dice que la fuerza de la gravedad es indistinguible de la aceleración constante. Me alegro de que hayamos tratado este punto, porque ahora tengo que confesar que simplifiqué el asunto y que las dos cosas no son, a la postre, del todo indistinguibles. ¿Cómo iban a serlo? Si la gravedad fuera equivalente a la aceleración, sería imposible que las personas que están en hemisferios opuestos resultaran atraídas simultáneamente por la Tierra. En definitiva, la Tierra no puede acelerar en dos direcciones a la vez. El tirón gravitatorio, que en América y en China se siente en direcciones opuestas, por ejemplo, no puede ser atribuido de ningún modo a una única aceleración.

La solución de esta paradoja es que el principio de equivalencia solamente afirma que la gravedad puede ser reemplazada por la aceleración *localmente* . En sitios diferentes del espacio, la aceleración que reemplazaría a la

gravedad, según el principio, apuntaría en general en direcciones diferentes. La respuesta a nuestro problema sobre las relaciones entre chinos y americanos es que la gravedad americana es equivalente a una aceleración en una dirección diferente de la dirección de la aceleración que reproduciría la gravedad china.

Esta idea crucial condujo a Einstein a una reformulación completa de la teoría de la gravedad. Ya no volvió a considerar la gravedad como una fuerza que actúa directamente sobre un objeto. La describió, por el contrario, como una distorsión de la geometría del espacio-tiempo, que a su vez refleja las diferentes aceleraciones precisas para anular la gravedad en diferentes lugares. El espacio-tiempo deja de ser el fondo entre paréntesis de un suceso: es un personaje activo. Con la teoría de la relatividad general de Einstein, la fuerza de la gravedad es interpretada en términos de la curvatura del espacio-tiempo, sobre la que reposa la teoría revolucionaria de Einstein.

Espacio curvado y espacio-tiempo curvado

Una teoría matemática ha de ser internamente consistente pero, al contrario que una teoría científica, no tiene la obligación de corresponder a una realidad física externa. Es verdad que con frecuencia los matemáticos se han inspirado en lo que ven en el mundo que los rodea. Algunos objetos matemáticos, como los cubos o los números naturales, tienen réplicas en el mundo real. Pero los matemáticos extienden sus suposiciones sobre estos objetos familiares a objetos cuya realidad física es menos segura, como los teseractos (hipercubos en el espacio de dimensión cuatro) y los cuaternios (un sistema numérico exótico).

Euclides escribió sus cinco postulados fundamentales en el siglo III a. de C. A partir de estas hipótesis se desarrolló una bonita estructura lógica, de la que seguramente nos han llegado algunas muestras en la enseñanza secundaria. Pero los matemáticos posteriores se encontraron con problemas relativos al quinto postulado, el que se conoce como postulado de las paralelas. Este postulado afirma que, dada una recta y un punto que no está sobre la recta, hay una y sólo una recta que pasa por el punto y que es paralela a la recta dada.

Durante dos mil años después de que Euclides formulara su postulado, los matemáticos discutieron sobre si este quinto postulado era, de hecho, independiente o meramente una consecuencia lógica de los otros cuatro. ¿Podría haber un sistema geométrico para el que todos los postulados fueran ciertos, salvo el último? Si no existiera un sistema semejante, el quinto postulado no sería independiente y se podría prescindir de él.

Hubo que esperar hasta el siglo XIX para que los matemáticos colocaran el quinto postulado en el lugar que le correspondía. El gran matemático alemán Carl Friedrich Gauss descubrió que la quinta suposición de Euclides era exactamente lo que éste había proclamado: un postulado que podía ser reemplazado por otro. Dio un paso más y lo reemplazó, descubriendo así otros sistemas geométricos y demostrando, por lo tanto, que el quinto postulado era independiente. Con esto nació la geometría no euclídea.

Un matemático ruso, Nikolai Ivanovich Lobachevsky, también desarrolló la geometría no euclídea, pero cuando envió su trabajo a Gauss sufrió una decepción al saber que este matemático, más veterano, había propuesto la misma idea cincuenta años antes. Pero ni Lobachevsky ni nadie más había sabido nada de los resultados de Gauss, que el alemán había ocultado por miedo a que sus colegas lo ridiculizaran.

Gauss no debió haberse preocupado. Es obvio que el quinto postulado de Euclides no siempre es cierto, porque todos conocemos otras alternativas. Por ejemplo, los meridianos se encuentran en el polo Norte y en el polo Sur, aunque son paralelos en el ecuador. La geometría sobre una esfera es un ejemplo de geometría no euclídea. Si los antiguos hubieran escrito sobre esferas en vez de sobre rollos, esto podría haber sido obvio también para ellos.

Pero hay muchos ejemplos de geometrías no euclídeas que, al contrario que la esfera, no pueden representarse físicamente en un mundo tridimensional. Las geometrías no euclídeas originales de Gauss, Lobachevsky y el matemático húngaro János Bolyai[31] versaban sobre dichas teorías imposibles de dibujar, lo que hace que resulte menos sorprendente que se tardara tanto en descubrirlas.

Unos ejemplos ilustran qué es lo que diferencia a las geometrías curvadas de la geometría plana de esta página. La figura 38 muestra tres superficies bidimensionales. La primera, la superficie de una esfera, tiene curvatura positiva constante. La segunda, una sección de un plano, tiene curvatura cero. Y la tercera, un paraboloide hiperbólico, tiene curvatura negativa constante. Son ejemplos de superficies curvadas negativamente la forma de una silla de montar, el terreno entre las cimas de dos montañas y una patata frita de la marca Pringles.



FIGURA 38. Superficies de curvatura positiva, cero y negativa.

Hay muchas pruebas decisivas que pueden decirnos cuál de los tres posibles tipos de curvatura posee cualquier espacio geométrico concreto. Por ejemplo, podemos dibujar un triángulo en cada una de las tres superficies. En la superficie plana, la suma de los ángulos de un triángulo es siempre exactamente 180 grados. Pero ¿qué pasa en un triángulo sobre la superficie de la esfera, con un vértice en el polo Norte y los otros dos vértices en el ecuador, separados entre sí por un cuarto de la longitud total del ecuador? Cada uno de los ángulos de este triángulo es un ángulo recto de 90 grados. Por lo tanto, la suma de los ángulos del triángulo es 270 grados. Esto no podría ocurrir nunca en una superficie plana, pero en una superficie con curvatura positiva la suma de los ángulos de un triángulo ha de exceder los

180 grados, ya que la superficie está abombada hacia fuera.

Análogamente, la suma de los ángulos de un triángulo dibujado sobre un paraboloide hiperbólico es siempre inferior a 180 grados, lo cual refleja su curvatura negativa. Esto es un poco más difícil de ver. Dibujemos dos vértices cerca de la parte superior de la silla de montar y otro en la parte baja, a lo largo de una de las partes más bajas del paraboloide hiperbólico, donde estaría situado uno de nuestros pies si estuviéramos montados a caballo. Este último ángulo es más pequeño de lo que sería si la superficie fuera plana. Los ángulos suman menos de 180 grados.

Una vez que quedó establecido que las geometrías no euclídeas eran internamente consistentes —o sea, que sus premisas no conducían a paradojas o contradicciones—, el matemático alemán Georg Friedrich Bernhard Riemann desarrolló una rica estructura matemática para describirlas. Un trozo de papel no puede enrollarse para formar una esfera, pero sí para formar un cilindro. No podemos aplanar una silla de montar sin que se arrugue o se superpongan unas partes sobre otras. Apoyándose en los trabajos de Gauss, Riemann creó un formalismo matemático que abarca estos hechos. En 1854 encontró una solución general al problema de cómo caracterizar todas las geometrías mediante sus propiedades intrínsecas. Sus estudios establecieron los fundamentos de la geometría diferencial moderna, una rama de las matemáticas que estudia las superficies y la geometría.

Como a partir de ahora voy a considerar casi siempre el espacio y el tiempo juntos, en general vamos a comprobar que la noción de *espacio-tiempo* es más útil que la noción de espacio. El espacio-tiempo tiene una dimensión más que el espacio: además de «arriba-abajo», «izquierda-derecha» y «adelante-atrás», incluye el tiempo. En 1908, el matemático Hermann Minkowski usó nociones geométricas para desarrollar esta idea de una estructura absoluta de espacio-tiempo. Mientras Einstein estudió el espacio-tiempo usando el tiempo y las coordenadas espaciales que dependían de un sistema de referencia, Minkowski identificó la estructura del espacio-tiempo independiente del observador, que puede emplearse para caracterizar una situación física dada.

En el resto del libro, cuando me refiera a la dimensión, estaré precisando el número de dimensiones del espacio-tiempo, excepto cuando diga explícitamente otra cosa. Por ejemplo, cuando miramos en torno nuestro vemos lo que voy a llamar a partir de ahora un universo de dimensión cuatro. En ocasiones distinguiré el tiempo y hablaré de un universo de dimensión «tres-más-uno» o de tres dimensiones espaciales. Recuérdese que todos estos términos se refieren a un mismo marco: el que tiene tres dimensiones espaciales y una temporal.

La estructura del espacio-tiempo es una noción muy importante. Caracteriza de modo conciso la geometría que corresponde al campo gravitatorio producido por una distribución concreta de energía y materia. Pero a Einstein inicialmente le disgustó la idea, ya que le pareció una manera demasiado artificiosa de volver a formular la física que él ya había explicado. Sin embargo, finalmente reconoció que la estructura del espacio-tiempo era esencial para describir la relatividad general y calcular completamente los

campos gravitatorios. (Para dejar las cosas claras, tampoco Einstein impresionó demasiado a Minkowski en su primer encuentro. Basándose en el rendimiento de Einstein cuando era estudiante en la clase de cálculo que impartía Minkowski, éste llegó entonces a la conclusión de que Einstein era un «perro perezoso»).

Einstein no fue el único en resistirse a la geometría no euclídea. Su amigo Marcel Grossmann, un matemático suizo, también la consideró más complicada de lo necesario e intentó convencer a Einstein de que prescindiera de ella. Sin embargo, ambos reconocieron finalmente que el único modo abordable de explicar la gravedad era usar la geometría no euclídea para representar la estructura del espacio-tiempo. Sólo entonces pudo Einstein interpretar y calcular el pandeo del espacio-tiempo que era equivalente a la gravedad y que resultó ser la clave para completar la relatividad general. Después de que Grossmann reconociera la derrota, él y Einstein se esforzaron en abrirse camino por el laberinto de la geometría diferencial para simplificar sus primeros intentos, enormemente complicados, de llegar a una formulación de la teoría de la gravedad. Al final, completaron la teoría de la relatividad general y consiguieron una comprensión más profunda de la gravedad misma.

La teoría de la relatividad general de Einstein

La relatividad general presentaba una revisión radical del concepto de gravedad. Ahora entendemos la gravedad —la fuerza que mantiene nuestros pies pegados a la tierra y que une a nuestra galaxia y el universo— no como una fuerza que actúa directamente sobre los objetos, sino como una consecuencia de la geometría del espacio-tiempo, una idea que llevó la visión de Einstein de la unión del espacio y del tiempo hasta sus últimas consecuencias lógicas. La relatividad general explota la conexión profunda entre la masa inercial y la masa gravitatoria para formular el efecto de la gravedad *únicamente* en términos de la geometría del espacio-tiempo. Cualquier distribución de materia o de energía curva o pandea el espacio-tiempo. Las sendas curvadas en el espacio-tiempo determinan el movimiento gravitatorio, y la materia y la energía del universo hacen que el espacio-tiempo mismo se expanda, se ondule o se contraiga.

En el espacio plano, la distancia más corta entre dos puntos, la *geodésica* , es la línea recta. En un espacio curvado se puede seguir definiendo la geodésica como el camino más corto entre dos puntos, pero ese camino no tiene por qué parecer necesariamente recto. Por ejemplo, las rutas de los aviones, que siguen círculos máximos sobre la superficie de la Tierra, son geodésicas. (Un círculo máximo es cualquier círculo, como el ecuador o los meridianos, que recorre la parte más gruesa de la esfera). Aunque estos caminos no son rectos, son las rutas más cortas que no precisan excavar un túnel a través de la Tierra.

En el espacio-tiempo curvado de dimensión cuatro podemos también definir lo que es una geodésica. Para dos sucesos separados en el tiempo, una geodésica es el camino natural que tomarían las cosas en el espacio-tiempo para conectar un suceso con el otro. Einstein comprendió que la caída libre, que es el camino de menor resistencia, es el movimiento a lo largo de una

geodésica del espacio-tiempo. De esto dedujo que, en ausencia de fuerzas externas, los objetos sueltos caerán siguiendo una geodésica, como el camino que seguía la persona del ascensor en caída libre, que no sentía su peso ni veía caer la pelota.

Sin embargo, incluso cuando las cosas están siguiendo las geodésicas del espacio-tiempo y no hay fuerzas externas, la gravedad tiene efectos perceptibles. Ya hemos visto que la equivalencia local entre gravedad y aceleración fue una de las ideas cruciales que condujeron a Einstein a desarrollar un modo enteramente nuevo de pensar sobre la gravedad. Él dedujo que, como la aceleración inducida por una fuerza gravitatoria es localmente la misma para todas las masas, la gravedad ha de ser una propiedad del espacio-tiempo mismo. Por eso la «caída libre» significa cosas diferentes en sitios diferentes, y la gravedad puede sustituirse por una única aceleración sólo localmente. Mi colega chino y yo caemos en direcciones diferentes, aunque ambos estemos en nuestra versión local del ascensor de Einstein. El hecho de que la dirección de la caída libre no sea la misma en todas partes es un reflejo de la curvatura del espacio-tiempo. No hay una aceleración *única* que pueda anular los efectos de la gravedad en todas partes. En el espacio-tiempo curvado, las geodésicas de observadores diferentes serán en general diferentes. Así es que, globalmente, la gravedad tiene consecuencias observables.

La relatividad general va mucho más lejos que la gravedad newtoniana porque nos permite calcular el campo gravitatorio relativista de cualquier distribución de energía y materia. Además, la revelación de que la geometría del espacio-tiempo codifica los efectos de la gravedad permitió a Einstein rellenar una de las grietas más profundas de su formulación original de la gravedad. Aunque los físicos sabían en ese momento cómo responderían los objetos a un campo gravitatorio, no sabían qué era la gravedad. Ahora comprendieron que el campo gravitatorio es la distorsión de la estructura del espacio-tiempo provocada por la materia y la energía. Esta distorsión se extiende a lo largo y ancho del cosmos mismo, o, como veremos enseguida, a lo largo y ancho de un espacio-tiempo de dimensión superior que podría incluir branas. Todos los efectos gravitatorios de estas situaciones más complicadas pueden engastarse en los rizos y curvas de una superficie de espacio-tiempo.

Un dibujo proporciona quizá la mejor descripción de cómo la materia y la energía distorsionan la estructura del espacio-tiempo para crear un campo gravitatorio. La figura 39 muestra una esfera de materia situada en el espacio. El espacio que rodea la esfera sufre una distorsión: la bola produce una depresión en la superficie espacial, cuya profundidad refleja la masa o la energía de la bola. Una bola que pase cerca rodará hacia la depresión central, donde está situada la masa. Según la relatividad general, la estructura del espacio-tiempo se comba de un modo análogo. Otra bola que pase por ella se aceleraría hacia el centro de la esfera. En este caso, el resultado coincidiría con lo que predice la ley de Newton, pero la interpretación y el cálculo del movimiento serían muy diferentes. Según la relatividad general, una bola sigue las ondulaciones de la superficie del espacio-tiempo, y, en consecuencia, realiza el movimiento inducido por el campo gravitatorio.

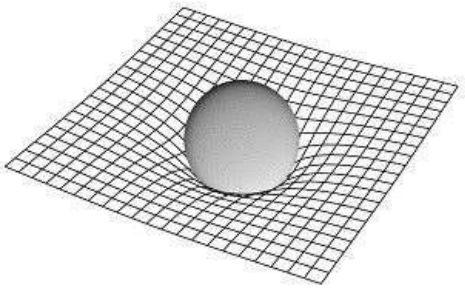


FIGURA 39. Un objeto con masa distorsiona el espacio que lo rodea, creando así un campo gravitatorio.

La figura 39 es un poco engañosa, así que convendría tener en mente algunas advertencias. Antes de nada, he mostrado el espacio que rodea la bola como si fuera bidimensional. Pero, en realidad, el espacio tridimensional entero y el espacio-tiempo tetradimensional entero están también combados. El tiempo está, asimismo, combado porque también él es una dimensión desde el punto de vista propio de la relatividad especial y general. El tiempo combado se refleja, por ejemplo, en que la relatividad especial nos dice que los relojes andan a ritmos diferentes en sitios diferentes. Otra advertencia es que una segunda bola que vaya rodando en la geometría curvada hacia la primera bola también afectaría a la geometría del espacio-tiempo; hemos supuesto que su masa es mucho más pequeña que la de la bola grande y hemos despreciado este pequeño efecto. La tercera cosa que es importante considerar es que el objeto que distorsiona el espacio-tiempo puede tener cualquier número de dimensiones. Más adelante, una brana desempeñará el papel que representa la esfera en este dibujo.

A pesar de todo, en cada uno de los casos la materia le dice al espacio-tiempo cómo ha de curvarse, y el espacio-tiempo le dice a la materia cómo ha de moverse. El espacio-tiempo curvado establece los caminos geodésicos a lo largo de los cuales, en ausencia de otras fuerzas, han de viajar las cosas. La gravedad está codificada dentro de la geometría del espacio-tiempo. A Einstein le llevó la mayor parte de una década deducir esta conexión precisa entre el espacio-tiempo y la gravedad, e incorporar también los efectos del campo gravitatorio mismo: en definitiva, el campo gravitatorio transporta energía y está por lo tanto forzando el espacio-tiempo[32] . Fue un esfuerzo heroico.

En sus famosas ecuaciones, Einstein especificó cómo encontrar el campo gravitatorio del universo, dado el contenido del universo. Aunque su ecuación más conocida es $E = mc^2$, los físicos usan el término «ecuaciones de Einstein» para referirse a las ecuaciones que determinan el campo gravitatorio. Las ecuaciones llevan a cabo esta formidable tarea mostrando cómo determinar la métrica del espacio-tiempo a partir de una distribución conocida de materia[M9] . La métrica que uno calcula determina la geometría del espacio-tiempo, diciéndonos cómo traducir los números asociados a una escala arbitraria a distancias físicas y formas que determinan la geometría.

Con la formulación final de la relatividad general, los físicos pudieron determinar el campo gravitatorio y calcular su influencia. Como en las formulaciones previas de la gravedad, los físicos usan estas ecuaciones para calcular el modo en que se mueve la materia en un campo gravitatorio dado. Por ejemplo, pueden introducir la masa y la posición de un cuerpo esférico grande, como el Sol o la Tierra, y calcular la bien conocida atracción gravitatoria newtoniana. En este ejemplo concreto, los resultados no serían nuevos, pero sí su significado. La materia y la energía curvan el espacio-tiempo y esta curvatura produce la gravedad. Pero la relatividad general tiene la ventaja adicional de que incorpora cualquier tipo de energía —incluida la del campo gravitatorio mismo— en la distribución de materia y energía. Esto hace que la teoría sea útil incluso en las situaciones en las que la propia gravedad contribuye con una cantidad significativa de energía.

Al aplicarse a cualquier distribución de energía, las ecuaciones de Einstein cambiaron la perspectiva de los cosmólogos, los historiadores del cosmos. Ahora, si los científicos conocieran la materia y la energía que contiene el universo, podrían calcular su evolución. En un universo vacío, el espacio sería completamente plano, sin rizos ni ondulaciones, sin ninguna curvatura en absoluto. Pero cuando la energía y la materia llenan el universo, distorsionan el espacio-tiempo, produciendo posibilidades interesantes para la estructura y el comportamiento en el tiempo del universo.

En definitiva, es casi seguro que no vivimos en un universo estático: como veremos pronto, podríamos vivir en un universo combado de dimensión cinco. Por fortuna, la relatividad general nos dice cómo calcular sus consecuencias. Así como hay ejemplos de geometrías bidimensionales con curvatura positiva, cero o negativa, hay configuraciones geométricas de dimensión cuatro del espacio-tiempo con curvatura positiva, cero o negativa, que podrían surgir de distribuciones apropiadas de materia y energía. Más adelante, cuando discutamos la cosmología y las branas en dimensiones extras, las distorsiones del espacio-tiempo que surgen de la materia y de la energía —tanto en nuestro universo visible como en las branas y en el bulto— serán de importancia crucial. Veremos que los tres tipos de curvatura del espacio-tiempo (positiva, negativa y cero) podrían darse en dimensiones superiores también.

La relatividad general tiene una gran cantidad de consecuencias que no se pueden calcular con la gravedad newtoniana. Entre sus muchos méritos, la relatividad general eliminó la molesta acción-a-distancia de la gravedad newtoniana, que afirmaba que los efectos gravitatorios de un objeto se sentirían en todas partes en cuanto éste apareciera o se moviera. Con la relatividad general, sabemos que antes de que la gravedad pueda actuar tiene que deformarse el espacio-tiempo. Este proceso no ocurre instantáneamente. Lleva su tiempo. Las ondas gravitatorias viajan a la velocidad de la luz. Los efectos gravitatorios pueden manifestarse en una posición dada sólo una vez pasado el tiempo necesario para que una señal viaje hasta allí y distorsione el espacio-tiempo. Esto no puede pasar en menos tiempo que el que tardaría la luz —que viaja más deprisa que cualquier otra cosa que conozcamos— en llegar allí. Por ejemplo, nunca recibiremos una señal de radio o una llamada en un teléfono celular en menos tiempo del que tardaría un rayo de luz en

llegar hasta nosotros.

Además, los físicos pudieron usar las ecuaciones de Einstein para explorar otros tipos de campo gravitatorio. Con la relatividad general, los científicos estuvieron en condición de describir y de estudiar los agujeros negros. Estos objetos, fascinantes y enigmáticos, se forman cuando la materia se concentra intensamente en un volumen muy pequeño. En los agujeros negros, la geometría del espacio-tiempo se distorsiona muchísimo, tanto que todo lo que entra en un agujero negro se queda atrapado dentro. Ni siquiera la luz puede escapar. Aunque el astrónomo alemán Karl Schwarzschild descubrió que los agujeros negros eran una consecuencia de las ecuaciones de Einstein casi inmediatamente después del desarrollo de la relatividad general[33] , hasta los años sesenta los físicos no se tomaron en serio la idea de que podrían ser cosas reales en nuestro universo. Hoy, los agujeros negros son bien aceptados en la comunidad astrofísica. De hecho, parece que hay un agujero negro con una masa enorme en el centro de cada galaxia, incluida la nuestra. Además, si hay dimensiones ocultas, entonces existen agujeros negros de dimensión superior que, cuando son grandes, presentan un aspecto parecido al de los agujeros negros de dimensión cuatro que han observado los astrónomos.

Coda

Para terminar con la historia del sistema GPS, resulta que, para calcular la posición con una precisión de un metro, necesitamos medir el tiempo con una precisión superior a una parte en 10^{13} . La única manera posible de conseguir esta precisión es con un reloj atómico.

Pero aunque tuviéramos relojes perfectos, la dilatación del tiempo los ralentizaría aproximadamente en una parte en 10^{10} . Este error, si no se corrige, sería mil veces más grande de lo permitido para que el sistema GPS funcionase como deseamos. También tenemos que contar con el desplazamiento gravitatorio hacia el azul, un efecto de la relatividad general asociado con el hecho de que un fotón viaja a través de un campo gravitatorio cambiante, lo cual produce un error por lo menos tan grande como el otro. Ésta y otras desviaciones de la relatividad general darían errores que, si no se tienen en cuenta, se irían acumulando a un ritmo de más de 10 km al día[34] . Ike (y los sistema GPS en uso) han de corregir estos efectos relativistas.

Aunque ahora la relatividad haya sido bien comprobada y se vea que incluso produce efectos que hay que tener en cuenta para el buen funcionamiento de dispositivos prácticos, yo sigo pensando que fue más bien extraordinario que hubiera alguien que escuchara a Einstein al principio. Éste era un completo desconocido que trabajaba en la oficina de patentes de Berna porque no consiguió encontrar un empleo mejor. Desde este puesto inverosímil propuso una teoría que iba en contra de las creencias de todos los demás físicos de su tiempo.

Gerald Holton, un historiador de la ciencia de Harvard, me cuenta que el físico alemán Max Planck fue el primer defensor de Einstein. Sin Planck, que reconoció de inmediato la brillantez de los trabajos de Einstein, seguramente se hubiera tardado mucho más en reconocerlos y aceptarlos. Siguiendo a

Planck, unos pocos físicos destacados se dieron por enterados lo suficiente como para escuchar y prestar atención. Y poco después, lo mismo haría todo el mundo.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•La velocidad de la luz es constante. Es independiente de la velocidad del observador.

•La *relatividad* modifica nuestras nociones de espacio y tiempo y nos dice que podemos tratarlas juntas como una única estructura de espacio-tiempo.

•La relatividad especial relaciona los valores de la energía, del momento (que dice cómo responde un objeto a una fuerza) y de la masa. Por ejemplo, $E = mc^2$, donde E es la energía, m la masa y c es la velocidad de la luz.

•La masa y la energía hacen que el espacio-tiempo se curve, y podemos pensar que este espacio-tiempo curvado es el origen del campo gravitatorio.

6

LA MECÁNICA CUÁNTICA:

LA INCERTIDUMBRE COMO PRINCIPIO, LAS INCERTIDUMBRES PRINCIPALES Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

And you may ask yourself,

Am I right?… Am I wrong?

[Y puedes preguntarte, | ¿habré acertado?… ¿O me habré equivocado?].

TALKING HEADS

Ike no sabía si Atenea le estaba haciendo ver demasiadas películas o si Dieter estaba hablando demasiado de física. Pero cualquiera que fuera la razón, la noche pasada Ike soñó que conocía a un detective cuántico. Tocado con un sombrero fedora y vestido con una gabardina, el detective le dijo en sueños y con una expresión glacial en la cara: «Lo único que sabía de ella era su nombre y que estaba allí, delante de mí. Pero desde el momento en que la vi supe que Electra[35] me traería problemas. Cuando le pregunté de dónde venía, no quiso decírmelo. La habitación contaba con dos puertas y ella tenía que haber entrado por una de ellas. Pero Electra susurró, con voz ronca: "Olvídese, señor, nunca le diré por cuál".

»Aunque vi que estaba temblando, intenté inmovilizar a aquella mujer. Pero Electra comenzó a ir y venir frenéticamente por la habitación en cuanto procuré aproximarme a ella. Me rogó que no me acercara más. Al ver que estaba alterada, me mantuve aparte. Yo ya conocía la incertidumbre, pero esta vez me dejó deshecho. Parecía que la incertidumbre iba a quedarse merodeando por allí un buen rato».

La mecánica cuántica, a pesar de ir contra la intuición, alteró de modo fundamental el modo en que los científicos ven el mundo. Gran parte de la ciencia moderna se desarrolló a partir de la mecánica cuántica: la mecánica estadística, la física de partículas, la química, la cosmología, la biología molecular, la biología evolutiva y la geología (con la datación radiactiva) fueron todas inventadas o revisadas como resultado de su desarrollo. Muchos dispositivos del mundo moderno, como los ordenadores, los reproductores de DVD y las cámaras digitales, no serían posibles sin los transistores y la electrónica moderna, cuyo desarrollo dependió de los fenómenos cuánticos.

No estoy segura de haber sabido apreciar del todo lo rara que es la mecánica cuántica cuando la estudié por primera vez en el colegio. Entonces aprendí los principios básicos y supe aplicarlos en varios contextos. Pero hasta que expliqué la mecánica cuántica, muchos años después, y trabajé

detenidamente con su lógica peculiar, no llegué a ver lo fascinante que es. Aunque ahora podamos explicar la mecánica cuántica como parte de la formación habitual en la carrera de física, sigue siendo, no obstante, verdaderamente chocante.

La historia de la mecánica cuántica ejemplifica bellamente cómo se supone que evoluciona la ciencia. La mecánica cuántica primitiva se construyó siguiendo el espíritu de la teoría de modelos: abordaba observaciones confusas antes incluso de que nadie hubiera formulado una teoría subyacente. Los avances, tanto experimentales como teóricos, llegaron rápido y con furia. Los físicos desarrollaron la teoría cuántica para interpretar los resultados experimentales que la física clásica no podía explicar. Y la teoría cuántica, a su vez, sugirió nuevos experimentos con los que comprobar las hipótesis.

A los científicos les llevó tiempo clasificar todas las implicaciones de estas observaciones experimentales. La aportación de la mecánica cuántica era tan radical que la mayor parte de los científicos no pudieron asimilarla inmediatamente. Los científicos tuvieron que dejar en suspenso su incredulidad para poder aceptar las premisas de la mecánica cuántica, que eran muy diferentes de los conceptos clásicos familiares. Incluso algunos de los pioneros teóricos, como Max Planck, Erwin Schrödinger y Albert Einstein, nunca se convirtieron en realidad al modo de pensar de la mecánica cuántica. Einstein expresó su objeción con su famosa observación: «Dios no juega a los dados con el universo». La mayor parte de los científicos aceptaron finalmente la verdad (tal como ésta se entiende normalmente), pero no de inmediato.

La naturaleza radical de los avances científicos de principios del siglo XX se reflejó en la cultura moderna. Los fundamentos del arte y de la literatura, así como nuestra comprensión de la psicología, cambiaron radicalmente en aquellos tiempos. Aunque algunos atribuyeron estos desarrollos al trastorno y a los estragos de la primera guerra mundial, algunos artistas como Wassily Kandinsky se valieron del hecho de que el átomo era penetrable para justificar la idea de que todo puede cambiar, y de que en el arte, por lo tanto, todo está permitido. Kandinsky describió así su reacción al átomo nuclear: «El colapso del modelo del átomo fue equivalente, en mi espíritu, al colapso del mundo entero. De repente cayeron los muros más espesos. No me hubiera sorprendido nada que apareciera una piedra flotando en el aire ante mí, que se fundiera y que se volviera invisible»[36] .

La reacción de Kandinsky fue un poco extrema. Al ser los fundamentos de la mecánica cuántica tan radicales, es fácil extralimitarse cuando se les aplica en contextos que no son científicos. Para mí, el ejemplo más fastidioso es el principio de incertidumbre, del que se abusa con tanta frecuencia y que es a menudo malversado para justificar con mala fe la inexactitud. En este capítulo veremos que el principio de incertidumbre es, de hecho, un enunciado muy preciso sobre las magnitudes medibles. No obstante, es un enunciado con implicaciones sorprendentes.

Presentaremos ahora la mecánica cuántica y los principios subyacentes que la hacen tan diferente de la antigua física clásica. Los extraños conceptos nuevos que encontraremos incluyen la cuantización, la función de onda, la

dualidad onda-partícula y el principio de incertidumbre. Este capítulo esboza estas ideas claves y permite saborear algunos detalles históricos del proceso mediante el cual fueron surgiendo estas ideas.

Trauma y asombro

Sidney Coleman, físico de partículas, ha dicho que si miles de filósofos estuvieran miles de años buscando la cosa más extraña posible, nunca encontrarían algo tan raro como la mecánica cuántica. La mecánica cuántica es difícil de entender porque sus consecuencias son muy sorprendentes y van decididamente contra la intuición. Sus principios fundamentales van contra las premisas subyacentes de toda la física previamente conocida, y también contra nuestras propias experiencias.

Una razón por la que la mecánica cuántica parece tan extravagante es que no estamos equipados fisiológicamente para percibir la naturaleza cuántica de la materia y de la luz. Los efectos cuánticos resultan, en general, significativos a distancias de aproximadamente un angstrom, el tamaño de un átomo. Sin instrumentos especiales, sólo podemos ver tamaños mucho más grandes. Hasta los píxeles de una televisión o de un monitor de ordenador de alta resolución son normalmente demasiado pequeños como para que podamos verlos.

Además, sólo vemos enormes acumulaciones de átomos, tantos que la física clásica sofoca los efectos cuánticos. Normalmente, también percibimos sólo muchos cuantos de luz. Aunque un fotorreceptor de un ojo es lo suficientemente sensible como para detectar las unidades de luz más pequeñas posibles —los cuantos individuales—, un ojo, típicamente, procesa tal cantidad de cuantos que todos los efectos cuánticos posibles quedan sofocados por el comportamiento clásico, que resulta más claramente visible.

Si bien la mecánica cuántica es difícil de explicar, hay una muy buena razón para que ello sea así. La mecánica cuántica tiene suficiente alcance como para incorporar las predicciones clásicas, pero no al revés. En muchas circunstancias —por ejemplo, cuando se trata de objetos grandes—, las predicciones de la mecánica cuántica concuerdan con las de la mecánica clásica newtoniana. Pero no hay ningún rango de tamaños para el cual la mecánica clásica genere predicciones cuánticas. Así que, cuando intentamos comprender la mecánica cuántica usando terminología y conceptos clásicos familiares, estamos abocados a meternos en problemas. Tratar de usar nociones clásicas para describir efectos cuánticos es como tratar de traducir del francés al inglés con un vocabulario restringido a sólo cien palabras. Uno se encontraría con frecuencia con conceptos o palabras que sólo podrían interpretarse de modo vago, o que sencillamente sería imposible expresar con un vocabulario inglés tan limitado.

El físico danés Niels Bohr, uno de los pioneros de la mecánica cuántica, era consciente de lo inadecuado del lenguaje humano para describir el funcionamiento interno del átomo. Reflexionando sobre este asunto, contaba que sus modelos «[…] se le habían ocurrido de modo intuitivo […] como imágenes»[37] . Como explicó el físico Werner Heisenberg, «Tenemos que

recordar simplemente que nuestro lenguaje habitual ya no sirve, que estamos en el reino de la física, en el que nuestras palabras no valen mucho»[38] .

No pretenderé, por lo tanto, describir los fenómenos cuánticos con modelos clásicos. En vez de esto, describiré las hipótesis claves y los fenómenos que hacen que la mecánica cuántica sea tan diferente de las teorías clásicas que vinieron antes. Reflexionaremos individualmente sobre algunas de las observaciones e ideas claves que contribuyeron al nacimiento y al desarrollo de la mecánica cuántica. Aunque esta discusión sigue un esquema más o menos histórico, mi auténtico propósito es presentar uno a uno los muchos conceptos e ideas nuevos que son intrínsecos a la mecánica cuántica.

Los comienzos de la mecánica cuántica

La física cuántica se desarrolló por etapas. Comenzó como una serie de suposiciones aleatorias que casaban con las observaciones, aunque nadie entendía por qué casaban. Estas suposiciones inspiradas, que carecían de toda justificación física detrás pero que tenían la virtud de dar las respuestas correctas, fueron incluidas en lo que ahora se conoce como la *vieja teoría cuántica* . Esta teoría se caracterizaba por suponer que algunas magnitudes como la energía y el momento no podían tomar valores arbitrarios. Por el contrario, las posibilidades se limitaban a un conjunto discreto, cuantizado, de números.

La mecánica cuántica, que se desarrolló a partir del humilde antecedente de la vieja teoría cuántica, justifica las misteriosas suposiciones de cuantización que encontraremos en breve. Además, la mecánica cuántica proporciona un procedimiento preciso para predecir cómo evolucionan en el tiempo los sistemas de la mecánica cuántica, incrementando grandemente el poder de la teoría. Pero al principio la mecánica cuántica se desarrolló a tropezones, ya que entonces nadie comprendía realmente qué estaba pasando. Al comienzo, las suposiciones de cuantización eran lo único que había.

La vieja teoría cuántica nació en 1900, cuando el físico alemán Max Planck sugirió que la luz podía llegar solamente en unidades cuantizadas, igual que los ladrillos sólo pueden venderse en partidas separadas. Según la hipótesis de Planck, la cantidad de energía contenida en la luz de cualquier frecuencia específica podía solamente ser un múltiplo de la unidad fundamental de energía para esa frecuencia concreta. Esa unidad fundamental es igual a una cantidad, que se conoce ahora como la constante de Planck, h , multiplicada por la frecuencia, f . La energía de la luz con una frecuencia concreta f podía ser hf , $2hf$, $3hf$ y así sucesivamente, pero, según las hipótesis de Planck, nunca encontraríamos cantidades intermedias. Al revés que los ladrillos, cuya cuantización es arbitraria y no fundamental —los ladrillos pueden partirse—, hay una unidad de energía mínima de la luz de una frecuencia dada que es indivisible. Los valores intermedios de energía no pueden darse nunca.

Esta insinuación, tan notablemente previsora, se hizo para abordar un enigma teórico conocido como la *catástrofe ultravioleta* [39] del cuerpo negro. Un cuerpo negro es un objeto, como un trozo de carbón, que absorbe toda la radiación que le llega y que la emite de nuevo a continuación[40] . La cantidad

de luz y otros tipos de energía que emite depende de su temperatura; la temperatura caracteriza por completo las propiedades físicas de un cuerpo negro.

Sin embargo, las predicciones clásicas para la luz emitida por un cuerpo negro eran problemáticas: los cálculos clásicos predecían que sería emitida mucha más energía en radiaciones de alta frecuencia que la que los físicos habían visto y registrado. Las mediciones mostraron que las diferentes frecuencias no contribuían de modo democrático a la radiación del cuerpo negro; las frecuencias muy altas contribuyen menos que las más bajas. Solamente las frecuencias más bajas emiten energía significativa. Ésta es la razón por la cual los objetos se ponen al «rojo vivo» y no al «azul vivo». Pero la física clásica preveía una cantidad grande de radiación de alta frecuencia. De hecho, la energía total emitida que preveía el razonamiento clásico era infinita. La física clásica se enfrentaba a una catástrofe ultravioleta.

Un camino *ad hoc* para salir de este dilema habría sido suponer que solamente las frecuencias que están por debajo de un cierto límite superior específico contribuyen a la radiación de un cuerpo negro. Planck rechazó esta posibilidad en favor de otra aparentemente igual de arbitraria: que la luz está cuantizada.

Planck razonó que si la radiación a cada frecuencia consistía en múltiplos enteros de un cuanto fundamental de radiación, entonces no podía emitirse ninguna radiación de alta frecuencia, porque la unidad fundamental de energía sería entonces demasiado grande. Como la energía contenida en una unidad cuántica de luz era proporcional a su frecuencia, incluso una sola unidad de radiación de alta frecuencia contendría una cantidad muy grande de energía. Cuando la frecuencia era lo suficientemente alta, la energía mínima que contendría un cuanto sería demasiado grande como para ser emitida. El cuerpo negro podría radiar solamente los cuantos de baja frecuencia. La hipótesis de Planck prohibía, por lo tanto, las radiaciones de frecuencia excesivamente alta.

Una analogía podría ayudar a dilucidar la lógica de Planck. Posiblemente todos hemos cenado alguna vez con personas que protestan cuando llega el momento de pedir el postre. Temen comer demasiada comida de la que engorda y rara vez piden un sabroso regalo para sí. Si el camarero asegura que los postres son pequeños, entonces quizá pidan uno. Pero se acobardan ante las raciones normalmente grandes, cuantizadas, de tarta, de helado o de budín.

Hay dos tipos de personas así. Ike pertenece a la primera categoría. Él es verdaderamente disciplinado y es verdad que no toma postre. Cuando un postre es demasiado grande, Ike simplemente se abstiene de comerlo. Yo me parezco más al segundo tipo de personas —y Atenea también—, que piensan que los postres son demasiado grandes y entonces no piden ninguno para sí, pero, al contrario que Ike, no tienen escrúpulos a la hora de picar en los postres de todos los demás. Así que cuando Atenea renuncia a pedir su propio postre, acaba de todos modos comiendo demasiado también. Si Atenea fuera a cenar con mucha gente y pudiera, por lo tanto, picar en un gran número de platos, acabaría sufriendo una lamentable «catástrofe calórica».

Según la teoría clásica, un cuerpo negro se parece más a Atenea. Emitiría pequeñas cantidades de luz de todas las frecuencias, y los teóricos que usaran el razonamiento clásico preverían entonces una «catástrofe ultravioleta». Para evitar este apuro, Planck insinuó que un cuerpo negro era análogo al tipo verdaderamente abstemio. Como Ike, que nunca come un trozo de postre, un cuerpo negro se comporta siguiendo la regla de cuantización de Planck y emite luz de una frecuencia dada sólo en unidades de energía cuantizadas, iguales a la constante h multiplicada por la frecuencia f. Si la frecuencia fuera alta, el cuanto de energía sería sencillamente demasiado grande como para que la luz pudiera emitirse a esa frecuencia. Un cuerpo negro ha de emitir entonces la mayor parte de su radiación a frecuencias bajas, y las frecuencias altas quedan automáticamente vedadas. En la teoría cuántica, un cuerpo negro no emite una cantidad sustancial de radiación de alta frecuencia y, por lo tanto, emite mucha menos radiación que la que predice la teoría clásica.

Cuando un objeto emite radiaciones, a su patrón de radiación —esto es, a la cantidad de energía que emite el objeto a cada frecuencia y a una temperatura dada— lo llamamos espectro[M10] (véase la figura 40). Los espectros de algunos objetos, como las estrellas, son muy parecidos a los de un cuerpo negro. Los espectros de estos cuerpos negros se han medido a muchas temperaturas diferentes y todos concuerdan con la hipótesis de Planck. La figura 40 muestra que la emisión se produce toda a bajas frecuencias; a frecuencias altas, la emisión se apaga.

FIGURA 40. El espectro del cuerpo negro correspondiente al fondo cósmico de microondas del universo. Un espectro del cuerpo negro da la cantidad de luz que se emite a todas las frecuencias cuando se fija la temperatura del objeto radiante. Obsérvese que el espectro se apaga a frecuencias altas.

Uno de los grandes logros de la cosmología experimental desde los ochenta ha sido la medición cada vez más precisa del espectro del cuerpo negro que produce la radiación en nuestro universo. Originalmente, el universo era una bola de fuego caliente y densa que contenía radiación a alta temperatura, pero desde entonces el universo se ha expandido y la radiación se ha enfriado de un modo tremendo. Esto es así porque, al expandirse el universo, las longitudes de onda de las radiaciones también lo hicieron. Y las longitudes de onda más largas corresponden a frecuencias más bajas, que corresponden a su vez a temperaturas más bajas. El universo actual contiene radiación que parece la misma que produciría un cuerpo negro a una temperatura que está solamente 2,7 grados por encima del cero absoluto, considerablemente más fría que cuando empezó.

Los satélites han determinado hace poco el espectro de esta radiación del fondo cósmico de microondas (que es el que muestra la figura 40). Es casi idéntico al espectro de un cuerpo negro a una temperatura de 2,7 grados Kelvin. Las mediciones nos dicen que las desviaciones son más pequeñas que una diezmilésima. De hecho, el vestigio de esta radiación es el espectro del cuerpo negro que con mayor precisión se ha medido hasta hoy.

Cuando en 1931 le preguntaron cómo había llegado a esa extravagante

suposición de que la luz está cuantizada, Planck respondió: «Fue un acto de desesperación. Llevaba seis años debatiéndome con la teoría del cuerpo negro. Sabía que este problema era fundamental y sabía la respuesta. Tenía que encontrar una explicación teórica a cualquier precio [...]»[41] . Para Planck, la cuantización de la luz era un ardid, una trampa que daba el espectro del cuerpo negro correcto. En su opinión, la cuantización no era necesariamente una propiedad de la luz en sí, sino que podría ser, por el contrario, consecuencia de alguna propiedad de los átomos que estaban radiando la luz. Aunque la conjetura de Planck fue el primer paso para entender la cuantización de la luz, el mismo Planck no la comprendió del todo.

Cinco años después, en 1905, Einstein hizo una aportación importante a la teoría cuántica al establecer que los cuantos de luz eran entes reales, y no meras abstracciones matemáticas. Einstein estuvo muy ocupado ese año desarrollando la relatividad especial, ayudando a probar que existen los átomos y las moléculas con el estudio de las propiedades estadísticas de la materia y aportando una validación de la teoría cuántica, al mismo tiempo que trabajaba en la oficina suiza de patentes de Berna.

La observación concreta que Einstein interpretó usando la hipótesis de los cuantos de luz, incrementando así su credibilidad, se conoce como *efecto fotoeléctrico* . Los experimentadores dirigieron radiación de una sola frecuencia sobre una porción de materia y esta radiación entrante expelía electrones hacia el exterior. Los experimentos habían demostrado que al bombardear el material con más luz, que aporta más energía total, no se alteraba la energía cinética (energía del movimiento) máxima de los electrones emitidos. Esto es contrario a lo que podría sugerir la intuición: la incidencia de más energía debería producir, sin duda, electrones con más energía cinética. El límite de la energía cinética del electrón constituía, por lo tanto, un enigma. ¿Por qué el electrón no absorbía más energía?

La interpretación de Einstein era que la radiación consiste en cuantos individuales de luz y solamente un único cuanto donaba su energía a un electrón concreto. La luz llega a un electrón individual como si fuera un misil, no como una lluvia de bombas. Como es un solo cuanto de luz el que impulsa al electrón, el hecho de que incidan más cuantos no habría de alterar la energía del electrón emitido. El aumento del número de cuantos incidentes hace que la luz emita más electrones, pero no influye sobre la energía máxima de un electrón concreto.

En cuanto Einstein interpretó los resultados del efecto fotoeléctrico en términos de estos paquetes definidos de energía, las unidades cuantizadas de luz, tuvo sentido que los electrones emitidos contaran siempre con la misma energía cinética máxima. El máximo de energía cinética que puede tener un electrón es la energía fija que recibe del cuanto de luz menos la energía precisa para expulsar del átomo al electrón.

Usando esta lógica, Einstein logró deducir la energía de los cuantos de luz. Descubrió que su energía dependía de la frecuencia de la luz incidente, tal como lo predecía la hipótesis de Planck. Para Einstein, esto constituía una clara prueba de que los cuantos de luz eran reales. Su interpretación dio una descripción muy concreta de los cuantos de luz: un solo cuanto alcanzaba a

un solo electrón, que era emitido a continuación. Fue esta observación, y no la relatividad, la que hizo ganar a Einstein el Premio Nobel de Física en 1921.

Extrañamente, sin embargo, aunque Einstein reconoció la existencia de unidades cuantizadas de luz, se mostró reacio a aceptar que estos cuantos fueran, de hecho, partículas sin masa; que portaban energía y momento, pero que no tenían masa. La primera prueba convincente de que los cuantos de luz eran partículas llegó con la medición, realizada en 1923, de la *dispersión de Compton* , en la que un cuanto de luz alcanza un electrón y éste resulta desviado (véase la figura 41). En general, podemos determinar la energía y el momento de una partícula midiendo el ángulo de desvío después de una colisión. Si los fotones fueran partículas sin masa, se comportarían de un modo bien definido cuando chocaran con otras partículas como los electrones. Las mediciones mostraron que los cuantos de luz se comportaban precisamente como si los cuantos fueran partículas sin masa que interactuaran con los electrones. La conclusión inexorable era que los cuantos de luz eran de verdad partículas, y ahora a estas partículas las llamamos *fotones* .

FIGURA 41. En la dispersión de Compton, un fotón (λ) dispersa un electrón estacionario (e –) y emerge con una energía y un momento diferentes.

El hecho de que Einstein se resistiera tanto a la teoría cuántica que él mismo ayudó a desarrollar produce cierta perplejidad. Pero su reacción no es más asombrosa que la respuesta de Planck a la propuesta de cuantización de Einstein, que es de un escepticismo total. Planck y algunos otros alabaron los muchos logros de Einstein, pero matizaron su entusiasmo[42] . Planck llegó a decir, con cierta inconsistencia: «Que no diera en la diana en sus especulaciones, como, por ejemplo, en su hipótesis de los cuantos de luz, no puede realmente sostenerse con mucha razón en su contra, porque no es posible introducir ideas auténticamente nuevas en las ciencias más exactas sin asumir a veces algunos riesgos»[43] . Pero no nos confundamos. Los cuantos de luz conjeturados por Einstein iban por el rumbo correcto. El comentario de Planck refleja meramente la naturaleza revolucionaria de la idea de Einstein y la resistencia inicial de los científicos a aceptarla.

La cuantización y el átomo

La historia de la cuantización y de la vieja teoría cuántica no terminó con la luz. Resulta que *toda* la materia está hecha de cuantos fundamentales. Niels Bohr fue el siguiente de la fila con una hipótesis de cuantización. En su caso, la aplicó a una partícula bien establecida, el electrón.

El interés de Bohr hacia la mecánica cuántica se desarrolló, en parte, a partir de sus intentos por aclarar en aquel entonces las misteriosas propiedades del átomo. Durante el siglo XIX, la noción de átomo era increíblemente vaga: muchos científicos creían que los átomos existían solamente como mecanismos heurísticos, que eran una herramienta útil, pero que no tenían ningún fundamento en la realidad. Hasta algunos de los científicos que sí creían en los átomos los confundían, sin embargo, con las moléculas, que, como sabemos ahora, están compuestas de átomos.

La composición y las auténticas propiedades del átomo no se aceptaron hasta principios del siglo pasado. Una parte del problema era que la palabra griega *átomo* significaba una cosa que no podía dividirse y la imagen original del átomo era ciertamente la de un objeto indivisible e inmutable. Pero a medida que los físicos del siglo XIX fueron descubriendo más hechos sobre el comportamiento de los átomos, empezaron a darse cuenta de que esta idea tenía que ser incorrecta. Hacia fin de siglo, la radiactividad y las *líneas espectrales* , las frecuencias específicas a las que se emite y se absorbe la luz, eran algunas de las propiedades de los átomos que mejor se habían medido. Pero ambos fenómenos mostraban que los átomos podían cambiar. Por añadidura, en 1897, J. J. Thomson identificó los electrones y propuso que el electrón era un ingrediente del átomo, lo que implicaba que los átomos tenían que ser divisibles.

A principios del siglo XX, Thomson sintetizó las observaciones atómicas de entonces en su modelo del «budín de ciruela», nombre que proviene de la tarta británica que contiene trozos aislados de fruta incrustados en una masa de bizcocho. Insinuó que había un componente con carga positiva extendido por todo el átomo (la parte del bizcocho) con electrones con carga negativa (los trozos de fruta) incrustados dentro.

Ernest Rutherford, natural de Nueva Zelanda, probó en 1910 que este modelo era erróneo, cuando Hans Geiger y un estudiante de investigación, Ernest Marsden, realizaron un experimento que había sugerido aquél. Descubrieron así un núcleo atómico fuerte y compacto, mucho más pequeño que el átomo mismo. El radón-222, un gas producido en la desintegración radioactiva de las sales de radio, emite partículas alfa, que ahora sabemos que son núcleos de helio. Los físicos revelaron la existencia del núcleo del átomo disparando partículas alfa a los átomos y registrando los ángulos con los que se dispersaban dichas partículas. La dispersión drástica que registraron podía producirse solamente si había un núcleo atómico fuerte y compacto. Una carga positiva difusa extendida por todo el átomo no podría nunca dispersar tanto las partículas. En palabras de Rutherford: «Fue sin duda la experiencia más increíble que he tenido en mi vida. Fue casi tan chocante como si disparásemos un proyectil de 38 cm a un trozo de papel higiénico y rebotara y nos diera a nosotros»[44] .

Los resultados de Rutherford refutaron el modelo del budín de ciruela del átomo. Su descubrimiento implicaba que la carga positiva no estaba dispersa por todo el átomo, sino confinada en un corazón interno mucho más pequeño. Tenía que haber un componente central fuerte, el núcleo. Un átomo, según esta descripción, consistía de electrones que orbitaban en torno a un pequeño núcleo central.

En el verano de 2002 asistí al congreso anual sobre teoría de cuerdas, que se celebraba ese año precisamente en el Laboratorio Cavendish de Cambridge. Muchos de los pioneros importantes de la mecánica cuántica, entre ellos Rutherford y Thomson, dos de sus cabezas visibles, desarrollaron allí gran parte de sus importantes pesquisas. Los pasillos se encuentran decorados con recuerdos de aquellos primeros años fascinantes y descubrí algunas cosas divertidas al pasear por ellos.

Por ejemplo, James Chadwick, el descubridor del neutrón, había estudiado física simplemente porque era demasiado tímido como para atreverse a decir que se había equivocado de fila cuando estaba esperando para matricularse. Y J. J. Thomson era tan joven cuando accedió al puesto de director del laboratorio (tenía veintiocho años) que una felicitación decía: «Perdóneme si he hecho mal en no escribirle para desearle muchas satisfacciones y éxitos como profesor. La noticia de su elección me produjo una sorpresa tan grande que no me permitió hacerlo». (Los físicos no son siempre los más amables).

Sin embargo, a pesar de la descripción coherente del átomo que se había desarrollado a principios del siglo XX en el Laboratorio Cavendish y en otras partes, el comportamiento de sus componentes estaba a punto de hacer estragos en las creencias más fundamentales de los físicos. Los experimentos de Rutherford habían sugerido un átomo que consistía en electrones que viajaban en órbitas en torno a un núcleo atómico central. Esta visión, sencilla como era, presentaba un inconveniente lamentable: tenía que ser errónea. La teoría electromagnética clásica predecía que, al orbitar en un círculo, los electrones tendrían que radiar energía emitiendo fotones (o, en lenguaje clásico, emitiendo ondas electromagnéticas). Los fotones se llevarían así energía y dejarían atrás un electrón con menos energía, que orbitaría en círculos cada vez más pequeños, yendo en espiral hacia el centro. De hecho, la teoría electromagnética clásica predecía que los átomos no podían ser estables y que se colapsarían en menos de un nanosegundo. Las órbitas estables del electrón en el átomo eran un completo misterio. ¿Por qué los electrones no perdían energía y no se precipitaban en espiral hacia el núcleo atómico?

Se precisaba una ruptura radical con el razonamiento clásico para explicar las órbitas del electrón en el átomo. Al proseguir con esta lógica hasta su conclusión inevitable, quedaron al descubierto en la física clásica grietas que sólo pudieron rellenarse con el desarrollo de la mecánica cuántica. Niels Bohr hizo una de estas propuestas revolucionarias cuando extendió la noción de cuantización de Planck a los electrones. Éste fue también uno de los componentes esenciales de la vieja teoría cuántica.

Cuantización del electrón

Bohr decidió que los electrones no podían moverse en cualquier órbita de las de antes: la órbita de un electrón debía tener un radio que concordara con el dado por una fórmula que él proponía. Descubrió estas órbitas haciendo un cálculo ingenioso y afortunado. Decidió que era preciso que los electrones actuaran como si fueran ondas, lo que implicaba que oscilaban hacia arriba y hacia abajo al ir circulando en torno al núcleo.

En general, una onda con una longitud de onda determinada oscila hacia arriba y hacia abajo y recorre cada vez una distancia fija; esa distancia es la longitud de onda. Una onda que va rodeando un círculo también tiene asociada una longitud de onda. En este caso, la longitud de onda fija la magnitud del arco sobre el que la onda subirá y luego bajará al ir rodeando el núcleo.

Un electrón que orbita en un radio fijo no puede tener una longitud de onda cualquiera. Sólo puede tener una longitud de onda que le permita a la onda subir y bajar un número fijo de veces. Esto implicaba una regla para determinar las longitudes de onda permitidas: la onda ha de oscilar un número entero[45] de veces cuando recorre una vez el círculo que define la órbita del electrón (véase la figura 42).

FIGURA 42: Patrones posibles para las ondas de un electrón según la cuantización de Bohr.

Aunque la propuesta de Bohr era radical y su significado, oscuro, su cálculo resolvía el asunto: si fuera correcto, garantizaría las órbitas estables del electrón. Sólo se permitirían a los electrones ciertas órbitas concretas. Las órbitas intermedias quedarían vetadas. En ausencia de un agente externo que hiciera que un electrón saltara de una órbita a otra, no habría ninguna posibilidad de que un electrón se aproximara al núcleo.

Podemos pensar en el átomo de Bohr, con sus órbitas electrónicas fijas, como si fuera un edificio con varios pisos en el que estuviéramos confinados a los pisos pares: el segundo, el cuarto, el sexto, y así sucesivamente. Al no poder pasar por los pisos intermedios, como el tercero o el quinto, estaríamos eternamente confinados en el piso par que nos hubiera tocado. No habría manera de llegar a la planta baja y salir a la calle.

Las ondas de Bohr fueron una hipótesis inspirada. Él no reivindicó conocer su significado; ideó su hipótesis sencillamente para explicar las órbitas estables de los electrones. No obstante, la naturaleza cuantitativa de su propuesta permitía someterla a una constatación. En particular, la hipótesis de Bohr predecía correctamente las líneas espectrales atómicas. Las líneas espectrales dan la frecuencia de la luz que un átomo *no ionizado* —un átomo neutro con todos sus electrones, que tiene una carga total igual a cero— emite o absorbe[46] . Los físicos habían observado que dichos espectros muestran un patrón con rayas, como un código de barras, y no una distribución continua (o sea, en la que contribuyen todas las frecuencias de la luz). Pero nadie entendía por qué. Ni nadie sabía tampoco la razón por la que aparecían los valores concretos de la frecuencia que veían.

Con su hipótesis de cuantización, Bohr pudo explicar por qué los fotones eran emitidos o absorbidos sólo en las frecuencias medidas. Aunque las órbitas de los electrones eran estables para un átomo aislado, podían cambiar cuando un fotón con la frecuencia apropiada —y por lo tanto, según Planck, con la energía apropiada— daba o quitaba energía.

Valiéndose de un razonamiento clásico, Bohr calculó las energías de los electrones que obedecían su hipótesis de cuantización. A partir de estas energías predijo las energías, y por lo tanto las frecuencias, de los fotones que el átomo de hidrógeno, que contiene un solo electrón, emitía o absorbía. Las predicciones de Bohr eran correctas, y estas predicciones correctas hicieron muy plausible su hipótesis de cuantización. Y esto es lo que convenció a Einstein, y a otros, de que Bohr había acertado.

Los paquetes cuantizados de luz, que podían ser emitidos o absorbidos y que, por lo tanto, podían cambiar las órbitas de los electrones, pueden compararse con las longitudes de cuerdas colocadas en las ventanas del edificio de varios pisos, en nuestro ejemplo de antes. Si la longitud de cada trozo de cuerda coincide precisamente con la distancia que va desde el piso en el que uno está hasta otro de los pisos pares, y sólo están abiertas las ventanas de estos pisos pares, las cuerdas proporcionarían un medio para cambiar de piso —pero sólo entre los pisos pares—. Del mismo modo, las líneas espectrales podrían tomar solamente ciertos valores: los valores de las diferencias de energía entre los electrones que ocuparan las órbitas permitidas.

A pesar de que Bohr no ofreciese ninguna explicación de su condición de cuantización, parecía, ciertamente, que tenía razón. Se habían medido muchas líneas espectrales y su hipótesis valía para reproducirlas. Habría sido milagroso que esta concordancia fuera una pura coincidencia. A la postre, la mecánica cuántica justificó su hipótesis.

La fobia al compromiso de las partículas

Por importantes que fueran las propuestas de cuantización, la conexión que establecía la mecánica cuántica entre las partículas y las ondas sólo empezó a cuajar con los avances conseguidos por el físico francés Louis de Broglie, séptimo duque de Broglie, el austríaco Erwin Schrödinger y Max Born, nacido en Alemania.

El primer paso clave que sacó a la vieja teoría cuántica de su camino errante y la puso en la vía correcta de una auténtica mecánica cuántica fue la brillante sugerencia que hizo De Broglie de poner patas arriba la hipótesis de cuantización de Planck. Mientras Planck había asociado cuantos con las ondas de la radiación, De Broglie —como Bohr— postuló que las partículas podían también comportarse como ondas. La hipótesis de De Broglie implicaba que las partículas exhibían propiedades de las ondas y que esas ondas están determinadas por un momento de la partícula. (A velocidades bajas, el momento es la masa multiplicada por la velocidad. A una velocidad cualquiera, el momento dice cómo algo responde cuando se le aplica una fuerza. Aunque a velocidades relativistas el momento es una función más compleja de la masa y la velocidad, la generalización del momento que funciona a altas velocidades sigue indicando cómo algo a velocidad relativista responde cuando se le aplica una fuerza).

De Broglie supuso que una partícula con momento p estaba asociada a una onda cuya longitud de onda era inversamente proporcional al momento, esto es, cuanto más pequeño sea el momento, más grande será la longitud de onda. La longitud de onda era también proporcional a la constante de Planck h [47] . La idea que había tras la propuesta de De Broglie era que una onda que oscilase de modo frenético (o sea, con longitud de onda corta) transportaba mayor momento que una que oscilase de modo letárgico (con longitud de onda larga). Longitudes de onda más cortas implican oscilaciones más rápidas, que De Broglie asociaba con momentos más grandes.

Si la existencia de esta onda-partícula nos parece confusa, es porque lo es.

Cuando De Broglie presentó sus ondas, nadie supo decir qué es lo que se esperaba que éstas fueran. Max Born propuso una interpretación sorprendente: que la onda era una función de posición cuyo cuadrado da la probabilidad de encontrar una partícula en una localización dada del espacio[48] . A esto lo llamó una *función de onda* . La idea de Max Born era que resulta importante localizar con precisión las partículas, a las que sólo cabe describir en términos de probabilidad. Ésta es una ruptura muy grande con las hipótesis clásicas. Significa que no podemos saber la localización exacta de la partícula. Sólo podemos especificar la *probabilidad* de encontrarla en un sitio concreto.

Pero, a pesar de que una onda de la mecánica cuántica describe solamente probabilidades, la mecánica cuántica predice la evolución precisa de esta onda a lo largo del tiempo. Dados los valores en un momento dado cualquiera, podemos determinar los valores en cualquier otro momento posterior. Schrödinger desarrolló la ecuación de ondas que muestra la evolución de la onda asociada a una partícula de la mecánica cuántica.

Pero ¿qué significa esta probabilidad de encontrar una partícula? Es una idea desconcertante: a la postre, no existe nada a lo que podamos llamar una fracción de partícula. El hecho de que una partícula pueda describirse con una onda fue (y en algunos aspectos todavía lo es) uno de los aspectos más sorprendentes de la mecánica cuántica, sobre todo teniendo en cuenta que sabemos que las partículas suelen comportarse como bolas de billar y no como ondas. Una interpretación como partícula y una interpretación como onda parecen incompatibles entre sí.

La solución de esta aparente paradoja depende del hecho de que nunca podemos detectar la naturaleza como onda de una partícula mirando una sola partícula. Cuando se detecta un electrón aislado, lo vemos en una localización bien determinada. Para proyectar la onda entera, necesitamos un conjunto de electrones idénticos, o bien repetir un mismo experimento muchas veces. A pesar de que cada electrón está asociado a una onda, con un solo electrón mediremos un solo número. Pero si pudiéramos preparar un conjunto grande de electrones idénticos, descubriríamos que la fracción de electrones que hay en cada punto es proporcional a la onda de probabilidad asignada a un electrón por la mecánica cuántica.

La función de onda de un electrón individual nos informa sobre el comportamiento de muchos electrones idénticos con esta misma función de onda. Cualquier electrón individual se encontrará en un único lugar. Pero si hubiera muchos electrones idénticos, éstos mostrarían una distribución de localizaciones que semeja una onda. La función de onda nos dice la probabilidad de que el electrón se sitúe en esas localizaciones.

Esto es análogo a la distribución de estaturas en una población. Cualquier persona tiene su estatura propia, pero la distribución nos dice la probabilidad de que una persona tenga una estatura concreta. Análogamente, aunque un electrón se comporte como una partícula, muchos electrones juntos tendrán una distribución de posiciones delineada por una onda. Lo que es distinto es que de todos modos un electrón individual va asociado también a esta onda.

En la figura 43 he representado un ejemplo de una función de probabilidad para un electrón. Esta onda da la probabilidad relativa de encontrar un electrón en una localización determinada. La curva que he dibujado toma un valor determinado en cada punto del espacio (o mejor dicho, en cada punto de una recta, ya que el hecho de que el papel es plano me obliga a dibujar solamente una dimensión del espacio). Si me fuese posible sacar muchas copias de este mismo electrón, podría también hacer una serie de mediciones de la posición del electrón. Descubriría que el número de veces que hubiera encontrado el electrón en un punto concreto sería proporcional a esta función de probabilidad. Un valor mayor significa que sería más probable encontrar el electrón en ese punto; un valor menor, que sería menos probable. La onda refleja el efecto acumulado de muchos electrones.

FIGURA 43. Un ejemplo de una función de probabilidad para un electrón.

A pesar de que proyectamos la onda con la ayuda de muchos electrones, lo que hace que la mecánica cuántica sea especial es que un electrón individual queda, no obstante, también descrito por una onda. Esto implica que no podemos predecir con certeza todo lo relacionado con un electrón. Si medimos su posición, lo encontraremos en un punto concreto. Pero, hasta que no hagamos esta medición, sólo podemos predecir que el electrón tiene una determinada probabilidad de acabar allí. No podemos decir tajantemente dónde terminará.

Esta dicotomía onda-partícula queda de manifiesto en el famoso experimento de la doble rendija al que se refería el origen desconocido de Electra en la historia que abre el capítulo[M11] . Hasta 1961, año en el que físico alemán Claus Jonsson lo realizó de hecho en el laboratorio, el experimento de la doble rendija era simplemente un experimento mental del que los físicos se valían para dilucidar el significado y las consecuencias de la función de onda del electrón. El experimento consiste en un emisor de electrones que lanza electrones sobre una placa perforada con dos rendijas paralelas (véase la figura 44). Los electrones pasan por las rendijas y chocan contra una pantalla situada detrás de la placa, donde son identificados.

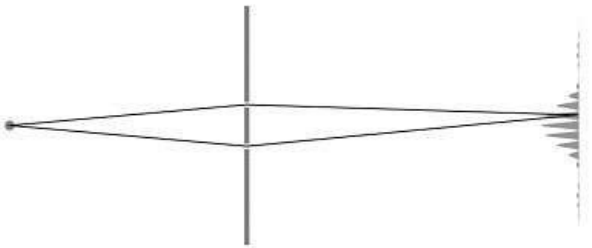


FIGURA 44. Disposición esquemática del experimento de interferencia del electrón a través de la doble rendija. Los electrones pueden pasar por una u otra de las dos rendijas antes de chocar contra la pantalla. El patrón de onda que queda registrado en la pantalla es el resultado de la interferencia de las dos trayectorias.

Este experimento pretendía imitar un experimento análogo que demostró la naturaleza ondulatoria de la luz a principios del siglo XIX. Entonces Thomas Young, un médico, físico y egiptólogo inglés[49] , lanzó luz monocromática a través de dos rendijas y observó el patrón, que se asemejaba al de una onda, que aparecía en una pantalla situada detrás de las rendijas. El experimento demostró que la luz se comportaba como una onda. La clave de imaginar el mismo experimento con electrones consiste en ver cómo podríamos observar la naturaleza ondulatoria del electrón.

Y ciertamente, si realizáramos el experimento de las dos rendijas con electrones, veríamos lo que Young vio para la luz: un patrón propio de una onda sobre la pantalla colocada tras las rendijas (véase la figura 45). En el caso de la luz, comprendemos que la onda ha sido producida por la interferencia. Parte de la luz pasa por una de las rendijas y parte pasa por la otra, y el patrón de onda recogido refleja la interferencia entre las dos partes. Pero ¿qué significa un patrón propio de una onda en el caso de los electrones?

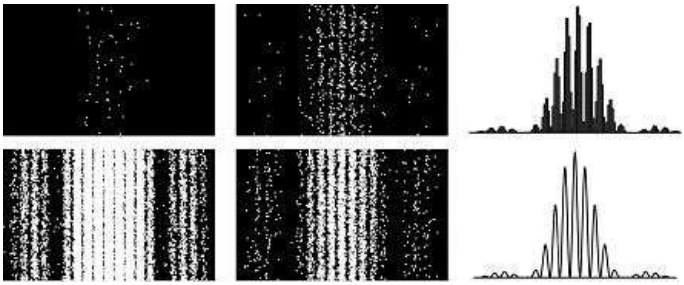


FIGURA 45. El patrón de interferencia que se registra en el experimento de la doble rendija. Los cuatro paneles de la izquierda muestran, en el sentido de las agujas del reloj y empezando arriba a la izquierda, el patrón que se ve después de haber lanzado sobre las ranuras 50, 500, 5.000 y 50.000 electrones. Las curvas de la derecha comparan la distribución del número de electrones (curva superior) con el patrón que se obtendría para una onda que pasara por las dos rendijas. Son casi idénticas, lo que muestra que la función de onda del electrón actúa, de hecho, como una onda.

El patrón semejante al de una onda que aparece en la pantalla nos describe el hecho nada intuitivo de que hemos de pensar que cada electrón pasa por las dos rendijas. No se puede saberlo todo sobre un electrón individual. Cualquier electrón puede pasar por cualquiera de las dos rendijas. A pesar de que la localización de cada electrón queda registrada al llegar éste a la pantalla, nadie sabe por cuál de las dos rendijas ha pasado un electrón concreto.

La mecánica cuántica nos dice que una partícula puede tomar cualquier camino posible para ir desde su punto de partida hasta su punto de llegada, y la función de onda de esa partícula refleja este hecho. Éste es uno de los muchos rasgos notables que posee la mecánica cuántica. Al contrario que la física clásica, la mecánica cuántica no asigna a una partícula una trayectoria definida.

Pero ¿cómo es que el experimento de la doble rendija puede indicar que un electrón individual actúa como una onda, si sabemos ya que los electrones son partículas? Al fin y al cabo, no existe nada a lo que podamos llamar medio electrón. Cualquier electrón individual queda registrado en una localización precisa. ¿Qué está pasando realmente?

La respuesta es la que ya di antes. Podemos ver el patrón de la onda cuando registramos muchos electrones. Cada electrón individual es una partícula. Choca contra la pantalla en un único punto. Sin embargo, el efecto acumulativo de muchos electrones que son lanzados contra la pantalla produce un patrón clásico de onda, que refleja el hecho de que los dos caminos de los electrones interfieren entre sí. Esto puede verse en la figura 45.

La función de onda da la probabilidad de que un electrón alcance la pantalla en un punto concreto. El electrón podría ir a cualquier sitio, pero sólo hemos de esperar encontrarlo en un punto concreto con una probabilidad definida que viene dada por el valor de la función de onda en ese punto. Muchos electrones juntos producen la onda que podríamos deducir de la hipótesis de que el electrón pasa por las dos rendijas.

En los años setenta, Akira Tonamura, en Japón, y Piergiorgio Merli, Giulio Pozzi y Gianfranco Missiroli, en Italia, vieron de hecho este fenómeno de verdad en experimentos concretos. Lanzaron electrones sobre las rendijas de uno en uno y vieron cómo se formaba el patrón a medida que más y más electrones alcanzaban la pantalla.

Podríamos preguntarnos por qué hubo que esperar hasta el siglo XX para que alguien descubriera algo tan impresionante como la dualidad onda-partícula. Por ejemplo, ¿por qué nadie se dio cuenta antes de que la luz semeja una onda pero en realidad está hecha de bolitas discretas, o sea, fotones?

La respuesta es que nadie (con la posible excepción de los superhombres) ve fotones sueltos[50] , de modo que los efectos de la mecánica cuántica no son fácilmente detectables. La luz normal no parece estar hecha de cuantos. Vemos muchedumbre de fotones que constituyen la luz visible. Un gran número de fotones juntos actúan como una onda clásica.

Necesitamos una fuente de fotones muy débil o un sistema preparado con mucho cuidado, para observar la naturaleza cuántica de la luz. Cuando hay demasiados fotones, no podemos distinguir el efecto de uno de ellos suelto. Si se añade un fotón más a la luz clásica, que contiene multitud de fotones, la diferencia es tan pequeña que resulta imposible notarlo. Si una bombilla, que se comporta al modo clásico, emitiera un fotón más, nunca nos enteraríamos. Podemos observar fenómenos cuánticos detallados únicamente en experimentos diseñados con mucha precisión.

Si el lector no cree que este último fotón es realmente insignificante, que piense cómo se siente cuando va a votar. ¿Merece realmente la pena votar sabiendo que nuestro voto posiblemente no influya nada en el resultado final, ya que millones de personas están votando también? Con la notable excepción

de Florida, el estado de la incertidumbre, un voto generalmente se pierde entre la muchedumbre. Aunque unas elecciones se deciden por el efecto acumulativo de los votos individuales, un voto suelto rara vez o nunca cambia el resultado. (Y, para dar un paso más en esta comparación, podríamos observar que únicamente en los sistemas cuánticos —y en Florida, que actúa como un estado cuántico— las mediciones repetidas producen resultados distintos).

La incertidumbre de Heisenberg

La naturaleza ondulatoria de la materia tiene muchas consecuencias nada intuitivas. Vamos a pasar ahora de la incertidumbre electoral al principio de incertidumbre de Heisenberg, uno de los temas favoritos de los físicos y de los tertulianos de sobremesa.

El físico alemán Werner Heisenberg fue uno de los principales pioneros de la mecánica cuántica. En su autobiografía contó cómo empezaron a germinar sus ideas revolucionarias sobre los átomos y la mecánica cuántica cuando estaba acuartelado en el Colegio de Formación Teológica de Múnich, adonde fue destinado en 1919 para combatir contra los comunistas bávaros. Cuando amainó el tiroteo, se sentó en el tejado del colegio y leyó los diálogos de Platón, en particular el *Timeo* . El texto de Platón convenció a Heisenberg de que «para interpretar el mundo material, necesitamos saber algo sobre sus componentes más pequeños»[51] .

Heisenberg odiaba la agitación externa que le rodeó en su juventud; habría preferido volver a «los principios de la vida prusiana, la subordinación de la ambición individual a la causa común, la modestia en la vida privada, la honradez y la incorruptibilidad, la cortesía y la puntualidad»[52] . No obstante, con el principio de incertidumbre, Heisenberg cambió irrevocablemente la visión del mundo que tenía la gente. Quizá la era tumultuosa en la que le tocó vivir le procuró un modo revolucionario de abordar la ciencia, aunque no la política[53] . En todo caso, yo encuentro una cierta ironía en el hecho de que el autor del principio de incertidumbre fuera un hombre con inclinaciones tan conflictivas.

El principio de incertidumbre dice que ciertas parejas de magnitudes nunca pueden medirse con precisión al mismo tiempo. Esto supuso una ruptura mayúscula con la física clásica, que asume, al menos en principio, que podemos medir todas las características de un sistema físico (la posición y el momento, por ejemplo) con tanta precisión como queramos.

Las parejas de magnitudes en cuestión son aquellas respecto de las cuales es importante considerar cuál se mide primero. Por ejemplo, si tuviéramos que medir la posición y luego el momento (la magnitud que nos da a la vez la velocidad y la dirección), no obtendríamos el mismo resultado que si midiéramos primero el momento y después la posición. Esto no pasaría en la física clásica y ciertamente no es algo a lo que estemos acostumbrados. El orden en el que se hagan las mediciones solamente importa en la mecánica cuántica. Y el principio de incertidumbre dice que, en el caso de dos magnitudes para las cuales el orden de medición cuenta, el producto de los

errores de ambas será siempre superior a una constante fundamental, la constante de Planck h , que es 6,582 × 10^{-25} GeV por segundo, para el que quiera conocerla[M12] .[54] Si insistimos en saber la posición con mucha precisión, no podemos saber el momento con una precisión análoga, y viceversa. No importa ni lo precisos que sean nuestros instrumentos de medida ni las veces que lo intentemos, quizá no podremos nunca medir simultáneamente ambas magnitudes con una precisión muy alta.

La aparición de la constante de Planck en el principio de incertidumbre tiene pleno sentido. La constante de Planck es una magnitud que surge sólo con la mecánica cuántica. Recordemos que, según la mecánica cuántica, los cuantos de energía de una partícula con una frecuencia determinada son la constante de Planck multiplicada por esa frecuencia. Si la física clásica rigiese el mundo, la constante de Planck sería cero y no habría un cuanto fundamental.

Pero en la auténtica descripción que da la mecánica cuántica del mundo, la constante de Planck es una magnitud fija no nula. Y ese número nos habla sobre la indeterminación. En principio, cualquier magnitud individual puede conocerse con precisión. Algunas veces los físicos utilizan la expresión *colapso de la función de onda* para declarar que algo ha sido medido exactamente y que toma, por lo tanto, un valor preciso. La palabra *colapso* se refiere a la forma de la función de onda, que ya no se extiende longitudinalmente, sino que toma un valor no nulo en un punto concreto, dado que la probabilidad de obtener otro valor en una nueva medición es cero. En este caso, cuando una magnitud se mide con toda precisión, el principio de incertidumbre nos diría que, después de hacer la medición, no podemos saber nada sobre la otra magnitud que forma pareja en el principio de incertidumbre con la magnitud que hemos medido. Tendríamos una incertidumbre infinita para el valor de esa otra magnitud. Por supuesto, si hubiéramos medido primero la segunda magnitud, la que no conoceríamos sería la primera. En cualquier caso, cuanto más exactamente conozcamos una de las magnitudes, menos precisa tiene que ser la medición de la otra.

En este libro no entraré en la deducción detallada del principio de incertidumbre, pero intentaré de todos modos ofrecer unas pinceladas sobre su origen. Como esto no es esencial para lo que viene después, el lector que lo desee puede saltarse esta parte y pasar directamente a la siguiente sección. Pero quizá quiera saber un poco más sobre el razonamiento en el que se basa la incertidumbre.

En esta deducción, nos centraremos en la incertidumbre tiempo-energía, que es un poco más fácil de explicar y de entender. El principio de incertidumbre tiempo-energía relaciona la incertidumbre de la energía (y por lo tanto, según la hipótesis de Planck, de la frecuencia) con el intervalo de tiempo que es característico del ritmo de cambio del sistema. Esto es, el producto de la incertidumbre de la energía y del tiempo característico para que el sistema cambie será siempre mayor que la constante de Planck h .

Una materialización física del principio de incertidumbre tiempo-energía sucede, por ejemplo, cuando encendemos el interruptor de la luz y oímos ruido estático en una radio cercana. Al encender el interruptor de la luz se

genera un amplio rango de frecuencias de radio. Esto es así porque la cantidad de electricidad que transportaba el cable cambia muy rápidamente, con lo que el rango de energía (y por lo tanto de frecuencia) ha de ser grande. El aparato de radio lo recoge como ruido estático.

Para comprender el origen del principio de incertidumbre, consideremos ahora un ejemplo muy distinto: un grifo que gotea[55] . Vamos a demostrar que es preciso hacer mediciones de larga duración para determinar exactamente el ritmo al que gotea el grifo, y veremos que este hecho es muy parecido a lo que enuncia el principio de incertidumbre. Un grifo y el agua que pasa por él, que involucra muchos átomos, es un sistema demasiado complejo como para exhibir efectos observables propios de la mecánica cuántica: éstos quedan rebosados por los procesos clásicos. Es cierto, no obstante, que necesitamos realizar mediciones que duran más para determinar con más exactitud la frecuencia, y ésta es la esencia del principio de incertidumbre. Un sistema de la mecánica cuántica daría un paso más en esta interdependencia porque, en un sistema de la mecánica cuántica cuidadosamente preparado, la energía y la frecuencia están relacionadas. Así que en un sistema de la mecánica cuántica, una relación entre la incertidumbre de la frecuencia y el tiempo de duración de una medición (como la que vamos a ver enseguida) se traslada, por lo tanto, a una auténtica relación de incertidumbre entre la energía y el tiempo.

Supongamos que el agua está goteando a un ritmo aproximado de una vez por segundo. ¿Con qué precisión podríamos medir este ritmo si nuestro cronómetro tiene una exactitud de un segundo (o sea que indica solamente los segundos transcurridos)? Si tuvimos que esperar un segundo y vimos después caer una gota, podríamos pensar que estamos en condiciones de deducir que el grifo gotea una vez por segundo.

Sin embargo, como el cronómetro no indica más que los segundos transcurridos, nuestra observación no nos diría con precisión cuánto tiempo tardó el grifo en gotear. Si el reloj marcó un segundo, ese tiempo podría haber sido un poco más de un segundo o podría haber sido casi dos. ¿En qué momento, entre uno y dos segundos, diría uno que el grifo goteó? Sin un cronómetro más preciso o una medición más prolongada, no podríamos elegir la mejor respuesta. Con el reloj que tenemos, lo único que podemos concluir es que las gotas caen a un ritmo que está entre una por segundo y una por cada dos segundos. Si dijéramos que el grifo gotea una vez por segundo, podríamos tener esencialmente hasta un 100% de error en nuestra medición. Esto es, podríamos equivocarnos hasta en un factor de 2.

Pero supongamos que, por el contrario, estuvimos realizando las mediciones durante 10 segundos. En este caso, habrían caído 10 gotas de agua durante el tiempo que el reloj tardó en hacer tictac 10 veces. Con nuestro sencillo cronómetro, que tiene una precisión de un segundo, lo único que realmente podríamos inferir es que el tiempo que tardaron en caer 10 gotas está entre 10 y 11 segundos. Nuestra medición, que diría de nuevo que las gotas caen aproximadamente a un ritmo de una por segundo, tendría ahora un error de solamente el 10%. Esto es así porque, al esperar 10 segundos, hemos podido medir la frecuencia con una precisión de 1/10 de segundo. Obsérvese que el producto del tiempo que duró la medición (10 segundos) y la incertidumbre

de la frecuencia (10%, o bien 0,1) es aproximadamente 1. Obsérvese también que el producto de la incertidumbre de la frecuencia y el tiempo que duró la medición en el primer ejemplo, que tenía un error mayor en la determinación de la frecuencia (100%) pero que se llevó a cabo en un tiempo más corto (1 segundo), es también aproximadamente 1.

Podríamos continuar en esta línea. Si hiciéramos una medición durante 100 segundos, podríamos medir la frecuencia con una exactitud de una gota en 100 segundos. Si hiciéramos la medición durante 1.000 segundos, podríamos medir la frecuencia con una exactitud de una gota en 1.000 segundos. En todos los casos, el producto del intervalo de tiempo que dura la medición y la exactitud con la que se mide la frecuencia es aproximadamente 1.[56] El hecho de que se precise más tiempo para conseguir una medición más precisa de la frecuencia está en el núcleo del principio de incertidumbre tiempo-energía. Podemos medir la frecuencia con más exactitud, pero, para hacerlo, necesitaríamos más tiempo. El producto del tiempo y de la incertidumbre de la frecuencia es siempre aproximadamente 1.[57]

Para completar la deducción de nuestro principio de incertidumbre simple, si tuviéramos un sistema de la mecánica cuántica suficientemente sencillo (por ejemplo, un fotón suelto), su energía sería igual a la constante de Planck h multiplicada por la frecuencia. Para un objeto como éste, el producto del intervalo de tiempo durante el cual medimos la energía y el error de la energía siempre superaría h . Podríamos medir la energía con toda la precisión que quisiéramos, pero el experimento tendría que prolongarse en el tiempo con arreglo a la precisión deseada. Éste es el mismo principio de incertidumbre que acabamos de deducir; el matiz añadido, es sencillamente, la relación de cuantización que relaciona la energía con la frecuencia.

Dos valores importantes de la energía y lo que el principio de incertidumbre nos dice sobre ellos

Esto prácticamente completa nuestra introducción a los fundamentos de la mecánica cuántica. Esta sección y la siguiente examinan dos elementos pendientes de la mecánica cuántica, que usaremos más adelante.

Esta sección, que no incluye ningún principio físico nuevo, presenta una aplicación importante del principio de incertidumbre y de la relatividad especial. Explora la relación entre dos energías importantes y las escalas de longitud más pequeñas de los procesos físicos a los que las partículas con dichas energías podrían ser sensibles, relaciones que los físicos consagrados a las partículas utilizan continuamente. La sección siguiente introducirá el espín, los bosones y los fermiones, nociones que aparecerán en el próximo capítulo, que trata del modelo estándar, y también más adelante, cuando consideremos la supersimetría.

El principio de incertidumbre posición-momento dice que el producto de la incertidumbre de posición y la de momento ha de superar la constante de Planck. Nos dice que cualquier cosa —sea un rayo de luz, una partícula o cualquier otro objeto o sistema que podamos imaginar y que pueda ser sensible a procesos físicos que ocurran a distancias cortas— tiene que

abarcar un abanico grande de momentos (ya que el momento tiene mucha incertidumbre). En particular, cualquier objeto que sea sensible a esos procesos físicos ha de involucrar momentos muy elevados. Según la relatividad especial, cuando los momentos son elevados, también lo son las energías. La combinación de estos dos hechos nos dice que el único modo de explorar distancias cortas es con el uso de altas energías.

Otro modo de explicar esto consiste en decir que necesitamos altas energías para explorar distancias cortas porque solamente las partículas cuyas funciones de onda varían sobre escalas pequeñas podrán resultar afectadas por procesos físicos de corta distancia. Así como Vermeer no habría podido ejecutar sus pinturas con un pincel de 5 cm de ancho, y así como no podemos ver detalles finos con la visión borrosa, las partículas no pueden ser sensibles a procesos físicos de corta distancia, salvo que su función de onda varíe sólo sobre escalas pequeñas. Pero según De Broglie, las partículas cuya función de onda involucra longitudes de onda cortas tienen también momentos elevados. De Broglie afirmó que la longitud de onda de una onda-partícula es inversamente proporcional a su momento. Por lo tanto, De Broglie nos llevaría también a concluir que necesitamos momentos elevados, y por ende altas energías, para ser sensibles a la física de las distancias cortas.

Esto tiene ramificaciones importantes para la física de partículas. Solamente las partículas con alta energía notan los efectos de los procesos físicos de corta distancia. Vamos a ver en dos ejemplos concretos cuán alta ha de ser la energía a la que me refiero.

Los físicos que estudian las partículas suelen medir la energía en múltiplos de un *electronvoltio* , que se escribe abreviadamente como eV. Un electronvoltio es la energía que se precisa para mover un electrón contra una diferencia de potencial de 1 voltio, que es la que podría proporcionar una pila bastante floja. También usaré las unidades, relacionadas con la anterior, que se llaman *gigaelectronvoltio* o GeV y teraelectronvoltio o TeV; un GeV son mil millones de eV y un TeV son un billón de eV (o 1.000 GeV).

Los físicos de partículas suelen considerar conveniente usar estas unidades para medir no sólo la energía, sino también la masa. Podemos hacer esto porque las relaciones de la relatividad especial entre masa, momento y energía nos dicen que las tres magnitudes están relacionadas por medio de la velocidad de la luz, que es la constante c =299.792.458 metros por segundo[M13] . Podemos, por lo tanto, usar la velocidad de la luz para convertir una energía dada en masa o en momento. Por ejemplo, la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$ significa que hay una masa definida relacionada con cualquier energía dada. Como todo el mundo sabe que el factor de conversión es c^2 , podemos incorporarlo y expresar las masas en unidades de eV. La masa del protón en estas unidades es mil millones de eV, es decir, 1 GeV.

Convertir unas unidades en otras de este modo es parecido a lo que hacemos todos los días cuando, por ejemplo, decimos a alguien que «La estación de tren está a diez minutos». Estamos suponiendo un determinado factor de conversión. La distancia podría ser 800 m, que corresponden a diez minutos

andando, o podría ser 16 km, que corresponden a diez minutos de autopista. Hay un factor de conversión convenido entre nosotros y nuestro interlocutor.

Estas relaciones de la relatividad especial, en conjunción con el principio de incertidumbre, determinan el tamaño espacial mínimo de los procesos físicos que una onda o partícula con una energía o una masa concreta podría experimentar o detectar. Vamos a aplicar ahora estas relaciones a dos energías muy importantes para la física de partículas que aparecerán con frecuencia en capítulos posteriores (véase la figura 46).

FIGURA 46. Algunas escalas de longitud y de energía importantes en la física de partículas. Las energías más grandes corresponden (mediante la teoría de la relatividad y el principio de incertidumbre) a las distancias más cortas; una onda con más energía es sensible a interacciones que se producen a una escala de distancias más cortas. La interacción gravitatoria es inversamente proporcional a la escala de energía de Planck. El que la escala de energías de Planck sea grande significa que las interacciones gravitatorias son débiles. La energía de la escala débil es la energía que se adapta (mediante la fórmula $E = mc^2$) a las masas de los bosones de gauge débiles. La longitud de la escala débil es la distancia a la que los bosones de gauge débiles comunican la fuerza débil.

La primera energía, también conocida como la *energía de la escala débil*, es 250 GeV. Los procesos físicos a esta energía determinan propiedades claves de la fuerza débil y de las partículas elementales; una de las más notables es cómo estas partículas adquieren masa. Los físicos (entre los que me incluyo) esperamos ver, cuando exploremos esta energía, nuevos efectos previstos por teorías físicas todavía desconocidas, así como aprender mucho más sobre la estructura subyacente de la materia. Por fortuna, hay experimentos que están a punto de explorar la energía de la escala débil y que pronto podrían decirnos lo que queremos saber.

A veces me referiré también a la *masa de la escala débil*, que está relacionada con la energía de la escala débil mediante la velocidad de la luz. En unidades de masa más convencionales, la masa de la escala débil es 10^{-21} gramos. Pero, como acabo de explicar, los físicos de partículas se encuentran a gusto hablando de la masa en unidades de GeV.

La *longitud de la escala débil* es 10^{-16} cm, o la diez mil billonésima parte de un centímetro. Éste es el rango de la fuerza débil, la distancia máxima a la que las partículas pueden influir unas sobre otras mediante esta fuerza.

Como la incertidumbre nos dice que las distancias cortas sólo pueden sondearse con alta energía, la longitud de la escala débil es también la longitud mínima a la que algo con 250 GeV de energía puede ser sensible, esto es, es la escala más pequeña sobre la cual los procesos físicos pueden afectarla. Si se pudieran explorar distancias más pequeñas con esa energía, la incertidumbre de la distancia tendría que ser más pequeña que 10^{-16} cm, y se violaría la relación de incertidumbre distancia-momento. El acelerador Fermilab, que está ya operando en estos momentos, y el futuro Gran Acelerador de Hadrones (LHC, según sus siglas en inglés), que se construirá

en el CERN de Ginebra esta misma década, explorarán procesos físicos en esta escala, y muchos de los modelos que discutiré deberían tener consecuencias visibles a estas escalas.

La segunda energía importante, conocida como *la energía de la escala de Planck* , M_{Pl} , es 10^{19} GeV. Esta energía es muy relevante para cualquier teoría de la gravedad. Por ejemplo, la constante gravitatoria, que aparece en la ley de la fuerza gravitatoria de Newton, es inversamente proporcional al cuadrado de la energía de la escala de Planck. La atracción gravitatoria entre dos masas es pequeña porque la energía de la escala de Planck es grande.

Además, la energía de la escala de Planck es la más grande a la que puede aplicarse la teoría clásica de la gravedad; más allá de la energía de la escala de Planck, es esencial una teoría cuántica de la gravedad, que describe consistentemente tanto la mecánica cuántica como la gravedad. Más adelante, cuando discutamos la teoría de cuerdas, veremos también que en los modelos antiguos de la teoría de cuerdas la tensión de una cuerda está seguramente determinada por la energía de la escala de Planck.

La mecánica cuántica y el principio de incertidumbre nos dicen que, cuando las partículas alcanzan esta energía, son sensibles a los procesos físicos a distancias tan cortas como la longitud de la escala de Planck[58] , que es 10^{-33} cm. Ésta es una distancia extremadamente corta, mucho más que cualquier distancia que resulte medible. Para describir los procesos físicos que tienen lugar a distancias tan pequeñas se requiere una teoría cuántica de la gravedad, y esa teoría podría ser la teoría de cuerdas. Por esta razón, la longitud de la escala de Planck, junto con la energía de la escala de Planck, son escalas importantes que volverán a aparecer en capítulos posteriores.

Bosones y fermiones

La mecánica cuántica hace una distinción importante entre las partículas, dividiendo el mundo de las partículas en *bosones* y *fermiones* . Esas partículas podrían ser partículas fundamentales, como el electrón y los quarks, o entidades compuestas, como el protón o el núcleo atómico. Cualquier objeto es un bosón o un fermión.

El que un objeto sea un bosón o un fermión depende de una propiedad que se llama el *espín intrínseco* . El nombre es muy sugerente[59] , pero el «espín» de las partículas no corresponde a ningún movimiento real en el espacio. Pero si una partícula tiene un espín intrínseco, interactúa como si estuviera dando vueltas, aunque en realidad no lo está.

Por ejemplo, la interacción entre un electrón y un campo magnético depende de la rotación clásica del electrón, su rotación real en el espacio. Pero la interacción del electrón con el campo magnético también depende de su espín intrínseco. Al contrario del espín clásico que surge del movimiento real en el espacio físico[60] , el espín intrínseco es una propiedad de una partícula. Es fijo y tiene un valor específico ahora y para siempre. Por ejemplo, el fotón es un bosón y tiene espín 1. Ésta es una propiedad del fotón; es tan fundamental como el hecho de que el fotón viaja a la velocidad de la luz.

En la mecánica cuántica, el espín está cuantizado. El espín cuántico puede tomar el valor 0 (o sea, sin espín), o 1, o 2, o cualquier número entero. Hablaremos de espín-0 (que se lee «espín-cero»), espín-1, espín-2, y así sucesivamente. Los objetos denominados bosones, que se llaman así en honor del físico indio Satyendra Nath Bose, tienen un espín intrínseco (el espín de la mecánica cuántica que es independiente de la rotación) que es también un entero: los bosones pueden tener un espín intrínseco igual a 0, 1, 2, y así sucesivamente.

El espín de los fermiones está cuantizado en unidades que nadie hubiera pensado que fueran posibles antes de la llegada de la mecánica cuántica. Los fermiones, que se llaman así en honor del físico italiano Enrico Fermi, tienen valores semienteros, como $^1/_2$ o $^3/_2$. Mientras que un objeto con espín-1 vuelve a su configuración inicial después de haber dado una vuelta, una partícula con espín $-^1/_2$ lo haría sólo después de haber dado dos vueltas. A pesar de la rareza aparente de los valores semienteros de los espines de los fermiones, tanto los protones como los neutrones y los electrones son todos fermiones con espín $-^1/_2$. Esencialmente, toda la materia familiar está compuesta de partículas con espín $-^1/_2$.

La naturaleza fermiónica de las partículas más fundamentales determina muchas propiedades de la materia que nos rodea. El *principio de exclusión de Pauli* , en particular, afirma que dos fermiones del mismo tipo nunca se encontrarán en el mismo sitio. El principio de exclusión es lo que da al átomo la estructura sobre la que se basa la química. Como los electrones con el mismo espín no pueden estar en el mismo lugar, tienen que estar en diferentes órbitas.

Por eso pude hacer uso antes de la analogía con los diferentes pisos de un edificio. Los diferentes pisos representaban las diferentes órbitas cuantizadas del electrón, las cuales, según el principio de exclusión de Pauli, quedan ocupadas cuando un núcleo se encuentra rodeado de muchos electrones. El principio de exclusión es también la razón por la cual no podemos atravesar con la mano una mesa o caer hasta el centro de la Tierra. La mesa y la mano adoptan la estructura sólida que tienen únicamente porque el principio de exclusión produce la estructura atómica, molecular y cristalina de la materia. Los electrones de la mano, que son los mismos que los de la mesa, no tienen adónde ir cuando golpeamos la mesa con la mano. Dos fermiones idénticos no pueden estar en el mismo sitio a la vez, de modo que la materia sencillamente no puede colapsarse.

Los bosones actúan de un modo exactamente opuesto al de los fermiones. Pueden y tienen que encontrarse en el mismo sitio. Los bosones son como los cocodrilos: prefieren tumbarse los unos encima de los otros. Si dirigimos un haz de luz a donde ya hay luz, éste se comporta de un modo muy distinto a como se comporta la mano en su golpe de kárate sobre la mesa. La luz, que está hecha de fotones bosónicos, pasa sin problemas a través de la luz. Dos rayos de luz pueden dirigirse exactamente al mismo punto. De hecho, el láser se basa en esta propiedad: los bosones en un mismo estado permiten a los

láseres producir sus haces de luz potentes y coherentes. Los superfluidos y los superconductores están hechos también de bosones.

Un ejemplo extremo de propiedades bosónicas es el condensado de Bose-Einstein, en el que muchas partículas idénticas actúan juntas como una sola partícula, algo que los fermiones, que tienen que estar en sitios diferentes, no podrían hacer nunca. Los condensados de Bose-Einstein son posibles por la sencilla razón de que los bosones que los componen, al contrario que los fermiones, pueden tener propiedades idénticas. En 2001, Eric Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl Wieman recibieron el Premio Nobel de Física por su descubrimiento del condensado de Bose-Einstein.

No voy a necesitar más adelante estas propiedades detalladas del modo de comportarse de los fermiones y los bosones. Sólo utilizaré los siguientes hechos de esta sección: que las partículas fundamentales tienen un espín intrínseco y que pueden actuar como si estuvieran girando en una u otra dirección, y que todas las partículas pueden caracterizarse por ser bosones o fermiones.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•La mecánica cuántica nos dice que tanto la materia como la luz consisten en unidades discretas que se conocen como *cuantos* . Por ejemplo, la luz, que parece continua, está compuesta, de hecho, de cuantos discretos denominados *fotones* .

•Los cuantos son la base de la física de partículas. El modelo estándar de la física de partículas, que explica la materia y las fuerzas conocidas, nos dice que toda la materia y todas las fuerzas pueden interpretarse en última instancia en términos de partículas y de sus interacciones.

•La mecánica cuántica nos dice también que toda partícula lleva asociada una onda, conocida como la *función de onda* de la partícula. El cuadrado de esta onda es la probabilidad de que la partícula se encuentre en una localización concreta. Por comodidad, hablaré a veces sobre una *onda de probabilidad* , el cuadrado de la función de onda que se usa más habitualmente. Los valores de esta onda de probabilidad darán directamente las probabilidades. Una onda así aparecerá más adelante cuando discutamos el *gravitón* , la partícula que comunica la fuerza de la gravedad. La probabilidad será importante también cuando discutamos los *modos de Kaluza-Klein* (KK), que son partículas que tienen un momento que se despliega a lo largo de las dimensiones extras, o sea, dirigido perpendicularmente a las dimensiones usuales.

•Otra diferencia muy importante entre la física clásica y la mecánica cuántica es que la mecánica cuántica nos dice que no podemos determinar con precisión el camino de una partícula: no podemos saber nunca el camino preciso que una partícula ha seguido para viajar desde su punto de partida hasta su punto de destino. Esto nos dice que tenemos que considerar todos los caminos que una partícula puede tomar cuando comunica una fuerza. Como los caminos cuánticos pueden involucrar a cualesquiera partículas que interactúan entre sí, los efectos de la mecánica cuántica pueden afectar a las masas y a las fuerzas de interacción.

•La mecánica cuántica clasifica a las partículas como *bosones* y *fermiones* . La existencia de dos categorías distintas de partículas es crucial para la estructura del modelo estándar y también para una generalización que se ha propuesto del modelo estándar, conocida como *supersimetría* .

•El principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, asociado con las relaciones de la relatividad especial, nos dice que podemos relacionar, usando constantes físicas, la masa, la energía y el momento de una partícula con el tamaño mínimo de la región en la que una partícula con esa energía puede experimentar fuerzas o interacciones.

•Dos de las más frecuentes aplicaciones de estas relaciones involucran las dos energías conocidas como la *energía de la escala débil* y la *energía de la escala de Planck* . La energía de la escala débil es 250 GeV (gigaelectronvoltios) y la energía de Planck es mucho mayor: diez millones de billones de GeV.

•Sólo las fuerzas con un rango más pequeño que una cien mil billonésima (10^{-17}) de centímetro producirán efectos medibles sobre una partícula con energía de la escala débil. Ésta es una distancia minúscula, pero es importante en los procesos físicos que tienen lugar en el núcleo y en el mecanismo mediante el cual las partículas adquieren masa.

•A pesar de lo diminuta que es, la longitud de la escala débil es mucho más grande que la longitud de la escala de Planck, que es una mil millonésima de una billonésima de una billonésima (10^{-33}) de centímetro. Éste es el tamaño de la región en la que las fuerzas influyen sobre las partículas que tienen la energía de la escala de Planck. La energía de la escala de Planck determina la fuerza de la gravedad; es la energía que las partículas deberían tener para que la gravedad fuera una fuerza fuerte.

7

EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS: LA ESTRUCTURA CONOCIDA MÁS BÁSICA DE LA MATERIA

You’re never alone,

You’re never disconnected!

You’re home with your own;

When company’s expected, you’re well protected!

… When you’re a Jet, you stay a Jet!

[No estás nunca solo, | ¡no estás nunca desconectado! | Estás en casa con los tuyos; | cuando esperas compañía, ¡estás bien protegido! | … Si eres un Jet, ¡siempre serás un Jet!].

RIFF (*West Side Story*)

De todos los cuentos que había leído Atenea, el que más perpleja la había dejado era «La princesa y el guisante», de Hans Christian Andersen. El cuento narra la historia de un príncipe que buscaba sin éxito una princesa idónea para casarse con ella. Después de haber buscado en vano durante semanas, un día llegó por casualidad a su palacio una posible princesa, buscando refugio ante una tormenta. Esta empapada visitante se convirtió así, sin querer, en el involuntario objeto de la prueba de fuego de la que se valía la reina para detectar princesas.

La reina preparó una cama, en la que superpuso varios colchones y edredones. Debajo de todos ellos colocó un solitario guisante. Esa noche condujo a la visitante a la habitación de invitados que tan cuidadosamente había preparado. A la mañana siguiente, la princesa (pues eso demostró ser, ciertamente, la visitante) se quejó de que no había podido pegar ojo en toda la noche. Se había pasado la noche entera dando vueltas en la cama y, de hecho, se había levantado llena de cardenales, todo por culpa del incómodo guisante. La reina y el príncipe se convencieron de que la visitante tenía en verdad sangre real, porque, si no, ¿cómo iba a ser tan delicada?

Atenea dio a este cuento mil vueltas en la cabeza. Pensaba que era absolutamente ridículo que alguien, aunque este alguien fuera la más sensible de las princesas, pudiera haber descubierto el guisante que yacía inerte bajo el montón de colchones. Después de deliberar varios días, Atenea dio con una interpretación plausible y fue corriendo a contársela a su hermano.

No aceptó la interpretación habitual de que la princesa probó su condición real poniendo de manifiesto su fragilidad y su refinamiento al mostrar su susceptibilidad ante algo tan nimio como un guisante bajo varios colchones apilados. Y ofreció una explicación alternativa.

Atenea insinuó que, cuando la reina se fue y dejó a la princesa sola en la habitación, ésta abandonó todo decoro y dio rienda suelta a su bulliciosa naturaleza juvenil. La princesa se puso a correr y a saltar sobre la cama hasta que se agotó, y sólo entonces se acostó para intentar dormir. Durante su travesura, la princesa aplastó tanto los colchones que el guisante dio la nota un momento y le hizo una insignificante magulladura. Atenea pensaba que esta princesa seguía siendo sumamente delicada, pero le parecía que la nueva interpretación que había formulado era mucho más satisfactoria.

El descubrimiento de subestructura dentro del átomo fue un logro tan destacado como el descubrimiento que la princesa hizo del guisante. Las partículas denominadas *quarks* , los ladrillos constitutivos del protón, ocupan aproximadamente la misma fracción de volumen del protón que la que ocupa un guisante en un colchón. Un guisante de un centímetro cúbico en un colchón de 2 metros × 1 metro × $^{1}/_{2}$ metro ocupa una millonésima parte del volumen del colchón, la cual no es muy diferente de la fracción de volumen del protón que ocupa un quark. Y el camino por el que los físicos descubrieron los quarks presenta algún parecido con el bullicioso descubrimiento de la princesa. Una princesa pasiva nunca descubriría un guisante enterrado bajo capas y capas. Análogamente, los físicos no descubrieron los quarks hasta que irrumpieron dentro del protón con partículas con mucha energía, que pudieron explorar sus entrañas.

En este capítulo el propio lector saltará sobre el modelo estándar de la física de partículas, la teoría que describe los elementos constituyentes elementales conocidos de la materia y las fuerzas que actúan sobre ellos[61] . El modelo estándar, que representa la culminación de muchos desarrollos sorprendentes y fascinantes, es un logro fenomenal. No será preciso recordar todos los detalles, ya que volveré a citar los nombres de todas las partículas o la naturaleza de sus interacciones cuando me refiera a ellas más adelante. Pero el modelo estándar está en la base de muchas de las exóticas teorías extradimensionales que voy a describir enseguida y, al ir conociendo mejor los fascinantes desarrollos recientes, una visión somera del modelo estándar y de sus ideas claves puede contribuir sin duda a una comprensión más profunda de la estructura fundamental de la materia y de la manera en que los físicos de hoy día piensan con respecto al mundo.

El electrón y el electromagnetismo

Cuando Vladimir I. Lenin usó el electrón como metáfora en su libro filosófico *Materialismo y empiriocriticismo* , escribió que «el electrón es inagotable», refiriéndose así a los diversos niveles de ideas teóricas y de interpretaciones mediante las cuales lo comprendemos. En realidad, hoy entendemos el electrón de un modo muy distinto de como lo hicimos a principios del siglo XX, antes de que la mecánica cuántica revisase nuestras ideas.

Pero, en un sentido físico, lo cierto es lo contrario de lo que afirma la cita de Lenin: el electrón *es* agotable. Por lo que sabemos, el electrón es fundamental e indivisible. Para un físico de partículas, el electrón, más que tener una estructura «inagotable», es la partícula del modelo estándar más fácil de describir. El electrón es estable y no tiene partes constituyentes, de modo que podemos caracterizarlo completamente si enumeramos unas pocas de sus propiedades, entre las que están la masa y la carga. (Luboš Motl, físico checo anticomunista consagrado a la teoría de cuerdas, dijo, bromeando, que ésta no es la única diferencia que existía entre las opiniones de Lenin y las suyas).

Un electrón se moverá hacia el ánodo, cargado positivamente, de una pila. Un electrón en movimiento responde también a una fuerza magnética: cuando un electrón se mueve por un campo magnético, su trayectoria se curva. Estos dos fenómenos provienen de la carga negativa del electrón, que le hace responder a la electricidad y al magnetismo.

Antes del año 1800, todo el mundo pensaba que la electricidad y el magnetismo eran fuerzas independientes. Pero en 1819, el físico y filósofo danés Hans Oersted descubrió que una corriente de cargas en movimiento genera un campo magnético. De esta observación dedujo que debería haber una única teoría que describiera a la vez la electricidad y el magnetismo: tienen que ser las dos caras de una misma moneda. Cuando la aguja de una brújula responde a un relámpago, está confirmando la conclusión de Oersted.

La teoría clásica del *electromagnetismo* , todavía en uso hoy, se desarrolló en el siglo XIX y se valió de la observación de que la electricidad y el magnetismo están relacionados. La noción de *campo* fue también crucial en esta teoría. *Campo* es el nombre que los físicos dan a cualquier magnitud que impregna el espacio. Por ejemplo, el valor del campo gravitatorio en un punto dice cuán intenso es el efecto de la gravedad en ese punto. Lo mismo se aplica a cualquier tipo de campo: el valor del campo en cualquier punto nos dice cuán intenso es el campo en ese punto.

En la segunda mitad del siglo XIX, el químico y físico inglés Michael Faraday introdujo los conceptos de campo eléctrico y de campo magnético, y estos conceptos siguen vigentes en la física de hoy. Dado que se vio en la necesidad de abandonar temporalmente su educación formal cuando tenía catorce años para ayudar al mantenimiento de su familia, es realmente notable que consiguiera llevar a cabo investigaciones en física de un impacto tan revolucionario. Por suerte para él (y para la historia de la física), trabajó como aprendiz de un encuadernador que le animaba a leer los libros sobre los que estaba trabajando y a adquirir así una buena formación por sus propios medios.

La idea de Faraday era que las cargas producen campos eléctricos o magnéticos por doquier en el espacio, y que estos campos actúan a su vez sobre otros objetos cargados, estén donde estén. La magnitud del efecto de los campos eléctricos o magnéticos sobre los objetos cargados depende, sin embargo, de su situación. El campo ejerce un influjo mayor donde su valor es más grande y tiene un efecto menor donde su valor es más pequeño.

Podemos ver pruebas del campo magnético si espolvoreamos virutas de hierro

cerca de un imán. Las partículas se distribuyen formando patrones acordes con la fuerza y la dirección del campo. También podemos experimentar un campo sujetando dos imanes próximos entre sí. Notaremos la atracción o la repulsa mutua entre los imanes bastante antes de que se toquen. Cada cual responde así al campo que empapa la región del espacio que existe entre ellos.

La ubicuidad de los campos eléctricos se me hizo muy presente un día que estaba terminando de escalar un risco cerca de Boulder, en Colorado, con un compañero que era nuevo en el mundo de la escalada pero que tenía mucha experiencia en senderismo. Se estaba acercando rápidamente una tormenta eléctrica y no quería ponerle nervioso, así que le exhorté a que se diera prisa sin mencionarle que la cuerda soltaba chispas y que él tenía los pelos de punta. Cuando, ya abajo y a salvo, comentábamos felizmente nuestra aventura, que había sido en su mayor parte una experiencia montañera deliciosa, mi compañero me dijo que claro que se había dado cuenta de que habíamos estado en peligro: ¡yo también tenía los pelos visiblemente de punta! El campo eléctrico no estaba en un punto solamente: estaba rodeándonos por todas partes.

Antes del siglo XIX, nadie había descrito la electricidad y el magnetismo en términos de campos. La gente usaba convencionalmente el término *acción a distancia* para describir estas fuerzas. Puede ser que esta expresión haya sido la que hemos oído en la escuela para describir cómo un objeto cargado eléctricamente atrae o repele instantáneamente cualquier otra carga, esté donde esté. Esto podría no parecer misterioso, ya que es a lo que estamos acostumbrados. Sin embargo, sería extraordinario que algo colocado en un sitio pudiera influir instantáneamente sobre otro objeto situado a cierta distancia. ¿Cómo podría comunicarse ese influjo?

Aunque podría sonar como un mero asunto de semántica, realmente hay una diferencia conceptual enorme entre un campo y una acción a distancia. Según la interpretación del electromagnetismo que da el concepto de campo, una carga no afecta inmediatamente a las demás regiones del espacio. El campo necesita tiempo para actuar. Una carga en movimiento crea un campo en su entorno inmediato, que se rezuma (eso sí, muy deprisa) a todo el espacio. Los objetos se enteran del movimiento de la carga distante solamente después de que la luz (que está compuesta de campos electromagnéticos) haya tenido tiempo de llegar hasta ellos. Los campos eléctricos y magnéticos no cambian entonces a una velocidad más rápida que la que permite la velocidad finita de la luz. En un punto dado del espacio, el campo empieza a actuar después de haber pasado el tiempo preciso para que el efecto de la carga distante alcance ese punto.

Sin embargo, a pesar de la importancia crucial de los campos electromagnéticos de Faraday, éstos eran más heurísticos que matemáticos. Quizá a causa de su educación irregular, las matemáticas no eran el fuerte de Faraday. Pero otro físico británico, James Clerk Maxwell, incorporó la idea de campo de Faraday a la teoría electromagnética clásica. Maxwell era un científico brillante que contó, entre sus muchos intereses, con la óptica y el color, las matemáticas de los óvalos, la termodinámica, los anillos de Saturno, la medida de la latitud por medio de un cuenco de melaza y la cuestión de por

qué los gatos aterrizan de pie conservando el momento angular cuando se les deja caer patas arriba[62] .

La contribución más importante de Maxwell a la física fue el conjunto de ecuaciones que describen cómo deducir los valores de los campos eléctricos y magnéticos a partir de una distribución de cargas y corrientes[M14] .[63] De estas ecuaciones dedujo la existencia de las ondas electromagnéticas, las ondas de las radiaciones electromagnéticas de todo tipo, como las de nuestros ordenadores, televisiones, hornos de microondas y muchos otros utensilios de la era moderna.

Sin embargo, Maxwell cometió un error. Como todos los demás físicos de su tiempo, interpretó la idea de campo de un modo demasiado materialista. Supuso que el campo provenía de las vibraciones del éter, una idea que Einstein, como hemos visto, desacreditó definitivamente. No obstante, Einstein reconoció la importancia de Maxwell en el origen de la teoría de la relatividad especial: la teoría electromagnética de Maxwell le proporcionó a Einstein la idea de la velocidad constante de la luz, la cual alentó su monumental obra.

El fotón

La teoría electromagnética clásica de Maxwell hizo muchas predicciones acertadas, pero, como precedió a la mecánica cuántica, no incluía obviamente los efectos cuánticos. Hoy los físicos estudian la fuerza electromagnética con la física de partículas. La teoría del electromagnetismo proporcionada por la física de partículas incluye las predicciones, bien estudiadas y bien verificadas, de la teoría clásica de Maxwell, pero incorpora también las predicciones de la mecánica cuántica. Es, por lo tanto, una teoría del electromagnetismo más amplia y más precisa que su predecesora clásica. De hecho, la teoría cuántica del electromagnetismo ha producido predicciones asombrosamente exactas que han sido comprobadas con la increíble precisión de una parte en cien mil millones[64] .

La teoría electromagnética clásica atribuye la fuerza electromagnética al intercambio de la partícula llamada *fotón* , el cuanto de luz que hemos considerado en el capítulo anterior. Su modo de funcionar es el siguiente: un electrón, al llegar, emite un fotón, que viaja hasta otro electrón, comunica a éste la fuerza electromagnética y luego desaparece. Mediante su intercambio, los fotones transmiten o sirven de *intermediario* para transmitir una fuerza. Actúan como si fueran cartas confidenciales que llevan información de un sitio a otro, pero que son destruidas inmediatamente después.

Sabemos que la fuerza eléctrica unas veces es atractiva y otras repulsiva: es atractiva cuando interactúan objetos con cargas opuestas y repulsiva cuando las cargas tienen el mismo signo, ambas positivas o ambas negativas. Podríamos imaginar la fuerza repulsiva que comunica un fotón si pensamos en la interacción que se establece entre dos patinadores sobre hielo que se lanzan entre sí, sucesivamente, una bola de jugar a los bolos; cada vez que uno de ellos recoge la bola, se aleja del otro patinador, deslizándose sobre el hielo. Las fuerzas atractivas, por el contrario, se parecen más a dos

principiantes que se lanzan entre sí un disco volador; al revés que los patinadores sobre hielo, que se separan deslizándose sobre sus patines, estos principiantes en el juego del disco volador se irán acercando un poco más con cada tirada sucesiva.

El fotón es el primer ejemplo que vamos a encontrar de un *bosón gauge* , una partícula elemental fundamental que es la responsable de comunicar una fuerza determinada. (La palabra *gauge* suena más intimidatoria de lo que realmente es; los físicos la usaron por primera vez a finales de 1800, a causa de la analogía lejana que hay con el «ancho de vía[65] » de los ferrocarriles, que nos dice la distancia que hay entre los dos raíles, un término que era mucho más familiar hace cien años). Los bosones débiles y los gluones son otros ejemplos de bosones gauge. Estas partículas comunican la fuerza débil y la fuerza fuerte, respectivamente.

Entre finales de la década de 1920 y la década de 1940, el físico inglés Paul Dirac y los americanos Richard Feynman y Julian Schwinger, así como Sin-Itiro Tomonaga, que trabajaba independientemente en el Japón de la posguerra, desarrollaron la teoría cuántica del fotón. A la rama de la mecánica cuántica que desarrollaron la denominaron *electrodinámica cuántica* (QED, según sus siglas en inglés). La electrodinámica cuántica incluye todas las predicciones de la teoría electromagnética clásica y también las contribuciones (cuánticas) de las partículas a los procesos físicos, esto es, las interacciones que se generan intercambiando o produciendo partículas cuánticas.

La electrodinámica cuántica predice cómo el intercambio de fotones produce la fuerza electromagnética. Por ejemplo, en el proceso ilustrado en la figura 47, dos electrones entran en la zona de interacción, intercambian un fotón y salen por los caminos resultantes (velocidad y dirección del movimiento, por ejemplo), influidos por la fuerza electromagnética que les ha sido transmitida. La teoría de campos asocia números a cada parte del diagrama, de modo que podemos usarlo para hacer predicciones cuantitativas. Este dibujo es un ejemplo de un *diagrama de Feynman* , que se llama así en honor de Richard Feynman y que es un modo gráfico de describir interacciones en la teoría cuántica de campos. (Feynman estaba tan orgulloso de su invento que tenía varios diagramas pintados en su furgoneta).

FIGURA 47. El diagrama de Feynman, a la derecha, tiene varias interpretaciones. Una interpretación (cuando se lee de abajo arriba) es que dos electrones entran en una zona de interacción, intercambian un fotón y se van, como se ilustra esquemáticamente a la izquierda. (Este diagrama puede interpretarse también en términos de anulación electrón-positrón).

Sin embargo, no todos los procesos de la electrodinámica cuántica involucran un fotón que acaba destruido. Además de las efímeras *partículas intermediarias o internas* [66] —como los fotones que conducen a las interacciones electromagnéticas y que son producidos y destruidos casi inmediatamente después—, también hay fotones *externos* , que son partículas reales que entran o salen de una zona de interacción. A veces esas partículas son desviadas y a veces se convierten en otras partículas. En todo caso, las

partículas que entran o salen son partículas físicas reales.

Teoría cuántica de campos

La teoría cuántica de campos, la herramienta con la que estudiamos las partículas[67] , se basa en objetos eternos omnipresentes que pueden crear y destruir esas partículas. Estos objetos son los «campos» de la teoría cuántica de campos. Como los campos electromagnéticos clásicos que inspiraron su nombre, los campos cuánticos son objetos que empapan el espacio-tiempo. Pero los campos cuánticos desempeñan un papel diferente. Éstos crean o absorben partículas elementales. Según la teoría cuántica de campos, las partículas pueden ser producidas o destruidas en cualquier punto y en cualquier momento.

Por ejemplo, un electrón o un fotón puede aparecer o desaparecer en cualquier punto del espacio. Los procesos cuánticos permiten que cambie el número de partículas cargadas del universo mediante la creación o la destrucción de partículas. Cada partícula es creada o destruida por su propio campo particular. En la teoría cuántica de campos, no sólo el electromagnetismo sino también todas las fuerzas y las interacciones son descritas en términos de campos, que pueden crear nuevas partículas o eliminar partículas que ya estaban presentes.

Según la teoría cuántica de campos, podemos imaginarnos las partículas como si fueran excitaciones del campo cuántico. Mientras que el *vacío* , un estado sin partículas, contiene solamente campos constantes, los estados con partículas presentes contienen campos con protuberancias y contoneos correspondientes a las partículas. Cuando el campo adquiere una protuberancia, se crea una partícula, y, cuando absorbe esta protuberancia para hacerse constante como antes, la partícula se destruye.

Los campos que crean los electrones y los fotones han de existir en todas partes para garantizar que todas las interacciones puedan suceder en cualquier punto del espacio-tiempo. Esto es esencial porque las interacciones son *locales* , lo cual quiere decir que sólo pueden participar las partículas que estén en el mismo sitio. La acción a distancia se parecería más a la magia. Las partículas no poseen percepción extrasensorial: tienen que estar en contacto para interactuar directamente.

Las interacciones electromagnéticas se producen entre cargas distantes que no están en contacto directo, pero sólo bajo los auspicios del fotón o de alguna otra partícula que tiene contacto directo con las dos partículas cargadas que están interactuando. En ese caso, parece que las cargas se afectan la una a la otra instantáneamente, pero esto es así sólo porque la velocidad de la luz es rapidísima. En realidad, la interacción sólo ha ocurrido mediante procesos locales; el fotón ha coincidido primero con una de las partículas cargadas y luego con la otra. Por lo tanto, el campo ha de crear y destruir el fotón en los puntos precisos donde están situadas las partículas cargadas.

Las antipartículas y el positrón

La teoría cuántica de campos nos dice también que para cada partícula ha de existir una colega suya, conocida como antipartícula. Tom Stoppard habla sobre las antipartículas en su obra *Hapgood* : «Cuando una partícula se encuentra con una antipartícula, se anulan la una a la otra y se convierten en un estallido de energía, ¿entiendes?». Cualquier aficionado a la ciencia ficción ha oído hablar de las antipartículas: con ellas es con lo que hacemos las armas para destruir el universo y con ellas también se impulsa la *USS Enterprise* , la nave ficticia del universo de *Star Trek* .

Estas aplicaciones son ficticias, pero las antipartículas no lo son. Las antipartículas forman realmente parte de la visión del mundo que proporciona la física de partículas. En la teoría de campos y en el modelo estándar son tan esenciales como las partículas. De hecho, las antipartículas son exactamente como las partículas, sólo que sus cargas son opuestas.

Paul Dirac encontró por vez primera las antipartículas cuando desarrolló la teoría cuántica de campos que describe el electrón. Descubrió que una teoría cuántica de campos que sea consistente a la vez con la mecánica cuántica y con la relatividad especial ha de incluir, necesariamente, antipartículas. No las había añadido deliberadamente. Cuando incorporó la relatividad especial, la teoría las rechazó. Las antipartículas son una consecuencia necesaria de la teoría cuántica de campos relativista.

He aquí un argumento aproximado que explica por qué las antipartículas surgen de la relatividad especial. Las partículas cargadas pueden viajar hacia delante y hacia atrás en el espacio. Viendo las cosas ingenuamente, la relatividad especial nos diría, por lo tanto, que dichas partículas podrían viajar también hacia delante y hacia atrás en el tiempo. Pero, por lo que sabemos, ni las partículas ni nada de lo que conocemos es, de hecho, capaz de viajar hacia atrás en el tiempo. En vez de esto, lo que ocurre es que las antipartículas con cargas opuestas reemplazan a las partículas que viajan hacia atrás en el tiempo. Las antipartículas reproducen los efectos que tendrían las partículas que viajan hacia atrás en el tiempo, de modo que, incluso sin ellas, las predicciones de la teoría cuántica de campos son compatibles con la relatividad especial.

Imaginemos una película de una corriente de electrones, con carga negativa, que viajan de un punto a otro. Imaginemos que ahora proyectamos la película en sentido inverso. La carga negativa viajaría ahora hacia atrás, o, equivalentemente (por lo menos en lo que toca a las cargas), la carga positiva viajaría hacia delante. Una corriente de *positrones* , las antipartículas de los electrones, que tienen carga positiva, produce esta corriente con carga positiva que viaja hacia delante y actúa, por lo tanto, como una corriente de electrones que viaja hacia atrás en el tiempo.

La teoría cuántica de campos nos dice que si existe un determinado tipo de partícula cargada, como el electrón, también tiene que existir la correspondiente antipartícula con carga opuesta. Por ejemplo, como el electrón lleva una carga –1, el positrón tiene carga +1. La antipartícula es como el electrón en todos los aspectos, salvo en el aspecto de la carga. El protón también tiene carga +1, pero es 2.000 veces más pesado que el electrón y, por lo tanto, no podría ser su antipartícula.

Como dijo Stoppard, las antipartículas realmente anulan a las partículas cuando ambas entran en contacto. Como las cargas de una partícula y de su antipartícula siempre suman cero, cuando una partícula se encuentra con una antipartícula pueden anularse la una a la otra y ser destruidas. La partícula y la antipartícula juntas no llevan carga, así que la relación de Einstein $E = mc^2$ nos dice que toda la masa puede convertirse en energía.

Por otro lado, la energía puede convertirse en una pareja partícula-antipartícula cuando hay energía suficiente para producirlas. Tanto la anulación como la creación de una partícula ocurren en los aceleradores de partículas de alta energía, en los que los físicos llevan a cabo los experimentos que estudian las partículas pesadas, partículas con tal cantidad de masa que no se encuentran en la materia ordinaria. En estos aceleradores, una partícula y una antipartícula chocan y se anulan entre sí, creando así un estallido de energía a partir del cual emergen nuevas parejas de partícula-antipartícula.

Dado que la materia (y los átomos en particular) está hecha de partículas y no de antipartículas, generalmente no se encuentran en la naturaleza antipartículas como los positrones. Pero pueden producirse temporalmente en los aceleradores de partículas, en regiones calientes del universo e incluso en los hospitales, donde la tomografía de emisión de positrones (PET, según sus siglas en inglés) se utiliza para explorar los signos del cáncer.

Gerry Gabrielse, un colega mío en el departamento de física de Harvard, se pasa todo el tiempo produciendo antipartículas en el sótano de los Laboratorios Jefferson, donde trabajo. Gracias a la labor de Gerry y de otras personas, sabemos con un grado muy alto de precisión que las antipartículas son realmente como réplicas de las partículas en masa y tirón gravitatorio, a pesar de sus cargas opuestas. Pero no hay tantas como para que resulten dañinas. Puedo asegurar a los apasionados de la ciencia ficción que estas antipartículas hacen mucho menos daño al edificio que la construcción permanente de nuevos laboratorios y despachos, que viene siempre precedida por una enorme cantidad de destrucción visible y audible.

Los electrones, los positrones y los fotones son las partículas más sencillas y accesibles. No es una coincidencia que las fuerzas eléctricas y los electrones fueran los primeros ingredientes del modelo estándar que los físicos comprendieron. Sin embargo, el electrón, el positrón y el fotón no son las únicas partículas que hay, ni el electromagnetismo la única fuerza.

Hice la lista de las partículas y de las fuerzas no gravitatorias[68] conocidas en las figuras 32 y 33. Dejé la gravedad aparte porque ésta es cualitativamente distinta de las otras fuerzas y debe ser tratada separadamente. A pesar del nombre prosaico que tienen dos de las fuerzas (la fuerza débil y la fuerza fuerte), éstas tienen muchas propiedades interesantes. En las dos secciones siguientes, veremos qué son estas fuerzas.

La fuerza débil y el neutrino

Aunque no notemos la fuerza débil en nuestra existencia cotidiana, ya que es realmente débil, ésta es esencial en muchos procesos nucleares. La fuerza débil explica algunas formas de la desintegración nuclear, como, por ejemplo, la del potasio-40 (que se encuentra aquí en la Tierra, con una desintegración que es lo bastante lenta —aproximadamente mil millones de años de media— como para seguir calentando el núcleo terrestre) y también la del propio neutrón. Los procesos nucleares cambian la estructura del núcleo y mediante estos procesos cambia el número de neutrones que hay en un núcleo, liberándose una enorme cantidad de energía. Esta energía puede aprovecharse para generar electricidad de origen nuclear o bombas nucleares, pero tiene también otras finalidades.

Por ejemplo, la fuerza débil desempeña un papel en la creación de elementos pesados, que son creados en las explosiones cataclísmicas de las supernovas. La fuerza débil es también esencial para que brillen las estrellas, el Sol incluido: con ella empieza la cadena de reacciones que convierten el hidrógeno en helio. Los procesos nucleares desencadenados por la fuerza débil ayudan a que la composición del universo evolucione continuamente. De nuestro conocimiento de la física nuclear podemos deducir que aproximadamente el 10% del hidrógeno primordial del universo ha sido utilizado como combustible nuclear en las estrellas. (Felizmente, el 90% que queda garantiza que el universo no habrá de recurrir a fuentes extrañas de energía en el futuro inmediato).

A pesar de su importancia, hace relativamente poco que los científicos han identificado la fuerza débil. En 1862, William Thomson (más tarde lord Kelvin[69]), uno de los físicos más respetados en su día, estimó muy por debajo de su verdadero valor la edad de la Tierra y del Sol porque no conocía los procesos nucleares provocados por la fuerza débil (que, digamos en su descargo, no habían sido todavía descubiertos). Thomson basó su estimación en la única fuente conocida de iluminación, la incandescencia. Dedujo que la energía que había habido disponible no podría haber mantenido encendido el Sol más allá de unos treinta millones de años.

A Charles Darwin no le gustó nada este resultado. Él había llegado a una edad mínima mucho más próxima a la correcta estimando el número de años precisos para que la erosión acabase formando el Weald, un valle al sur de Inglaterra. La estimación de Darwin, trescientos millones de años, tenía para él el atractivo añadido de que proporcionaba el tiempo suficiente para que la selección natural hubiera producido el amplio abanico de especies que se encuentran en la Tierra.

Sin embargo, todos —incluido el propio Darwin— asumieron que Thomson, el físico de reputación estelar, estaba en lo cierto. Darwin quedó tan convencido por el cálculo de Thomson y por su reputación que suprimió sus propias estimaciones sobre la edad de la Tierra en las ediciones posteriores de su libro *El origen de las especies* . Solamente después del descubrimiento que hizo Rutherford del significado de la radiación[70] se pudo confirmar la idea de Darwin que proponía una edad mayor y se estableció que la edad de la Tierra y del Sol rondaba los cuatro mil quinientos millones de años, mucho más de lo que decía la estimación de Thomson y también la de Darwin.

En la década de 1960, los físicos americanos Sheldon Glashow y Steven Weinberg, así como el físico paquistaní Abdus Salam, trabajando todos independientemente (y no necesariamente en armonía), desarrollaron la *teoría electrodébil* , una teoría que explica la fuerza débil y que proporcionó ideas penetrantes sobre la fuerza del electromagnetismo[71] . Según la teoría electrodébil, el intercambio de las partículas denominadas *bosones gauge débiles* produce los efectos de la fuerza débil, al igual que el intercambio de fotones comunica el electromagnetismo. Hay tres tipos de bosones gauge débiles. Dos de ellos están cargados eléctricamente, el W^+ y el W^- (la W viene de la fuerza débil, *weak* , en inglés, y el signo + o – es la carga del bosón gauge). El tercero es neutro y se llama Z (por su carga cero, *zero* en inglés).

Como en el intercambio de fotones, el intercambio de bosones gauge débiles produce fuerzas que pueden ser atractivas o repulsivas, dependiendo de las *cargas débiles* de las partículas. Las cargas débiles son números que desempeñan en la fuerza débil el mismo papel que la carga eléctrica desempeña en la fuerza electromagnética. Sólo las partículas que llevan carga débil experimentan la fuerza débil, y su carga concreta determina la fuerza y el tipo de interacciones que experimentarán.

No obstante, hay varias distinciones importantes entre la fuerza electromagnética y la fuerza débil. Una de las más sorprendentes es que la fuerza débil distingue entre derecha e izquierda, o, como dirían los físicos, *viola la simetría de paridad* . La violación de la paridad significa que la imagen especular de una partícula se comportará de modo diferente a la partícula original. Los físicos chino-americanos C. N. Yang y T. D. Lee formularon la teoría de la violación de la paridad en la década de 1950, y otra física chino-americana, C. S. Wu, la confirmó experimentalmente en 1957. Yang y Lee recibieron el Premio Nobel de Física ese año. Curiosamente, Wu, la única mujer que desempeñó un papel en el desarrollo del modelo estándar que estoy discutiendo, no recibió el Premio Nobel por su trascendental descubrimiento.

Algunas violaciones de invarianza de la paridad pueden resultar familiares. Por ejemplo, tenemos el corazón en la parte izquierda del cuerpo. Pero si la evolución hubiera procedido de otro modo, y la gente hubiera terminado con el corazón a la derecha, esperaríamos en todo caso que todas sus propiedades fueran las mismas que ahora vemos. El que el corazón esté en un lado y no en el otro no debería ser importante para ningún proceso biológico fundamental.

A lo largo de los muchos años que precedieron a las mediciones de Wu, efectuadas en 1957, era «obvio» que las leyes físicas (aunque no necesariamente los objetos físicos) no podían tener una mano preferida. Al fin y al cabo, ¿por qué iban a tenerla? Es verdad que la gravedad y el electromagnetismo y otras muchas interacciones no hacen ninguna distinción entre ambas manos. No obstante, la fuerza débil, una fuerza fundamental de la naturaleza, distingue entre derecha e izquierda. Aunque esto sea muy sorprendente, la fuerza débil viola la simetría de paridad.

¿Cómo es que una fuerza puede preferir una mano a la otra? La respuesta se encuentra en el espín intrínseco del fermión. Igual que un tornillo tiene su

rosca, de modo que se aprieta girándolo en el sentido de las agujas del reloj, pero no en el sentido contrario a las agujas del reloj, las partículas pueden tener también una mano preferida, que indica la dirección en la que giran (véase la figura 48). Muchas partículas, como el electrón y el protón, pueden girar en una de dos direcciones: hacia la izquierda o hacia la derecha. La palabra *quiralidad* , derivada de la palabra griega *keir* , que significa «mano», se refiere a las dos direcciones posibles del espín. Las partículas pueden ser dextrógiras o levógiras, al igual que los dedos de las manos; si el conjunto de una de ellas va hacia la derecha, el conjunto de la otra va hacia la izquierda.

La fuerza débil viola la simetría de la paridad actuando de modo diferente sobre las partículas dextrógiras y las levógiras. Resulta que solamente las partículas levógiras experimentan la fuerza débil. Por ejemplo, un electrón levógiro experimentará la fuerza débil, mientras que uno dextrógiro no la experimentará. Hay experimentos que muestran esto claramente —así es como funciona el mundo—, pero no hay ninguna explicación intuitiva mecánica de este fenómeno.

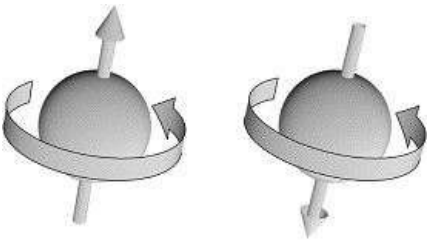


FIGURA 48. Los quarks y los leptones pueden ser dextrógiros o levógiros.

¿Cómo imaginar una fuerza que pudiera actuar sobre nuestra mano izquierda pero no sobre nuestra mano derecha? Todo lo que puedo decir es que la violación de la paridad es una propiedad sorprendente, pero bien medida, de las interacciones débiles; es uno de los rasgos más intrigantes del modelo estándar. Por ejemplo, los electrones que emergen cuando se desintegra un neutrón son siempre levógiros. Las interacciones débiles violan la simetría de paridad, de modo que cuando haga la lista del conjunto completo de las partículas elementales y de las fuerzas que actúan sobre ellas (en la figura 52, página 245), necesitaré enumerar por separado las partículas dextrógiras y las levógiras.

La violación de la simetría de paridad, por extraña que parezca, no es la única propiedad novedosa de la fuerza débil. Una segunda propiedad igual de importante consiste en que la fuerza débil puede, de hecho, convertir una partícula de un tipo en otra de otro tipo (conservando, sin embargo, la cantidad total de carga electromagnética). Por ejemplo, cuando un neutrón interactúa con bosón gauge débil, podría surgir un protón (véase la figura 49). Esto es muy diferente de la interacción de un fotón, que nunca cambiaría el número total de partículas cargadas de un tipo particular (esto es, el número de partículas menos el número de antipartículas), como por ejemplo el número de electrones menos el número de positrones. (Para poder comparar, en la figura 50 se ilustra un fotón interactuando con un electrón que entra y sale, junto con la figura de tipo esquemático que hemos usado

antes). La interacción de un bosón gauge débil cargado con el neutrón y el protón es lo que permite que un neutrón aislado se desintegre y se convierta en una partícula completamente distinta.

FIGURA 49. La interacción con un bosón gauge W^- transforma un neutrón en un protón (y un quark down contenido en el neutrón en un quark up contenido en el protón).

FIGURA 50. La representación mediante un diagrama de Feynman (a la derecha) de la interacción fotón-electrón. La línea ondulada es el fotón. Interactúa con el electrón que llega y parte del vértice de interacción, como se ilustra esquemáticamente a la izquierda.

Sin embargo, como el neutrón y el protón tienen masas distintas y transportan cargas distintas, el neutrón tiene que desintegrarse, produciendo un protón y otras partículas, de modo que se conserven la carga, la energía y el momento. Y resulta que cuando un neutrón se desintegra, produce no sólo un protón, sino también un electrón y una partícula que se llama *neutrino* [72] . Éste es el proceso conocido como *desintegración beta* , ilustrado en la figura 51.

FIGURA 51. En la desintegración beta, un neutrón se desintegra mediante la fuerza débil en un protón, un electrón y un antineutrino. A la derecha se muestra la representación de este proceso con un diagrama de Feynman. Un neutrón se convierte en un protón y en un bosón gauge virtual W^- , que se convierte entonces en un electrón y en un electrón antineutrino.

Cuando se observó por primera vez la desintegración beta, nadie sabía de la existencia del neutrino, que interactúa sólo mediante la fuerza débil y no mediante la fuerza electromagnética. Los detectores de partículas únicamente pueden encontrar partículas cargadas o que liberan energía. Como el neutrino no tiene carga eléctrica y no se desintegra, era invisible para los detectores y nadie sabía que existía.

Pero, sin el neutrino, parecía que la desintegración beta no conservaba la energía. La conservación de la energía es un principio fundamental en la física, y dice que la energía no puede crearse ni destruirse, solamente puede trasladarse de un sitio a otro. La hipótesis de que la desintegración beta no conservaba la energía era descabellada y, sin embargo, hubo muchos físicos respetados que, al ignorar la existencia del neutrino, estaban dispuestos a aceptar esta propuesta radical (y errónea).

En 1930, Wolfgang Pauli allanó el camino para la salvación científica de los dubitativos proponiendo lo que llamó «una salida a la desesperada»: una nueva partícula eléctricamente neutra[73] . Su idea era que el neutrino hace desaparecer algo de energía cuando se desintegra el neutrón. Tres años después, Enrico Fermi dio a la «pequeña» partícula neutra, a la que llamó neutrino, un fundamento teórico firme. No obstante, el neutrino parecía entonces una propuesta tan poco sólida que la prestigiosa revista científica *Nature* rechazó el artículo de Fermi porque «contenía especulaciones demasiado remotas como para interesar al lector».

Pero las ideas de Pauli y de Fermi eran correctas y hoy los físicos coinciden universalmente en la aceptación de la existencia del neutrino[74] . De hecho, ahora sabemos que los neutrinos pasan a través de nosotros constantemente, provenientes junto con los fotones de los procesos nucleares que se producen en el Sol. Billones de neutrinos solares nos atraviesan cada segundo, pero interactúan tan débilmente que ni siquiera los notamos. Los únicos neutrinos que sabemos con certeza que existen son levógiros; los neutrinos dextrógiros o no existen o son muy pesados —tanto que no pueden producirse—, o interactúan muy débilmente. Sea como sea, nunca se han producido neutrinos dextrógiros en los aceleradores, y nunca los hemos visto. Como estamos mucho más seguros de la existencia de los neutrinos levógiros que de la de los neutrinos dextrógiros, sólo he incluido a los neutrinos levógiros en la figura 52, en la que enumero las partículas dextrógiras y levógiras separadamente.

Así pues, ahora sabemos que las interacciones débiles actúan sólo sobre las partículas levógiras y que pueden cambiar el tipo de partícula. Pero para entender verdaderamente la fuerza débil necesitamos una teoría que prediga las interacciones de los bosones gauge débiles que comunican la fuerza. Los físicos vieron al principio que construir esa teoría no era sencillo. Necesitaban realizar un avance teórico importante antes de poder comprender verdaderamente la fuerza débil y sus consecuencias.

FIGURA 52: Las tres generaciones del modelo estándar. Los quarks y leptones dextrógiros y levógiros son enumerados separadamente. Cada columna contiene partículas con la misma carga (distintos sabores del tipo de partícula). La fuerza débil puede convertir elementos de la primera columna en elementos de la segunda, y elementos de la quinta columna en elementos de la sexta. Los quarks experimentan la fuerza fuerte y los leptones no.

El problema era el extravagante rasgo final de la fuerza débil: que se desvanece precipitadamente al llegar a una distancia muy corta, la diez mil billonésima parte (10^{-16}) de un centímetro. Esto hace que sea muy diferente de la gravedad y del electromagnetismo, para los cuales, como vimos en el capítulo 2, la fuerza decrece con la distancia en proporción con el cuadrado del inverso de la separación. Aunque la gravedad y el electromagnetismo se debilitan cuando uno se aleja, no se desvanecen ni mucho menos con la rapidez de la fuerza débil. El fotón transporta el electromagnetismo a distancias lejanas. ¿Por qué la fuerza débil actúa de un modo tan diferente?

Estaba claro que los físicos necesitaban encontrar un nuevo tipo de interacción para explicar procesos nucleares como la desintegración beta, pero no estaba claro qué podría ser esta nueva interacción. Antes de que Glashow, Weinberg y Salam desarrollaran su teoría de la fuerza débil, Fermi hizo una tentativa de explicar la referida interacción con una teoría que incluía nuevos tipos de interacción en los que intervenían cuatro partículas, como el protón, el neutrón, el electrón y el neutrino. Esta *interacción de Fermi* producía directamente la desintegración beta sin invocar un bosón gauge débil intermediario. En otras palabras, la interacción permitía a un protón pasar directamente a los productos de su desintegración: el neutrón, el electrón y el neutrino.

Sin embargo, estaba claro, incluso en aquel momento, que la teoría de Fermi no podría ser la auténtica teoría válida para todas las energías. Aunque sus predicciones eran correctas para energías bajas, eran, a todas luces, completamente erróneas para altas energías, en las que las interacciones entre las partículas se vuelven mucho más intensas. De hecho, si supusiéramos incorrectamente que podemos aplicar la teoría de Fermi cuando las partículas tienen mucha energía, obtendríamos predicciones sin sentido, como por ejemplo que las partículas interactúan con una probabilidad mayor que uno. Esto es imposible, ya que nada puede ocurrir más veces que siempre.

Aunque la teoría basada en la interacción de Fermi era una elegante teoría efectiva para explicar las interacciones a bajas energías y entre partículas lo suficientemente distantes, los físicos vieron que necesitaban una explicación más fundamental de procesos como la desintegración beta si querían saber qué es lo que pasaba a energías altas. Parecía que una teoría basada en fuerzas comunicadas por bosones gauge débiles funcionaría mucho mejor a altas energías, pero nadie sabía cómo explicar el corto alcance de la fuerza débil.

Este corto alcance resulta ser una consecuencia de que los bosones gauge débiles tienen masa. En la física de partículas las relaciones que dimanan del principio de incertidumbre y la relatividad especial tienen consecuencias perceptibles. Al final del capítulo 6 discutí las distancias más cortas a las que una partícula con una determinada energía, como la energía de la fuerza débil o la energía de la escala de Planck, puede resultar afectada por las diversas fuerzas. A causa de la relación que establece la relatividad especial entre energía y masa ($E = mc^2$), las partículas con masa, como los bosones gauge débiles, incorporan automáticamente relaciones similares entre masa y distancia.

En particular, la fuerza comunicada por el intercambio de una partícula con una masa determinada se desvanece a una distancia más lejana cuanto más pequeña es la masa. (Esa distancia es también proporcional a la constante de Planck e inversamente proporcional a la velocidad de la luz[75]). La relación entre masa y distancia dada en el capítulo 6 nos dice que el bosón gauge débil, cuya masa es aproximadamente 100 GeV, transmite automáticamente la fuerza débil solamente a las partículas que están a menos de la diez mil billonésima parte de un centímetro. A una distancia superior, la fuerza transmitida por la partícula se hace extraordinariamente pequeña, tan pequeña que no podemos ni siquiera detectar sus efectos.

El hecho de que el bosón gauge débil tenga masa es crucial para el éxito de la teoría de la fuerza débil. La masa es la razón por la cual la fuerza débil actúa sólo a distancias muy cortas y por la cual es tan débil que casi es inexistente a distancias más largas. Los bosones gauge débiles son distintos en este aspecto del fotón y del gravitón, ya que estos dos no tienen masa. Como el fotón y el *gravitón*, la partícula que transmite la fuerza gravitatoria, llevan energía y momento, pero no tienen masa, pueden transmitir las fuerzas a distancias más largas.

El concepto de partículas sin masa podría sonar extraño, pero desde la perspectiva de la física de partículas no es nada demasiado particular. El hecho de que ciertas partículas no tengan masa nos dice que éstas viajan a la velocidad de la luz (al fin y al cabo, la luz está compuesta de fotones sin masa), y también que la energía y el momento obedecen siempre a una relación especial: la energía es proporcional al momento.

Los portadores de la fuerza débil, por el contrario, sí que tienen masa. Y desde la perspectiva de la física de partículas, la rareza es un bosón gauge con masa y no uno sin masa. El desarrollo clave que allanó el camino para la teoría de la fuerza débil fue la comprensión del origen de las masas de los bosones gauge débiles, que hacen que la dependencia de la distancia de la fuerza débil sea tan distinta de la que tiene el electromagnetismo. El mecanismo que produce las masas de los bosones gauge débiles, conocido como el *mecanismo de Higgs* , es el tema del capítulo 10. Como veremos en el capítulo 12, la teoría subyacente —esto es, el modelo preciso que da a las partículas la masa que tienen— es uno de los mayores enigmas a los que se enfrentan hoy los físicos que se dedican a estudiar las partículas. Uno de los atractivos de las dimensiones extras es que podrían ayudar a resolver este misterio.

Los quarks y la fuerza fuerte

Un amigo mío, que es físico, le explicó una vez a una de mis hermanas que él trabajaba en «la fuerza fuerte, que se llama la fuerza fuerte porque es muy fuerte». Aunque a mi hermana esto no le pareció demasiado instructivo, el nombre que ha recibido la fuerza fuerte es, de hecho, muy adecuado. Es ésta una fuerza extraordinariamente poderosa. Liga entre sí los componentes del protón tan intensamente que éstos rara vez se separan. La fuerza fuerte tiene solamente un interés tangencial en otras partes posteriores de este libro, pero comentaré aquí algunos hechos básicos sobre ella para que la discusión sea completa.

La fuerza fuerte, descrita por la teoría denominada *cromodinámica cuántica* (QCD, según sus siglas en inglés), es la última de las fuerzas del modelo estándar que podemos explicar mediante el intercambio de bosones gauge. Tampoco ella fue descubierta antes del siglo pasado. Los bosones gauge fuertes se conocen como gluones, porque comunican la fuerza, el pegamento (*glue* en inglés), que traba fuertemente entre sí a las partículas sobre las que actúan.

En la década de 1950 y en la de 1960, los físicos descubrieron muchas partículas en una rápida sucesión. A las partículas individuales les dieron nombres de letras griegas, como la π (que se pronuncia «pi» o «pión» en el caso de la partícula a la que da nombre), la θ (que se pronuncia «zeta») y la Δ (que se pronuncia «Delta», escrita con «D» mayúscula para expresar el hecho de que la correspondiente letra griega es mayúscula). Estas partículas se llaman colectivamente *hadrones* , según la palabra griega *hadros* , que significa «gordo», «pesado».

En efecto, los hadrones eran todos mucho más pesados que el electrón. Eran

en su mayor parte comparables en masa con el protón, que tiene una masa 2.000 veces más grande que la del electrón. La enorme muchedumbre de hadrones distintos fue un misterio hasta que el físico Murray Gell-Mann[76] sugirió en los sesenta que los abundantes hadrones no eran partículas fundamentales, sino que ellos mismos estaban compuestos de partículas a las que llamó *quarks* .

Gell-Mann sacó la palabra *quark* de un poema que aparece en el *Finnegans Wake* de James Joyce: «*Three quarks for Muster Mark!* | *Sure he hasn't got much of a bark* . | *And sure any he has it's all beside the mark* » [«¡Tres graznidos por Mark, ese dechado! | Que de timbre de voz no anda sobrado | y el poco que tiene está desafinado»[77]]. Esta cita, hasta donde a mí me alcanza, está muy poco relacionada con la física de los quarks, excepto por dos cosas: había también tres y eran difíciles de comprender.

Gell-Mann propuso que había tres variedades de quark[78] —que se llaman ahora *up* , *down* y *extraño* — y que los numerosos hadrones correspondían a las muchas posibles combinaciones de quarks que podían ligar entre sí. Si su propuesta era correcta, los hadrones tenían que repartirse limpiamente siguiendo patrones predecibles. Como suele pasar cuando se proponen nuevos principios físicos, Gell-Mann en realidad no creía en la existencia de los quarks cuando los propuso por primera vez. No obstante, su propuesta fue muy osada ya que solamente se habían descubierto algunos de los hadrones previstos. El que se descubrieran los hadrones que faltaban y se confirmara la hipótesis de los quarks supuso por lo tanto para Gell-Mann una victoria brillante, que allanó el camino que lo condujo al Premio Nobel de Física de 1969.

A pesar de que los físicos coincidían en que los hadrones estaban hechos de quarks, pasaron nueve años desde la propuesta de los quarks hasta el momento en que se explicó la física de los hadrones en términos de la fuerza fuerte. Paradójicamente, la fuerza fuerte fue la última fuerza que se comprendió, en parte a causa de su enorme intensidad. Ahora sabemos que la fuerza fuerte es tan intensa que las partículas fundamentales, como los quarks, que experimentan la fuerza fuerte están siempre trabadas y es muy difícil aislarlas y, por lo tanto, estudiarlas. Las partículas que experimentan la fuerza fuerte no son libres de pasear por ahí sin una señora de compañía.

Hay tres tipos de cada variedad de quark. Los físicos etiquetan festivamente los distintos tipos con colores y a veces los llaman rojos, verdes y azules. Y estos quarks de colores se encuentran siempre con otros quarks y antiquarks, ligados *en combinaciones de color neutro* . Estas combinaciones son aquellas en las que las «cargas» de la fuerza fuerte que llevan los quarks y los antiquarks se anulan entre sí, del mismo modo que los colores se anulan entre sí para producir la luz blanca[79] . Hay dos tipos de combinaciones de color neutro. Las configuraciones estables de hadrones o bien contienen un quark y un antiquark que se asocian recíprocamente o bien tres quarks (y ningún antiquark) que se ligan entre sí. Por ejemplo, un quark se empareja con un antiquark en las partículas denominadas piones, y tres quarks se asocian entre sí en el protón y en el neutrón.

La «carga» de la fuerza fuerte se anula entre los quarks del hadrón, como la carga positiva del protón y la carga negativa del electrón se anulan entre sí en el átomo. Pero mientras que es fácil ionizar un átomo, es muy difícil fisgar en los objetos, como el protón y el neutrón, que están consolidados con una presión extraordinaria por los gluones de la fuerza fuerte. A los gluones sería mejor llamarlos «supergluones», por lo difíciles que son de romper sus ataduras.

Ahora ya estamos casi preparados para volver al descubrimiento de los quarks que la historia revisionista de Atenea describía metafóricamente. El protón y el neutrón consisten en combinaciones de tres quarks en las que la carga asociada con la fuerza fuerte se anula. El protón contiene dos quarks up y un quark down, tipos diferentes de quarks con diferente carga eléctrica. Como el quark up tiene carga eléctrica $+^{2}/_{3}$ y el quark down tiene carga $-^{1}/_{3}$, el protón tiene carga eléctrica +1. Por otro lado, el neutrón contiene un quark up y dos quarks down, de modo que tiene carga eléctrica igual a cero (la suma de $-^{1}/_{3}$, $-^{1}/_{3}$ y $+^{2}/_{3}$).

Podemos imaginarnos los quarks como si fueran objetos duros y puntiagudos dentro de un protón grande y blando. Los quarks están embutidos dentro de un protón o un neutrón, como un guisante sepultado bajo un colchón. Pero como nuestra princesa saltarina que se contusiona con el guisante, un experimentador activo puede disparar un electrón de alta energía que emite un fotón, el cual hace saltar directamente el quark. Esto parece muy diferente al caso de un fotón que hace saltar un objeto grande vaporoso, al igual que el hecho de que la partícula alfa de Rutherford haga saltar un núcleo duro parecía muy diferente al caso de una que hace saltar carga positiva más difusa.

El experimento de *dispersión inelástica profunda* de Friedman-Kendall-Taylor que se llevó a cabo en el Centro de Aceleración Lineal de Stanford (SLAC, según sus siglas en inglés), demostró la existencia de los quarks al registrar este efecto. El experimento mostraba cómo se comportan los electrones cuando éstos dispersan a los protones, proporcionando así la primera prueba experimental de que los quarks existen realmente. Jerry Friedman, Henry Kendall (que fueron colegas míos en el MIT) y Richard Taylor ganaron el Premio Nobel de Física en 1990 por este descubrimiento.

Cuando se producen quarks en choques de alta energía, todavía no se hallan formando hadrones, pero esto no significa que se encuentren aislados: siempre llevan una comitiva de otros quarks y gluones que los acompañan y que hacen que la combinación neta sea neutra para la fuerza fuerte. Los quarks nunca se presentan como objetos libres que andan solos, sino que van siempre escudados por otras muchas partículas con fuertes interacciones entre sí. En vez de un quark aislado único, un experimento con partículas lo que va a registrar es un conjunto de partículas compuesto de quarks y gluones, que van más o menos en la misma dirección.

Colectivamente, los grupos de partículas compuestos de quarks y gluones que se mueven al unísono en una dirección determinada se conocen como *flujos*

(*jets* en inglés). Una vez que se forma un flujo energético, es como una cuerda, que nunca desaparece. Cuando cortamos una cuerda, lo único que hacemos es crear dos nuevas cuerdas. Análogamente, cuando alguna interacción divide un flujo, lo único que pueden hacer las piezas es formar nuevos flujos: nunca se dispersarán en quarks y gluones aislados individuales. Stephen Sondheim seguramente no estaba pensando en los aceleradores de partículas de alta energía cuando escribió la letra para la canción de los Jets de *West Side Story* , pero sus palabras se adaptan de modo admirable a los flujos de partículas trabadas por fuertes interacciones. Las partículas con alta energía y ligadas por fuertes interacciones permanecen unidas. «Nunca están solas […] siempre están bien protegidas».

Las partículas fundamentales conocidas

Este capítulo ha descrito tres de las cuatro fuerzas conocidas: el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte. La gravedad, la fuerza que falta, es tan débil que no cambiaría las predicciones de la física de partículas de un modo observable experimentalmente.

Pero todavía no hemos terminado de presentar todas las partículas del modelo estándar. Están identificadas por sus cargas y también por la mano que prefieren. Como conté antes, las partículas dextrógiras y levógiras pueden tener (y de hecho tienen) diferentes cargas débiles.

Los físicos que estudian las partículas las clasifican como quarks o *leptones* . Los quarks son partículas fermiónicas fundamentales que experimentan la fuerza fuerte. Los leptones son partículas fermiónicas que no experimentan dicha fuerza. Los electrones y los neutrinos son ejemplos de leptones. La palabra *leptón* proviene del griego *leptos* , que significa «pequeño» o «fino», y se refiere a la minúscula masa del electrón.

Lo raro es que, además de las partículas que son esenciales en la estructura del átomo, como el electrón y los quarks up y down, hay otras partículas que, aunque son más pesadas, tienen las mismas cargas que las partículas que ya conocemos. Todos los quarks y leptones estables más ligeros tienen réplicas más pesadas. Nadie sabe por qué están ahí ni para qué pueden servir.

Cuando los físicos se percataron de que el muón, una partícula que se vio por primera vez en los rayos cósmicos, no era sino una versión más pesada del electrón (200 veces más pesada), el físico I. I. Rabi preguntó: «¿Quién había pedido esto?». Aunque el muón está cargado negativamente, como el electrón, es más pesado que el electrón y puede desintegrarse para convertirse en un electrón. Esto es, el muón es inestable (véase la figura 53) y se convierte rápidamente en un electrón (y dos neutrinos). Por lo que sabemos, no sirve para nada en lo que respecta a la materia que hay aquí en la Tierra. ¿Por qué existe? Éste es uno de los muchos misterios del modelo estándar que esperamos resolver con el progreso científico.

FIGURA 53. En la desintegración del muón, éste se convierte en un neutrino muón y un bosón gauge virtual W^- , que se convierte a su vez en un electrón y un antineutrino electrón.

De hecho, hay tres copias del conjunto completo de partículas con las mismas cargas del modelo estándar (véase la figura 52). A cada una de estas copias se le llama *generación* o, a veces, *familia* . La primera generación de partículas contiene un electrón, un quark up y un quark down dextrógiros y otros tantos levógiros, y un neutrino levógiro. La primera generación contiene todo el material estable del que están compuestos los átomos y, por lo tanto, toda la materia estable.

La segunda y la tercera generaciones contienen partículas que se desintegran y que no están presentes en la materia conocida como «normal». No son copias exactas de la primera generación; tienen cargas idénticas a las de las versiones de la primera generación, pero son más pesadas. No se descubrieron hasta que se produjeron en los aceleradores de partículas de alta energía, y su finalidad sigue siendo oscura. La segunda generación consiste en un muón, un *quark con encanto* y un *quark extraño* dextrógiros y otros tantos levógiros, así como un neutrino muón[80] levógiro estable. La tercera generación consiste en un tau, un *quark top* y un *quark bottom* dextrógiros y otros tantos levógiros, así como un *neutrino tau* levógiro. Las copias idénticas de una determinada partícula con la misma asignación de carga pero de generaciones diferentes suelen llamarse *sabores* del tipo de partícula en cuestión.

En la figura 52 vemos que, aunque solamente había tres sabores conocidos de quark cuando Gell-Mann propuso la existencia de éste, ahora conocemos seis: tres «tipos up» y tres «tipos down», uno en cada generación. Además del propio quark up, hay otros dos quarks up con la misma carga: el quark con encanto y el quark top. Análogamente, el quark down, el quark extraño y el quark bottom son sabores diferentes del quark down. Y los leptones muón y tau son versiones más pesadas del electrón.

Los físicos están todavía intentando comprender las razones de la existencia de tres generaciones, así como el motivo por el cual las partículas tienen las masas que tienen y no otras. Éstas son cuestiones fundamentales sobre el modelo estándar que alimentan las investigaciones que se están llevando a cabo actualmente. Con muchos otros colegas, yo misma he trabajado en estos problemas a lo largo de mi carrera, pero todavía seguimos buscando las respuestas.

Los sabores más pesados son significativamente más pesados que los ligeros. Aunque el primero de los quarks más pesados, el bottom, fue descubierto en 1977, el quark top, muy pesado, no se descubrió hasta 1995. El asunto del capítulo siguiente versa sobre dos experimentos de la física de partículas, uno de ellos aquel famoso que llevó al descubrimiento del quark top.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•El modelo estándar consiste en las fuerzas que no son la fuerza gravitatoria y las partículas que experimentan estas fuerzas. Además de la muy conocida fuerza del electromagnetismo, hay otras dos fuerzas que actúan dentro del núcleo: la *fuerza fuerte* y la *fuerza débil* .

•La fuerza débil plantea el misterio más importante que queda sin resolver sobre el modelo estándar. Mientras que las partículas que comunican las otras dos fuerzas son partículas sin masa, los bosones gauge que comunican la fuerza débil sí que tienen masa.

•Además de las partículas que comunican fuerzas, el modelo estándar contiene partículas que experimentan esas fuerzas. Estas partículas se dividen en dos categorías: los *quarks* , que experimentan la fuerza fuerte, y los *leptones* , que no la experimentan.

•Los quarks y los leptones ligeros que se encuentran en la materia (el quark up, el quark down y el electrón) no son las únicas partículas conocidas. También existen quarks y leptones más pesados: el quark up, el quark down y el electrón tienen todos dos versiones más pesadas.

•Estas partículas pesadas son inestables, lo cual quiere decir que se desintegran generando quarks y leptones más ligeros. Pero experimentos que se han llevado a cabo en los aceleradores de partículas las han producido y han demostrado que estas partículas más pesadas experimentan las mismas fuerzas que las familiares y ligeras partículas estables.

•Cada grupo de partículas que contiene un leptón cargado, un quark up y un quark down se llama *generación* . Hay tres generaciones, cada una de las cuales contiene versiones sucesivamente más pesadas de cada tipo de partícula. Estas variedades de partículas se conocen como *sabores* . Hay tres sabores de quark up, tres sabores de quark down, tres sabores de leptón cargado y tres sabores de neutrino.

•En adelante, no haré nunca uso de los detalles y ni siquiera de los nombres de ningún quark o leptón determinado. Sin embargo, el lector precisará saber algo sobre los sabores y las generaciones a causa de las fuertes restricciones de las propiedades de las partículas, que nos dan pistas vitales y restricciones sobre la física que hay más allá del modelo estándar.

•La principal de estas restricciones es que los diferentes sabores de los quarks y de los leptones con las mismas cargas raramente, o prácticamente nunca, se convierten unos en otros. Las teorías en las que las partículas cambian fácilmente de sabor se descartan sin más. Veremos más adelante que esto plantea un gran desafío a los modelos de la supersimetría rota y a otras generalizaciones que se han propuesto del modelo estándar.

8

INTERLUDIO EXPERIMENTAL:

LA VERIFICACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR

One way, or another I’m gonna find you…

[De un modo u otro, acabaré encontrándote…].

BLONDIE

Ike volvió a soñar que se encontraba con el detective cuántico. Esta vez, el detective sabía lo que buscaba y tenía una idea bastante buena de dónde estaría. Lo único que debía hacer era esperar y, antes o después, si no se equivocaba, aparecería su presa.

Encontrar partículas pesadas no es fácil. Pero es lo que tenemos que hacer si queremos descubrir la estructura en la que se basa el modelo estándar y, a la postre, la composición física del universo. Casi todo lo que sabemos en física de partículas proviene de los experimentos realizados en los *aceleradores de partículas de alta energía* , que primero aceleran un haz de partículas que se mueven rápidamente y después hacen que estas partículas se estrellen sobre otro tipo de materia.

En un acelerador de partículas de alta energía, el haz acelerado de partículas choca de hecho con otro haz acelerado de antipartículas, de modo que coinciden en una pequeña región de colisión que contiene una cantidad enorme de energía. Esta energía se convierte a veces en partículas pesadas que no se encuentran fácilmente en la naturaleza. Los aceleradores de partículas de alta energía son los únicos sitios donde han aparecido las partículas conocidas más pesadas desde los tiempos del Big Bang, cuando el universo estaba mucho más caliente y contenía todas las partículas en abundancia. Los aceleradores pueden crear, en principio, parejas de partícula y antipartícula de todo tipo, siempre que tengan suficiente energía para ese tipo concreto, energía que viene dada por la ecuación de Einstein $E = mc^2$.

Pero el objetivo de la física de alta energía no es simplemente encontrar nuevas partículas. Los experimentos que se realizan en los aceleradores de alta energía nos informan sobre leyes fundamentales de la naturaleza que no pueden ser observadas de otra manera, leyes que operan a distancias tan cortas que no podemos verlas más directamente. Los experimentos en altas energías proporcionan el único medio de sondear las interacciones a corta distancia que operan a escalas de distancias extremadamente pequeñas.

Este capítulo trata sobre dos de los experimentos llevados a cabo en aceleradores, experimentos que fueron importantes para confirmar las

predicciones del modelo estándar y fijar qué teorías físicas podría haber detrás. Estos dos experimentos son impresionantes por derecho propio. Pero también deberían transmitir al lector una idea de aquello a lo que se habrán de enfrentar los físicos cuando se pongan a buscar nuevos fenómenos, como las dimensiones extras, en el futuro.

El descubrimiento del quark top

La búsqueda del quark top ilustra bellamente las dificultades que existen para encontrar una partícula en un acelerador cuando la energía de éste es apenas justo la precisa para producirla, así como el ingenio que han de desplegar los experimentadores para superar el reto. Aunque el quark top no forma parte de ningún átomo o materia conocida, el modelo estándar sería inconsistente sin él, de modo que desde 1970 muchos físicos estaban seguros de su existencia. Pero hasta hace poco, en 1995, nadie había detectado nunca ninguno.

En aquel momento, los experimentadores llevaban muchos años buscando en vano el quark top. El quark bottom, la partícula más próxima en peso del modelo estándar, que pesa cinco veces la masa de un protón, fue descubierta en 1977. Pero aunque los físicos que iban en su busca entonces pensaron que el quark top haría pronto su aparición, y los experimentadores compitieron entre ellos para encontrarlo y reclamar la gloria consiguiente, los experimentos fallaron, para sorpresa de todos, uno tras otro. No fue detectado en los aceleradores que operaban a una energía 40 veces, 60 veces e incluso 100 veces superior a la que se precisa para producir un protón. El quark top era evidentemente pesado, notablemente pesado comparado con los otros quarks, que habían sido todos detectados. Cuando finalmente hizo su aparición después de veinte años de búsqueda, resultó que tenía una masa que era casi 200 veces la masa del protón.

Como el quark top es tan pesado, las relaciones de la relatividad especial nos dicen que sólo un acelerador que operara a una energía extraordinariamente alta podría producirlo. La alta energía siempre requiere un acelerador muy grande, que es técnicamente difícil de diseñar y caro de construir.

El acelerador que produjo finalmente el quark top fue el Tevatrón de Batavia, en Illinois, a cuarenta y ocho kilómetros al oeste de Chicago. El acelerador del Fermilab fue diseñado inicialmente con una energía mucho más baja de la precisa para producir el quark top, pero los ingenieros y los físicos habían hecho muchos cambios que aumentaron enormemente su potencia. Hacia 1995, el Tevatrón, la culminación de estas mejoras, operaba a una energía mucho más alta y producía muchas más colisiones que las que podría haber manejado la máquina original.

El Tevatrón, que sigue operativo, está instalado en el Fermilab, un centro de aceleradores que fue proyectado en 1972 y que lleva este nombre en honor del físico Enrico Fermi. Me hizo mucha gracia, cuando visité por primera vez el Fermilab, encontrar allí maíz salvaje, gansos y, por alguna extraña razón, búfalos. Si dejamos a un lado los búfalos, la región es bastante llana y aburrida. La acción de la película *Wayne's world: ¡qué desparrame!* transcurría en Aurora, a unos ocho kilómetros al sur del Fermilab, y el que

conozca la película podrá hacerse una idea del entorno del centro. Por suerte, la física que se hace allí es tan fascinante que la gente se lo pasa bien de todos modos.

El Tevatrón se llama así porque acelera los protones y a los antiprotones hasta una energía de un TeV (pronunciado T-e-V, aunque el «Tev» de «Tevatrón» rima con «Bev»[81]), que es lo mismo que 1.000 GeV, la energía más alta que se ha conseguido hasta ahora en un acelerador. Los haces energéticos de protones y antiprotones que produce el Tevatrón circulan por un anillo y chocan entre sí cada 3,5 microsegundos en dos puntos de colisión.

Dos equipos de investigadores experimentales independientes colocan detectores en cada uno de los dos puntos de colisión donde los haces de partículas y antipartículas se cruzan y pueden ocurrir los procesos físicos interesantes. Uno de estos experimentos se llamó Detector de Choques del Fermilab (CDF, según sus siglas en inglés) y el otro se llamó D0, que era como se denominaba el punto de colisión entre protones y antiprotones en el que estaba localizado el detector. Los dos experimentos buscaron extensamente nuevas partículas y procesos físicos, pero a principios de la década de 1990 el quark top era su Santo Grial. Cada equipo de colaboración experimental quería ser el primero en encontrarlo.

Muchas partículas pesadas son inestables y se desintegran casi inmediatamente. Cuando pasa esto último, los experimentos buscan pruebas visibles de los productos de la desintegración de la partícula, más que la partícula misma. El quark top, por ejemplo, se desintegra en un quark bottom y un W (el bosón gauge cargado que comunica la fuerza débil). Y el W también se desintegra, en leptones o en quarks. De modo que los experimentos que buscan el quark top buscan el quark bottom en conjunción con otros quarks o leptones.

Las partículas no llegan, sin embargo, con etiquetas, de manera que los detectores han de identificarlas por sus propiedades características, como son su carga eléctrica o las interacciones en las que aquéllas participan, y se precisan componentes independientes del detector para registrar estas propiedades. Los dos detectores del CDF y del D0 están constituidos por varias piezas, cada una de las cuales registra características diferentes. Una pieza es el *rastreador* , que detecta las partículas cargadas por los electrones de los átomos ionizados que deja en su estela. Otra pieza, que se llama *calorímetro* , mide la energía que liberan las partículas al pasar a través de ella. Los detectores tienen otros componentes que pueden identificar partículas con otras propiedades características específicas, como el quark bottom, que dura más que la mayor parte de las partículas antes de desintegrarse.

En cuanto el detector capta una señal, la transmite a través de una amplia red de cables y amplificadores y registra los datos resultantes. Sin embargo, no merece la pena registrar todo lo que se detecta. Cuando chocan un protón y un antiprotón, sólo rara vez se producen partículas interesantes como los quarks top y antitop. Con mucha mayor frecuencia las colisiones producen sólo quarks y gluones más ligeros, y más frecuentemente todavía, nada que tenga un interés real. De hecho, por cada quark top que fue producido en el

Fermilab, hubo diez billones de choques que no contenían ningún quark top.

Ningún sistema de ordenadores es tan potente como para encontrar el único suceso interesante que hay metido entre esa muchedumbre de datos inútiles. Por eso, los experimentos siempre cuentan con *activadores* , instrumentos en los que elementos del aparato y del programa actúan como los porteros de las discotecas y que permiten que se graben solamente los sucesos que son interesantes en potencia. Los activadores del CDF y del D0 redujeron el número de sucesos que los experimentadores tenían que tamizar a uno entre cien mil, lo cual sigue siendo una tarea abrumadora, pero aun así más tratable que extraer uno entre diez billones.

Una vez que se tiene registrada la información, los físicos intentan interpretarla y reconstruir las partículas que han surgido en cada una de las colisiones interesantes. Como siempre hay muchas colisiones y muchas partículas y sólo un número limitado de datos, reconstruir el resultado de una colisión es una tarea formidable, que ha agudizado el ingenio de la gente y que posiblemente conduzca a nuevos avances en el área del proceso de datos en los próximos años.

En 1994, varios de los grupos que trabajaban en el CDF habían visto sucesos que parecían cuadrar con el quark top (véase la figura 54, que muestra un ejemplo), pero no estaban del todo seguros. Aunque el CDF no pudo decir con certeza que descubrieron el quark top ese año, D0 y CDF confirmaron los dos el descubrimiento en 1995. Un amigo mío que trabajaba en el D0, Darien Wood, contó el intenso trabajo que hubo en la reunión final del comité editorial, en el que D0 completó el análisis de datos y el artículo en el que se describían sus resultados. La reunión duró toda la noche y parte del día siguiente, y hubo gente que durmió un rato con los codos apoyados en la mesa.

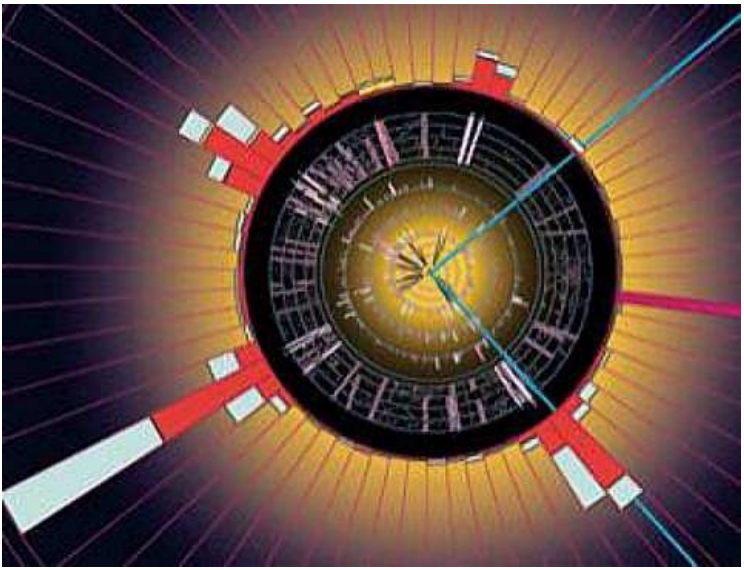


FIGURA 54. Un suceso con un quark top tal como fue registrado por D0, que detecta los productos de la desintegración del quark top y del antiquark top, que se producen simultáneamente. La línea de la parte superior derecha es un muón, que llega hasta la zona exterior del detector. Los cuatro bloques de forma más o menos rectangular son cuatro flujos que se produjeron. La línea que va hacia la derecha es la energía perdida por el neutrino.

El D0 y el CDF fueron reconocidos conjuntamente como descubridores del quark top. Se había producido una partícula nueva que no había sido vista nunca antes. Esta partícula recién descubierta se incorporó a las filas de las otras partículas, bien establecidas, del modelo estándar. Hoy día se han visto ya tantos quarks top, que conocemos su masa y demás propiedades con una precisión extraordinaria. Esperamos que, en el futuro, los aceleradores de alta energía produzcan tantos quark top que incluso existe el peligro de que los quarks top mismos se conviertan en un *ruido de fondo* que interfiera con el descubrimiento de otras partículas.

Casi seguro que hay aquí nuevos fenómenos físicos que apreciar. Pronto veremos por qué los problemas sin resolver del modelo estándar nos están diciendo que han de aparecer nuevas partículas y nuevos procesos físicos cuando los aceleradores alcancen energías apenas un poco más altas que las que son posibles ahora. Los experimentadores del Gran Acelerador de Hadrones (LHC, según sus siglas en inglés) buscarán pruebas de estructuras que estén más allá del modelo estándar. Si estos experimentos salen bien, la recompensa será fabulosa: una mejor comprensión de la estructura subyacente de la materia. La alta energía, la colisión múltiple de partículas y las ideas sagaces contribuirán todas a ejecutar esta difícil tarea.

Pruebas de precisión del modelo estándar

Vamos a trasladarnos ahora brevemente desde las llanuras de Illinois a la montañosa Suiza, donde está localizado el CERN, el Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (que ahora se llama Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, o, en español, Organización Europea para la Investigación Nuclear, aunque se ha quedado el viejo acrónimo, CERN). Las predicciones del modelo estándar han sido comprobadas con muchos experimentos, pero pocos tan espectaculares como los que se llevaron a cabo entre 1989 y 2000 en el Gran Acelerador de Electrones y Positrones (LEP, según sus siglas en inglés) situado en las instalaciones del CERN.

La sede del CERN fue elegida por su situación en el centro de Europa. La entrada principal del CERN está tan cerca de la frontera con Francia que la garita de guardia que separa ambos países está justo frente a la salida del centro. Muchos empleados del CERN viven en Francia y cruzan la frontera dos veces al día. Rara vez se les molesta cuando cruzan la frontera —salvo que su coche no responda a las exigencias helvéticas, caso en el que los suizos no les dejarán pasar—. Sólo hay otro peligro, y es ser un profesor distraído, como puede atestiguar un colega mío. Los guardias lo detuvieron y lo registraron porque no paró en la frontera al ir despistado, pensando en los agujeros negros.

El contraste entre la localización del Fermilab y la del CERN no puede ser más sorprendente. El CERN está al lado de las montañas del Jura (véase la figura 55), muy cerca de Chamonix, un valle precioso que serpentea entre montañas cubiertas de glaciares que llegan prácticamente hasta la carretera (ahora un poco menos por el calentamiento global), y al pie del Mont Blanc, la montaña más alta de Europa. En el CERN, muchos físicos con suerte tienen durante el invierno las caras bronceadas a pesar de la persistente capa de nubes que cubre la ciudad, gracias al tiempo que pasan en las montañas próximas, esquiando, deslizándose en tabla sobre la nieve o caminando.

El CERN fue creado después de la segunda guerra mundial, en el incipiente ambiente de colaboración internacional que había entonces. Los doce estados miembros originales eran Alemania Occidental, Bélgica, Dinamarca, Francia, Grecia, Italia, Noruega, los Países Bajos, Gran Bretaña, Suecia, Suiza y Yugoslavia (que la abandonó en 1961). Posteriormente se han incorporado Austria, España, Portugal, Finlandia, Polonia, Hungría, las Repúblicas Checa y Eslovaca y Bulgaria. Están también los países que actúan como observadores de las actividades del CERN, que son: India, Israel, Japón, la Federación Rusa, Turquía y Estados Unidos. El CERN es de verdad una empresa internacional.



FIGURA 55. La sede del CERN con los Alpes al fondo. Se señala el anillo del Gran Acelerador de Hadrones, por el que circularán bajo tierra dos haces de protones.

El CERN, como el Tevatrón, cuenta con muchos logros en su haber. Carlo Rubbia y Simon van der Meer recibieron el Premio Nobel de Física en 1984 por diseñar el acelerador original del CERN y por descubrir los bosones

gauge débiles, la historia de un éxito que destruyó el monopolio americano en lo que atañe al descubrimiento de partículas. Fue también en el CERN donde un empleado, el inglés Tim Berners-Lee, propuso la World Wide Web (la red mundial de datos), el HTML (el lenguaje de inclusión de hipertexto) y el http (el protocolo de transferencia de hipertexto). Este hombre desarrolló la red para que muchos experimentadores de naciones dispersas estuvieran en contacto instantáneo con la información, de modo que los datos pudieran ser compartidos por muchos ordenadores. Por supuesto, las repercusiones de la red han llegado mucho más lejos que el CERN: a veces es difícil prever las aplicaciones prácticas de la investigación científica.

Dentro de unos años, el CERN va a ser el nexo de algunos de los resultados nuevos más apasionantes de la física. El Gran Acelerador de Hadrones, que podrá alcanzar una energía siete veces mayor que la energía actual del Tevatrón, estará localizado allí y los descubrimientos que se hagan en el LHC serán casi inevitablemente nuevos desde el punto de vista cualitativo. Los experimentos del LHC buscarán —y seguramente encontrarán— la física todavía desconocida en la que se basa el modelo estándar, confirmando o descartando modelos como los que describo en este libro. Aunque el acelerador esté en Suiza, el LHC será verdaderamente un esfuerzo internacional; ahora mismo se están diseñando experimentos para el LHC por todo el mundo.

Pero, volviendo a los años de la década de 1990, los físicos e ingenieros construyeron entonces el increíble LEP (Gran Acelerador de Electrones y Positrones) en el CERN, una «fábrica» de bosones Z que produjo millones de ellos. El bosón gauge Z es uno de los tres bosones gauge que comunican la fuerza débil. Al estudiar millones de bosones Z, los experimentadores del LEP (y también del SLAC, el Centro de Aceleración Lineal de Stanford, en Palo Alto, California) pudieron hacer mediciones detalladas de las propiedades del bosón Z, comprobando así las predicciones del modelo estándar con un nivel de precisión sin precedentes. Nos llevaría demasiado lejos del camino describir aquí cada una de estas mediciones en detalle, pero dentro de un momento daré una idea de la asombrosa precisión que se alcanzó con ellas.

La premisa básica que había tras las comprobaciones del modelo estándar era muy sencilla. El modelo estándar hace predicciones sobre las masas de los bosones gauge débiles y la desintegración e interacciones de las partículas fundamentales. Podemos comprobar la consistencia de la teoría de las interacciones débiles revisando si las relaciones entre todas estas magnitudes coinciden con las predicciones de la teoría. Si hubiera una teoría nueva con nuevas partículas y nuevas interacciones que resultara importante en las energías próximas a la escala débil, habría nuevos ingredientes que podrían cambiar las predicciones sobre la interacción fuerte en relación con los valores que da el modelo estándar.

Los modelos que van más allá del modelo estándar proporcionan, por lo tanto, predicciones de las propiedades del bosón Z ligeramente diferentes de las que proporciona el modelo estándar mismo. A principios de la década de 1990, todo el mundo empleaba en estos modelos alternativos un método increíblemente pesado para predecir las propiedades de los bosones Z, de modo que pudieran comprobarse dichas predicciones. El método era muy

difícil de dominar y estaba someramente descrito en un documento con más páginas de las que yo quería sufrir. En aquel entonces me encontraba en la Universidad de California, en Berkeley, en calidad de estudiante postdoctoral. En el verano de 1992, mientras participaba en un taller veraniego en el Fermilab, opté por pensar que las relaciones entre diferentes magnitudes físicas no podrían ser de ningún modo tan pesadas como aparecían en el método que salía de aquel documento con tantas páginas.

Así, desarrollé con Mitch Golden, entonces estudiante postdoctoral en el Fermilab, un método más conciso para interpretar los resultados experimentales sobre las interacciones débiles. Mitch y yo mostramos cómo tener en cuenta de modo sistemático los efectos de partículas más pesadas (todavía sin descubrir) añadiendo solamente tres nuevas magnitudes al modelo estándar, que resumirían todas las posibles contribuciones no previstas en éste. Pasé varias semanas intentando que todo cuadrara, y las soluciones llegaron finalmente a lo largo de un fin de semana de intenso trabajo. Fue tremendamente gratificante descubrir cómo todos los procesos que medirían las fábricas de bosones Z podrían ser relacionados entre sí de un modo elegante. Mitch y yo sentimos que habíamos desarrollado una descripción mucho más clara de cómo se relacionaban la teoría y las mediciones, y esto fue realmente satisfactorio. Sin embargo, no estuvimos solos a la hora de realizar este descubrimiento. Michael Peskin, en el SLAC, y su estudiante postdoctoral Takeo Takeuchi hicieron a la vez un trabajo parecido, y pronto otros siguieron rápidamente nuestros pasos.

Pero la historia de un auténtico éxito concierne más bien a las pruebas del modelo estándar que realizó el LEP, que fueron extraordinariamente precisas. No entraré en los detalles, pero voy a contar dos anécdotas que demuestran su impresionante sensibilidad. La primera versa sobre la búsqueda de la energía exacta a la que colisionaban los positrones y los electrones. Los experimentadores necesitaban conocer esta energía para determinar el valor preciso de la masa del bosón Z. Tenían que considerar todo lo que pudiera afectar el valor de esta energía. Pero, incluso después de haber tenido en cuenta todo aquello que se les ocurrió, observaron que el valor de la energía parecía subir y bajar ligeramente, dependiendo del momento en que se hiciera la medición. ¿Qué era lo que causaba esta variación?

Increíblemente, resultó que eran las mareas del lago de Ginebra. El nivel del lago subía y bajaba con las mareas y con las intensas lluvias de aquel año. Esto afectaba a su vez al terreno próximo, que alteraba ligeramente la distancia que recorrían los electrones y los positrones a lo largo del acelerador. En cuanto se tuvo en cuenta en los cálculos el efecto de las mareas, las mediciones espurias de la masa del bosón Z, que dependían del momento en el que se hacían, se desvanecieron.

La segunda anécdota es también muy impresionante. Los electrones y los positrones del acelerador se mantienen en su sitio gracias a intensos campos magnéticos, que precisan a su vez una gran cantidad de energía. Parecía que, periódicamente, los electrones y los positrones quedaban ligeramente mal alineados, lo cual indicaba algún tipo de variación en los campos magnéticos del acelerador. Un trabajador del centro observó que esta variación coincidía bastante bien con el paso del TGV, el tren de alta velocidad que une Ginebra

con París. Al parecer, había picos de tensión vinculados a la corriente continua francesa que trastornaban ligeramente el acelerador. Alain Blondel, un físico francés que trabaja en el CERN, me contó la parte más divertida de esta historia. Los experimentadores tuvieron una magnífica ocasión de confirmar sin lugar a dudas esta hipótesis. Dado que la mayor parte de los miembros de la plantilla del TGV eran franceses, acabó convocándose, inevitablemente, una huelga, de modo que los experimentadores ¡tuvieron un día sin picos de tensión de regalo!

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•La herramienta experimental más importante para estudiar la física de partículas es el *acelerador de partículas* de alta energía. Los *aceleradores* de alta energía son aceleradores de partículas que hacen chocar entre sí las partículas; si tienen la energía suficiente, los aceleradores producen partículas que son demasiado pesadas para existir en el mundo que nos rodea.

•El *Tevatrón* es el acelerador de alta energía más potente que está ahora en funcionamiento.

•El *Gran Acelerador de Hadrones (LHC)* de Suiza, que tendrá una energía más o menos siete veces mayor que la del Tevatrón y que estará construido en una década, comprobará muchos modelos de la física de partículas.

9

LA SIMETRÍA:

EL PRINCIPIO ORGANIZADOR ESENCIAL

La.

La la la la.

La la la la.

La la la la la la la la.

SIMPLE MINDS

Atenea soltó de la jaula a tres de sus lechuzas y las dejó volar por ahí. Para desgracia de Ike, ese día había dejado plegado el techo de su descapotable y las lechuzas, que eran curiosas, fueron directas a él. La más traviesa de ellas picoteó la tapicería del coche y terminó por desgarrarla un poco.

Cuando Ike vio el estropicio, se dirigió, furibundo, a la habitación de Atenea, quien exigió que, en el futuro, vigilara a sus lechuzas con más atención. Atenea se defendió aduciendo que casi todas sus lechuzas eran muy formales y que solamente había que prestar atención y no perder de vista a la única que se portaba mal. Pero para entonces ya habían vuelto todas las lechuzas a la jaula y ni Ike ni Atenea supieron decir cuál de ellas había sido la culpable.

El modelo estándar funciona espectacularmente bien, pero esto se debe solamente a que es una teoría en la que los quarks, los leptones y los bosones gauge débiles —los W cargados y los Z que comunican la fuerza débil entre materia con carga débil— tienen todos masa. La masa de las partículas fundamentales es, por supuesto, crucial para todo lo que hay en el universo; si la materia hubiera estado desprovista verdaderamente de masa, nunca habría formado hermosos objetos sólidos, y la estructura y la vida en el universo tal como las conocemos no se habrían formado nunca. Y, sin embargo, es como si los bosones gauge débiles y otras partículas fundamentales de la teoría más simple de las fuerzas carecieran de masa y viajasen a la velocidad de la luz.

Podría parecernos extraño que una teoría de las fuerzas prefiera masas iguales a cero. ¿Por qué no permitir algo de masa? Pero la más básica de las teorías cuánticas de las fuerzas es intolerante en este aspecto. Prohíbe terminantemente cualquier valor que no sea cero para las masas de las partículas del modelo estándar. Uno de los logros del modelo estándar es que muestra cómo resolver este problema y diseñar una teoría en la que las partículas tienen las masas que las observaciones dicen que han de tener.

En el capítulo siguiente exploraremos el mecanismo mediante el cual las partículas adquieren masa, que es el fenómeno que se conoce como mecanismo de Higgs. Pero en este capítulo vamos a discutir el importante asunto de la *simetría* . La simetría y la ruptura de la simetría ayudan a determinar cómo el universo pasa de ser un punto amorfo a poseer la estructura compleja que vemos ahora. El mecanismo de Higgs está íntimamente ligado con la simetría, y en particular con la ruptura de la simetría. Para comprender cómo adquieren masa las partículas elementales se precisa tener cierta familiaridad con estas importantes ideas.

Cosas que cambian pero que siguen siendo iguales

La palabra *simetría* es sagrada para la mayoría de los físicos. Podríamos conjeturar que otras comunidades valoran la simetría por lo menos tanto como los físicos, ya que la cruz cristiana, la menorah judía, la rueda del dharma del budismo, la luna creciente del islam y el mandala hindú tienen todos simetría (véase la figura 56). Algo tiene simetría si podemos manipularlo —por ejemplo, girarlo, reflejarlo en un espejo o intercambiar sus partes—, de modo que la nueva configuración es indistinguible de la configuración inicial. Por ejemplo, si intercambiamos entre sí dos velas idénticas de una menorah, no notaríamos ninguna diferencia visible. Y la imagen especular de una cruz es idéntica a la cruz misma.

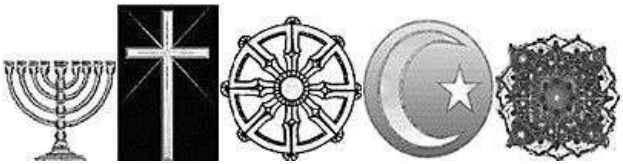


FIGURA 56. La menorah, la cruz, la rueda del dharma del budismo, la luna creciente del islam y el mandala hindú son todos simétricos.

Ya hablemos de matemáticas, de física o del mundo, cuando hay simetría podemos hacer transformaciones que aparentemente no cambian nada. Un sistema tiene simetría si alguien puede intercambiar sus componentes, reflejarlo en un espejo o girarlo mientras otro está de espaldas y que éste no note ninguna diferencia cuando se da de nuevo la vuelta.

La simetría suele ser una propiedad estática: por ejemplo, la simetría de una cruz no involucra la noción de tiempo. Pero los físicos prefieren casi siempre describir las simetrías en términos de *transformaciones de simetría* imaginarias, manipulaciones que uno puede aplicar a un sistema sin cambiar ninguna de sus propiedades observables. Por ejemplo, en vez de decir que las velas de una menorah son equivalentes, podría señalar que una menorah seguiría pareciendo lo mismo si intercambiara dos de sus velas. De hecho, no tendría que intercambiar las velas para defender que hay una simetría. Pero si, hipotéticamente, intercambiase las velas, no sería capaz de reconocer ninguna diferencia. A veces, por simplicidad, describiré la simetría de esta forma.

Todos estamos familiarizados con la simetría, no sólo en la ciencia y en los

símbolos sagrados, sino también en el arte seglar. Puede encontrarse simetría en la mayoría de las obras de la pintura, de la escultura, de la arquitectura, de la música, de la danza y de la poesía. El arte islámico es quizá el más espectacular en este aspecto, con el uso intrincado e intenso que hace de la simetría en la arquitectura y en las artes ornamentales: cualquiera que haya visto el Taj Mahal puede atestiguarlo. No sólo el edificio parece el mismo visto desde cualquier lado, sino que, contemplado desde la orilla del extenso estanque que tiene delante, se refleja perfectamente en la superficie inmóvil del agua. Hasta los árboles se han plantado pensando en conservar las simetrías del edificio. Cuando estuve allí, vi a un guía que estaba señalando algunos de los puntos de simetría, así que le pedí que me mostrara también los otros. Acabé mirando el edificio desde los ángulos más extraños y gateando entre los escombros a las afueras del recinto para ver todas las simetrías que presenta el monumento.

En el lenguaje coloquial la gente suele identificar la simetría con la belleza, y ciertamente parte de la fascinación de la simetría proviene de la regularidad y pulcritud que garantiza. Las simetrías nos ayudan también a aprender, ya que la repetición, ya sea en el tiempo o en el espacio, puede crear imágenes indelebles en la mente. El cerebro está programado para responder a la simetría y el intenso atractivo estético de ésta explica en gran parte por qué nos rodeamos de ella.

Pero las simetrías no aparecen sólo en el arte y en la arquitectura, sino también en la naturaleza, sin ninguna intervención humana. Por esta razón encontramos también simetrías en la física. El objeto de la física es relacionar distintas magnitudes entre sí, de modo que podamos hacer predicciones basadas en las observaciones. La simetría es un participante natural en este contexto. Cuando un sistema físico tiene simetría, podemos describirlo basándonos en un número de observaciones menor del que habría que considerar si el sistema no la tuviera. Por ejemplo, si hay dos objetos con propiedades idénticas, conoceríamos las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de uno de los objetos si hubiéramos medido ya el comportamiento del otro. Como los dos objetos son equivalentes, sabemos que tienen que comportarse de la misma manera.

En física, la existencia de una transformación de simetría en un sistema significa que hay un determinado procedimiento para reorganizar el sistema que deja inmutables todas sus propiedades físicas medibles[82] . Por ejemplo, si un sistema tiene simetrías rotacionales y traslacionales, dos ejemplo muy conocidos de simetrías del espacio, las leyes físicas se aplican del mismo modo en todas las direcciones y en todos los puntos. Las simetrías rotacionales y traslacionales nos dicen, por ejemplo, que no importa hacia dónde estemos mirando o dónde estemos situados al golpear con un bate una pelota de béisbol: siempre que apliquemos la misma fuerza, la pelota se comportará exactamente del mismo modo. Un experimento ha de arrojar el mismo resultado aunque giremos nuestras instalaciones o repitamos la medición en otra habitación o, sencillamente, en un lugar distinto.

Es difícil sobreestimar la importancia de la simetría en las leyes físicas. Muchas teorías físicas, como las leyes de la electrodinámica de Maxwell y la teoría de la relatividad de Einstein, están profundamente enraizadas en la

simetría. Y al explotar diversas simetrías podemos normalmente simplificar el uso de las teorías para hacer predicciones físicas. Por ejemplo, las predicciones sobre el movimiento orbital de los planetas, el campo gravitatorio del universo (que es más o menos simétrico desde el punto de vista rotacional), el comportamiento de las partículas en los campos electromagnéticos y muchas otras magnitudes físicas son matemáticamente más sencillas no bien tenemos en cuenta la simetría.

Las simetrías que hay en el mundo físico no siempre son completamente obvias. Pero incluso cuando no resulta fácil verlas o cuando se trata de herramientas meramente teóricas, las simetrías normalmente simplifican mucho la formulación de las leyes físicas. La teoría cuántica de las fuerzas, en la que enseguida nos centraremos, no es una excepción a esta regla.

Simetrías internas

Los físicos generalmente clasifican las simetrías en diferentes categorías. Todos estamos probablemente más familiarizados con las simetrías del espacio, las transformaciones simétricas que mueven o giran objetos en el mundo externo. Estas simetrías, entre las que figuran las simetrías traslacionales y rotacionales que acabo de mencionar, nos dicen que las leyes de la física son las mismas para un sistema, mire éste hacia donde mire y esté donde esté.

Quiero considerar ahora un tipo diferente de simetría, conocido como *simetría interna* . Mientras que las simetrías espaciales nos dicen que la física trata a todas las direcciones y a todas las posiciones por igual, las simetrías internas nos dicen que las leyes físicas actúan del mismo modo sobre objetos distintos pero indistinguibles en la práctica. En otras palabras, las transformaciones vinculadas a las simetrías internas intercambian o mezclan cosas distintas de un modo que no se puede discernir. De hecho, ya he dado un ejemplo de una simetría interna: la posibilidad de intercambiar entre sí dos velas de un candelabro judío. La simetría interna dice que las dos velas son equivalentes. Ésta es una afirmación sobre las velas, no sobre el espacio.

Un candelabro judío tradicional, sin embargo, tiene simetrías espaciales y simetrías internas. Mientras que las diferentes velas son equivalentes, lo que significa que hay una simetría interna, un candelabro judío sigue también pareciendo el mismo cuando se le gira 180 grados sobre su vela central, lo cual significa que también tiene simetría espacial. Pero puede existir una simetría interna aunque no exista una simetría espacial. Por ejemplo, podemos intercambiar teselas verdes idénticas en un mosaico, aunque la hoja que ayudan a representar conjuntamente tenga una forma irregular.

Otro ejemplo de una simetría interna es el intercambio mutuo de dos canicas idénticas. Si sujeto una de estas canicas en cada mano, no hay modo de distinguir cuál es cuál. Incluso si alguien las etiquetara como «canica 1» y «canica 2», nunca podría descubrir si yo conseguí en algún momento cambiar la una por la otra. Obsérvese que este ejemplo de las canicas no tiene una vinculación directa con ninguna distribución espacial, como sucedía en el caso del candelabro judío y en el del mosaico; las simetrías internas conciernen a los objetos mismos y no a sus localizaciones en el espacio.

La física de partículas se ocupa de las simetrías internas algo abstractas que relacionan diferentes tipos de partículas. Estas simetrías tratan a las partículas y a los campos que éstas crean como entes intercambiables. Igual que dos canicas idénticas se comportan exactamente del mismo modo cuando las hacemos rodar o las lanzamos contra un muro, dos tipos de partículas que tengan las mismas cargas y las mismas masas obedecen leyes físicas idénticas. La simetría que describe esto se llama *simetría de sabores* .

En el capítulo 7 vimos que los sabores son los tres tipos distintos de partículas que tienen cargas idénticas, uno en cada una de las tres generaciones. Por ejemplo, los electrones y los muones son los dos sabores de los leptones cargados, lo que implica que tienen cargas idénticas. Si viviéramos en un mundo en el que el electrón y el muón tuvieran también masas idénticas, los dos serían completamente intercambiables. Habría habido entonces una simetría de sabores, en virtud de la cual el electrón y el muón se comportarían exactamente igual en presencia de cualesquiera otras partículas o fuerzas.

En nuestro mundo, el muón es más pesado que el electrón, de modo que la simetría de sabores no es exacta. Pero la diferencia de masa puede ser insignificante para algunas predicciones físicas, así que las simetrías de sabores entre partículas ligeras con cargas idénticas, como el muón y el electrón, son, no obstante, con frecuencia, útiles en los cálculos. A veces el explotar simetrías, aunque éstas sean algo imperfectas, nos ayuda a calcular resultados con una exactitud suficiente. Por ejemplo, la diferencia de masas entre partículas suele ser tan pequeña (comparada con la energía u otra masa grande) que para las predicciones no produce una diferencia mensurable.

Pero en este punto el tipo de simetría que reviste mayor importancia para nosotros es la simetría que es relevante en la teoría de fuerzas, que es exacta. Esta simetría es también una simetría interna entre partículas, pero es un poco más abstracta que la simetría de sabores que acabamos de discutir. Este tipo particular de simetría interna se parece más al ejemplo siguiente. Como seguramente recordaremos de la física que estudiamos en el colegio, o de las clases de teatro o de arte, tres focos de luz —normalmente uno rojo, otro verde y otro azul— al funcionar juntos, pueden producir luz blanca. Si intercambiáramos entre sí las posiciones de los tres focos, cualquiera de las nuevas configuraciones seguiría proporcionando luz blanca. No importa de dónde venga cada haz de luz individual, desde el momento en que nosotros sólo vemos el resultado final, luz blanca. En ese caso, la transformación simétrica interna que intercambia las diferentes luces nunca producirá ninguna consecuencia observable.

Vamos a ver ahora que esta simetría guarda una gran analogía con las simetrías asociadas con las fuerzas, ya que, en ambos casos, no podemos observarlo todo. El caso de la luz muestra simetría sólo porque no se nos permite mirarlo todo, sólo la luz combinada. Si pudiéramos ver las luces mismas, sabríamos que han sido intercambiadas. Como mencionamos antes, esta estrecha analogía entre los colores y las fuerzas es la razón que explica los términos *color y cromodinámica cuántica* (QCD) que aparecen en la descripción de la fuerza fuerte.

En 1927, los físicos Fritz London y Hermann Weyl demostraron que la descripción más sencilla de las fuerzas, siguiendo la teoría cuántica de campos, involucra simetrías internas análogas a las que aparecen en el ejemplo del proyector de luz de antes. La conexión entre las fuerzas y la simetría es sutil, y por eso es raro que podamos leer algo sobre ella si no es en los libros de texto. Como el lector no precisa realmente comprender esta conexión para seguir la discusión de las secciones de este libro en las que hablaremos sobre las masas —incluimos aquí el mecanismo de Higgs y el problema de la jerarquía de los próximos capítulos—, en este punto podría saltarse lo que viene y pasar si quiere directamente al siguiente capítulo. Pero si está interesado en el papel que desempeña la simetría interna en la teoría de las fuerzas y el mecanismo de Higgs, le aconsejo que lea lo que viene a continuación.

La simetría y las fuerzas

El electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte llevan todas aparejadas simetrías internas. (La gravedad está relacionada con las simetrías del espacio y del tiempo, y ha de ser considerada, por lo tanto, por separado). Sin las simetrías internas, la teoría cuántica de las fuerzas sería un amasijo intratable. Para comprender estas simetrías, necesitamos considerar primero las *polarizaciones de los bosones gauge* .

Probablemente todo el mundo está familiarizado con la polarización de la luz; por ejemplo, las gafas de sol polarizadas reducen el deslumbramiento al permitir pasar solamente la luz que está polarizada verticalmente y eliminar la luz polarizada horizontalmente. En este caso, las polarizaciones son las direcciones independientes en las que pueden oscilar las ondas electromagnéticas asociadas con la luz.

La mecánica cuántica asocia una onda a cada fotón. Cada fotón individual tiene también diferentes polarizaciones posibles, pero no todas las polarizaciones imaginables están permitidas. Resulta que cuando un fotón se desplaza en una dirección determinada, la onda puede oscilar sólo en las direcciones que son perpendiculares a su dirección de movimiento. Esta onda actúa como las olas del mar, que también oscilan perpendicularmente. Por eso vemos que una boya o una barca suben y bajan cuando una ola pasa por debajo de ellas.

La onda asociada a un fotón puede oscilar en cualquier dirección perpendicular a la dirección de su movimiento (véase la figura 57). Realmente hay infinitas direcciones de este tipo: si imaginamos un círculo perpendicular a la línea de movimiento, podemos ver que la onda puede oscilar en cualquier dirección radial (desde el centro hasta un punto en el borde del círculo) y que hay una infinidad de tales direcciones.

FIGURA 57. Una onda transversal oscila perpendicularmente a la dirección del movimiento (en este caso, hacia arriba y hacia abajo, mientras que la onda viaja hacia la derecha).

Pero en la descripción física de estas oscilaciones sólo necesitamos dos

oscilaciones perpendiculares independientes para dar cuenta de todas las demás. En la terminología de la física se llaman *polarizaciones transversales* . Es como si hubiéramos etiquetado un círculo con ejes x e y . Cualquier línea que dibujemos y que parta del centro del círculo cortará siempre la circunferencia en un punto determinado —una pareja determinada de valores de x e y — y puede, por lo tanto, determinarse de modo único con sólo dos coordenadas. Análogamente (sin entrar en detalles de cómo funciona esto), aunque hay una infinidad de direcciones que son perpendiculares a la dirección en la que viaja una onda, todas estas direcciones pueden obtenerse como combinaciones de luz polarizada en dos direcciones perpendiculares cualesquiera.

Lo importante es que podría haber habido en principio una tercera dirección de polarización, que oscilara en la misma dirección en la que viaja la onda (si hubiera existido, se habría llamado *polarización longitudinal* [M15]). Así es como viajan las ondas de sonido, por ejemplo. Pero no existe dicha polarización del fotón. En la naturaleza solamente existen dos de las tres direcciones de polarización independientes concebibles. Un fotón nunca oscila a lo largo de la dirección de su movimiento o en la dirección del tiempo: oscila sólo a lo largo de las direcciones perpendiculares a su movimiento.

Aunque no supiéramos de antemano, por consideraciones teóricas independientes, que la polarización longitudinal es espuria, la teoría cuántica de campos nos hubiera dicho que no la incluyéramos en la teoría. Si un físico se pusiera a hacer cálculos usando una teoría de las fuerzas que incluyera equivocadamente las tres direcciones de polarización, las predicciones de sus propiedades, proporcionadas por la teoría, no tendrían sentido. Por ejemplo, ella prevería índices de interacción ridículamente altos para los bosones gauge. De hecho, prevería bosones gauge que interaccionan más veces que siempre, esto es, más del cien por ciento del tiempo. Cualquier teoría que haga predicciones tan absurdas es claramente errónea, y tanto la naturaleza como la teoría cuántica de campos dejan claro que esta polarización que no es perpendicular no existe.

Por desgracia, la teoría más sencilla de las fuerzas que podrían formular los físicos incluye esta dirección espuria de polarización. Esto no es tan sorprendente, ya que una teoría que sirva para cualquier fotón posiblemente no pueda contener información sobre un fotón concreto que viaja en una dirección concreta. Y sin esta información, la relatividad especial no distinguiría ninguna dirección. En una teoría que conserve las simetrías de la relatividad especial (incluida la simetría rotacional), necesitaríamos tres direcciones, no dos, para describir todas las direcciones en las que podría oscilar un fotón; en una descripción así, el fotón podría oscilar en cualquier dirección del espacio.

Pero sabemos que esto no es cierto. Para cualquier fotón concreto, la dirección de su movimiento resulta especial y queda prohibida la oscilación en esa dirección. Pero no sería deseable tener que hacer una teoría diferente para cada uno de los fotones, cada uno con su propia dirección de desplazamiento. Nos gustaría una teoría que funcionara con independencia del camino que sigue el fotón. Aunque podríamos tratar de desarrollar una teoría que sencillamente no incluyera la polarización espuria, es mucho más

sencillo y nítido respetar la simetría rotacional y eliminar la polarización mala de algún otro modo. Los físicos, pensando en la simplicidad, han reconocido que la teoría cuántica de campos funciona mejor cuando incluyen la polarización espuria en su teoría pero añaden un ingrediente adicional para filtrar las predicciones buenas y relevantes desde el punto de vista de la física y separarlas de las malas.

Aquí es donde entran en escena las simetrías internas. El papel de las simetrías internas en la teoría de las fuerzas es eliminar las contradicciones que crearían las polarizaciones no deseadas sin hacernos perder las simetrías de la relatividad especial. La simetrías internas son el modo más sencillo de filtrar las polarizaciones a lo largo de la dirección de desplazamiento, polarizaciones que, según nos dicen ciertas razones teóricas independientes y las observaciones experimentales, no existen. Clasifican las polarizaciones en buenas y malas, las que son compatibles con las simetrías y las que no. El modo en que esto funciona es demasiado técnico para explicarlo aquí, pero puedo dar una idea general usando una analogía.

Supongamos que tenemos una máquina que confecciona camisas y que puede hacer mangas izquierdas y derechas de dos medidas, cortas y largas, pero, por algún motivo, al fabricante de la máquina se le olvidó añadir un dispositivo para asegurarse de que la manga izquierda y la derecha sean de la misma medida. La mitad de las veces saldrán camisas útiles —con dos mangas largas o con dos mangas cortas—, pero la otra mitad saldrán camisas inservibles, desequilibradas, con una manga corta y otra larga. Por desgracia para nosotros, ésta es la única máquina para hacer camisas que tenemos.

Podría uno tirar la máquina de hacer camisas y dejar de fabricarlas, o quedarse con la máquina y fabricar unas cuantas camisas buenas y otras taradas. No todo está perdido, sin embargo, ya que será bastante obvio qué camisas descartar: puede uno solamente ponerse las camisas que conservan una simetría lateral entre izquierda y derecha. Siempre iremos bien vestidos si dejamos que la máquina haga todo tipo de camisas, pero nos quedamos solamente con las que tengan simetría lateral.

Las simetrías internas asociadas a las fuerzas consiguen algo parecido. Proporcionan un marcador útil para distinguir aquellas cantidades que, en principio, podríamos observar (las que hacen intervenir las polarizaciones que queremos conservar) de aquellas otras que no deberían estar presentes (las que hacen intervenir a la polarización espuria a lo largo de la dirección del movimiento). Como los filtros de basura de los ordenadores, que buscan rasgos identificadores de los mensajes electrónicos no deseados para separarlos de los mensajes útiles, el filtro de las simetrías internas distingue los procesos físicos que conservan la simetría de los espurios que no la conservan. Las simetrías internas hacen que sea fácil eliminar las polarizaciones con pinta de basura; si estuvieran presentes, romperían la simetría interna.

El modo de funcionar de la simetría es muy parecido al ejemplo del foco multicolor que hemos discutido antes, en el que podíamos observar sólo la luz blanca producida por los tres colores juntos, pero no las luces individuales. Análogamente, resulta que sólo ciertas combinaciones de partículas son

consistentes con las simetrías internas que intervienen en la teoría de las fuerzas, y éstas son las únicas combinaciones que aparecen en el mundo físico.

Las simetrías internas asociadas a las fuerzas prohíben cualquier proceso en el que intervengan las polarizaciones malas, las que oscilan a lo largo de la dirección del movimiento (las que no existen realmente en la naturaleza). Así como las camisas faltas de equilibrio que eran inconsistentes con la simetría lateral entre izquierda y derecha se distinguían y se descartaban fácilmente, las polarizaciones espurias que se muestran inconsistentes con la simetría interna son automáticamente eliminadas y nunca producen confusiones en los cálculos. Una teoría que estipula la simetría interna correcta elimina las polarizaciones malas que, de lo contrario, estarían presentes.

El electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte se transmiten todos mediante bosones gauge: el electromagnetismo mediante el fotón, la fuerza débil mediante los bosones gauge débiles y la fuerza fuerte mediante gluones. Y cada tipo de bosón gauge va asociado a ondas que podrían oscilar en principio en cualquier dirección, pero que en realidad sólo oscilan en las direcciones perpendiculares. De modo que cada una de las tres fuerzas precisa su propia simetría particular para eliminar las polarizaciones malas de los bosones gauge que transmiten esa fuerza. Hay, por lo tanto, una simetría asociada al electromagnetismo, una simetría independiente asociada a la fuerza débil y otra simetría más asociada a la fuerza fuerte.

Las simetrías internas de la teoría de las fuerzas podrían parecer complicadas, pero constituyen el camino más sencillo que conocen los físicos para formular una teoría cuántica de fuerzas útil, que nos permita hacer predicciones. Las simetrías internas son las que discriminan entre las polarizaciones auténticas y las espurias.

Las simetrías internas que acabamos de explorar son cruciales para la teoría de las fuerzas. Están también en la base del mecanismo de Higgs, que nos dice cómo adquieren su masa las partículas elementales del modelo estándar. En el próximo capítulo no vamos a necesitar los detalles de la simetría interna, pero veremos que la simetría y su ruptura son componentes esenciales del modelo estándar.

Los bosones gauge, las partículas y la simetría

Hasta ahora hemos considerado el efecto de la simetría sólo sobre los bosones gauge. Pero las transformaciones simétricas asociadas a una fuerza no solamente actúan sobre los bosones gauge. Un bosón gauge interactúa con las partículas que experimentan la fuerza asociada a ese bosón gauge: el fotón interactúa con las partículas que tienen carga electromagnética; los bosones débiles, con las partículas que tienen carga débil, y los gluones, con los quarks.

A causa de estas interacciones, cada una de las simetrías internas puede ser conservada solamente si transforma a la vez los bosones gauge y las partículas con las que éstos interactúan. Podemos ver esto por analogía. Las rotaciones, por ejemplo, no serían transformaciones simétricas si actuaran

solamente sobre algunos objetos, pero no sobre otros. Si hacemos girar una de las pastas que forman una galleta Oreo[83] , pero no la otra, rompemos la galleta. La galleta Oreo se queda igual que antes después de una rotación sólo si giramos a la vez las dos pastas que la forman.

Por razones análogas, una transformación que transformase sólo los bosones gauge que transmiten una fuerza, pero no las partículas que experimentan esa fuerza, no podría conservar nunca una simetría. La simetría interna que elimina las polarizaciones espurias de los gluones exige que los quarks, al igual que aquéllos, sean intercambiables, así como los gluones. De hecho, la transformación simétrica que intercambia los quarks es la misma que la que intercambia los bosones gauge. La única manera de preservar la simetría consiste en mezclar las dos juntas, así como la única manera de conservar entera una galleta Oreo al girarla es girar a la vez las dos pastas que la forman.

La fuerza que más nos va a interesar en este libro es la fuerza débil. La simetría interna asociada a la fuerza débil trata los tres bosones gauge débiles como equivalentes. También trata como equivalentes a las parejas de partículas como el electrón y el neutrino o el quark up y el quark down. Esta transformación simétrica de la fuerza débil intercambia los tres bosones gauge débiles y también estas parejas de partículas. Como con los gluones y los quarks, la simetría sólo se conserva si se intercambia todo a la vez[M16] .

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•Las simetrías nos dicen cuándo dos configuraciones diferentes se comportan del mismo modo.

•En la física de partículas, las simetrías son útiles como un método para prohibir ciertas interacciones: no se permiten aquellas que no conservan la simetría.

•Las simetrías son importantes para la teoría de las fuerzas porque la teoría de las fuerzas factible más sencilla incluye una simetría asociada a cada fuerza. Estas simetrías eliminan las partículas no deseadas. También eliminan las predicciones falsas que, de lo contrario, la teoría de las fuerzas más sencilla haría sobre las partículas de alta energía.

10

EL ORIGEN DE LAS MASAS DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES:

LA RUPTURA ESPONTÁNEA DE LA SIMETRÍA Y EL MECANISMO DE HIGGS

One of these mornings the chain is gonna break.

[Un día de estos la cadena se va a romper].

ARETHA FRANKLIN

Una aplicación más estricta de los límites de velocidad hizo que los viajes de largo recorrido se convirtieran en una pesadilla para Ícaro III. Anhelaba correr a más no poder, pero la policía le abordaba casi a cada kilómetro. Los polis nunca se preocupaban de los coches lentos y vulgares, pero acosaban a los vehículos rápidos y turboalimentados, como el suyo.

Ike se resignó a conducir solamente distancias cortas, ya que así lograba esquivar por completo a la policía. Dentro del área de un kilómetro de diámetro que rodeaba su punto de partida, la policía nunca le molestaba y él podía conducir siempre a una velocidad impresionante. Aunque la fuerza del motor de su Porsche era desconocida fuera de su barrio, cerca de su casa se hizo legendaria.

Las simetrías son importantes, pero el universo normalmente no manifiesta una simetría perfecta. Las simetrías ligeramente imperfectas son las que hacen el mundo interesante (pero organizado). Para mí, uno de los aspectos más intrigantes de la investigación en física es la búsqueda de conexiones que hagan que la simetría sea significativa en un mundo asimétrico.

Cuando una simetría no es exacta, los físicos dicen que la simetría se ha *roto* . Aunque la ruptura de la simetría suele ser interesante, no siempre es atractiva desde el punto de vista estético: la belleza y la economía del sistema o de la teoría subyacente pueden perderse (o desvirtuarse). Hasta el Taj Mahal, tan simétrico, carece de una simetría perfecta, ya que el ahorrador heredero del constructor decidió no levantar un segundo monumento que estaba planeado y añadió, sin embargo, al original una tumba desplazada con respecto al centro. Esta segunda tumba destruye la simetría de cuatro lados, que sin ella sería perfecta, empañando ligeramente su belleza subyacente.

Pero por suerte para los físicos sensibles a la estética, las simetrías rotas pueden ser todavía más bonitas e interesantes que las cosas que son perfectamente simétricas. La simetría perfecta suele ser aburrida. La *Mona Lisa* con una sonrisa simétrica simplemente no sería la misma.

En la física, como en el arte, la simplicidad sola no es necesariamente el

objetivo supremo. La vida y el universo rara vez son perfectos, y casi todas las simetrías que podemos señalar son imperfectas. Aunque los físicos valoramos y admiramos la simetría, estamos todavía pendientes de encontrar una conexión entre una teoría simétrica y un mundo asimétrico. Las mejores teorías respetan la elegancia de las teorías simétricas y a la vez incorporan las rupturas de la simetría necesarias para hacer predicciones que concuerden con los fenómenos de nuestro mundo. El objetivo es hacer teorías que sean más ricas y a veces incluso más bellas sin comprometer su elegancia.

El concepto del *mecanismo de Higgs* , que se basa en la ruptura espontánea de la simetría (que consideraremos en la siguiente sección), es un ejemplo de este tipo de idea teórica, sofisticada y elegante. Este mecanismo, que se llama así en honor del físico escocés Peter Higgs, permite a las partículas del modelo estándar —quarks, leptones y bosones gauge débiles— adquirir masa.

Sin el mecanismo de Higgs, todas las partículas elementales tendrían que ser partículas sin masa; el modelo estándar con partículas que tengan masa pero sin el mecanismo de Higgs generaría predicciones sin sentido a altas energías. La propiedad mágica del mecanismo de Higgs es que te deja guardar el pastel y también comértelo: las partículas tienen masa, pero actúan como si no la tuvieran cuando cuentan con energías a las que las partículas con masa causarían problemas. Vamos a ver que el mecanismo de Higgs permite a las partículas tener masa pero viajar libremente sobre un área restringida —de un modo muy parecido a lo que ocurría con el coche de Ike, siempre detenido por la policía tras haber recorrido un kilómetro, pero que viajaba sin estorbos a distancias acotadas—, y que esto es suficiente para resolver los problemas de las altas energías.

Aunque el mecanismo de Higgs es una de las ideas más bonitas de la teoría cuántica de campos y está en la base de las masas de todas las partículas fundamentales, es también algo abstracto. Por esta razón no es muy conocido por la mayoría de la gente, si exceptuamos a los especialistas. Aunque el lector podrá entender muchos aspectos de las ideas que discutiré más adelante en el libro sin conocer los detalles del mecanismo de Higgs (y puede ir ahora si quiere directamente al resumen del final del capítulo), este capítulo ofrece la oportunidad de explorar un poco más profundamente la física de partículas y las ideas que, como la ruptura espontánea de la simetría, apuntalan hoy los desarrollos teóricos de la física de partículas. Como beneficio adicional, un poco de familiaridad con el mecanismo de Higgs le revelará al lector una idea sorprendente del electromagnetismo que se descubrió hace relativamente poco, en la década de 1960, una vez que se comprendieron debidamente la fuerza débil y el mecanismo de Higgs. Y más adelante, cuando toque explorar los modelos extradimensionales, una comprensión somera del mecanismo de Higgs hará significativos los méritos potenciales de esas ideas recientes.

La ruptura espontánea de la simetría

Antes de describir el mecanismo de Higgs, necesitamos primero investigar la ruptura espontánea de la simetría, un tipo especial de ruptura de la simetría que resulta central para aquél. La ruptura espontánea de la simetría

desempeña un papel decisivo en muchas de las propiedades del universo que ya comprendemos y es muy posible que también lo haga en lo que sea que esté aún por descubrir.

La ruptura espontánea de la simetría no es ubicua solamente en la física, sino que es, de hecho, una característica bien presente en la vida cotidiana. Una simetría rota espontáneamente es una simetría que se conserva por leyes físicas, pero no por el modo en que las cosas están realmente dispuestas en el mundo. La ruptura espontánea de la simetría se produce cuando un sistema no puede preservar una simetría que de otro modo sí que estaría presente. Quizá la mejor manera de explicar cómo funciona esto es dar unos cuantos ejemplos.

Pensemos primero en una mesa circular dispuesta para la cena, alrededor de la cual se sientan una serie de personas que tienen vasos de agua colocados entre ellas. ¿Cuál es el vaso que debe uno usar, el que está colocado a su derecha o el que está colocado a su izquierda? No hay una respuesta óptima. Me dicen que la Sra. Buenas Maneras dice que ha de ser el colocado a la derecha, pero si dejamos de lado las arbitrarias reglas de la etiqueta, tanto da el vaso de la derecha como el de la izquierda.

No obstante, en cuanto alguien escoge un vaso, se rompe la simetría. El ímpetu por elegir no habría de ser necesariamente parte del sistema; en este caso sería otro factor: la sed. Aun así, si alguien bebiera espontáneamente del vaso de la izquierda, lo mismo harían seguramente sus vecinos, y al final todo el mundo bebería del vaso de la izquierda.

La simetría existe hasta que alguien toma un vaso. En ese momento se rompe espontáneamente la simetría lateral entre izquierda y derecha. No hay ninguna ley de la física que dicte que alguien tenga que escoger la izquierda o la derecha. Pero uno tiene que escoger, y una vez hecho, la izquierda y la derecha ya no son iguales, en el sentido de que ya no hay una simetría que las intercambie.

He aquí otro ejemplo. Imaginemos un lápiz que está en posición vertical, apoyado sobre la punta, en el centro de un círculo. Durante el brevísimo segundo en el que está sobre la punta en posición exactamente vertical, todas las direcciones son equivalentes y existe una simetría rotacional. Pero un lápiz apoyado sobre su punta no puede estar mucho tiempo así: enseguida caerá espontáneamente en alguna dirección. Tan pronto como el lápiz se inclina, se rompe la simetría rotacional original.

Obsérvese que no serían las leyes de la física mismas las que determinasen la dirección de caída. La física del lápiz que cae sería exactamente la misma, sea cual sea la dirección de caída. El que rompería la simetría sería el propio lápiz, el estado del sistema. Sencillamente, el lápiz no puede caer en todas las direcciones a la vez. Tiene que caer en una dirección determinada.

Parecería que una pared infinitamente larga y alta es igual en todos los puntos y a lo largo de todas las direcciones. Pero como una pared de verdad ha de tener límites, si queremos ver las simetrías debemos acercarnos a la pared hasta que los límites queden fuera del alcance de la vista. Los bordes

de la pared nos dicen que no todo es igual a lo largo de la pared, pero si pegáramos la nariz a ella y viéramos solamente una pequeña porción suya, nos parecería que la simetría se conserva. Sería interesante pararse a pensar un rato este ejemplo, que muestra cómo puede dar la impresión de que una simetría se conserva cuando se la ve a una distancia, aunque parezca que se ha roto cuando se la ve desde otra: un concepto cuya importancia quedará patente enseguida.

En el mundo, casi todas las simetrías que sabríamos señalar no se conservan. Por ejemplo, hay muchas simetrías que estarían presentes en el espacio vacío, como la invarianza rotacional o traslacional, que nos dice que todas las direcciones y posiciones son la misma. Pero el espacio no está vacío: está salpicado de estructuras como las estrellas y el sistema solar, que ocupan posiciones determinadas y que están orientadas en direcciones determinadas que ya no conservan la simetría subyacente. Podrían estar en cualquier sitio, pero no pueden estar en todos los sitios. Las simetrías subyacentes tienen que romperse, aunque sigan implícitas en las leyes físicas que describen el mundo.

La simetría asociada con la fuerza débil también se rompe espontáneamente. En el resto de este capítulo explicaré cómo sabemos esto y discutiré algunas de sus consecuencias. Veremos que la ruptura espontánea de la simetría de la fuerza débil es la única manera de explicar la masa de las partículas y evitar a la vez las predicciones incorrectas para las partículas de altas energías que son inevitables en cualquier otra teoría candidata. El mecanismo de Higgs reconoce tanto la exigencia de la simetría interna asociada con la fuerza débil como la necesidad de que ésta se rompa.

El problema

La fuerza débil posee una propiedad especialmente extravagante. Al contrario que la fuerza electromagnética, que viaja largas distancias —propiedad de la que nos beneficiamos cada vez que encendemos la radio—, la fuerza débil sólo afecta a la materia que se encuentra a una distancia extremadamente corta. Dos partículas han de estar entre ellas a una distancia inferior a la diez mil billonésima parte de un centímetro para que puedan influenciarse mutuamente mediante la fuerza débil.

Para los físicos que estudiaron la teoría cuántica de campos y la electrodinámica cuántica (QED, la teoría cuántica del electromagnetismo) en sus primeros tiempos, este rango de acción tan restringido era un misterio. La electrodinámica cuántica hacía pensar que las fuerzas —como la electromagnética, tan bien comprendida— tenían que transmitirse arbitrariamente lejos a partir de una fuente cargada. ¿Por qué la fuerza débil no se transmitía también a las partículas que estuvieran a cualquier distancia y no solamente a las que están tan próximas?

La teoría cuántica de campos, que combina los principios de la mecánica cuántica y la relatividad especial, dicta que si las partículas de baja energía transmiten fuerzas solamente a cortas distancias, entonces han de poseer masa; y cuanto más pesada sea la partícula, más corto será su radio de acción. Como se explicó en el capítulo 6, esto es una consecuencia del

principio de incertidumbre y de la relatividad especial. El principio de incertidumbre nos dice que necesitamos partículas con un momento alto para sondear o influir en los procesos físicos a cortas distancias, y la relatividad especial vincula el momento a la masa. Aunque éste es un enunciado cualitativo, la teoría cuántica de campos precisa esta relación. Dice a qué distancia se desplazará la partícula con masa: cuanto más pequeña sea la masa, mayor será la distancia.

Por lo tanto, según la teoría cuántica de campos, el corto alcance de la fuerza débil solamente podía significar una cosa: los bosones gauge débiles que transmiten esta fuerza han de tener una cierta masa. Sin embargo, la teoría de las fuerzas que he descrito en el capítulo anterior funciona solamente para los bosones gauge como el fotón, que transmite una fuerza a largas distancias y que no tiene masa. Según la teoría original de las fuerzas, la existencia de masas no nulas era extraña y problemática: las predicciones de la teoría a altas energías cuando los bosones gauge tienen masa carecen de sentido. Por ejemplo, la teoría prevería que los bosones con mucha energía, con mucha masa, interactuarían entre sí con demasiada fuerza, con tanta fuerza, de hecho, que sería como si las partículas interactuasen más del cien por cien de las veces. Esta teoría simplista es claramente errónea.

Además, las masas de los bosones gauge débiles, los quarks y los leptones (todos los cuales, como sabemos, tienen una masa no nula) no conservan la simetría interna, que, como hemos visto en el capítulo anterior, es un ingrediente clave de la teoría de las fuerzas. Los físicos que tenían la esperanza de construir una teoría con partículas que tuvieran masa necesitaban obviamente una idea nueva.

Los físicos han probado que el único modo de elaborar una teoría que evite las predicciones absurdas sobre los bosones gauge con masa y energía consiste en que se rompa espontáneamente la simetría de la fuerza débil a través del proceso que se conoce como mecanismo de Higgs. He aquí el porqué.

Quizá recordemos del capítulo anterior que una de las razones por las que queríamos incluir una simetría interna que eliminara una de las tres polarizaciones posibles de un bosón gauge era que una teoría sin la simetría hace el mismo tipo de predicciones absurdas que acabamos de mencionar. La teoría de fuerzas más sencilla sin una simetría interna predice que cualquier bosón gauge con energía, con o sin masa, interactúa con otros bosones gauge con una frecuencia excesiva.

La teoría correcta de las fuerzas elimina este mal comportamiento en altas energías, vetando la polarización responsable de las predicciones incorrectas y que, de hecho, no existe en la naturaleza. Las polarizaciones espurias son la fuente de las predicciones problemáticas de la dispersión en alta energía, de modo que la simetría permite que queden sólo las polarizaciones físicas, las únicas que realmente existen y que son consistentes con la simetría. La simetría, que libra a la teoría de las polarizaciones no existentes, también elimina las predicciones incorrectas que, de otro modo, éstas producirían.

Aunque en su momento no lo dije tan explícitamente, esta idea funciona sólo,

tal como está expuesta, para los bosones gauge sin masa. Los bosones gauge débiles, al contrario que el fotón, tienen masas no nulas. Los bosones gauge débiles viajan a una velocidad inferior a la de la luz. Y esto produce un tirón en el mecanismo.

Mientras los bosones gauge sin masa tienen sólo dos polarizaciones que existen en la naturaleza, los bosones gauge con masa tienen tres. Una manera de comprender esta distinción es que los bosones gauge sin masa siempre viajan a la velocidad de la luz, lo que nos dice que no están nunca en reposo. Por lo tanto, siempre seleccionan una dirección de movimiento; así, podemos distinguir siempre las direcciones perpendiculares a la de la polarización restante, que oscila a lo largo de aquélla. Y resulta que para los bosones gauge sin masa, las polarizaciones físicas oscilan sólo en las dos direcciones perpendiculares.

Los bosones gauge con masa, sin embargo, son diferentes. Como todos los objetos familiares, pueden estar en reposo. Pero cuando un bosón con masa no se mueve, no selecciona ninguna dirección de movimiento. Para un bosón gauge con masa en reposo, las tres direcciones serían equivalentes. Pero si las tres direcciones son equivalentes, entonces deberían existir en la naturaleza las tres polarizaciones posibles. Y efectivamente existen.

Aunque esta lógica nos parezca misteriosa, podemos descansar tranquilos, dado que los experimentadores han visto ya los efectos de esta tercera polarización de un bosón gauge con masa y han confirmado su existencia. La tercera polarización se llama *polarización longitudinal* . Cuando un bosón gauge con masa se mueve, la polarización longitudinal es la onda que oscila a lo largo de la dirección del movimiento; por ejemplo, la dirección de las oscilaciones de las ondas de sonido.

Esta polarización no existe en el caso de bosones gauge sin masa, como el fotón. Sin embargo, para los bosones gauge con masa, como los bosones gauge débiles, la tercera polarización es verdaderamente parte de la naturaleza. La tercera polarización ha de ser parte de la teoría del bosón gauge débil.

Como esta tercera polarización es la fuente del radio de interacción a altas energías más grande de lo debido del bosón gauge débil, su existencia plantea un dilema. Ya sabemos que necesitamos una simetría para eliminar el mal comportamiento a alta energía. Pero esta simetría se libra de las predicciones incorrectas eliminando también la tercera polarización, y esa polarización es esencial para un bosón gauge con masa y, por lo tanto, para la teoría que lo describe. Aunque una simetría interna eliminaría las malas predicciones sobre el comportamiento a alta energía, lo haría a un precio demasiado alto: ¡la simetría se desembarazaría también de la masa! Una simetría en la teoría de los bosones gauge con masa parece abocada a llevarse con el agua del baño también al bebé.

El atolladero parece, a primera vista, insuperable, ya que los requerimientos de una teoría de los bosones gauge con masa parecen ser completamente contradictorios. Por una parte, no podría conservarse una simetría interna —como la descrita en el capítulo anterior—, ya que, de lo contrario, quedarían

vetados los bosones gauge con masa con tres polarizaciones físicas. Por otra parte, sin una simetría interna para eliminar dos de las polarizaciones, la teoría de las fuerzas hace predicciones incorrectas cuando los bosones gauge tienen alta energía. Seguimos necesitando una simetría para eliminar la tercera polarización de cada bosón gauge con masa si queremos tener alguna esperanza de eliminar el mal comportamiento a alta energía.

La clave para resolver esta aparente paradoja y comprender la descripción cuántica correcta de un bosón gauge con masa era reconocer la diferencia entre los bosones con alta energía y los bosones con baja energía. En la teoría sin una simetría interna, solamente las predicciones sobre los bosones gauge de alta energía parecían problemáticas. Las predicciones sobre los bosones gauge con masa con baja energía eran sensatas (y ciertas).

Estos dos hechos juntos implican algo bastante profundo: para evitar las predicciones problemáticas a altas energías, es esencial una simetría interna; o sea que las lecciones del capítulo anterior siguen estando vigentes. Pero cuando los bosones gauge con masa tienen baja energía (baja comparada con la energía que la relación de Einstein $E = mc^2$ asocia con su masa), la simetría no debería conservarse. La simetría ha de ser eliminada para que los bosones gauge puedan tener masa y la tercera polarización pueda participar en las interacciones a baja energía en las que la masa marca una diferencia.

En 1964, Peter Higgs y otros descubrieron cómo las teorías de las fuerzas podrían incorporar a los bosones gauge con masa haciendo exactamente lo que acabamos de decir: manteniendo una simetría interna a altas energías, pero eliminándola a bajas energías. El mecanismo de Higgs, basado en la ruptura espontánea de la simetría, rompe la simetría interna de las interacciones débiles, pero sólo a baja energía. Esto asegura que la polarización extra estará presente a baja energía, donde la teoría la necesita. Pero la polarización extra no participará en los procesos a alta energía, y no aparecerán las interacciones sin sentido a altas energías.

Vamos a considerar ahora un modelo particular que rompe espontáneamente la simetría de la fuerza débil y que implementa el mecanismo de Higgs. Con este ejemplo del mecanismo de Higgs, veremos cómo adquieren masa las partículas elementales del modelo estándar.

El mecanismo de Higgs

El mecanismo de Higgs implica un campo que los físicos llaman el campo de Higgs. Como hemos visto, los campos de la teoría cuántica de campos son objetos que pueden producir partículas en cualquier punto del espacio. Cada tipo de campo genera su propio tipo determinado de partícula. Un campo electrónico es una fuente de electrones, por ejemplo. Análogamente, un campo de Higgs es una fuente de partículas de Higgs.

Como los quarks pesados y los leptones, las partículas de Higgs son tan pesadas que no se encuentran en la materia normal. Pero al contrario que los quarks pesados y los leptones, nadie ha visto nunca las partículas de Higgs que produciría el campo de Higgs, ni siquiera en los experimentos realizados

en los aceleradores de alta energía. Esto no significa que las partículas de Higgs no existan, sino simplemente que las partículas son tan pesadas que no hemos podido producirlas con las energías que los experimentos han explorado hasta ahora. Los físicos esperan que, si existen las partículas de Higgs, estemos en condiciones de crearlas dentro de unos pocos años, cuando el acelerador de alta energía LHC comience a funcionar.

No obstante, estamos casi seguros de que el mecanismo de Higgs se da en nuestro mundo, ya que es el único modo conocido de proporcionar masa a las partículas del modelo estándar. Es la única solución conocida a los problemas planteados en la sección anterior. Por desgracia, como nadie ha descubierto todavía la partícula de Higgs, aún no sabemos con precisión en qué consiste el campo (o los campos) de Higgs.

La naturaleza de la partícula de Higgs es uno de los asuntos sobre los cuales se discute más acaloradamente en la física de partículas. En esta sección, expondré el más sencillo de los muchos modelos que se presentan como candidatos —o sea, las posibles teorías que contienen diferentes fuerzas y partículas— y que muestra cómo funciona el mecanismo de Higgs. Independientemente de cómo resulte ser la auténtica teoría del campo de Higgs, ésta implementará el mecanismo de Higgs —la ruptura espontánea de la simetría de la fuerza débil y la concesión de masas a las partículas elementales— de la misma manera que el modelo que ahora mismo voy a presentar.

En este modelo, un par de campos experimentan la fuerza débil. Más adelante resultará útil pensar que estos dos campos de Higgs, que están sujetos a la fuerza débil, son portadores de cargas de ésta. La terminología del mecanismo de Higgs es a veces poco rigurosa, ya que a veces el término *Higgs* se refiere a los dos campos juntos y otras veces a uno de los campos individuales (y a menudo también a las partículas de Higgs que esperamos encontrar). Aquí distinguiré entre ambas posibilidades y me referiré a cada uno de los campos como Higgs_1 y Higgs_2 .

Tanto Higgs_1 como Higgs_2 tienen capacidad de producir partículas. Pero también pueden asumir valores no nulos aunque no haya ninguna partícula presente. Hasta este momento no habíamos encontrado estos valores distintos de cero para un campo cuántico. De momento, aparte del campo eléctrico y el magnético, hemos considerado solamente campos cuánticos que crean o destruyen partículas, pero que toman el valor cero en ausencia de partículas. Pero los campos cuánticos pueden tener también valores no nulos, como los campos eléctrico y magnético clásicos. Y según el mecanismo de Higgs, uno de los campos de Higgs toma un valor no nulo. Ahora veremos que este valor no nulo es en esencia el origen de las masas de las partículas[M17] .

Cuando un campo toma un valor no nulo, el mejor modo de pensar en él es imaginar que el espacio manifiesta la carga que porta el campo, pero sin contener ninguna partícula de verdad. Habría que imaginarse que la carga que porta el campo está presente en todas partes. Es una pena, pero esta noción es muy abstracta porque el campo mismo es un objeto abstracto. Sin embargo, cuando el campo toma un valor no nulo, las consecuencias son

concretas: la carga que porta un campo no nulo existe en el mundo real.

Un campo de Higgs no nulo, en particular, distribuye la carga de la fuerza débil por todo el universo. Es como si el campo de Higgs que porta la fuerza débil pintara la carga de la fuerza débil por todo el espacio. Un valor no nulo de los campos de Higgs significa que la carga débil que porta $Higgs_1$ (o $Higgs_2$) está en todas partes, aunque no haya ninguna partícula presente. El mismo vacío, que es el estado del universo en el que no hay ninguna partícula presente, porta carga débil cuando uno de los dos campos de Higgs toma un valor no nulo.

Los bosones gauge débiles interactúan con esta carga débil del vacío, igual que lo hacen con cualquier otra carga débil. Y la carga que empapa el vacío bloquea a los bosones débiles cuando éstos tratan de comunicar fuerzas a largas distancias. Cuanto más lejos intentan llegar, más «pintura» encuentran. (Como la carga se extiende en realidad a lo largo de tres dimensiones, quizá sería preferible imaginarse una niebla de pintura).

El campo de Higgs desempeña un papel muy parecido al del agente de tráfico en la historia que abre el capítulo, restringiendo la influencia de la fuerza débil a distancias muy cortas. Cuando trata de comunicar la fuerza débil a partículas distantes, los bosones gauge portadores de la fuerza débil se topan con el campo de Higgs, que se interpone en su camino y los anula. Como Ike, que sólo podía viajar libremente alrededor de un radio de medio kilómetro a partir de su punto de partida, los bosones gauge débiles se mueven sin impedimentos sólo a una distancia muy corta, a la diez mil billonésima parte de un centímetro. Tanto los bosones gauge débiles como Ike pueden viajar libremente a distancias cortas, pero son interceptados a distancias más largas.

La carga débil en el vacío se encuentra dispersa de un modo tan sutil que en distancias cortas apenas hay rastro del campo de Higgs no nulo y la carga que éste lleva asociada. Los quarks, los leptones y los bosones gauge débiles viajan libremente a cortas distancias, casi como si no existiera la carga en el vacío. Los bosones gauge débiles pueden transmitir, por lo tanto, fuerzas a corta distancia, casi como si los dos campos de Higgs fueran cero.

Sin embargo, a distancias más largas, las partículas viajan más lejos y se encuentran, por lo tanto, con una cantidad más significativa de carga débil. La cantidad exacta que encuentran depende de la densidad de carga, que depende a su vez del valor del campo de Higgs no nulo. El viaje (y la transmisión de la fuerza débil) a largas distancias no es posible para los bosones gauge débiles, pues en las excursiones largas la carga débil del vacío se interpone en su camino.

Esto es exactamente lo que necesitábamos para explicar el sentido de los bosones gauge débiles. La teoría cuántica de campos dice que las partículas que viajan libremente a distancias cortas, pero que sólo muy rara vez viajan a largas distancias, tienen masa no nula. Los viajes interrumpidos de los bosones gauge débiles nos dicen que éstos actúan como si tuvieran masa, ya que los bosones gauge con masa sencillamente no llegan muy lejos. La carga

débil que empapa el espacio entorpece los viajes de los bosones gauge débiles, haciendo que se comporten exactamente como deberían hacerlo para concordar con lo que indican los experimentos.

Las cargas débiles en el vacío tienen una densidad que corresponde más o menos a las cargas que están separadas por una distancia de una diez mil billonésima de centímetro. Con esta densidad de carga débil, las masas de los bosones gauge débiles (los W cargados y el Z neutro) adoptan los valores que se han medido, de aproximadamente 100 GeV.

Y esto no es todo lo que el mecanismo de Higgs logra. Es el responsable también de las masas de los quarks y de los leptones, las partículas elementales constituyentes de la materia en el modelo estándar. Los quarks y los leptones adquieren masa de un modo muy parecido al de los bosones gauge débiles. Los quarks y los leptones interactúan con el campo de Higgs que está distribuido por todo el espacio y resultan, por lo tanto, obstaculizados por la carga débil del universo. Como los bosones gauge débiles, los quarks y los leptones adquieren su masa absorbiendo la carga de Higgs que está distribuida por todas partes en el espacio-tiempo. Sin el campo de Higgs, estas partículas tendrían también masa nula. Pero, una vez más, el campo de Higgs no nulo y la carga débil del vacío interfieren con el movimiento y hacen que las partículas tengan masa. El mecanismo de Higgs es necesario también para que los quarks y los leptones adquieran su masa.

Aunque el mecanismo de Higgs constituye una explicación del origen de las masas más elaborado de lo que uno estimaría necesario, es el único modo práctico que tienen los bosones gauge débiles de adquirir masa, según la teoría cuántica de campos. La belleza del mecanismo de Higgs radica en que proporciona masa a los bosones gauge débiles, cumpliendo a la vez la tarea que expuse al principio de este capítulo. El mecanismo de Higgs hace que parezca que la simetría de la fuerza débil se conserva a distancias cortas (lo que, según la mecánica cuántica y la relatividad especial, es equivalente a altas energías) pero se rompe a largas distancias (equivalentes a bajas energías). Rompe espontáneamente la simetría de la fuerza débil, y esta ruptura espontánea está en la base de la solución del problema de la masa de los bosones gauge. Este asunto más avanzado se explica en la sección siguiente (pero que el lector se sienta libre de saltarse esta parte y pasar directamente al capítulo siguiente si así lo desea).

La ruptura espontánea de la simetría de la fuerza débil

Hemos visto que la transformación de simetría interna asociada a la fuerza débil intercambiará todo lo que esté cargado con la fuerza débil ya que la transformación de simetría actúa sobre todo aquello que interactúe con los bosones gauge débiles. Así pues, la simetría interna asociada a la fuerza débil ha de actuar sobre los campos Higgs_1 y Higgs_2 , o sobre las partículas Higgs_1 y Higgs_2 que éstos crearían, y tratarlas como si fueran equivalentes, al igual que trata a los quarks up y down, que también experimentan la fuerza débil, como si fueran partículas intercambiables.

Si los dos campos de Higgs fueran cero, serían equivalentes e

intercambiables, y toda la simetría asociada a la fuerza débil se conservaría. Sin embargo, cuando uno de los dos campos de Higgs toma un valor no nulo, los campos de Higgs rompen espontáneamente la simetría de la fuerza débil. Si un campo es cero y el otro no, la simetría electrodébil, por la que $Higgs_1$ y $Higgs_2$ son intercambiables, se rompe.

Igual que la primera persona que escoge el vaso que tiene a su derecha o a su izquierda rompe la simetría entre izquierda y derecha en una mesa redonda, un campo de Higgs que tome un valor no nulo rompe la simetría de la fuerza débil que intercambia entre sí a los dos campos de Higgs. La simetría se rompe espontáneamente porque todo lo que rompe es el vacío, el estado real del sistema, el campo no nulo en este caso. No obstante, las leyes físicas, que permanecen inalterables, siguen conservando la simetría.

Una ilustración podría ayudar a transmitir cómo un campo no nulo rompe la simetría de la fuerza débil. La figura 58 muestra una gráfica con dos ejes, etiquetados como eje x y eje y. La equivalencia de los dos campos de Higgs es como la equivalencia de los ejes x e y sin ningún punto dibujado. Si girásemos la gráfica de modo que los ejes quedasen intercambiados, la gráfica seguiría presentando el mismo aspecto. Esto es consecuencia de la simetría rotacional usual[M18] .

Obsérvese que si dibujo un punto en la posición $x = 0$, $y = 0$, esta simetría rotacional se conserva enteramente. Pero si pongo un punto que tenga una coordenada no nula, por ejemplo $x = 5$ e $y = 0$, la simetría rotacional ya no se conserva. Los dos ejes ya no son equivalentes pues el valor de x, pero no el valor de y, de este punto no es igual a cero[M19] .

El mecanismo de Higgs rompe espontáneamente la simetría de la fuerza débil de un modo parecido. Cuando los dos campos de Higgs son cero, la simetría se conserva. Pero cuando uno es cero y el otro no, la simetría de la fuerza débil se rompe espontáneamente.

FIGURA 58. Cuando se distingue el punto $x = 0$, $y = 0$, la simetría rotacional se conserva. Pero cuando se distingue $x = 5$, $y = 0$, se rompe la simetría rotacional.

Las masas de los bosones gauge débiles nos dicen el valor preciso de la energía a la que se rompe espontáneamente la simetría de la fuerza débil. Esa energía es 250 GeV, la escala de la energía débil, muy próxima a las masas de los bosones gauge débiles, el W^-, el W^+ y el Z. Cuando las partículas tienen una energía superior a 250 GeV, la simetría se rompe y los bosones gauge débiles actúan como si tuvieran masa. Con el valor correcto del campo de Higgs no nulo, la simetría de la fuerza débil se rompe espontáneamente al valor correcto de la energía y los bosones gauge débiles adquieren la masa correcta.

Las transformaciones de simetría que actúan sobre los bosones gauge débiles actúan también sobre los quarks y los leptones. Y resulta que estas transformaciones no dejarán las cosas como antes a menos que los quarks y los leptones no tengan masa. Esto significa que las simetrías de la fuerza

débil sólo se conservarían si los quarks y los leptones no tuvieran masa. Y como la simetría de la fuerza débil es esencial a altas energías, la ruptura espontánea de la simetría no sólo es precisa para las masas de los bosones gauge débiles, sino también para que los quarks y los leptones adquieran masa. El mecanismo de Higgs es el único camino para que las partículas fundamentales del modelo estándar adquieran su masa.

El mecanismo de Higgs funciona exactamente del modo preciso para asegurar que cualquier teoría que lo incorpore pueda tener bosones gauge débiles con masa (y también quarks y leptones con masa) y, sin embargo, haga las predicciones correctas sobre el comportamiento a altas energías. Concretamente, parece que la simetría se conserva para los bosones gauge débiles con alta energía (los que tienen una energía superior a 250 GeV), de modo que no hay predicciones incorrectas. A altas energías la simetría interna asociada con la fuerza débil sigue descartando la polarización problemática del bosón gauge débil, que causaría interacciones a un ritmo demasiado elevado. Pero a bajas energías, donde la masa es esencial para reproducir las interacciones a corta distancia de la fuerza débil medidas, la simetría de la fuerza débil se rompe.

Por esto es tan importante el mecanismo de Higgs. Ninguna otra teoría que asigne estas masas tiene estas propiedades. Otras posibles soluciones fallan a bajas a energías, donde la masa será incorrecta, o a altas energías, donde las interacciones se predecirán incorrectamente.

Gratificación

Hay un aspecto todavía más brillante del modelo estándar que no he explicado todavía. Aunque el campo de Higgs será importante en los próximos capítulos, este aspecto particular del mecanismo de Higgs no va a serlo. Sin embargo, es tan sorprendente y tan fascinante que merece la pena mencionarlo.

El mecanismo de Higgs nos ilumina sobre otras cosas, aparte de la fuerza débil. Sorprendentemente, también da ideas novedosas sobre el problema de por qué el electromagnetismo es tan especial. Hasta la década de 1960, nadie hubiera pensado que había todavía cosas por descubrir sobre la fuerza electromagnética, que había sido tan bien estudiada y comprendida durante más de un siglo. En la década de 1960, sin embargo, la teoría electrodébil que propusieron Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam mostró que, cuando el universo comenzó su evolución a altas temperaturas y energías, había tres bosones gauge débiles y además un cuarto bosón neutro independiente, con una fuerza de interacción distinta. El fotón, ubicuo e importante como es hoy, no figuraba en esta lista. Los autores de la teoría electrodébil dedujeron la naturaleza del cuarto bosón gauge débil a partir de pistas físicas y matemáticas que no voy a describir aquí.

Lo notable es que el fotón originalmente no era nada especial. De hecho, el fotón del que hablamos hoy es realmente una mezcla de dos de los cuatro bosones gauge originales. La razón por la que el fotón resultó distinguido es que se trata del único bosón gauge que interviene en la fuerza electrodébil que es inmune a la carga débil del vacío. La principal propiedad característica

del fotón es que éste viaja libre a través de la carga débil del vacío y que, por lo tanto, no tiene masa.

El desplazamiento del fotón, al contrario que el del bosón W y Z, no es obstruido por el valor no nulo del campo de Higgs. Esto es así porque, aunque el vacío porta carga débil, no porta carga eléctrica. El fotón, que transmite la fuerza electromagnética, interactúa sólo con los objetos que tengan carga eléctrica. Por esta razón, el fotón puede transmitir fuerza a largas distancias sin interferencias del vacío. Es, por lo tanto, el único bosón gauge que sigue sin masa incluso en presencia de un campo de Higgs no nulo.

La situación se parece mucho a los controles de velocidad contra los que Ike tenía que luchar (aunque hay que admitir que esta parte de la analogía es un poco más floja). Los controles de velocidad dejan pasar los coches insulsos sin que paguen multa. Los fotones, como los coches insulsos, con carga neutra, viajan siempre sin impedimentos.

¿Quién lo habría pensado? El fotón, esa cosa que los físicos pensaron durante años que entendían completamente, tiene un origen que sólo puede comprenderse en términos de una teoría más compleja que combina la fuerza débil y la fuerza electromagnética en una sola teoría. Esta teoría suele llamarse, consecuentemente, *teoría electrodébil* , y la simetría relevante correspondiente, *simetría electrodébil* . La teoría electrodébil y el mecanismo de Higgs son éxitos extraordinarios de la física de partículas. No sólo las masas de los bosones gauge débiles, sino también la relevancia del fotón quedan nítidamente explicadas dentro de este marco. Y por si esto fuera poco, nos permite comprender el origen de las masas de los quarks y de los leptones. Las ideas, bastante abstractas, que acabamos de encontrar, explican muy bien un abanico bastante amplio de propiedades de nuestro mundo.

Advertencia

El mecanismo de Higgs funciona magníficamente y proporciona a los quarks, a los leptones y a los bosones gauge débiles las masas que tienen, sin hacer predicciones sin sentido a altas energías, y además explican cómo surgió el fotón. Sin embargo, hay una propiedad esencial del mecanismo de Higgs que los físicos no comprenden todavía del todo.

La simetría electrodébil debe romperse en torno a los 250 GeV para dar a las partículas las masas que se han medido. Los experimentos muestran que las partículas con una energía superior a 250 GeV no parecen tener masa, mientras que las partículas con una energía por debajo de 250 GeV actúan como si la tuvieran. Sin embargo, la simetría electrodébil se romperá a los 250 GeV sólo si la propia partícula de Higgs (que a veces se llama el bosón de Higgs)[M20] tuviera más o menos esta masa (valiéndose nuevamente de $E = mc^2$); la teoría de la fuerza débil no funcionaría si la masa de Higgs fuera mucho mayor. Si la masa de Higgs fuera mayor, la ruptura de la simetría se produciría a una energía más alta y los bosones gauge débiles serían más pesados, contradiciendo así los resultados experimentales.

Sin embargo, en el capítulo 12 explicaré por qué el hecho de que la partícula

de Higgs sea ligera plantea un problema teórico importante. Los cálculos que tienen en cuenta la mecánica cuántica apuntan hacia una partícula de Higgs más pesada y los físicos no saben todavía por qué la masa de la partícula de Higgs es tan baja. Este dilema es clave a la hora de motivar nuevas ideas sobre la física de partículas y algunos de los modelos extradimensionales que consideraremos más adelante.

Incluso sin saber la naturaleza precisa de la partícula de Higgs ni la razón por la que ésta es tan ligera, el condicionante de la masa nos dice que el Gran Acelerador de Hadrones, que comenzará a funcionar en el CERN de Suiza esta misma década, habrá de descubrir una o más partículas nuevas cruciales. Sea lo que sea, lo que logre romper la simetría electrodébil ha de tener una masa más o menos coincidente con la masa de la escala débil. Y esperamos que el LHC descubra qué es. Cuando lo haga, este descubrimiento, de importancia capital, hará que nuestro conocimiento de la estructura subyacente de la materia avance de modo espectacular. Y también nos dirá cuál de las propuestas para explicar la partícula de Higgs es la correcta, si es que alguna lo es.

Pero antes de llegar a estas propuestas, miraremos una posible extensión del modelo estándar que fue sugerida basándose puramente en el interés por la simplicidad de la naturaleza. El próximo capítulo explora las partículas virtuales, cómo las fuerzas dependen de las distancias y el fascinante asunto de la *gran unificación* .

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•A pesar de la importancia de las simetrías para hacer las predicciones correctas sobre las partículas de alta energía, las masas de los quarks, de los leptones y de los bosones gauge débiles nos dicen que ha de romperse la *simetría de la fuerza débil* .

•Como tenemos que seguir prevenidos contra las predicciones falsas, la simetría de la fuerza débil tiene que conservarse, no obstante, a altas energías. Por lo tanto, la simetría de la fuerza débil ha de romperse sólo a energías bajas.

•La *ruptura espontánea de la simetría* se produce cuando todas las leyes físicas conservan una simetría, pero el sistema físico real no lo hace. Las simetrías rotas espontáneamente son simetrías que se conservan a altas energías, pero que se rompen a bajas energías. La simetría de la fuerza débil se rompe espontáneamente.

•El proceso mediante el cual se rompe espontáneamente la simetría de la fuerza débil es el *mecanismo de Higgs* . Para que el mecanismo de Higgs rompa espontáneamente la simetría de la fuerza débil, tiene que haber una partícula con una masa aproximadamente igual a la masa de la escala débil, que es 250 GeV (recuérdese que la relatividad especial relaciona la masa y la energía mediante la fórmula $E = mc^2$).

11

LAS ESCALAS Y LA GRAN UNIFICACIÓN:

LA RELACIÓN ENTRE INTERACCIONES A DIFERENTES DISTANCIAS Y ENERGÍAS

I hope someday you'll join us

And the world will live as one.

[Espero que un día os unáis a nosotros | y el mundo viva unido].

JOHN LENNON

Atenea solía pensar que ella era siempre la última en enterarse de las cosas interesantes. No había oído nada sobre las aventuras de Ike con su coche hasta pasado un mes desde que lo hubo comprado. Y no tuvo noticias de éstas porque él se las comentase directamente: se enteró a través de un amigo al que se las había contado el hermano del primo de Dieter, al que se las había contado el primo de Dieter, al que se las había contado Dieter.

Por este camino indirecto, llegó hasta Atenea la observación que había hecho Ike: «La influencia de las fuerzas depende de dónde estés». Este pronunciamiento, tan poco característico de él, confundió a Atenea, hasta que se dio cuenta de que el mensaje seguramente se había distorsionado por el camino. Después de reflexionar un rato, llegó a la conclusión de que la observación que en realidad habría hecho Ike sería: «El rendimiento de los Porsche depende del modelo de coche».

Vamos a ver que la frase que, en un principio, oyó Atenea es cierta. Este capítulo trata de cómo los procesos físicos que se producen entre partículas separadas una cierta distancia pueden estar relacionados con los que se producen a otras distancias y de por qué las magnitudes físicas, como la masa de una partícula o la fuerza de interacción, dependen de la energía de la partícula. Esta dependencia respecto de la energía y la distancia es, además, la clásica dependencia de las fuerzas con respecto a la distancia. Por ejemplo, clásicamente, la fuerza del electromagnetismo, como la de la gravedad, decrece en proporción al cuadrado de la distancia entre los objetos que interactúan (la ley del cuadrado del inverso). Pero la mecánica cuántica modifica esta dependencia respecto a la distancia influyendo sobre la propia fuerza de interacción, de modo que las partículas que están a distintas distancias (y con distintas energías) parecen interactuar con cargas distintas.

Las fuerzas se hacen más débiles o más fuertes dependiendo de las distancias como resultado de las *partículas virtuales* : partículas de vida breve que existen como consecuencia de la mecánica cuántica y del principio de

incertidumbre. Las partículas virtuales interactúan con los bosones gauge y alteran las fuerzas, de modo que su efecto depende de las distancias, algo muy parecido al proceso mediante el cual los amigos de Atenea distorsionaron el mensaje al transmitírselo de unos a otros.

La teoría cuántica de campos nos dice cómo se calcula el efecto de las partículas virtuales sobre la dependencia de las fuerzas con respecto a la distancia y la energía. Un triunfo de estos cálculos fue la explicación de por qué la fuerza fuerte es así de fuerte. Otra consecuencia importante fue la existencia potencial de una *gran teoría unificada* , en la que las tres fuerzas no gravitatorias, que son tan diferentes a bajas energías, se funden en una sola fuerza unificada a altas energías. Exploraremos estos dos resultados, así como las ideas y los cálculos de la teoría cuántica de campos en los que se basan.

Al leer los próximos capítulos, habrá que tener en mente lo muy dispares que son las escalas de energía que estamos discutiendo. La energía de unificación es aproximadamente mil billones de GeV, y la energía de la escala de Planck, en la que la gravedad se hace fuerte, es aproximadamente mil veces más grande. La energía de la escala débil, que es la energía a la que normalmente se realizan los experimentos, es tremendamente más pequeña: aproximadamente entre cien y mil GeV. La energía de la escala débil, comparada con la energía de unificación, es tan pequeña como el tamaño de una canica comparado con la distancia entre la Tierra y el Sol. Consecuentemente, a veces diré que la energía de la escala débil es baja aunque es una energía alta desde el punto de vista de los experimentos[84] , ya que es muchísimo más pequeña que la energía de unificación y también que la energía de la escala de Planck.

El enfoque de cerca y el de lejos

Las *teorías de campos efectivas* aplican la idea de las teorías efectivas sobre las que hablamos en el capítulo primero a la teoría cuántica de campos. Se concentran sólo en aquellas escalas de energía y de distancia que esperamos poder medir. La teoría de campos efectiva que se aplica a una escala de energía o de distancia determinada describe «efectivamente» aquellas energías o distancias que necesitamos tener en cuenta. Se concentra en aquellas fuerzas e interacciones que pueden darse cuando las partículas tienen esa energía determinada (o más baja)[85] e ignora todas las energías que son inaccesiblemente más altas. No reclama los detalles de los procesos físicos o de las partículas que surgen sólo a energías más altas de las que podemos alcanzar.

Una de las ventajas de una teoría de campos efectiva es que, aunque no conozcamos qué interacciones tienen lugar a distancias cortas, podemos de todos modos estudiar las cantidades que cuentan en las escalas que nos interesan. En realidad solamente necesitamos pensar en las magnitudes que, en principio, podemos detectar. Cuando mezclamos pintura, no necesitamos saber su estructura molecular detallada. Pero probablemente queramos saber las propiedades que percibimos fácilmente, como el color y la textura. Con esta información, aunque no sepamos la microestructura de la pintura,

podríamos clasificar las propiedades relevantes de las pinturas y predecir qué efecto presentarán las mezclas de las pinturas cuando las apliquemos al lienzo.

Sin embargo, si supiéramos la composición química de la pintura, las reglas de la física nos permitirían también deducir algunas de esas propiedades. Cuando estamos pintando (usando la teoría efectiva) no necesitamos esta información, pero sí que la encontraríamos útil si estuviéramos fabricando pintura (deduciendo los parámetros de la teoría efectiva a partir de una teoría más fundamental).

Análogamente, si no conocemos la teoría a corta distancia (alta energía), no seremos capaces de deducir magnitudes mensurables. Sin embargo, cuando conocemos los detalles a distancias cortas, la teoría cuántica de campos nos dice precisamente cómo relacionar entre sí las diferentes teorías efectivas que se aplican a las diferentes energías. Nos permite deducir las magnitudes de una de las teorías efectivas a partir de las magnitudes de otra.

El método para calcular cómo dependen las magnitudes de la energía y de la distancia, que fue desarrollado por vez primera por Kenneth Wilson en 1974, tiene un nombre caprichoso: el *grupo de renormalización* . Además de las simetrías, dos de las herramientas más poderosas de la física son el concepto de teoría efectiva y el grupo de renormalización, y ambos involucran procesos físicos con escalas de distancia o energía muy diferentes. La palabra *grupo* es un término matemático que se consolidó, aunque su origen matemático es bastante irrelevante.

Sin embargo, la palabra *renormalización* no es del todo mala. Se refiere al hecho de que a cada escala de distancias de interés, nos paramos un momento para orientarnos. Determinamos qué partículas y qué interacciones son relevantes para las energías concretas que nos interesan en ese momento. Y entonces aplicamos una nueva normalización —esto es, una nueva calibración— para todos los parámetros de la teoría.

El grupo de renormalización emplea ideas que son semejantes a las presentadas en el capítulo 2, en el que discutimos la viabilidad de interpretar una teoría de dimensión superior en un lenguaje de dimensión inferior y tratamos una teoría bidimensional que tenía una pequeña dimensión enrollada como si fuera solamente unidimensional. Cuando enrollábamos dimensiones, ignorábamos todos los detalles de lo que ocurría dentro de las dimensiones extras y suponíamos que podía describirse todo en términos de dimensión inferior. Nuestra nueva «normalización» era la descripción en dimensión cuatro, que podía usarse cuando nos concentrábamos en grandes distancias.

Podemos seguir un proceso muy parecido para deducir una teoría que se aplique a distancias largas a partir de cualquier teoría que sea apropiada para distancias cortas: decidir cuál es la distancia mínima que nos interesa y «limpiar» la física relevante a distancias más cortas. Un modo de hacer esto es determinar el valor medio de aquellas cantidades cuyos detalles determinarían una diferencia solamente en las distancias cortas que hemos decidido ignorar. Si tenemos un retículo lleno de puntos en una escala de

grises, literalmente haríamos la media de la densidad de gris de los puntos más pequeños para calcular la intensidad de gris que habría que dar a puntos más grandes, de modo que reprodujeran el mismo efecto que antes. Los ojos hacen esto automáticamente cuando vemos algo con una resolución borrosa.

Si podemos ver las cosas sólo con un nivel dado de precisión, no necesitamos saber qué pasa a escalas más reducidas para hacer cálculos útiles que relacionen las magnitudes mensurables. Nuestra línea de conducta más efectiva suele implicar la elección del «tamaño del punto» en la teoría, de modo que éste concuerde con nuestro nivel de precisión. De esta manera podemos desdeñar las partículas pesadas que nunca se producirán y las interacciones a corta distancia que nunca se darán. En su lugar, podemos concentrar los cálculos en las partículas e interacciones que son relevantes en la energía que podemos conseguir.

No obstante, si conocemos la teoría más precisa que rige a distancias más cortas, podemos usar esta información para calcular magnitudes en la teoría efectiva que nos interesa, o sea, la teoría efectiva con una resolución más baja. Al igual que ocurre con la escala de grises, cuando pasamos de una teoría efectiva con una determinada resolución a corta distancia, a otra con una resolución menos precisa, en esencia lo que hacemos es cambiar el «tamaño del punto» con el que decidimos analizar la teoría. El grupo de renormalización nos dice cómo calcular la influencia que podrían tener esas interacciones a corta distancia sobre las partículas en la teoría a largas distancias. Extrapolamos así los procesos físicos de una escala de distancia o de energía a otra.

Partículas virtuales

Los cálculos del grupo de renormalización hacen estas extrapolaciones teniendo en cuenta el efecto de los procesos de la mecánica cuántica y las *partículas virtuales* . Las partículas virtuales, consecuencia de la mecánica cuántica, son gemelas extrañas y fantasmales de las partículas reales. Irrumpen en el mundo y al momento se esfuman, durando sólo un suspiro. Las partículas virtuales tienen las mismas interacciones y las mismas cargas que las partículas físicas, pero disponen de energías que parecen estar mal. Por ejemplo, una partícula que se mueve muy rápido obviamente transporta mucha energía. Por el contrario, una partícula virtual puede tener una velocidad enorme y nada de energía. De hecho, las partículas virtuales pueden tener cualquier energía diferente de la energía que porta la correspondiente partícula física real. Si tuviera la misma energía, sería una partícula real, no una partícula virtual. Las partículas virtuales son un aspecto extraño de la mecánica cuántica que hay que tener en cuenta para llegar a las predicciones correctas.

¿Cómo pueden, entonces, existir estas partículas aparentemente imposibles? Una partícula virtual con su energía prestada no podría existir si no fuera por el principio de incertidumbre, que permite que las partículas tengan una energía incorrecta siempre y cuando esto ocurra durante un intervalo de tiempo tan corto que resulte imposible de medir.

El principio de incertidumbre nos dice que tardaríamos un tiempo infinito en

medir la energía (o la masa) con una precisión infinita, y que cuanto más dura una partícula, más precisa puede ser nuestra evaluación de su energía. Pero si la partícula tiene una vida corta y no es posible determinar su energía con una precisión infinita, esa energía puede diferir temporalmente de la de una partícula auténtica de más larga vida. De hecho, a causa del principio de incertidumbre, las partículas harán todo aquello que puedan hacer sin que las pillen. Las partículas virtuales no tienen escrúpulos y hacen lo que les parece cuando nadie las mira. (Un físico de Ámsterdam llegó a insinuar que eran holandesas).

Podemos imaginar que el vacío es un depósito de energía: las partículas virtuales son partículas que surgen del vacío, tomando prestada temporalmente parte de su energía. Existen de un modo fugaz y desaparecen de nuevo en el vacío, llevándose la energía que tomaron prestada. Esta energía podría volver a su lugar de origen o podría ser transferida a partículas situadas en algún otro punto.

El vacío de la mecánica cuántica es un sitio muy frecuentado. Aunque por definición en el vacío no hay nada, los efectos cuánticos producen un mar hormigueante de partículas y antipartículas virtuales que aparecen y desaparecen, y, aunque no son estables, también las partículas de larga vida están allí presentes. Todas las parejas partícula-antipartícula pueden, en principio, producirse, aunque eso sí, sólo para visitas cortas; tan cortas que resulta imposible verlas directamente. Pero a pesar de lo breve de su existencia, hemos de ocuparnos de las partículas virtuales ya que, no obstante, dejan su marca en las interacciones de las partículas de larga vida.

Las partículas virtuales traen consecuencias mensurables porque ejercen su influencia sobre las interacciones de las partículas físicas reales que entran y salen de una determinada región de interacción. Durante el breve lapso de su existencia, una partícula virtual puede viajar entre partículas reales antes de desaparecer y de pagar su deuda de energía al vacío. Las partículas virtuales actúan por ello como intermediarios que ejercen su influencia sobre las interacciones de las partículas estables de larga vida.

Por ejemplo, el fotón de la figura 47, intercambiado para generar la fuerza electromagnética clásica, era, de hecho, un fotón virtual. No tenía la energía de un auténtico fotón, pero tampoco la necesitaba. Sólo precisaba durar lo suficiente como para comunicar la fuerza electromagnética y hacer interactuar las partículas cargadas reales.

En la figura 59 se muestra otro ejemplo de partículas virtuales. Aquí, un fotón entra en una región de interacción, se produce una pareja virtual electrón-positrón y luego la pareja es absorbida en otro punto. En el sitio donde son absorbidas las partículas, emerge del vacío otro fotón que se lleva la energía que la pareja intermedia electrón-positrón había tomado prestada temporalmente. Vamos a investigar ahora una consecuencia notable de este tipo de interacción.

FIGURA 59. Un fotón físico real puede convertirse en un electrón virtual y un positrón virtual, que, a su vez, pueden convertirse de nuevo en un fotón. Esto queda ilustrado a la derecha con un diagrama de Feynman y a la izquierda

mediante un esquema.

Por qué la fuerza de interacción depende de la distancia

La intensidad de las fuerzas que conocemos depende de las energías y de las distancias que conciernen a las interacciones de las partículas, y las partículas virtuales desempeñan un papel en esta dependencia. Por ejemplo, la intensidad de la fuerza electromagnética es más pequeña cuando los dos electrones están más alejados entre sí. (Recuérdese que este decrecimiento propio de la mecánica cuántica se produce además de la dependencia clásica respecto a la distancia del electromagnetismo). Las consecuencias de las partículas virtuales y la dependencia en relación con la distancia de las fuerzas son reales; las predicciones teóricas y los experimentos concuerdan extraordinariamente bien.

La razón por la que las magnitudes de una teoría efectiva —la intensidad de las fuerzas o de las interacciones, por ejemplo— dependen de las energías y de la separación de las partículas implicadas resulta de una propiedad de la teoría cuántica de campos que el físico Jonathan Flynn llamó, con humor, el *principio de anarquía* [86] . El principio de anarquía surge de la mecánica cuántica, que nos dice que todas las interacciones entre partículas que pueden darse de hecho se darán. En la teoría cuántica de campos, todo lo que no está prohibido ocurrirá.

A cada proceso independiente mediante el cual interactúa un grupo determinado de partículas voy a llamarlo un camino. Un camino puede o no implicar partículas virtuales. Cuando incluya alguna de éstas, diré que ese camino es una *contribución cuántica* . La mecánica cuántica nos dice que todos los posibles caminos contribuyen a la intensidad neta de una interacción. Por ejemplo, las partículas físicas pueden convertirse en partículas virtuales, que pueden interactuar entre sí y luego volver a convertirse en otras partículas físicas. En un proceso así, las partículas físicas originales podrían volver a emerger o podrían transformarse en otras partículas físicas diferentes. Aunque las partículas virtuales no durarían el tiempo suficiente como para que nos sea posible verlas directamente, afectarían de todos modos el modo de interacción entre las partículas observables reales.

Intentar evitar que las partículas virtuales faciliten una interacción sería como decir un secreto a unos amigos y esperar que aquél no llegue a oídos de otro amigo determinado. Sabemos que más tarde o más temprano alguno de los amigos «virtuales intermedios» traicionará nuestra confianza y transmitirá el mensaje al otro amigo. Aunque ya le hubiéramos dicho el secreto a este último, el hecho de que los amigos virtuales discutan también el secreto con él influirá asimismo en su opinión sobre el asunto. De hecho, su opinión será el resultado neto de todo lo que ha hablado con los demás.

No sólo las interacciones directas entre partículas físicas, sino también las *interacciones indirectas* , las que implican partículas virtuales, desempeñan su papel a la hora de transmitir una fuerza. Al igual que la opinión del amigo está influida por todo el que habla con él, la interacción neta entre partículas

es la suma de todas las posibles contribuciones, incluidas las que provienen de las partículas virtuales. Y como la importancia de las partículas virtuales depende de las distancias implicadas, la intensidad de las fuerzas depende de la distancia.

El grupo de renormalización nos dice precisamente cómo calcular el impacto de las partículas virtuales en cualquier interacción. Todos los efectos de las partículas virtuales intermedias se van sumando, y esto refuerza o debilita las interacciones de un bosón gauge.

Las interacciones indirectas desempeñan un papel más importante cuando las partículas que interactúan entre sí están más separadas. Una distancia mayor es comparable al hecho de decir el secreto a más amigos «virtuales». Aunque uno no pueda estar seguro de que un amigo concreto vaya a traicionar la confianza puesta en él, cuantos más amigos sepan el secreto, mayor será la probabilidad de que alguno lo cuente. Siempre que exista un camino por el cual las partículas virtuales puedan contribuir a la intensidad neta de una interacción, la mecánica cuántica nos asegura que así lo harán. Y la aportación de las partículas virtuales que influye en esa intensidad depende de la distancia desde la que se transmite la fuerza.

Pero los cálculos reales del grupo de renormalización son todavía más astutos, ya que incorporan también las contribuciones de los amigos que hablan entre sí. Los caminos de un mensaje, a medida que va recorriendo los entresijos de una compleja burocracia, constituyen una analogía mejor de las contribuciones debidas a las partículas virtuales. Si una persona situada en la cima del escalafón envía un mensaje, éste llegará directamente. Pero alguien que se encuentre más abajo en el escalafón podría estar obligado a enviar previamente sus mensajes a los jefes, para que éstos los revisen. Si alguien que está en un nivel todavía más bajo envía un mensaje, quizá éste primero tenga que circular por más capas de papeleo antes de llegar, finalmente, a su destino. En este caso, en cada nivel los burócratas distribuirían el mensaje por su entorno antes de enviarlo a niveles más altos. El mensaje sólo se haría público una vez que hubiera alcanzado, finalmente, los escalones superiores. El mensaje que resultaría en este caso no sería, generalmente, igual que el original; por el contrario, sería el que quedaría después de haber sido filtrado a través de muchas capas de burocracia.

Si nos imaginamos que las partículas virtuales son burócratas y que un burócrata de nivel superior corresponde a una partícula virtual con más energía, un mensaje de alto nivel se comunicaría directamente, mientras que los de nivel inferior pasarían por muchas etapas. El vacío de la mecánica cuántica es la «burocracia» con la que se topa el fotón. Cada interacción es investigada a través de partículas virtuales intermedias con cada vez menos energía. Como en todo régimen burocrático, pueden producirse derivas en todos los niveles (o en todas las distancias). Algunos caminos sortearán los rodeos «burocráticos» impuestos por las partículas virtuales, mientras que otros habrán de contar con partículas virtuales que viajan a distancias cada vez más largas. Los contactos a más corta distancia (más alta energía) tropiezan con menos procesos virtuales que los que se producen a más larga distancia.

Sin embargo, hay una diferencia notable entre los procesos virtuales y un régimen burocrático. En un régimen burocrático, un mensaje determinado sigue un camino determinado, por muy complicado que éste sea. La mecánica cuántica, sin embargo, dice que puede haber muchos caminos. E insiste en que la intensidad neta de una interacción es la suma de las contribuciones de todos los posibles caminos que podrían recorrerse.

Consideremos un fotón que viaja de una partícula cargada a otra. Como puede convertirse en parejas de electrón-positrón sobre la marcha (véase la figura 60), la mecánica cuántica nos dice que algunas veces, efectivamente, así lo hará. Y las rutas con electrones y positrones virtuales debilitan la eficacia con la que el fotón transmite la fuerza electromagnética.

FIGURA 60. Corrección virtual de la dispersión electrón-positrón. Lectura de izquierda a derecha: un electrón y un positrón se anulan mutuamente y producen un fotón, que a su vez se escinde en una pareja virtual electrón-positrón, que entonces se anulan para dar un fotón, que a su vez se convierte en un electrón y un positrón. El electrón y el positrón virtuales intermedios debilitan así la intensidad de la fuerza electromagnética.

Y éste no es el único proceso cuántico que puede darse. Los electrones y los positrones virtuales mismos pueden emitir fotones, que pueden convertirse en otras partículas virtuales, y así sucesivamente. La distancia entre las dos partículas cargadas que intercambian el fotón determina cuántas interacciones de éstas tendrá el fotón mensajero con partículas en el vacío y cuán grande será el impacto de las interacciones. La intensidad de la fuerza electromagnética es el resultado neto de los muchos caminos que toma el fotón cuando se tienen en cuenta todos los rodeos burocráticos posibles, esto es, todos los procesos cuánticos en los que podrían participar partículas virtuales a distancias cortas o largas. Como el número de partículas virtuales que un fotón recorre depende de la distancia que recorre, la fuerza de interacción del fotón depende de la distancia entre los objetos cargados con los que interactúa.

Cuando se suman todas las contribuciones de todos los posibles caminos, el cálculo muestra que el vacío diluye el mensaje que el fotón transmite de parte del electrón. La explicación intuitiva de la disolución de la interacción electromagnética es que las cargas opuestas se atraen y las cargas iguales se repelen, y por lo tanto, como promedio, los positrones virtuales están más próximos al electrón que los electrones virtuales. Las cargas de las partículas virtuales debilitan, por ende, el impacto pleno de la fuerza eléctrica del electrón inicial. Los efectos cuánticos tamizan la carga eléctrica. Este tamizado de la carga eléctrica implica que la intensidad de la interacción entre un fotón y un electrón decrece con la distancia.

La auténtica fuerza eléctrica a largas distancias parece ser más pequeña que la fuerza eléctrica clásica a cortas distancias porque un fotón que transmite una fuerza a corta distancia toma con más frecuencia un camino que no involucra partículas virtuales. Un fotón que viaje a corta distancia no tendría que pasar a través de una gran nube debilitadora de partículas virtuales, que es lo que debería hacer un fotón que transmitiera una fuerza a una gran

distancia.

No sólo el fotón, sino todos los bosones gauge portadores de fuerza interactúan con las partículas virtuales en la marcha hacia su destino. Las parejas de partículas virtuales, la partícula y su antipartícula, surgen espontáneamente del vacío y son luego absorbidas por él, debilitando la intensidad neta de una interacción. Estas partículas virtuales abordan temporalmente al bosón gauge que transmite la fuerza y cambian la intensidad total de la interacción. Los cálculos prueban que la intensidad de la fuerza débil, así como la del electromagnetismo, decrece con la distancia.

Sin embargo, las partículas virtuales no siempre echan el freno a las interacciones. Sorprendentemente, a veces pueden también echarles una mano. A principios de la década de 1970, David Politzer, que entonces era estudiante de posgrado de Sidney Coleman (que fue el que propuso el problema) en Harvard, e independientemente David Gross y Frank Wilczek, discípulo suyo, por aquel entonces ambos en Princeton, y también Gerard ’t Hooft en Holanda, hicieron cálculos que probaban que la fuerza fuerte se comporta de un modo exactamente opuesto al de la fuerza eléctrica. Más que tamizar la fuerza fuerte a largas distancias y así debilitarla, las partículas virtuales en realidad acrecientan las interacciones de los gluones (las partículas que transmiten la fuerza fuerte), y tanto es así que la fuerza fuerte a largas distancias sigue mereciendo su nombre. Gross, Politzer y Wilczek ganaron el Premio Nobel de Física por sus penetrantes ideas sobre la fuerza fuerte.

La clave de este fenómeno está en los mismos gluones. Hay una gran diferencia entre los gluones y los fotones, y es que los gluones interactúan entre sí. Un gluón puede entrar en una región de interacción y convertirse en una pareja de gluones virtuales que afectan entonces a la intensidad de la fuerza. Estos gluones virtuales, como todas las partículas virtuales, existen sólo momentáneamente. Pero sus efectos se acumulan al aumentar la distancia, hasta que la fuerza fuerte es de verdad extraordinariamente fuerte. Y el resultado de un cálculo es que los gluones virtuales acrecientan de un modo drástico la intensidad de la fuerza fuerte cuando las partículas están más distantes. La fuerza fuerte es mucho más intensa cuando las partículas están bastante separadas que cuando están muy juntas.

Comparado con el tamizado que sufre la carga eléctrica, el incremento de la fuerza fuerte con la distancia es un resultado muy poco intuitivo. ¿Cómo puede ser que una interacción se haga más fuerte cuando las partículas están más separadas? La mayoría de las interacciones amainan con la distancia. En realidad, necesitaríamos un cálculo para probar esto que decimos, pero en el mundo hay ejemplos de comportamientos de este tipo.

Por ejemplo, si alguien envía a través de un régimen burocrático un mensaje cuya importancia no comprende algún directivo intermedio, éste podría inflar lo que de otro modo no hubiera sido sino un memorándum más y convertirlo en una directriz de importancia capital. Una vez modificado el mensaje por el directivo intermedio, aquél tendrá un impacto muchísimo mayor que si hubiera sido comunicado directamente por el autor original.

La guerra de Troya es otro ejemplo en el que las fuerzas fueron más poderosas a larga que a corta distancia. Según la *Ilíada* , la guerra de Troya empezó cuando el príncipe troyano Paris decidió huir con Helena, la mujer de Menelao, rey de Esparta. Si Menelao y Paris hubieran peleado por Helena mano a mano antes de que estos últimos se fugaran a Troya, la guerra entre los griegos y los troyanos hubiera concluido sin llegar a convertirse en una epopeya. Cuando Menelao y Paris estuvieron lejos el uno del otro, ambos interactuaron con muchas personas y crearon las intensas fuerzas que participaron en las poderosísimas interacciones entre griegos y troyanos.

Aunque sorprendente, el crecimiento de las interacciones fuertes con la distancia es suficiente para explicar todas las propiedades características de la fuerza fuerte. Explica por qué la fuerza fuerte tiene la fuerza suficiente para mantener a los quarks empaquetados, formando protones y neutrones, y atrapados en los flujos: la fuerza fuerte aumenta tanto a larga distancia que una partícula que la experimenta no puede separarse demasiado de otras partículas con interacciones fuertes. Las partículas fundamentales con interacciones fuertes como los quarks nunca se encuentran aisladas.

Un quark y un antiquark muy separados acopiarían una enorme cantidad de energía, tanta que sería mucho más eficiente desde el punto de vista energético crear nuevos quarks y antiquarks físicos entre ellos que permitir que siguieran aislados. Si intentáramos separar todavía más el quark y el antiquark, se crearían del vacío nuevos quarks y antiquarks. Tal como sucede con el tráfico de Boston, donde uno no puede separarse mucho del coche que le precede sin que se le cuele un coche que surge de una bocacalle, esos nuevos quarks y antiquarks rondarían alrededor de los originales, de modo que ningún quark ni ningún antiquark individual estaría más aislado que al principio: siempre habría cerca de él otro quark u otro antiquark.

Como la fuerza fuerte a largas distancias es tan intensa que no permite a las partículas con interacciones fuertes permanecer aisladas entre sí, las partículas cargadas con la fuerza fuerte se encuentran siempre rodeadas por otras partículas cargadas, formando configuraciones de carga fuerte nula. Como consecuencia, nunca vemos quarks aislados. Sólo vemos hadrones fuertemente cohesionados y flujos.

La gran unificación

Los resultados de la sección anterior nos hablan de cómo dependen de la distancia las fuerzas fuerte, débil y electromagnética[M21] . En 1974, Georgi y Glashow insinuaron con atrevimiento que estas tres fuerzas cambian en función de la distancia y de la energía, de manera que resultan unificadas como una única fuerza a altas energías. A esta teoría la llamaron una *gran teoría unificada* (GUT, según sus siglas en inglés). Mientras que la simetría de la fuerza fuerte intercambia tres colores de quarks (como se discutió en el capítulo 7) y la simetría de la fuerza débil intercambia diferentes parejas de partículas, la simetría de la fuerza de la GUT actúa sobre todos los tipos de partículas del modelo estándar, quarks y leptones, y los intercambia[M22] .

Según la gran teoría unificada de Georgi y Glashow, en los primeros tiempos

de la evolución del universo, cuando la temperatura y la energía eran enormemente altas —la temperatura era superior a los cien billones de billones de grados Kelvin y la energía superior a mil billones de GeV—, la intensidad de cada una de las tres fuerzas era la misma y las tres fuerzas no gravitatorias estaban fundidas en una única fuerza, «La Fuerza».

Al evolucionar el universo, la temperatura bajó y la fuerza unificada se escindió en tres fuerzas distintas, cada una con una dependencia diferente con respecto a la energía, a través de la cual evolucionaron hacia las tres fuerzas no gravitatorias que conocemos hoy. Aunque las fuerzas empezaron como una sola fuerza, acabaron con intensidades de interacción muy diferentes a bajas energías a causa de las distintas influencias que las partículas virtuales ejercieron sobre cada una de ellas.

Las tres fuerzas serían como trillizos idénticos que se desarrollaran a partir de un único huevo fertilizado, pero que maduraran para producir tres individuos bastante diferentes. Uno de los trillizos podría ser ahora un cantante *punk* con una cresta de pelo teñido, otro un marine con el pelo rapado y el tercero un artista con una larga coleta. Compartirían, de todos modos, el mismo ADN y, de bebés, habrían sido casi indistinguibles.

En los primeros tiempos del universo, las tres fuerzas habrían sido también indistinguibles. Pero luego se habrían diferenciado mediante la ruptura espontánea de la simetría. Así como el mecanismo de Higgs rompió la simetría electrodébil y sólo dejó intacto el electromagnetismo, rompería también la simetría de la GUT y dejaría las tres fuerzas independientes que vemos hoy.

Una única intensidad de interacción a altas energías es un prerrequisito para una gran teoría unificada. Esto implica que las tres líneas que representan la intensidad de interacción como función de la energía deben coincidir a partir de un valor dado de la energía. Pero ya sabemos cómo varía la intensidad de las tres fuerzas no gravitatorias en función de la energía. Y como la mecánica cuántica nos dice que una distancia larga equivale a una energía baja y que una distancia corta equivale a una energía alta[87] , los resultados de la sección anterior pueden interpretarse igualmente en términos de la energía. A bajas energías, las fuerzas electromagnética y débil son menos potentes que la fuerza fuerte, pero se intensifican a energías más altas, mientras que la fuerza fuerte se debilita.

En otras palabras, las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias se van haciendo más equiparables a energías más altas. Podrían incluso converger hacia una intensidad común. Esto significaría que las tres líneas que representan la intensidad de interacción en función de la energía coinciden a altas energías.

Dos líneas que se encuentran en un punto no es un resultado tan fascinante: eso va a ocurrir de todos modos si las dos líneas se van aproximando. Pero que tres líneas se encuentren en un punto es una gran coincidencia o la prueba de algo más significativo. Si es verdad que las fuerzas convergen, su intensidad de interacción común podría ser una indicación de que hay sólo un

único tipo de fuerza a altas energías, y en ese caso tendríamos una teoría unificada.

Aunque la unificación sigue siendo hasta hoy una conjetura, la unificación de las fuerzas, si fuera cierta, sería un gran salto hacia una descripción más sencilla de la naturaleza. Al ser los principios de unificación tan intrigantes, los físicos estudiaron la intensidad de las tres fuerzas a altas energías para ver si convergen o no. Hacia 1974, nadie había calculado la intensidad de interacción de las tres fuerzas no gravitatorias con una gran precisión. Howard Georgi, Steven Weinberg y Helen Quinn (por aquel entonces, ayudante postdoctoral sin sueldo en Harvard, y, actualmente, física de plantilla en el Acelerador Lineal de Stanford y presidenta de la Sociedad Americana de Física) usaron las mediciones imperfectas que estaban entonces disponibles e hicieron un cálculo con el grupo de renormalización para extrapolar la intensidad de las fuerzas a altas energías. Descubrieron que las tres líneas que representan la intensidad de las fuerzas no gravitatorias parecían realmente convergir en un único punto.

El famoso artículo de Georgi y Glashow de 1974 sobre su teoría de la gran unificación comienza con estas palabras: «Presentamos una serie de hipótesis y de especulaciones que conducen sin remedio a la conclusión […] de que todas las fuerzas producidas por partículas elementales (la fuerte, la débil y la electromagnética) son diferentes manifestaciones de la misma interacción fundamental que involucra a una única intensidad de conexión. Nuestras hipótesis pueden ser erróneas y nuestras especulaciones absurdas, pero la unidad y la sencillez de nuestro esquema son razones suficientes para que sea tomado en serio»[88] . Quizá aquellas palabras no eran demasiado modestas. Sin embargo, Georgi y Glashow no pensaban realmente que la unidad y la sencillez constituyeran pruebas suficientes de que su teoría fuera una descripción correcta de la naturaleza. También querían que hubiera una confirmación experimental.

Aunque era preciso un tremendo acto de fe para extrapolar el modelo estándar a una energía diez billones de veces más grande que la que había sido explorada directamente hasta entonces, se dieron cuenta de que esa extrapolación tenía una consecuencia verificable. En su artículo, Georgi y Glashow explicaron que su GUT, su teoría de la gran unificación, «predice que el protón se desintegra» y que los físicos experimentales deberían intentar comprobar esta predicción.

La teoría unificada de Georgi y Glashow predecía que los protones no durarían siempre. Después de mucho tiempo, se desintegrarían. Esto no pasaría nunca en el modelo estándar. Los quarks y los leptones se distinguen normalmente entre sí por las fuerzas que experimentan. Pero en una gran teoría unificada, las fuerzas son todas esencialmente una misma fuerza. Así, al igual que un quark up puede convertirse en un quark down por efecto de la fuerza débil, un quark podría convertirse en un leptón por efecto de la fuerza unificada. Esto implica que, si la idea de la gran teoría unificada es correcta, el número total de quarks del universo no sería fijo y un quark podría convertirse en un leptón, haciendo que el protón, que está compuesto de tres quarks, se desintegre.

Como el protón puede desintegrarse en una gran teoría unificada que vincula los quarks a los leptones, toda la materia familiar sería, en definitiva, inestable. Sin embargo, la tasa de desintegración del protón es lentísima: su tiempo de vida superaría ampliamente la edad del universo. Esto implica que la señal de un protón que se desintegra, por vistosa que sea, tiene poquísimas posibilidades de ser detectada, ya que se produce muy rara vez.

Para encontrar pruebas de la desintegración del protón, los físicos tuvieron que diseñar experimentos en extremo complicados y de larga duración, que estudiaron una enorme cantidad de protones. De este modo, aunque es muy poco probable que cualquier protón concreto se desintegre, un gran número de protones incrementa mucho la posibilidad de que el experimento pueda detectar la desintegración de uno de ellos. Aunque la probabilidad de que nos toque la lotería es pequeña, sería mucho mayor si compráramos millones de billetes.

Los físicos diseñaron ciertamente este tipo de experimentos, complicados y a base de muchos protones; entre ellos está el proyecto Irvine/Michigan/Brookhaven (IMB), localizado en la mina Homestake, en Dakota del Sur, y el proyecto Kamiokande, una tina de agua y de detectores enterrados a un kilómetro de profundidad en Kamioka, Japón. Aunque la desintegración del protón es un proceso rarísimo, estos experimentos ya hubieran encontrado pruebas de él si la teoría de la gran unificación de Georgi y Glashow fuera correcta. Por desgracia para las ambiciones de la gran unificación, nadie ha descubierto hasta ahora esa desintegración.

Esto no descarta necesariamente la unificación. De hecho, gracias a medidas más precisas de las fuerzas, ahora sabemos que el modelo original propuesto por Georgi y Glashow es, casi con certeza, incorrecto, y que sólo una versión ampliada del modelo estándar puede unificar las fuerzas. Resulta que en esos modelos las predicciones sobre la vida del protón son más largas y por eso resultaría lógico que la desintegración del protón no haya sido detectada aún.

Todavía hoy no sabemos realmente si la unificación de las fuerzas es una verdadera propiedad de la naturaleza, y si es así, qué significa eso. Los cálculos muestran que la unificación podría darse en varios modelos que explicaré más adelante, entre los que se encuentran los modelos supersimétricos, los modelos extradimensionales de Hořava y Witten y los modelos extradimensionales arqueados que desarrollamos Raman Sundrum y yo. Los modelos extradimensionales son particularmente intrigantes porque podrían llevar a la gravedad al redil de la unificación y unificar de verdad las cuatro fuerzas conocidas. Estos modelos son también importantes porque en los modelos originales de unificación se suponía que no había nuevas partículas por descubrir que estuvieran por encima de la escala débil y que no fueran las que tienen masa en la escala de la teoría de la gran unificación[89] . Estos otros modelos demuestran que la unificación podría darse aunque hubiera muchas otras partículas que pudieran producirse solamente a energías que están por encima de la escala débil.

Sin embargo, por fascinante que pueda ser la unificación de las fuerzas, los físicos se encuentran actualmente divididos sobre sus méritos teóricos, según propugnen un planteamiento de la física que vaya de arriba hacia abajo o uno

que vaya de abajo hacia arriba. La idea de una teoría de la gran unificación encarna el planteamiento que va de arriba hacia abajo. Georgi y Glashow formularon una atrevida hipótesis sobre la ausencia de partículas con masa entre mil y mil billones de GeV y desarrollaron una teoría hipotética basada en esta suposición. La gran unificación fue el primer paso del debate de la física de partículas que continúa hoy con la teoría de cuerdas. Ambas teorías extrapolan las leyes físicas desde las energías efectivamente medidas hasta energías por lo menos diez billones de veces superiores. Georgi y Glashow se volvieron después escépticos sobre el planteamiento que va de arriba hacia abajo, que está representado por la teoría de cuerdas y por la búsqueda de la gran unificación. Desde entonces han vuelto sobre sus pasos y ahora se concentran en la física de bajas energías.

Aunque las teorías unificadas tienen algunos rasgos atractivos, no estoy realmente segura de que con su estudio se llegará a ideas correctas sobre la naturaleza. El intervalo de energías que hay entre lo que sabemos y lo que extrapolamos es enorme, y podemos imaginar muchas posibilidades para lo que puede ocurrir a medio camino. En todo caso, hasta que se descubra la desintegración del protón (o alguna otra predicción), si es que esto ocurre alguna vez, será imposible establecer con certeza si las fuerzas de verdad se unifican a altas energías. Hasta entonces, esta teoría permanecerá en el reino de las especulaciones grandiosas, pero teóricas.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•Las *partículas virtuales* son partículas que tienen la misma carga que las auténticas partículas físicas, pero que tienen energía que parece ser incorrecta.

•Las partículas virtuales existen sólo durante un breve lapso de tiempo; temporalmente, toman prestada energía del *vacío* , el estado del universo en el que no hay ninguna partícula.

•Las *contribuciones cuánticas* a los procesos físicos surgen de las partículas virtuales que interactúan con las partículas reales. Estas contribuciones de las partículas virtuales influyen en las interacciones de las partículas reales, apareciendo y desapareciendo, y actuando como intermediarias entre las partículas reales.

•El *principio de anarquía* nos dice que cuando se consideran las propiedades de una partícula, las contribuciones cuánticas han de tenerse siempre en cuenta.

•En una *teoría unificada* , una única fuerza de alta energía se convierte a bajas energías en las tres fuerzas conocidas que son distintas de la gravedad. Para que las tres fuerzas se unifiquen, han de tener la misma intensidad a altas energías.

12

EL PROBLEMA DE LA JERARQUÍA:

LA ÚNICA TEORÍA EFECTIVA DE LA FILTRACIÓN

The highway is for gamblers, better use your sense.

Take what you have gathered from coincidence.

[La carretera es para los jugadores, usa mejor tu sentido común. | Guarda lo que has reunido por casualidad].

BOB DYLAN

Ike Rushmore III tuvo un desgraciado fin cuando con su nuevo Porsche, resplandeciente, chocó contra una farola. Pero fue, sin embargo, feliz en el cielo, donde pudo jugar todo el tiempo. En su fuero interno, era un jugador.

Un día, el mismo Dios invitó a Ike a jugar con Él a un juego bastante extraño. Dios le dijo que escribiera un número de dieciséis cifras. Dios lanzaría el dado icosaédrico celestial. Mientras que el dado normal cúbico tiene seis caras, este dado tenía veinte caras, con los números del 0 al 9 escritos en ellas dos veces cada uno. Dios explicó que iba a lanzar el dado dieciséis veces y a construir así un número de dieciséis cifras, apuntando los resultados uno tras otro. Si Dios e Ike llegaban al mismo enorme número, o sea, si coincidían todas las cifras en el mismo orden, ganaría Dios. Y si los números no eran exactamente los mismos, o sea, si alguna de las cifras no coincidía, entonces era Ike quien ganaba.

Dios empezó a tirar. La primera cifra que salió fue el número 4. Coincidía con la primera cifra del número de Ike, que era el 4.715.031.495.526.312. Ike se sorprendió de que Dios acertase al tirar, ya que las posibilidades eran solamente una entre diez. No obstante, estaba seguro de que el segundo o el tercer número serían erróneos; la posibilidad de que Dios sacara los dos números correctamente uno tras otro era solamente una entre cien.

Dios lanzó el dado una segunda vez y luego una tercera. Sacó un 7 y después un 1, que también eran correctos. Siguió tirando hasta que, ante el asombro de Ike, hubo sacado las dieciséis cifras correctamente. La probabilidad de que esto ocurriera por azar era solamente una entre 10.000.000.000.000.000. ¿Cómo pudo ganar Dios?

Ike estaba un poco enfadado (en el cielo uno no se enfada mucho) y preguntó cómo pudo ocurrir algo tan ridículamente poco probable. Dios respondió sabiamente: «Yo soy el único que puede esperar ganar, ya que soy a la vez omnisciente y omnipotente. Sin embargo, como habrás oído, no me gusta

jugar a los dados».

Y después de esto apareció en una nube un cartel que decía «PROHIBIDO JUGAR». Ike estaba furioso (pero sólo un poco). No sólo había perdido la partida, sino que encima se había quedado sin derecho a jugar.

Al llegar a este punto, el lector habrá aprendido seguramente bastante sobre física de partículas y sobre algunos de los bonitos elementos teóricos con los que los físicos han construido el modelo estándar. El modelo estándar funciona muy bien al explicar muchos resultados experimentales diversos. Sin embargo, reposa incómodo sobre una base inestable que plantea un misterio profundo y significativo, cuya solución casi seguro nos llevará hacia nuevas ideas innovadoras sobre la estructura subyacente del universo. En este capítulo exploraremos ese misterio, conocido entre los físicos de partículas como el *problema de la jerarquía* .

El problema no es que las predicciones del modelo estándar no coincidan con los resultados experimentales. Las masas y las cargas asociadas con las fuerzas electromagnética, débil y fuerte han sido comprobadas con una precisión increíble. Los experimentos realizados en el CERN, en el SLAC y en el Fermilab han confirmado todos con precisión exquisita las predicciones del modelo estándar sobre las interacciones y las tasas de desintegración de las partículas conocidas. Y las intensidades de las fuerzas del modelo estándar tampoco plantean ningún misterio significativo. De hecho, las relaciones que hay entre ellas son muy sugerentes y sustentan la idea de una gran teoría unificada. Además, el mecanismo de Higgs explica perfectamente cómo el vacío rompe la simetría electrodébil y proporciona masas a los bosones gauge W y Z, así como a los quarks y a los leptones.

Sin embargo, hasta las familias en apariencia más idílicas pueden manifestar corrientes subterráneas de tensión cuando se las investiga más atentamente. Bajo un comportamiento muy bien coordinado y una apariencia armoniosa y feliz, puede ocultarse, al acecho, un secreto familiar devastador. El modelo estándar esconde un secreto de este tipo. Todo concuerda con las predicciones siempre y cuando asumamos sin espíritu crítico que la intensidad de la fuerza electromagnética, la de la fuerza electrodébil y las masas de los bosones gauge toman los valores que han sido medidos en los experimentos. Pero pronto veremos que el parámetro de masa (la masa de la escala débil que determina las masas de las partículas elementales), aunque muy bien medido, es diez mil billones de veces, o dieciséis órdenes de magnitud, más pequeño que la masa que los físicos esperarían obtener a partir de consideraciones teóricas generales. A cualquier físico que se hubiera puesto a calcular el valor de la masa de la escala débil basándose en una teoría para las altas energías, le habría salido un resultado completamente erróneo (y lo mismo le habría pasado con las masas de todas las partículas). La masa parece surgir por arte de magia. Este enigma, el problema de la jerarquía, es una brecha muy grande en nuestra comprensión de la física de partículas.

En la introducción expliqué el problema de la jerarquía, diciendo que consiste en la cuestión de por qué la gravedad es tan débil, pero ahora veremos que este problema puede replantearse como la cuestión de por qué la masa de la

partícula de Higgs, y por lo tanto las masas de los bosones gauge débiles, son tan pequeñas. Para que esas masas adopten los valores medidos, el modelo estándar tiene que apañárselas con una hipótesis que es tan improbable como si alguien ganara a Ike el juego de averiguar un número de dieciséis cifras elegido al azar. A pesar de sus muchos éxitos, el modelo estándar depende de este apaño sin escrúpulos para acomodar las masas de las partículas elementales conocidas.

Este capítulo explica este problema y por qué yo, y la mayor parte de los físicos que estudian las partículas, pensamos que es tan importante. El problema de la jerarquía nos dice que, sea lo que sea lo que produce la ruptura de la simetría electrodébil, seguramente será más interesante que el ejemplo de los dos campos de Higgs que presentamos en el capítulo 10. Todas las posibles soluciones involucran nuevos principios físicos, y la solución muy probablemente guiará a los físicos hacia partículas y leyes más fundamentales. El hecho de identificar qué es lo que desempeña el papel del campo de Higgs a la hora de romper la simetría electrodébil revelará algunos de los fenómenos físicos nuevos más ricos que tendremos la posibilidad de descubrir mientras yo viva. Es casi seguro que aparecerán nuevos fenómenos físicos a una energía de aproximadamente un TeV. Las comprobaciones experimentales de las hipótesis que compiten entre sí están ya al alcance de la mano, y dentro de una década se hará seguramente una revisión drástica de nuestra comprensión de las leyes físicas fundamentales que incorporará todo lo que se haya descubierto hasta entonces.

El problema de la jerarquía nos dice que antes de extrapolar la física a energías extremadamente altas por lo menos tenemos que prestar atención a un problema urgente que se plantea para bajas energías. Durante prácticamente los últimos treinta años, los físicos de partículas han estado buscando la estructura que predice y protege la escala de la energía débil, la energía relativamente baja a la que se rompe la simetría electrodébil. Pienso, al igual que otras personas, que ha de haber una solución del problema de la jerarquía, que proporcionará una de las mejores claves para saber qué es lo que hay más allá del modelo estándar. Para comprender la motivación de algunas de las teorías que enseguida presentaré, es útil saber un poco sobre este problema, más bien técnico, pero muy importante. La búsqueda de su solución nos ha llevado ya a investigar nuevos conceptos físicos, como los que se explorarán en los capítulos posteriores, y la solución nos hará revisar casi seguro nuestros puntos de vista actuales.

Antes de examinar la versión más general del problema de la jerarquía, consideraremos primero el problema de la jerarquía en el contexto de una gran teoría unificada, que fue donde se reconoció el problema por primera vez y donde es un poco más sencillo de entender. Examinaremos luego el problema en su contexto más amplio (y más dominante) y veremos por qué se reduce, en definitiva, a la debilidad de la gravedad comparada con todas las demás fuerzas conocidas.

El problema de la jerarquía en una gran teoría unificada

Imaginemos que visitamos a un amigo muy alto y que descubrimos que aunque él mida 1,90, su querido hermano gemelo mide sólo 1,50. Esto sería

sorprendente. Todos esperaríamos que el amigo y su hermano, con una estructura genética similar, tuvieran también una estatura parecida. Imaginemos ahora algo todavía más raro: vamos a casa de nuestro amigo y vemos que su hermano es diez veces más pequeño o diez veces más grande que él. Eso sí que sería raro de verdad.

No pensamos que las partículas deban tener todas las mismas propiedades. Pero, salvo que haya un buen motivo para ello, esperamos que las partículas que experimentan fuerzas parecidas sean, en cierto modo, parecidas. Esperamos, por ejemplo, que tengan masas comparables. Así como tenemos un buen motivo para esperar que los miembros de la misma familia tengan estaturas parecidas, los físicos de partículas tienen razones científicas válidas para esperar que las partículas de una misma teoría, como una gran teoría unificada, tengan masas parecidas. Pero en una gran teoría unificada las masas no son todas iguales: hasta las partículas que experimentan fuerzas parecidas han de tener masas enormemente diferentes. Y no con un mero factor de diez: la discrepancia entre masas es más bien del orden de un factor de diez billones.

El problema en una gran teoría unificada es que, aunque la partícula de Higgs que rompe la simetría electrodébil tenga que ser «ligera» —con una masa aproximadamente igual a la masa de la escala débil—, una gran teoría unificada emparenta a la partícula de Higgs con otra partícula que interactúa mediante la fuerza fuerte. Y esa nueva partícula de la gran teoría unificada tiene que ser extremadamente pesada, con una masa aproximadamente igual a la masa de la escala de la gran teoría unificada. En otras palabras, dos partículas que supuestamente están relacionadas por una simetría (la simetría de la fuerza de la gran teoría unificada) han de tener masas enormemente diferentes.

Las dos partículas, diferentes pero relacionadas entre sí, deben aparecer juntas en una gran teoría unificada porque la fuerza débil y la fuerza fuerte tendrían que ser intercambiables a altas energías. Ésa es la idea que hay detrás de una teoría unificada: todas las fuerzas serían, en definitiva, una misma fuerza. Así que cuando la fuerza fuerte y la fuerza débil están unificadas, toda partícula que experimenta la fuerza débil, incluida la partícula de Higgs, debe de estar emparentada con otra partícula que experimenta la fuerza fuerte y que tiene interacciones similares a las de la partícula de Higgs original. Sin embargo, hay un problema muy grave con esta nueva partícula.

Esta partícula con carga fuerte emparentada con la partícula de Higgs puede interactuar simultáneamente con un quark y con un leptón y, por lo tanto, permitir que el protón se desintegre, incluso más rápidamente de lo que una gran teoría unificada prevería en otro caso. Para evitar una desintegración demasiado rápida, la partícula que interactúa fuertemente —que debe intercambiarse entre dos quarks y dos leptones para que se produzca la desintegración del protón— tiene que ser extremadamente pesada. El límite admitido del tiempo de vida del protón nos dice que la pareja de Higgs con carga fuerte, si existe en la naturaleza, ha de tener una masa de tamaño similar a la masa de la escala de la gran teoría unificada, aproximadamente mil billones de GeV. Si esta partícula existiera pero *no* fuera así de pesada,

nosotros y este libro nos desintegraríamos antes de que acabásemos de leer esta frase.

Sin embargo, ya sabemos que la partícula de Higgs débilmente cargada tiene que ser ligera (de unos 250 GeV) para proporcionar a los bosones gauge débiles las masas que han sido determinadas en los experimentos. Así que los imperativos experimentales nos dicen que la masa de la partícula de Higgs ha de ser tremendamente diferente de la masa de la pareja de Higgs que experimenta la fuerza fuerte. La partícula de Higgs con carga fuerte, que se supone que tiene interacciones muy parecidas a las de la partícula de Higgs con carga débil en una teoría unificada, debe de tener una masa muy diferente, porque, si no, el mundo no sería como lo vemos. La enorme discrepancia entre las dos masas —una es diez billones de veces la otra— es muy difícil de explicar, especialmente en una teoría unificada en la que se supone que ambas, la partícula de Higgs con carga débil y la partícula de Higgs con carga fuerte, tienen interacciones similares.

En casi todas las teorías unificadas, la única manera de hacer que una partícula sea pesada y la otra ligera consiste en introducir un factor de apaño muy grande. Ningún principio físico predice que las masas tengan que ser tan diferentes; un número elegido con mucho cuidado es el único modo de hacer que las cosas funcionen. Ese número debe tener trece cifras exactas, porque, si no, el protón se desintegraría o las masas de los bosones gauge débiles serían demasiado grandes.

Los físicos de partículas llaman al apaño necesario *afinación precisa* (*fine-tuning* en inglés). Una afinación precisa consiste en ajustar el parámetro para obtener exactamente el valor que queremos. Se usa la palabra *afinación* porque es como pellizcar una cuerda de piano para conseguir precisamente la nota correcta. Pero si quisiéramos conseguir una frecuencia de unos cientos de hertzios que fuera correcta con una precisión de trece cifras, tendríamos que escucharla durante diez mil millones de segundos —mil años— para comprobar que está bien. Una exactitud de trece cifras es difícil de lograr.

Podría hacer otras analogías de la afinación precisa, pero les aseguro que todas sonarían artificiales. Consideremos, por ejemplo, una gran empresa en la que una persona está encargada de los gastos y otra está encargada de los recibos. Imaginemos que nunca hablan entre ellas, pero que al final del año se supone que la empresa tiene que haberse gastado casi con toda precisión la cantidad con la que se ha abastecido, sin que sobre ni falte más de un euro, y que, de lo contrario, la empresa quiebra. Es un ejemplo artificial, claro que sí. Y hay un buen motivo para que sea así. Ninguna situación importante depende de la afinación precisa, nadie quiere que su destino (o el de su negocio) dependa de una coincidencia improbable. Y sin embargo casi todas las grandes teorías unificadas con una partícula de Higgs ligera tienen este problema de dependencia. Es muy poco probable que una teoría en la que las predicciones físicas dependen con tanta sensibilidad de un parámetro sea la respuesta definitiva.

Pero la única manera de conseguir una masa lo suficientemente pequeña para la partícula de Higgs en la más sencilla de las grandes teorías unificadas consiste en amañar la teoría. El modelo de la gran teoría unificada no ofrece

ninguna alternativa buena. Éste es un problema serio para la mayoría de los modelos que unifican las fuerzas en cuatro dimensiones, y muchos físicos, incluida yo misma, no están debido a esto seguros de la unificación de fuerzas.

Y el problema de la jerarquía se pone todavía peor. Aunque estuviésemos deseosos de aceptar sencillamente, sin ninguna explicación previa, que una partícula es ligera y la otra tremendamente pesada, nos buscaríamos problemas de todos modos con un efecto que se llama las *contribuciones de la mecánica cuántica* o, simplemente, las *contribuciones cuánticas* . Estas contribuciones cuánticas han de sumarse a la masa clásica para determinar la auténtica masa física que tendría la partícula de Higgs en el mundo real. Y esas contribuciones son, generalmente, mucho más grandes que la masa de unos pocos cientos de GeV que requiere la partícula de Higgs.

Permítanme avisar de que la discusión de la siguiente sección sobre las contribuciones cuánticas, basándose como lo hace en las partículas virtuales y en la mecánica cuántica, no va a ser intuitiva. No intentemos imaginarnos una situación clásica análoga; lo que vamos a considerar es un efecto puramente cuántico.

Contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs

El capítulo anterior explicaba por qué una partícula generalmente no puede viajar en el espacio sin que sufra cambios. Pueden aparecer y desaparecer partículas virtuales, e influir con ello en los caminos seguidos por la partícula original. La mecánica cuántica nos dice que siempre tenemos que sumar a cualquier magnitud física las contribuciones de todos esos caminos.

Ya hemos visto que esas partículas virtuales hacen que la intensidad de las fuerzas dependa de la distancia de un modo que ha sido medido y que concuerda muy bien con las predicciones. Los mismos tipos de contribución cuántica que producen la dependencia respecto a la energía de las fuerzas también influyen en el tamaño de las masas. Pero en el caso de la masa de la partícula de Higgs —al contrario de lo que pasa con la intensidad de las fuerzas—, no parece que las consecuencias de las partículas virtuales vayan a coincidir con lo que los experimentos exigen de la teoría. Parecen ser mucho más grandes.

Como la partícula de Higgs interactúa con partículas pesadas cuya masa es tan grande como la masa de la escala de la gran teoría unificada, algunos de los caminos que sigue la partícula de Higgs implican que el vacío expela una partícula virtual pesada y su antipartícula virtual, así como el hecho de que la partícula de Higgs se convierta temporalmente en esas partículas mientras viaja (véase la figura 61). Las partículas pesadas que surgen del vacío y se desvanecen en él influyen sobre el movimiento de la partícula de Higgs. Ellas son las responsables a las que hay que culpar de las enormes contribuciones cuánticas.

FIGURA 61. La contribución virtual a la masa de la partícula de Higgs proveniente de las partículas pesadas en una gran teoría unificada (GUT). La partícula de Higgs puede convertirse en partículas virtuales pesadas (con una

masa de la gran teoría unificada), que luego vuelven a convertirse, a su vez, en una partícula de Higgs. Esto se ilustra por medio de un esquema a la izquierda, y con un diagrama de Feynman, a la derecha.

La mecánica cuántica nos dice que si queremos determinar la masa que posee realmente la partícula de Higgs, debemos añadir esos caminos con partículas virtuales pesadas al único camino que no las tiene. El problema es que los caminos que contienen partículas virtuales pesadas generan contribuciones a la masa de la partícula de Higgs que son aproximadamente del mismo tamaño que las masas de las partículas pesadas de una gran teoría unificada: trece órdenes de magnitud más grandes que la masa deseada. Todas estas enormes contribuciones cuánticas de las partículas virtuales pesadas han de ser añadidas al valor clásico de la masa de la partícula de Higgs para conseguir el valor físico que aparecería al realizar una medición, que debería ser de aproximadamente 250 GeV si queremos obtener las masas correctas de los bosones gauge débiles. Eso significa que, aunque cada contribución individual de masa de la gran teoría unificada sea muy grande (trece órdenes de magnitud más grande de lo debido), cuando juntamos todas las enormes contribuciones a la masa, algunas de las cuales son positivas y otras resultan ser negativas, la respuesta sería aproximadamente 250 GeV. Con que haya una sola partícula virtual que interactúe con la partícula de Higgs, aparece inevitablemente un problema.

Si, como en el capítulo anterior, pensamos en que las partículas virtuales son como miembros de un régimen burocrático, podríamos identificarlos con funcionarios de la Oficina de Inmigración cuya tarea consiste en demorar las cartas de algunas personas sospechosas y que, en vez de hacer esto, examinan en detalle todas las cartas que les llegan. En vez de implantar un sistema de doble rasero en el que algunas cartas pasan rápidamente y otras se demoran, todas las cartas son tratadas igual. Análogamente, el mecanismo de Higgs requiere que la «burocracia» de las partículas virtuales mantenga unas partículas pesadas pero permita que otras, como la partícula de Higgs, sean ligeras. Sin embargo, por el contrario, como los funcionarios escrupulosos, los caminos cuánticos vinculados a las partículas virtuales otorgan contribuciones parecidas a todas las masas de las partículas. Así que habría que esperar que todas las partículas, incluida la partícula de Higgs, sean tan pesadas como la masa de la escala de la gran teoría unificada.

Sin una nueva física, el único camino (muy insatisfactorio) para sortear el problema de la masa excesivamente grande de la partícula de Higgs es suponer que su masa clásica toma precisamente el valor (que podría ser negativo) que cancelaría la gran contribución cuántica a su masa. Los parámetros de la teoría que determinan las masas tendrían que ser tales que al sumar todas las contribuciones saliera un número muy pequeño, aunque cada contribución individual sea enorme. En esto consiste la afinación precisa que mencioné en la sección anterior.

Esto es concebible, pero es en extremo improbable que suceda en la realidad. No es simplemente cuestión de amañar un poquito un parámetro para conseguir la masa correcta. El apaño es enorme, y enormemente preciso: algo menos de una precisión de trece cifras daría resultados espectacularmente incorrectos. Hablando claro, este extravagante apaño no es lo mismo que

querer medir con precisión alguna cantidad, como por ejemplo la velocidad de la luz. Normalmente, las predicciones cualitativas no dependen de que un parámetro tome un valor determinado u otro. Solamente un valor concordará con la cantidad precisa que se mide, pero el mundo no habría sido muy diferente si el parámetro hubiera tomado un valor ligeramente distinto. Si la constante de la gravitación de Newton (que determina la fuerza de la gravedad) tuviera un valor diferente en un 1%, nada habría cambiado de un modo trágico.

Con una gran teoría de la unificación, sin embargo, un pequeño cambio en un parámetro es suficiente para arruinar completamente las predicciones de la teoría, cuantitativa y cualitativamente. Las consecuencias físicas del valor de la masa de la partícula de Higgs que rompe la simetría electrodébil depende con una sensibilidad extraordinaria de un parámetro. Para prácticamente todos los valores de ese parámetro, no existiría la jerarquía entre la masa de la gran teoría unificada y la masa de la escala débil, y la estructura y la vida, que dependen de esta jerarquía, serían imposibles. Si ese parámetro variara su valor solamente un 1%, la masa de la partícula de Higgs sería demasiado grande. Las masas de los bosones gauge débiles, y también las masas de las otras partículas, serían entonces todas mucho más grandes, y las consecuencias del modelo estándar no tendrían nada que ver con lo que vemos.

El problema de la jerarquía y la física de partículas

La última sección presentaba un enorme misterio, el problema de la jerarquía en una gran teoría unificada. Pero el auténtico problema de la jerarquía es aún peor. Aunque las grandes teorías unificadas fueron las primeras en alertar a los físicos sobre el problema de la jerarquía, las partículas virtuales generarán de todos modos contribuciones demasiado grandes a la masa de la partícula de Higgs, incluso en una teoría que no tenga partículas con la masa de la gran teoría unificada. Hasta el modelo estándar es sospechoso.

El problema es que una teoría que consista en el modelo estándar combinado con la gravedad contiene dos escalas de energía sumamente diferentes. Una es la escala de la energía débil, la energía a la que se rompe la simetría electrodébil, que es 250 GeV. Cuando las partículas tienen energías que están por debajo de esa escala, los efectos de la ruptura de la simetría electrodébil son manifiestos, y los bosones gauge débiles y las partículas elementales tienen masa.

La otra energía es la energía de la escala de Planck, que es dieciséis órdenes de magnitud, o diez mil billones de veces, más grande que la energía de la escala débil: un enorme 10^{19} GeV. La energía de la escala de Planck determina la intensidad de las interacciones gravitatorias: la ley de Newton dice que la intensidad es *inversamente* proporcional al cuadrado de la energía. Y como la intensidad de la gravedad es pequeña, la masa de la escala de Planck (relacionada con la energía de la escala de Planck por $E = mc^2$) es grande. Una masa de la escala de Planck enorme es equivalente a una gravedad extremadamente débil.

Hasta ahora, la masa de la escala de Planck no ha aparecido en nuestras discusiones sobre la física de partículas porque la gravedad es tan débil que puede ignorarse sin consecuencias en la mayoría de los cálculos de la física de partículas. Pero ésta es precisamente la cuestión que los físicos de partículas quieren contestar: ¿por qué la gravedad es tan débil que podemos ignorarla en los cálculos de física de partículas? Otro modo de formular el problema de la jerarquía es preguntar por qué la masa de la escala de Planck es tan enorme: ¿por qué es diez mil billones de veces más grande que las masas que cuentan en las escalas de la física de partículas, todas ellas inferiores a unos cientos de GeV?

Para tener un patrón de comparación, consideremos la atracción gravitatoria entre dos partículas de poca masa, como una pareja de electrones. La atracción gravitatoria entre los dos electrones es aproximadamente cien millones de billones de billones de billones de veces más débil que el rechazo eléctrico entre ellos. Los dos tipos de fuerza serían equiparables sólo si los electrones fueran más pesados de lo que realmente son en un factor de diez mil millones de billones. Éste es un número enorme: es equiparable al número de veces que podríamos ir colocando sucesivamente la isla de Manhattan hasta los confines del universo observable.

La masa de la escala de Planck es muchísimo más grande que la masa del electrón y que la masa de todas las demás partículas que conocemos, y esto significa que la gravedad es muchísimo más débil que las otras fuerzas conocidas. Pero ¿por qué debería haber una discrepancia tan enorme entre las intensidades de la mayoría de las fuerzas? O equivalentemente, ¿por qué la masa de la escala de Planck debería ser tan enorme comparada con las masas de las partículas conocidas?

Para los físicos de partículas, la enorme desproporción entre la masa de la escala de Planck y la masa de la escala débil, un factor de aproximadamente diez mil billones, es duro de digerir. Este número es más grande que el número de minutos que han pasado desde el Big Bang; es más o menos mil veces el número de canicas que podemos alinear desde la Tierra hasta el Sol. ¡Es cien veces más grande que el déficit presupuestario de Estados Unidos expresado en centavos! ¿Por qué dos masas que describen el mismo sistema físico han de ser tan tremendamente diferentes?

Al que no sea un físico de partículas quizá le pueda parecer que este problema no es demasiado significativo considerado en sí mismo, aunque esos números sean de un tamaño descomunal. Al fin y al cabo, no tenemos por qué ser necesariamente capaces de explicarlo todo: esas dos masas podrían ser diferentes sencillamente porque sí, sin ningún motivo especial. Pero la situación es, de hecho, mucho más grave de lo que parece. No sólo está sin explicar la enorme desproporción entre las masas. En la sección siguiente veremos que, en la teoría cuántica de campos, cualquier partícula que interactúe con la partícula de Higgs puede participar en un proceso virtual que eleva la masa de la partícula de Higgs hasta un valor igual de grande que la masa de la escala de Planck, 10^{19} GeV.

De hecho, si pidiéramos a un físico de partículas honrado, conocedor de la

intensidad de la gravedad pero que no supiera nada sobre las masas calculadas de los bosones gauge débiles, que estimara la masa de la partícula de Higgs usando la teoría cuántica de campos, prevería un valor para la masa de la partícula de Higgs —y, por lo tanto, también para las masas de los bosones gauge débiles— que es diez mil billones de veces más grande. Esto es, concluiría a partir de sus cálculos que la proporción entre la masa de la escala de Planck y la masa de la partícula de Higgs (o la masa de la escala débil, que está determinada por la masa de la partícula de Higgs) estaría ¡mucho más próxima a uno que a diez mil billones! Su estimación de la masa de la escala débil estaría tan próxima a la masa de la escala de Planck que todas las partículas serían agujeros negros, y la física de partículas, tal como la conocemos, no existiría. Aunque no tendría ninguna previsión *a priori* del valor individual de la masa de la escala débil ni de la masa de la escala de Planck, podría usar la teoría cuántica de campos para estimar la proporción entre ambas, y llegaría a una conclusión completamente errónea, Aquí existe, claramente, una discrepancia enorme. La sección siguiente explica por qué.

Partículas energéticas virtuales

La razón por la que la masa de la escala de Planck interviene en los cálculos de la teoría cuántica de campos es sutil. Como hemos visto, la masa de la escala de Planck determina la intensidad de la fuerza gravitatoria. Según la ley de Newton, la fuerza gravitatoria es inversamente proporcional al valor de la masa de la escala de Planck, y el hecho de que la gravedad sea tan débil nos dice que la masa de la escala de Planck es enorme.

Generalmente, podemos ignorar la gravedad cuando hacemos predicciones en la física de partículas porque los efectos gravitatorios sobre una partícula con una masa de aproximadamente 250 GeV son completamente despreciables. Si necesitamos realmente tener en cuenta los efectos gravitatorios podemos incorporarlos de modo sistemático, pero normalmente no merece la pena. En capítulos posteriores explicaremos los contextos nuevos y muy diferentes en los que la gravedad de dimensión superior es fuerte y no puede ser despreciada. Pero en el modelo estándar convencional, de cuatro dimensiones, despreciar la gravedad es una práctica normal y justificable.

Sin embargo, la masa de la escala de Planck desempeña también otro papel: es el valor máximo de la masa que puede asumir una partícula virtual en un cálculo fiable de la teoría cuántica de campos. Si las partículas tuvieran más masa que la masa de la escala de Planck, el cálculo no sería digno de confianza, y la relatividad general no resultaría fiable y habría que reemplazarla por una teoría más general, como la teoría de cuerdas.

Pero cuando las partículas (y entre ellas, las partículas virtuales) tienen una masa que es inferior a la masa de la escala de Planck, la teoría cuántica de campos convencional debe de ser válida, y los cálculos basados en ella, dignos de confianza. Esto significa que un cálculo en el que aparezca un quark top virtual (o cualquier otra partícula virtual) con una masa casi igual a la masa de la escala de Planck sería de fiar.

El problema de la jerarquía es que la contribución de las partículas virtuales con una masa en extremo alta a la masa de la partícula de Higgs será casi tan

grande como la masa de la escala de Planck, que es diez mil billones de veces más grande que la masa de la partícula de Higgs que queremos, la que da la masa correcta de la escala débil y las masas correctas de las partículas elementales.

Si consideramos un camino, como el descrito en la figura 62, en el que la partícula de Higgs se convierte en una pareja de un quark top virtual y un antiquark top virtual, vemos que la contribución a la masa de la partícula de Higgs va a ser demasiado grande. De hecho, cualquier tipo de partícula capaz de interactuar con la partícula de Higgs podría aparecer como partícula virtual y tener una masa[90] próxima a la masa de la escala de Planck. Y el resultado de todos estos caminos posibles es la enorme contribución cuántica a la masa de la partícula de Higgs. La partícula de Higgs tiene que ser mucho más ligera.

FIGURA 62. Una contribución a la masa de la partícula de Higgs proveniente de un quark top virtual y un antiquark top virtual. La partícula de Higgs puede convertirse en un quark top virtual y un antiquark top virtual, y esto produce una enorme contribución a la masa de la partícula de Higgs.

En su estado presente, la física de partículas es como una teoría de la «filtración» demasiado efectiva. En economía no es difícil conseguir una jerarquía de la riqueza. La aplicación de la economía de la filtración nunca ha elevado demasiado el bienestar financiero de los pobres, si acaso justo hasta el nivel de las clases superiores. En física, por el contrario, la transferencia de riqueza es demasiado efectiva. Si una masa es grande, entonces las contribuciones cuánticas nos dicen que todas las masas de las partículas elementales han de ser casi igual de grandes. Todas las partículas terminan ricas en masa. Pero sabemos, gracias a nuestras mediciones, que las masas elevadas (la masa de la escala de Planck) y las masas bajas (las masas de las partículas) conviven en este mundo.

Sin modificar o generalizar el modelo estándar, la física de partículas puede conseguir una masa pequeña para la partícula de Higgs solamente a partir de un valor milagroso de su masa clásica. Ese valor ha de ser extremadamente grande —y posiblemente negativo—, de modo que pueda compensar de manera muy precisa las enormes contribuciones cuánticas. Todas las contribuciones a la masa han de sumar al final 250 GeV.

Para que esto ocurra, como en la teoría de la gran unificación que consideramos antes, la masa ha de ser un parámetro afinado con precisión. Y este parámetro sutilmente afinado habría de ser un apaño de un tamaño desmesurado pero a la vez sorprendentemente exacto, designado específicamente para proporcionar a la masa de la partícula de Higgs un valor neto pequeño. O bien la contribución cuántica proveniente de las partículas virtuales o bien la contribución clásica ha de ser negativa, y la una y la otra han de ser casi de la misma magnitud. La precisión de la afinación que se necesita, de dieciséis cifras exactas, es más exagerada que la necesaria para mantener un lápiz apoyado en equilibrio sobre su punta. Esto es tan improbable como que alguien le gane por casualidad el juego de averiguar el número a Ike.

Los físicos de partículas preferirían un modelo en el que no apareciera la afinación precisa que requiere el modelo estándar para asegurar a la partícula de Higgs una masa ligera. Aunque podríamos diseñar una afinación precisa en un acto de desesperación, detestamos esto. La afinación precisa es, casi seguro, un vergonzoso apaño que refleja nuestra ignorancia. A veces pasan cosas improbables, pero rara vez cuando uno quiere.

El problema de la jerarquía es el más urgente de los misterios a los que se enfrenta el modelo estándar. Para dar un giro positivo a las cosas, el problema de la jerarquía proporciona una pista sobre lo que desempeña el papel de la partícula de Higgs y rompe la simetría electrodébil.

Cualquier teoría que reemplazara a la teoría de los dos campos de Higgs debería acomodar naturalmente o predecir una escala de masa electrodébil baja: si no fuera así, no merecería siquiera la pena pensar en ella. Muchas teorías subyacentes son compatibles con los fenómenos físicos que vemos, pero muy pocas de ellas abordan el problema de la jerarquía e integran una partícula de Higgs ligera de un modo convincente que evite la afinación precisa. Mientras que la tarea de unificar las fuerzas es un aliciente teórico fascinante, aunque quizá poco sólido, de la física de altas energías, la tarea de resolver la jerarquía es una necesidad concreta que exige el progreso de la física de bajas energías. Lo que hace que este reto resulte más atractivo es que cualquier cosa relacionada con el problema de la jerarquía tendría consecuencias experimentales medibles en el Gran Acelerador de Hadrones, donde los físicos experimentales esperan hallar partículas con masas de entre 250 y 1.000 GeV. Sin estas partículas adicionales, no hay modo de soslayar el problema. Pronto veremos que las consecuencias experimentales de resolver el problema de la jerarquía podrían ser las compañeras supersimétricas o las partículas que viajan en dimensiones extras, sobre las que discutiremos más adelante.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•Aunque sepamos que el mecanismo de Higgs es el responsable de las masas de las partículas, el ejemplo conocido más sencillo que implementa el mecanismo de Higgs funciona solamente con un apaño muy grande. En la teoría más sencilla uno esperaría que las masas de los bosones gauge débiles y de los quarks fueran aproximadamente diez mil billones de veces más grandes de lo que son. El *problema de la jerarquía* es la cuestión de por qué esto no es así.

•El problema de la jerarquía surge de la discrepancia entre la pequeña masa de la escala débil y la enorme masa de la escala de Planck (véase la figura 63). Esta última masa es importante para la gravedad: el valor grande de la masa de la escala de Planck nos dice que la gravedad es muy débil. De modo que otra forma de plantear el problema de la jerarquía consiste en preguntar por qué la gravedad es tan débil, tan poco intensa en relación con las otras fuerzas no gravitatorias.

FIGURA 63. El problema de la jerarquía es la cuestión de por qué la energía de la escala de Planck es tan grande comparada con la energía de la escala débil.

•Cualquier teoría que resuelva el problema de la jerarquía será verificable experimentalmente, ya que tendrá necesariamente implicaciones experimentales en los aceleradores que operan a energías superiores a la de la escala débil. El Gran Acelerador de Hadrones explorará estas energías dentro de muy poco.

13

LA SUPERSIMETRÍA:

UN SALTO MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

You were meant for me.

And I was meant for you.

[Tú estabas hecha para mí. | Y yo estaba hecho para ti].

GENE KELLY (*Cantando bajo la lluvia*)

Nada más llegar Ícaro al cielo, lo llevaron a un seminario de instrucción en el que las autoridades explicaron las reglas de conducta que regían allí. Se enteró con gran sorpresa de que los grupos religiosos de derechas estaban esencialmente en lo cierto y de que los valores familiares eran, de hecho, una piedra angular en su nuevo entorno. Las autoridades habían establecido hacía mucho tiempo una estructura familiar tradicional basada en la separación de las generaciones y en la estabilidad de los matrimonios; alguien de la alta sociedad se casaría siempre con alguien de baja extracción, la persona encantadora se juntaría con el bicho extraño y la señorita del centro se casaría siempre con el golfo de barrio. Todos, incluso Ike, estaban de acuerdo con estas ordenanzas.

Pero Ike supo luego que la estructura social del cielo no había sido siempre tan segura. En un principio, unos peligrosos y enérgicos infiltrados habían amenazado los fundamentos jerárquicos de la sociedad. En el Cielo, sin embargo, casi todos los problemas pueden resolverse. Dios había enviado a cada uno un ángel de la guarda personal, y los ángeles y sus protegidos habían trabajado juntos heroicamente para alejar la amenaza que pesaba sobre la jerarquía y preservar el orden social que Ike podía ahora disfrutar.

Aun así, el cielo no estaba del todo a salvo. Resultó que los ángeles eran agentes independientes, sin ningún contrato que los vinculara a una generación determinada. Los volubles ángeles, que habían rescatado tan valientemente la jerarquía, amenazaban ahora con destruir los valores familiares del cielo. Ike estaba horrorizado. A pesar de los muy conocidos atractivos del cielo, a él este lugar le parecería un sitio sorprendentemente lleno de tensiones.

En la terminología física abundan las palabras que empiezan por «super». Tenemos superconducción, superenfriamiento, supersaturación, superfluidos, el Superacelerador Superconductor (el SSC, según sus siglas en inglés) —que habría sido el acelerador de mayor energía hoy si el Congreso no lo hubiera cancelado en 1993—, y la lista continúa. Así que es fácil imaginar la emoción

que se produjo cuando los físicos descubrieron que la misma simetría del espacio-tiempo tiene una versión más grande, una versión «super».

El descubrimiento de la *supersimetría* fue realmente sorprendente. En el momento en el que empezaron a desarrollarse las teorías supersimétricas, los físicos pensaban que conocían todas las simetrías del espacio y del tiempo. Las simetrías del espacio-tiempo son las simetrías más familiares que vimos en el capítulo 9, las cuales afirman que no podemos decir dónde estamos o hacia dónde miramos o qué hora es solamente basándonos en las leyes físicas. La trayectoria de un balón de baloncesto, por ejemplo, no depende del lado del campo en el que nos encontremos, ni de si jugamos en California o en Nueva York.

En 1905, con la llegada de la teoría de la relatividad, la lista de las transformaciones simétricas del espacio-tiempo se amplió para incluir las que cambian el vector velocidad (la rapidez y la dirección del movimiento). Pero los físicos consideraron que éstas clausuraban la lista. Nadie pensó que podría haber otras simetrías sin descubrir que involucraran el espacio y el tiempo. Dos físicos, Jeffrey Mandula y Sidney Coleman, formalizaron esta intuición en 1967 al probar que no podía haber más simetrías de este tipo. Sin embargo, ellos (y todos los demás) habían pasado por alto una posibilidad que se basaba en hipótesis no convencionales.

En este capítulo presentamos la *supersimetría* , una nueva transformación simétrica extraña que intercambia bosones y fermiones. Los físicos pueden ahora construir teorías que incorporan la supersimetría. Sin embargo, la supersimetría como una simetría de la naturaleza es todavía hipotética, ya que nadie ha descubierto todavía la supersimetría en el mundo que nos rodea. No obstante, los físicos tienen dos buenas razones para pensar que podría existir en el mundo.

Una razón es la supercuerda, que investigaremos con más detalle en el capítulo siguiente. La teoría de supercuerdas, que incorpora la supersimetría, es la única versión conocida de la teoría de cuerdas que está capacitada para reproducir las partículas del modelo estándar. Sin la supersimetría, la teoría de cuerdas no parece estar preparada para describir nuestro universo.

La segunda razón es que las teorías supersimétricas están capacitadas para resolver el problema de la jerarquía. La supersimetría no explica necesariamente el origen de la enorme desproporción entre la masa de la escala débil y la masa de la escala de Planck, pero sí que elimina las problemáticas enormes contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs. El problema de la jerarquía es un serio enigma en el que muy pocas propuestas de solución han sobrevivido después de su escrutinio experimental y teórico. Antes de que se presentaran las teorías extradimensionales como alternativas potenciales, la supersimetría era la única candidata que ofrecía una solución.

Como nadie sabe todavía si la supersimetría existe o no en el mundo externo, lo único que podemos hacer en este punto es evaluar las teorías candidatas y sus consecuencias. De este modo, cuando los experimentos alcancen energías más altas, estaremos preparados para descifrar cuál es realmente la teoría

física que yace bajo el modelo estándar. Echemos entonces un vistazo a lo que podríamos tener en el almacén.

Fermiones y bosones: una extraña pareja

En un mundo supersimétrico, toda partícula conocida está emparejada con otra —su compañera supersimétrica, conocida también como su *supercompañera* —, con la que se intercambia bajo la acción de una transformación supersimétrica. Una transformación supersimétrica convierte un fermión en su compañero bosón y un bosón en su compañero fermión. Vimos en el capítulo 6 que los fermiones y los bosones son tipos de partículas que se distinguen en la mecánica cuántica por su espín. Las partículas fermiónicas tienen espín semientero, mientras que las partículas bosónicas tienen espín entero. Los valores enteros del espín son números que pueden asumir los objetos normales que giran en el espacio, mientras que los valores semienteros son un rasgo peculiar de la mecánica cuántica.

Todos los fermiones de una teoría supersimétrica pueden transformarse en sus compañeros bosones y todos los bosones pueden transformarse en sus compañeros fermiones. La supersimetría es una propiedad de la descripción teórica de estas partículas. Si jugamos con las ecuaciones que describen cómo se comportan las partículas al hacer una transformación supersimétrica que intercambia bosones y fermiones, las ecuaciones terminarán, al final, siendo prácticamente las mismas. Las predicciones serían idénticas a las que haríamos antes de aplicar la transformación.

A primera vista, una simetría así desafía la lógica. Se supone que las transformaciones simétricas dejan los sistemas invariables. Pero las transformaciones supersimétricas intercambian partículas que son manifiestamente diferentes: fermiones y bosones.

Aunque uno nunca esperaría que una simetría mezclara cosas que son tan diferentes, varios grupos de físicos probaron, sin embargo, que esto era posible. En la década de 1970, físicos europeos y rusos[91] mostraron que una simetría podía intercambiar estas partículas diferentes y que las leyes de la física podían ser las mismas antes y después de que los bosones y los fermiones fueran intercambiados.

Esta simetría es un poco diferente de las simetrías previas que hemos considerado porque los objetos que intercambia claramente tienen propiedades diferentes. Pero la simetría puede, no obstante, existir si los bosones y los fermiones presentes coinciden en número. Como analogía, imaginemos un mismo número de canicas rojas y verdes de diferentes tamaños, con una canica de cada color en cada tamaño. Supongamos que estamos jugando con un amigo, y que nosotros tenemos las canicas rojas y él las verdes. Si las canicas estuvieran emparejadas exactamente, la elección de uno u otro color no nos daría ninguna ventaja. Sin embargo, si no hubiera el mismo número de canicas rojas y verdes de un mismo tamaño, el juego no sería equitativo. El escoger rojas o verdes traería sus consecuencias y el juego seguiría derroteros distintos si intercambiáramos los colores con el compañero. Para que haya una simetría, cada tamaño de canica debe

presentarse en color rojo y verde, y ha de haber el mismo número de canicas de cada color en cada tamaño dado.

Análogamente, la supersimetría es posible solamente si los bosones y los fermiones están exactamente emparejados. Se necesita el mismo número de partículas de tipo bosón y de partículas de tipo fermión. Y así como las canicas que había que intercambiar deberán tener el mismo tamaño, los bosones y los fermiones emparejados tienen que contar con la misma masa y la misma carga el uno y el otro, y sus interacciones han de estar controladas por los mismos parámetros. En otras palabras, cada partícula ha de tener su propia supercompañera con propiedades análogas. Si un bosón experimenta interacciones fuertes, lo mismo su compañero supersimétrico. Si hay interacciones en las que intervienen varias partículas, ha de haber las interacciones correspondientes en las que intervienen sus compañeras supersimétricas.

Una razón por la que a los físicos la supersimetría les parece tan fascinante es que, si se *descubre* en nuestro mundo, será la primera simetría nueva del espacio-tiempo que se descubra en casi un siglo. Por eso es «super». No voy a dar la explicación matemática, pero con sólo saber que la supersimetría intercambia partículas de espín diferente es suficiente para deducir una conexión. Como sus espines son diferentes, los bosones y los fermiones se transforman de modo diferente cuando giran en el espacio. Las transformaciones supersimétricas tienen que hacer intervenir el espacio y el tiempo para compensar esta distinción[M23] .

Pero no pensemos que esto implica que podamos representar gráficamente el comportamiento de una transformación supersimétrica concreta en el espacio físico. Incluso los físicos comprenden la supersimetría solamente en términos de su descripción matemática y de sus consecuencias experimentales. Y éstas, como veremos pronto, podrían ser espectaculares.

Superhistoria

El lector puede saltarse esta parte si así lo desea. Se trata de una sección histórica en la que no se presentará ningún concepto que resulte esencial más adelante. Pero el desarrollo de la supersimetría es una historia interesante, en parte porque muestra con precisión la versatilidad de las buenas ideas y la manera en la que a veces la teoría de cuerdas y la construcción de modelos establecen relaciones productivas y simbióticas. La teoría de cuerdas motivó la búsqueda de la supersimetría, y la supercuerda —la mejor candidata de la teoría de cuerdas a la hora de explicar el mundo real— fue identificada gracias a las ideas de la supergravedad, la teoría supersimétrica que incluye la gravedad.

El físico Pierre Ramond, de origen francés, presentó la primera teoría supersimétrica en 1971. No estaba trabajando con las cuatro dimensiones en las que pensamos que vivimos (o solíamos pensarlo), sino con dos: una de espacio y otra de tiempo. El objetivo de Ramond era encontrar un modo de incluir los fermiones en la teoría de cuerdas. Por motivos técnicos, la versión original de la teoría de cuerdas contenía sólo bosones, pero los fermiones son

esenciales para cualquier teoría que pretenda describir nuestro mundo.

La teoría de Ramond contenía la supersimetría bidimensional y evolucionó hacia la teoría de cuerdas fermiónica que desarrolló junto a André Neveu y John Schwarz. La teoría de Ramond fue la primera teoría supersimétrica que apareció en el mundo occidental: Gol'fand y Likhtman habían descubierto simultáneamente la supersimetría en la Unión Soviética, pero sus artículos quedaron ocultos para Occidente tras el Telón de Acero.

Como la teoría cuántica de campos de dimensión cuatro tenía unos cimientos mucho más sólidos que la teoría de cuerdas, la cuestión obvia era si la supersimetría es posible o no en dimensión cuatro. Pero como la supersimetría está entretejida intrincadamente en la estructura del espacio-tiempo, no era una tarea rutinaria generalizar las ideas de dos a cuatro dimensiones. En 1973, el físico alemán Julius Wess y el físico Bruno Zumino, nacido en Italia, desarrollaron una teoría supersimétrica en cuatro dimensiones. En la Unión Soviética, Dmitri Volkov y Vladimir Akulov dedujeron independientemente otra teoría supersimétrica en cuatro dimensiones, pero de nuevo otra vez la guerra fría se anticipó a cualquier intercambio de ideas.

Una vez que estos pioneros hubieron desarrollado una teoría supersimétrica de dimensión cuatro, más físicos empezaron a prestar atención a estas ideas. Sin embargo, el modelo de Wess-Zumino de 1973 no pudo acomodar todas las partículas del modelo estándar; nadie sabía todavía cómo incluir a los bosones gauge portadores de fuerza en una teoría supersimétrica de dimensión cuatro. Los teóricos italianos Sergio Ferrara y Bruno Zumino resolvieron este difícil problema en 1974.

En un viaje en tren de Cambridge a Londres, cuando acabábamos de participar en el Congreso de Cuerdas 2002, Sergio me contó que encontrar la teoría correcta habría sido un problema de solución imposible de no haber sido por el formalismo del superespacio, una generalización abstracta del espacio-tiempo que tiene *dimensiones fermiónicas* adicionales. El superespacio es un concepto extremadamente complicado y no intentaré describirlo ahora. El punto importante aquí es que este tipo de dimensión enteramente diferente —que no es una dimensión del espacio— desempeñó un papel crucial en el desarrollo de la supersimetría. Este instrumento puramente teórico sigue simplificando los cálculos de la supersimetría hoy día.

La teoría de Ferrara-Zumino enseñó a los físicos cómo incluir el electromagnetismo y las fuerzas débil y fuerte en una teoría supersimétrica. Sin embargo, las teorías supersimétricas no incluían todavía la gravedad. Así que la cuestión pendiente de una teoría supersimétrica del mundo era si podría incorporar o no esta fuerza que faltaba. En 1976, tres físicos, Sergio Ferrara, Dan Freedman y Peter van Nieuwenhuizen, resolvieron este problema construyendo la *supergravedad* , una complicada teoría supersimétrica que contiene la gravedad y la relatividad.

Lo interesante es que, mientras se formulaba la supergravedad, la teoría de cuerdas seguía su marcha independientemente. En uno de los desarrollos

teóricos claves de la teoría de cuerdas, Ferdinando Gliozzi, Joel Scherk y David Olive descubrieron una teoría de cuerdas estable como consecuencia de la teoría de cuerdas fermiónica que había desarrollado Ramond en colaboración con Neveu y Schwarz. La teoría de cuerdas fermiónica resultó contener un tipo de partícula que nadie había encontrado previamente, más que en las teorías de la supergravedad. La nueva partícula tenía propiedades idénticas a las del compañero supersimétrico del gravitón, que se conoce como *gravitino* , y esto es, en efecto, lo que resultó ser.

A causa del desarrollo concurrente de la supergravedad, los físicos se valieron de este elemento común de las dos teorías y lo investigaron, y pronto se dieron cuenta de que la supersimetría estaba presente en la teoría de cuerdas fermiónica. Y así nació la supercuerda.

Volveremos a la teoría de cuerdas y a la teoría de supercuerdas en el capítulo siguiente. Por ahora nos concentraremos en la otra aplicación importante de la supersimetría: sus consecuencias para la física de partículas y el problema de la jerarquía.

La generalización supersimétrica del modelo estándar

La supersimetría sería lo más económica posible si emparejase las partículas conocidas unas con otras. Sin embargo, para que esto fuera así, el modelo estándar debería contener el mismo número de fermiones y de bosones, pero no satisface este criterio. Esto nos dice que si el universo es supersimétrico, tiene que contener muchas nuevas partículas. De hecho, ha de contener por lo menos el doble de partículas que los físicos experimentales han observado hasta ahora. Todos los fermiones del modelo estándar, las tres generaciones de quarks y leptones, deben emparejarse con nuevos supercompañeros bosónicos que todavía no han sido descubiertos. Y los bosones gauge, las partículas que comunican las fuerzas, han de tener también supercompañeros.

En un universo supersimétrico, los compañeros de los quarks y de los leptones serían nuevos bosones. Los físicos, que disfrutan con una nomenclatura caprichosa (pero sistemática), los llaman *squarks* y *sleptones* . En general, el compañero supersimétrico bosónico de un fermión tiene el mismo nombre que el fermión, pero con una s al principio. Los electrones se emparejan con los *selectrones* , por ejemplo, y los quarks top con los *squarks stop* . Cada fermión tiene un supercompañero bosónico, su sfermión aliado.

Las propiedades de estas partículas y las de sus compañeras están rígidamente vinculadas las unas a las otras: las supercompañeras bosónicas tienen las mismas masas y cargas que sus contrapartidas fermiónicas, y también tienen interacciones relacionadas. Por ejemplo, si el electrón tiene carga –1, lo mismo el selectrón; y si el neutrino interactúa mediante la fuerza débil, lo mismo el sneutrino.

Si el universo es supersimétrico, los bosones también han de tener supercompañeros. Los bosones conocidos del modelo estándar son portadores de fuerza: el fotón, los W cargados, el Z y los gluones, todos los cuales tienen espín –1. La nomenclatura de la supersimetría dicta que los nuevos

supercompañeros fermiónicos tengan el mismo nombre que el bosón con el que están emparejados, con un «-ino» añadido al final. Así que los compañeros fermiónicos de las partículas gauge se llaman *gauginos* , los compañeros fermiónicos de los gluones son los *gluinos* y el compañero fermiónico de la partícula de Higgs es el *Higgsino* . Al igual que en el caso de los supercompañeros bosónicos, los supercompañeros fermiónicos tienen las mismas cargas, las mismas interacciones y —si la supersimetría es exacta— la misma masa que el bosón con el que están emparejados (véase la figura 64).

FIGURA 64. Las partículas y sus compañeras supersimétricas.

Podríamos pensar que es curioso que los físicos se tomen tan en serio la posibilidad de que exista la supersimetría, dado que nunca se ha encontrado un supercompañero. A veces me sorprende la confianza que muestran algunos de mis colegas en la existencia de la supersimetría. Pero aunque todavía no se ha descubierto la supersimetría en la naturaleza, hay varias razones que hacen sospechar su presencia.

Sergio Ferrara, uno de los primeros en trabajar en supersimetría, expresó la opinión de muchos físicos cuando, durante nuestro viaje en tren a Londres, me dijo que sería difícil creer que una construcción teórica tan sorprendente y fascinante no desempeñase un papel en la física del mundo.

Otros físicos, menos atrapados por la belleza de la simetría, creen en la supersimetría principalmente por los beneficios que aportan las generalizaciones supersimétricas del modelo estándar. Al contrario que las teorías que no son supersimétricas, aquéllas protegen la ligera partícula de Higgs y la jerarquía de las masas.

La supersimetría y el problema de la jerarquía

En el modelo estándar, el problema de la jerarquía consiste en la cuestión de por qué la partícula de Higgs es tan ligera. ¿Cómo puede haber una partícula de Higgs ligera cuando hay grandes contribuciones cuánticas a su masa provenientes de las partículas virtuales? Estas grandes contribuciones nos dicen que el modelo estándar funciona sólo si contiene un apaño monumental y desafortunado.

La gran ventaja de una generalización supersimétrica del modelo estándar es que, cuando hay contribuciones virtuales provenientes tanto de las partículas como de sus supercompañeras, la supersimetría garantiza la ausencia de las grandes contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs, las cuales hacían que pareciera tan improbable una partícula de Higgs ligera. Las teorías supersimétricas pueden tener solamente aquellas interacciones en las que las interacciones bosónicas y las fermiónicas están correlacionadas. Y a causa de las restricciones que esto impone, las teorías supersimétricas no tienen problemas con las grandes contribuciones cuánticas a las masas de las partículas.

En una teoría supersimétrica, las partículas virtuales del modelo estándar no son las únicas partículas virtuales que contribuyen a la masa de la partícula de Higgs. Las supercompañeras virtuales contribuyen también. Y a causa de

las notables propiedades de la supersimetría, los dos tipos de contribución siempre suman cero. Las contribuciones cuánticas de los fermiones y bosones virtuales a la masa de la partícula de Higgs se relacionan de un modo tan preciso que está garantizado que las grandes contribuciones hechas por los bosones o los fermiones individualmente se anulan las unas con las otras. El valor de la contribución de los fermiones es negativo y compensa exactamente la contribución de los bosones.

En la figura 65 se ilustra una de estas anulaciones; dicha figura muestra dos diagramas, uno con un quark top virtual y otro con un squark stop virtual. Cada uno de los diagramas individuales llevaría a una contribución grande a la masa de la partícula de Higgs. Pero a causa de la relación especial que hay entre las partículas y sus interacciones en las teorías supersimétricas, las enormes contribuciones cuánticas a la masa provenientes de los quarks top y de los squarks stop quedan eliminadas porque juntas suman cero.

FIGURA 65. En una teoría supersimétrica, la masa de la partícula de Higgs recibe contribuciones tanto de las partículas como de las partículas supersimétricas (en este caso, un quark top virtual y un quark antitop virtual en un diagrama, y un squark stop virtual y un squark antistop virtual en el otro). Los dos diagramas se representan de manera diferente porque las interacciones de los fermiones y de los bosones son diferentes. No obstante, las contribuciones a la masa de la partícula de Higgs de los dos diagramas se anulan la una a la otra cuando se suman juntas.

En una teoría que no sea supersimétrica, las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs destruirían la ruptura de la simetría electrodébil a bajas energías, a menos que un apaño improbable hiciera que todas las contribuciones grandes a la masa de la partícula sumaran en total un número muy pequeño. Pero una generalización supersimétrica del modelo estándar garantiza que todas las influencias potencialmente desestabilizadoras, como las que muestran los diagramas, juntas sumen cero. Un valor pequeño de la masa clásica de la partícula de Higgs garantiza que la masa verdadera —que incluye las contribuciones cuánticas— sea también pequeña.

La supersimetría procura unos cimientos estables y flexibles para el modelo estándar. Si nos imaginamos la afinación precisa del modelo estándar como el equilibrio necesario para mantener un lápiz apoyado sobre la punta, entonces la supersimetría es como un hilo fino que sujeta el lápiz en su sitio. Alternativamente, si pensamos en el problema de la jerarquía como en los funcionarios de la Oficina de Inmigración que cumplen con excesivo celo su función y que demoran muchas cartas, los compañeros supersimétricos son como los abogados de las libertades civiles que refrenan a los funcionarios y les obligan a tramitar la mayor parte de las cartas.

Como las contribuciones de las partículas virtuales normales unidas a las contribuciones de las compañeras supersimétricas suman cero, la supersimetría garantiza que las contribuciones cuánticas de las partículas virtuales no eliminan de la teoría a las partículas con poca masa. En una teoría supersimétrica, una partícula que se supone ligera, como la partícula de Higgs, seguirá siendo ligera aunque tengamos en cuenta las

contribuciones virtuales.

La ruptura de la supersimetría

Aunque la supersimetría resuelve en potencia el problema de las grandes contribuciones virtuales a la masa de la partícula de Higgs, hay un serio problema en la supersimetría tal como la he presentado hasta aquí. Claramente, el mundo no es supersimétrico. ¿Cómo iba a serlo? Si existieran supercompañeras con masa y carga idénticas a las de las partículas conocidas, ya las habríamos visto también. Pero nadie ha descubierto un selectrón o un fotino.

Esto no significa que tengamos que abandonar la idea de la supersimetría. Pero sí significa que la supersimetría, si es que existe en la naturaleza, no puede ser una simetría exacta. Como la simetría local que acompaña a la fuerza electrodébil, la supersimetría ha de romperse.

El razonamiento teórico muestra que la supersimetría puede romperse al no tener las partículas y sus supercompañeras masas idénticas; los pequeños efectos de la ruptura de la supersimetría pueden distinguirlas. La diferencia entre la masa de una partícula y la de su correspondiente supercompañera estaría controlada por el grado de ruptura de la supersimetría. Si la supersimetría se rompe sólo un poco, la diferencia de masa será pequeña, mientras que si se rompe mucho, la diferencia será grande. De hecho, la diferencia de masa entre las partículas y sus supercompañeras es un modo de describir cuán seriamente se rompe la supersimetría.

En casi todos los modelos de ruptura de la supersimetría, las masas de las supercompañeras son superiores a las masas de las partículas conocidas. Esto es una suerte, ya que el hecho de que las supercompañeras sean más pesadas que sus socias del modelo estándar es crítico para asegurar la consistencia de la supersimetría con las observaciones experimentales. Explicaría por qué no las hemos visto todavía. Las partículas más pesadas solamente pueden producirse a energías más altas y, si existe la supersimetría, a lo mejor los aceleradores no han conseguido aún el nivel de energía suficiente para producirlas. Como los experimentos han explorado energías de hasta unos cientos de GeV, el hecho de que no hayamos visto todavía supercompañeras nos dice que, si existen, tienen masas por lo menos de esa magnitud.

La masa específica que tiene que superar una supercompañera para haber eludido la detección depende de la carga y de las interacciones de esa partícula concreta. Así que para evitar ser detectadas, las partículas con interacciones más fuertes han de ser más pesadas que las que tienen interacciones más débiles. Los imperativos experimentales actuales en la mayoría de los modelos de ruptura de la supersimetría nos dicen que, en el caso de que exista la supersimetría, todas las supercompañeras han de tener una masa de al menos unos cientos de GeV para haber eludido la detección. Aquellas supercompañeras que están sujetas a la fuerza fuerte, como los squarks, han de ser todavía más pesadas, con masas de al menos mil GeV.

La ruptura de la supersimetría y la masa de la partícula de Higgs

Como hemos visto, las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs no son problemáticas en las teorías supersimétricas porque la supersimetría garantiza que suman cero. Sin embargo, acabamos de ver también que la supersimetría ha de romperse si ha de existir en el mundo real. Como en una teoría supersimétrica las supercompañeras no tienen la misma masa que sus socias del modelo estándar, las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs no están tan rígidamente equilibradas como lo están cuando la supersimetría es exacta. Así que, cuando se rompe la supersimetría, las contribuciones virtuales no se anulan entre sí del todo.

No obstante, mientras las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs no sean demasiado grandes, el modelo estándar puede arreglarse sin necesidad de afinación precisa o apaños. Incluso cuando se rompe la supersimetría —siempre que el efecto sea pequeño—, el modelo estándar puede contener una partícula de Higgs ligera. La supersimetría, aunque se rompa un poquito, es suficientemente poderosa para eliminar las contribuciones de masa del orden de la masa de la escala de Planck provenientes de las partículas virtuales. Si hay solamente un poco de ruptura de la supersimetría, no son necesarias las improbables y excepcionales compensaciones entre partículas.

Queremos que la ruptura de la supersimetría sea lo suficientemente pequeña como para que la diferencia de masa correspondiente a esa ruptura de la supersimetría entre las supercompañeras y las partículas del modelo estándar sea pequeña y no haya necesidad de apaños. Resulta que la contribución cuántica a la masa de la partícula de Higgs proveniente de una partícula virtual y de su supercompañera, aunque no sea cero, nunca será mucho más grande que la diferencia de masa correspondiente a la ruptura de la supersimetría entre la partícula y su supercompañera. Eso nos dice que la diferencia de masa entre todas las partículas y sus supercompañeras debería ser aproximadamente la masa de la escala débil. En ese caso, las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs serían también aproximadamente igual a la masa de la escala débil, que es más o menos la medida correcta para la masa de la partícula de Higgs.

Como las partículas conocidas del modelo estándar son ligeras, la diferencia de masa entre una supercompañera y una partícula del modelo estándar será comparable a la masa de la supercompañera. Por lo tanto, si la supersimetría resuelve el problema de la jerarquía, las masas de las supercompañeras no deberían ser mucho mayores que los aproximadamente 250 GeV de la escala débil.

Si las masas de las supercompañeras coinciden más o menos con la masa de la escala débil, la contribución cuántica a la masa de la partícula de Higgs no será muy grande. Al contrario que en el caso no supersimétrico, en el que las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs eran superiores a lo esperado en dieciséis órdenes de magnitud, de modo que era preciso un apaño intolerable para mantener una partícula de Higgs ligera, un mundo supersimétrico con masas correspondientes a la ruptura de la supersimetría de unos cientos de GeV generaría contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs no demasiado grandes.

La exigencia de que la partícula de Higgs y, por ende, las supercompañeras, no pesen mucho más que unos cientos de GeV (para que así no se introduzcan grandes contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs), junto con el hecho de que los experimentos ya han buscado supercompañeras con masas de aproximadamente unos 200 GeV, nos dice que si la supersimetría existe en la naturaleza y resuelve el problema de la jerarquía, entonces las compañeras supersimétricas han de tener masas de unos pocos cientos de GeV. Esto es muy emocionante porque insinúa que las pruebas experimentales de la existencia de la supersimetría podrían estar a la vuelta de la esquina y aparecer en los aceleradores de partículas en cualquier momento. Sólo sería suficiente incrementar un poco la energía del actual acelerador, el Tevatrón, para alcanzar las energías a las que podrían aparecer las supercompañeras.

El Gran Acelerador de Hadrones explorará este abanico de energías. Si no se descubre la supersimetría en el LHC, que buscará partículas con una masa de unos cientos de GeV, esto significará que las supercompañeras son demasiado pesadas para resolver el problema de la jerarquía y que habrá que descartar la solución de la supersimetría.

Pero si la supersimetría resuelve el problema de la jerarquía, será un regalo experimental caído del cielo. Un acelerador de partículas que explorase energías de más o menos un TeV (1.000 GeV) encontraría, además de la partícula de Higgs, multitud de compañeras supersimétricas de las partículas del modelo estándar. Veríamos gluinos y squarks, y también sleptones, winos (pronunciado «uinos»), el zino y el fotino. Las nuevas partículas tendrían todas las mismas cargas que las partículas correspondientes del modelo estándar, pero serían más pesadas. Con energía suficiente y suficientes colisiones, sería difícil que se nos escaparan estas partículas. Si la supersimetría es cierta, pronto la veremos confirmada.

La supersimetría: el peso de las pruebas

Esto nos deja con la cuestión primordial: ¿existe la supersimetría en la naturaleza? Bueno, el juicio continúa. Sin más hechos, cualquier respuesta es mera conjetura. En este momento tanto la defensa como la fiscalía tienen argumentos de peso a su favor.

Ya hemos mencionado dos de las razones más fuertes para creer en la supersimetría: el problema de la jerarquía y la supercuerda. Otra prueba irresistible a favor de la supersimetría es la unificación en potencia de fuerzas en las generalizaciones supersimétricas del modelo estándar. Como se discutió en el capítulo 11, la intensidad de interacción de las fuerzas electromagnética, débil y fuerte depende de la energía. Aunque Georgi y Glashow descubrieron en principio que las fuerzas del modelo estándar se unifican, mediciones más precisas de estas tres fuerzas mostraron que en el modelo estándar en realidad no funciona la unificación. Se ofrece una representación gráfica de las tres intensidades de interacción como función de la energía en el diagrama superior de la figura 66.

FIGURA 66. La gráfica de arriba representa las intensidades de las fuerzas

electromagnética, débil y fuerte en función de la energía en el modelo estándar. Las curvas se acercan las unas a las otras, pero no se encuentran en un punto. La gráfica de abajo representa las intensidades de las tres mismas fuerzas en función de la energía en la generalización supersimétrica del modelo estándar. La intensidad de las tres fuerzas es la misma a altas energías, lo que indica que las tres fuerzas podrían, de hecho, unificarse en una sola fuerza.

Sin embargo, la supersimetría introduce muchas partículas nuevas que interactúan a través de estas tres fuerzas. Esto cambia la dependencia respecto a la distancia (o respecto a la energía) de las fuerzas, ya que las compañeras supersimétricas también aparecen como partículas virtuales. Estas contribuciones cuánticas adicionales intervienen en el cálculo del grupo de renormalización e influyen en el modo en que la intensidad de interacción de las fuerzas electromagnética, débil y fuerte depende de la energía.

El diagrama inferior de la figura 66 muestra cómo la intensidad de las fuerzas depende de la energía cuando se incluye el efecto de las supercompañeras virtuales. Notablemente, con la supersimetría las tres fuerzas parecen unificarse con más precisión que nunca. Esto es más significativo que los intentos anteriores de unificación, porque ahora tenemos mediciones mucho mejores de la intensidad de interacción. La intersección de las tres curvas podría ser coincidencia. Pero también podría interpretarse como una prueba en apoyo de la supersimetría.

Otro aspecto bonito de las teorías supersimétricas es que contienen un candidato natural para la materia oscura. La materia oscura es la materia no luminosa que empapa el universo y que ha sido descubierta a través de su influencia gravitatoria. Aunque aproximadamente una cuarta parte de la energía del universo existe en forma de materia oscura, todavía no sabemos qué es eso[92] . Una partícula supersimétrica que no se desintegre y que tenga la masa y la intensidad de interacción adecuadas sería una candidata idónea para la materia oscura. Y, efectivamente, la partícula supersimétrica más ligera no se desintegra y podría tener la masa correcta y las interacciones correctas para ser la partícula de la que está compuesta la materia oscura. La supercompañera más ligera podría ser el fotino, el compañero del fotón. O, en el contexto extradimensional que consideraremos más adelante, podría ser el wino, el compañero del bosón gauge W.

Sin embargo, el caso de la supersimetría no es irrecusable. El argumento más fuerte contra la supersimetría es que ni la partícula de Higgs ni sus compañeras supersimétricas han aparecido todavía. Aunque el descubrimiento de las compañeras supersimétricas podría ser inminente, no está del todo claro por qué, si la supersimetría resuelve el problema de la jerarquía, no se han visto todavía. Los físicos experimentales han alcanzado energías de varios cientos de GeV. Aunque, ciertamente, las supercompañeras podrían ser un poco más pesadas, realmente no hay ninguna razón para ello. De hecho, cuanto más ligeras sean las supercompañeras, mejor desde el punto de vista de la resolución del problema de la jerarquía. ¿Por qué, si la supersimetría resuelve el problema de la jerarquía, no se han encontrado todavía las supercompañeras?

Desde el punto de vista teórico, la supersimetría no es del todo irresistible ya que quedan pendientes algunas cuestiones importantes sobre el proceso de su ruptura. Sabemos que tiene que romperse espontáneamente, pero, como en el caso del modelo estándar y la simetría de la fuerza débil, aún ignoramos qué partículas son las responsables. Se han insinuado muchas ideas fascinantes, pero todavía falta que alguien proponga una teoría completamente satisfactoria en dimensión cuatro.

La primera vez que oí hablar de la supersimetría, contemplada desde el punto de vista del constructor de modelos, ésta me dio la impresión de ser demasiado fácil. Parecía como si la supersimetría pudiera contener masas casuales sin interrelaciones, ya que las contribuciones cuánticas estaban ausentes. Aunque no supiéramos por qué aparecerían masas muy dispares, éstas no causarían ningún problema. Esto era descorazonador desde la perspectiva de un constructor de modelos, porque daba la impresión de que no había ninguna pista sobre la teoría subyacente, que estaba todavía sin determinar. Y era también bastante aburrido, ya que construir modelos no parecía presentar ningún reto.

Pero entonces oí hablar del *problema de los sabores* en la supersimetría, que nos dice que eso no es cierto; de hecho, es muy difícil hacer que funcionen los detalles de una teoría con ruptura de la supersimetría. El problema es un poco sutil, pero no obstante importante. El problema de los sabores es el obstáculo principal para que funcione una teoría sencilla con ruptura de la supersimetría. Todas las teorías nuevas de la ruptura de la supersimetría se concentran en este problema, y el capítulo 17 explicará por qué la ruptura de la simetría en dimensiones extras es una solución en potencia.

Recordemos que los sabores de los fermiones del modelo estándar son los tres fermiones diferentes de las tres generaciones diferentes que tienen cargas idénticas, pero masas distintas: el quark up, el quark con encanto y el quark top, o el electrón, el muón y el tau, por ejemplo. En el modelo estándar, la identidad de estas tres partículas no cambia. Por ejemplo, los muones nunca interactúan directamente con los electrones: interactúan sólo indirectamente mediante el intercambio de un bosón gauge débil. Aunque los muones pueden desintegrarse en electrones, esto es así únicamente porque la desintegración produce un neutrino muón y un antineutrino electrón también (véase la figura 53, p. 255). El muón nunca se convierte directamente en un electrón sin la emisión de los neutrinos asociados.

Los físicos expresamos esta identidad definida de un cierto tipo de leptones diciendo que se conserva el número de muones y el de electrones. Asignamos un número electrónico positivo al electrón y al neutrino electrón, y un número electrónico negativo al positrón y al antineutrino electrón. Y asignamos un número muónico positivo al muón y al neutrino muón, y un número muónico negativo al antimuón y al antineutrino muón. Si el número de muones y de electrones se conserva, un muón nunca podría desintegrarse en un electrón y un fotón, ya que partiríamos de un número positivo de muones y cero electrones, y terminaríamos con un número positivo de electrones y cero muones. Y, de hecho, nunca se ha visto este tipo de desintegración. Por lo que sabemos, el número de electrones y el de muones se conservan en todas las interacciones de partículas.

En una teoría supersimétrica, la conservación del número de electrones y de muones nos diría que, aunque un electrón y un selectrón pueden interactuar a través de la fuerza débil, como también pueden un muón y un smuón, un electrón nunca interactuaría directamente con un smuón. Si, por alguna razón, un electrón se emparejara con un smuón o un muón con un selectrón, se generarían interacciones que no se ven en la naturaleza, como, por ejemplo, que un muón se desintegrara en un electrón y un fotón.

El problema es que aunque estas *interacciones* que intercambian el sabor no ocurren en una teoría auténticamente supersimétrica, una vez que se rompe la supersimetría, nada garantiza que el número de muones y de electrones se conserve. Las interacciones supersimétricas en una teoría con ruptura de la supersimetría pueden cambiar el número de electrones y de muones, contradiciendo así lo que sabemos a partir de los experimentos. Esto es porque las supercompañeras bosónicas con masa carecen del fuerte sentido de identidad que poseen sus fermiones asociados. Las masas que tienen en una teoría supersimétrica permiten a las supercompañeras bosónicas mezclarse todas entre sí. No sólo un smuón, sino también un selectrón podría emparejarse con un muón, por ejemplo. Pero el emparejamiento de un selectrón y de un muón produciría todo tipo de desintegraciones que sabemos que no ocurren nunca. En cualquier teoría correcta de la naturaleza, las interacciones que cambian el número de muones o de electrones tendrían que ser muy débiles (o inexistentes), ya que ese tipo de interacciones no ha sido observado nunca.

Los quarks sufrirían problemas parecidos. El sabor del quark no se conservaría cuando se rompiera la supersimetría y conduciría a la peligrosa mezcla de generaciones que Ike temía en la historia que abría el capítulo. En la naturaleza sí se da una cierta mezcla de quarks, pero en mucho menor medida de lo que preverían las teorías de ruptura de la supersimetría.

Las teorías de ruptura de la supersimetría se enfrentan al formidable reto de explicar por qué estas interacciones que intercambian sabores no ocurren con mucha más frecuencia. Por desgracia para las teorías supersimétricas, la mayoría de ellas no son capaces de explicar la ausencia de efectos del intercambio de sabores. Esto es inadmisible: esas mezclas tienen que estar vetadas si queremos que las teorías correspondan a la naturaleza.

Si este problema nos parece oscuro, podemos consolarnos con el hecho de que muchos físicos al principio pensaron lo mismo y tampoco consideraron que el problema de los sabores en la supersimetría tuviera importancia. Simplificando enormemente, la disidencia se produjo a lo largo de una línea geográfica: los europeos no se preocuparon tanto como los americanos. Aquéllos de nosotros que habíamos dedicado ya varios años a pensar en el problema de los sabores en otros contextos sabíamos lo difícil que podría ser resolverlo. Pero muchos otros, en un primer momento, ignoraron las implicaciones del principio de anarquía y no vieron por qué había que preocuparse. De hecho, al volver del Congreso Internacional de Supersimetría que se celebró en Ann Arbor, Michigan, en 1994, David B. Kaplan, un físico maravilloso (y mi primer colaborador en los tiempos de la universidad) que está ahora en el Instituto de Teoría Nuclear de Seattle, me contó lo frustrado

que se sintió, después de explicar al público de allí la solución que proponía al problema de los sabores, cuando descubrió ¡la poca gente que había que pensaba que se trataba de un problema de primera línea!

Esto cambió muy rápidamente. La mayoría de la gente reconoce ahora la importancia del problema de los sabores. Es muy difícil encontrar teorías de la ruptura de la supersimetría que proporcionen todas las masas necesarias a las supercompañeras, sin comprometer por ello la identidad de las partículas. Cómo romper la supersimetría impidiendo, sin embargo, el intercambio de sabores es un desafío crucial, si la supersimetría está destinada a triunfar en la solución del problema de la jerarquía. La pérdida de la conservación del número de muones y de electrones (y de quarks) podría parecer técnico, pero es realmente la pesadilla de la ruptura de la supersimetría. Justamente es dificilísimo impedir que las supercompañeras se transformen unas en otras. Las simetrías en general son incapaces de impedirlo.

Así que volvemos otra vez a nuestro asunto: las teorías con simetría son elegantes, pero la simetría rota que describe el mundo que vemos debería ser igualmente elegante. ¿Cómo y por qué se rompe la supersimetría? Habremos completado el reto teórico de comprender las teorías supersimétricas sólo cuando tengamos un modelo competente de la ruptura de la simetría.

Esto no es lo mismo que decir que la supersimetría está necesariamente equivocada, ni tampoco que no tiene nada que ver con el problema de la jerarquía. Pero sí que significa, sin embargo, que se necesita un ingrediente adicional para que triunfen las teorías supersimétricas del mundo. Pronto veremos que el ingrediente extra podría ser las dimensiones extras.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•La *supersimetría* , esencialmente, duplica el espectro de partículas. Para cada bosón de la teoría, la supersimetría introduce un fermión acompañante, y para cada fermión, introduce un bosón acompañante.

•Los efectos cuánticos hacen difícil (sin la supersimetría) mantener la partícula de Higgs lo suficientemente ligera como para que funcione el modelo estándar. Hasta la llegada de las teorías extradimensionales, la supersimetría era el único camino para abordar este problema.

•La supersimetría no va a decirnos necesariamente por qué la partícula de Higgs es ligera, pero sí que aborda el problema de la jerarquía, posibilitando la suposición de que la partícula de Higgs sea una partícula ligera.

•Las grandes contribuciones virtuales que las partículas del modelo estándar y sus supercompañeras hacen a la masa de la partícula de Higgs suman cero. Así pues, una partícula de Higgs ligera no es problemática en una teoría supersimétrica.

•Aun cuando la supersimetría podría resolver el problema de la jerarquía, no puede ser exacta. Si lo fuera, las supercompañeras tendrían las mismas masas que las partículas del modelo estándar y ya habríamos encontrado pruebas experimentales de la supersimetría.

•Las *supercompañeras* , en caso de que existan, tienen que ser más pesadas que sus compañeras del modelo estándar. Como los aceleradores de altas energías sólo pueden producir partículas con masas hasta un cierto límite, podría ser que estos aceleradores no tengan todavía suficiente energía para producirlas. Esto podría explicar por qué todavía no las hemos visto.

•Una vez que se rompe la supersimetría, pueden ocurrir *interacciones que intercambian los sabores* . Éstos son procesos que transforman quarks o leptones en quarks o leptones de otra generación (esto es, que son más pesados o más ligeros) con las mismas cargas. Estos procesos son muy extraños: cambian la identidad de las partículas conocidas y ocurren muy raramente en la naturaleza. Pero la mayoría de las teorías de ruptura de la supersimetría predicen que deberían ocurrir con mucha frecuencia, mucha más que la que vemos en los experimentos.

14

ALLEGRO (MA NON TROPPO):

PASAJE PARA CUERDAS

I’ve got the world on a string.

[Tengo el mundo en una cuerda].

FRANK SINATRA

Dentro de mil años.

Ícaro Rushmore XLII estaba probando su nuevo dispositivo Alicxvr, modelo 6.3, que acababa de comprar en la red espacial. (El interés de Ícaro III por la velocidad y los aparatos había ido pasando, por lo visto, de generación en generación, durante muchas generaciones). El Alicxvr estaba diseñado para permitir al usuario visualizar cosas de todos los tamaños, de las más pequeñas a las más grandes. Ike estaba casi seguro de que todos sus amigos que habían comprado el Alicxvr probarían primero las posiciones del selector correspondientes a las cosas grandes, de muchos megapársecs, para poder ver el espacio exterior que hay más allá del universo conocido. Pero Ike pensó: «Sé igual de poco sobre lo que está pasando a distancias diminutas», y decidió, por el contrario, investigar una distancia minúscula.

Sin embargo, Ike era de los impacientes. Le fastidiaba tener que leer el grueso manual de instrucciones que acompañaba el aparato, así que decidió ponerse a manipularlo sin más. Ignorando alegremente el indicador rojo superpuesto sobre las etiquetas de las distancias más pequeñas, ajustó el selector en la posición de 10^{-33} cm y apretó el botón que decía «Ir».

Para su espanto, se encontró mareado en un territorio lleno de cuerdas, escarpado y que oscilaba de una manera desenfrenada. El espacio ya no era allí el fondo anónimo y apacible al que estaba acostumbrado. Por el contrario, en algunos sitios bailaba rápidamente, mientras que en otros formaba secciones puntiagudas o se alejaba formando lazos que se esfumaban y volvían luego a salir a la superficie. Desesperadamente, Ike buscó a tientas el botón de parar y mal que bien, consiguió apretarlo a tiempo para volver a la situación normal, con sus sentidos intactos.

Una vez recuperada la estabilidad, Ike pensó que, después de todo, tendría que haberse leído el manual a pesar de su impaciencia. Buscó la sección de «Advertencias» y allí leyó: «Su nuevo Alicxvr model 6.3 funciona sólo para distancias superiores a 10^{-33} cm. Todavía no hemos incorporado los últimos avances de la teoría de cuerdas, cuyas predicciones teóricas los físicos y los matemáticos conectaron con el mundo físico tan sólo el año pasado».

Ike se sintió muy decepcionado al enterarse de que solamente el nuevo modelo 7.0 iba a incluir los últimos resultados obtenidos. Pero entonces se puso al día con los desarrollos más recientes de la teoría de cuerdas, aumentó la potencia de su Alicxvr y ya nunca más volvió a marearse.

La teoría general de la relatividad de Einstein fue algo monumental. Con ella, los físicos comprendieron más profundamente el campo gravitatorio y pudieron calcular la influencia de la gravedad con una precisión desconocida hasta entonces. La relatividad proporcionó a los físicos las herramientas precisas para predecir la evolución de todos los sistemas gravitatorios, incluido el sistema formado por el universo entero. Sin embargo, a pesar de las predicciones acertadas que ofrece, la relatividad general no puede decir la última palabra sobre la gravedad. La relatividad general falla cuando se aplica a distancias muy cortas. A escalas de longitud diminutas, sólo un nuevo paradigma gravitatorio puede funcionar. Muchos físicos piensan que dicho paradigma tiene que ser la teoría de cuerdas.

Si la teoría de cuerdas es correcta, abarca las predicciones acertadas de la relatividad general, de la mecánica cuántica y de la física de partículas. Pero también amplía el campo de la física a dominios de distancia y energía que estas otras teorías no están preparadas para tratar. La teoría de cuerdas no está todavía tan desarrollada como para permitirnos evaluar sus predicciones en altas energías y validar su eficacia en estos regímenes elusivos de distancia y energía. Pero sí posee algunos rasgos notables que otorgan credibilidad a esta perspectiva tan halagüeña.

Vamos a echar ahora una mirada a la teoría de cuerdas y a examinar cómo evolucionó esta teoría radicalmente nueva, hasta culminar con la «revolución de las supercuerdas» de 1984, en la que los físicos demostraron que las diversas piezas de la teoría de cuerdas encajan milagrosamente bien. La revolución de las supercuerdas fue sólo el principio de un intenso programa de investigación que hoy día involucra activamente a muchos físicos. En éste y en los próximos capítulos, pasaremos revista a la historia de la teoría de cuerdas y a algunos de los desarrollos recientes más espectaculares de esta teoría. Veremos que la teoría de cuerdas ha conseguido avances notables y que presenta numerosos aspectos prometedores. Pero también veremos que se enfrenta a muchos desafíos cruciales, que los físicos tendrán que resolver antes de poder utilizarla para hacer predicciones sobre nuestro mundo.

Malestar incipiente

La mecánica cuántica y la relatividad general conviven en paz en un amplio abanico de distancias, en particular en todas aquellas que son accesibles a los experimentos. Aunque ambas teorías habrían de ser válidas en todas las escalas de distancia, las dos teorías tienen un acuerdo mutuo sobre cuál de ellas manda en las distancias medibles cortas y en las largas. La mecánica cuántica y la relatividad general pueden compartir el territorio en paz gracias a que cada una respeta la autoridad de la otra en el dominio que le ha sido asignado. La relatividad general es importante para objetos inmensos y con enorme masa, como las estrellas o la galaxia. Pero la influencia de la gravedad sobre un átomo es despreciable, de modo que se puede estudiar el

átomo correctamente, haciendo caso omiso de la relatividad general. La mecánica cuántica, en cambio, resulta crucial en las distancias atómicas ya que sus predicciones para un átomo son sustanciales y difieren significativamente de las que proporciona la física clásica.

No obstante, la mecánica clásica y la relatividad no mantienen una relación del todo armoniosa. Estas dos teorías, tan diferentes, nunca negociaron de modo adecuado el trato de la diminuta distancia conocida como la longitud de Planck, 10^{-33} cm. Sabemos, por la ley de gravitación de Newton, que la fuerza de la gravedad es directamente proporcional a las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. A pesar de que la gravedad es débil a escala atómica, la ley de la gravitación nos dice que a escalas cada vez más pequeñas la fuerza de la gravedad puede llegar a ser enorme. La gravedad es importante no sólo para objetos inmensos y con una gran masa, sino también para objetos que están sumamente próximos, separados por una distancia igual a la minúscula longitud de Planck. Si intentáramos hacer predicciones para esta distancia, que es tan pequeña que no podemos medirla, tanto la mecánica cuántica como la relatividad general tendrían algo significativo que decir, pero lo que diría una de las teorías resultaría incompatible con lo que diría la otra. En este reñido territorio, en el que la mecánica cuántica y la relatividad general dejan de cooperar y las predicciones están abocadas al fracaso, no se puede dejar a un lado ni a la mecánica cuántica ni a la gravedad.

La relatividad general funciona sólo cuando hay campos gravitatorios que varían suavemente y que están codificados en un espacio-tiempo que se va curvando gradualmente. Pero la mecánica cuántica nos dice que cualquier cosa que sea capaz de sondear o de ejercer alguna influencia en la escala de Planck tiene una enorme incertidumbre en su momento angular. Una sonda que tuviera la energía suficiente como para actuar en la escala de Planck induciría procesos dinámicos disruptivos, por ejemplo erupciones energéticas de partículas virtuales, que echarían a perder toda esperanza de una descripción por medio de la relatividad general. De acuerdo con la mecánica cuántica, en la escala de Planck, en vez de una geometría que se va ondulando gradualmente, habría fluctuaciones incontroladas y lazos y asas del espacio-tiempo que se bifurcan, el tipo de topografía que se encontró Ike el futurista. La relatividad general no sirve para nada en este terreno tan salvaje.

Pero tampoco la relatividad general se queda a un lado y da rienda suelta a la mecánica cuántica, ya que a la escala de Planck la gravedad ejerce una fuerza sustancial. Aunque la gravedad sea débil en las energías de la física de partículas a las que estamos acostumbrados, es enormemente poderosa en las altas energías necesarias para explorar la escala de Planck[93] . La energía de la escala de Planck, o sea, la energía precisa para explorar la escala de Planck, es exactamente la energía en la que la gravedad ya no es desdeñable como una fuerza débil. En la escala de Planck no puede ignorarse la gravedad.

De hecho, en la energía de la escala de Planck la gravedad construye barreras que hacen imposibles los cálculos de la mecánica cuántica convencional.

Cualquier cosa que tuviera la energía suficiente para sondear 10^{-33} cm se convertiría en un agujero negro que retiene todo lo que entra en él. Solamente una teoría cuántica de la gravedad puede decirnos qué es lo que pasa de verdad ahí dentro.

A distancias muy pequeñas, la mecánica cuántica y la gravedad están pidiendo a voces una teoría más fundamental. Dado el conflicto que hay entre ellas, la única solución es traer a un árbitro externo que sirva como alternativa a ambas. El nuevo régimen debería dar rienda suelta a ambas en los respectivos antiguos territorios en los que no había disputa, pero también tener la suficiente autoridad para gobernar la región reñida que ninguna de las anteriores teorías controlaba. La teoría de cuerdas podría ser la respuesta.

La incompatibilidad entre la mecánica cuántica y la gravedad queda también de manifiesto con las predicciones sin sentido que hace la gravedad convencional para las interacciones de alta energía de una partícula que se llama *gravitón* , la partícula que comunica la fuerza gravitatoria en una teoría cuántica de la gravedad.

Según la teoría clásica de la gravedad, ésta se comunica entre los objetos con masa a través de un campo gravitatorio, de un modo muy parecido a como, según la teoría electromagnética clásica de Maxwell, se comunica el electromagnetismo entre partículas cargadas a través de un campo electromagnético clásico. Pero la electrodinámica cuántica (QED), la teoría cuántica del campo electromagnético, reinterpreta esta fuerza electromagnética clásica en términos del intercambio de una partícula, el fotón[94] . La QED, la teoría del fotón, es una ampliación de la teoría clásica del electromagnetismo que incorpora los efectos de la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica dicta, de modo semejante, que ha de haber una partícula que transmita la fuerza gravitatoria. Esta partícula es el gravitón. En una teoría cuántica de la gravedad, el intercambio de un gravitón entre dos objetos reproduce la ley de Newton de la atracción gravitatoria. Aunque los gravitones nunca han sido observados directamente, los físicos estamos convencidos de que existen porque la mecánica cuántica nos dice que tienen que existir.

Más adelante, el espín distintivo del gravitón va a resultarnos muy importante. Al comunicar los gravitones la gravedad, una fuerza vinculada de manera inherente al espacio y al tiempo, éstos tienen un espín diferente del que poseen los otros portadores de fuerza conocidos, como el fotón. No vamos a profundizar aquí en las razones de este fenómeno, pero el gravitón es la única partícula sin masa conocida que tiene espín igual a 2 y no igual a 1, como ocurre con los otros bosones gauge, ni igual a $^1/_2$, como sucede con los quarks y los leptones. El hecho de que tenga espín igual a 2 es importante a la hora de encontrar pruebas convincentes de las teorías de dimensiones extras. Y además, como veremos pronto, el espín del gravitón fue también la clave para reconocer las implicaciones potenciales de la teoría de cuerdas.

Sin embargo, la descripción de la gravedad en el marco de la teoría cuántica

de campos no puede estar completa. Ninguna teoría cuántica de campos para el gravitón puede predecir sus interacciones en todas las energías. Cuando un gravitón tiene tanta energía como la energía de la escala de Planck, la teoría cuántica de campos deja de funcionar. El razonamiento teórico muestra que algunas interacciones extras del gravitón, que son irrelevantes a bajas energías, se vuelven, sin embargo, importantes a altas energías, pero la lógica de la teoría cuántica de campos no es suficiente para decirnos qué son ni cómo contar con ellas. Si usáramos incorrectamente una teoría cuántica de campos para la gravedad, dejando de lado las interacciones que no cuentan a bajas energías, e intentáramos hacer predicciones para gravitones de enorme energía, deduciríamos que las interacciones del gravitón se producen con una probabilidad superior a uno, algo que es claramente imposible. A la energía de la escala de Planck, o equivalentemente (según la mecánica cuántica y la relatividad general), a la distancia de Planck, 10^{-33} cm, la descripción del gravitón que da la mecánica cuántica obviamente deja de funcionar.

La longitud de Planck, diecinueve órdenes de magnitud más pequeña que el tamaño de un protón, sería demasiado pequeña como para que los físicos se ocupasen de ella si no fuera por los resultados fundamentales que una teoría más amplia puede proporcionar en potencia. Por ejemplo, las teorías actuales de la cosmología conjeturan que el universo comenzó como una bola diminuta, del tamaño de la longitud de Planck. Pero no comprendemos la «Explosión» del Big Bang (Gran Explosión). Comprendemos muchos aspectos de la evolución posterior del universo, pero no cómo empezó. La deducción de las leyes físicas que funcionan a distancias más pequeñas que la longitud de Planck arrojaría luz sobre las etapas más tempranas de la evolución de nuestro universo.

Hay, además, muchos misterios en torno a los agujeros negros. Entre las cuestiones importantes que están sin resolver figura el problema de qué es lo que ocurre en el *horizonte* del agujero negro, el lugar sin vuelta posible, más allá del cual nada puede ya escapar, y en la *singularidad* , el lugar situado en el centro del agujero negro, en el que deja de funcionar la relatividad general. Otra cuestión que está sin resolver es cómo se almacena la información sobre los objetos que caen en un agujero negro. Contrariamente a lo que ocurre con la fuerza gravitatoria que todos experimentamos, los efectos gravitatorios que se producen dentro de un agujero negro son fuertes, tanto como los efectos que producen los objetos con una energía de la escala de Planck en el espacio plano ordinario. No aclararemos estos misterios de los agujeros negros hasta que hayamos resuelto el problema de encontrar una sola teoría que incluya de modo consistente tanto la mecánica cuántica como la relatividad general, una teoría de la *gravedad cuántica* a la escala de Planck, 10^{-33} cm. Los agujeros negros ejemplifican algunas de las cuestiones sobre los efectos gravitatorios fuertes que sólo quedarán resueltos con una teoría cuántica de la gravedad. La teoría de cuerdas es la mejor candidata conocida a encarnar esta teoría.

Practicando con las cuerdas

La visión que ofrece la teoría de cuerdas de la naturaleza fundamental de la materia difiere significativamente de la que ofrece la física de partículas tradicional. Según la teoría de cuerdas, los objetos indivisibles más básicos

que están en la base de toda la materia son las *cuerdas* , lazos unidimensionales vibrantes o segmentos de energía. Estas cuerdas, al contrario, por ejemplo, que las cuerdas de un violín, no están hechas de átomos, que, a su vez, están hechos de electrones y núcleos, que, a su vez, están hechos de quarks. De hecho, lo cierto es justamente lo contrario. Estas cuerdas son cuerdas fundamentales, lo que quiere decir que todo, incluso los electrones y los quarks, consiste en sus oscilaciones. Según la teoría de cuerdas, el hilo con el que juega el gato está hecho de átomos que, en última instancia, están compuestos a base de vibraciones de cuerdas.

La hipótesis radical de la teoría de cuerdas es que las partículas proceden de los diversos modos de oscilación resonante de las cuerdas. Toda partícula corresponde a las vibraciones de una cuerda subyacente y el carácter de estas vibraciones determina las propiedades de la partícula. Como las cuerdas pueden vibrar de muchos modos distintos, una sola cuerda puede producir muchos tipos de partícula. Los teóricos pensaron al principio que había un único tipo de cuerda fundamental responsable de todas las partículas conocidas. Pero esta visión ha cambiado en los últimos años, y ahora pensamos que la teoría de cuerdas puede contener tipos de cuerda diferentes e independientes, cada uno de los cuales puede oscilar de muchas maneras posibles.

Las cuerdas se despliegan en una sola dimensión. En un momento dado, sólo es preciso conocer un número para identificar un punto situado sobre una cuerda, así que, según nuestra definición de dimensionalidad, las cuerdas son objetos de dimensión espacial igual a uno. No obstante, pueden rizarse y anudarse, como los trozos físicos, reales, de cuerda. De hecho, hay dos tipos de cuerdas: las *cuerdas abiertas* , que tienen dos cabos, y las *cuerdas cerradas* , que son lazos sin cabos (véase la figura 67).

FIGURA 67. Una cuerda abierta y una cuerda cerrada.

Las partículas que una cuerda de hecho produce dependen de la energía de la cuerda y de los modos de vibración precisos que se exciten. Los modos de una cuerda son como los modos resonantes de un violín. Uno puede imaginarse que las oscilaciones son unidades elementales que pueden combinarse para formar todas las partículas conocidas. En este lenguaje, las partículas son cuerdas y sus interacciones son armonías. La cuerda de la teoría de cuerdas no siempre produce todas las partículas, igual que la cuerda de un violín no produce sonido mientras alguien no le aplique el arco. Pero la energía va a excitar los modos de una cuerda, del mismo modo que el arco excita los modos de un violín. Y cuando la cuerda tenga suficiente energía, producirá tipos diferentes de partículas.

Tanto en las cuerdas abiertas como en las cerradas, los modos resonantes son los que oscilan un número entero de veces a lo largo de la extensión de la cuerda. Algunos de estos modos están descritos en la figura 68. En estos modos, la onda oscila hacia arriba y hacia abajo unas cuantas veces, completando todas las oscilaciones al recorrer toda la longitud de la cuerda. En una cuerda abierta, las vibraciones de la onda llegan al extremo de la cuerda y dan media vuelta, yendo y viniendo todo el tiempo, mientras que las ondas de las cuerdas cerradas oscilan subiendo y bajando al rodear el lazo

cerrado que forma la cuerda. Las demás ondas, las que no completan un número entero de oscilaciones, no aparecen nunca.

FIGURA 68. Algunos modos de oscilación de una cuerda abierta (arriba) y de una cuerda cerrada (abajo).

A la postre, el modo preciso en que la cuerda oscila determina todas las propiedades de la partícula, como su masa, su espín y su carga. En general, habrá muchas variantes de una misma partícula con el mismo espín y la misma carga, pero todas con masas distintas. Como estos modos infinitos, una sola cuerda puede dar lugar a un conjunto infinito de partículas pesadas. Las partículas conocidas, que son relativamente ligeras, proceden de cuerdas con el mínimo número posible de oscilaciones. Un modo sin oscilación podría ser una partícula ligera familiar, como un quark o un leptón ordinario. Pero una cuerda con energía puede oscilar de muchas maneras, de modo que la teoría de cuerdas se distingue por sus partículas más pesadas, que proceden de modos de vibrar más complicados.

Sin embargo, para que haya más oscilaciones se requiere más energía. Las partículas extras de la teoría de cuerdas que provienen de más oscilaciones son seguramente muy pesadas: para producirlas se necesitaría una cantidad enorme de energía. Así que, aunque la teoría de cuerdas sea correcta, es muy posible que sus consecuencias más novedosas sean muy difíciles de detectar. Si bien no esperamos descubrir ninguna de estas partículas más pesadas a energías accesibles, lo que sí esperamos es que la teoría de cuerdas y la física de partículas produzcan las mismas consecuencias observables a las energías que vemos. Esta perspectiva podría cambiar si algunos de los desarrollos recientes sobre las dimensiones extras son correctos. Pero examinemos por ahora la perspectiva que ofrece la teoría de cuerdas convencional. El caso de los modelos extra-dimensionales lo trataremos más adelante.

Los orígenes de la teoría de cuerdas

En los tiempos futuros de Ike XLII, la teoría de cuerdas podría quizá presumir de una larga historia. Pero con fines científicos, hemos de limitar nuestra historia al siglo XX y a principios del siglo XXI. Ahora vemos la teoría de cuerdas como una teoría que podría reconciliar la mecánica cuántica y la gravedad. En sus orígenes, sin embargo, tuvo una aplicación completamente diferente. La teoría surgió por primera vez en 1968, como un intento de describir las partículas fuertemente interactivas, bautizadas como hadrones. Esta teoría fracasó; como vimos en el capítulo 7, ahora sabemos que los hadrones están hechos de quarks que se mantienen juntos en virtud de la interacción fuerte. No obstante, la teoría de cuerdas sobrevivió, pero no como una teoría de los hadrones, sino como una teoría de la gravedad.

A pesar de su inutilidad para describir los hadrones, podemos aprender algo sobre los aspectos buenos de la teoría de cuerdas de la gravedad al examinar un poco los problemas que abordó la teoría de cuerdas de los hadrones. Curiosamente, los defectos de la teoría de cuerdas de los hadrones resultaron ser rasgos redentores (o por lo menos no fueron obstáculos) para la teoría de cuerdas de la gravedad cuántica.

El primer problema de la versión original de la teoría de cuerdas es que contenía un *taquión* . La gente interpretó al principio los taquiones como partículas que viajan a una velocidad superior a la de la luz (el término proviene del griego *tacos* , que significa «velocidad»). Pero ahora sabemos que un taquión indica que hay una inestabilidad en la teoría que lo contiene. Para decepción de los aficionados a la ciencia ficción, los taquiones no son partículas físicas reales que aparezcan en la naturaleza. Si una teoría parece contener un taquión, es que uno la está analizando incorrectamente. Un sistema que contenga un taquión puede transformarse en un sistema relacionado con el anterior, con menos energía y en el que el taquión ya no aparece, y así lo hará. El sistema con el taquión no dura lo suficiente como para tener efectos físicos; es sólo un aspecto de la descripción teórica incorrecta. Hay que encontrar una descripción teórica de la configuración estable relacionada sin el taquión antes de poder identificar partículas y fuerzas físicas auténticas. Si no contiene una configuración así, es que la teoría es incompleta.

La teoría de cuerdas con un taquión no parecía tener sentido. Pero nadie sabía cómo formular la teoría de modo que éste quedase eliminado. Esto implicaba que las predicciones de la teoría de cuerdas, incluidas las relacionadas con otras partículas que no fueran el taquión, no eran fiables. Uno podría pensar que esto debería haber sido una razón suficiente para abandonar la teoría de cuerdas de los hadrones. Pero los físicos seguían teniendo esperanzas de que el taquión no fuera real; algunos pensaban que podría ser simplemente un problema con las aproximaciones matemáticas que se hacían al formular la teoría, aunque esto no fuera muy probable.

Sin embargo, Ramond, Neveu y Schwarz descubrieron una versión alternativa supersimétrica de la cuerda: la *supercuerda* . La ventaja, importante en términos críticos, de la teoría de supercuerdas respecto de la versión original de la teoría de cuerdas fue que aquélla contenía partículas con espín igual a $^1/_2$, lo que le confería la posibilidad de describir los fermiones del modelo estándar, como el electrón y los diferentes tipos de quarks. Pero un regalo adicional de la teoría de supercuerdas era que ésta no contenía el taquión, que había atormentado a la versión original de la teoría de cuerdas. La teoría de supercuerdas, que parecía en todo caso una teoría más prometedora, no tenía la inestabilidad del taquión, que hubiera amenazado con estorbar su progreso.

Un segundo problema de la teoría de cuerdas original de los hadrones era que ésta contenía una partícula sin masa y con espín igual a 2. Los cálculos mostraron que no había modo de eliminarla, pero ningún físico experimental había descubierto nunca esta maldita partícula. Teniendo en cuenta que los físicos experimentales deberían haber sido capaces de observar una partícula sin masa que interactuara con tanta fuerza como el hadrón, daba la sensación de que la teoría de cuerdas de los hadrones presentaba problemas.

Scherk y Schwarz pusieron la teoría de cuerdas patas arriba cuando mostraron que la partícula con espín igual a 2 que había sembrado la confusión en la teoría de cuerdas de los hadrones podría, de hecho, ser la gloria suprema de una teoría de cuerdas de la gravedad; la partícula con

espín igual a 2 podría ser, en realidad, el gravitón. Pasaron a probar que la partícula con espín igual a 2 se comportaba exactamente como debería comportarse el gravitón. La observación crucial de que la teoría de cuerdas contenía un candidato a gravitón convirtió a la teoría de cuerdas en una teoría en potencia de la gravedad cuántica. Nadie había concebido cómo formular una teoría consistente de la gravedad, descrita a base de partículas, que funcionara en todas las energías. Por el contrario, parecía que una descripción en el contexto de la teoría de cuerdas podría conseguir esa magia.

Había otro indicio de que, aunque no funcionase una teoría de cuerdas de los hadrones, Scherk y Schwarz podrían estar sobre la pista acertada de una teoría de cuerdas de la gravedad. Como vimos en el capítulo 7, Friedman, Kendall y Taylor probaron en el Centro de Aceleración Lineal de Stanford (SLAC, según sus siglas en inglés) que los núcleos dispersan, de manera drástica, los electrones, lo que implica la existencia en su interior de objetos duros y puntiagudos: los quarks. Este experimento era similar en esencia al experimento de dispersión de Rutherford, que se describió en el capítulo 6. En aquel caso, los resultados de dispersión drástica indicaban la existencia de un núcleo atómico duro y, en éste, la presencia de quarks puntiagudos en el interior de los nucleones, y no de cuerdas mullidas y extensas.

Sin embargo, las predicciones de la teoría de cuerdas no casaban bien con los resultados del experimento del SLAC. Las cuerdas nunca conducirían a la intensa dispersión que solamente un objeto duro y compacto podría producir. Al interactuar en cada momento dado solamente ciertas porciones de las cuerdas, las cuerdas chocarían más blandamente. Esta dispersión tranquila y relativamente poco marcada fue el toque de difuntos de la teoría de cuerdas de los hadrones. Sin embargo, desde el privilegiado punto de vista de la gravedad cuántica, parecía que podía tratarse de una propiedad muy prometedora.

En una teoría del gravitón basada en su interpretación como partícula, el gravitón interactúa de un modo excesivamente fuerte a altas energías. Sería mejor una teoría en la que los gravitones con energía no interactuaran tan intensamente. Y esto es justo lo que pasa en una teoría de cuerdas de la gravedad. La teoría de cuerdas, que sustituye las partículas puntiagudas por cuerdas desplegadas, garantiza el hecho de que el gravitón interactúe de un modo mucho menos drástico a altas energías. Las cuerdas, al contrario que los quarks, no tienen procesos de dispersión duros. Tienen interacciones más blandas que se producen en una región más amplia[M24] . Esta propiedad implica que la teoría de cuerdas podría resolver en potencia el problema del índice de interacción tan ridículamente alto del gravitón, y predecir correctamente las interacciones del gravitón a altas energías. Las colisiones más suaves de las cuerdas a altas energías fueron otro indicio importante de que una teoría de cuerdas de la gravedad podría ser correcta.

En suma, la teoría de supercuerdas contiene fermiones, bosones gauge portadores de fuerza y el gravitón, todos los tipos de partículas que conocemos. No contiene ningún taquión. Además, la teoría de supercuerdas incluye un gravitón, cuya descripción cuántica tiene sentido en potencia a altas energías. La teoría de cuerdas parecía ser capaz de describir en

principio todas las fuerzas conocidas. Era una prometedora candidata a encarnar una teoría del mundo.

La revolución de las supercuerdas

La teoría de supercuerdas era un paso extremadamente audaz, incluso para resolver un problema tan profundo como el de la gravedad cuántica. Una teoría de cuerdas de la gravedad predice una infinidad de partículas, aparte de las que ya conocemos. Además, es dificilísimo analizarla con cálculos. El precio que había que pagar para resolver el problema de la gravedad cuántica era exorbitante: una teoría con una infinidad de partículas y una descripción matemática intratable en potencia. Para trabajar en teoría de cuerdas en los años setenta había que ser una persona muy lanzada o un poco loca. Scherk y Schwarz estuvieron entre los pocos que tomaron este arriesgado camino.

Después de la prematura muerte de Scherk en 1980, Schwarz perseveró con la teoría de cuerdas. Colaboró con otro converso de entonces (quizá el único que había), el físico británico Michael Green, y juntos desvelaron las consecuencias de la teoría de supercuerdas. Schwarz y Green descubrieron una cualidad curiosa de la teoría de supercuerdas: que sólo tiene sentido en diez dimensiones, nueve espaciales y una temporal. En cualquier otro número de dimensiones, algunos modos de vibración inaceptables de la cuerda conducen a predicciones que manifiestamente no tienen sentido, como probabilidades negativas para procesos que involucran modos de la cuerda que no deberían existir. En diez dimensiones, todos los modos no deseados desaparecen. Una teoría de cuerdas en otro número cualquiera de dimensiones carecía de sentido.

Aclaremos esto. La propia cuerda se extiende a lo largo de una sola dimensión en el espacio y viaja en el tiempo. Éstas eran las dos dimensiones que Ramond había estudiado al poco tiempo de descubrir la supersimetría. Pero, así como sabemos que un objeto puntiagudo —que no tiene extensión en ninguna dimensión espacial y, por lo tanto, tiene dimensión espacial igual a cero— puede moverse en las tres dimensiones del espacio, una cuerda —que tiene dimensión espacial igual a uno— puede moverse en un espacio que tiene muchas más dimensiones que las que él mismo posee. Resultaba concebible que las cuerdas pudieran moverse en tres, cuatro o más dimensiones. Los cálculos indicaban que el número correcto (incluido el tiempo) era diez.

El hecho de que tuviera demasiadas dimensiones no era un aspecto novedoso de la teoría de supercuerdas. La primera versión de la teoría de cuerdas (la que no tenía fermiones ni supersimetría) contaba con veintiséis dimensiones: una temporal y veinticinco espaciales. Pero tenía otros problemas, como el taquión. La teoría de supercuerdas, por el contrario, era lo suficientemente prometedora como para que valiera la pena perseverar en ella.

Incluso siendo esto así, la teoría de cuerdas fue bastante ignorada hasta 1984, año en el que Green y Schwarz demostraron una propiedad asombrosa de la teoría de supercuerdas que convenció a muchos otros físicos de que estaban sobre una pista prometedora. Este descubrimiento, junto con otros dos desarrollos a los que llegaremos enseguida, fue el que colocó a la teoría de cuerdas en la corriente principal de la física.

El trabajo de Green y Schwarz versó sobre un fenómeno conocido como *anomalías* . Como el propio nombre sugiere, las anomalías supusieron una gran sorpresa cuando fueron descubiertas. Los primeros físicos que trabajaron en teoría cuántica de campos dieron por sentado que cualquier simetría de una teoría clásica permanecería inalterada al extender esa teoría a la versión que de ella da la mecánica cuántica, que es la versión algo más general de la teoría que engloba también los efectos de las partículas virtuales. Pero no siempre es éste el caso. En 1969, Steven Adler, John Bell y Roman Jackiw mostraron que, aunque una teoría clásica preserve una simetría, los procesos de la mecánica cuántica que involucran partículas virtuales violan a veces esa simetría. Estas violaciones de la simetría se llamaron *anomalías* , y a las teorías que contenían anomalías se les puso la etiqueta de *anómalas* .

Las anomalías son muy relevantes para las teorías de las fuerzas. En el capítulo 9 vimos que una teoría lograda de las fuerzas exige la existencia de una simetría interna. Estas simetrías tienen que ser exactas, porque, de no ser así, no hay manera de eliminar la polarización indeseada del bosón *gauge* , y la teoría de las fuerzas perderá su sentido. La simetría asociada a una fuerza ha de estar *sin anomalías* , esto es, la suma de todos los efectos que rompen la simetría ha de ser igual a cero.

Ésta es una restricción muy potente en cualquier teoría cuántica de fuerzas. Por ejemplo, ahora sabemos que dicha restricción es una de las explicaciones más convincentes de la existencia de los quarks, así como de la de los leptones, en el modelo estándar. Individualmente, los quarks y los leptones virtuales producirían contribuciones cuánticas anómalas que destruirían las simetrías del modelo estándar. Sin embargo, la suma de las contribuciones cuánticas de los quarks y de los leptones da cero. Esta simplificación milagrosa es lo que hace que se sostenga el modelo estándar; tanto los leptones como los quarks son necesarios si queremos que las fuerzas del modelo estándar tengan sentido.

Las anomalías eran un problema en potencia para la teoría de cuerdas, la cual, al fin y al cabo, incluye las fuerzas. En 1983, cuando los físicos teóricos Luis Álvarez Gaumé y Edward Witten mostraron que estas anomalías se producían no sólo en la teoría cuántica de campos, sino también en la teoría de cuerdas, dio la impresión de que este descubrimiento enviaría la teoría de cuerdas a los anales de las ideas interesantes pero excesivamente trascendentes. Parecía que la teoría de cuerdas no podía conservar las simetrías requeridas. En el ámbito de escepticismo creado por la existencia potencial de anomalías en la teoría de cuerdas, Green y Schwarz causaron sensación cuando probaron que la teoría de cuerdas podía satisfacer los requisitos precisos para evitar las anomalías. Calcularon la contribución cuántica de todas las posibles anomalías y probaron que para algunas fuerzas concretas, milagrosamente, la suma de las anomalías daba cero.

Una de las cosas que hicieron que el resultado de Green y Schwarz fuera tan sorprendente es que la teoría de cuerdas permite muchos procesos cuánticos inquietantes, cada uno de los cuales, según parece, podría crear anomalías que destruyen la simetría. Pero Green y Schwarz probaron que la suma de las

contribuciones de la mecánica cuántica a todas estas posibles anomalías que destruyen la simetría en la teoría de supercuerdas en diez dimensiones es igual a cero. Esto implicaba que la gran cantidad de simplificaciones que era preciso que se produjeran en los cálculos de la teoría de cuerdas, de hecho, se producen, y no sólo eso, sino que las simplificaciones se producen en diez dimensiones, el número de dimensiones que ya se sabía que era especial para la teoría de supercuerdas. Este descubrimiento fue lo bastante milagroso como para que muchos físicos decidieran que estas conspiraciones no podían ser casuales. La simplificación de las anomalías fue un argumento poderoso a favor de la teoría de supercuerdas de dimensión diez.

Además, Green y Schwarz completaron su trabajo en un momento afortunado. Los físicos habían estado buscando sin éxito teorías que pudieran generalizar el modelo estándar para incluir la supersimetría y la gravedad, y estaban preparados para considerar algo nuevo. No podían ignorar el descubrimiento de Green y Schwarz de una teoría supersimétrica que pudiera reproducir en potencia todas las partículas y fuerzas del modelo estándar. A pesar de que la estructura adicional de la teoría de cuerdas era una molestia, la teoría de supercuerdas había triunfado donde otras teorías, potencialmente más económicas, habían fracasado.

Pronto otros dos desarrollos significativos aseguraron la inclusión de la teoría de cuerdas en el canon de la física. Uno de ellos vino de la colaboración en Princeton de David Gross, Jeff Harvey, Emil Martinec y Ryan Rohm, quienes en 1985 elaboraron una teoría que llamaron teoría de la *cuerda heterótica* . La palabra proviene de la palabra *heterosis* , que en botánica significa «vigor híbrido», un término que se usa para referirse a organismos híbridos con propiedades superiores a las que poseen sus progenitores. Se usó el nombre de *heterótica* para esta teoría porque en ella a las ondas que se movían hacia la izquierda se las trataba de modo diferente a como se hacía con las ondas que se movían hacia la derecha, y, en consecuencia, la teoría incluía más fuerzas interesantes que las versiones de la teoría de cuerdas que ya se conocían.

El descubrimiento de las cuerdas heteróticas fue una confirmación más de que las fuerzas descubiertas por Green y Schwarz, que no tenían anomalías y que eran aceptables en diez dimensiones, eran verdaderamente especiales. Habían encontrado varios conjuntos de fuerzas, entre las que estaban todas las que ya se había probado que eran posibles en la teoría de cuerdas, más otro conjunto de fuerzas que nunca antes se había descubierto (teóricamente) que formaran parte de la teoría de cuerdas. Las fuerzas de la teoría de las cuerdas heteróticas eran precisamente estas nuevas fuerzas de las que Green y Schwarz descubrieron que no tenían anomalías. Con la teoría de las cuerdas heteróticas, se probó no sólo que este conjunto adicional de fuerzas, que podrían incluir las del modelo estándar, era una auténtica posibilidad de la teoría de cuerdas, sino también que podría hacerse realidad explícitamente. Los físicos consideraron la teoría de las cuerdas heteróticas como un avance genuino en el intento de vincular la teoría de cuerdas y el modelo estándar.

Hubo un desarrollo final que asentó la prominencia de la teoría de cuerdas. Este descubrimiento versó sobre las dimensiones extras esenciales en las supercuerdas. Está muy bien y es muy conveniente demostrar que la teoría de

supercuerdas es internamente consistente y que engloba las fuerzas del modelo estándar, pero todo ello no resulta nada interesante si está uno atascado en un número erróneo de dimensiones espaciales. La teoría de supercuerdas estipula diez dimensiones. El mundo que nos rodea parece contener solamente cuatro (incluido el tiempo). Hay que hacer algo con las seis que sobran.

Los físicos piensan ahora que la respuesta podría estar en la compactación: las dimensiones enrolladas que ocupan un espacio de un tamaño imperceptible, como se describió en el capítulo 2. Al principio, sin embargo, esta idea de que las dimensiones extras puedan estar enrolladas no parecía ser el modo correcto de tratar estas dimensiones extras de la teoría de cuerdas. El problema era que las teorías con dimensiones enrolladas no eran capaces de reproducir la importante (y sorprendente) propiedad de la fuerza débil discutida en el capítulo 7: la fuerza débil trata las partículas levógiras y dextrógiras de modo diferente. Éste no es un mero detalle técnico. Toda la estructura del modelo estándar se basa en el hecho de que las partículas levógiras son las únicas que sufren la fuerza débil. Si no fuera así, funcionarían pocas predicciones del modelo estándar.

A pesar de que la teoría de cuerdas de dimensión diez podía tratar de modo diferente las partículas levógiras y las dextrógiras, parecía que esto dejaría de ser cierto si las seis dimensiones extras estuvieran enrolladas. La teoría efectiva que resultaba en cuatro dimensiones siempre contenía parejas de una partícula levógira y otra dextrógira claramente combinadas. Todas las fuerzas que actuaban sobre los fermiones levógiros actuaban también sobre los dextrógiros, y viceversa. Si la teoría de cuerdas no encontraba un modo de salir de este callejón, sería necesario desecharla.

En 1985, Philip Candelas, Gary Horowitz, Andy Strominger y Edward Witten reconocieron la importancia de una nueva manera de conseguir que las dimensiones extras se enrollaran, manera que consistía en una compactación conocida como *variedades de Calabi-Yau* . Los detalles son complicados, pero básicamente las variedades de Calabi-Yau generan una teoría de dimensión cuatro que puede distinguir entre derecha e izquierda y que produce las partículas y fuerzas del modelo estándar, incluida la fuerza débil que viola la paridad. Además, al acomodar hechas un ovillo a las dimensiones extras en una variedad de Calabi-Yau, se conserva la supersimetría[95] . Con el avance de Calabi-Yau, la teoría de supercuerdas seguía en escena.

En muchos departamentos de física, la teoría de supercuerdas desbancó a la física de partículas, y la revolución de las supercuerdas fue más bien un golpe de Estado. Como la teoría de supercuerdas incorpora la gravedad cuántica y podría contener las partículas y fuerzas conocidas, muchos físicos fueron tan lejos que pensaron que sería la teoría definitiva que lo engloba todo. En los años ochenta a la teoría de cuerdas se la bautizó como la «Teoría del Todo» (o «TOE», sus siglas en inglés). La teoría de cuerdas era aún más ambiciosa que las grandes teorías unificadas (o «GUT», sus siglas en inglés): con la teoría de cuerdas, los físicos esperaban unificar todas las fuerzas (incluida la gravedad) a una energía superior incluso a la energía asociada a las GUT. Sin disponer siquiera de observaciones que respaldaran la teoría de cuerdas, muchos físicos resolvieron que la posible capacidad de la teoría de cuerdas para

reconciliar la mecánica cuántica y la gravedad era una razón suficiente para apoyar su pretensión de ser considerada importante.

La resistencia del antiguo régimen

Si la teoría de cuerdas es correcta, y el mundo está compuesto en última instancia de cuerdas fundamentales oscilantes, ¿habrá que abandonar entonces toda la física de partículas? La respuesta es un «no» rotundo. El objetivo de la teoría de cuerdas es reconciliar la mecánica cuántica y la gravedad a distancias más pequeñas que la longitud de Planck, donde pensamos que una nueva teoría viene a sustituirlas. Así pues, en la teoría de cuerdas convencional (en contraste con las variantes sugeridas por los modelos con dimensiones extras), una cuerda habría de ser de un tamaño aproximado próximo a la longitud de Planck. Esto nos dice que en la teoría de cuerdas convencional, las diferencias entre la física de partículas y la teoría de cuerdas aparecerían sólo a distancias tan pequeñas como la diminuta longitud de Planck o, equivalentemente, a energías tan enormes como la energía de Planck, situaciones en las que se espera que la gravedad sea fuerte. Este tamaño es tan pequeño y esta energía tan intensa, que las cuerdas no obviarían de ninguna manera la descripción con partículas a energías experimentalmente accesibles.

Para energías que estén por debajo de la energía de Planck, la descripción que ofrece la física de partículas es, de hecho, muy adecuada. Si una cuerda es tan pequeña que su longitud resulta imposible de detectar, la cuerda muy bien podría ser una partícula; ningún experimento podría poner de manifiesto la diferencia. Las partículas y las cuerdas cuya longitud es la longitud de Planck son indistinguibles. La extensión unidimensional de la cuerda es tan invisible para nosotros como las minúsculas dimensiones extras enrolladas que consideramos antes. Salvo que tuviéramos instrumentos que pudieran tratar longitudes del orden de 10^{-33} cm, una cuerda así es demasiado pequeña como para que la podamos ver.

Tiene sentido que la teoría de cuerdas y la física de partículas parezcan lo mismo a energías alcanzables. El principio de incertidumbre nos dice que el único modo de estudiar las distancias pequeñas es con partículas con momentos altos, que son muy energéticas. Por lo tanto, sin suficiente energía, no hay manera de ver si la cuerda es larga y flaca, o como un punto.

En principio, podríamos encontrar pruebas para apoyar la teoría de cuerdas por medio de la búsqueda de alguna de las muchas partículas nuevas que predice, las partículas que corresponden a las numerosas oscilaciones posibles de la cuerda. El problema de esta estrategia es que la mayoría de las nuevas partículas inducidas por la cuerda serían muy pesadas, con una masa tan grande como la masa de Planck, 10^{19} GeV. Esta masa es enorme, comparada con la masa de las partículas que han sido detectadas experimentalmente, la más pesada de las cuales tiene más o menos 200 GeV.

Las partículas extras que surgirían de las oscilaciones de la cuerda serían así de pesadas debido a que su *tensión* —su resistencia a ser estirada, que determina la holgura con la que oscilará la cuerda y producirá partículas

pesadas— sería grande. La energía de Planck determina la tensión de las cuerdas: se precisa esta tensión para que la teoría de cuerdas reproduzca la fuerza de interacción correcta para el gravitón, y, por lo tanto, para la propia gravedad[M25] . Cuanto más intensa es la tensión de la cuerda, más energía se requiere para generar oscilaciones (al igual que es más difícil pulsar, o desplazar, la cuerda de un arco cuando está tensa que cuando está floja). Y esta energía elevada se traslada a una masa elevada para las partículas extras que surgen de la cuerda. Estas partículas con una masa parecida a la masa de Planck son demasiado pesadas como para que puedan producirse en ninguno de los experimentos con partículas que se están desarrollando hoy (y, con toda probabilidad, tampoco en ninguno de los que se desarrollen en el futuro).

Así, aunque la teoría de cuerdas sea correcta, es muy poco probable que encontremos alguna de las muchas partículas pesadas adicionales que predice. La energía de los experimentos actuales es dieciséis órdenes de magnitud más baja que la necesaria. Al ser las partículas extras tan extraordinariamente pesadas, las perspectivas de descubrir, experimentalmente, pruebas de las cuerdas, son muy pobres, con la posible excepción de los modelos con dimensiones extras que discutiré más adelante.

Sin embargo, en la mayoría de las distintas perspectivas que presenta la teoría de cuerdas, al ser la longitud de la cuerda tan diminuta y la tensión de la cuerda tan grande, nunca veremos pruebas que apoyen la teoría de cuerdas en las energías alcanzables en los aceleradores, incluso a pesar de que la descripción de la teoría de cuerdas sea correcta. Los físicos de partículas que están interesados en predecir resultados experimentales pueden aplicar sin peligro la teoría cuántica de campos convencional en cuatro dimensiones, ignorar la teoría de cuerdas y seguir obteniendo los resultados correctos. Mientras uno mire solamente distancias superiores a 10^{-33} cm (o, equivalentemente, energías inferiores a 10^{19} GeV), nada de lo que hemos considerado anteriormente sobre las consecuencias en bajas energías de la física de partículas va a cambiar. Dado que el tamaño de un protón es más o menos 10^{-13} cm y que la máxima energía que alcanzan los aceleradores actuales es más o menos mil GeV, es una apuesta bastante segura el hecho de que serán suficientes las predicciones que procura la teoría de partículas.

Incluso así, los físicos de partículas que se concentran en fenómenos de baja energía tienen buenas razones para prestar atención a la teoría de cuerdas. La teoría de cuerdas introduce nuevas ideas, tanto matemáticas como físicas, que de otra manera nadie hubiera considerado nunca, como las branas y otras nociones con dimensiones extras. Incluso en cuatro dimensiones, la teoría de cuerdas ha allanado el camino para llegar a una mejor comprensión de la supersimetría, de la teoría cuántica de campos y de las fuerzas que podría contener un modelo de la teoría cuántica de campos. Y por supuesto, si resulta que la teoría de cuerdas da una descripción cuántica absolutamente consistente de la gravedad, esto sería un logro formidable. Estos beneficios hacen que la teoría de cuerdas sea muy valiosa, incluso para los que están interesados únicamente en los fenómenos que son experimentalmente accesibles. Aunque será muy difícil (si no imposible) detectar las cuerdas, las ideas teóricas iluminadas por la teoría de cuerdas podrían ser pertinentes para nuestro mundo. Pronto veremos cuáles podrían ser algunas de ellas.

Secuelas de la revolución

En 1984, en la cima de la revolución de las supercuerdas, yo era una estudiante de doctorado en Harvard. Pronto se vio claro que, para investigar, un físico principiante tenía dos opciones. Podía decidirse por la teoría de cuerdas, siguiendo los pasos de Ed Witten y David Gross, que estaban entonces ambos en Princeton. O podía seguir siendo un físico de partículas en contacto más inmediato con los resultados experimentales, en la escuela de Howard Georgi y Sheldon Glashow, entonces ambos en Harvard. Podría parecer increíble que físicos interesados en los mismos problemas hayan podido estar tan divididos, pero las ideas de cómo avanzar eran muy diferentes en los dos campos.

El entusiasmo de Harvard siguió volcado en la física de partículas, y muchos físicos de allí descartaron en gran medida la teoría de cuerdas. Una serie de problemas de la física de partículas y de la cosmología seguían sin resolverse: ¿por qué no responder estas cuestiones antes de hurgar en el campo de minas matemático en el que amenazaba convertirse la teoría de cuerdas? ¿Resultaba aceptable para la física extenderse hasta dominios inconmensurables? Con tanta gente brillante y tantas ideas fascinantes para ir más allá del modelo estándar usando métodos más tradicionales, no había demasiada motivación para subirse a aquel tren en marcha.

En los demás sitios, sin embargo, los físicos estaban convencidos de que todas las cuestiones sobre la teoría de supercuerdas se resolverían pronto, y que la teoría de cuerdas era la física del futuro (y también la del presente). La teoría de supercuerdas estaba en sus primeras fases. Algunos pensaban que, dedicándose a ello un número suficiente de horas de trabajo (y horas de trabajo era lo que, ante todo, se necesitaba), los especialistas en teoría de cuerdas acabarían deduciendo toda la física conocida. En su artículo de 1985 sobre las cuerdas heteróticas, Gross y sus colegas escribieron: «Aunque queda mucho trabajo por hacer, parece que no hay obstáculos insuperables para deducir toda la física conocida de […] la teoría de cuerdas heteróticas»[96] . La teoría de cuerdas prometía ser la Teoría del Todo. Princeton estuvo en la vanguardia de este esfuerzo. Los físicos de allí estaban tan convencidos de que la teoría de cuerdas era la vía al futuro que el departamento ya no contaba en su seno con ningún físico de partículas que no trabajara en la teoría de cuerdas, un error que Princeton tiene todavía que corregir.

Hoy día no podemos decir si los obstáculos a los que se enfrenta la teoría son «insuperables» o no, pero son ciertamente desafiantes. Quedan muchas cuestiones cruciales sin contestar. Abordar los problemas sin resolver de la teoría de cuerdas parece requerir un aparato matemático o un enfoque fundamentalmente nuevo que está todavía muy lejos de los instrumentos que los físicos y los matemáticos han desarrollado hasta ahora.

Joe Polchinski, en su libro de texto sobre la teoría de cuerdas, de uso tan extendido, escribe que «es posible que la teoría de cuerdas refleje el mundo real en sus líneas más generales»[97] , y así lo hace en muchos aspectos. La teoría de cuerdas puede englobar las partículas y fuerzas del modelo

estándar, y puede reducirse a cuatro dimensiones cuando las restantes están enrolladas. Sin embargo, aunque hay pruebas seductoras de que la teoría de cuerdas podría incorporar el modelo estándar, el programa para encontrar el candidato ideal de modelo estándar no se encuentra, ni mucho menos, próximo a su fin después de veinte años de investigación.

Al principio, los físicos tenían la esperanza de que la teoría de cuerdas hiciese una predicción única sobre cómo sería el mundo, que estaría corroborada por el mundo que vemos. Pero ahora hay muchos posibles modelos que pueden surgir en la teoría de cuerdas, cada uno con fuerzas diferentes, con dimensiones diferentes y con combinaciones diferentes de partículas. Queremos encontrar el conjunto que corresponde al universo visible y comprender la razón por la cual es tan especial. Ahora mismo nadie sabe cómo elegir entre las posibilidades existentes. Y en todo caso, ninguna de ellas parece ser del todo correcta.

Por ejemplo, la compactación de Calabi-Yau puede determinar el número de generaciones de partículas elementales. Una posibilidad es, en efecto, las tres generaciones del modelo estándar. Pero no hay un único candidato de Calabi-Yau. Aunque originalmente los especialistas en teoría de cuerdas habían esperado que la compactación de Calabi-Yau seleccionara una forma preferida y leyes físicas únicas, pronto se desengañaron. Andy Strominger me contó cómo a la semana de descubrir una compactación de Calabi-Yau y de pensar que era única, su colaborador Gary Horowitz encontró varias otras candidatas. Andy supo más tarde, al hablar con Yau, que hay más o menos diez mil candidatas de Calabi-Yau. Ahora sabemos que las teorías de cuerdas basadas en la compactación de Calabi-Yau pueden contener cientos de generaciones. ¿Cuál de las compactaciones de Calabi-Yau es la correcta, si es que alguna lo es? ¿Y por qué? A pesar de que sabemos que algunas de las dimensiones de la teoría de cuerdas han de hacerse un ovillo o desaparecer de otra manera, los especialistas de teoría de cuerdas tienen que determinar todavía los principios que nos digan el tamaño y la forma de las dimensiones que están enrolladas.

Además, sumadas a las nuevas partículas pesadas que surgen de ondas que oscilan muchas veces a lo largo de la cuerda, la teoría de cuerdas contiene nuevas partículas ligeras. Y deberíamos esperar que, de existir y de ser tan ligeras como ingenuamente predice la teoría de cuerdas, esas partículas sean visibles en experimentos hechos en nuestro mundo. La mayoría de los modelos basados en la teoría de cuerdas contienen muchas más partículas ligeras y fuerzas de las que observamos a bajas energías, y no está claro qué es lo que distingue a las que son correctas.

Conseguir que la teoría de cuerdas coincida con el mundo real es un problema enormemente complicado. Tenemos que averiguar todavía por qué la gravedad, las partículas y las fuerzas que salen de la teoría de cuerdas tienen que concordar con lo que ya sabemos que es cierto en nuestro mundo. Pero estos problemas con las partículas, las fuerzas y las dimensiones palidecen en comparación con el auténtico tabú: la grosera sobrestimación de la densidad de energía del universo.

Aun en ausencia de partículas, el universo puede portar una energía que se

conoce como energía de vacío. Según la teoría de la relatividad, esta energía tiene una consecuencia física: estira o encoge el espacio. La energía de vacío positiva acelera la expansión del universo, mientras que la energía negativa hace que éste se colapse. Einstein fue el primero que propuso la existencia de esta energía en 1917 para encontrar una solución estática a sus ecuaciones de la relatividad general, en la que el efecto gravitatorio de la energía de vacío se compensara con la de la materia. Aunque tuvo que abandonar esta idea por muchos motivos, entre los que se encontraba la observación efectuada por Edwin Hubble, en 1929, de que el universo se expandía, no hay ninguna razón teórica por la que esta energía de vacío no pueda existir en nuestro universo.

En realidad, los astrónomos han medido hace poco la energía de vacío en el cosmos (también conocida como *energía oscura* o *constante cosmológica*) y han encontrado un valor positivo muy pequeño. Han observado que las supernovas distantes brillan menos de lo esperado, y ello se debe a que se alejan con cierta aceleración. Estas mediciones de las supernovas y las detalladas observaciones de los viejos fotones creados durante el Big Bang nos dicen que la expansión del universo se está acelerando, lo cual prueba que la energía de vacío tiene un pequeño valor positivo.

Esta medición es apasionante. Pero también introduce un enigma significativo. La aceleración es muy lenta, lo cual nos dice que el valor de la energía de vacío, aunque no es cero, es pequeñísima. El problema teórico con la energía de vacío observada es que su valor es mucho más pequeño que lo que dicen todas las estimaciones. Según las estimaciones que proporciona la teoría de cuerdas, la energía debería ser mucho mayor. Pero si lo fuera, esta energía simplemente no conduciría a la aceleración de las supernovas que tanto costó medir. Y si la energía de vacío fuera grande, el universo se habría colapsado hace tiempo (en el caso de que fuera negativa) o que se habría expandido rápidamente hacia la nada (en el caso de que fuera positiva).

La teoría de cuerdas debe aún explicar por qué la energía de vacío del universo es todo lo pequeña que sabemos que ha de ser. Tampoco la física de partículas tiene respuesta para este problema. Sin embargo, y al contrario que la teoría de cuerdas, la física de partículas no pretende ser una teoría de la gravedad cuántica: es menos ambiciosa. Un modelo de física de partículas que no pueda explicar la energía es insatisfactoria, pero una teoría de cuerdas que dé una energía errónea quedaría descartada.

La cuestión de por qué la densidad de energía es tan minúscula constituye un problema que está enteramente sin resolver. Algunos físicos piensan que no hay una auténtica explicación. Aunque la teoría de cuerdas es una única teoría con un único parámetro —la tensión de la cuerda pulsada—, los especialistas en teoría de cuerdas todavía no pueden usarla para predecir la mayoría de las características del universo. Casi todas las teorías físicas contienen principios físicos que permiten decidir cuáles de las muchas configuraciones físicas posibles predeciría, de hecho, una teoría. Por ejemplo, la mayor parte de los sistemas se instalarán en la configuración que tiene la energía más baja. Pero este criterio no parece funcionar en la teoría de cuerdas, que da la impresión de ser capaz de producir una infinidad de configuraciones diferentes que no tienen la misma energía de vacío. Y no

sabemos cuál de ellas, si ha de haber alguna, ha de ser la preferida.

Algunos especialistas de la teoría de cuerdas ya no tratan de encontrar una teoría única. Miran los posibles tamaños y formas de las dimensiones que están enrolladas y las diferentes opciones para la energía que podría contener un universo, y concluyen que lo único que puede hacer la teoría de cuerdas es delinear un panorama que describa el enorme número de posibles universos en los que podríamos vivir. Estos especialistas no creen que la teoría de cuerdas prediga de manera única la energía de vacío. Creen que el cosmos alberga muchas regiones inconexas entre sí con valores diferentes para la energía de vacío, y que nosotros vivimos en la porción del cosmos que contiene el valor correcto. De los muchos universos posibles, sólo podría albergarnos (y así lo hace) el único que puede producir estructura. Estos físicos piensan que vivimos en un universo con un valor tan increíblemente improbable de la energía de vacío porque cualquier otro valor más grande hubiera imposibilitado la formación de galaxias y de estructura en el universo, y, por lo tanto, también nuestra propia existencia.

Este razonamiento tiene un nombre: el principio antrópico. El principio antrópico difiere sustancialmente del propósito original de la teoría de cuerdas, que consistía en predecir todas las características del universo. Dice que no hay necesidad de explicar el pequeño valor de la energía. Existen universos inconexos con muchos posibles valores de la energía de vacío, pero vivimos en uno de los pocos en los que pueden formarse estructuras. El valor de la energía en este universo es ridículamente pequeño y sólo algunas versiones excepcionales de la teoría de cuerdas predeciría este valor minúsculo, pero es que únicamente podríamos existir en un universo con una energía minúscula. Este principio podría ser desmentido por progresos futuros o quizá podría verse confirmado por investigaciones más detenidas. Sin embargo, y por desgracia, será difícil (acaso imposible) de verificar. Un mundo en el que el principio antrópico es la respuesta constituiría una perspectiva ciertamente decepcionante y no muy satisfactoria.

En todo caso, la teoría de cuerdas en su estado actual de desarrollo ciertamente no predice las características del mundo, a pesar de ser una única teoría en su formulación subyacente. De nuevo nos vemos frente a la cuestión de cómo conectar una bonita teoría simétrica con las realidades físicas de nuestro universo. La formulación más sencilla de la teoría es demasiado simétrica: muchas dimensiones y muchas partículas y fuerzas, que sabemos que han de ser diferentes, aparecen en pie de igualdad. Y para hacer la conexión con el modelo estándar y el mundo que vemos, este orden inmenso tiene que alterarse. Después de romperse la simetría, la teoría de cuerdas solo puede manifestarse bajo aspectos diversos, según cuál de las simetrías se han roto, qué partículas se hagan pesadas y qué dimensiones se destaquen.

Es como si la teoría de cuerdas fuera un traje magníficamente diseñado, pero que no sienta bien. En su estado actual, puede uno colgarlo en una percha y admirar sus bellas puntadas y su diseño intricadamente urdido —es realmente bonito—, pero uno no puede ponérselo antes de hacer los arreglos necesarios. Nos gustaría que la teoría de cuerdas acomodase todo lo que sabemos sobre el mundo. Pero la «talla única» raramente le sienta bien a alguien. Ahora

mismo ni siquiera sabemos si disponemos de los instrumentos adecuados para cortar correctamente el traje de la teoría de cuerdas.

Como no sabemos realmente todas las implicaciones de la teoría y no está claro que alguna vez las sepamos, algunos físicos, sencillamente, definen la teoría de cuerdas como algo que resuelve la paradoja de la mecánica cuántica y la relatividad general a distancias pequeñas. Ciertamente, la mayoría de los especialistas de la teoría de cuerdas creen que la teoría de cuerdas y la teoría correcta son una misma cosa, o que al menos están muy íntimamente ligadas.

Está claro que queda mucho por descubrir. Todavía es muy pronto para discernir los méritos definitivos de una descripción del mundo basada en la teoría de cuerdas. Quizá una maquinaria matemática más elaborada permita a los físicos comprender de verdad la teoría de cuerdas o quizá las ideas físicas que se saquen aplicando las implicaciones de la teoría de cuerdas al universo que nos rodea proveerán las pistas cruciales. Abordar con éxito los problemas que están sin resolver en la teoría de cuerdas parece requerir un enfoque fundamentalmente nuevo, que rebasa la capacidad de las herramientas desarrolladas hasta ahora por los matemáticos y los físicos.

Pero, a pesar de todo, la teoría de cuerdas es una teoría notable. Nos ha llevado ya a ideas importantes sobre la gravedad, las dimensiones y la teoría cuántica de campos, es la mejor candidata que conocemos para encarnar una teoría consistente de la gravedad cuántica. Además, la teoría de cuerdas ha llevado a progresos matemáticos increíblemente hermosos. Pero los especialistas de la teoría de cuerdas tienen todavía que cumplir las promesas, hechas en los años ochenta, de conectar la teoría de cuerdas con el mundo. Aún no conocemos la mayor parte de las implicaciones de la teoría de cuerdas.

En justicia, las cuestiones planteadas por la física de partículas tampoco fueron aclaradas de inmediato. Muchos de los problemas de la física de partículas conocidos en los años ochenta no han sido resueltos todavía. Entre ellos está la cuestión de explicar el origen de las masas dispares de las partículas elementales y la de determinar la solución correcta del problema de la jerarquía. Además, los diseñadores de modelos están todavía esperando las pistas experimentales que nos digan cuál es, entre la miríada de posibilidades que hay, la que describe correctamente la física más allá del modelo estándar. Hasta que no exploremos energías superiores a un TeV, probablemente no sepamos con certeza las respuestas a las cuestiones que más nos preocupan.

Hoy día, tanto la comunidad de la teoría de cuerdas como la de los físicos de partículas tienen una visión más equilibrada de su nivel de comprensión que la que tenían en los años ochenta. Estamos tratando de abordar cuestiones difíciles y las respuestas tardarán en llegar. Pero son tiempos apasionantes y, a pesar de haber tantos problemas abiertos (o quizá gracias a que ello), hay buenas razones para ser optimista. Los físicos tienen ahora un mejor dominio de las muchas consecuencias tanto de la física de partículas como de la teoría de cuerdas, y de entre ellos, quienes son de amplias miras están hoy ahí para aprovechar los logros de ambas escuelas. Éste es el punto medio en el que algunos físicos colegas míos y yo misma preferimos situarnos, punto que ha

conducido, por lo demás, a muchos de los fascinantes resultados con los que pronto vamos a encontrarnos.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•El gravitón es la partícula que transmite la fuerza gravitatoria, así como el fotón transmite la fuerza electromagnética.

•Según la teoría de cuerdas, los objetos fundamentales del mundo son las *cuerdas* , no las partículas puntuales.

•Los modelos posteriores de dimensiones extras no usarán explícitamente la teoría de cuerdas; a distancias superiores a la minúscula longitud de Planck (10^{-33} cm), la física de partículas es suficiente.

•En cualquier caso, la teoría de cuerdas es importante para la física de partículas, incluso a bajas energías, debido a los nuevos conceptos e instrumentos analíticos que introduce.

15

PASILLOS SECUNDARIOS:

EL DESARROLLO DE LAS BRANAS

Insane in the membrane

Insane in the brain.

[Loco en la membrana. | Loco en el cerebro].

CYPRESS HILL

Ike Rushmore XLII decidió sumirse de nuevo en la diminuta escala de Planck. Felizmente, su Alicxvr con la potencia aumentada funcionó perfectamente y llegó sin problemas a un universo de dimensión diez lleno de cuerdas. Ávido de explorar su nuevo entorno, Ike conectó el accesorio de hiperpropulsión que acababa de comprar en Gbay. Contempló, fascinado, cómo las cuerdas chocaban entre sí y se enredaban de manera hipnotizante.

Aunque a Ike le preocupaba que su Alicxvr se averiase, sentía curiosidad por saber más sobre este mundo nuevo. Así que aumentó la presión en el mando de hiperpropulsión. Al principio, las cuerdas chocaban con más frecuencia todavía. Pero cuando apretó el mando un poco más, entró en un entorno nuevo, completamente irreconocible. Ike no podía ni siquiera decir si el espacio-tiempo seguía intacto. Pero continuó presionando el mando de hiperpropulsión y, cosa bastante extraña, logró salir ileso[M26] .

Sin embargo, lo que le rodeaba era ahora completamente diferente. Ike ya no estaba en el universo de dimensión diez al que había llegado. Se hallaba, por el contrario, en un universo de dimensión once lleno de partículas y branas. Y, por extraño que pareciera, nada en este universo nuevo interactuaba mucho. Cuando Ike volvió a mirar sus mandos, descubrió que la palanca de hiperpropulsión se había colocado de nuevo misteriosamente, en su posición más baja. Confundido y bastante irritado, Ike oprimió la palanca otra vez y se encontró nuevamente en el punto de partida. Cuando comprobó los mandos, descubrió que la palanca de hiperpropulsión se había colocado una vez más en su posición baja.

Ike pensó que probablemente su Alicxvr tenía alguna avería. Pero cuando revisó su manual, que estaba puesto al día, descubrió que su aparato funcionaba perfectamente: la hiperpropulsión alta en la teoría de cuerdas de dimensión diez era lo mismo que la hiperpropulsión baja en un mundo alternativo de dimensión once. Y viceversa.

El manual no decía lo que pasaría cuando la hiperpropulsión no estuviera ni

muy alta ni muy baja, así que Ike entró en la red espacial y se apuntó en la lista de espera para comprar la versión mejorada que resolvería el problema. Pero los diseñadores del Alicxvr sólo prometían que la fecha de salida sería algún día del milenio.

En el mundo de la física de hoy, podríamos decir que «teoría de cuerdas» es un nombre inapropiado para esta teoría. De hecho, el físico teórico Michael Duff se refiere en plan jocoso a ella mediante la expresión «la teoría que antes se conocía como teoría de cuerdas». La teoría de cuerdas ya no es exactamente la teoría de las cuerdas que se despliegan en una dirección espacial, sino también la teoría de las branas que pueden desplegarse en dos, tres o más dimensiones[M27] . Ahora sabemos que las branas, que pueden desplegarse en cualquier número de dimensiones, mientras éste no supere el número que contenga la teoría de supercuerdas, forman parte de la teoría de supercuerdas con el mismo derecho que las cuerdas mismas. Los físicos teóricos las dejaron a un lado al principio porque estudiaron las cuerdas cuando el «indicador» de la intensidad de interacción entre las cuerdas estaba en posición baja y las interacciones entre branas eran menos importantes. Las branas resultaron ser la pieza que faltaba para completar milagrosamente varios rompecabezas.

En este capítulo, describiré la evolución de las branas, que empezaron como una curiosidad divertida y poco seria y acabaron siendo actrices principales en la historia de la teoría de cuerdas. Vamos a ver los caminos diversos por los que las branas ayudaron a resolver algunos aspectos desconcertantes de la teoría de cuerdas, mediada ya la década de 1990. Las branas ayudaron a los físicos a comprender el origen de partículas misteriosas en la teoría de cuerdas que de ningún modo podían proceder de las cuerdas. Y cuando los físicos dieron paso a las branas, descubrieron las *teorías duales* : parejas de teorías que parecen muy diferentes entre sí, pero que tienen las mismas consecuencias físicas. La historia de más arriba se refiere a un ejemplo destacado de dualidad que este capítulo explorará: una equivalencia entre la teoría de supercuerdas de dimensión diez y la supergravedad de dimensión once, una teoría en la que hay branas pero no cuerdas.

En este capítulo se introducirá también la *teoría M* , una teoría de dimensión once que abarca tanto la teoría de cuerdas como la supergravedad de dimensión once, y cuya existencia fue inferida usando las ideas de las branas. Nadie sabe realmente de dónde viene la *M* —el inventor del término, Edward Witten, la dejó deliberadamente en la ambigüedad— pero entre las explicaciones sugeridas se encuentran las que señalan que proviene de *membrana* , *magia* y *misterio* . En este punto, sólo voy a decir que la teoría M es todavía una «*Missing theory* »: una teoría ausente, que se postula como cierta, pero que no se comprende todavía del todo. Sin embargo, aunque la teoría M deja aún muchas cuestiones sin contestar, los avances realizados con las branas revelaron conexiones teóricas que exigieron de la teoría M una estructura más compleja y más abarcadora. Por eso los que se dedican a la teoría de cuerdas siguen estudiándola hoy.

Este capítulo pone al día la descripción de la teoría de cuerdas que inició sus pasos en la década de 1980, presentando algunos aspectos del punto de vista más moderno que los físicos desarrollaron en la década de 1990. Mucho de

este material no será fundamental para las aplicaciones de las branas a la física de partículas y las conjeturas posteriores sobre los mundos brana no se basarán explícitamente en ninguno de los fenómenos descritos más adelante. El lector puede sentirse, por lo tanto, libre de saltarse esta parte si así lo desea. Pero, asimismo, puede aprovechar esta oportunidad para familiarizarse con algunos de los notables desarrollos de la teoría de cuerdas que fueron en gran parte responsables de colocar firmemente a las branas en el mapa teórico de la teoría de cuerdas.

Branas nacientes

En el capítulo 3 vimos que las branas se extienden por algunas de las dimensiones del espacio, pero no necesariamente por todas. Por ejemplo, una brana podría extenderse sólo por tres dimensiones del espacio, incluso si el espacio del bulto contiene muchas más. Las dimensiones extras podrían extinguirse en las branas; en otras palabras, las branas pueden acotar el espacio extradimensional. También sabemos que una brana puede alojar partículas que se mueven solamente a lo largo de sus dimensiones. Aunque hubiera muchas dimensiones espaciales adicionales, las partículas confinadas a una brana se moverían sólo a lo largo de la región más limitada ocupada por esa brana; no serían libres para explorar el bulto extradimensional completo.

Vamos a ver ahora que las branas son algo más que una simple localización en el espacio: son objetos por derecho propio. Las branas son como membranas, y, al igual que las membranas, son objetos reales. Las branas pueden estar flojas, y en ese caso pueden contonearse y moverse, o pueden estar tensas, y entonces lo probable es que se mantengan quietas. Y pueden portar cargas e interactuar mediante fuerzas. Además, influyen en el comportamiento de las cuerdas y de otros objetos. Todas estas propiedades nos dicen que las branas son esenciales para la teoría de cuerdas; cualquier formulación consistente de la teoría de cuerdas ha de incluir las branas.

En 1989, Jin Dai, Rob Leigh y Joe Polchinski, todos ellos en la Universidad de Texas, y, de manera independiente, el físico checo Petr Hořava descubrieron matemáticamente un tipo particular de brana llamada brana D en las ecuaciones de la teoría de cuerdas. Mientras que las cuerdas cerradas se cierran sobre sí mismas, las cuerdas abiertas tienen dos cabos libres. Estos cabos tienen que estar en algún sitio, y en la teoría de cuerdas la localización permitida para los extremos de las cuerdas abiertas son las branas D (la *D* se refiere a Peter Dirichlet, un físico alemán del siglo XIX). El bulto puede contener más de una brana, de modo que no todas las cuerdas terminan necesariamente en la misma brana. Pero Polchinski, Dai, Leigh y Hořava descubrieron que todas las cuerdas abiertas han de terminar en branas, y la teoría de cuerdas nos dice qué dimensiones y qué propiedades tendrán estas branas.

Algunas branas se extienden por tres dimensiones, pero otras lo hacen por cuatro, cinco o más dimensiones. De hecho, la teoría de cuerdas contiene branas que se extienden en cualquier número de dimensiones, hasta nueve. El convenio de la teoría de cuerdas para etiquetar las branas consiste en usar el número de dimensiones del espacio —no del espacio-tiempo— por las que se extienden. Por ejemplo, una 3-brana es una brana que se extiende a lo largo

de las tres dimensiones del espacio (pero por las cuatro del espacio-tiempo). Cuando nos toque examinar las consecuencias de las branas en el mundo visible, las 3-branas serán muy importantes. Sin embargo, para las aplicaciones de las branas discutidas en este capítulo, las branas con otro número de dimensiones también desempeñarán un cierto papel.

En la teoría de cuerdas surgen distintos tipos de branas. Se distinguen no sólo por su dimensionalidad —el número de dimensiones por las que se extienden —, sino también por sus cargas, su forma y una característica importante que se llama *tensión* (a la que llegaremos enseguida). No sabemos si las branas existen en el mundo real, pero sí conocemos los tipos de branas que son posibles según la teoría de cuerdas.

Las branas no eran más que una curiosidad en el momento en el que fueron descubiertas. Entonces nadie vio ninguna razón para considerar branas que interactuasen o que se moviesen. Si las cuerdas interactuaran sólo débilmente, como supusieron los teóricos de las cuerdas inicialmente, las branas D se encontrarían tan tensas que simplemente estarían ahí y no contribuirían de ningún modo al movimiento o a las interacciones de las cuerdas. Y si las branas no respondieran a las cuerdas en el bulto, serían sencillamente una complicación innecesaria. Serían un lugar o localización, pero serían tan irrelevantes para los movimientos o las interacciones de las cuerdas como lo es la Gran Muralla China para nuestra existencia cotidiana. Además, los físicos no querían incluir las branas en la realización física de la teoría de cuerdas porque las branas violaban su intuición de que todas las dimensiones son creadas iguales. Las branas distinguen ciertas dimensiones —las que se extienden con la brana son diferentes de las que quedan fuera de ella—, mientras que las leyes conocidas de la física tratan todas las direcciones igual. ¿Por qué la teoría de cuerdas habría de ser diferente?

También esperamos que la física sea en un punto dado del espacio la misma que en cualquier otro. Pero las branas tampoco respetan esta simetría. Aunque las branas se extienden hasta el infinito en algunas dimensiones, están situadas en una posición fija en las otras direcciones. Por eso no ocupan todo el espacio. Pero en aquellas direcciones en las que la posición de la brana es fija, no es lo mismo estar a un palmo de la brana que estar a cien metros o a medio kilómetro. Imaginémonos una brana que esté empapada de perfume. Seguro que podríamos decir si estamos lejos o cerca de ella.

Por estas razones, los especialistas de la teoría de cuerdas ignoraron al principio las branas. Pero aproximadamente cinco años después de ser descubiertas, su estatus en la comunidad teórica aumentó espectacularmente. En 1995, Joe Polchinski cambió el curso de la teoría de cuerdas irreversiblemente cuando mostró que las branas eran objetos dinámicos que formaban parte integrante de la teoría de cuerdas y que muy posiblemente desempeñarían un papel crucial en su formulación definitiva. Polchinski explicó qué tipos de branas D están presentes en la teoría de supercuerdas y demostró que estas branas portan carga[M28] y que, por lo tanto, interactúan.

Además, las branas de la teoría de cuerdas tienen una tensión finita. La tensión de una brana es análoga a la tensión de la superficie de un tambor, que vuelve a su posición tensa después de aplastarla o tirar de ella. Si la

tensión de una brana fuera cero, cualquier pequeño contacto con ella tendría enormes efectos, ya que la brana no ofrecería resistencia alguna. Por el contrario, si la tensión de una brana fuera infinita, no podríamos ejercer ningún efecto sobre ella de buenas a primeras, porque se trataría de un objeto estático, no dinámico. Como la tensión de las branas es finita, las branas pueden moverse y fluctuar y responder a las fuerzas, al igual que cualquier otro objeto cargado.

La tensión finita de las branas y su carga no nula nos dicen que no son meramente sitios, sino que son también cosas: sus cargas nos dicen que interactúan y su tensión finita nos dice que se mueven. Como un trampolín —una superficie que interactúa con su entorno cuando se la presiona y se la suelta—, una brana puede moverse e interactuar. Por ejemplo, tanto los trampolines como las branas pueden deformarse. Y tanto los trampolines como las branas pueden influir sobre su entorno, los trampolines lanzando gente y aire, y las branas lanzando objetos cargados y campo gravitatorio.

Si existen las branas en el cosmos, su violación de las simetrías del espacio-tiempo no debería ser más molesta que la violación de las simetrías espaciales causada por el Sol o la Tierra. El Sol y la Tierra están también situados en localizaciones concretas; cuando se miden con respecto al Sol o a la Tierra, no todas las posiciones del espacio tridimensional son las mismas. No obstante, las leyes físicas preservan las simetrías del espacio-tiempo del espacio tridimensional, aunque no lo haga el estado del universo. En este aspecto, las branas no serían peores que el Sol o la Tierra. Las branas, como los demás objetos que se encuentran en puntos determinados del espacio, rompen algunas de las simetrías del espacio-tiempo.

Si reflexionamos un momento, veremos que esto no es tan malo. En definitiva, si la teoría de cuerdas es la verdadera descripción de la naturaleza, entonces no todas las dimensiones se crean igual. Las tres dimensiones espaciales usuales parecen iguales, pero las dimensiones extras tienen que ser distintas; si no lo fueran, no serían «extras». Desde el punto de vista privilegiado del universo físico, la violación de las simetrías del espacio-tiempo podría ayudar a explicar por qué las dimensiones extras son diferentes: las branas podrían distinguir correctamente las dimensiones extras de la teoría de cuerdas de las tres dimensiones espaciales que experimentamos y conocemos.

En capítulos posteriores consideraré branas con tres dimensiones espaciales y describiré algunas de sus radicales implicaciones en potencia para el mundo real. Pero en el resto del capítulo me concentraré en el asunto de por qué las branas son tan significativas en la teoría de cuerdas: tan importantes, de hecho, que catalizaron la «segunda revolución de las supercuerdas» de 1995. La sección siguiente da algunas razones de por qué las branas han permanecido al frente de la teoría de cuerdas durante la última década y por qué pensamos ahora que han llegado para quedarse.

Las branas maduras y las partículas ausentes

Mientras Joe Polchinski trabajaba intensamente investigando las branas D, Andy Strominger, entonces colega suyo en Santa Bárbara, examinaba las *branas p* , soluciones fascinantes de las ecuaciones de Einstein. Se extienden

hasta el infinito en algunas direcciones espaciales, pero en las direcciones restantes actúan como agujeros negros, atrapando a los objetos que se acercan demasiado. Las branas D, por otra parte, son superficies en las que se acaban las cuerdas abiertas.

Andy me contó cómo Joe y él discutían sobre los avances de sus investigaciones todos los días, después de comer. Andy hablaba de las branas *p* y Joe peroraba sobre las branas D. Aunque los dos estaban estudiando las branas, al principio pensaron, como todos los demás físicos, que esos dos tipos de branas eran cosas completamente diferentes. Joe descubrió finalmente que no lo eran.

El trabajo de Andy demostró que las branas *p* que estaba estudiando eran de una importancia crucial en la teoría de cuerdas porque en algunas geometrías del espacio-tiempo producían nuevos tipos de partículas. Incluso si la notable y nada intuitiva premisa de la teoría de cuerdas es cierta y las partículas surgen como modos de oscilación de las cuerdas, las oscilaciones de las cuerdas no explican necesariamente todas las partículas. Andy probó que podrían existir partículas adicionales que surgen independientemente de las cuerdas.

Hay branas de diferentes aspectos, formas y tamaños. Aunque hemos insistido en que las branas son los sitios donde terminan las cuerdas, las branas mismas son objetos independientes que pueden interactuar con su entorno. Andy consideró las branas *p* que envuelven una región enrollada minúscula del espacio y descubrió que estas branas fuertemente envueltas pueden actuar como partículas. Una brana *p* envuelta que actúa como una partícula puede compararse con un lazo muy apretado. Al igual que un lazo de cuerda se hace pequeño cuando se le aprieta mucho alrededor de un poste o del cuerno de un toro, una brana puede envolver una región compacta del espacio. Y si esa región del espacio es diminuta, entonces la brana que la envuelve será también igual de diminuta.

Estas branas pequeñas, como los objetos macroscópicos más familiares, tienen una masa que crece con su tamaño. Más de lo mismo (ya se trate de tubos de plomo, de porquería o de fresas) pesa más y menos de lo mismo pesa menos. Una brana que envuelve una región minúscula del espacio, al ser tan pequeña, será también extremadamente ligera. Y los cálculos de Andy mostraron que en el caso extremo en el que la brana es todo lo minúscula que uno pueda imaginar, esta brana diminuta parece ser una nueva partícula sin masa. El resultado de Andy fue crucial porque probó que incluso la hipótesis más básica de la teoría de cuerdas —que todo surge de las cuerdas— no siempre es correcta. Las branas también contribuyen al espectro de partículas.

La notable observación de Joe de 1995 fue que estas nuevas partículas que surgen de las branas *p* minúsculas podían también explicarse con las branas D. De hecho, en el artículo suyo en el que establece la relevancia de las branas D, Joe mostró que las branas D y las branas *p* eran, de hecho, una misma cosa. En las energías a las que la teoría de cuerdas hace las mismas predicciones que la relatividad general, las branas D se transforman en branas *p* . Joe y Andy, aunque no se dieron cuenta al principio, habían estado

estudiando, de hecho, los mismos objetos. Este resultado implicó que el significado de las branas D no podía ser puesto en cuestión más tiempo: eran tan importantes como las branas *p* que las habían precedido, y esas branas *p* eran esenciales para el espectro de partículas de la teoría de cuerdas. Además, hay una manera muy bonita de comprender por qué las branas *p* son equivalentes a las branas D. Se basa en la importante y sutil noción de *dualidad* .

Las branas maduras y la dualidad

La dualidad es uno de los conceptos más fascinantes de los últimos diez años en la física de partículas y la teoría de cuerdas. Ha desempeñado un papel muy importante en los avances recientes de la teoría cuántica de campos y también en los de la teoría de cuerdas y, como pronto veremos, tiene consecuencias especialmente importantes en las teorías con branas.

Dos teorías son duales cuando se trata de una misma teoría con descripciones diferentes. En 1992 el físico indio Ashoke Sen fue uno de los primeros en reconocer la dualidad en la teoría de cuerdas. En sus trabajos, en los que siguió la idea de dualidad que los físicos Claus Montonen y David Olive habían introducido en 1977, mostró que una teoría determinada seguía siendo exactamente la misma cuando se intercambiaban entre sí las partículas y las cuerdas de la teoría. En la década de 1990, el físico Nati Seiberg, nacido en Israel y que estaba entonces en la Universidad de Rutgers, también exhibió dualidades notables entre diferentes teorías supersimétricas de campos con fuerzas superficialmente distintas.

Para comprender la importancia de la dualidad, ayuda saber un poco cómo generalmente efectúan los cálculos los especialistas de la teoría de cuerdas. Las predicciones de la teoría de cuerdas dependen de la tensión de la cuerda. Pero también dependen del valor de un número que se llama *acoplamiento de cuerdas* , que determina la intensidad con la que las cuerdas interactúan. ¿Pasan de largo, apenas rozándose, lo cual corresponde a un acoplamiento débil, o tienen una gran connivencia sobre sus respectivos destinos, lo cual corresponde a un acoplamiento fuerte? Si supiéramos el valor del acoplamiento de las cuerdas, podríamos estudiar la teoría de las cuerdas sólo para ese valor particular. Pero como no sabemos todavía el valor del acoplamiento de las cuerdas, solamente hay esperanzas de comprender la teoría cuando podamos hacer predicciones para cualquier intensidad de interacción entre las cuerdas. Entonces podríamos descubrir cuál es la que funciona.

El problema es que, ya desde el comienzo de la teoría de cuerdas, la teoría de los acoplamientos fuertes pareció ser intratable. En la década de 1980 solamente se comprendió la teoría de cuerdas con cuerdas que interactuaban débilmente. (Uso aquí el adjetivo *débil* para describir la intensidad de las interacciones entre las cuerdas, pero no nos dejemos llevar por las palabras: esto no tiene nada que ver con la fuerza débil). Cuando las cuerdas interactúan muy fuertemente, es sumamente difícil calcular cualquier cosa. Igual que resulta mucho más fácil desatar un nudo que está flojo que uno que está muy apretado, una teoría en la que sólo hay interacciones débiles es mucho más manejable que una teoría con interacciones fuertes. Cuando las

cuerdas interactúan unas con otras muy fuertemente, pueden convertirse en una maraña inextricable que es muy difícil de desenredar. Los físicos han probado diversos procedimientos ingeniosos para abordar los cálculos donde aparecen cuerdas con interacciones fuertes, pero no han encontrado métodos que pudieran aplicarse útilmente al mundo real.

De hecho, no sólo la teoría de cuerdas, sino todas las ramas de la física resultan más fáciles de comprender cuando las interacciones son débiles. Esto es porque si la interacción débil es sólo una pequeña *perturbación* , o alteración, en una teoría resoluble —normalmente una teoría en la que no hay interacciones—, entonces podemos usar una técnica que se llama *teoría de perturbaciones* . La teoría de perturbaciones nos permite acercarnos sigilosamente a la respuesta de una cuestión en la teoría con interacciones débiles partiendo de la teoría sin interacciones y calculando pequeñas mejoras en pasos sucesivos. La teoría de perturbaciones es un procedimiento sistemático que nos dice cómo refinar un cálculo en pasos sucesivos hasta que alcanzamos el nivel deseado de precisión (o hasta que nos cansamos, lo que ocurra antes).

Valerse de la teoría de la perturbación para aproximar una cantidad en una teoría insoluble podría compararse al hecho de mezclar pintura para llegar al color deseado. Supongamos que nos estamos esforzando en conseguir un azul sutil con una pizca de verde que recuerde el Mediterráneo en el apogeo de su belleza. Podríamos empezar por azul y después ir mezclándolo con cantidades cada vez más pequeñas de verde, alternando de vez en cuando con un poco más de azul, hasta que consigamos (casi) el color preciso que buscamos. Perturbar la mezcla de pintura de este modo es un método de procedimiento por etapas para obtener una aproximación lo más cercana que queramos del color deseado. Análogamente, la teoría de la perturbación es un método para aproximar estrechamente la respuesta correcta de cualquier problema que estemos estudiando, haciendo progresos sucesivos, a partir de un problema que ya sabemos cómo resolver.

Tratar de encontrar la respuesta a un problema sobre una teoría con acoplamientos fuertes, por otro lado, se parece más a tratar de reproducir una pintura de Jackson Pollock vertiendo al azar pintura sobre el lienzo. Cada vez que vertiéramos pintura, el resultado cambiaría completamente. Nuestra obra no se parecería más al resultado apetecido después de veinte iteraciones que después de sólo ocho iteraciones. De hecho, cada vez que arrojáramos pintura, quiera que no, taparíamos una gran parte de nuestro intento anterior, cambiando el cuadro tanto que, esencialmente, sería como si estuviéramos partiendo de cero cada vez.

La teoría de la perturbación es igual de inútil cuando una teoría resoluble está perturbada por interacciones fuertes. Como ocurre con los esfuerzos fútiles para reproducir una obra maestra moderna hecha de salpicaduras, los intentos sistemáticos de aproximar una cantidad de interés en una teoría con interacciones fuertes no triunfarán. La teoría de la perturbación es útil y los cálculos están bajo control solamente cuando las interacciones son débiles.

A veces, en algunas situaciones excepcionales, aun cuando sea inútil la teoría de la perturbación, podemos entender todavía las propiedades cualitativas de

una teoría con interacciones fuertes. Por ejemplo, la descripción física de nuestro sistema podría parecerse, a grandes rasgos, a la teoría con interacciones débiles aunque los detalles sean probablemente bastante diferentes. Sin embargo, es más frecuente que resulte imposible decir nada sobre una teoría con interacciones fuertes. Incluso las propiedades cualitativas de un sistema con interacciones fuertes suelen ser completamente diferentes de las de un sistema con interacciones débiles que sea superficialmente parecido.

Así que hay dos cosas que podríamos esperar de la teoría de cuerdas de dimensión diez con interacciones fuertes. Podríamos pensar que nadie está en condiciones de resolverla y que nos es imposible decir nada de ella, o podríamos esperar que se parezca, al menos a grandes rasgos, a la teoría de cuerdas con acoplamientos débiles. Paradójicamente, en algunos casos ninguna de estas dos opciones resulta ser correcta. En el caso de un tipo particular de teoría de cuerdas de dimensión diez llamada IIA, la cuerda con interacción fuerte no se parece en nada a la cuerda con interacción débil. Pero, sin embargo, podemos estudiar sus consecuencias porque es un sistema tratable en el que son posibles los cálculos.

En Cuerdas 95, un congreso celebrado en la Universidad de California del Sur en marzo de ese año, Edward Witten pasmó al público demostrando que, a bajas energías, una versión de la teoría de supercuerdas de dimensión diez con acoplamientos fuertes era completamente equivalente a una teoría que la mayoría de la gente habría pensado que es totalmente diferente: la supergravedad de dimensión once, la teoría supersimétrica de dimensión once que incluye la gravedad. Y los objetos en esta teoría equivalente de la supergravedad interactuaban débilmente, de modo que podía aplicarse de forma útil la teoría de la perturbación.

Esto implicaba, paradójicamente, que se podía usar la teoría de la perturbación para estudiar la teoría original de supercuerdas de dimensión diez con interacciones fuertes. No se usaría la teoría de la perturbación directamente en la teoría de cuerdas misma con interacciones fuertes, sino en una teoría en apariencia enteramente diferente: la supergravedad de dimensión once, con interacciones débiles. Este resultado extraordinario, que también había observado antes Paul Townsend, de la Universidad de Cambridge, implicaba que, a pesar de sus diferentes envoltorios, la teoría de supercuerdas de dimensión diez y la supergravedad de dimensión once eran, de hecho, la misma teoría. O, como dirían los físicos, eran duales.

Podemos ilustrar la idea de dualidad con la analogía de la pintura. Supongamos que empezáramos con pintura azul y la «perturbásemos» añadiendo verde. Una buena descripción de nuestra mezcla de pintura sería entonces pintura azul con un poco de verde. Pero, en vez de esto, supongamos que la pintura verde que añadimos no es una pequeña perturbación: supongamos que añadimos una enorme cantidad de pintura verde. Si esa cantidad excediera mucho la cantidad de pintura azul original, una descripción mejor, «dual», de la mezcla sería pintura verde con un poco de azul. La descripción preferida depende enteramente de las cantidades presentes de cada color.

Análogamente, una teoría podría tener una descripción cuando un acoplamiento de una interacción es pequeño. Pero cuando ese acoplamiento es suficientemente grande, la teoría de la perturbación ya no es útil en la descripción original. No obstante, en ciertas situaciones notables, la teoría original puede ser readaptada completamente, de modo que se pueda aplicar la teoría de la perturbación. Ésta sería la situación dual.

Es como si se nos presentase alguien con los ingredientes para una comida de cinco platos. Aunque tuviéramos todos los ingredientes, quizá no sabríamos por dónde empezar. Para conseguir que la comida funcione, tendríamos que comprender qué ingredientes están destinados a qué platos, cómo interactúan las especias con la comida y entre sí, y qué es lo que hay que cocinar y cuándo. Pero si los proveedores nos entregaran los mismos ingredientes previamente organizados y preparados para la ensalada, la sopa, el primer plato, el segundo plato y el postre, lo que se espera es que cualquiera se las arreglaría para convertirlos en una comida. Con los mismos ingredientes organizados del modo correcto, preparar una cena pasa de ser un problema complicado a ser un asunto trivial.

La dualidad en la teoría de cuerdas funciona así. Aunque la teoría de supercuerdas de dimensión diez con interacciones fuertes parecía completamente intratable, la descripción dual organiza automáticamente todo en una teoría en la que se puede aplicar la teoría de la perturbación. Los cálculos que son difíciles en una teoría resultan abordables en la otra. Incluso si los acoplamientos en una teoría son demasiado grandes para usar la teoría de la perturbación, los acoplamientos en la otra son lo suficientemente pequeños para permitirnos llevar a cabo cálculos de perturbaciones. Sin embargo, nos falta todavía comprender plenamente la dualidad. Por ejemplo, nadie sabe cómo calcular nada cuando el acoplamiento entre las cuerdas no es ni muy pequeño ni muy grande. Pero cuando uno de los acoplamientos es muy pequeño o muy grande (y el otro muy grande o muy pequeño, respectivamente), entonces podemos hacer cálculos.

La dualidad de la teoría de supercuerdas fuertemente acopladas y la teoría de la supergravedad de dimensión once con interacciones débiles nos dice que podemos calcular todo lo que nos gustaría saber en una teoría de supercuerdas de dimensión diez con interacciones fuertes realizando cálculos en una teoría que, superficialmente, es enteramente diferente. Todo lo que predice la teoría de supercuerdas de dimensión diez con interacciones fuertes puede sacarse de la teoría de la supergravedad de dimensión once con interacciones débiles.

La característica de esta dualidad que la vuelve tan increíble es que ambas descripciones hacen intervenir solamente *interacciones locales* , o sea, interacciones con objetos cercanos. Aunque los objetos correspondientes existen en ambas descripciones, la dualidad es sólo un fenómeno realmente sorprendente e interesante si ambas descripciones tienen interacciones locales. Al fin y al cabo, una dimensión es más que una colección de puntos: es un modo de organizar las cosas según estén cerca o lejos. Una memoria de ordenador podría contener todo lo que quiero saber y ser equivalente a un conjunto organizado de archivos y documentos, pero no se trataría de una

descripción sencilla, a menos que la información estuviera organizada coherentemente con la información relevante contigua. Las interacciones locales en la teoría de supercuerdas de dimensión diez y en la teoría de la supergravedad de dimensión once son las que hacen que las dimensiones en ambas teorías —y, por lo tanto, las teorías mismas— sean significativas y útiles.

La equivalencia entre la teoría de supercuerdas de dimensión diez y la supergravedad de dimensión once confirmó el acierto de Paul Townsend, en Cambridge, y Michael Duff, entonces en Texas A&M. Durante mucho tiempo, los especialistas de la teoría de cuerdas habían rechazado y hablado mal de sus trabajos sobre la supergravedad de dimensión once: no podían entender por qué Duff y Townsend estaban perdiendo el tiempo con esta teoría, siendo tan obvio que la teoría de cuerdas era la física del futuro. Tras la conferencia de Witten, los teóricos de las cuerdas tuvieron que reconocer que la supergravedad de dimensión once no sólo era interesante, sino que ¡era equivalente a la teoría de cuerdas!

Yo caí en la cuenta de la enorme atención que este sorprendente resultado sobre la dualidad estaba recibiendo cuando me encontraba en un avión en un viaje de regreso de Londres. Un compañero de asiento, que resultó ser concertista de rock, vio que estaba leyendo unos artículos de física. Dirigiéndose a mí, me preguntó si el universo tenía diez u once dimensiones. Me sentí un poco sorprendida. Pero sí le expliqué que, en cierto sentido, las dos afirmaciones eran válidas. Como la teoría de dimensión diez y la teoría de dimensión once son equivalentes, cualquiera de ellas puede considerarse correcta. El convenio es dar el número de dimensiones en cualquiera de las teorías que tenga cuerdas con interacciones débiles y, por lo tanto, un valor físico inferior del acoplamiento de las cuerdas.

Pero al contrario de lo que ocurre en el caso de los acoplamientos asociados a las fuerzas del modelo estándar, cuya intensidad podemos medir, no sabemos todavía la magnitud del acoplamiento de las cuerdas. Podría ser débil, y en ese caso la teoría de la perturbación puede aplicarse directamente, o podría ser fuerte, y entonces sería mejor usar la teoría de la perturbación en la descripción dual. Sin conocer el valor del acoplamiento de las cuerdas, no hay modo de saber cuál de las dos descripciones, si ha de corresponder esto a alguna de ellas, es el modo más sencillo de describir la teoría de cuerdas tal y como ésta se aplica al mundo[98] .

Y hubo más sorpresas sobre la dualidad en el encuentro Cuerdas 95. Hasta entonces, la mayoría de los especialistas de la teoría de cuerdas pensaban que había cinco versiones de la teoría de supercuerdas, cada una de las cuales contenía fuerzas e interacciones diferentes. En Cuerdas 95, Witten (y antes que él, Townsend y otro físico británico, Chris Hull) demostró que había dualidad entre algunas parejas de versiones de la teoría de supercuerdas. Y a lo largo de 1995 y 1996 los teóricos de las cuerdas mostraron que todas estas versiones de la teoría de dimensión diez eran duales entre sí y, además, duales de la supergravedad de dimensión once. La conferencia de Witten había desencadenado una auténtica revolución en la dualidad. Con la aportación extra de la naturaleza de las branas, se probó que las cinco teorías de supercuerdas aparentemente distintas eran la misma teoría con distintas

vestiduras.

Como las diversas versiones de la teoría de cuerdas son realmente una misma versión, Witten concluyó que tenía que existir una teoría única que englobase la supergravedad de dimensión once y las diferentes manifestaciones de la teoría de cuerdas, contuvieran o no sólo interacciones débiles. A la nueva teoría de dimensión once la llamó teoría M, la teoría que mencioné al principio de este capítulo. Se puede obtener cualquier versión conocida de la teoría de supercuerdas a partir de la teoría M. Pero la teoría M se extiende también, más allá de las versiones conocidas, a dominios que todavía nos falta comprender. La teoría M podría proporcionar una descripción más unificada y coherente de las supercuerdas y convertir en realidad la capacidad que tiene en potencia la teoría de cuerdas de ofrecer una teoría cuántica de la gravedad. Sin embargo, se precisan algunas piezas o estructuras más para que los teóricos de las cuerdas comprendan la teoría M con la profundidad suficiente para perseguir estos objetivos. Si las versiones conocidas de la teoría de supercuerdas son restos de cerámica sacados de una excavación arqueológica, la teoría M es el enigmático y codiciado artefacto que resultaría al ensamblar todos ellos. Nadie sabe todavía cuál es el mejor modo de formular la teoría M. Pero los especialistas de la teoría de cuerdas piensan que éste es su objetivo primordial.

Más sobre la dualidad

Esta sección da algunos detalles más sobre la dualidad concreta que mencioné más arriba, la que existe entre la teoría de supercuerdas de dimensión diez y la supergravedad de dimensión once. No utilizaré estas explicaciones posteriormente, así que el lector puede optar por pasar directamente, si quiere, al capítulo siguiente. Pero como éste es un libro sobre las dimensiones, no parece estar del todo fuera de lugar una digresión sobre la dualidad entre dos teorías con diferentes dimensiones.

Un aspecto que hace que la dualidad sea un poco más razonable es que una de las dos teorías siempre contiene objetos con interacciones fuertes. Si las interacciones son fuertes, sólo raramente podremos deducir directamente las implicaciones físicas de la teoría. Aunque es extraño pensar que una teoría que parece de dimensión diez pueda ser explicada mejor por otra teoría de dimensión once totalmente diferente, parece menos extraño cuando recordamos que nuestra teoría de dimensión diez contenía objetos con interacciones fuertes y que por eso no podíamos predecir de buenas a primeras lo que estaba pasando. Todas las apuestas estaban perdidas de antemano.

Hay, sin embargo, muchos aspectos desconcertantes en una dualidad entre teorías con un número diferente de dimensiones. Y en el caso particular de la dualidad entre la teoría de supercuerdas de dimensión diez y la supergravedad de dimensión once, parece haber a primera vista un problema en extremo básico. La teoría de supercuerdas de dimensión diez contiene cuerdas, mientras que la supergravedad de dimensión once no.

Los físicos usan branas para resolver este rompecabezas. Aunque la supergravedad de dimensión once no contenga cuerdas, contiene 2-branas.

Pero, contrariamente a las cuerdas, que tienen solamente una dimensión espacial, las 2-branas tienen dos (como es fácil de suponer). Ahora bien, supongamos que una de las once dimensiones está enrollada en un círculo sumamente diminuto. En ese caso, una 2-brana que rodee la dimensión circular enrollada parece justamente una cuerda. La brana enrollada da la impresión de tener solamente una dimensión espacial, como ilustra la figura 69. Esto significa que la teoría de la supergravedad de dimensión once con una dimensión enrollada parece contener cuerdas, aunque la teoría original de dimensión once no las contenga.

FIGURA 69. Una brana con dos dimensiones espaciales que esté enrollada alrededor de un círculo muy pequeño parece una cuerda.

Esto podría sonar como una especie de timo, porque hemos argumentado ya que una teoría con una dimensión enrollada siempre parece tener menos dimensiones a largas distancias y bajas energías, así que no deberíamos sorprendernos de descubrir que una teoría de dimensión once con una dimensión enrollada actúe como una teoría de dimensión diez. Si queremos demostrar que estas dos teorías, la una de dimensión diez y la otra de dimensión once, son equivalentes, ¿por qué sería suficiente estudiar la teoría de dimensión once cuando una de las dimensiones está enrollada?

La clave de la respuesta es que en el capítulo 2 solamente probamos que una dimensión enrollada es invisible a largas distancias o bajas energías. Edward Witten fue más lejos en el encuentro Cuerdas 95. Él demostró la equivalencia entre la teoría de dimensión diez y la de dimensión once al señalar que la supergravedad de dimensión once con una de las dimensiones enrollada es completamente equivalente a la teoría de supercuerdas de dimensión diez también a distancias cortas. Cuando una dimensión está enrollada, podemos seguir distinguiendo los puntos en distintas localizaciones a lo largo de esta dimensión si miramos desde más cerca. Witten probó que todo es equivalente en las teorías duales, incluso aquellas partículas que tienen energía suficiente para sondear distancias más pequeñas que el tamaño de la dimensión enrollada.

Todo lo que pasa en la teoría de la supergravedad de dimensión once con una dimensión enrollada, incluso a cortas distancias y en procesos y objetos con alta energía, tiene una contrapartida en la teoría de supercuerdas de dimensión diez. Además, la dualidad sigue siendo válida con una dimensión enrollada en un círculo de radio cualquiera, sin que importe lo grande que éste sea. Anteriormente, cuando hablamos de las dimensiones enrolladas, solamente argumentamos que una dimensión enrollada pequeña pasaría desapercibida.

Pero ¿cómo es posible que dos teorías con un número diferente de dimensiones sean la misma teoría? Al fin y al cabo, el número de dimensiones del espacio es el número de coordenadas que necesitamos para precisar la posición de un punto. La dualidad podría ser cierta sólo si la teoría de supercuerdas usase siempre un número adicional para describir los objetos puntuales.

La clave de la dualidad es que en la teoría de supercuerdas hay nuevas

partículas especiales que pueden identificarse unívocamente solamente especificando el valor del momento en nueve dimensiones espaciales y también el valor de una carga, mientras que en la supergravedad de dimensión once necesitamos conocer el momento en diez dimensiones espaciales. Obsérvese que aunque en un caso uno tenga nueve dimensiones y diez en la otra, en ambos casos necesitaríamos especificar diez números: nueve valores para el momento y una carga en un caso, y diez valores para el momento en el otro.

Las cuerdas ordinarias sin carga no se emparejan con ningún objeto de la teoría de dimensión once. Como necesitamos conocer once números para localizar un objeto en el espacio-tiempo de la teoría de dimensión once, solamente las partículas que portan carga tienen socias de dimensión once. Y las socias de las partículas de la teoría de dimensión once resultan ser branas: branas cargadas, de naturaleza puntual, que se llaman branas D0 (branas de dimensión cero). La teoría de cuerdas y la supergravedad de dimensión once son duales porque, para cada brana D0 con una carga dada en la teoría de supercuerdas de dimensión diez[99] , está la partícula correspondiente con un momento determinado de dimensión once. Y viceversa. Los objetos de la teoría de dimensión diez y los de la teoría de dimensión once (y también sus interacciones) concuerdan exactamente.

Aunque la carga podría parecer muy diferente del momento en una dirección determinada, si cada objeto con un momento determinado en la teoría de dimensión once concuerda con un objeto con una carga determinada en la teoría de dimensión diez (y viceversa), queda a nuestra elección llamar a ese número momento o carga. El número de dimensiones es el número de direcciones diferentes en las que un objeto puede viajar. Pero si el momento a lo largo de una de las direcciones puede sustituirse por una carga, el número de dimensiones no está realmente bien definido. La mejor elección está determinada por el valor del acoplamiento de las cuerdas.

Esta sorprendente dualidad fue uno de los primeros análisis en los que las branas demostraron ser imprescindibles. Las branas fueron los ingredientes adicionales que se precisaron para que las diferentes teorías de cuerdas concordasen entre sí. Pero la propiedad crucial de las branas de la teoría de cuerdas, importante por su aplicación en las teorías físicas, es el hecho de que pueden alojar partículas y fuerzas. El próximo capítulo explica por qué.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•La teoría de cuerdas tiene un nombre inapropiado: la teoría de cuerdas contiene también branas de dimensión superior. Las *branas D* son un tipo de branas de la teoría de cuerdas en las que las cuerdas abiertas (las cuerdas que no se cierran sobre sí mismas) han de terminar.

•Las branas desempeñaron un papel en muchos de los desarrollos importantes de la teoría de cuerdas de la última década.

•Las branas resultaron cruciales para demostrar la *dualidad* , que probó que versiones superficialmente diferentes de la teoría de cuerdas son, de hecho,

equivalentes.

•A bajas energías, la teoría de supercuerdas de dimensión diez es dual de la *supergravedad* de dimensión once, una teoría de dimensión once que engloba la supersimetría y la gravedad. Las partículas de una de las teorías concuerdan con las branas de la otra.

•Los resultados sobre branas de este capítulo no serán relevantes en adelante. Estos resultados, sin embargo, explican parte de la fascinación que suscitaron las branas en la comunidad de la teoría de cuerdas.

16

PASILLOS BULLICIOSOS:

LOS MUNDOS BRANA

Welcome to where time stands still.

No one leaves and no one will.

[Bienvenidos al país donde el tiempo se detiene. | Nadie se va de él y nadie se irá].

METALLICA

Ícaro III estaba cada vez más desilusionado del cielo. Había pensado que se trataría de un entorno liberal y condescendiente. Pero, por el contrario, estaba prohibido el juego, la cubertería metálica estaba vedada y ya no se permitía fumar. De todas las prohibiciones, la más restrictiva era la que atañía a la confinación del cielo en una brana: a los residentes de allí no les estaba permitido viajar en la quinta dimensión.

Todos los que vivían en la brana celestial sabían de la existencia de la quinta dimensión y de otras branas. De hecho, los estrictos habitantes de la brana celestial cotilleaban sobre los indeseables personajes confinados en una brana carcelaria que había no muy lejos de allí. Sin embargo, los habitantes de la brana carcelaria no podían oír las habladurías que los habitantes de la brana celestial divulgaban sobre ellos, así que todo seguía tranquilo en el bulto y en las branas.

Desde la perspectiva de la «revolución de la dualidad» podríamos pensar que las branas fueron una gran ayuda para la gente que estaba intentando conectar la teoría de cuerdas con el universo visible. Si todas las formulaciones diferentes de la teoría de cuerdas son, de hecho, una y la misma, los físicos ya no se verían abocados a la tarea abrumadora de descubrir las reglas mediante las cuales la naturaleza elige entre ellas. No es necesario buscar la favorita si todas las teorías de cuerdas que aparecen con diferentes vestiduras son realmente la misma.

Pero, por bonito que sería pensar que estamos próximos a descubrir la conexión entre la teoría de cuerdas y el modelo estándar, la tarea no es tan sencilla. Aunque las branas fueron cruciales para las dualidades que redujeron el número de las distintas manifestaciones de la teoría de cuerdas, de hecho, incrementaron el número de modos en que podría emerger el modelo estándar. Esto es así porque las branas pueden alojar partículas y fuerzas que los teóricos de las cuerdas no tuvieron en cuenta al desarrollar originalmente la teoría de cuerdas. A causa de las muchas posibilidades que

hay en lo que concierne a los tipos de branas que existen y dónde están situadas en el espacio de dimensión superior de la teoría de cuerdas, hay muchas maneras nuevas concebibles de materializar el modelo estándar en la teoría de cuerdas, maneras en las que nadie había pensado antes. Las fuerzas del modelo estándar no surgen necesariamente de una única cuerda fundamental: podrían ser, por el contrario, nuevas fuerzas que surgen de cuerdas extendidas por diferentes branas. Aunque las dualidades nos dicen que las cinco versiones originales de la teoría de supercuerdas son equivalentes, el número de mundos brana concebibles en la teoría de cuerdas es fabuloso.

El hallazgo de un único candidato de modelo estándar se presentaba igual de difícil que siempre. La euforia que la dualidad produjo entre los especialistas de la teoría de cuerdas se enfrió con esta convicción. Sin embargo, los que buscábamos nuevas ideas innovadoras para la física observable estábamos en la gloria. Con las nuevas posibilidades que tenían las partículas y las fuerzas de vivir confinadas en las branas, había llegado el momento de volver a pensar sobre el punto de partida de la física de partículas.

La propiedad de las branas que es esencial para sus posibles aplicaciones observables consiste en que pueden atrapar partículas y fuerzas. El propósito de este capítulo es dar al lector una idea de cómo funciona esto. Empezaremos explicando por qué las branas de la teoría de cuerdas retienen partículas y fuerzas. Consideraremos la idea de un mundo brana y el primer mundo brana conocido, que salió de la dualidad y la teoría de cuerdas. En los capítulos posteriores, pasaremos a examinar aquellos aspectos de los mundos brana y de sus posibles aplicaciones físicas que me parecen más fascinantes.

Partículas, cuerdas y branas

Como dice Ruth Gregory, una especialista de la relatividad general de la Universidad de Durham, las branas de la teoría de cuerdas vienen «cargadas hasta arriba» de partículas y fuerzas. Esto es, algunas branas siempre tienen partículas y fuerzas atrapadas en ellas. Como los gatos muy caseros que no se aventuran a salir de los muros de su domicilio, las partículas que están confinadas en las branas nunca se aventuran a salir de ellas. No pueden. Su existencia está basada en la presencia de las branas. Cuando se mueven, lo hacen sólo a lo largo de las dimensiones espaciales de la brana; y cuando interactúan, lo hacen sólo en las dimensiones espaciales ocupadas por la brana. Desde la perspectiva de las partículas confinadas en la brana, si no fuera por la gravedad o por las partículas del bulto con las que podrían interactuar, es como si el mundo sólo tuviera las dimensiones de la brana.

Veamos ahora cómo puede la teoría de cuerdas confinar partículas y fuerzas en branas. Imaginemos que hay una sola brana D, suspendida en algún lugar del universo de dimensión superior. Como, por definición, ambos extremos de una cuerda abierta han de estar en una misma brana D, esta brana D sería el sitio desde donde parten y en el que terminan todas las cuerdas abiertas. Los extremos de todas las cuerdas abiertas no estarían pegados en ningún punto en particular, pero tendrían que estar siempre en algún punto de la brana. Como los raíles del tren que confinan las ruedas pero les permiten, sin embargo, rodar, las branas actúan como superficies fijas en las que están

confinados los extremos de las cuerdas, pero sobre las cuales pueden, sin embargo, moverse.

Como los modos de vibración de las cuerdas abiertas son partículas, los modos de una cuerda abierta con ambos extremos confinados en una brana son partículas que están confinadas en la brana. Estas partículas viajarían e interactuarían sólo a lo largo de las dimensiones ocupadas por la brana.

Resulta que una de esas partículas que surgen de una cuerda confinada por una brana es un bosón gauge que puede transmitir una fuerza. Sabemos esto porque tiene el espín de un bosón gauge (que es 1) y porque interactúa exactamente igual a como lo haría un bosón gauge. Uno de estos bosones gauge confinado en una brana transmitiría una fuerza que actuaría sobre otras partículas confinadas en la brana, y los cálculos muestran que las partículas del extremo de llegada están siempre cargadas con esta fuerza. De hecho, el extremo de cualquier cuerda que termine en la brana actuaría como una partícula cargada. La presencia de la fuerza confinada en la brana y de estas partículas cargadas es lo que nos dice que una brana D de la teoría de cuerdas viene «colmada» de partículas cargadas y de una fuerza que actúa sobre ellas.

En situaciones con más de una brana, habrá más fuerzas y más partículas cargadas. Supongamos, por ejemplo, que hubiera dos branas. En este caso, además de las partículas confinadas a cada una de las branas, habría un nuevo tipo de partícula que surgiría de las cuerdas cuyos extremos estuvieran cada uno en una de las dos branas distintas (véase la figura 70).

FIGURA 70. Una cuerda que nace y muere en una misma brana puede producir un bosón gauge. Una cuerda con cada extremo en una brana distinta produce un nuevo tipo de bosón gauge. Cuando las branas están separadas, el bosón gauge tiene masa no nula.

Resulta que, cuando las dos branas están separadas entre sí en el espacio, las partículas asociadas a la cuerda que se extiende entre ellas serán partículas con masa. La masa de las partículas que surgen de los modos vibratorios de esta cuerda crece con la distancia entre las branas. Esta masa es como la energía que se almacena cuando se estira un muelle: cuanto más se estira, más energía contiene. Análogamente, la partícula que surge de una cuerda extendida entre dos branas tendrá una masa que aumenta en proporción a la separación entre las branas.

Sin embargo, cuando se deja un muelle suelto, en situación de reposo, no almacena nada de energía. Análogamente, si las dos branas no están separadas —o sea, si están en el mismo sitio—, la partícula que surge de la cuerda con un extremo en cada brana no tiene masa.

Supongamos ahora que las dos branas coinciden, de modo que producen partículas sin masa. Una de estas partículas sin masa sería un bosón gauge: no un bosón gauge de los que surgen de las cuerdas con ambos extremos en una misma brana, sino uno nuevo, distinto. Este nuevo bosón gauge sin masa, que sólo surge cuando hay dos branas coincidentes, transmite una fuerza que actúa sobre las partículas de cada una de las dos branas. Además, como pasa

con todas las fuerzas, las fuerzas sobre la brana van asociadas a una simetría. En este caso la transformación simétrica sería la que intercambia las dos branas (lo que le encantaría a un Igor[100] bromista[M29]).

Por supuesto, si las dos branas estuvieran realmente en el mismo sitio, podríamos pensar que es un poco raro referirnos a ellas como si fueran dos objetos distintos. Y tendríamos razón: si las dos branas están en el mismo sitio, podemos imaginarnos perfectamente que son una única brana. Esta nueva brana existe en la teoría de cuerdas. Se trata, secretamente, de dos branas coincidentes y cuenta con las propiedades que tendrían estas branas. Aloja todos los distintos tipos de partículas que hemos discutido antes: las partículas que surgen de las cuerdas abiertas que mueren en cada brana en la descripción original con dos branas y también las que surgen de las cuerdas cuyos extremos están ambos en una única brana.

Supongamos ahora que superponemos muchas branas. Habría entonces muchos nuevos tipos de cuerdas abiertas porque los dos extremos de las cuerdas pueden estar en cualquiera de las branas (véase la figura 71). Las cuerdas abiertas que se extienden entre branas diferentes o las cuerdas que nacen o mueren en una misma brana generan nuevas partículas compuestas a partir de los modos vibratorios de estas cuerdas. De nuevo estas nuevas partículas incorporan nuevos tipos de bosones gauge y nuevos tipos de partículas cargadas. Y una vez más las nuevas fuerzas están asociadas con nuevas simetrías que intercambian entre sí las diversas branas superpuestas.

FIGURA 71. Cada cuerda que nace y muere en una misma brana o que se extiende entre branas produce bosones gauge. Cuando las branas coinciden hay nuevos bosones gauge sin masa, correspondientes a cada uno de los modos en los que una cuerda puede nacer y morir en cada una de las branas coincidentes.

Así que, en efecto, las branas llegan «colmadas» de fuerzas y partículas; muchas branas implican ricas posibilidades. Además, pueden surgir situaciones todavía más intrincadas que involucren lotes separados de branas. Las branas situadas en sitios diferentes portarían partículas y fuerzas completamente independientes. Las partículas y fuerzas que están confinadas a un grupo de branas serían completamente diferentes de las partículas y fuerzas confinadas en otras.

Por ejemplo, si las partículas de las que estamos compuestos, junto con el electromagnetismo, están todas confinadas en una brana, experimentaríamos la fuerza electromagnética. Sin embargo, las partículas que están confinadas en branas distantes no la experimentarían; esas partículas extranjeras serían insensibles al electromagnetismo. Por el contrario, las partículas confinadas en branas distantes experimentarían fuerzas nuevas ante las que somos completamente insensibles.

Una propiedad importante de una situación así, que será relevante más tarde, es que las partículas de branas separadas no interactúan directamente entre sí. Las interacciones son locales: sólo pueden darse entre partículas que estén en el mismo lugar; las partículas que se encuentran en branas separadas

estarían demasiado alejadas entre sí como para interactuar directamente.

Podríamos comparar el bulto, el espacio completo de dimensión superior, con un inmenso estadio de tenis en el que se desarrollan varios partidos independientes a la vez.

La pelota de cualquiera de las pistas iría y vendría pasando por encima de la red, y podría moverse por donde quisiera dentro de la pista. Sin embargo, cada partido se desarrollaría independientemente de los otros y cada pelota permanecería aislada en su propia pista. Al igual que la pelota de una pista dada debe permanecer ahí y solamente los dos tenistas que juegan allí tienen acceso a ella, los bosones gauge o cualesquiera otras partículas confinadas en una brana interactúan sólo con objetos que estén en su misma brana.

Sin embargo, las partículas que están en branas separadas pueden comunicarse entre sí si hay partículas y fuerzas que tengan libertad para viajar por el bulto. Estas partículas del bulto tendrían libertad para entrar y salir de una brana. Podrían interactuar ocasionalmente con las partículas de una brana, pero también pueden viajar libremente por el espacio completo de dimensión superior.

Una situación con branas separadas y partículas del bulto que se comunican entre ellas sería como un estadio con partidos simultáneos independientes cuyos jugadores tuvieran el mismo entrenador. El entrenador, al que bien le podría apetecer seguir un poco varios de los partidos que se están jugando a la vez, iría pasando de una pista a otra. Si un jugador quisiera transmitir algo a un jugador de otra pista, se lo podría decir al entrenador y éste llevaría el mensaje. Los jugadores no se comunicarían directamente entre sí durante los partidos, pero podrían, sin embargo, comunicarse a través de una persona que va y viene entre sus respectivas pistas. Análogamente, las partículas del bulto podrían interactuar con partículas de una brana y posteriormente interactuar con partículas de una brana distante, permitiendo así a las partículas que están confinadas en branas separadas comunicarse entre sí indirectamente.

En la sección siguiente veremos que el gravitón, la partícula que transmite la fuerza gravitatoria, es una de las partículas del bulto. En un contexto de dimensión superior, viajaría a través del espacio de dimensión superior e interactuaría con todas las partículas dondequiera, estén o no en una brana.

La gravedad, diferente otra vez

La gravedad, al contrario que todas las demás fuerzas, nunca se encuentra confinada en una brana. Los bosones gauge y los fermiones son el resultado de las cuerdas abiertas, pero en la teoría de cuerdas el gravitón —la partícula que transmite la gravedad— es un modo vibratorio de una cuerda cerrada. Las cuerdas cerradas no tienen extremos, y, por lo tanto, no hay cabos que podamos pegar en una brana.

Las partículas que provienen de modos vibratorios de cuerdas cerradas tienen licencia sin restricciones para viajar por el bulto completo de dimensión superior. La gravedad, la fuerza que sabemos que es transmitida por una

partícula que proviene de una cuerda cerrada, es así, una vez más, distinta de las otras fuerzas. El gravitón, contrariamente a los bosones gauge y a los fermiones, *debe* viajar a través del espacio de dimensión superior entero. No hay modo de confinar la gravedad a dimensiones inferiores. En capítulos posteriores veremos que, sorprendentemente, la gravedad puede estar localizada cerca de una brana. Pero realmente es imposible confinar la gravedad en una brana.

Esto implica que, aunque los mundos brana podrían atrapar a la mayoría de las partículas y fuerzas en branas, nunca podrán retener la gravedad. Ésta es una bonita propiedad. Nos dice que los mundos brana siempre harán intervenir a la física de dimensión superior, incluso en el caso de que el modelo estándar completo esté retenido en una brana de dimensión cuatro. Si hay un mundo brana, todo lo que esté en él interactuará con la gravedad, y la gravedad ejercerá su influencia dondequiera en el espacio completo de dimensión superior. Pronto veremos el motivo por el cual esta importante distinción entre la gravedad y otras fuerzas podría ayudar a explicar por qué la gravedad es tan débil comparada con las otras fuerzas conocidas.

Modelos de mundos brana

Poco después de que los físicos reconocieran la importancia de las branas para la teoría de cuerdas, las branas se convirtieron en un polo de intenso estudio. En particular, los físicos estaban ávidos por descubrir su posible importancia para la física de partículas y para nuestra concepción del universo. Por ahora, la teoría de cuerdas no nos dice si existen o no las branas en el universo, ni, si existen, cuántas hay. Sabemos sólo que las branas son una pieza teórica esencial de la teoría de cuerdas, sin la cual le faltaría coherencia. Pero ahora que sabemos que las branas son parte de la teoría de cuerdas, hemos comenzado también a preguntarnos si podrían estar presentes en el mundo real. Y si realmente están, ¿cuáles son las consecuencias?

La posible existencia de las branas abre muchas posibilidades nuevas para la composición del universo, algunas de las cuales podrían ser relevantes para las propiedades físicas de la materia que observamos. La especialista en teoría de cuerdas Amanda Peet, al oír la expresión de branas «cargadas hasta arriba», exclamó que las branas «abrían de par en par el campo de la construcción de modelos basados en las cuerdas». A partir de 1995, las branas se convirtieron en un nuevo instrumento de la construcción de modelos.

A finales de la década de 1990, muchos físicos, entre los que me cuento, ensancharon sus horizontes para incorporar en ellos la posibilidad de las branas. Nos preguntamos: «¿Qué pasaría si hubiera un universo de dimensión superior en el que las partículas y fuerzas que conocemos no viajan en todas las dimensiones, sino que están confinadas en menos dimensiones, en una brana de dimensión inferior?».

El contexto de las branas presentó muchas nuevas posibilidades para la naturaleza global del espacio-tiempo. Si las partículas del modelo estándar están confinadas en una brana, entonces nosotros también, pues nosotros y el

cosmos que nos rodea estamos compuestos de estas partículas. Además, no todas las partículas tienen que estar en la misma brana. Podría haber, por lo tanto, partículas completamente nuevas y poco familiares que experimentaran fuerzas e interacciones diferentes de las que conocemos. Las partículas y fuerzas que observamos podrían ser sólo una pequeña parte de un universo mucho más grande. Dos físicos de Cornell, Henry Tye y Zurab Kakushadze, acuñaron el término *mundos brana* para denominar estas situaciones. Henry me dijo que usaba el término para, con una caída en picado, ser capaz de describir todas las posibles vías que el universo podría adoptar para incluir branas, sin comprometerse con ninguna posibilidad en particular.

Aunque la proliferación de posibles mundos brana podría ser frustrante para los teóricos de las cuerdas que tratan de deducir una única teoría del mundo, es también incitante. Éstas son posibilidades reales para el mundo en el que vivimos y una de ellas podría describirlo de verdad. Y como las reglas de la física de partículas en un universo de dimensión superior serían algo diferentes de las que han supuesto los físicos de partículas, las dimensiones extras introducen nuevas vías para intentar abordar algunas de las desconcertantes propiedades del modelo estándar. Aunque estas ideas sean especulativas, los mundos brana que abordan problemas de la física de partículas podrían ser pronto verificables en los experimentos que se realizan en los aceleradores. Esto significa que los experimentos, y no nuestros prejuicios, podrían decidir en última instancia si estas ideas se aplican o no a nuestro mundo.

Vamos a investigar enseguida algunos de estos nuevos mundos brana. Nos preguntaremos qué aspecto podrían presentar y cuáles podrían ser sus consecuencias. No nos limitaremos a mundos brana deducidos explícitamente de la teoría de cuerdas, sino que consideraremos modelos de mundos brana que ya han introducido ideas nuevas en la física de partículas. Los físicos están tan lejos de comprender las implicaciones de la teoría de cuerdas que sería prematuro excluir modelos solamente porque nadie haya encontrado todavía un ejemplo de la teoría de cuerdas con un conjunto de partículas o de fuerzas determinado o con una distribución de energía determinada. Estos mundos brana podrían ser considerados como objetivos en las exploraciones de la teoría de cuerdas. De hecho, el modelo de jerarquía arqueado del que hablaré en el capítulo 20 se dedujo de la teoría de cuerdas después de que Raman Sundrum y yo lo introdujéramos como una posibilidad de mundos brana.

Los capítulos siguientes presentarán varios mundos brana diferentes. Cada uno ilustrará un fenómeno físico completamente nuevo. El primero mostrará cómo los mundos brana pueden sortear el principio de anarquía; el segundo mostrará que las dimensiones pueden ser mucho más grandes de lo que se había pensado en un principio; el tercero mostrará que el espacio-tiempo puede curvarse de modo que cabe esperar que los objetos tengan tamaños y masas muy diferentes; y los dos últimos mostrarán que, cuando se curva el espacio-tiempo, puede ocurrir que hasta las dimensiones extras infinitas sean invisibles y que incluso el espacio-tiempo parezca tener diferentes dimensiones en lugares diferentes.

Presento varios modelos porque todos ellos son posibilidades reales. Pero

también por una razón igual de importante: todos ellos contienen rasgos nuevos que, hasta hace poco, los físicos pensaron que eran imposibles. Al final de cada uno de los capítulos, resumiré el significado de cada modelo y el modo en que éste violó los conocimientos convencionales. Que el lector se sienta libre de leer primero estos resúmenes destacados con viñetas para hacerse una idea de conjunto, un epítome rápido del significado del modelo concreto que ese capítulo explica.

Antes de llegar a esos mundos brana, presentaré ahora brevemente el primer mundo brana conocido, que salió directamente de la teoría de cuerdas. Petr Hořava y Edward Witten toparon con este mundo brana —que se llama «HW», tomando las iniciales de sus nombres— cuando estaban explorando la dualidad de la teoría de cuerdas. Presento este modelo porque es interesante por derecho propio, pero también porque tiene algunas propiedades que presagian rasgos de los otros mundos brana que pronto encontraremos.

Teoría de Hořava-Witten

El mundo brana HW está ilustrado en la figura 72. Es un mundo de dimensión once acotado por dos branas paralelas, cada una de las cuales posee nueve dimensiones espaciales que engloban un bulto que tiene diez dimensiones espaciales (once del espacio-tiempo). El universo HW era la teoría original del mundo brana; en HW, cada una de las dos branas contiene un conjunto diferente de partículas y de fuerzas.

FIGURA 72. Dibujo esquemático del mundo brana de Hořava-Witten. Dos branas con nueve dimensiones espaciales (representadas esquemáticamente como dos branas bidimensionales) se encuentran separadas a lo largo de la undécima dimensión del espacio-tiempo (que es la décima dimensión espacial). El bulto incluye todas las dimensiones espaciales: las nueve que se extienden en las direcciones espaciales de las dos branas y la dimensión adicional que se extiende entre ellas.

Las fuerzas en las dos branas son las mismas que las de la cuerda heterótica que se introdujo en el capítulo 14; ésta fue la teoría que descubrieron David Gross, Jeff Harvey, Emil Martinec y Ryan Rohm en la que las oscilaciones que se mueven hacia la izquierda o hacia la derecha a lo largo de la cuerda interactúan de modo diferente. La mitad de esas fuerzas están confinadas en una de las dos branas de la frontera y la otra mitad en la otra brana. Hay suficientes fuerzas y partículas confinadas en cada una de las dos branas, de modo que es concebible que cualquiera de ellas contenga todas las partículas del modelo estándar (y, por lo tanto, a nosotros). Hořava y Witten supusieron que las partículas y fuerzas del modelo estándar residen en una de las dos branas, mientras que la gravedad y otras partículas, que forman parte de la teoría pero que no han sido observadas en nuestro mundo, tienen libertad para viajar en la otra brana y también fuera de las branas, en el bulto completo de dimensión once.

De hecho, el mundo brana HW no tenía exactamente las mismas fuerzas que la cuerda heterótica: *era* la cuerda heterótica, pero eso sí, con acoplamientos fuertes entre cuerdas. Éste es otro ejemplo de dualidad. En este caso, una teoría de dimensión once con dos branas que acotan la undécima dimensión

(la décima dimensión del espacio) es dual de la teoría de la cuerda heterótica de dimensión diez. Es decir, cuando las interacciones de la cuerda heterótica son muy fuertes, la teoría se describe mejor como una teoría de dimensión once con dos branas confinantes y nueve dimensiones espaciales. Esto no es muy distinto de la dualidad entre la teoría de supercuerdas de dimensión diez y la supergravedad de dimensión once que se discutió en el capítulo anterior. Pero, en el ejemplo presente, la undécima dimensión no está enrollada, sino que, por el contrario, se encuentra acotada entre dos branas. De nuevo, una teoría de dimensión once puede ser equivalente a una de dimensión diez, pero siempre que una de las teorías tenga interacciones fuertes y la otra interacciones débiles.

Por supuesto, incluso si las partículas del modelo estándar están confinadas en una brana, la teoría seguiría teniendo más dimensiones que las que vemos en nuestro entorno. Si el mundo brana de Hořava-Witten se corresponde con la realidad, seis de sus dimensiones tienen que ser invisibles. Hořava y Witten supusieron que había seis dimensiones ensortijadas en una variedad de Calabi-Yau diminuta.

Si hay seis dimensiones ensortijadas, podemos imaginarnos el universo HW como una teoría efectiva de dimensión cinco con branas confinantes de dimensión cuatro. Esta descripción de un universo de dimensión cinco con dos branas confinantes es muy interesante y la han investigado muchos físicos. Raman y yo aplicamos algunas de las técnicas que los físicos Burt Ovrut y Dan Waldram usaron para estudiar la teoría HW efectiva a las diferentes teorías de dimensión cinco que discutiré en los capítulos 20 y 22.

Un elemento fascinante del mundo brana de Hořava-Witten es que puede acomodar no sólo las partículas y fuerzas del modelo estándar, sino también una gran teoría unificada completa. Y como la gravedad se origina en dimensiones superiores, hace posible que la gravedad y otras fuerzas tengan la misma intensidad a altas energías en este modelo.

El mundo brana HW ilustra tres razones que apoyan la idea de que los mundos brana pueden tener importancia para la física del mundo real. Primeramente, involucra más de una sola brana. Esto implica que puede contener fuerzas y partículas que interactúan entre sí sólo débilmente a causa de la distancia entre las dos branas donde se encuentran retenidas. El único modo mediante el cual pueden comunicarse las partículas confinadas en branas diferentes es a través de interacciones comunes con las partículas del bulto. Esta primera propiedad será significativa en los modelos de secuestro que examinaremos en el próximo capítulo.

La segunda propiedad importante de los mundos brana es que cualquier mundo brana introduce nuevas escalas de longitud en la física. Estas nuevas escalas, como el tamaño de las dimensiones adicionales, podrían ser relevantes para la unificación o el problema de la jerarquía. Los problemas en estas dos teorías se centran en la cuestión de por qué tendría que haber escalas de masa y de energía muy diferentes en una misma teoría, y por qué los efectos cuánticos no tienden a igualar las dos.

Finalmente, las branas y el bulto pueden acarrear energía. Esta energía

puede estar almacenada en las branas o en el bulto de dimensión superior; no depende de las partículas que haya presentes. Como todas las formas de energía, ésta curva el espacio-tiempo del bulto. Pronto veremos que esta curvatura del espacio-tiempo provocada por la energía que se difunde por el espacio puede ser muy importante para los mundos brana.

El mundo brana HW tiene, ciertamente, muchas virtudes cautivadoras. Pero también sufre los problemas que todas las encarnaciones de la teoría de cuerdas parecen tener a la hora de reproducir la física conocida. La teoría de Hořava-Witten es muy difícil de comprobar experimentalmente porque sus dimensiones son demasiado pequeñas. Las muchas partículas que no se han visto deben de ser bastante pesadas ya que no han podido ser detectadas y seis de sus dimensiones tienen que estar ensortijadas, aunque no se ha determinado ni la forma ni el tamaño de estas dimensiones enrolladas.

Siguiendo estas líneas, podríamos topar accidentalmente con la versión de la teoría de cuerdas que describe correctamente la naturaleza; esta posibilidad no está descartada del todo. Para que esto ocurra, deberíamos tener una suerte increíble. Pero los problemas de la física de partículas también cautivan y merece la pena investigar cómo se los podría resolver en un mundo con dimensiones extras del espacio y branas que se extienden solamente a lo largo de un subconjunto limitado de estas dimensiones. De esto trata el resto del libro.

LO QUE HAY QUE RECORDAR:

•Los mundos brana son posibles dentro del marco de la teoría de cuerdas. Las partículas y fuerzas de la teoría de cuerdas pueden estar atrapados en branas.

•La gravedad es diferente de las otras fuerzas. Nunca está confinada en una brana y siempre se extiende por todas las dimensiones.

•Si la teoría de cuerdas describe el universo, podría contener muchas branas. Los mundos brana son muy naturales en estos contextos.

17

PASILLOS POCO FRECUENTADOS:

MULTIVERSOS Y SECUESTROS

Just turn around now

(’cause) you’re not welcome anymore.

[Vuélvete ahora | porque no quiero verte más].

GLORIA GAYNOR

A pesar de que en la brana celestial estaba prohibido explícitamente, Ícaro III volvió, a la postre, al juego. Después de hacer caso omiso de varios avisos, se lo condenó a ser confinado en la brana carcelaria, una brana lejana que se encontraba separada de la brana celestial a lo largo de la quinta dimensión. Estando ya recluido en la brana carcelaria, Ike trató obstinadamente de contactar con sus antiguos amigotes. Pero la distancia entre ambas branas hacía difícil la comunicación. Se vio limitado a intentar detener, por medio de señales, a los transportistas de correo del bulto que pasaban por allí, muchos de los cuales desatendían por completo sus ruegos. Los pocos que paraban siempre llevaban sus mensajes a la brana celestial, pero a un paso desesperadamente lento.

Mientras tanto, en la brana celestial se olía el desastre. Los ángeles guardianes, que habían restablecido con tanta valentía la jerarquía, no sentían respeto por los valores familiares de los otros residentes y estaban a punto de crear inestabilidad entre generaciones. Los ángeles caídos consideraban aceptables todas las parejas y animaban a los demás a que se mezclaran con un compañero de otra generación.

Cuando Ike se enteró de la amenaza, se sintió espantado y decidió salvar la situación. Se dio cuenta de que valiéndose de la manera lenta y deliberada en que se veía obligado a comunicarse con la brana celestial, podría alimentar sensatamente los imponentes egos de los desenfrenados ángeles que vivían allí. Gracias a la útil intervención de Ike, los ángeles dejaron de amenazar el orden social. Aunque Ícaro III tenía que cumplir de todos modos la sentencia, los consolados habitantes de la brana celestial lo honraron para siempre, convirtiéndolo en un mito urbano.

Este capítulo habla del *secuestro* , una de las razones por las que las dimensiones extras podrían resultar importantes para la física de partículas. Las partículas secuestradas están separadas físicamente en branas diferentes. Al confinar partículas diferentes en entornos diferentes, el secuestro podría explicar las propiedades características que distinguen una partícula de otra.

El secuestro podría ser también la razón por la que el principio de anarquía, que dice que todo debería interactuar, no siempre se aplica. Si las partículas están separadas en dimensiones extras, es menos probable que interactúen entre sí.

En principio, las partículas podrían estar secuestradas en las tres dimensiones espaciales. Pero, por lo que sabemos, todas las direcciones y todos los puntos del espacio tridimensional son iguales. Las leyes conocidas de la física nos dicen que cualquier partícula puede estar en cualquier punto de las tres dimensiones que vemos, de modo que el secuestro en tres dimensiones no es una opción válida. Sin embargo, en el espacio de dimensión superior, los fotones y los objetos cargados no necesariamente pueden estar en cualquier sitio. Las dimensiones extras introducen una vía para separar las partículas. Los distintos tipos de partículas podrían estar restringidas a regiones separadas del espacio ocupadas por branas diferentes. Como no todos los puntos en las dimensiones extras son del mismo tipo, las dimensiones extras introducen una vía para separar las partículas reteniendo los distintos tipos de partículas en branas independientes.

Las teorías que secuestran partículas podrían resolver, en principio, muchos problemas. La historia sobre Ike se refiere a mi primera incursión en las dimensiones extras: la aplicación del secuestro a la ruptura de la supersimetría. Mientras que las teorías de dimensión cuatro encaran graves problemas a causa de que los modelos de ruptura de la supersimetría introducen generalmente interacciones no deseadas, los modelos de ruptura de la supersimetría con secuestro parecen ser mucho más prometedores. El secuestro podría explicar también por qué las partículas tienen masas distintas las unas de las otras y por qué no se produce la desintegración del fotón en los modelos extradimensionales. En este capítulo exploraremos el secuestro y unas pocas de sus aplicaciones a la física de partículas. Veremos cómo incluso algunas ideas, como la supersimetría, que pensamos que se aplicaban al espacio-tiempo de dimensión cuatro, podrían ser más fructíferas en un contexto extradimensional.

Mi pasillo hacia las dimensiones extras

Los físicos somos afortunados al tener muchas oportunidades para acudir a congresos en los que nos encontramos con nuestros colegas y compartimos con ellos ideas estimulantes para la investigación. Pero hay una cantidad tan abrumadora de congresos y talleres de física de partículas cada año que escoger qué invitaciones aceptar puede ser difícil. Algunos son grandes concentraciones que proporcionan la oportunidad de enterarse del trabajo reciente de otros y de compartir nuestros últimos resultados. Algunos son congresos relativamente breves, de dos o tres días de duración, en los que los físicos informan sobre los principales resultados nuevos en un campo muy especializado. Otros encuentros son talleres más largos, en los que los físicos comienzan o completan colaboraciones con otros colegas. A veces los congresos se celebran en sitios tan espectaculares que sería una verdadera lástima perdérselos.

Aunque Oxford es un sitio muy bonito, el congreso sobre la supersimetría, al que fui, que se celebró allí en los primeros días de julio de 1998, encaja mejor

en la primera categoría. La supersimetría, que durante muchos años fue considerada como el único camino para resolver el problema de la jerarquía, ha evolucionado con el tiempo para convertirse en un área de investigación importante, y todos los años los físicos se reúnen para discutir sobre los progresos recientes en este campo.

Sin embargo, el congreso de Oxford encerraba una sorpresa. El tema más interesante no fue la supersimetría, sino la idea, que acababa de surgir, de las dimensiones extras. Una de las charlas más estimulantes trató sobre las dimensiones extras grandes, el tema del capítulo 19. Otras charlas trataron sobre el futuro que les espera a las dimensiones extras de la teoría de cuerdas y otros discutieron sobre las posibles implicaciones experimentales de las dimensiones extras. La novedad y la naturaleza especulativa de estas ideas quedaba clara con el título de la charla del físico teórico Jeff Harvey, de Chicago: él y otros conferenciantes posteriores titularon en broma sus charlas inspirándose en *La isla de la fantasía* . Joe Lykken, un teórico de Fermilab, tenía incluso una diapositiva en la que había un hombrecillo que anunciaba «Da brana. Da brana». (No hace falta decir que esta broma sobre Tattoo, famoso por dar el recibimiento al «da plane», el avión, en la isla de la fantasía, se la perdieron todos los que no disfrutaron en su momento de las joyas de la televisión americana de los setenta).

Con bromas y todo, regresé del congreso sobre la supersimetría de Oxford pensando en las dimensiones extras y en que los problemas de la física de partículas podrían quizá resolverse en un mundo extradimensional. Aunque tenía dudas sobre las dimensiones extras grandes, que fue uno de los temas tratados más en boga, y no tenía intención de trabajar sobre ellas yo misma, estaba muy convencida de que las branas y las dimensiones extras podrían ser instrumentos importantes en la construcción de modelos, con posible capacidad para explicar algunos de los fenómenos misteriosos de la física de partículas que han desafiado las explicaciones sencillas en el contexto de las cuatro dimensiones.

Ese año tenía la intención de pasar el resto del verano en Boston. Esto no es lo que solía hacer en aquel entonces; la mayoría de los miembros de la comunidad de los físicos teóricos de Boston, incluida yo misma, viajamos por ahí una buena parte del verano, acudiendo a diversos congresos y talleres. Pero había decidido quedarme en casa para relajarme y pensar sobre las nuevas ideas.

Raman Sundrum, que era entonces becario postdoctoral en la Universidad de Boston, había decidido también quedarse en Boston ese verano. Había visto a menudo a Raman en encuentros científicos o cuando uno de nosotros visitaba la universidad del otro, y hasta habíamos coincidido durante un breve período de tiempo como estudiantes postdoctorales en Harvard. Como Raman había pensado ya en las dimensiones extras, supuse que podría ser útil discutir mis ideas y cuestiones con él.

Raman es un personaje interesante. Mientras que la mayor parte de los físicos trabajan sobre problemas relativamente inofensivos —cuestiones de interés general en las que es probable realizar progresos—, en las primeras etapas de su carrera, Raman insistió en concentrarse en todo aquello que consideraba

más importante, aunque fuera un problema en extremo difícil o algo que divergiera considerablemente de los intereses del resto de la gente. A pesar de su talento manifiesto, esta actitud idiosincrásica le había impedido acceder a una plaza en la facultad y le había llevado a su tercera beca postdoctoral. Pero en aquel momento Raman estaba pensando en las dimensiones extras y en las branas; sus intereses y los del resto de la comunidad de físicos habían empezado a converger.

Nuestra colaboración comenzó en la sucursal de Toscanini's en el MIT (tristemente ya cerrada), una heladería del centro de estudiantes del MIT que tenía unos helados excelentes y un café muy bueno. Toscanini's era el sitio ideal para discutir ideas sin restricciones o interrupciones y, a la vez, para entregarse a los deliciosos estimulantes de la investigación que servían allí.

Desde aquellos primeros días en que empezamos, nuestra investigación evolucionaba y cuajaba a medida que avanzaba el verano. En agosto había llegado a un punto en el que necesitábamos pizarras cada vez más grandes para que cupieran en ellas los detalles de lo que estábamos discutiendo. Como la pizarra que había en mi despacho del MIT, donde era entonces profesora, era bastante pequeña, recorríamos el «pasillo infinito» (el larguísimo corredor que va de parte a parte del edificio principal del MIT) buscando aulas vacías.

El problema de investigación concreto sobre el que nos concentramos era la aplicación del secuestro a la ruptura de la supersimetría. La idea era secuestrar a las partículas responsables de la ruptura de la supersimetría del modelo estándar y evitar así las interacciones no deseadas entre ellas (véase la figura 73). Escogimos la palabra *secuestro* para distinguir los modelos en los que las partículas están separadas en branas diferentes de los llamados modelos de ruptura de la supersimetría con un «sector oculto», que estaban entonces de moda. En los modelos con un sector oculto, las partículas de la ruptura de la supersimetría interactuaban débilmente con las partículas del modelo estándar, pero no estaban realmente ocultas (a pesar de su nombre), y podían, por lo tanto, interactuar de modos que no son aceptables en el mundo real.

FIGURA 73. En este modelo de ruptura de la supersimetría, hay dos branas. Las partículas del modelo estándar están en una brana, y las partículas que rompen la supersimetría están secuestradas en la otra. Las dos branas tienen ambas tres dimensiones espaciales y se encuentran separadas en una quinta dimensión del espacio-tiempo, que es la cuarta dimensión del espacio.

Al principio yo estaba muy entusiasmada con nuestras ideas y Raman tenía dudas, aunque intercambiábamos nuestros papeles de vez en cuando. Pero con un entusiasta y un escéptico, abarcamos rápidamente muchas cuestiones y llegamos hasta el núcleo de la física sobre la que estábamos pensando. Algunas veces hasta descartábamos ideas quizá antes de tiempo, pero normalmente uno de nosotros conservaba un punto de vista a largo plazo que nos permitía progresar.

Francis Bacon, que junto a Galileo es considerado uno de los fundadores del método científico moderno, describió la dificultad de progresar conservando,

sin embargo, el escepticismo necesario para asegurar la corrección de nuestros resultados[101] . ¿Cómo puede uno tomarse una idea tan en serio como para investigar sus consecuencias, sospechando a la vez que podría ser incorrecta? Si tiene tiempo suficiente, una única persona puede fluctuar entre estas dos actitudes y llegar a la respuesta correcta. Pero como nosotros dos adoptábamos actitudes opuestas, el descartar una idea intrigante pero equivocada no solía ser más que una cuestión de horas o incluso de minutos.

No obstante, me parecía que la idea de la que partimos, a saber, que el secuestro impedía interacciones no deseadas en las teorías supersimétricas, tenía que ser cierta. No había nada en cuatro dimensiones que funcionase de un modo suficientemente competente, y las dimensiones extras parecían contar con todos los ingredientes necesarios para constituir un modelo acertado. Sin embargo, hubo que esperar hasta el final del verano para que Raman y yo comprendiéramos el secuestro y sus consecuencias para la ruptura de la supersimetría con la precisión necesaria para verlos bajo una misma luz y coincidir en el aprecio de sus méritos.

Naturalidad y secuestros

La razón por la que el secuestro podría ser importante radica en que se trata de una manera de evitar los problemas causados por el principio de anarquía, la regla no oficial que dice que, en una teoría cuántica de campos de dimensión cuatro, todo lo que pueda pasar pasará. El problema del principio de anarquía es que las teorías terminan prediciendo interacciones y relaciones entre masas que no se ven en la naturaleza. Incluso las interacciones que no ocurren en una teoría clásica (en la que no se tiene en cuenta la mecánica cuántica) ocurrirán al incluir en la teoría las partículas virtuales; las interacciones de las partículas virtuales inducen todas las posibles interacciones.

He aquí una analogía que ilustra por qué. Supongamos que le hemos dicho a Atenea que mañana nevaría y que luego Atenea se lo ha dicho a Ike. Aunque no nos hayamos comunicado directamente con Ike, nuestra información influirá, no obstante, en la ropa que Ike elegirá el día siguiente: se pondrá gabardina gracias a nuestro consejo virtual.

Análogamente, si una partícula interactúa con una partícula virtual y esta partícula virtual interactúa a su vez con una tercera partícula, el efecto neto es que la primera y la tercera partículas interactúan. El principio de anarquía nos dice que los procesos en los que intervienen partículas virtuales están destinados a ocurrir, aunque no sucedan clásicamente. Y esos procesos suelen inducir interacciones no deseadas.

Muchos de los problemas de las teorías de la física de partículas brotan del principio de anarquía. Por ejemplo, las contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs que resultan de las partículas virtuales son la raíz del problema de la jerarquía. Cualquier camino que tome la partícula de Higgs puede ser interrumpido temporalmente por partículas pesadas y estas intervenciones incrementan la masa de la partícula de Higgs.

Vimos otro ejemplo en el que interviene el principio de anarquía en el capítulo 11. En la mayoría de las teorías con ruptura de la supersimetría, las partículas virtuales inducen interacciones no deseadas, interacciones de las que sabemos, gracias a los experimentos, que no tienen lugar. Esas interacciones cambiarían la identidad de los quarks y los leptones conocidos. Semejantes interacciones que cambian los sabores, o no ocurren en la naturaleza u ocurren muy raramente. Si queremos que una teoría funcione, debemos eliminar de algún modo estas interacciones, que el principio de anarquía nos dice que surgirán.

Las partículas virtuales no llevan necesariamente a estas predicciones no deseadas. La teoría no va a predecir estas interacciones no deseadas si se da el caso poco probable de que haya simplificaciones enormes entre las contribuciones clásicas y las contribuciones cuánticas a una magnitud física. Aunque las contribuciones clásicas y cuánticas sean individualmente muy grandes, es concebible que las dos juntas den una predicción aceptable. Pero este modo de rodear el problema casi seguramente no es más que un recurso provisional que sustituye a una verdadera solución. Realmente ninguno de nosotros creemos que esas simplificaciones tan precisas y accidentales sean la explicación fundamental de la ausencia de ciertas interacciones. Empleamos a regañadientes estas simplificaciones fortuitas como una muleta, de modo que podamos ignorar estos problemas y pasar a investigar otros aspectos de nuestras teorías.

Los físicos creen que ciertas interacciones están ausentes de una teoría solamente si estas interacciones quedan eliminadas por un camino que encaje con la noción que tienen los físicos de lo que es natural. En el mundo cotidiano, la palabra *natural* se refiere a cosas que ocurren espontáneamente, sin intervención humana. Pero para los físicos de partículas, *natural* significa, más que algo que ocurre, algo que, si ocurriera, no presentaría un enigma. Para los físicos, sólo es «natural» esperar lo esperado.

El principio de anarquía y las abundantes interacciones no deseadas que inducirá la mecánica cuántica nos dicen que han de entrar nuevos conceptos en cualquier modelo físico que dé base al modelo estándar, si se quiere que este modelo tenga posibilidades de ser correcto. Una razón por la que las simetrías son tan importantes es que constituyen la única vía natural, en un mundo de dimensión cuatro, de garantizar que no ocurran interacciones no deseadas. Las simetrías proporcionan, esencialmente, una regla extra para detectar cuáles son las interacciones que podrían ocurrir. Entenderemos fácilmente este fenómeno con ayuda de una analogía.

Supongamos que estamos preparando seis servicios de mesa, pero que tenemos que hacerlo de tal modo que los seis servicios sean idénticos. Esto es, los servicios permiten una transformación simétrica que intercambia cada par de servicios. Sin una simetría semejante, podríamos haber dado en principio a una persona dos tenedores, tres a otra, y a una tercera un par de palillos. Pero con las restricciones de la simetría, solamente podemos asignar servicios en los que las seis personas tengan el mismo número de tenedores, cuchillos, cucharas y palillos: nunca podríamos dar a una persona dos cuchillos y a otra tres.

Análogamente, las simetrías nos dicen que no todas las interacciones pueden ocurrir. Aunque muchas de las partículas interactúen, las contribuciones cuánticas generalmente no producirán interacciones que violen una simetría si las interacciones clásicas preservan esa simetría. Si no partimos de interacciones que violen la simetría, nunca generaremos ninguna de éstas (aparte de las raras anomalías conocidas que se mencionaron en el capítulo 14), aunque incluyamos todas las posibles interacciones que hacen intervenir partículas virtuales. Al imponer una simetría en nuestros servicios de mesa, siempre acabaremos con servicios idénticos, sin que importe cuántos cambios hagamos, como añadir cucharas para pomelos o cuchillos para carne. Análogamente, las interacciones que son inconsistentes con una simetría no serán inducidas, incluso si se tienen en cuenta los efectos cuánticos. Si una simetría no fuera ya violada en la teoría clásica, no habría ningún camino que pudiera seguir una partícula capaz de inducir una interacción que violara la simetría.

Hasta hace poco los físicos pensaban que las simetrías eran el único modo de evitar el principio de anarquía. Pero como vimos Raman y yo, después de habernos tomado unos cuantos helados, las branas separadas son otro modo de conseguir lo mismo. Un motivo crucial por el que las dimensiones extras me parecieron inicialmente tan prometedoras es que insinuaban una razón, aparte de la simetría, por la que podrían ser naturales algunos tipos restringidos o inusuales de interacciones. El secuestro de las partículas no deseadas puede impedir las interacciones no deseadas porque éstas generalmente no ocurrirán entre partículas que están separadas en branas diferentes.

Las partículas que están en branas diferentes no interactúan fuertemente porque las interacciones son siempre locales: sólo las partículas que están en el mismo sitio interactúan directamente. Las partículas secuestradas pueden establecer contacto con partículas de otras branas, pero sólo si hay partículas interactivas que puedan viajar de una brana a otra. Como Ike en la brana carcelaria, las partículas de branas diferentes disponen solamente de medios restringidos de comunicación entre sí porque no tienen ninguna opción que no sea invocar un intermediario. Aunque este tipo de interacciones indirectas ocurren, suelen ser en extremo débiles, ya que las partículas intermediarias del bulto, y en especial las que tienen masa, muy raramente viajan largas distancias.

Esta supresión de interacciones entre partículas secuestradas en diferentes lugares sería análoga a la supresión de información internacional en un país, que llamaré Xenofobia, en el que el gobierno controla cuidadosamente las fronteras y los medios de comunicación. En Xenofobia, la información que no se proporciona localmente podría adquirirse solamente por medio de los visitantes extranjeros que lograran entrar o de los periódicos o libros que se lograran pasar de contrabando.

Análogamente, las branas separadas proporcionan una plataforma desde la cual escapar del principio de anarquía, duplicando así el conjunto de herramientas a disposición de la naturaleza para garantizar la ausencia de interacciones no deseadas. Un mérito más del secuestro es que puede incluso

proteger a las partículas de los efectos de la ruptura de la simetría. Mientras que la ruptura de la simetría ocurra suficientemente lejos de esas partículas, tendrá muy poco efecto sobre ellas. Cuando la ruptura de la simetría está secuestrada, se encuentra en cuarentena, como una enfermedad contagiosa cuya extensión se evita cuando a todo el que tiene la enfermedad se le recluye en un área restringida. O, si usamos la otra analogía, acontecimientos graves que ocurran fuera de Xenofobia no tendrían ningún efecto en Xenofobia sin la intervención de un comunicante. Sin fronteras porosas, Xenofobia podría funcionar independientemente del resto del mundo.

Secuestros y supersimetría

El problema concreto que Raman y yo investigamos durante el verano de 1998 trataba sobre la cuestión de cómo podría operar el secuestro en la naturaleza para producir un universo con ruptura de la supersimetría que tenga las propiedades del universo que vemos. Hemos estudiado que la supersimetría puede proteger elegantemente la jerarquía y garantizar que todas las grandes contribuciones cuánticas a la masa de la partícula de Higgs sumen cero. Pero, como vimos en el capítulo 13, aunque la supersimetría exista en la naturaleza, tiene que romperse para explicar por qué hemos visto partículas sin sus supercompañeras.

Por desgracia, la mayoría de los modelos con ruptura de la simetría predicen interacciones que no ocurren en la naturaleza, y estos modelos no tienen posibilidades de ser correctos. Raman y yo quisimos encontrar un principio físico del que acaso se valiera la naturaleza para protegerse de estas interacciones no deseadas, de modo que pudiéramos incorporarlo en una teoría más acertada.

Nos concentramos en la ruptura de la supersimetría en el contexto de un mundo brana. Los mundos brana pueden preservar la supersimetría. Pero tal como sucede en cuatro dimensiones, la supersimetría puede romperse espontáneamente cuando una parte de la teoría contiene partículas que no conservan la supersimetría. Raman y yo concluimos que si todas las partículas responsables de la ruptura de la supersimetría estuvieran separadas de las partículas del modelo estándar, el modelo con ruptura de la supersimetría sería menos problemático.

Supusimos, por lo tanto, que las partículas del modelo estándar se hallaban confinadas en una brana, y que las partículas responsables de la ruptura de la supersimetría estaban secuestradas en otra. Observamos que, en este contexto, las interacciones peligrosas que la mecánica cuántica podría inducir no ocurren necesariamente. Aparte de los efectos de ruptura de la supersimetría que podrían comunicarse a través de partículas intermediarias del bulto, las interacciones de las partículas del modelo estándar serían las mismas que las de una teoría sin ruptura de la supersimetría. Al igual que en una teoría con supersimetría exacta, las interacciones no deseadas que intercambian sabores, que son inconsistentes con los experimentos, no ocurrirían. Las partículas del bulto que interactúan con partículas que están en la brana con ruptura de la supersimetría o en la brana del modelo estándar determinarían, precisamente, qué interacciones son posibles —no tendrían por qué incluir necesariamente las prohibidas—.

Por supuesto, a las partículas del modelo estándar hay que transmitirles un poco de ruptura de la supersimetría. A menos que se les comunique algo de ruptura de la supersimetría, no habrá nada que incremente las masas de las supercompañeras. Aunque no conocemos los valores exactos de las masas de las supercompañeras, las restricciones experimentales, combinadas con el papel de la supersimetría en la protección de la jerarquía, nos dicen aproximadamente cuáles tendrían que ser las masas de las supercompañeras.

Las restricciones nos dicen las relaciones cualitativas entre las masas de las supercompañeras. A grandes rasgos, todas las supercompañeras tienen más o menos la misma masa, que es aproximadamente la masa de la escala débil, 250 GeV. Necesitábamos asegurar que las masas de las supercompañeras caen en este rango, impidiendo a la vez que ocurran interacciones no deseadas. Todas las piezas debían casar para que la teoría de la supersimetría secuestrada tuviera la oportunidad de ser correcta.

La clave para el éxito de nuestro modelo era encontrar la partícula intermediaria que pudiera transmitir la noticia de la ruptura de la supersimetría a las partículas del modelo estándar y proporcionar a las supercompañeras las masas que éstas precisan tener. Pero también queríamos estar seguros de que nuestra intermediaria no incitara interacciones imposibles.

El gravitón, una partícula del bulto que interactúa con las partículas con energía, estén éstas donde estén, parecía el candidato perfecto. El gravitón interactúa con partículas de la brana de la ruptura de la supersimetría y también con partículas de la brana del modelo estándar. Además, las interacciones del gravitón se conocen: salen de la teoría de la gravedad. Pudimos demostrar que las interacciones del gravitón, a la vez que generan las masas necesarias de las supercompañeras, no generan las interacciones que harían que los quarks o los leptones confundieran sus identidades, las interacciones que, como sabemos, no ocurren en la naturaleza. El gravitón parecía, por lo tanto, una elección prometedora.

Cuando Raman y yo determinamos las masas de las supercompañeras que resultarían de un gravitón mensajero mediador, descubrimos que, a pesar de la sencillez de los elementos, el cálculo era sorprendentemente sutil. Las contribuciones clásicas a las masas de la ruptura de la supersimetría resultaron ser cero, y solamente los efectos cuánticos comunicaban la ruptura de la supersimetría. Cuando nos dimos cuenta de esto, llamamos a la comunicación de la ruptura de la supersimetría a través del gravitón *mediación anómala* . Escogimos este nombre porque, como las anomalías que discutí en el capítulo 14, los efectos cuánticos específicos rompían una simetría que, de otro modo, estaría presente. Lo grande era que, como las masas de las supercompañeras dependían de efectos cuánticos conocidos en el modelo estándar, más que de interacciones desconocidas en dimensión superior, pudimos predecir los tamaños relativos de las masas de las supercompañeras.

Nos llevó unos cuantos días acoplarlo todo, lo que significó que pude pasar del desánimo al alivio en el mismo día. Recuerdo cómo aturdí a la persona con

la que cenaba una noche, cuando me quedé completamente ensimismada porque reconocí un error y resolví un problema que me había preocupado ese mismo día por la mañana. Al final, Raman y yo descubrimos que, si la gravedad comunica la ruptura de la supersimetría, la ruptura de la supersimetría secuestrada funciona sorprendentemente bien. Todas las supercompañeras tenían las masas correctas y la relación entre las masas del gaugino y del squark estaba en el rango en el que queríamos que estuviera. Aunque no todo funcionaba de un modo tan sencillo como habíamos pensado inicialmente, las relaciones importantes entre las masas de las supercompañeras encajaron en su sitio sin inducir las interacciones imposibles que son problemáticas para otras teorías de la ruptura de la supersimetría. Y, con sólo ligeras modificaciones, todo funcionó.

Y lo mejor de todo fue que, gracias a las predicciones características para las masas de las supercompañeras, podía comprobarse nuestra idea. Una propiedad muy significativa de la ruptura de la supersimetría secuestrada es que, aunque la dimensión extra podría ser extraordinariamente diminuta, más o menos de 10^{-31} cm, apenas cien veces más grande que la minúscula escala de Planck, todavía tendría consecuencias visibles. Esto va contra los conocimientos comunes, que dicen que solamente dimensiones mucho más grandes podrían tener consecuencias visibles, a través de una ley de la fuerza gravitatoria modificada o de nuevas partículas pesadas.

Aunque, en efecto, es cierto que no veremos ninguna de las consecuencias experimentales comentadas arriba cuando la dimensión extra es pequeña, el gravitón transmite la ruptura de la supersimetría a los gauginos de un modo muy particular, que pudimos calcular a partir de las interacciones gravitatorias conocidas y las interacciones conocidas que ocurren en una teoría con supersimetría. El modelo de ruptura de la supersimetría secuestrada predice proporciones características para las masas de los gauginos, los socios de los bosones gauge, y esas masas pueden ser medidas[M30] .

Todo esto resulta muy atractivo. Si los físicos descubren partículas supercompañeras, podrán entonces determinar si las relaciones entre sus masas concuerdan con lo que predecimos. En estos momentos hay un experimento en marcha en el Tevatrón, el acelerador protón-antiprotón del Fermilab, en Illinois, que tiene por objeto la búsqueda de estas supercompañeras gauge. Si hay mucha suerte, veremos resultados en los próximos años.

Al final, Raman y yo estábamos bastante convencidos de que habíamos descubierto algo interesante. Pero a los dos nos quedaban algunas dudas residuales. Yo me temía que una idea tan interesante, de ser cierta, no podía haber permanecido desapercibida hasta entonces, y que era preciso todavía asegurarse de que no se nos había escapado algún fallo oculto en nuestro modelo. También Raman pensaba que la idea era demasiado buena como para haber pasado desapercibida. Pero tenía confianza en que era correcta y sólo temía que pudiéramos desconocer alguna idea parecida que estuviera ya en publicaciones anteriores.

Y no andaba lejos de la verdad. La mediación anómala de la ruptura de la supersimetría fue descubierta independientemente hacia la misma época por Gian Giudice en el CERN, Markus Luty en Maryland, Hitoshi Murayama en Berkeley y Riccardo Rattazzi en Pisa, que habían estado trabajando juntos aquel mismo verano. Enviaron un artículo para su publicación un día después de que saliera el nuestro. Su investigación resultó sorprendente para mí. No lograba entender cómo dos grupos de físicos habían sido capaces de recorrer el mismo tortuoso camino por el mundo de las ideas en un mismo verano, pero Raman había intuido correctamente que otros podían tener intereses parecidos a los nuestros. De hecho, los dos teníamos razón en cierto modo. Aunque el otro grupo tenía ideas análogas, las desarrollaron independientemente de la motivación extradimensional, sin la cual las masas mediadas por la anomalía eran una mera curiosidad. Como, generosamente, dijo Riccardo al físico Massimo Porrati, un amigo común, Raman y yo lo habíamos hecho mejor, no porque nuestra versión de la mediación anómala fuera más correcta, sino porque teníamos una razón que ¡todo el mundo hubiera colocado por delante! Esa razón eran las dimensiones extras. Sin las dimensiones extras, la ruptura de la supersimetría no estaría secuestrada y las masas mediadas por la anomalía se verían anegadas por efectos más intensos.

Desde entonces, otros físicos han continuado investigando modelos secuestrados de la ruptura de la supersimetría. Han encontrado vías para juntar esto con otras ideas más antiguas, a fin de confeccionar modelos todavía más exitosos, que podrían representar el mundo real. La gente ha encontrado incluso caminos para extender la lección del secuestro a las cuatro dimensiones de siempre.

Hay demasiados modelos como para poder enumerarlos todos, pero voy a mencionar dos ideas que me parecieron especialmente interesantes. La primera idea surgió de una colaboración entre Raman y Markus Luty. Usaron las ideas de la geometría arqueada (descrita en el capítulo 20) para reinterpretar las consecuencias del secuestro en cuatro dimensiones. Con estas ideas desarrollaron una nueva clase de modelos de ruptura de la supersimetría en dimensión cuatro.

Otra idea interesante recibió el nombre de *mediación del gaugino* . La idea era transmitir la ruptura de la supersimetría, no a través del gravitón, sino a través de los gauginos, los compañeros supersimétricos de los bosones gauge. Para que esto funcione, los bosones gauge y sus compañeros no podrían estar recluidos en una brana; tendrían que ser libres para viajar por el bulto. Raman me recordó que la mediación del gaugino fue, de hecho, una de las ideas que habíamos descartado anteriormente. Pero los excelentes constructores de modelos David E. Kaplan, Graham Kribs y Martin Schmaltz, e, independientemente, Zacharia Chacko, Markus Luty, Ann Nelson y Eduardo Pontón, demostraron que habíamos sido demasiado impacientes, y que la mediación del gaugino podría funcionar maravillosamente a la hora de transmitir las masas de la ruptura de la supersimetría, conservando a la vez todas las ventajas de la ruptura de la supersimetría secuestrada[102] .

El secuestro y las masas brillantes

La ruptura de la supersimetría secuestrada es una poderosa herramienta para la construcción de modelos. El mundo real podría contener branas separadas, y, construyendo modelos con esta hipótesis, los físicos pueden explorar el abanico de posibilidades.

La sección anterior explicaba cómo los problemas con las interacciones que intercambian sabores podrían resolverse en las teorías con supersimetría. Pero otra cuestión que desafía al constructor de modelos es por qué tiene que haber en principio diferentes sabores de quarks y leptones con masas diferentes. El mecanismo de Higgs da a las partículas sus masas, pero los valores precisos son diferentes para cada sabor. Esto puede ser cierto solamente si cada uno de los sabores interactúa de modo diferente con lo que sea que desempeñe el papel de la partícula de Higgs. Dado que los tres sabores de cada tipo de partícula, como los quarks up, top y con encanto, tienen exactamente las mismas interacciones gauge, es misterioso que todas deban disponer de masas diferentes. Algo ha de distinguirlas, pero la física de partículas del modelo estándar no nos dice qué.

Intentamos hacer modelos que expliquen las masas diferentes. Pero, casi invariablemente, cualquier modelo contendría también interacciones no deseadas que cambiarían las identidades de sabores. Lo que necesitamos es algo que pueda distinguir sabores tranquilamente, sin producir estas interacciones problemáticas.

Nima Arkani-Hamed y el físico Martin Schmaltz, nacido en Alemania, supusieron que las diferentes partículas del modelo estándar estaban alojadas en branas separadas y que así se podían explicar algunas masas. Nima y Savas Dimopoulos encontraron otra posibilidad todavía más sencilla. Supusieron que había una brana en la que estaban confinadas las partículas del modelo estándar y que las interacciones entre las partículas de esta brana trataban idénticamente a todos los sabores. Pero si únicamente hay interacciones simétricas para los sabores, que son las que tratan igual a todos los sabores, todas las partículas tendrían exactamente la misma masa. Claramente, sólo podemos explicar las masas diferentes si hay algo que trata a las partículas de modo diferente.

Nima y Savas supusieron que había otras partículas responsables de la ruptura de la simetría de sabores que estaban secuestradas en otras branas. Como en el caso de la ruptura de la supersimetría secuestrada, la ruptura de la simetría de sabores podría ser comunicada a las partículas del modelo estándar sólo mediante interacciones con partículas del bulto. Si hubiera muchas partículas del bulto interactuando con el modelo estándar, cada una de las cuales comunicara la ruptura de la simetría de sabores desde una brana diferente a una distancia diferente, su modelo podría explicar las masas diferentes de los sabores del modelo estándar. La ruptura de la simetría transmitida desde branas distantes induciría masas más pequeñas que las inducidas por la ruptura de la simetría transmitida desde branas cercanas. Nima y Savas llamaron a su idea *brillo* , para enfatizar este hecho. Al igual que la luz parece más mortecina cuando la fuente de la que proviene está más lejana, el efecto de la ruptura de la simetría es más pequeño cuando su origen está en una brana más lejana. En su contexto, los diferentes sabores de los

quarks y los leptones serían diferentes porque interactúan con branas diferentes que están a distancias diferentes.

Las dimensiones extras y el secuestro son maneras novedosas y atractivas de abordar los problemas de la física de partículas. Y esto no es todo. Recientemente hemos probado que el secuestro podría desempeñar también un papel importante en la cosmología, la ciencia que estudia la evolución de nuestro universo. Es evidente que aún hemos de descubrir todos los méritos de un universo (o multiverso) que contiene partículas secuestradas, y que hay ideas que todavía están por llegar.

LO QUE ES NUEVO:

•Las partículas pueden estar secuestradas en branas diferentes.

•Hasta las dimensiones extras más diminutas pueden tener consecuencias para las propiedades de las partículas observables.

•Las partículas secuestradas no están necesariamente sujetas al principio de anarquía. No todas las interacciones ocurren necesariamente, ya que las partículas distantes no pueden interactuar de manera directa.

•En un modelo en el que las partículas que desempeñan un papel en la ruptura de la supersimetría se encuentran secuestradas con respecto a las partículas del modelo estándar, la supersimetría puede romperse sin introducir interacciones que cambien de sabor a las partículas.

•La ruptura de la supersimetría secuestrada es comprobable. Si se producen gauginos en los aceleradores de alta energía, podremos comparar las masas de los gauginos y ver si coinciden con las predicciones.

•La ruptura de la simetría de sabores secuestrada podría ayudar a explicar la disparidad entre las masas de las partículas.

18

PASILLOS CON GOTERAS:

LAS HUELLAS DACTILARES DE LAS DIMENSIONES EXTRAS

I was peeking

But it hasn’t happened yet

I haven’t been given

My best souvenir

I miss you

But I haven’t met you yet.

[Estaba flotando; | pero aún no ha pasado. | No me han dado | mi mejor recuerdo. | Te extraño, | pero todavía no te conozco].

BJÖRK

Atenea tuvo que admitir que echaba de menos a Ike. Aunque con frecuencia le había resultado molesto, se sentía bastante sola sin él. Estaba impaciente por encontrarse con K. Square, un estudiante de intercambio que tenía pensado visitarla. Pero le horrorizaba la cerrazón de sus vecinos, que sentían aprensión ante la inminente llegada de K. Square. No importaba que hablase la misma lengua y que se comportase igual que cualquiera. En aquel ambiente, sólo el origen extranjero de K. Square era suficiente para volverlos cautelosos.

Cuando Atenea preguntó a sus vecinos por qué estaban tan preocupados, éstos contestaron: «¿Qué pasará si va a buscar a sus parientes más fuertes? ¿Qué pasará si no son tan bien educados como él y se atienen a sus leyes extranjeras? Y cuando lleguen todos a la vez, ¿qué pasará entonces?».

Por desgracia, Atenea intensificó sus recelos al decirles que, en todo caso, K. Square y sus familiares no podrían, seguramente, quedarse mucho tiempo, ya que todos ellos eran muy inestables y solamente podían hacer visitas durante los disturbios de la cosecha de energía. Al darse cuenta de su desafortunada elección de las palabras, añadió, para tranquilizarlos, que los extranjeros se someterían a las leyes de la ciudad durante sus breves y emocionantes visitas. Convencidos, sus vecinos se solidarizaron con Atenea y juntos dieron la bienvenida al clan de K. Square.

En una parte anterior del libro expliqué cómo las dimensiones extras podrían

estar ocultas. Podrían estar enrolladas o cercadas por branas, de modo tal que fueran imperceptibles de tan pequeñas. Pero ¿puede un universo extradimensional realmente esconder su naturaleza tan completamente que ninguna de sus propiedades le distinga de un mundo de dimensión cuatro? Esto sería difícil de creer. Incluso si las dimensiones compactadas fueran tan pequeñas que pudiéramos adormecernos y creer que el mundo es de dimensión cuatro, un mundo de dimensión superior debe de contener algunos elementos nuevos que le diferencien de uno que de verdad tenga cuatro dimensiones.

Si hay dimensiones extras, es seguro que existen dichas huellas dactilares de las dimensiones extras. Esas huellas dactilares son partículas llamadas *partículas de Kaluza-Klein* (partículas KK[103]). Las partículas KK son los ingredientes adicionales de un universo extra-dimensional. Son la huella en dimensión cuatro del mundo de dimensión superior.

Si las partículas KK existen y son lo suficientemente ligeras, los aceleradores de alta energía las producirán y dejarán su marca en los datos experimentales. Los detectives extra-dimensionales —los físicos experimentales— coordinarán todas estas pistas, transformando los datos en pruebas forenses de un mundo de dimensión superior. Este capítulo trata de estas partículas de Kaluza-Klein, y de por qué, en un mundo de dimensión superior, uno puede estar seguro de su existencia.

Las partículas de Kaluza-Klein

Aunque una partícula del bulto viaje en el espacio de dimensión superior, deberíamos ser capaces de todos modos de describir sus propiedades e interacciones en términos del espacio de dimensión cuatro. Al fin y al cabo, no vemos directamente las dimensiones extras, de modo que todo debe aparecer ante nuestros ojos como si fuera de dimensión cuatro. Del mismo modo que los habitantes de Planilandia, que ven sólo dos dimensiones espaciales, cuando pasaba una esfera tridimensional por su mundo podían observar solamente discos bidimensionales, nosotros únicamente podemos ver partículas que aparentemente sólo viajan en tres dimensiones espaciales, aunque esas partículas tengan su origen en un espacio de dimensión superior. Estas nuevas partículas que tienen su origen en las dimensiones extras, pero que aparecen ante nosotros como partículas extras en nuestro espacio-tiempo tetradimensional[104] , son partículas de Kaluza-Klein (partículas KK). Si pudiéramos medir y estudiar todas sus propiedades, nos dirían cuanto hay que saber sobre el espacio de dimensión superior.

Las partículas de Kaluza-Klein son la manifestación de una partícula de dimensión superior en cuatro dimensiones. Tal como podemos reproducir cualquier sonido generado por una cuerda de violín superponiendo muchos modos resonantes, podemos reproducir el comportamiento de una partícula de dimensión superior reemplazándola por partículas KK apropiadas. Las partículas KK caracterizan por completo las partículas de dimensión superior y la geometría de dimensión superior por la que viajan.

Para imitar el comportamiento de las partículas de dimensión superior, las

partículas KK tendrían que portar un momento extradimensional. Toda partícula del bulto que viaje a través del espacio de dimensión superior queda reemplazada en nuestra descripción efectiva tetradimensional por partículas KK que tienen los momentos correctos y las interacciones correctas para imitar esa partícula concreta de dimensión superior[M31] . Un universo de dimensión superior aloja partículas familiares y sus parientes KK que portan momentos extradimensionales que están determinados por las propiedades detalladas del espacio enrollado.

Sin embargo, una descripción tetradimensional no incluye información sobre la posición o el momento extradimensional. Así pues, el momento extradimensional de las partículas KK debe llamarse de otra forma cuando se mira desde nuestra perspectiva tetradimensional. La relación entre masa y momento impuesta por la relatividad especial nos dice que el momento extradimensional se vería como masa en el mundo tetradimensional. Las partículas KK son entonces partículas como las que conocemos, pero con masas que reflejan sus momentos extradimensionales.

Las masas de las partículas KK están determinadas por la geometría de dimensión superior. Sin embargo, sus cargas son las mismas que las de las partículas tetradimensionales conocidas. Esto es así porque, si las partículas conocidas tienen su origen en el espacio-tiempo de dimensión superior, las partículas de dimensión superior han de portar las mismas cargas que las partículas conocidas. Esto es cierto también para las partículas KK que imitan la conducta de las partículas de dimensión superior. Así que para cada partícula que conocemos, debería haber muchas partículas KK con la misma carga, pero cada una con una masa distinta. Por ejemplo, si un electrón viaja en dimensiones superiores, tendría compañeros KK con la misma carga negativa. Y si un quark viaja en dimensiones superiores, tendría parientes KK que, como el quark, experimentan la fuerza fuerte. Los compañeros KK tienen cargas idénticas a las de las partículas que conocemos, pero masas que están determinadas por las dimensiones extras.

La determinación de las masas de Kaluza-Klein

Para comprender el origen y las masas de las partículas KK se requiere dar un paso más allá de la descripción intuitiva de las dimensiones enrolladas invisibles que hemos visto anteriormente. Por simplicidad, consideraremos primero un universo sin branas, en el que cada partícula es fundamentalmente de dimensión superior y libre de moverse en todas direcciones, incluidas todas las adicionales. Para concretar, imaginaremos un espacio con sólo una dimensión adicional que está enrollada formando un círculo y partículas elementales que viajan por este espacio.

Si viviéramos en un mundo en el que la física clásica de Newton tuviese la última palabra, las partículas de Kaluza-Klein podrían tener cualquier momento extradimensional y, por lo tanto, cualquier masa. Pero, como vivimos en un universo donde rige la mecánica cuántica, éste no es el caso. La mecánica cuántica nos dice que, al igual que sólo los modos resonantes del violín contribuyen a generar los sonidos que las cuerdas del violín pueden producir, sólo los momentos extradimensionales cuantificados contribuyen con sus efectos cuando las partículas KK reproducen el movimiento y las

interacciones de una partícula de dimensión superior. Y así como las notas de una cuerda de violín dependen de su longitud, los momentos extradimensionales cuantificados de las partículas KK dependen de los tamaños y formas de las dimensiones extras.

Los momentos extradimensionales que portan las partículas KK aparecerían en nuestro mundo en apariencia tetradimensional como un patrón distintivo de las masas de las partículas KK. Si los físicos descubren partículas KK, estas masas nos informarán sobre la geometría de las dimensiones extras. Por ejemplo, si hay una única dimensión extra enrollada en un círculo, estas masas nos dirían cuál es el tamaño de esta dimensión extra.

El proceso para encontrar los momentos permitidos (y, por ende, las masas) para las partículas KK en un universo con una dimensión enrollada es muy parecido al método que usamos para determinar matemáticamente los modos resonantes de un violín y también al método que usó Bohr para determinar las órbitas cuantificadas del electrón en el átomo. La mecánica cuántica asocia a todas las partículas con ondas y sólo se permiten aquellas ondas que pueden oscilar un número entero de veces sobre el círculo extradimensional. Determinamos las ondas permitidas y luego usamos la mecánica cuántica para relacionar la longitud de onda con el momento. Y los momentos extradimensionales nos dicen las masas permitidas para las partículas KK, que es lo que queremos saber.

La onda constante —la que no oscila nada— está siempre permitida. Esta «onda» es como la inmóvil superficie de un estanque, sin ninguna ola visible, o como una cuerda de violín que todavía no ha sido pulsada. Esta onda de probabilidad tiene el mismo valor en todos los puntos de la dimensión extra. A causa del valor constante de esta onda plana de probabilidad, la partícula KK asociada con esta onda no favorece ninguna localización extradimensional concreta. Según la mecánica cuántica, esta partícula no porta un momento extradimensional, y entonces, según la relatividad especial, no tiene masa adicional.

La partícula KK más ligera es, por lo tanto, la asociada con este valor constante de la probabilidad en la dimensión extra. En bajas energías ésta es la única partícula KK que puede producirse. Como no tiene ni momento ni estructura en la dimensión extra, es indistinguible de una partícula tetradimensional normal con la misma carga y la misma masa. Sólo con baja energía, la partícula extradimensional es incapaz de contonearse en la dimensión compacta que está enrollada. En otras palabras, la baja energía no producirá ninguna de las partículas KK adicionales que distinguirían nuestro universo de otro con más dimensiones. Los procesos a baja energía y las partículas KK más ligeras no nos dirán, por lo tanto, nada sobre la existencia de una dimensión extra, sea del tamaño o de la forma que sea.

Sin embargo, si el universo contiene dimensiones adicionales, y los aceleradores de partículas consiguen energías suficientemente altas, éstos crearán partículas KK más pesadas. Estas partículas KK más pesadas, que portan momentos extradimensionales no nulos, serán la primera prueba real de las dimensiones extras. En nuestro ejemplo, esas partículas KK más pesadas están asociadas con ondas que tienen estructura a lo largo de la

dimensión circular adicional; las ondas varían al rodear una y otra vez la dimensión enrollada, oscilando hacia arriba y hacia abajo un número entero de veces a lo largo de su longitud.

La más ligera de dichas partículas KK sería la que tiene una función de probabilidad con la mayor longitud de onda posible. Y la longitud de onda más larga posible para la cual la oscilación se ajusta a un círculo es la que oscila hacia arriba y hacia abajo exactamente una vez, mientras la onda rodea la dimensión enrollada. Esta longitud de onda queda determinada por el tamaño de circunferencia de la dimensión extra (es aproximadamente del mismo tamaño). Una longitud de onda más grande no se ajustaría; la onda estaría desplazada al volver a un mismo punto sobre el círculo. La partícula con esta onda de probabilidad es la partícula KK más ligera que «recuerda» su origen extradimensional.

Tiene sentido que la longitud de onda de la onda asociada con la partícula más ligera que tiene momento extradimensional no nulo sea más o menos la misma que el tamaño de la dimensión extra. Al fin y al cabo, la intuición nos dice que solamente algo suficientemente pequeño para sondear aspectos o interacciones en una escala diminuta sería sensible a la existencia de una dimensión enrollada. Tratar de investigar una dimensión extra con una longitud de onda más grande sería como tratar de medir la localización de un átomo con una regla. Por ejemplo, si tratáramos de detectar una dimensión extra con luz o con alguna otra sonda de una cierta longitud de onda, la luz tendría que poseer una longitud de onda más pequeña que el tamaño de la dimensión extra. Como la mecánica cuántica asocia las ondas de probabilidad con las partículas, las afirmaciones anteriores sobre las longitudes de onda de las posibles sondas se traducen en afirmaciones sobre propiedades de las partículas. Solamente las partículas con longitud de onda suficientemente pequeña y, por lo tanto (según resulta del principio de incertidumbre), con momento extradimensional suficientemente alto podrían ser sensibles a la existencia de una dimensión extra.

Otro aspecto atractivo de las más ligeras de las partículas KK con momento extradimensional no nulo es que su momento (y, por ende, su masa) es más pequeño cuanto mayor es la dimensión extra. Una dimensión extra más grande sería más accesible y daría consecuencias observables más fluidamente, ya que las partículas más ligeras son más fáciles de producir y de descubrir.

Si existen las dimensiones extras, la partícula KK más ligera no sería la única prueba de ellas. Otras partículas de momento más alto dejarían huellas dactilares todavía más nítidas de las dimensiones extras en los aceleradores de partículas. Estas partículas tendrían ondas de probabilidad que oscilan más de una vez cuando atraviesan la dimensión enrollada. Como la enésima de estas partículas correspondería a la onda que oscila n veces según rodea la dimensión enrollada, las masas de estas partículas KK serían todas múltiplos enteros de la más ligera de todas. Y cuanto más altos sean los momentos, más nítidas serán las huellas dactilares de las dimensiones extras en los aceleradores de partículas. La figura 74 muestra esquemáticamente los valores de las masas de las partículas KK, que son proporcionales al tamaño inverso de las dimensiones extras, y una pareja de ondas que corresponden a

estas partículas con masa.

FIGURA 74. Las partículas de Kaluza-Klein están en correspondencia con las ondas que oscilan un número entero de veces en torno a la dimensión enrollada. Las ondas con más oscilaciones corresponden a las partículas más pesadas.

Las muchas partículas KK sucesivas más pesadas se asemejan a las múltiples generaciones de una familia de inmigrantes. Los miembros de la generación más joven que nacieron en Estados Unidos asimilan por completo la cultura americana, hablan inglés perfectamente y nada delata en ellos sus orígenes extranjeros. Esto no es tan cierto para la generación anterior, los padres de la generación más joven: quizá hablan con un cierto acento extranjero, y ocasionalmente dicen algún proverbio de su país original. La generación que es más vieja todavía parecería aún más extranjera, y llevaría ropa y contaría historias provenientes de su tierra. Podríamos decir que estas generaciones más antiguas añaden dimensiones culturales a lo que de otro modo sería una sociedad uniforme, con menos color.

Análogamente, las partículas KK más ligeras son indistinguibles de las partículas de un mundo fundamentalmente tetradimensional; solamente los «parientes más viejos», con más masa, revelarían pruebas de las dimensiones extras. Aunque las más ligeras de las partículas KK parecerían ser tetradimensionales, su proveniencia sería más evidente una vez que se hubiera conseguido la suficiente energía para producir los «progenitores» con más masa.

Si los experimentos descubren nuevas partículas pesadas con las mismas cargas que las partículas familiares y masas que son semejantes entre sí, estas partículas serán una sólida prueba de las dimensiones extras. Si dichas partículas comparten las mismas cargas y aparecen a intervalos regulares de masa, esto significaría muy probablemente que se ha descubierto una dimensión enrollada simple.

Pero geometrías extradimensionales más complicadas producirán patrones de masa más complicados. Si se descubre un número suficiente de partículas de éstas, las partículas KK revelarían entonces no sólo la existencia de las dimensiones extras, sino también sus tamaños y formas. Sea cual sea la geometría de las dimensiones ocultas, las masas de las partículas KK dependerán de ella. En cualquier caso, las partículas KK y sus masas podrían decirnos mucho sobre las propiedades extradimensionales.

Restricciones experimentales

Hasta hace poco, la mayoría de los especialistas de la teoría de cuerdas suponían que las dimensiones extras no son más grandes que la diminuta longitud de la escala de Planck. Esto es porque la gravedad se vuelve fuerte a la energía de la escala de Planck, y una teoría de la gravedad cuántica, que podría ser la teoría de cuerdas, es la que se hace cargo de todo a partir de ese momento. Pero la longitud de la escala de Planck es mucho más pequeña que cualquier longitud que podamos estudiar experimentalmente. La minúscula longitud de la escala de Planck corresponde (según la mecánica cuántica y la

relatividad general) a la enorme masa (o energía) de la escala de Planck: diez mil billones de veces la energía que alcanzan los aceleradores actuales. Las partículas KK con masa de Planck serían tan pesadas que estarían muy fuera del alcance de cualquier experimento concebible.

Sin embargo, quizá las dimensiones extras sean mayores y las partículas KK sean más ligeras. ¿Por qué no preguntar entonces qué pruebas experimentales nos dicen algo sobre el tamaño de una dimensión extra? ¿Qué sabemos realmente, dejando aparte los prejuicios teóricos?

Si el mundo es de dimensión superior y no hay branas, entonces todas las partículas familiares —el electrón, por ejemplo— tendrían socios KK[M32] . Serían partículas que tienen exactamente la misma carga que las partículas familiares, pero que portan momentos en las dimensiones adicionales. Los socios KK del electrón estarían cargados negativamente, como el electrón, pero serían más pesados. Si hay una dimensión extra enrollada en un círculo, la masa de la más ligera de dichas partículas diferiría de la masa del electrón en una cantidad inversamente proporcional al tamaño de la dimensión extra. Esto significa que cuanto más grande sea la dimensión extra, más pequeña será la masa de la partícula. Como una dimensión más grande daría lugar a partículas KK más ligeras, ninguna de las cuales ha sido vista en los experimentos, las cotas impuestas a las masas de las partículas KK limitan el tamaño permitido de una dimensión enrollada.

Hasta ahora no han aparecido rastros de semejantes partículas cargadas en los aceleradores que operan a energías que rondan los 1.000 GeV. Como las partículas KK serían las firmas de las dimensiones extras, el que no las hayamos visto todavía significa que las dimensiones extras no pueden ser muy grandes. Las limitaciones experimentales actuales nos dicen que las dimensiones extras no pueden ser más grandes que 10^{-17} cm (la cien mil billonésima parte de un centímetro[105]). Esto es pequeñísimo: mucho más pequeño que cualquier cosa que podamos ver directamente.

El límite del tamaño de una dimensión extra es unas diez veces más pequeño que la longitud de la escala débil. Pero aunque 10^{-17} cm es muy poco, aun así es enorme comparado con la longitud de la escala de Planck, que es 10^{-33} , dieciséis órdenes de magnitud más pequeña. Esto significa que las dimensiones extras podrían ser mucho más grandes que la longitud de la escala de Planck y aun así haber escapado de la detección. El físico griego (moderno) Ignatius Antoniadis fue uno de los primeros en imaginar que las dimensiones extras no eran del tamaño de la escala de Planck, sino que eran más bien comparables en tamaño con la longitud de escala asociada con la fuerza débil. Estaba pensando sobre el aspecto que tendría la nueva física cuando los aceleradores incrementaran su energía, aunque no fuera más que un poquito. Al fin y al cabo, el problema de la jerarquía nos dice que debe verse algo a esas energías, en las que se producirán partículas con energías y masas de la escala débil.

Pero incluso el límite comentado más arriba del tamaño de las dimensiones extras no se aplica necesariamente siempre. Las partículas KK son huellas dactilares de las dimensiones extras, pero pueden ser astutas y

sorprendentemente difíciles de encontrar. Recientemente hemos aprendido mucho más sobre las partículas KK y el aspecto que pueden presentar. Los capítulos siguientes explicarán los últimos resultados sobre la razón por la cual, una vez que introducimos las branas, las dimensiones extras pueden ser más grandes que 10^{-17} cm y seguir evitando su detección, aunque esperemos que dimensiones más grandes den lugar a partículas KK más ligeras. Algunos modelos con dimensiones sorprendentemente grandes —dimensiones que aparentemente tendrían consecuencias muy visibles— pueden ser invisibles y, no obstante, ayudar a explicar las misteriosas propiedades de las partículas del modelo estándar. Y el capítulo 22 presentará un resultado todavía más sorprendente: una dimensión extra infinitamente grande podría dar lugar a infinitas partículas KK ligeras y, no obstante, no dejar ningún rastro observable.

LO QUE ES NUEVO:

•Los modos de Kaluza-Klein son partículas que portan un momento extradimensional; son intrusos de dimensión superior en nuestro mundo tetradimensional.

•Las partículas KK parecerían partículas pesadas con las mismas cargas que las partículas conocidas.

•Las masas y las interacciones de las partículas KK están determinadas por la teoría de dimensión superior; reflejan, por lo tanto, las propiedades del espacio-tiempo de dimensión superior.

•Si pudiéramos encontrar y medir las propiedades de todas las partículas KK, sabríamos la forma y el tamaño de las dimensiones superiores.

•Las limitaciones experimentales actuales nos dicen que, si todas las partículas viajan a través del espacio de dimensión superior, las dimensiones extras no pueden ser más grandes que aproximadamente 10^{-17} cm.

19

PASILLOS VOLUMINOSOS:

DIMENSIONES EXTRAS GRANDES

I couldn’t even see the millimeter when it felt.

[Ni siquiera pude ver cuándo cayó el milímetro].

EMINEM

Ahora que ya se había terminado la visita de K. Square, Atenea pasaba un montón de tiempo en el cibercafé de su barrio. Estaba entusiasmada con su reciente descubrimiento de algunas páginas nuevas de la Red, la más intrigante de las cuales se llamaba xxx.tancercaysinembargotanlejos.al. Atenea sospechó que estos sitios tan estimulantes eran consecuencia de la reciente fusión entre AOB (*America on Brane* [América en la Brana]) y la empresa multimedia Warner Espacio-tiempo, pero tenía que regresar a su casa y no le dio tiempo a investigar.

En cuanto Atenea llegó a su casa, corrió hacia su ordenador, donde volvió a buscar los exóticos hiperenlaces que habían sido tan fácilmente accesibles en el cibercafé. Para su frustración, sin embargo, la ciberNanny le impidió llegar hasta las páginas de la Red con realce multidimensional, que estaban prohibidas[106] . Pero, ocultando su identidad con su alias seguro, Mentor, venció a su cibercensor y consiguió, finalmente, volver a los misteriosos hiperenlaces.

Atenea esperaba, secretamente, que K. Square le hubiera enviado un mensaje oculto en una página de la Red. Pero esos sitios no eran fáciles de entender y sólo consiguió recoger unas pocas señales significativas en potencia. Decidió estudiar su contenido un poco más y esperó que la fusión —al contrario de lo que había pasado con otra fusión de nombre parecido[107] — durase el tiempo suficiente para descifrarlos.

En el congreso sobre supersimetría de Oxford de 1998, el físico de Stanford Savas Dimopoulos dio una de las conferencias más interesantes. Informó en ella sobre los trabajos que había hecho en colaboración con otros dos físicos, Nima Arkani-Hamed y Gia Dvali. Los pintorescos nombres de estos tres personajes concuerdan con sus personalidades e ideas, también pintorescas. Savas se emociona muchísimo con sus proyectos; sus colaboradores me cuentan que su entusiasmo es siempre contagioso. Estaba tan absorbido por las dimensiones extras que le dijo a un colega que todas las ideas físicas sin explorar que había le hacían sentirse como un niño en una confitería: quería comérselo todo antes de que nadie tocara nada. Gia, un físico de la antigua república soviética de Georgia, asume grandes riesgos, lo mismo en su

manera de abordar la física que en sus audaces hazañas montañeras. Estuvo una vez retenido sin comida en lo alto de una montaña del Cáucaso durante dos noches. Nima, un físico de familia iraní, está lleno de energía, es estimulante y gesticula vivamente. Ahora es colega mío en Harvard y a menudo vaga por los pasillos explicando con entusiasmo sus últimas investigaciones y convenciendo a otros para que se sumen a ellas.

Irónicamente, la conferencia de Savas en el congreso de supersimetría, que en modo alguno versó sobre supersimetría sino sobre las dimensiones extras, se llevó parte del protagonismo de la supersimetría. Explicó que las dimensiones extras, más que la supersimetría, podrían constituir la teoría física que late bajo el modelo estándar. Y que si su propuesta era correcta, los experimentadores podrían esperar encontrar pruebas de las dimensiones extras, más que de la supersimetría, cuando exploren la escala débil en un futuro inmediato.

Este capítulo presenta la idea de Arkani-Hamed, Dimopoulos y Dvali[108] sobre cómo las dimensiones muy grandes podrían explicar la debilidad de la gravedad. En esencia, las dimensiones extras grandes podrían diluir la fuerza gravitatoria tanto que la intensidad de la gravedad sería mucho más débil de lo que nos harían creer las estimaciones hechas en ausencia de dimensiones extras. Sus modelos no resuelven, de hecho, el problema de la jerarquía porque todavía quedaría por explicar por qué las dimensiones son tan grandes. Pero ADD pensaron que esta cuestión nueva y diferente sería más tratable.

Consideraremos también la siguiente pregunta, estrechamente relacionada con la planteada más arriba por ADD: ¿cuán grandes pueden ser las dimensiones extras enrolladas si las partículas del modelo estándar están confinadas en una brana y no tienen libertad para viajar por el bulto sin contradecir los resultados experimentales? La respuesta que encontraron fue extraordinaria. En el momento en el que escribieron su artículo, parecía que las dimensiones extras podrían tener el tamaño de un milímetro.

Dimensiones de (casi) un milímetro

En el modelo ADD, como en el modelo del secuestro que describí en el capítulo 17, las partículas del modelo estándar están confinadas en una brana. Sin embargo, los dos modelos tienen objetivos muy diferentes, de modo que el resto de sus aspectos son completamente distintos. Mientras que el modelo del secuestro contaba con una dimensión adicional que estaba acotada entre dos branas, los modelos ADD tienen todos más de una dimensión, y esas dimensiones están enrolladas. Dependiendo de los detalles de las implementaciones, el espacio de sus modelos contiene dos, tres o más dimensiones adicionales enrolladas. Además, el modelo ADD contiene una única brana en la que están confinadas las partículas del modelo estándar, pero esa brana no acota el espacio. Sencillamente, está alojada dentro de las dimensiones extras enrolladas, como se ilustra en la figura 75[M33] .

FIGURA 75. Dibujo esquemático del mundo brana ADD. Las dimensiones extras del universo están enrolladas (y son grandes). Vivimos en una brana (la

línea de puntos a lo largo del cilindro), de modo que solamente la gravedad experimenta las dimensiones extras.

Una cuestión que ADD querían abordar con su proyecto era cómo las dimensiones extras grandes podían seguir ocultas si todas las partículas del modelo estándar estaban atrapadas en una brana y la única fuerza del bulto de dimensión superior era la gravedad. La respuesta que encontraron sorprendió a muchos físicos. En abierta oposición con el tamaño de una cien mil billonésima parte de un centímetro que consideramos en el capítulo anterior, estas dimensiones extras enrolladas podían tener hasta un milímetro. (De hecho, es un poco engañoso dar el número exacto ahora porque, como discutiremos más adelante en este mismo capítulo, físicos de la Universidad de Washington han estado buscando dimensiones extras del tamaño de un milímetro y no las han encontrado. Basándonos en sus resultados, sabemos ahora que las dimensiones extras tienen que ser más pequeñas que, aproximadamente, la décima parte de un milímetro, o de lo contrario, habría que descartarlas. No obstante, las dimensiones que fueran de un tamaño igual a la décima parte de un milímetro seguirían siendo bastante chocantes).

El lector quizá piense que, de ser las dimensiones del tamaño de un milímetro (o incluso diez veces más pequeñas), ya sabríamos seguramente algo de ellas. Al fin y al cabo, el que no ve objetos de un milímetro es porque necesita gafas nuevas. En las escalas de la física de partículas, un milímetro es enorme.

Para hacernos una idea de lo extraordinarias que serían las dimensiones extras de un milímetro —e incluso de la décima parte de un milímetro—, recapitulemos los tipos de escalas de longitud que hemos discutido hasta ahora. La longitud de la escala de Planck, muy lejos del alcance experimental, es 10^{-33} cm. La escala TeV, que es la explorada actualmente por los experimentos, ronda los 10^{-17} cm; los físicos han comprobado el electromagnetismo a distancias tan pequeñas como los 10^{-17} cm. Los tamaños de los que hablaban ADD eran enormes en comparación. En ausencia de branas, las dimensiones extras del tamaño de un milímetro constituirían un absurdo que habría sido descartado.

Sin embargo, las branas hacen que sean concebibles dimensiones extras más grandes. Las branas pueden atrapar a los quarks, a los leptones y a los bosones gauge de modo que *solamente* la gravedad experimente de lleno el espacio de dimensión superior. En el marco de ADD, que supone que todo lo que no sea la gravedad está confinado en una brana, todo lo que no haga intervenir la gravedad sería exactamente igual que si no hubiera dimensiones extras, incluso si éstas fueran extremadamente grandes.

Por ejemplo, todo lo que vemos parecería tetradimensional. Nuestros ojos detectan fotones, y los fotones en el modelo ADD están atrapados en una brana. Así que todos los objetos que vemos se comportarían exactamente igual a como lo harían si sólo hubiera tres dimensiones espaciales. Si los fotones están atrapados en una brana, entonces, por gordas que fueran nuestras gafas, nunca veríamos ninguna prueba directa de las dimensiones extras.

De hecho, podríamos esperar ver pruebas de las dimensiones de un milímetro en la teoría ADD solamente por medio de una sonda de la gravedad extraordinariamente sensible. Todos los procesos usuales de la físicas de partículas, como las interacciones comunicadas por la fuerza electromagnética, la creación de pares electrón-positrón o la formación del núcleo mediante la fuerza fuerte, ocurren solamente en la brana tetradimensional y serían exactamente los mismos que en un universo puramente tetradimensional.

Las partículas KK cargadas tampoco serían un problema. El capítulo anterior explicó que las dimensiones extras no pueden ser muy grandes cuando todas las partículas están en el bulto, porque, si lo fueran, ya habríamos visto a las compañeras KK de las partículas del modelo estándar. Pero esto no es cierto en el marco de la teoría ADD porque todas las partículas del modelo estándar —el electrón, por ejemplo— están retenidas en una brana. Así que las partículas del modelo estándar, que no viajan en el bulto de dimensión superior, no portarían momentos extradimensionales. Las partículas del modelo estándar, que están confinadas en una brana, no tendrían entonces compañeras KK. Y al no haber compañeras KK, las limitaciones basadas en las partículas KK, como las consideradas en el último capítulo, ya no tendrían validez.

De hecho, en el modelo ADD, la única partícula que ha de tener compañeras KK es el gravitón, que, según sabemos, ha de viajar en el bulto de dimensión superior. Sin embargo, las compañeras KK del gravitón interactúan mucho más débilmente que las compañeras KK del modelo estándar. Mientras que las compañeras KK del modelo estándar interactúan a través del electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte, las compañeras KK del gravitón interactúan sólo con una intensidad gravitatoria: o sea, tan débilmente como el propio gravitón. Las compañeras KK del gravitón serían mucho más difíciles de producir y de detectar que las compañeras KK de las partículas del modelo estándar. Al fin y al cabo, nadie ha visto nunca directamente un gravitón. Sus compañeras KK, que interactúan tan débilmente como el propio gravitón, no van a ser más fáciles de detectar.

ADD llegaron a la conclusión de que si las únicas restricciones de las dimensiones extras venían de la gravedad, el tamaño de la dimensión extra en su teoría, en la que las partículas del modelo estándar están retenidas en una brana, podría ser mucho más grande de lo que sugiere el capítulo anterior. La razón radica en que la gravedad es muy débil y, por lo tanto, es extraordinariamente difícil investigarla experimentalmente. Para objetos ligeros a distancias cortas, la gravedad es tan débil que sus efectos son fácilmente anegados por otras fuerzas.

Por ejemplo, la fuerza gravitatoria entre dos electrones es 10^{43} veces más débil que la fuerza electromagnética. La fuerza gravitatoria de la Tierra domina solamente porque su carga neta es cero. A escalas pequeñas, no sólo cuenta la carga neta, sino también el modo en que las cargas están distribuidas. Para probar la ley de la fuerza gravitatoria entre objetos pequeños, hay que proteger el tirón de la gravedad de las consecuencias de otras fuerzas, por diminutas que sean. Aunque los planetas que orbitan

alrededor del Sol, la Luna que orbita alrededor de la Tierra y la propia evolución del universo nos hablan sobre la forma de actuar de la gravedad a distancias muy grandes, la gravedad es difícil de comprobar a distancias cortas. Sabemos mucho menos sobre ella que sobre las otras fuerzas. Así que si la gravedad es la única fuerza del bulto, la existencia de dimensiones extras sorprendentemente grandes no contradiría ningún resultado experimental. Las dimensiones con partículas confinadas en branas son difíciles de observar.

En 1996, cuando ADD escribieron su artículo, la ley de Newton del cuadrado del inverso se había comprobado hasta distancias aproximadas de un milímetro. Esto implicaba que las dimensiones extras podían ser del tamaño de un milímetro y que nadie había visto pruebas de ellas. Como decían en su artículo ADD: «Nuestra interpretación de M_{Pl} [la energía de Planck] como la escala fundamental de energía [donde las interacciones gravitatorias se hacen fuertes] está entonces basada en la hipótesis de que la gravedad no sufre modificaciones al pasar por los 33 órdenes de magnitud que van desde donde es medida [...] hasta la longitud de la escala de Planck, 10^{-33} cm»[109] . En otras palabras, en 1998 no se sabía nada sobre la gravedad que se dedujera de experimentos realizados a distancias más cortas que un milímetro. A separaciones más pequeñas que ésa, la ley de la fuerza gravitatoria podría comportarse de otra manera, con la atracción gravitatoria aumentando mucho más rápidamente al aproximarse los objetos entre sí, por ejemplo, sin que nadie lo supiera.

Dimensiones grandes y el problema de la jerarquía

La posibilidad de dimensiones extras grandes fue una observación importante. Pero ADD no estudiaron las dimensiones extras grandes simplemente para explorar posibilidades abstractas. Su auténtico interés era la física de partículas y, en particular, el problema de la jerarquía.

Como se explicó en el capítulo 12, el problema de la jerarquía concierne la enorme proporción que hay entre la masa de la escala débil y la masa de la escala de Planck, las masas que asociamos con la física de partículas y la gravedad. Hasta hace poco, la cuestión principal que se planteaban los físicos de partículas era por qué la masa de la escala débil era tan pequeña, a pesar de las contribuciones virtuales del tamaño de la masa de la escala de Planck (que son grandes)[110] a la masa de la partícula de Higgs, que tenderían a hacerla crecer. Hasta que los físicos empezaron a pensar sobre las dimensiones extras, todos los intentos de abordar el problema de la jerarquía suponía reforzar el modelo estándar con la esperanza de encontrar una teoría subyacente más general de la física de partículas que explicase por qué la masa de la escala débil es tan pequeña en relación a la masa de la escala de Planck.

Pero el problema de la jerarquía involucra una gran disparidad entre dos números. El enigma es por qué la escala de Planck y la escala débil son tan diferentes. De modo que el problema de la jerarquía puede plantearse con otras palabras: ¿por qué la masa de la escala de Planck es tan grande si la masa de la escala débil es tan pequeña? O equivalentemente, ¿por qué la

fuerza de la gravedad es tan débil cuando actúa sobre las partículas elementales? Planteado de este modo, el problema de la jerarquía suscita la cuestión de si es la gravedad, y no la física de partículas, lo que difiere de lo que los físicos han supuesto.

ADD siguieron este proceso lógico y sugirieron que los intentos de resolver el problema de la jerarquía a través de generalizaciones del modelo estándar iban por el camino equivocado. Observaron que las dimensiones extras suficientemente grandes podían resolver igual de bien el problema. Propusieron que la escala de masa fundamental que determina la intensidad de la gravedad no es la masa de la escala de Planck, sino una escala mucho más pequeña, próxima a un TeV.

Sin embargo, ADD se toparon entonces con la cuestión de por qué la gravedad sería tan débil. Al fin y al cabo, la razón por la que la masa de la escala de Planck es tan grande es que la gravedad es débil: la intensidad de la gravedad es inversamente proporcional a esta escala. Una escala de masa fundamental mucho más pequeña para la gravedad haría que las interacciones gravitatorias fueran demasiado fuertes.

Pero este problema no era insuperable. ADD señalaron que la que era necesariamente fuerte era solamente la gravedad de dimensión superior. Razonaron que las dimensiones extras grandes podrían diluir la intensidad de la gravedad hasta el punto de que, aunque la fuerza de la gravedad fuera muy fuerte en dimensiones superiores, fuera, sin embargo, muy débil en la teoría efectiva de dimensión inferior. En su descripción, la gravedad aparece débil ante nosotros porque se diluye en un espacio extradimensional muy grande. Las fuerzas electromagnética, fuerte y débil, por otro lado, no serían débiles porque estas fuerzas estarían confinadas en una brana y no se diluirían en modo alguno. Las dimensiones grandes y una brana podrían, por lo tanto, explicar razonablemente por qué la gravedad es tan débil en relación con las otras fuerzas.

Nima me dijo que el punto culminante de su investigación se produjo cuando él y sus colaboradores comprendieron la relación precisa entre las intensidades de la gravedad en dimensión superior y la gravedad en dimensión inferior. Esta relación no era nueva. Los especialistas de la teoría de cuerdas, por ejemplo, siempre la usaron para relacionar la escala gravitatoria tetradimensional con la escala de dimensión diez. Y, como expliqué brevemente en el capítulo 16, Hořava y Witten usaron la relación entre las intensidades de la gravedad de dimensión diez y la gravedad de dimensión once cuando observaron que la gravedad podía unificarse con otras fuerzas: una undécima dimensión grande permite que la escala gravitatoria de dimensión superior, y, por lo tanto, también la escala de las cuerdas, sea tan pequeña como la escala GUT. Pero nadie había reconocido antes que la gravedad extradimensional podría ser lo suficientemente fuerte como para abordar el problema de la jerarquía, siempre que las dimensiones extras sean lo suficientemente grandes como para diluirla adecuadamente. Nima, Savas y Gia, tras haber reflexionado una temporada sobre las dimensiones extras y haber aprendido a relacionar la gravedad de dimensión superior y la gravedad de dimensión inferior, comprendieron esta extraordinaria implicación.

La relación entre la gravedad en dimensión superior y la gravedad en dimensión inferior

En el capítulo 2 vimos que cuando exploramos sólo las distancias que son más grandes que el tamaño de las dimensiones extras enrolladas, las dimensiones extras son imperceptibles. Sin embargo, esto no implica necesariamente que las dimensiones adicionales no tengan consecuencias físicas; aunque no las veamos, pueden, sin embargo, influir en los valores de magnitudes que sí vemos. El capítulo 17 dio un ejemplo de este fenómeno. En el modelo de ruptura de la supersimetría secuestrada, en la que la ruptura de la supersimetría ocurría en una brana lejana y el gravitón comunicaba la ruptura a las compañeras supersimétricas de las partículas del modelo estándar, los valores de las masas de las supercompañeras reflejaban el origen extradimensional de la ruptura de la supersimetría y su comunicación mediante la gravedad.

Consideraremos ahora otro ejemplo en el que las dimensiones extras influyen en los valores de magnitudes conmensurables. Los tamaños de las dimensiones compactadas determinan la relación entre la intensidad de la gravedad tetradimensional (esto es, la gravedad que observamos) y la intensidad de la gravedad de dimensión superior de la que proviene. La gravedad se diluye en las dimensiones extras y es más débil cuando las dimensiones extras enrolladas encierran un volumen más grande.

Para ver cómo funciona esto, volvamos al ejemplo del capítulo 2, donde consideramos el universo tridimensional de la manguera de jardín como una analogía de un bulto tridimensional acotado por branas. Si entrara agua en la manguera a través de un orificio (véase la figura 23, p. 82), aquélla se dispersaría inmediatamente pasado el orificio y se extendería en las tres dimensiones. Sin embargo, una vez que el agua hubiese alcanzado la anchura de la manguera, se extendería solamente a lo largo de la longitud de la manguera: ésta es la razón por la que la manguera parece ser unidimensional cuando medimos la ley de la fuerza gravitatoria a distancias más largas que el tamaño de las dimensiones extras.

Pero aunque el agua viaje sólo a lo largo de la única dimensión de la manguera, su presión depende del tamaño de la sección. Una manera de entender esto es imaginar lo que ocurriría si se incrementa la anchura de la manguera. El agua que entrase a través del orificio se extendería entonces a lo ancho de una región más grande y la presión del agua que sale del orificio sería más débil.

Si la presión del agua representa las líneas de fuerza gravitatoria, y el agua que entra en la manguera a través del orificio representa las líneas del campo que salen de un objeto con masa, entonces las líneas de fuerza que parten de este objeto con masa se extenderían inicialmente en las tres direcciones, al igual que el agua en el ejemplo anterior. Y cuando las líneas de fuerza alcancen las paredes del universo (las branas), se combarán y correrán únicamente a lo largo de la única dimensión grande. Con la manguera, descubrimos que cuanto más ancha es la boquilla, más débil es la presión del agua. Análogamente, el área de las dimensiones extras en nuestro universo de

juguete de la manguera de jardín determinaría lo diluidas que estarían las líneas de campo en el mundo de dimensión inferior. Cuanto más grande sea el área de las dimensiones extras, más débil será la intensidad del campo gravitatorio en el universo efectivo de dimensión inferior.

El mismo argumento se aplica a las dimensiones enrolladas en un universo con cualquier número de dimensiones enrolladas. Cuanto mayor sea el volumen de las dimensiones extras, más se diluye la fuerza gravitatoria y más débil es la intensidad de la gravedad. Podemos ver esto con una manguera de dimensión superior análoga a la que acabamos de considerar. Las líneas de fuerza gravitatoria en una manguera de dimensión superior se extenderían primero en todas las dimensiones, incluidas las dimensiones extras enrolladas. Las líneas de fuerza alcanzarían la frontera de las dimensiones enrolladas, después de lo cual se extenderían sólo a lo largo de las dimensiones infinitas del espacio de dimensión inferior. La expansión inicial en las dimensiones extras reduciría la densidad de las líneas de fuerza en el espacio de dimensión inferior, de modo que la intensidad de la gravedad experimentada allí sería más débil[M34] .

De nuevo el problema de la jerarquía

A causa de la disolución de la gravedad en las dimensiones extras, la gravedad de dimensión inferior es más débil cuando el volumen del espacio compactado extradimensional es más grande. ADD observaron que esta disolución de la gravedad en las dimensiones extras podría, en principio, ser tan grande como para explicar la debilidad observada de la gravedad tetradimensional en nuestro mundo.

Razonaron como sigue. Supongamos que la gravedad en una teoría de dimensión superior no depende de la enorme masa de la escala de Planck, 10^{19} GeV, sino de una energía mucho más pequeña, en torno a un TeV, dieciséis órdenes de magnitud más baja. Eligieron un TeV para eliminar el problema de la jerarquía: si un TeV o una energía parecida fuera la energía a la que la gravedad se vuelve fuerte, entonces no habría jerarquía de masas en la física de partículas. Todo, tanto la física de partículas como la gravedad, estaría caracterizado por la escala TeV. Así que mantener una partícula de Higgs razonablemente ligera de aproximadamente un TeV no sería un problema en su modelo.

Según su suposición, a energías de aproximadamente un TeV, la gravedad de dimensión superior sería una fuerza razonablemente intensa, comparable en intensidad a las otras fuerzas conocidas. Para tener una teoría sensata que concordara con lo que vemos, ADD necesitaban, por lo tanto, explicar por qué la gravedad tetradimensional parece tan débil. El ingrediente añadido de su modelo era la suposición de que las dimensiones extras eran extraordinariamente grandes. En el fondo desearíamos explicar el por qué de este tamaño grande. Pero, según su propuesta, las dimensiones extras encierran ese volumen grande. Y, siguiendo la lógica de la sección anterior, la gravedad tetradimensional sería extraordinariamente débil. La gravedad en nuestro mundo sería débil porque las dimensiones extras son grandes, no porque haya fundamentalmente una masa grande responsable de una fuerza

gravitatoria minúscula. La masa de la escala de Planck que medimos en cuatro dimensiones es grande (haciendo que la gravedad parezca pequeña) solamente porque la gravedad se ha diluido en dimensiones extras grandes.

¿Cuán grandes habrían de ser estas dimensiones extras? La respuesta depende del número de dimensiones extras. ADD consideraron diferentes números posibles de dimensiones para su modelo, ya que los experimentadores no han decidido todavía cuántas dimensiones hay. Nótese que en este punto nos interesan solamente las dimensiones extras grandes. Así que si pensamos que nosotros y los especialistas de teoría de cuerdas de nuestra universidad sabemos que el número de dimensiones espaciales es diez u once, podemos todavía considerar diferentes posibilidades para el número de dimensiones grandes y suponer que todas las demás dimensiones son pequeñas, de modo que se pueda hacer caso omiso de ellas sin peligro.

El tamaño de las dimensiones en la propuesta de ADD depende de cuántas de ellas haya, porque el volumen depende del número de dimensiones. Si todas las dimensiones fueran del mismo tamaño, una región de dimensión superior encerraría mayor volumen que una de dimensión inferior y diluiría, por lo tanto, más la gravedad. Esto podemos verlo fácilmente a partir del hecho de que los objetos de dimensión inferior entran dentro de los de dimensión superior. O, volviendo al ejemplo del aspersor del capítulo 2, podemos ver que una planta recibe más agua de un aspersor que reparte agua solamente a lo largo de un segmento de una longitud determinada (una dimensión) que de uno que reparte agua sobre el área definida por un círculo (dos dimensiones) cuyo diámetro es esa misma longitud. Cuando el agua se reparte por una región de dimensión superior, llega más diluida.

Si hubiera solamente una dimensión extra grande, ésta tendría que ser enorme para satisfacer la propuesta de ADD. Tendría que ser tan grande como la distancia de la Tierra al Sol para diluir lo suficiente la gravedad. Esto no está permitido. Si la dimensión extra fuera así de grande, el universo se comportaría como si fuera de dimensión cinco a distancias conmensurables. Ya sabemos que la ley de la fuerza gravitatoria de Newton es válida a estas distancias; una dimensión extra grande que modificara la gravedad a estas largas distancias queda claramente descartada.

Sin embargo, con que haya dos dimensiones adicionales, el tamaño de las dimensiones es casi aceptablemente pequeño. Si hubiera exactamente dos dimensiones adicionales, éstas podrían ser del tamaño de un milímetro y aun así diluir debidamente la gravedad. Ésta es la razón por la que ADD prestaron tanta atención a la escala del milímetro. No sólo estaba justo en el límite de las sondas experimentales, sino que dos dimensiones adicionales de este tamaño podrían ser relevantes para el problema de la jerarquía. La gravedad podría extenderse por estas dos dimensiones milimétricas y producir, finalmente, la fuerza gravitatoria débil que conocemos. Por supuesto, un milímetro es todavía bastante grande, pero, como dijimos antes, las pruebas de la gravedad no son tan restrictivas como podríamos pensar. Espoleados por la descripción de ADD, la gente consideró más seriamente la búsqueda de dimensiones enrolladas de este tamaño.

Con más de dos dimensiones adicionales, la gravedad resulta modificada

solamente a una distancia muy pequeña. Con más dimensiones adicionales, puede diluirse suficientemente, incluso si esas dimensiones extras son relativamente pequeñas. Por ejemplo, con seis dimensiones extras el tamaño necesita ser sólo más o menos de 10^{-13} cm, la décima parte de una billonésima de centímetro.

Incluso con dimensiones tan pequeñas como éstas podríamos, con suerte, encontrar pruebas de uno de estos ejemplos en algún momento no muy lejano, no con las pruebas gravitatorias directas que discutiremos en la sección siguiente, sino con los experimentos de los aceleradores de partículas de alta energía que consideraremos después.

La búsqueda de dimensiones grandes

¿Qué hacer para descubrir diferencias en la gravedad a distancias cortas? ¿Qué deberíamos buscar? Sabemos que si hay dimensiones enrolladas, la intensidad de la gravedad a distancias más pequeñas que el tamaño de las dimensiones extras decrecería más rápidamente con la distancia de lo que Newton había predicho, porque la gravedad se extendería en más de tres dimensiones espaciales. Siempre que los objetos estuvieran separados a una distancia más pequeña que los tamaños de las dimensiones extras, operaría la gravedad de dimensión superior. Un escarabajo lo suficientemente pequeño que circulase por una dimensión enrollada experimentaría la dimensión extra, porque podría viajar por ella y también porque la fuerza gravitatoria se extendería alrededor de él en todas las dimensiones. Así que si alguien, como este escarabajo inusualmente perceptivo, pudiera detectar la fuerza gravitatoria a distancias cortas, las dimensiones extras tendrían consecuencias visibles.

Esto nos dice que, explorando la gravedad a distancias tan pequeñas como el tamaño propuesto de una dimensión enrollada (o más pequeñas todavía) y estudiando cómo la intensidad de la gravedad depende de la separación de las masas a esas distancias, un experimento podría indagar el comportamiento de la gravedad y buscar pruebas de las dimensiones extras. Sin embargo, los experimentos que resultan sensibles a la gravedad a distancias muy cortas son formidablemente difíciles de proyectar. La gravedad es tan débil que resulta fácilmente sofocada por las otras fuerzas, como el electromagnetismo. Como se mencionó antes, en la época de la propuesta de ADD, los experimentos habían buscado desviaciones de la ley de la fuerza gravitatoria de Newton y habían probado que la ley se aplica por lo menos hasta distancias de aproximadamente un milímetro. Si alguien supiera hacerlo mejor y lograra estudiar distancias todavía más cortas, tendría una oportunidad de descubrir las dimensiones grandes de la propuesta de ADD, que estaban justo en el límite de la accesibilidad experimental.

Los físicos experimentales pusieron manos a la obra ante el nuevo reto. Motivados por la idea de ADD, Eric Adelberger y Blayne Heckel, dos profesores de la Universidad de Washington, diseñaron un bonito experimento cuyo propósito era buscar desviaciones de la ley de Newton a distancias muy cortas. Otros han estudiado también la gravedad a cortas distancias, pero este experimento fue la prueba más rigurosa de la propuesta de ADD.

Su aparato, localizado en el sótano del Departamento de Física de la Universidad de Washington, se llama el aparato del experimento Eöt-Wash. El nombre se refiere a un famoso físico que estudió la gravedad, el barón húngaro Roland von Eötvös. El experimento del grupo Eöt-Wash se ilustra en la figura 76. Consiste en un anillo suspendido sobre dos discos atractores, uno ligeramente por encima del otro. El anillo, así como el disco superior y el inferior, está perforado por una serie de agujeros, y dichos agujeros están alineados de modo tal que, si la ley de Newton es correcta, el anillo no girará. Sin embargo, si hubiera dimensiones extras, la diferencia de atracción gravitatoria entre los dos discos no concordaría con la ley de Newton y el anillo giraría.

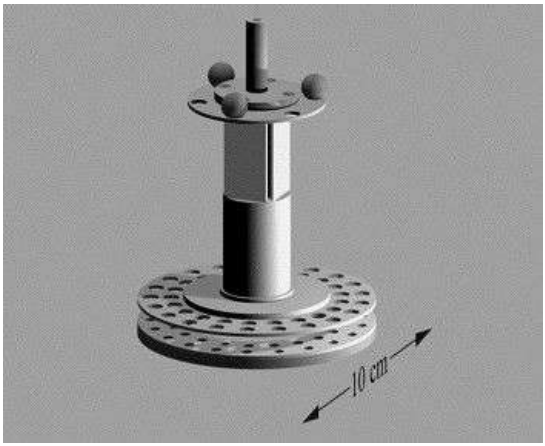


FIGURA 76. El aparato del experimento Eöt-Wash. Un anillo se encuentra suspendido sobre dos discos. Los agujeros del anillo y de los discos garantizan que el anillo no girará si se cumple la ley del cuadrado del inverso de Newton. Las tres esferas que hay cerca de la parte superior del aparato se usan para calibrarlo.

Adelberger y Heckel no detectaron ningún giro y concluyeron que no hay efectos extradimensionales (o de otro tipo) que modifiquen la fuerza gravitatoria a las distancias que ellos pudieron estudiar. Su experimento midió la fuerza gravitatoria a distancias más pequeñas que las estudiadas hasta entonces y estableció que la ley de Newton es válida hasta distancias superiores a aproximadamente la décima parte de un milímetro. Esto implicaba que las dimensiones extras, incluso aquéllas para las que las partículas del modelo estándar están confinadas en una brana, no pueden ser de un tamaño tan grande como un milímetro, como ADD habían sugerido. Tienen que ser por lo menos diez veces más pequeñas.

Notablemente, las dimensiones del tamaño de un milímetro están también vedadas por las observaciones del espacio exterior. El principio de incertidumbre de la mecánica cuántica asocia a un milímetro una energía de tan sólo más o menos 10^{-3} eV y a la décima parte de un milímetro una energía de más o menos 10^{-2} eV, en cualquier caso, una energía extremadamente

pequeña, varios órdenes de magnitud más pequeña que la necesaria para producir un electrón, por ejemplo.

Partículas con una masa tan pequeña podrían quizá encontrarse en el universo circundante y en objetos celestiales, como en las supernovas o en el Sol. Estas partículas serían tan ligeras que, de existir, las supernovas calientes podrían producirlas. Como ahora sabemos cuán rápidamente se enfrían las supernovas y comprendemos el mecanismo de enfriamiento (mediante emisión de neutrinos), sabemos que no puede haber muchos otros objetos emitidos con baja masa. El ritmo de enfriamiento sería demasiado rápido si la energía se filtrara de algún otro modo. En particular, los gravitones no podrían llevarse demasiada energía. Usando este razonamiento, los físicos probaron (independientemente de cualquier experimento terrestre) que las dimensiones extras deberían ser de un tamaño inferior a la centésima parte de un milímetro.

Sin embargo, hay que tener en mente que, por impresionante que resulte descartar desvíos de la gravedad a distancias de un milímetro, esto no pone a prueba la mayor parte de los modelos extradimensionales actualmente propuestos. Recuérdese que sólo el modelo con dos dimensiones extras grandes produce efectos que serían visibles a una escala milimétrica. Si una teoría con más de dos dimensiones extras grandes resuelve el problema de la jerarquía (o si uno de los modelos que consideraremos en el próximo capítulo se aplica al mundo), las desviaciones de la ley de Newton ocurrirían únicamente a distancias mucho más pequeñas.

No sabemos con certeza cómo es el comportamiento de la atracción gravitatoria entre dos objetos separados entre sí por menos de la décima parte de un milímetro. Nadie lo ha comprobado nunca. Así que no sabemos si hay dimensiones extras que se abren al llegar a la décima parte de un milímetro, distancia que, si lo pensamos un momento, no es tan pequeña. Las dimensiones extras relativamente grandes —aunque no tanto que midan un milímetro— siguen siendo una posibilidad viable. Para comprobar modelos de este tipo, tendremos que esperar a las pruebas de los aceleradores, que es el tema de la siguiente sección.

La búsqueda de dimensiones extras grandes en los aceleradores

Los aceleradores de partículas de alta energía están bien equipados para descubrir partículas KK de dimensiones extras grandes, aunque haya más de dos de estas dimensiones. En los modelos ADD con dimensiones extras grandes, las compañeras KK del gravitón son siempre increíblemente ligeras. Si la propuesta con dimensiones grandes se aplica al mundo real, las compañeras KK del gravitón serían lo suficientemente ligeras como para ser producidas en los aceleradores, con independencia del número de dimensiones extras que haya. Esto nos dice que, incluso en el caso de que las dimensiones sean más pequeñas que un milímetro, las búsquedas realizadas en los aceleradores actuales y los futuros podrían llevar a descubrirlas. Los aceleradores actuales crean energía más que suficiente para producir ese tipo de partículas con poca masa. De hecho, si la única magnitud relevante fuera la energía, ya se habrían producido partículas KK en abundancia.

Sin embargo, hay una pega. Las compañeras KK del gravitón interactúan solamente de un modo muy débil: tan débilmente, de hecho, como el propio gravitón. Dado que las interacciones de un gravitón son tan insignificantes que los gravitones nunca se producen en los aceleradores o no son detectados en una proporción medible, a una compañera KK individual del gravitón le pasaría lo mismo.

Pero la posibilidad en potencia de detectar partículas KK de dimensiones superiores es, de hecho, mucho más prometedora de lo que nos puede haber hecho creer esta deprimente valoración. Esto es así porque, si la propuesta ADD es correcta, habría tal cantidad de compañeras KK ligeras del gravitón que todas juntas podrían dejar alguna prueba detectable de su existencia. Si es cierta la hipótesis de dimensiones grandes, entonces, aunque cualquier partícula KK individual se produciría sólo muy raramente, la probabilidad de producir una de las muchas partículas KK ligeras sería razonablemente alta. Por ejemplo, si hubiera dos dimensiones extras, habría aproximadamente cien mil billones de modos KK suficientemente ligeros que podrían producirse en un acelerador que opere a una energía de un TeV. La probabilidad de producir al menos una de estas partículas sería bastante alta, aunque la probabilidad de producir una de ellas determinada sea extraordinariamente baja.

Sería como si alguien nos susurrara algo en una voz tan baja que fuéramos incapaces de memorizarlo la primera vez que lo oímos. Pero como si luego cincuenta personas nos repitieran lo mismo. Aunque no hubiéramos prestado mucha atención la primera vez que oímos el mensaje, al llegar a la quincuagésima vez, ya lo habríamos memorizado. Análogamente, aunque las partículas KK son lo suficientemente ligeras para ser producidas en los aceleradores actuales, interactúan tan débilmente que no podemos detectar ninguna de ellas individualmente. Sin embargo, cuando un acelerador alcance energía suficiente para producir muchas de ellas, las partículas KK dejarán señales detectables.

El Gran Acelerador de Hadrones, que estudiará las energías de la escala TeV, podría producir partículas KK a un ritmo detectable si la idea de ADD es correcta. Esto podría parecer una especie de coincidencia afortunada: ¿por qué una energía de aproximadamente un TeV va a ser relevante para la producción de partículas KK cuando ni las masas de estas partículas KK ni la masa que determina la intensidad de interacción de estas partículas KK (esto es, M_{Pl}) es un TeV? La respuesta es que una energía de aproximadamente un TeV determina la intensidad de la gravedad de dimensión superior y la gravedad de dimensión superior determina, en última instancia, lo que producirá un acelerador. Como las interacciones de las muchas compañeras KK del gravitón son equivalentes a la interacción de un único gravitón de dimensión superior y el gravitón de dimensión superior interactúa fuertemente a energías próximas a un TeV, la suma de las contribuciones de todas las partículas KK tiene que ser también significativa en esta escala.

Los físicos experimentales están ya buscando partículas KK en el Tevatrón del Fermilab. Aunque el Tevatrón no alcanza energías tan altas como las que alcanzará el LHC, sí alcanza energías para las que tiene sentido empezar a

buscar. Pero el LHC operará mejor y tiene una probabilidad mucho más alta de encontrar partículas KK de las de ADD, si es que existen.

¿Cómo se presentarán estas partículas KK? La respuesta es que las colisiones que producen las compañeras KK del gravitón se presentarán como eventos normales en el acelerador, con la excepción de que, aparentemente, no habrá energía. En el LHC, al chocar dos protones, éstos podrían producir una partícula del modelo estándar y una compañera KK del gravitón. La partícula del modelo estándar podría ser un gluón, por ejemplo: los protones chocarían para producir un gluón virtual y este gluón virtual se transformaría en un gluón físico de verdad y en una compañera KK del gravitón.

Sin embargo, cualquier partícula KK individual interaccionaría muy débilmente y sería imposible detectarla: recuérdese que las compañeras KK del gravitón interactúan muy débilmente y que podrían ser detectadas solamente porque hay mucha cantidad de ellas. Pero como el detector registraría el gluón —o más precisamente, el flujo (véase el capítulo 7) que acompaña al gluón—, la colisión que produjo la compañera KK del gravitón quedaría registrada, aunque no la propia partícula. La clave para identificar el origen extradimensional de la colisión sería que la compañera KK no vista se llevaría energía a las dimensiones extras, de modo que parecería que falta energía. Estudiando colisiones en las que la energía que emite el gluón es inferior a la energía que entró en la colisión, los experimentadores podrían deducir que han producido una compañera KK del gravitón (véase la figura 77). Esto sería análogo al proceso que siguió Pauli para conjeturar la existencia del neutrino (como vimos en el capítulo 7).

FIGURA 77. Producción de una partícula KK en el modelo ADD. Los protones chocan y un quark y un antiquark se anulan para producir un gluón virtual. El gluón virtual se convierte en una partícula KK no detectada y un flujo observable. Las líneas grises son chorros de partículas adicionales que los protones siempre emiten al chocar.

Como lo único que sabríamos de la nueva partícula es que se lleva energía, en realidad no sabríamos con seguridad si el acelerador ha producido una partícula KK y no cualquier otra partícula que interactúa débilmente y no puede ser detectada. Sin embargo, haciendo un estudio detallado de las colisiones en las que falta energía —cómo el ritmo de producción depende de la energía, por ejemplo—, los experimentadores podrían esperar determinar si la interpretación con partículas KK es o no correcta.

En nuestro mundo tetradimensional, las partículas KK serían las intrusas extradimensionales más accesibles, ya que posiblemente sean los objetos más ligeros capaces de indicar las dimensiones extras. Pero, si tenemos suerte, otras firmas del modelo ADD podrían aparecer en su compañía, firmas que incluyan objetos todavía más exóticos. Si la teoría ADD es correcta, la gravedad de dimensión superior se haría fuerte aproximadamente a la energía de un TeV, es decir, a una energía mucho más baja de la que sería la correcta en un mundo tetradimensional convencional. Si éste es el caso, cabe la posibilidad de que se produzcan agujeros negros a una energía próxima a un TeV, y estos agujeros negros de dimensión superior constituirían una puerta para una mejor comprensión de la gravedad clásica, la gravedad

cuántica y la forma del universo. Si las energías relevantes de la propuesta ADD son suficientemente bajas, la producción de agujeros negros podría ser inminente; podrían formarse en el LHC.

Los agujeros negros de dimensión superior que se formasen en los aceleradores serían mucho más pequeños que los que hay en el universo, a nuestro alrededor. Serían comparables, en tamaño, a las minúsculas dimensiones extras. Por si esto nos preocupa, hemos de decir que podemos quedarnos tranquilos, pues estos pequeños agujeros negros, de vida muy breve, no supondrán un peligro ni para nosotros ni para nuestro planeta: habrán desaparecido antes de que puedan hacer algún daño. Los agujeros negros no duran siempre: se evaporan al emitir una radiación mediante el fenómeno que se conoce como *radiación de Hawking* . Pero, al igual que una pequeña gota de café se evapora más rápidamente que una taza entera, un agujero negro pequeño se evapora más rápidamente que uno grande, de modo que los agujeros negros que acaso lleguen a producirse en los aceleradores se evaporarían casi en el acto. No obstante, si se producen, estos agujeros negros de dimensión superior durarían el tiempo suficiente para dejar en un detector signos visibles de su existencia. Su aparición resultaría muy vistosa, pues producirían muchas más partículas que las que encontramos en los procesos normales de desintegración de partículas, y estas partículas irían en todas las direcciones.

Además, si el modelo ADD es correcto, los agujeros negros y las compañeras KK del gravitón podrían no ser los únicos descubrimientos exóticos nuevos. Si ADD y la teoría de cuerdas son ambas correctas, los aceleradores podrían producir cuerdas a muy bajas energías, casi tan bajas como un TeV. Esto se debe, una vez más, a que la escala fundamental de la gravedad es muy baja en los modelos ADD. La gravedad de dimensión superior se haría fuerte aproximadamente a un TeV y la gravedad cuántica podría aportar efectos medibles.

Las cuerdas de la teoría ADD no tendrían tanta masa como la inaccesible masa de la escala de Planck. Si pensamos en las cuerdas como si fueran notas, las cuerdas de la propuesta ADD son mucho menos agudas. Las cuerdas poco agudas de los modelos ADD poseerían una masa no mucho más grande que un TeV. Si tenemos suerte, serán lo suficientemente ligeras como para que pueda producirlas el LHC. Las colisiones con energía suficiente podrían entonces producir en abundancia las cuerdas ligeras de este modelo, acompañadas de otros objetos nuevos llamados *bolas de cuerda* , que contienen muchas cuerdas largas.

Sin embargo, a pesar de lo atractivo de estos posibles descubrimientos, hay que tener en mente que con toda probabilidad la energía del LHC estará cerca de la energía necesaria para construir cuerdas y agujeros negros, pero que le faltará un poco para llegar a ella. El hecho de que las cuerdas de la teoría ADD y los agujeros negros se hagan visibles o no depende de la energía precisa de la gravedad de dimensión superior (y, por supuesto, de si las propuestas son correctas o incorrectas).

La discusión

La propuesta ADD fue fascinante. ¿Quién habría pensado que las dimensiones extras podrían ser tan grandes, o que podrían tener tanto peso en problemas de un interés inmediato (al menos para los físicos de partículas), como el problema de la jerarquía? Sin embargo, esta propuesta no *resolvió* , de hecho, el problema de la jerarquía. Convirtió el problema de la jerarquía en otro problema: ¿pueden las dimensiones adicionales ser así de grandes? Ésta sigue siendo una cuestión importante en el contexto de ADD. Sin algunos principios físicos nuevos, que aún habría que determinar, no se espera que las dimensiones sean tan extraordinariamente grandes. Como mucho, de acuerdo con las teorías conocidas, seguiríamos necesitando la supersimetría para mantener el gran espacio plano que se precisa para la propuesta ADD. En esencia, la supersimetría estabilizaría y reforzaría las dimensiones grandes que, de otro modo, se colapsarían. Como parecía que una de las propiedades más bonitas del modelo ADD era su posible capacidad para eliminar la necesidad de la supersimetría, esto resulta un poco desalentador.

El otro punto débil de la teoría radica en sus consecuencias cosmológicas. Para que la teoría concuerde con los hechos conocidos sobre la evolución del universo, algunos de sus números han de ser elegidos con mucho cuidado. Y el bulto tiene que contener muy poca energía, pues, de lo contrario, la evolución cosmológica no coincidiría con las observaciones. De nuevo, esto es una posibilidad, pero justamente el punto clave de una solución del problema de la jerarquía consiste en eliminar la necesidad de grandes apaños.

No obstante, muchos físicos estaban abiertos a la idea de considerar en serio las teorías extradimensionales y de tratar de inventar medios para buscarlas. Los físicos experimentales estaban, especialmente, entusiasmados. Como me dijo Joe Lykken, un físico de partículas que trabaja en el Fermilab, al describirme la reacción que tuvieron los experimentadores ante las dimensiones extras grandes: «Para ellos, todo eso de investigar “más allá del modelo estándar” es una chaladura. ¿Supersimetría o dimensiones extras grandes? ¡Qué más da! Las dimensiones extras no son una chaladura mayor». Los físicos experimentales estaban ansiosos por buscar algo nuevo y las dimensiones extras les proporcionaron una alternativa muy interesante a la supersimetría.

Los teóricos tuvieron reacciones más matizadas. Por un lado, las dimensiones extras grandes parecían extrañas; nadie las había considerado antes, ya que no se conocía ninguna razón por la que las dimensiones extras tuvieran que ser tan grandes. Por otro lado, nadie podía identificar un método para descartarlas. De hecho, antes de que se escribiera el primer artículo sobre las dimensiones extras grandes, Gia Dvali, uno de sus autores, habló sobre ellas en Stanford. Los autores, que eran conscientes de lo radical de su propuesta, esperaron el día de la charla con inquietud, y se sintieron aliviados cuando no surgió ninguna objeción seria. Pero también algo consternados: ¿cómo podía la gente aceptar esta idea tan radical con tanta ecuanimidad? Nima me dijo que el día que colgaron el artículo en Internet vivieron una experiencia parecida. Aunque esperaban una inundación de respuestas, solamente recibieron dos. Al parecer, el físico italiano Riccardo Rattazzi y yo fuimos los únicos que comentamos algunos posibles problemas. Y estos dos mensajes no eran realmente independientes: Riccardo y yo acabábamos de discutir el

artículo en el CERN, donde estábamos de visita.

Posteriormente, los físicos, a medida que fueron absorbiendo las implicaciones del modelo ADD, investigaron las consecuencias para el mundo real con más detalle, considerando pruebas de gravedad, búsqueda en aceleradores, consecuencias astrofísicas e implicaciones cosmológicas. Las reacciones variaron según los intereses o el estilo de las investigaciones.

Los físicos cuya investigación exploraba detalles del modelo estándar aceptaron con alegría la posibilidad de una idea nueva, que era, en todo caso, interesante. Sorprendentemente, hubo más hostilidad por parte de los constructores de modelos, que no deseaban perder ideas sobre la supersimetría que se habían ido atrincherando con el paso de los años. Hay que admitir que alterar el modelo estándar tan drásticamente plantea unos desafíos formidables. Cualquier modelo nuevo tendría que reproducir los rasgos del modelo estándar que han sido ya comprobados experimentalmente y las teorías que alteren el modelo estándar demasiado drásticamente pasarán tiempos difíciles encarando este reto. Además, habría que abandonar la brillante luz de la supersimetría —la unificación de los acoplamientos, el hecho de que a altas energías todas las fuerzas tendrían la misma intensidad —. Sin embargo, los teóricos más jóvenes que no estaban comprometidos con la supersimetría daban muestras de un entusiasmo mayor. El tema de las dimensiones extras era una idea nueva, sin acorralar todavía, y planteaba nuevos retos y cuestiones abiertas.

También la reacción de los teóricos de cuerdas fue desigual. Cuando Savas Dimopoulos comenzó su proyecto, previó que la investigación de las dimensiones extras aproximaría entre sí la teoría de cuerdas y la física de partículas. Y los especialistas de la teoría de cuerdas prestaron atención a otra propuesta, aunque la mayoría de ellos consideraron las dimensiones extras grandes como una idea interesante, pero que nunca sería relevante para la teoría de cuerdas. Para los especialistas de las teoría de cuerdas, el problema básico era teórico: es difícil comprender cómo puede haber dimensiones tan grandes como las supuestas por ADD.

Personalmente, no creo que las dimensiones extras, en el caso de que existan, sean así de grandes[111] . Tanto por razones teóricas (es difícil conseguir dimensiones que sean tan grandes) como por razones basadas en las observaciones (es muy penoso conseguir que funcione la cosmología), las posibilidades de que esta idea dé en el blanco parecen ser remotas. Hasta Nima, uno de los protagonistas, se muestra escéptico en este punto. Pero se trata de una idea teórica muy importante. Esta sugerencia nueva y previamente inexplorada ha puesto de relieve hasta dónde llega nuestra ignorancia sobre la gravedad y la forma del universo. El artículo de ADD estimuló una buena cantidad de nuevos conceptos y, se pruebe o no que la idea es correcta, ha tenido ya un impacto importante en el pensamiento de los físicos. Los planteamientos con dimensiones grandes han llevado a muchas propuestas nuevas sobre dimensiones extras y a muchas ideas para pruebas experimentales. Después de que se encienda el LHC, los prejuicios teóricos se volverán, en cualquier caso, irrelevantes, ya que las implicaciones de los datos concretos serán irrefutables. ¿Quién sabe? A lo mejor resulta que tienen razón.

LO QUE ES NUEVO:

•Si las partículas del modelo estándar están confinadas en una brana, las dimensiones extras pueden ser mucho más grandes de lo que pensaron previamente los físicos: su tamaño aproximado acaso alcance la décima parte de un milímetro.

•Las dimensiones extras pueden ser tan grandes que quizá estén en condiciones de explicar por qué la gravedad es tan débil en comparación con las fuerzas electromagnética, débil y fuerte.

•Si las dimensiones extras grandes resuelven el problema de la jerarquía, la gravedad de dimensión superior se haría fuerte aproximadamente a un TeV.

•Si la gravedad de dimensión superior se hace fuerte aproximadamente a un TeV, el LHC producirá partículas KK a un ritmo medible. Las partículas KK se llevarían energía en cada colisión, de modo que su firma aparecería reflejada en colisiones en las que falta energía.

20

PASILLO ARQUEADO:

UNA SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LA JERARQUÍA

What’s so small to you,

Is so large to me.

If it’s the last thing I do,

I’ll make you see.

[Lo que para ti es pequeño | para mí es grande. | Aunque sea lo último que haga, | te lo haré ver].

SUZANNE VEGA

Atenea se despertó sobresaltada. Había vuelto a tener ese sueño recurrente, que, como siempre, empezaba en el momento en que entraba en la madriguera del Conejo, la cual conducía a un mundo de ensueño. En este episodio, cuando el Conejo anunció «Próxima parada: Bidilandia», Atenea hizo caso omiso y esperó a ver qué opciones quedaban.

En la parada tridimensional, el Conejo anunció: «Si vivieras aquí, ya estarías en casa». Pero se negó a abrir las puertas, a pesar de las protestas de Atenea, que insistía en que ella vivía allí y que tenía muchas ganas de llegar a casa.

En la parada siguiente, intentaron entrar unos seres de seis dimensiones que iban uniformados. Pero el Conejo echó una ojeada a su inmoderada gordura y cerró de repente las puertas, diciendo que era imposible que cupieran. Esos seres se marcharon rápidamente cuando el Conejo los amenazó con cortarlos en trocitos[112] .

El ascensor continuó su extraordinario viaje. En la siguiente parada, el Conejo anunció «Geometría arqueada: un mundo de dimensión cinco»[113] . Y empujó suavemente a Atenea hacia la puerta, al tiempo que le aconsejaba: «Entra a través del espejo deformante: él te llevará a casa». El Conejo había mencionado una quinta dimensión, pero Atenea creía que esto era muy poco probable. Con todo, no le quedaba más opción que entrar y esperar que el engañoso Conejo tuviera razón.

Cuando aprendemos una lengua, las palabras que recordamos dependen de nuestras necesidades o de nuestros intereses concretos. En un viaje en bicicleta por Italia, por ejemplo, aprendí a pedir agua de varias maneras diferentes: *acqua di rubinetto* , *acqua minerale* , *acqua (minerale) gassata* ,

acqua (minerale) naturale , etc. Análogamente, cuando aprendemos nuevas teorías físicas, cada físico tiene su propia perspectiva y sus propias cuestiones, y podría, por lo tanto, fijarse en ciertos aspectos de un sistema o descubrir implicaciones diferentes de lo que ya se sabe. Es posible que cada uno de nosotros oiga algo diferente, incluso cuando escuchamos las mismas palabras o nos enfrentamos a una misma situación. Es conveniente escuchar con atención.

Raman y yo llevábamos varios años pensando sobre el problema de la jerarquía. Pero no buscábamos una solución nueva y mejor del problema de la jerarquía cuando comenzamos con nuestra colaboración. Estábamos trabajando en el modelo de ruptura de la supersimetría secuestrada que presenté en el capítulo 17. En el curso de este trabajo, descubrimos, sin darnos cuenta, una notable *geometría arqueada* (un tipo particular de geometría curvada que pronto explicaremos) del espacio-tiempo, que estaba acotada por dos branas. Y como ambos estábamos ocupados con la física de partículas y la debilidad de la gravedad, inmediatamente reconocimos el significado potencial de esta geometría arqueada: si el modelo estándar de la física de partículas está en este espacio-tiempo, el problema de la jerarquía podría resolverse. No estoy segura de que fuéramos los primeros en estudiar este particular conjunto de ecuaciones de Einstein. Pero fuimos, sin duda alguna, los primeros en reconocer esta llamativa consecuencia.

Los próximos capítulos explican esto y otras posibilidades notables de espacio-tiempo curvado, así como el modo en que sus consecuencias violan a veces nuestras expectativas. Este capítulo se concentra en un mundo arqueado de dimensión cinco que podría ayudar a explicar el amplio abanico de masas que son relevantes en la física de partículas. Mientras que en la teoría cuántica de campos tetradimensional se espera que las partículas tengan aproximadamente las mismas masas, en una geometría arqueada de dimensión superior esto ya no es así. Las geometrías arqueadas proporcionan un marco en el que surgen naturalmente masas muy dispares y en el que los efectos cuánticos están bajo control.

En la geometría concreta descrita en este capítulo, veremos que el espacio está tan fuertemente arqueado en presencia de dos branas confinantes planas que el problema de la jerarquía de la física de partículas se resuelve automáticamente, sin necesidad de una dimensión grande o de un número arbitrario de ellas. En este contexto, una de las branas experimenta una gran fuerza gravitatoria, pero la otra no. El espacio-tiempo varía tan rápidamente a lo largo de la quinta dimensión que convierte un número modesto asociado con la separación entre las dos branas en un número enorme (más o menos diez mil billones) asociado con la intensidad relativa de la fuerza gravitatoria.

Explicaremos primero la debilidad de la gravedad en la segunda brana en términos de la función de probabilidad del gravitón, que determina las interacciones del gravitón en cualquier localización concreta de la quinta dimensión. Pero también explicaremos la debilidad de la gravedad en otros términos, más basados en la geometría arqueada misma que en la intensidad de interacción del gravitón. Veremos que una de las consecuencias sorprendentes de la geometría arqueada es que el tamaño, la masa e incluso el tiempo depende de la posición en la quinta dimensión. El arqueo del

espacio y el tiempo en este marco con dos branas es como el arqueo del tiempo en las cercanías del horizonte de un agujero negro. Pero en este caso el tiempo se dilata, la geometría se expande, y en una de las branas las partículas tienen una masa pequeña, de modo que el problema de la jerarquía se resuelve automáticamente.

Después de discutir la geometría arqueada y sus implicaciones para el problema de la jerarquía, concluiremos este capítulo con una discusión de las implicaciones características de la teoría para experimentos futuros. Uno de los aspectos más fascinantes de esta teoría, como ocurre con los modelos extradimensionales grandes del capítulo anterior, consiste en que, si es correcta, tendrá muy pronto consecuencias observables en los aceleradores de partículas. De hecho, veremos que éstas serán todavía más drásticas que la firma de la energía ausente que ya discutimos. Las compañeras KK del gravitón, aunque sean visitantes provenientes del espacio de dimensión superior, serán partículas distinguibles, visibles, que se desintegrarán para dar lugar a partículas familiares en nuestra brana tetradimensional.

La geometría arqueada y sus sorprendentes implicaciones

La geometría que consideraremos en este capítulo contiene dos branas que acotan una quinta dimensión del espacio, como se ilustra en la figura 78. Este contexto es similar al que se consideró en el capítulo 17, en el sentido de que allí también había dos branas con una quinta dimensión que se extendía entre ellas. Sin embargo, la de ahora es realmente una teoría muy diferente. Las partículas y la distribución de energía son distintas y la teoría no es supersimétrica. Sin embargo, como en aquella teoría, suponemos que todas las partículas del modelo estándar, junto con una partícula de Higgs, que es la responsable de romper la simetría electrodébil, están confinadas en una de las branas.

FIGURA 78. La geometría arqueada de dimensión cinco con dos branas. El universo tiene cinco dimensiones del espacio-tiempo, pero el modelo estándar reside en una brana (la Brana Débil) que tiene cuatro. De nuevo, el número total de dimensiones del espacio-tiempo en este contexto es cinco, mientras que el número de dimensiones espaciales es cuatro, tres de las cuales se extienden a lo largo de las branas y una hace lo propio entre las dos branas.

También como antes, en este contexto supondremos que la gravedad es la única fuerza que existe a través de la quinta dimensión. Esto significa que, si no fuera por la gravedad, cada una de las branas se presentaría como un universo tetradimensional convencional. Los bosones gauge y las partículas confinadas a las branas transmitirían fuerzas e interactuarían como si la quinta dimensión no existiera. Las partículas del modelo estándar viajarían sólo en las tres dimensiones espaciales planas de las branas y las fuerzas se extenderían únicamente a lo largo de la superficie plana tridimensional de la brana[M35] .

La gravedad, sin embargo, es diferente, ya que no está limitada a una brana, sino que existe en el bulto completo de dimensión cinco. La fuerza de la gravedad se notaría dondequiera en la quinta dimensión. Pero esto no

significa necesariamente que se notara igual en todos los puntos. La energía que hay en las branas y en el bulto de dimensión cinco curva el espacio-tiempo y esto produce enormes diferencias en el campo gravitatorio.

Las teorías extradimensionales grandes del capítulo anterior aprovechaban el hecho de que las branas podían atrapar partículas y fuerzas, pero despreciaban la energía que aquéllas podían portar. Raman y yo no estábamos seguros de que ésta fuera una buena hipótesis, ya que un componente central de la teoría de la relatividad general de Einstein es que la energía induce un campo gravitatorio, lo cual implica que, de portar energía, las branas curvarían el espacio y el tiempo. En un universo con una única dimensión extra, que es lo que pretendíamos estudiar, no estaba nada claro que uno pudiera hacer caso omiso de la energía de la brana y del bulto: los efectos gravitatorios de la brana no se disipan rápidamente, de modo que uno ha de esperar distorsiones del espacio-tiempo, incluso lejos de las branas.

Queríamos saber cómo se curvaría el espacio-tiempo en presencia de dos branas con energía que acotasen la dimensión extra del espacio. Raman y yo resolvimos las ecuaciones de la gravedad de Einstein para este contexto con dos branas, suponiendo que había energía tanto en el bulto como en las branas. Descubrimos que esa energía era, en efecto, muy importante: el espacio-tiempo resultante se curvaba drásticamente.

En algunos casos, los espacios curvados son fáciles de dibujar. La superficie de una esfera, por ejemplo, es bidimensional —sólo precisamos la longitud y la latitud para saber una localización—, pero, con todo, está claramente combada. Sin embargo, muchos espacios curvados son más difíciles de dibujar porque no pueden representarse fácilmente en el espacio tridimensional. El espacio-tiempo arqueado concreto que consideraremos ahora es uno de estos ejemplos. Forma parte de un espacio-tiempo que se llama *espacio anti De Sitter* . El espacio anti De Sitter tiene curvatura negativa, se parece más a una patata frita de Pringles que a una esfera. El nombre proviene del matemático y cosmólogo holandés Willem de Sitter, que estudió un espacio con curvatura positiva que se llama ahora *espacio De Sitter* . Aunque no necesitamos el nombre aquí, nos referiremos a él más adelante cuando conectemos esta teoría con una teoría del espacio anti De Sitter que han estado estudiando los especialistas de la teoría de cuerdas.

Aunque pronto exploraremos el interesante camino que sigue el espacio-tiempo de dimensión cinco para curvarse, centrémonos un momento en las dos branas que hay en los bordes de la quinta dimensión. Estas dos branas confinantes son completamente planas. Si estuviéramos en una de las branas del borde, nos encontraríamos retenidos en un mundo con tres dimensiones más una (tres dimensiones del espacio y una del tiempo[114]), que se extendería hasta el infinito en las tres dimensiones espaciales y que parecería un espacio-tiempo plano, sin ningún efecto gravitatorio peculiar.

Además, el espacio-tiempo curvado tiene la propiedad especial de que, si debiéramos limitarnos a estar en una *única* rebanada a lo largo de la quinta dimensión —no sólo en las branas que hay en los bordes—, veríamos que esta rebanada es completamente plana. Esto es, aunque en la quinta dimensión no haya branas más que en los extremos, la geometría de las superficies de

dimensión uno más tres que se obtienen al restringirnos a un solo punto de la quinta dimensión parece plana: tiene la misma forma que las grandes branas planas que hay en los extremos. Si nos imaginamos que las branas del borde son como los corruscos de una barra de pan, las regiones tetradimensionales planas, paralelas, en cualquier punto, serían como las rebanadas planas de pan del interior de la barra.

Pero el espacio de dimensión cinco que estamos considerando está, sin embargo, curvado. Esto se refleja en el modo en el que, en la quinta dimensión, se van pegando unas con otras las rebanadas tetradimensionales planas del espacio-tiempo. La primera vez que hablé sobre esta geometría fue en el Instituto Kavli de Física Teórica de Santa Bárbara, donde el especialista de teoría de cuerdas Tom Banks me informó de que, hablando técnicamente, la geometría de dimensión cinco que Raman y yo habíamos encontrado era *arqueada* . Aunque, coloquialmente, se llama arqueadas a muchas estructuras espacio-temporales, el término técnico se refiere a las geometrías en las cuales cada rebanada es plana[115] , pero todas ellas son ensambladas siguiendo un *factor de arqueo* global. El factor de arqueo es una función que cambia la escala global de la posición, el tiempo, la masa y la energía en cada punto de la quinta dimensión. Esta propiedad fascinante de la geometría arqueada es sutil, y la explicaré más en la sección siguiente. El factor de arqueo se refleja también en la función de probabilidad y en las interacciones del gravitón que pronto exploraremos.

En la figura 79 se representa un espacio curvado con rebanadas planas. Se trata de un embudo relleno. Con un cuchillo podríamos rebanar el embudo en hojas planas y finas, pero la superficie del embudo está claramente curvada. Esto es análogo en algunos aspectos al espacio-tiempo curvado de dimensión cinco que estamos considerando. Pero la analogía no es perfecta, porque el borde del embudo, la superficie del embudo, es el único lugar donde éste está curvado, mientras que en el espacio-tiempo arqueado la curvatura se encuentra en todas partes. Esta curvatura se reflejaría en el reajuste global de la vara de medir el espacio y de la velocidad del reloj para el tiempo, que sería diferente en cada punto de la quinta dimensión[M36] .

FIGURA 79. Un embudo relleno consiste en rebanadas planas pegadas juntas.

Una manera más sencilla de ilustrar la curvatura del espacio-tiempo arqueado es mediante la forma de la función de probabilidad del gravitón. El gravitón es la partícula que transmite la fuerza gravitatoria, y su función de probabilidad nos dice la probabilidad de encontrar el gravitón en una posición fija del espacio. La intensidad de la gravedad se refleja en esta función: cuanto más grande es su valor, más fuertes son las interacciones del gravitón en ese punto concreto, y más intensa es la fuerza de la gravedad.

Para el espacio-tiempo plano, el gravitón tendría la misma probabilidad de encontrarse en cualquier punto. La función de probabilidad de un gravitón en el espacio tiempo plano sería, por lo tanto, constante. Pero para el espacio-tiempo curvado, como para la geometría arqueada que estamos considerando, esto ya no sería así. La curvatura nos informa sobre la forma de la gravedad. Cuando el espacio-tiempo se curva, el valor de la función de probabilidad del

gravitón es distinta en diferentes puntos del espacio-tiempo.

Como cada rebanada del espacio-tiempo es completamente plana en geometría arqueada, la función de probabilidad del gravitón no varía a lo largo de las dimensiones espaciales usuales: sólo cambia a lo largo de la quinta dimensión[116] . En otras palabras, aunque la función de probabilidad del gravitón tiene diferentes valores en diferentes puntos a lo largo de la quinta dimensión, mientras dos puntos estén a la misma distancia en la quinta dimensión, el valor será el mismo. Esto nos dice que la función de probabilidad del gravitón depende sólo de la posición en la quinta dimensión. No obstante, caracteriza completamente la curvatura del espacio-tiempo arqueado. Y como esa función varía sólo en una única coordenada, es sencilla de representar.

La función de probabilidad del gravitón a lo largo de la quinta dimensión está representada en la figura 80. Decrece a una velocidad exponencial, esto es, extraordinariamente deprisa, según uno se aleja de la primera brana, que llamaremos Brana de la Gravedad, y se dirige hacia la segunda brana, que llamaremos la Brana Débil. La Brana de la Gravedad y la Brana Débil son diferentes porque la primera porta energía positiva, mientras que la segunda porta energía negativa. Y esta asignación de energía hace que la función de probabilidad del gravitón sea mucho mayor en las cercanías de la Brana de la Gravedad.

FIGURA 80. La función de probabilidad del gravitón cae exponencialmente cuando uno va desde la Brana de la Gravedad hacia la Brana Débil.

El efecto de la caída en picado de la función de probabilidad es que el gravitón, la partícula cuyo intercambio genera la atracción gravitatoria, tiene muy pocas probabilidades de encontrarse cerca de la Brana Débil. Las interacciones del gravitón en la Brana Débil se encuentran, por lo tanto, fuertemente reprimidas.

La intensidad de la gravedad depende tan fuertemente de la posición a lo largo de la quinta dimensión que las intensidades de la gravedad que se experimentan en las dos branas, que limitan los extremos opuestos de este mundo arqueado de dimensión cinco, son sumamente diferentes. La gravedad es fuerte en la primera brana, donde está localizada la gravedad, pero débil en la segunda, que es donde reside el modelo estándar. Como en la segunda brana la función de probabilidad del gravitón es despreciable de tan pequeña, las interacciones del gravitón con las partículas del modelo estándar, que están confinadas allí, son extremadamente débiles.

Esto nos dice que en este espacio-tiempo arqueado esperaríamos realmente encontrar una jerarquía entre las masas observadas y la masa de la escala de Planck. Aunque el gravitón está en todas partes, interactúa con mucha más intensidad con las partículas de la Brana de la Gravedad que con las partículas de la Brana Débil. El gravitón, en realidad, no pasa mucho por allí. La función de probabilidad del gravitón en la Brana Débil es extremadamente diminuta, y si este marco es la descripción correcta del mundo, este tamaño diminuto es el responsable de la debilidad de la gravedad en nuestro mundo.

En este modelo, para que la gravedad sea débil en la Brana Débil, no se precisa que haya una gran separación entre las dos branas. Una vez que nos vamos de la Brana de la Gravedad, donde está altamente concentrada la función de probabilidad del gravitón, la gravedad va tornándose exponencialmente más débil, lo que hace que la gravedad en la Brana Débil sea sumamente débil. Como la función de probabilidad del gravitón cae en picado, la gravedad queda seriamente reprimida en la Brana Débil (que es donde vivimos). Puede ser diez mil billones de veces más débil de lo que esperaríamos si no existiera el arqueo, aunque las dos branas estuvieran bastante próximas. Este aspecto de la teoría, el hecho de que las branas no necesitan estar muy separadas, hace que este modelo sea una posibilidad mucho más realista que la de las dimensiones extras grandes. Aunque las dimensiones extras grandes eran un replanteamiento seductor del problema de la jerarquía, a la postre dejan todavía un número muy grande sin explicar: el tamaño de las dimensiones extras. En la teoría que estamos considerando ahora, la fuerza gravitatoria en la Brana Débil es muchos órdenes de magnitud más débil que otras fuerzas, incluso cuando la Brana Débil está solamente a una corta distancia de la primera brana (la Brana de la Gravedad).

En esta geometría arqueada, sólo se le exige a la distancia entre las branas que sea un poco más grande que la longitud de la escala de Planck. Mientras que la teoría de las dimensiones grandes requería la introducción de un número extraordinariamente grande —a saber, el tamaño de las dimensiones—, en la geometría arqueada no se precisa ningún número grande y rebuscado para explicar la jerarquía. Esto es porque una exponencial convierte automáticamente un número modesto en un número enorme (la exponencial) o en un número diminuto (la inversa de la exponencial). La intensidad de la gravedad es más pequeña en la Brana Débil; se reduce en un factor que es la exponencial de la distancia entre las dos branas[117] . La enorme proporción que hay entre la masa de la escala de Planck —la gran masa que nos dice que la gravedad es débil— y la masa de la partículas de Higgs, y, por lo tanto, las masas de los bosones gauge débiles, es la que se espera si la Brana Débil está localizada a una distancia de 16 unidades[118] , ya que la proporción de las diferentes masas es más o menos 10^{16} (diez mil billones). Esto significa que una distancia entre las branas que sea sólo aproximadamente un factor de 16 más grande que nuestra suposición más obvia sería suficiente para explicar la jerarquía. Un factor igual a dieciséis podría sonar muy grande, pero es muchísimo más pequeño que diez mil billones, el número que tratamos de explicar.

Durante años, los físicos de partículas esperaron encontrar una explicación exponencial de la jerarquía. Esto es, teníamos la esperanza de interpretar el número grande que estaba previamente sin explicar como una consecuencia de una función exponencial que aparecería naturalmente. Ahora, con las dimensiones extras, Raman y yo habíamos encontrado un modo para que la física de partículas incorporase automáticamente una jerarquía exponencial de masas. La interacción de la gravedad podría ser mucho más pequeña en la localización de nuestra brana, la Brana Débil, que en el lugar donde se dispara la función de probabilidad del gravitón. Como la gravedad en nuestra brana se encontraría debilitada por la geometría arqueada, si el modelo

estándar está alojado en la Brana Débil, el problema de la jerarquía quedaría resuelto. Se trataba de una solución del problema de la jerarquía, y había caído directamente en nuestro regazo.

Otra manera de comprender esta notable propiedad nueva de la geometría arqueada consiste en considerar cómo la gravedad se diluye. En el capítulo 19, explicamos la debilidad de la gravedad en el contexto ADD en términos de las líneas de fuerza gravitatoria emitidas por un objeto con masa, que se diluían porque tenían que extenderse por dimensiones grandes. Si hubiéramos querido, habríamos podido describir esta disolución como consecuencia de la función de probabilidad del gravitón. Recuérdese que la función de probabilidad del gravitón nos dice cómo la gravedad se extiende por el espacio. Dado que en el contexto de las dimensiones extras grandes la gravedad es, dondequiera, igualmente intensa, la función de probabilidad del gravitón en este caso es plana. Una función de probabilidad del gravitón plana como ésta nos diría que el gravitón, la partícula que transmite la gravedad, se extiende sobre la gran región acotada por las dimensiones extras. Esta función de probabilidad plana, que se halla equitativamente distribuida por todo el espacio extradimensional, nos dice que la influencia de la gravedad en cuatro dimensiones está muy diluida.

En el espacio-tiempo arqueado de dimensión cinco que estamos ahora considerando hay una peculiaridad interesante. El gravitón ya no tiene la misma probabilidad de estar en todos los lugares del espacio de dimensión cinco que se encuentra entre sus dos fronteras, la Brana de la Gravedad y la Brana Débil. La distribución del gravitón es, de hecho, muy poco democrática como consecuencia automática de la energía que llevan las branas y el bulto. La función de probabilidad del gravitón varía: es grande en una región y pequeña en todas las demás, y esta variación, precisamente, proporciona el factor de disolución, responsable de hacer que la gravedad se presente con tanta debilidad en nuestro mundo. La gravedad es débil en la Brana Débil porque allí la función de probabilidad del gravitón es minúscula.

Volvamos momentáneamente al ejemplo del aspersor, del que nos valimos anteriormente para explicar cómo la intensidad de la gravedad decrece con la distancia. Cuanto más grande sea la región sobre la que el aspersor distribuye agua (como se ilustra en la parte superior de la figura 81), más se diluye el agua. Cuando hay dimensiones extras grandes, la gravedad se extiende sobre una región muy grande y también resulta diluida. Por lo tanto, la gravedad parece débil en la teoría tetradimensional efectiva de baja energía.

La geometría arqueada, por el contrario, se parece a un aspersor que no distribuye el agua equitativamente en todas las direcciones, sino que lo envía preferentemente a una región determinada, la región que rodea la Brana de la Gravedad (véase la parte inferior de la figura 81). Con un aspersor no democrático, es obvio que llegará menos agua a cualquier parte que no sea la región preferida. Y si la cantidad de agua proporcionada a las otras regiones cae exponencialmente en relación con la región más favorecida, la fracción de agua destinada a esas otras áreas será, en efecto, minúscula, incluso aunque estén a una distancia moderada. Claramente, el agua distribuida por el aspersor «arqueado» se «diluye» mucho más que el agua que se distribuye

equitativamente por todas las regiones.

FIGURA 81. Tres aspersores diferentes. Si comparamos el primero y el segundo, vemos que un aspersor más largo proporciona menos agua a una región concreta que uno más corto. El tercer aspersor demuestra que el agua puede ser distribuida de modo no equitativo, de forma tal que el primer jardín reciba siempre la mitad del agua, el segundo jardín la cuarta parte del agua, y así sucesivamente. En este caso, la cantidad de agua proporcionada al primer jardín es independiente de la longitud del aspersor; siempre recibe la mitad del agua.

El resultado es que, si todas las partículas del modelo estándar están alojadas en la Brana Débil, entonces la gravedad es tan débil comparada con las otras tres fuerzas que el problema de la jerarquía de la física de partículas, la cuestión de por qué la gravedad es tan débil en relación con las otras fuerzas, queda resuelto. La debilidad de la gravedad es una consecuencia natural de la pequeña amplitud de la función de probabilidad del gravitón en la Brana Débil, aunque esté a una distancia relativamente moderada (unas diez veces más grande que la longitud de la escala de Planck, que es la favorita de la teoría de cuerdas) de la Brana de la Gravedad.

Crecer y decrecer en una dimensión arqueada

La explicación anterior de la jerarquía en términos de una función de probabilidad que cae exponencialmente es muy adecuada para comprender el espacio-tiempo arqueado. La explicación intuitiva de la debilidad de la gravedad es que es menos probable que el gravitón se encuentre en la Brana Débil. El lector es libre de aceptar esta interpretación y pasar directamente a la siguiente sección, pero quizá le interese leer la explicación que viene ahora, algo más rigurosa y que se adentra más en las fascinantes propiedades del espacio-tiempo arqueado.

En esta sección, veremos que la debilidad de la gravedad en la Brana Débil puede explicarse también como consecuencia de que los objetos se hacen más grandes y más ligeros, según se aleja uno de la Brana de la Gravedad y se acerca a la Brana Débil. Si Atenea se alejara de la Brana de la Gravedad hacia la Brana Débil (como hará en la historia del próximo capítulo), vería cómo su sombra en la Brana de la Gravedad aumenta de tamaño a medida que ella se aleja. Y dicho aumento sería enorme: ¡su sombra crecería dieciséis órdenes de magnitud!

Veremos también que en esta geometría pueden coexistir pacíficamente partículas pesadas y partículas ligeras. Aunque en una de las branas haya partículas con una masa de la escala de Planck, en la otra solamente hay partículas con masa de la escala débil. Por lo tanto, ya no hay un problema de jerarquía.

Para comprender cómo funciona esto, supongamos que, como la mayoría de la gente (por lo menos la que no ha leído este libro), no supiéramos nada de la quinta dimensión, que al fin y al cabo es invisible. Tranquilos en la creencia de que vivimos en cuatro dimensiones, conoceríamos sólo la gravedad tetradimensional y creeríamos que es transmitida por el gravitón

tetradimensional convencional. En la teoría tetradimensional efectiva que describe lo que vemos, habría sólo una fuerza gravitatoria y podría haber, por lo tanto, solamente un tipo de gravitón tetradimensional. Todas las partículas interaccionarían con ese único tipo de gravitón. Pero ese gravitón no tendría ninguna información sobre la localización de una partícula en la teoría original de dimensión superior.

Este razonamiento hace que parezca que todas las interacciones del gravitón son las mismas, esto es, que son independientes de dónde se originó un objeto en la quinta dimensión. Al fin y al cabo, no sabríamos que el objeto se originó en la quinta dimensión, ni siquiera que *había* una quinta dimensión. La constante de gravitación de Newton, que determina la intensidad de interacción del gravitón, sería la única cantidad que determina la intensidad de todas las interacciones tetradimensionales del gravitón. Pero en la sección anterior vimos que las interacciones de la gravedad son más débiles al alejarse de la Brana de la Gravedad y aproximarse a la Brana Débil. Esto deja sin explicar la siguiente cuestión: ¿cómo puede la intensidad de la gravedad utilizar información de la localización de un objeto en la quinta dimensión?

La resolución de esta aparente paradoja se apoya en el hecho de que la atracción gravitatoria es también proporcional a la masa, y la masa en puntos diferentes a lo largo de la quinta dimensión puede y debe ser diferente. La única manera de reproducir la interacción debilitada del gravitón en cada rebanada sucesiva a lo largo de la quinta dimensión consiste en medir la masa de manera diferente en cada una de las rebanadas tetradimensionales.

Una de las muchas propiedades notables del espacio-tiempo arqueado es que, al alejarse uno de la Brana de la Gravedad y aproximarse a la Brana Débil, las energías y los momentos encogen. La disminución de las energías y la de los momentos (y la consistencia con la mecánica cuántica y la relatividad especial) también nos dicen que la distancia y el tiempo tienen que expandirse (como se muestra en la figura 82). En la geometría que estoy describiendo, el tamaño, el tiempo, la masa y la energía dependen todos de la localización. Los tamaños y las masas tetradimensionales heredan valores que dependen de sus posiciones originales en la quinta dimensión. Los residentes de la Brana de la Gravedad o de la Brana Débil ven la física tetradimensional, pero al medir obtendrían tamaños diferentes y al pesar obtendrían masas diferentes.

FIGURA 82. El tamaño aumenta (y la masa y la energía disminuyen) cuando nos alejamos de la Brana de Gravedad y nos aproximamos a la Brana Débil.

La atracción gravitatoria de las masas de las partículas que se originan lejos de la Brana de la Gravedad en la teoría original de dimensión cinco es más pequeña en la teoría efectiva tetradimensional porque las masas mismas son más pequeñas. Esto se debe a que, en cada posición en la quinta dimensión, la masa y la energía son *reajustadas* siguiendo una cantidad proporcional a la amplitud de la función de probabilidad del gravitón en ese punto particular. Y el *factor de arqueo* , que es la cantidad con la que se reajustan las energías, es más pequeño al alejarse de la brana de la Gravedad. De hecho, su gráfica tiene exactamente la misma forma que la función de probabilidad del gravitón. Las masas y la energía encogen, por lo tanto, por un factor diferente

en cada punto a lo largo de la quinta dimensión, y el factor de arqueo es el que determina la medida de dicho encogimiento.

Este reajuste podría parecer arbitrario, pero no lo es. Es sutil, sin embargo, así que vamos a considerar primero una situación análoga. Supongamos que tuviéramos que medir el tiempo en términos de lo que tarda un tren en recorrer 100 km. Llamaré a estas unidades de tiempo unidades tt (tiempo de tren). Ésta es una buena manera de medir el tiempo, excepto por el hecho de que esta determinación del tiempo dependería de dónde está uno viajando: ¿los trenes son allí rápidos o son lentos? Por ejemplo, supongamos que una película durara dos horas. Si un tren americano tardara una hora en recorrer 100 km, un viajero americano recorrería 200 km durante la película y diría que ésta duraba 2 tt. Un viajero francés que se desplazara en el TGV, por otro lado, pensaría que la película tenía una duración de 6 tt, porque los trenes expresos en Francia viajan unas tres veces más rápidos y el viajero francés, para ver cómo termina la película, se vería obligado a hacer un recorrido en tren de 600 km. Como el tren del viajero francés cubre 100 km en 20 minutos, mientras que un tren americano cubre la misma distancia en una hora, necesitamos reajustar las unidades de tiempo de tren si queremos que los americanos y los franceses compartan unidades comunes y coincidan en la duración en tt de la película. Para convertir el tiempo francés en tiempo americano, hay que reajustar el tiempo del tren francés con un factor de tres.

Análogamente, en la Brana Débil, donde la interacción del gravitón es mucho más pequeña que en la Brana de la Gravedad, las unidades de la escala usada para medir la energía tienen que ser reajustadas a fin de considerar la debilidad de la gravedad. En la Brana Débil, el reajuste se hace con una cantidad enorme, 10^{16} , diez mil billones. Lo que esto significa es que, mientras en la Brana de la Gravedad se espera que todas las masas fundamentales sean M_{Pl} (la masa de la escala de Planck), en la Brana Débil se espera que sean sólo aproximadamente 1.000 GeV, un factor de 10^{16} más pequeñas. Las masas de las partículas nuevas que vivan en la Brana Débil podrían ser algo más grandes, quizá 3.000 o 5.000 GeV, pero no deberían serlo mucho más porque todas las masas han sido reajustadas drásticamente.

El problema de la jerarquía surge cuando todas las masas se ven aumentadas hasta acercarse al tamaño de la masa más grande. Si esa masa es la masa de la escala de Planck, se espera que todas las masas sean aproximadamente igual de grandes que la masa de la escala de Planck. Pero debido al reajuste de escala, si en un principio pensamos que la masa de la escala de Planck era la masa esperada para todo lo que hay en la Brana de la Gravedad, entonces concluiríamos que en la Brana Débil la masa esperada es un TeV, dieciséis órdenes de magnitud más pequeña[119] . Esto significa que la masa de la partícula de Higgs no es problemática: se espera una masa de aproximadamente un TeV —diez mil billones de veces más pequeña que la masa de la escala de Planck—, a pesar de que la gravedad es débil. El reajuste de escala, que es esencial en esta interpretación, resuelve el problema de la jerarquía.

Por el mismo razonamiento, todos los objetos nuevos de la Brana Débil, incluidas las cuerdas, deberían poseer una masa de aproximadamente un TeV.

Esto nos dice que este modelo podría tener consecuencias experimentales espectaculares. En la Brana Débil, las partículas extras asociadas con las cuerdas serían mucho más ligeras que las de la Brana de la Gravedad, o lo que es lo mismo para el caso, en un mundo tetradimensional. La Brana Débil se presenta como un escenario fabuloso desde el punto de vista del descubrimiento de dimensiones extras. Si esta idea es correcta, las partículas con poca masa de las dimensiones extras podrían estar al alcance de nuestras manos. Las partículas de aproximadamente un TeV abundarían en la Brana Débil.

Se espera que en la Brana Débil todo sea más ligero que la masa de la escala de Planck por un factor de 10^{16} . Y, según la mecánica cuántica, masa más pequeña implica tamaño más grande. La sombra de Atenea crecería a medida que se aleja de la Brana de la Gravedad y se aproxima a la Brana Débil. Esto nos dice que las cuerdas de la Brana Débil no serían de un tamaño de 10^{-33} cm. Por el contrario, deberían ser dieciséis órdenes de magnitud más grandes, esto es, de aproximadamente 10^{-17} cm.

Aunque me he concentrado en una teoría con dos branas con un factor de arqueo específico, es muy probable que las propiedades que hemos considerado sean más generales que lo que muestra este ejemplo. Con las dimensiones extras hay una buena razón para esperar masas dispares. Se viola la intuición de la física de partículas de que las masas han de ser más o menos iguales, y se *espera* un amplio abanico de masas. Las partículas localizadas en diferentes lugares tendrían, naturalmente, masas diferentes. Sus sombras cambian al moverse de un lado a otro. En nuestro mundo tetradimensional, el resultado sería un abanico de tamaños y masas, y esto es lo que observamos.

Otros desarrollos

Cuando, en 1999, apareció el artículo en el que explicábamos la jerarquía en términos de la geometría arqueada, la mayoría de nuestros colegas no se dieron cuenta de que se trataba de una teoría auténticamente nueva, muy diferente de la idea de las dimensiones grandes. Joe Lykken me dijo: «La aceptación de este trabajo fue cuajando poco a poco. Finalmente, todo el mundo comprendió que este artículo [y otro que se describirá en el capítulo 22] era importante, nuevo y fructífero, y que abría todo un nuevo campo de ideas, pero eso no fue así al principio».

Después de la aparición de nuestro artículo, durante meses se me pidió que diera conferencias acerca de mi trabajo sobre «dimensiones extras grandes». Tuve que insistir todo ese tiempo en que la belleza de nuestra teoría reside, precisamente, en que ¡las dimensiones no son grandes! De hecho, a Mark B. Wise [«sabio»] (un nombre es muy apropiado), un físico de partículas de Caltech, le hizo mucha gracia el título que le pusieron a una conferencia plenaria en la sesión de clausura del Congreso Leptón-Fotón de 2001, el gran congreso sobre partículas en el que los físicos experimentales presentan los resultados importantes obtenidos últimamente. Los organizadores habían dado a mi conferencia un título que se refería a todas las investigaciones sobre las dimensiones extras ¡salvo las mías!

Mark y su discípulo de entonces, Walter Goldberger, fueron de los primeros en comprender los méritos de la teoría arqueada. Pero también reconocieron que Raman y yo habíamos dejado un hueco potencial en nuestro resultado, un hueco que había que rellenar. Habíamos supuesto que la dinámica de las branas llevaría naturalmente a las branas a situarse a una distancia moderada la una de la otra. Sin embargo, no habíamos dicho explícitamente cómo se establece la distancia entre las dos branas. Esto no era solamente un detalle; el papel de nuestra teoría como una solución del problema de la jerarquía dependía de su capacidad para estabilizar fácilmente las dos branas a una distancia pequeña la una de la otra. Era posible que la función exponencial inversa de la distancia (que queríamos que fuera extremadamente minúscula), más que la distancia misma, resultase ser naturalmente un número modesto. Si esto era así, la jerarquía prevista entre la masa de la escala débil y la masa de la escala de Planck sería un número modesto, y no la exponencial inversa de ese número (mucho más pequeño), y nuestra solución no funcionaría.

Goldberger y Wise realizaron la importante investigación que cerró esta tronera, traicionera en potencia, que había en la teoría que habíamos presentado Raman y yo. Demostraron que la distancia entre las dos branas es un número modesto y que la inversa de la exponencial de esa distancia es extremadamente minúscula, exactamente el valor que se requería para que funcionase nuestra solución.

Su idea era elegante y resultó tener una validez más general de lo que se pensó en el momento. Resulta que cualquier modelo de estabilización es muy parecido al suyo. Goldberger y Wise sugirieron que, además del gravitón, había una partícula con masa que vivía en el bulto de dimensión cinco. Asignaron a esta partícula propiedades que la hacían actuar como un muelle. En general, un muelle tienen una longitud especial; cualquier longitud superior o inferior hace que el muelle tenga energía que lo hará moverse. Goldberger y Wise habían introducido una partícula (y su campo asociado) para que la configuración de equilibrio del campo y las branas implicara una separación moderada entre las branas: de nuevo, justo lo que requería nuestra solución de la jerarquía.

Su solución se basaba en dos efectos enfrentados, uno que favorece branas muy separadas y otro que favorece branas próximas. El resultado es una posición de compromiso estable. La combinación de los dos efectos contrarios conduce naturalmente a un modelo con dos branas en el que las dos branas están separadas por una distancia moderada.

El artículo de Goldberger y Wise dejó claro que la teoría arqueada de las dos branas realmente era una solución del problema de la jerarquía. Y el hecho de que se pudiese fijar la separación entre las branas era importante por otra razón. Si la distancia entre las branas quedaba indeterminada, las branas podrían acercarse o alejarse entre sí según fuese evolucionando la temperatura y la energía del universo. Si la separación entre las branas pudiera cambiar, o si partes diferentes del universo de dimensión cinco pudieran expandirse a ritmos diferentes, el universo no evolucionaría del modo en el que se supone que lo hace en cuatro dimensiones. Como los astrofísicos han comprobado la expansión del universo en las fases más

recientes de su evolución, sabemos que últimamente el universo se ha expandido como si fuera tetradimensional.

Con el mecanismo de estabilización de Goldberger y Wise, el universo arqueado de dimensión cinco concuerda con las observaciones cosmológicas. Una vez estabilizadas las branas en su posición relativa, el universo evolucionaría como si fuera tetradimensional, aunque, de hecho, tenga cinco dimensiones. Aunque hubiera una quinta dimensión, la estabilización reprimiría con rigidez los diferentes puntos a lo largo de la quinta dimensión de manera que evolucionasen del mismo modo, y el universo se comportaría como lo haría si tuviese cuatro dimensiones. Como la estabilización de Goldberger y Wise se habría producido en un momento relativamente temprano, el universo arqueado se presentaría como tetradimensional en la mayor parte de su evolución.

Una vez que se comprendió la estabilización y la cosmología, la solución que la geometría arqueada daba del problema de la jerarquía adquirió vigencia. Pronto sobrevinieron otros muchos desarrollos interesantes basados en esta geometría arqueada. Uno de ellos fue la unificación de las fuerzas. ¡Todas las fuerzas, incluida la gravedad, podían unificarse a altas energías en la geometría arqueada que estamos considerando!

La geometría arqueada y la unificación de las fuerzas

El capítulo 13 explicaba cómo uno de los logros más brillantes de la supersimetría consiste en que ésta puede acomodar con éxito la unificación de las fuerzas. Las teorías extradimensionales que abordaban el problema de la jerarquía parecían perder este desarrollo potencialmente importante. Dado que todavía no hemos visto ninguna prueba experimental concluyente de la unificación, como la desintegración del protón, ésta no es necesariamente una pérdida grave, ya que aún no sabemos con seguridad que la unificación sea correcta. No obstante, el que tres curvas se encuentren en un punto resulta intrigante y podría presagiar algo significativo. Aunque la unificación no esté todavía firmemente establecida, no deberíamos abandonarla con demasiadas prisas.

Alex Pomarol, un físico español que actualmente trabaja en la Universidad de Barcelona, observó que la unificación de fuerzas puede también darse en la geometría arqueada. Sin embargo, el contexto que él consideró es ligeramente diferente; las fuerzas electromagnética, débil y fuerte no se encuentran confinadas en una brana, sino que están presentes en el bulto completo de dimensión cinco. Los bosones gauge del modelo estándar —los gluones, el W, el Z y el fotón— no están retenidos en una brana de dimensión tres más uno.

Según la teoría de cuerdas, los bosones gauge podrían estar retenidos en una brana de dimensión superior o, acompañando a la gravedad, también podrían estar en el bulto. Al contrario de lo que sucede con el gravitón, que debe surgir de una cuerda cerrada, los bosones gauge y los fermiones cargados pueden corresponder a cuerdas abiertas o cerradas: depende del modelo. Y, según provengan de cuerdas abiertas o cerradas, los bosones gauge y los fermiones estarán retenidos en una brana o tendrán libertad para moverse

por el bulto.

En el contexto de las dimensiones extras grandes, si las fuerzas no gravitatorias hubieran estado en el bulto, habrían sido demasiado débiles como para concordar con las observaciones. Las fuerzas del bulto se habrían extendido a lo largo y ancho de un bulto enorme. Por lo tanto, ellas también, como la gravedad, se hubiesen diluido muchísimo. Esto sería inaceptable porque hemos medido las intensidades de las fuerzas y éstas resultan mucho más fuertes de lo que habría predicho esta teoría.

Pero si las dimensiones adicionales no son grandes, como en el caso de la geometría arqueada, no hay problema con que haya fuerzas no gravitatorias en el bulto de dimensión cinco. Lo único que puede diluirlas es el tamaño de las dimensiones extras, no el arqueo, y en el contexto arqueado ese tamaño es bastante pequeño. Esto significa que la auténtica teoría del mundo podría tener las cuatro fuerzas presentes en el bulto. En este caso, no sólo las partículas de la brana, sino también las partículas del bulto podrían sentir la fuerza eléctrica, la fuerza débil, la fuerza fuerte y también la gravedad.

Si los bosones gauge de la teoría arqueada están presentes en el bulto, podrían tener una energía mucho mayor que un TeV. Los bosones gauge, que vivirían en el bulto, experimentarían todo el abanico de energías. Sin estar ya atados en la Brana Débil, podrían viajar por cualquier parte del bulto y tener energías tan altas como la energía de la escala de Planck. Sólo en la Brana Débil la energía ha de ser inferior a un TeV. Como las fuerzas estarían en el bulto y, por lo tanto, estarían en condiciones de operar a altas energías, sería posible la unificación de fuerzas. Esto es fascinante porque implica que las fuerzas podrían unificarse a altas energías, incluso en una teoría con una dimensión extra. Y Pomarol descubrió el resultado, muy interesante, de que la unificación, en efecto, se producía, casi como si la teoría fuese verdaderamente tetradimensional.

Pero las cosas funcionan todavía mejor. La unificación y el mecanismo de la jerarquía arqueada pueden combinarse. Pomarol probó que las fuerzas se unifican, pero supuso que la supersimetría se ocupaba del problema de la jerarquía. Sin embargo, la solución del problema de la jerarquía en la geometría arqueada requiere sólo que la partícula de Higgs esté en la Brana Débil, de modo que su masa sea más o menos la misma que la masa de la escala débil, entre 100 GeV y un TeV. No hace falta que los bosones gauge estén retenidos allí.

En la geometría arqueada, lo único que necesitamos para resolver el problema de la jerarquía es que la masa de la partícula de Higgs sea pequeña. Esto es así porque el campo de Higgs es el responsable de la ruptura espontánea de la simetría, que es la fuente de las masas de todas las partículas elementales. Los bosones gauge y los fermiones no tendrían masa si no se rompiera la simetría de la fuerza débil. Mientras la partícula de Higgs tenga la masa de la escala débil, las masas de los bosones gauge débiles resultarán correctas. La solución que da la gravedad arqueada al problema de la jerarquía realmente sólo requiere que la partícula de Higgs esté en la Brana Débil.

Lo que significa todo esto es que, si la partícula de Higgs está en la Brana Débil, pero los quarks, los leptones y los bosones gauge están en el bulto (véase la figura 83), podemos tenerlo todo. La escala débil estaría protegida y sería de aproximadamente un TeV, pero la unificación podría darse todavía a energías muy altas, en la escala GUT. Matthew Schwartz, antiguo discípulo mío, y yo mostramos que la supersimetría no es la única teoría que puede ser consistente con la unificación: ¡una teoría arqueada extradimensional también puede serlo!

FIGURA 83. Las fuerzas no gravitatorias pueden estar también en el bulto. En ese caso, las fuerzas pueden unificarse a altas energías.

Consecuencias experimentales

La escala natural en la Brana Débil es de aproximadamente un TeV. Si esta teoría de la geometría arqueada resulta ser una descripción auténtica de nuestro mundo, las consecuencias experimentales en el Gran Acelerador de Hadrones del CERN, en Suiza, serán formidables. Las firmas del espacio-tiempo de dimensión cinco podrían incluir partículas de Kaluza-Klein, agujeros negros de dimensión cinco del espacio anti De Sitter y cuerdas con un TeV de masa.

Es probable que las partículas KK del espacio-tiempo arqueado sean el heraldo experimental más accesible de esta teoría. Como siempre, las partículas KK son partículas con momento en la dimensión extra. Pero el nuevo truco en este modelo es que, como el espacio es curvo —no plano—, las masas de las partículas KK reflejarían la idiosincrasia de la geometría arqueada.

Dado que el gravitón tetradimensional es la única partícula de la que sabemos con seguridad que viaja por el bulto, resulta conveniente que nos concentremos en sus compañeras KK. Como era cierto en el espacio plano, la más ligera de las compañeras KK del gravitón será la que no tenga ningún tipo de momento en la cuarta dimensión. Esta partícula sería indistinguible de una partícula de origen genuinamente tetradimensional: es el gravitón que comunicaría la gravedad en lo que parece un mundo tetradimensional y es el gravitón cuya función de probabilidad hemos estudiado en detalle en este capítulo. Si no hubiera otras partículas KK adicionales, la fuerza gravitatoria se comportaría exactamente del mismo modo que en un universo verdaderamente tetradimensional. En este contexto, el universo es secretamente de dimensión cinco, pero la partícula que actúa como un gravitón tetradimensional no revela este hecho. En ausencia de partículas KK más pesadas, el mundo de Atenea, en efecto, aparecería ante ella como si fuera tetradimensional.

Solamente las partículas KK con más masa podrían comunicar los secretos de la teoría de dimensión cinco. Pero han de ser lo bastante ligeras como para que sea posible producirlas. En esta teoría, el cálculo de las masas de las partículas KK resulta, sin embargo, un poco artificioso. A causa de la geometría característica, las partículas KK no tendrían masas proporcionales al tamaño inverso de la dimensión, como era el caso en la situación de las

dimensiones extras enrolladas del espacio plano. Una masa proporcional al inverso del tamaño habría sido extraordinariamente sorprendente, ya que, para la dimensión extra pequeña que estamos considerando, coincidiría con la masa de la escala de Planck. En la Brana Débil no puede existir nada mucho más pesado que un TeV; allí, ciertamente, uno jamás podría encontrar nada con la masa de la escala de Planck.

Como un TeV es la masa asociada con la Brana Débil, no sería una sorpresa demasiado grande que, al hacer los cálculos correctamente, teniendo en cuenta el espacio-tiempo arqueado, las partículas KK resulten poseer masas de aproximadamente un TeV. Tanto las partículas KK más ligeras como la diferencia entre las masas de las partículas KK sucesivamente más pesadas resultan ser de aproximadamente un TeV cuando la quinta dimensión termina en la Brana Débil, como hemos venido suponiendo. Las partículas KK se apilan en la Brana Débil (porque su función de probabilidad se dispara allí) y todas ellas tienen las propiedades de las partículas de la Brana Débil.

Esto significa que allí hay compañeras KK pesadas del gravitón que tienen masa aproximada de 1 TeV, 2 TeV, 3 TeV, etc. Y, dependiendo de la energía definitiva que consiga el LHC, hay una probabilidad razonable de encontrar alguna de ellas. Al contrario de lo que sucede con las compañeras KK de la teoría de las dimensiones extras largas, estas compañeras KK interactúan mucho más fuertemente que la gravedad.

Estas partículas KK no interactúan tan débilmente como el gravitón tetradimensional: tienen una intensidad de interacción dieciséis órdenes de magnitud más grande. Las compañeras KK del gravitón interactúan tan fuertemente en nuestra teoría que cualquier compañera KK producida en el acelerador no desaparecerá simplemente de nuestra vista, llevándose energía pero sin dejar ninguna señal visible. Por el contrario, se desintegrará dentro del detector en partículas detectables, quizá muones o electrones, que pueden usarse para reconstruir la partícula KK de la que provenían (véase la figura 84).

FIGURA 84. Dos protones chocan y un quark y un antiquark se anulan y producen una compañera KK del gravitón. La partícula KK puede entonces desintegrarse en partículas visibles, como un electrón y un positrón. Las líneas grises son flujos de partículas que surgen de los protones.

Ésta es la receta convencional para descubrir nuevas partículas: estudiar todos los productos de la desintegración y deducir las propiedades de aquello de donde provienen. Si lo que encontramos no es algo que ya conozcamos, ha de ser algo nuevo. Si las partículas KK se desintegran en el detector, la señal de las dimensiones extras sería muy clara. En nuestro modelo, más que una simple falta de energía, que no tiene ninguna etiqueta significativa que identifique definitivamente el origen de la energía perdida y que nos permita distinguir el modelo de otras posibilidades, la reconstrucción de las masas y de los espines de las partículas KK daría pistas enormemente útiles que nos dirían mucho sobre las identidades de las partículas nuevas. El valor del espín de las partículas KK —espín igual a 2— será una etiqueta de identificación virtual que nos dirá que las nuevas partículas tienen algo que ver con la gravedad. Una partícula con espín igual a 2 y masa de aproximadamente un

TeV sería una prueba extraordinariamente convincente de que existe una dimensión extra arqueada. Hay muy pocos modelos distintos de éste que produzcan partículas pesadas con espín igual a 2, y las que las producen tienen otras propiedades características.

Si tenemos suerte, además de las compañeras KK del gravitón, los experimentos podrían producir un conjunto todavía más rico de partículas KK. En una teoría en la que la mayoría de las partículas del modelo estándar residen en el bulto, podríamos ver también compañeras KK de quarks y de leptones, así como de bosones gauge. Esas partículas estarían cargadas y serían también pesadas. Y podrían darnos, en última instancia, todavía más información sobre el mundo de dimensión superior[120] . De hecho, los constructores de modelos Csaba Csaki, Christophe Grojean, Luigi Pilo y John Terning han demostrado que, en el espacio-tiempo arqueado extra-dimensional con partículas del modelo estándar en el bulto, la simetría electrodébil puede romperse aunque no haya una partícula de Higgs, y las partículas cargadas que los físicos experimentales tal vez detecten podrían decirnos si este modelo alternativo es correcto para el mundo en el que vivimos.

Una posibilidad todavía más rara

He descrito unas cuantas propiedades raras de las dimensiones extras. Pero la posibilidad más extraordinaria está todavía por llegar. Veremos enseguida que una dimensión extra arqueada puede, de hecho, extenderse hasta el infinito y seguir siendo invisible, al revés de lo que ocurre con una dimensión plana, que siempre ha de tener un tamaño finito para concordar con las observaciones.

Este resultado fue realmente chocante. En el capítulo 22, cuando discutamos esta dimensión extra infinita, nos concentraremos en la geometría del espacio, no en el problema de la jerarquía. Pero mencionaré aquí brevemente cómo podemos resolver también el problema de la jerarquía en el caso extradimensional infinito.

Hasta ahora hemos considerado un modelo con dos branas: la Brana de la Gravedad y la Brana Débil, las cuales limitan una quinta dimensión. Sin embargo, la Brana Débil no tiene por qué ser el extremo del mundo (esto es, la frontera de la quinta dimensión). Si la partícula de Higgs está confinada en una segunda brana situada en medio de una dimensión extra infinita, un modelo así podría también resolver el problema de la jerarquía. La función de probabilidad del gravitón sería muy pequeña en la Brana Débil, la gravedad sería débil y el problema de la jerarquía se resolvería exactamente igual que antes, cuando la Brana Débil era uno de los límites de la dimensión extra. La función de probabilidad del gravitón en el modelo con una dimensión arqueada infinita continuaría más allá de la Brana Débil, pero esto no afectaría la solución del problema de la jerarquía, que se basaría sólo en el pequeño valor de la función de probabilidad del gravitón en la Brana Débil.

Sin embargo, como la dimensión es infinita, las partículas KK tendrían masas e interacciones diferentes, de modo que las consecuencias experimentales de

este modelo serían distintas de las que acabo de describir. La primera vez que Joe Lykken y yo discutimos esta posibilidad en el Centro Aspen de Física (un sitio inspirador donde los haya y también uno de los motivos por los que hay tantos físicos teóricos aficionados al senderismo), no estábamos seguros de que, de hecho, esta idea funcionara. Si la quinta dimensión no terminase en la Brana Débil, no todas las partículas KK serían pesadas (y tendrían una masa aproximada de un TeV). Algunas partículas KK tendrían masas diminutas. Si estas partículas eran detectables pero los experimentos no las habían descubierto todavía, habría que descartar el modelo.

Pero resulta que nuestro modelo está a salvo. Sentada en un banco y rodeada de un paisaje montañoso espléndido, calculé las interacciones de las partículas KK (Joe hizo el mismo cálculo, pero creo que en su despacho del Centro). Calculamos un resultado que nos decía que, aunque las interacciones de las partículas KK podrían ser lo suficientemente intensas como para resultar interesantes para nuevos experimentos, no serían lo suficientemente intensas como para haber sido ya descubiertas.

En el futuro, el LHC tendrá una buena ocasión de producir las partículas KK de este modelo, si es que existen. Estas partículas no serán como las del modelo arqueado extradimensional de tamaño finito. En vez de las bonitas partículas KK que se desintegran dentro del detector, las partículas KK de este modelo con una dimensión extra infinita se escaparán a la dimensión extra (igual que hacen las partículas KK cuando hay dimensiones grandes). Así que, si hay una dimensión extra arqueada infinita y una Brana Débil que resuelve el problema de la jerarquía, los experimentos sólo podrían esperar descubrir colisiones en las que falta energía. Aun así, a energías suficientemente altas, la energía perdida sería una señal suficientemente explícita de que hay ahí algo nuevo.

Agujeros negros, cuerdas y otras sorpresas

Además de las partículas KK, podrían aparecer otras señales notables de las dimensiones extras cuando se encienda el LHC. Aunque los efectos de la gravedad de dimensión cinco son minúsculos a energías normales, la gravedad de dimensión cinco será una protagonista importante cuando los aceleradores creen partículas de alta energía. De hecho, cuando las energías alcancen aproximadamente un TeV, los efectos de la gravedad de dimensión cinco serán enormes: sofocarán las interacciones del débil gravitón tetradimensional, que tiene una función de probabilidad pequeña en la Brana Débil en la que vivimos (y en la que tienen lugar los experimentos).

La enorme intensidad de la gravedad de dimensión cinco significa que podrían producirse agujeros negros de dimensión cinco y también cuerdas de dimensión cinco. Además, una vez que las energías alcancen aproximadamente un TeV, cuanto esté en la Brana Débil o cerca de ella interactuaría fuertemente con todo lo demás. Esto es porque los efectos de la gravedad y de las partículas KK extras serían enormes a energías de un TeV y conspirarían para hacer que todo interactúe con todo lo demás. Estas fuertes interacciones entre todas las partículas conocidas y la gravedad no ocurrirían en un contexto tetradimensional; serían una señal definida de algo nuevo. Como pasaba en el caso de las dimensiones extras grandes, no sabemos

todavía si la energía será lo suficientemente alta como para ver estos nuevos objetos. Pero si las interacciones son fuertes a energías no mucho más altas que un TeV, los físicos experimentales no se las perderán.

Coda

La conexión entre una solución del problema de la jerarquía y las consecuencias experimentales a energías de un TeV es sólida, pero los detalles de lo que veremos depende del modelo. Modelos diferentes tienen consecuencias experimentales características, y esto resulta muy tranquilizador. Estas firmas características significan que una vez que el LHC esté terminado y funcionando, tendremos una buena ocasión para identificar cuál de estos modelos se aplica a nuestro mundo (si alguno lo hace).

LO QUE ES NUEVO:

•El espacio-tiempo puede curvarse drásticamente en presencia de energía de las branas y del bulto, incluso en el caso en el que la propia brana sea completamente plana.

•El modelo que hemos considerado en este capítulo tiene dos branas, la Brana de la Gravedad y la Brana Débil, en cada uno de los extremos de una quinta dimensión de tamaño finito. La energía del bulto y de las branas comban el espacio-tiempo.

•Una única dimensión extra introduce un modo enteramente nuevo de resolver el problema de la jerarquía. La quinta dimensión en este modelo no es grande, pero es muy arqueada. La intensidad de la gravedad depende de dónde esté uno en la quinta dimensión. La gravedad es fuerte en la Brana de la Gravedad y débil en la Brana Débil, en la que residimos nosotros.

•Desde la perspectiva de un observador que piensa que está en cuatro dimensiones, los objetos poseerían diferentes tamaños y masas si tienen su origen en puntos distintos de la quinta dimensión. Los objetos confinados en la Brana de la Gravedad serían muy pesados (con una masa parecida a la masa de la escala de Planck), mientras que los objetos confinados en la Brana Débil tendrían masas mucho más pequeñas, de aproximadamente un TeV.

•Todas las fuerzas pueden unificarse y el problema de la jerarquía puede resolverse si la partícula de Higgs (pero no los bosones gauge) está confinada en la Brana Débil.

•En los aceleradores de partículas, las compañeras de Kaluza-Klein del gravitón producirían colisiones muy distintivas; dentro del detector, se desintegrarían en partículas del modelo estándar.

•En los modelos en los que las partículas del modelo estándar están en el bulto, pueden producirse y observarse otras partículas KK.

21

LA «ALICIA» ANOTADA ARQUEADA[121]

Go ask Alice.

When she’s ten feet tall.

[Vete a preguntar a Alicia. | Cuando mide dos metros y medio].

JEFFERSON AIRPLANE

Atenea salió del ascensor del mundo de los sueños para entrar en el mundo arqueado de dimensión cinco y se sorprendió al encontrarse con que solamente veía tres dimensiones espaciales. ¿No estaría el Conejo jugando con ella? ¿No presumía acaso de llevarla a un mundo con cuatro dimensiones espaciales cuando, de hecho, había solamente tres? ¡Vaya una manera divertida de viajar a lo que parecía un mundo totalmente normal[122] !

Un habitante muy especial recibió con gran galantería a la sorprendida recién llegada. «Bienvenida a Branesville[123] , nuestra gloriosa capital. Permítame que la guíe por ella». Atenea, que estaba cansada y confundida, protestó bruscamente: «Branesville no parece tan especial. Hasta el alcalde parece completamente normal», aunque debía confesar que no estaba muy segura de eso, ya que nunca antes había visto a un alcalde.

El alcalde en cuestión había llegado acompañado por el gordo Gato de Cheshire, su consejero principal. El trabajo del Gato consistía en controlar todo lo que pasaba en la ciudad, para lo cual se valía en gran medida de su habilidad para pillar a la gente desprevenida, capacidad especialmente sorprendente, teniendo en cuenta su enorme tamaño. Al Gato le gustaba explicar que debía su maña a la habilidad que tenía para desaparecer en el bulto, pero nunca nadie comprendió lo que quería decir con esto[124] .

El Gato apareció cerca de Atenea y le preguntó si le gustaría acompañarlo en sus rondas. Le avisó que, para ello, lo más conveniente era que se sintiera a gusto con los bultos. Atenea le respondió con entusiasmo que su tío favorito era, de hecho, gordísimo. El Gato parecía tener dudas, pero, con todo, accedió a llevarla consigo. Ofreció a Atenea pastel de crema con cubierta de mantequilla, al que ella se entregó con fruición. Y se marcharon.

Atenea se preguntó qué sería lo que había comido. Ahora parecía encontrarse en una rebanada tetradimensional de un mundo de dimensión cinco, y, por lo que veía, ella misma no era más espesa que dicha rebanada. «¡Soy como mi muñeca recortable de papel! —exclamó—. Pero, mientras mi muñeca tiene dos dimensiones en un mundo tridimensional, yo tengo tres dimensiones

espaciales en un mundo tetradimensional». Con una amplia sonrisa, el Gato le explicó sabiamente: «Ahora eres consciente de lo que a mí me gusta llamar el bulto. Todavía estás en Branesville, pero de un momento a otro te irás de aquí (y crecerás). Branesville es, en realidad, parte de un universo de dimensión cinco, pero la quinta dimensión está arqueada tan discretamente que los habitantes de Branesville son completamente ajenos a su existencia. No tienen ni idea de que Branesville es la frontera de un estado de dimensión cinco. Tú también, al llegar, concluiste equivocadamente que sólo hay tres dimensiones espaciales. La nueva Atenea, no atada ya a la brana, tiene libertad para viajar en la quinta dimensión. ¿Puedo sugerirte como destino una ciudad llamada Brana Débil, que está al otro extremo de este universo de dimensión cinco?».

Resultó ser un viaje en dimensión cinco de lo más extraño. Al dejar Branesville, Atenea se encontró moviéndose en otra dimensión y creciendo a la vez (como se muestra en la figura 85[125]). Cuando el Gato, atento a todo, notó la expresión de confusión en el rostro de Atenea, para tranquilizarla, le explicó lo siguiente: «Brana Débil está cerca y llegaremos allí muy pronto[126] . Es bonita, pero no te alarmes cuando veas que, al igual que los habitantes de Branesville, los de Brana Débil se burlan de la noción de cuatro dimensiones espaciales. Tú, que puedes ver el bulto, tendrás una enorme sombra sobre Branesville, diez mil billones de veces más grande que la sombra con la que empezaste. Casi todo lo demás te parecerá completamente normal, y eso mismo pensarán los otros».

Pero, al llegar a Brana Débil, Atenea notó otra cosa más. El gravitón tetradimensional había acompañado tranquilamente a los viajeros durante el viaje y ahora, con el dedo, le daba a Atenea un suave golpecito en el hombro. La había tocado con tanta suavidad que ella apenas lo había notado[127] .

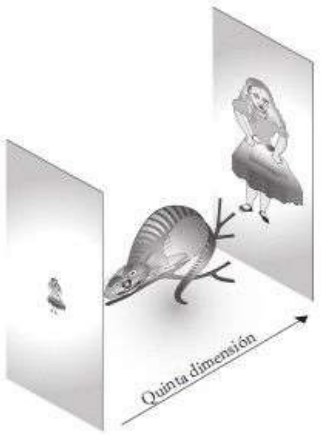


FIGURA 85. Alicia crecía a medida que cruzaba el bulto desde la Brana Débil hasta la Brana de la Gravedad.

Pero Atenea no pudo ignorar al gravitón cuando éste se lanzó a soltar una letanía de quejas. «Brana Débil sería fascinante si no fuera por la influencia

superior de la jerarquía consolidada. Las fuerzas armadas fuerte, débil y electromagnética de la Brana Débil sólo me permiten una intensidad de lo más débil». El gravitón se quejó de que en todas partes, menos allí, era una fuerza con la que había que contar, especialmente en Branesville, que estaba gobernada por una oligarquía con fuerzas de intensidades equiparables[128] . Brana Débil, donde la gravedad era la más reprimida, era el sitio menos deseable para el gravitón[129] . El gravitón se dirigía a Atenea con la esperanza de alistarla en su plan de arrancar algo de poder a las autoridades reinantes.

Atenea pensó que lo mejor sería marcharse inmediatamente; buscó en los alrededores el agujero de la madriguera, pero no logró dar con él. Encontró, en cambio, un conejo blanco, y supuso que sería un buen guía. Pero el conejo de Brana Débil tenía un andar muy lento y no hacía más que repetir lo contento que estaba de que no llegase el día[130] . Atenea se dio cuenta de que este conejo no iba a ninguna parte; acabó topándose con otro conejo más ansioso, al que pudo seguir para, finalmente, encontrar así el camino de regreso a su hogar. Una vez que comprendió su significado físico, Atenea disfrutó muchísimo con su sueño, aunque hay que decir que nunca más volvió a comer pastel de crema.

22

PASILLO PROFUNDO:

UNA DIMENSIÓN EXTRA INFINITA

From another dimension,

With voyeuristic intention

let’s do the time warp again.

[Desde otra dimensión, | con intención de curiosear, | hagamos que el tiempo se combe otra vez].

VANESSA (*The Rocky Horror Picture Show*)

Atenea se despertó, sobresaltada. El sueño recurrente la había llevado una vez más a la madriguera del Conejo. En esta ocasión, sin embargo, le pidió al Conejo que, de nuevo, la condujese directamente al mundo arqueado de dimensión cinco.

Atenea llegó otra vez a Branesville (o eso creyó). Pronto apareció el Gato y se dirigió ávidamente hacia él, prometiéndose un pastel para soñar y una deliciosa excursión a Brana Débil. Se sintió profundamente decepcionada cuando el Gato le dijo que, en este universo concreto, no había nada que se pareciera a Brana Débil[131] .

Atenea no le creyó y pensó que debía de haber otra brana alejada. Orgullosa de comprender por qué, en la geometría arqueada, las branas alejadas tenían una gravedad más débil, decidió que dicha brana se llamaría, seguramente, «Brana Dócil», y le preguntó al Gato si podría ir allí.

Pero, de nuevo, le esperaba una decepción. «Ese lugar no existe. Estás en la Brana; no hay más branas», fue la explicación del Gato. «Esto es cada vez más curioso», pensó Atenea. A todas luces, éste no era exactamente el mismo espacio que antes, ya que sólo tenía una brana. Pero Atenea no estaba dispuesta a resignarse. «¿Puedo ver yo misma que no hay ninguna otra brana?», pidió con su voz más dulce.

El Gato le recomendó seriamente que no lo intentara, y le advirtió: «La gravedad tetradimensional que hay en la Brana no garantiza que haya una gravedad tetradimensional en el bulto. Una vez que estuve ahí por poco no lo perdí todo, salvo la sonrisa». Atenea era una chica prudente, a pesar de las muchas aventuras que había corrido, y se tomó en serio el aviso del Gato. Pero a menudo se preguntaba qué es lo que había querido decir. ¿Qué había más allá de la Brana, y cómo podría saberlo alguna vez?

El espacio-tiempo curvado tiene propiedades notables. Exploramos algunas de ellas en el capítulo 20; tal es el caso de la manera en la que la masa, el tamaño y la intensidad de la gravedad pueden depender de la posición. Este capítulo presenta una propiedad todavía más extraordinaria del espacio-tiempo curvado: puede parecer que cuenta con cuatro dimensiones, aunque, verdaderamente, tenga cinco. Examinando más cuidadosamente la geometría arqueada del espacio-tiempo, Raman y yo nos percatamos, con asombro, de que incluso una dimensión extra infinita puede a veces ser invisible.

La geometría del espacio-tiempo que consideraremos en este capítulo es casi la misma que la descrita en el capítulo 20. Pero, como sugiere la historia de arriba, esta geometría presenta un único rasgo distintivo: tiene sólo una brana. Pero ésta es una distinción de una importancia tremenda: como no hay una segunda brana confinante, una única brana implica que la quinta dimensión es infinita (véase la figura 86).

FIGURA 86. El espacio-tiempo infinito con una única brana. Hay una única brana tetradimensional en un universo de dimensión cinco. El modelo estándar reside en esta única brana.

Ésta es una diferencia formidable. Durante tres cuartas partes de un siglo, desde que Theodor Kaluza introdujo la idea de una dimensión extra del espacio en 1919, los físicos creyeron que las dimensiones extras eran aceptables, pero sólo si eran de tamaño finito, o bien si estaban enrolladas o confinadas entre branas. Se suponía que las dimensiones extras infinitas eran muy fáciles de descartar porque la fuerza gravitatoria, que se extendería hasta el infinito en estas dimensiones, sería incorrecta en todas las escalas de distancia, incluso en aquéllas que ya conocemos. Se suponía que una quinta dimensión infinita desestabilizaría todo lo que nos rodea, incluso el sistema solar, que se mantiene unido por la física newtoniana.

Este capítulo explica por qué este razonamiento no siempre es correcto. Investigaremos una razón enteramente nueva por la que las dimensiones extras podrían estar ocultas, una razón que Raman y yo descubrimos en 1999. El espacio-tiempo puede estar arqueado de modo que el campo gravitatorio se concentre intensamente en una pequeña región cerca de una brana, y que esté tan concentrado en ella que la enorme expansión de una dimensión infinita no trae consecuencias. La fuerza gravitatoria no se pierde en las dimensiones extras, sino que permanece concentrada en una pequeña región cerca de una brana.

En este contexto, el gravitón, la partícula que transmite la gravedad, está *localizado* cerca de una brana, que es la brana de la historia de Atenea, pero que, a partir de ahora, voy a llamar la Brana de la Gravedad. El sueño de Atenea la llevó hasta este espacio arqueado de dimensión cinco, en el que la Brana de la Gravedad altera tan radicalmente la naturaleza del espacio-tiempo que el espacio parece ser tetradimensional, aunque, en realidad, es de dimensión cinco. Notablemente, una dimensión superior arqueada puede tener una extensión infinita y, sin embargo, estar oculta, mientras que las tres dimensiones infinitas planas reproducen la física de nuestro mundo.

El gravitón localizado

El lector quizá recuerde que la primera vez que introduje las branas distinguí entre la resistencia a explorar regiones lejanas y el confinamiento genuino, que prohíbe explícitamente viajar más allá del lugar donde alguien o algo está confinado. Aunque probablemente no hayamos visitado nunca Groenlandia, no hay ninguna ley que nos prohíba ir allí. Pero hay algunos sitios adonde, sencillamente, es problemático llegar. Aunque esté permitido viajar a esos lugares e incluso éstos no estén más lejos que otros a los que sí hemos ido, es muy probable que jamás los visitemos.

O imaginémonos a alguien a quien se le ha roto una pierna. En principio, podría salir de casa cuando quisiera, pero es mucho más probable que se encuentre dentro de la vivienda que fuera, aunque no haya barrotes ni candados que le retengan allí.

Análogamente, el gravitón localizado tiene acceso sin restricciones a una quinta dimensión infinita. Pero, sin embargo, está fuertemente concentrado en las cercanías de una brana y tiene una probabilidad muy pequeña de encontrarse lejos de ella. Según la relatividad general, todo —incluido el gravitón— está sujeto a la fuerza gravitatoria. El gravitón no es en absoluto especial, pero se comporta como si fuera atraído gravitatoriamente hacia la brana y, por lo tanto, permanece cerca de ella. Y como el gravitón sólo viaja muy raramente fuera de una región limitada, la dimensión extra puede ser infinita sin producir ningún efecto peligroso que obligue a descartar la teoría.

En nuestro trabajo, Raman y yo nos concentramos en la gravedad en un espacio-tiempo de dimensión cinco con una única dimensión extra del espacio. Pudimos así concentrarnos en el mecanismo de localización que ahora vamos a discutir, que mantiene la gravedad recluida en una pequeña región del espacio-tiempo de dimensión cinco. Supondré que, si el universo tiene diez o más dimensiones, una combinación entre la localización y el enrollamiento mantiene ocultas el resto. Dichas dimensiones ocultas adicionales no afectarían al fenómeno de localización que voy a describir enseguida, de modo que haré caso omiso de ellas y me concentraré en las cinco dimensiones que son cruciales para nuestra discusión.

En nuestro modelo hay una única brana en uno de los extremos de la quinta dimensión del espacio-tiempo. Es reflexiva, como lo eran las dos branas que describí en el capítulo 20. Las cosas que chocan contra la brana, sencillamente, rebotan, de modo que nada pierde energía cuando golpea la brana. Como el modelo que estamos considerando ahora contiene sólo esta única brana, supondremos que las partículas del modelo estándar están confinadas allí; nótese la diferencia con el modelo que discutí en el capítulo anterior, en el que las partículas del modelo estándar estaban en la Brana Débil, que aquí ya no existe. La localización de las partículas del modelo estándar no es relevante para la geometría del espacio-tiempo, pero tiene, por supuesto, implicaciones para la física de partículas.

Aunque en este capítulo estamos interesados en la teoría con una única brana, la primera pista que Raman y yo tuvimos de que podía legitimarse una

quinta dimensión infinita fue un rasgo curioso de la geometría arqueada con dos branas. Inicialmente supusimos que la segunda brana servía para dos cosas. En primer lugar, para confinar las partículas del modelo estándar; en segundo lugar, para hacer que la quinta dimensión sea finita. Como en el caso de las dimensiones extras planas, una quinta dimensión finita garantizaba que, a distancias suficientemente largas, la gravedad sería la de un espacio-tiempo tetradimensional.

Sin embargo, un hecho peculiar sugirió que este último papel de la segunda brana era un señuelo para despistar y que la segunda brana no era esencial para que la gravedad pudiera imitar la de un universo auténticamente tetradimensional: las interacciones del gravitón tetradimensional eran virtualmente independientes del tamaño de la quinta dimensión. Un cálculo mostraba que la gravedad tendría la misma intensidad si la segunda brana permanecía donde estaba o si estaba dos veces más lejos que la Brana de la Gravedad, o si estaba diez veces más lejos, adentrada en el bulto, muy lejos de la primera brana. De hecho, la gravedad tetradimensional persistía incluso si nuestro modelo ponía la segunda brana en el infinito, es decir, si sencillamente la eliminaba. Esto no sería cierto si la segunda brana y una dimensión finita fueran esenciales para reproducir la gravedad tetradimensional.

Ésta fue nuestra primera pista de que la intuición de que necesitamos una segunda brana se basaba en las dimensiones planas y que no era necesariamente cierta en el espacio-tiempo arqueado. Con una dimensión extra plana, la segunda brana es obligatoria para la gravedad tetradimensional. Podemos ver esto con ayuda del ejemplo del aspersor del capítulo 20. Una dimensión extra plana correspondería al hecho de que el agua se distribuye equitativamente por todas partes a lo largo de un aspersor recto largo (véase la figura 81, p. 553[132]). Cuanto más largo fuera el aspersor, menos agua caería en un jardín dado. Si hubiera que extender este razonamiento a un aspersor infinitamente largo, veríamos que el agua se reparte de manera tan dispersa que, esencialmente, no caería nada de agua en un jardín dado de área finita.

Análogamente, si la gravedad se extendiera a lo largo y ancho de una dimensión uniforme infinita, la fuerza gravitatoria estaría tan atenuada a lo largo de la dimensión extra que quedaría reducida a nada. Una geometría con una dimensión extra infinita tendría que contener alguna sutileza que fuera más allá de esta descripción intuitiva simple, si la gravedad ha de comportarse como si fuera tetradimensional. Y, en efecto, el espacio-tiempo arqueado proporciona el ingrediente añadido que se requiere.

Para ver cómo funciona esto, usemos otra vez el ejemplo del aspersor para identificar la brecha que presenta el argumento de arriba. Supongamos que tenemos un aspersor infinitamente largo, pero que no distribuimos el agua equitativamente por todas partes. Por el contrario, tenemos el control de cómo se reparte el agua, con la opción de asegurar que nuestro propio jardín esté bien regado. Una manera de conseguir esto sería destinar la mitad del agua a nuestra porción de tierra y la mitad restante del agua al resto de las tierras. En este caso, aunque los jardines lejanos recibirían un trato injusto, estaría garantizado que nuestro jardín recibiría el agua que necesita. Nuestro

jardín siempre recibiría la mitad del agua, aunque el aspersor continuara enviando agua indefinidamente lejos. Con una distribución desigual del agua, conseguiríamos toda el agua que necesitamos. El aspersor podría ser infinito, pero a nosotros nos daría igual su longitud.

Análogamente, la función de probabilidad del gravitón en nuestra geometría arqueada es siempre muy grande cerca de la Brana de la Gravedad, a pesar de la quinta dimensión infinita. Como en el capítulo anterior, la función de probabilidad del gravitón se dispara en esta brana (véase la figura 87) y cae exponencialmente, según el gravitón se aleja de la Brana de la Gravedad por la quinta dimensión. En esta teoría, sin embargo, la función de probabilidad del gravitón continúa indefinidamente lejos, pero esto no trae consecuencias para el tamaño de la función de probabilidad del gravitón cerca de la brana.

FIGURA 87. La función de probabilidad del gravitón en un espacio-tiempo infinito arqueado con una sola brana.

Este tipo de función de probabilidad que cae en picado nos dice que la probabilidad de encontrar un gravitón lejos de la Brana de la Gravedad es minúscula, tan minúscula que generalmente podemos olvidarnos de las regiones lejanas de la quinta dimensión. Aunque, en principio, el gravitón puede estar dondequiera en la quinta dimensión, el decrecimiento exponencial hace que la función de probabilidad del gravitón esté muy concentrada en las cercanías de la Brana de la Gravedad. La situación es casi la misma, pero no exactamente, que la producida por una segunda brana que confinara el gravitón en una región acotada.

La alta probabilidad de que el gravitón se encuentre cerca de la Brana de la Gravedad, y la correspondiente concentración del campo gravitatorio allí, podría compararse también a la alta probabilidad de que los patos glotones se concentren en un estanque cerca de la orilla. Normalmente los patos no están distribuidos equitativamente a lo largo y ancho del estanque, sino que más bien se concentran en torno a los pedazos de pan que los aficionados a las aves arrojan al agua (véase la figura 88). De modo que el tamaño del estanque sería esencialmente irrelevante en lo que afecta a la distribución de los patos. Análogamente, en el espacio-tiempo arqueado, la gravitación atrae al gravitón hacia la Brana de la Gravedad, de modo que la extensión de la quinta dimensión es irrelevante.

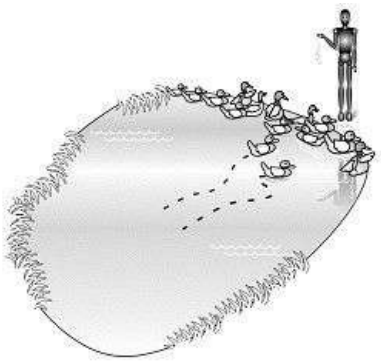


FIGURA 88. Si los patos se concentran cerca de la orilla, podemos contarlos casi todos con sólo contar los que están más cerca.

También podemos ver por qué la quinta dimensión no afecta demasiado a la gravedad considerando el campo gravitatorio que rodea un objeto en la Brana de la Gravedad. Hemos visto que, en las dimensiones espaciales planas, las líneas de fuerza que emanan de un objeto se dispersan equitativamente en todas las direcciones. Y cuando hay dimensiones extras finitas, las líneas de campo se extienden en todas las direcciones hasta que algunas alcanzan el borde y se desvían. Por esta razón, las líneas del campo gravitatorio de un objeto que están a una distancia más grande que el tamaño de las dimensiones extras se dispersan solamente a lo largo de las tres dimensiones infinitas del mundo de dimensión inferior.

FIGURA 89. En la teoría arqueada, las líneas de campo están distribuidas equitativamente por todas las direcciones de la brana. Sin embargo, al salir de la brana, las líneas de campo vuelven atrás, de modo que siguen un camino esencialmente paralelo a la brana, casi como si la quinta dimensión fuera finita. Incluso con una dimensión infinita, el campo gravitatorio está localizado cerca de la brana y las líneas de campo se dispersan esencialmente, como si hubiera sólo cuatro dimensiones (del espacio-tiempo).

En el contexto de la geometría arqueada, por el contrario, las líneas de campo no se distribuyen equitativamente en todas las direcciones. Perpendicularmente a la brana se extienden muy poco (véase la figura 89). Como las líneas del campo gravitatorio se dispersan principalmente a lo largo de la brana, el campo gravitatorio parece casi idéntico al campo asociado a un objeto en cuatro dimensiones. La dispersión en la quinta dimensión es tan pequeña (no mucho más grande que la longitud de la escala de Planck, 10^{-33} cm) que podemos hacer caso omiso de ella. Aunque la dimensión extra es infinita, resulta irrelevante para el campo gravitatorio de un objeto confinado en una brana.

Podemos ver también cómo Raman y yo resolvimos el enigma inicial al que nos enfrentamos: ¿por qué el tamaño de la quinta dimensión es irrelevante para la intensidad de la gravedad? Volviendo al ejemplo del aspersor, supongamos que especificamos ahora la distribución de agua sobre el aspersor entero, de modo que refleje la distribución de la gravedad de la función de probabilidad que cae en picado del gravitón: después de tomar la mitad del agua para nuestro jardín, enviamos la mitad del agua que queda al jardín colindante, la mitad de esta última cantidad al jardín siguiente y así sucesivamente, de manera que cada jardín va recibiendo la mitad del agua que recibió el anterior. Para reflejar la situación de una segunda brana en la quinta dimensión, supondremos que dejamos de suministrar agua en un cierto punto, al igual que una segunda brana en la quinta dimensión cortaría la función de probabilidad del gravitón en algún punto de la quinta dimensión. Y para reflejar una quinta dimensión infinita, supondremos que el aspersor distribuye agua indefinidamente a lo largo de todo su recorrido.

Para demostrar que el tamaño de la quinta dimensión es irrelevante para la intensidad de la gravedad cerca de la brana, quisiéramos probar que los

primeros jardines consiguen casi la misma cantidad de agua, independientemente de que dejemos de transportar agua al llegar al quinto jardín o al décimo jardín o de que sigamos distribuyendo agua indefinidamente. Consideremos entonces qué es lo que pasa si el aspersor se apaga después del quinto jardín. Como al sexto jardín y a los siguientes les iba a tocar tan poca agua, la cantidad total de agua que el aspersor destinaría a los primeros jardines diferiría de la cantidad total de un aspersor infinito solamente en un pequeño porcentaje. Y si apagásemos el aspersor después del séptimo jardín, ese porcentaje sería todavía más pequeño. Con nuestra distribución del agua, en la que casi toda el agua está destinada a los primeros jardines, los jardines lejanos, que reciben solamente una proporción diminuta del agua, son irrelevantes en relación con las cantidades de agua que reciben los primeros jardines[133] .

Como usaré de nuevo el ejemplo de los patos en el próximo capítulo, explicaré ahora lo mismo en términos de contar patos atraídos hacia la orilla, donde alguien ha echado pan. Si nos pusiéramos a contar primero los patos cercanos y luego los que están un poco más lejos, pronto nuestra actividad de recuento de patos se volvería casi inútil. Cuando llegase el momento de separar un poco nuestra vista de la orilla, quedarían ya muy pocos patos que contar. No es preciso seguir contando patos que estén lejos de la orilla porque, esencialmente, ya los hemos contado todos al concentrarnos en la región que estaba cerca de la orilla (véase la figura 88).

La función de probabilidad del gravitón es sencillamente tan pequeña más allá de la segunda brana que la colocación de una segunda brana produciría sólo una diferencia insignificante en la intensidad de interacción del gravitón tetradimensional. En otras palabras, la extensión de la quinta dimensión es irrelevante para la intensidad aparente de la gravedad tetradimensional en esta teoría, en la que el campo gravitatorio está localizado cerca de la Brana de la Gravedad[M37] . Aunque no haya una segunda brana y la quinta dimensión sea infinita, la gravedad sigue pareciendo tetradimensional.

Raman y yo llamamos a esta situación *gravedad localizada* . La razón es que la función de probabilidad del gravitón está localizada cerca de una brana. Aunque, hablando estrictamente, la gravedad puede trascender a la quinta dimensión porque la quinta dimensión es en efecto infinita, en realidad no lo hace a causa de la poca probabilidad que hay de que el gravitón se encuentre lejos. El espacio no está truncado y sin embargo todo permanece en una región concentrada en las cercanías de la brana. Una brana alejada no produce ninguna diferencia en los procesos físicos de la Brana de la Gravedad, ya que muy pocas cosas de la Brana de la Gravedad se aventuran a irse lejos. Todo lo que se produce en la Brana de la Gravedad o cerca de ella permanece próximo a ella, en una región localizada.

Algunas veces los físicos se refieren a este modelo de la gravedad localizada como RS2. RS alude a Randall y Sundrum, pero el 2 es confuso: se refiere al hecho de que éste es el segundo artículo que escribimos sobre geometría arqueada, y no al hecho de que haya dos branas. La teoría con dos branas, que aborda el problema de la jerarquía, se conoce como RS1. (Los nombres serían menos confusos si hubiésemos escrito los artículos en orden inverso).

Al contrario que en el caso de RS1, la teoría de este capítulo no es necesariamente relevante para el problema de la jerarquía, aunque uno puede introducir una segunda brana y resolver también el problema de la jerarquía, como consideramos brevemente hacia el final del capítulo 20. Pero haya o no haya una segunda brana en el espacio para abordar el problema de la jerarquía, la gravedad localizada es una posibilidad radical con importantes implicaciones teóricas, la cual contradice la hipótesis largo tiempo defendida de que las dimensiones extras tienen que ser compactas.

Compañeras Kaluza-Klein del gravitón

En la sección previa se discutió la función de probabilidad del gravitón, que está fuertemente concentrada en la Brana de la Gravedad. La partícula sobre la que se hablaba desempeña el papel del gravitón tetradimensional porque viaja casi exclusivamente a lo largo de la brana y tiene sólo una probabilidad minúscula de trascender a la quinta dimensión. Desde el punto de vista del gravitón, parece como si el espacio tuviera una quinta dimensión de sólo 10^{-33} cm (un tamaño fijado por la curvatura, que, a su vez, está determinada por la energía que tiene el bulto y la brana) más que de tamaño infinito.

Pero, aunque Raman y yo estábamos bastante entusiasmados con nuestro descubrimiento, no teníamos la seguridad de haber resuelto completamente el problema. ¿Era el gravitón localizado suficiente para generar por sí mismo una teoría efectiva tetradimensional en la que la gravedad se comportara como lo haría en cuatro dimensiones? El problema en potencia era que las compañeras de Kaluza-Klein del gravitón podrían también contribuir a la fuerza gravitatoria y modificar así significativamente la gravedad.

La razón por la que esto parecía tan peligroso consistía en que, generalmente, cuanto más grande es el tamaño de la dimensión extra, más pequeña es la masa de la partícula KK más ligera. Para nuestra teoría con una dimensión infinita, esto significaría que la partícula KK más ligera podría ser arbitrariamente ligera. Y como la diferencia en masas de las partículas KK también decrece con el tamaño de la dimensión extra, podrían producirse en cualquier energía finita infinidad de tipos de compañeras KK del gravitón muy ligeras. Todas estas partículas KK podrían contribuir potencialmente a la ley de la fuerza gravitatoria y cambiarla. El problema parecía especialmente endiablado porque aunque cada partícula KK interactuase muy débilmente, si hubiera muchas de ellas, entonces la fuerza gravitatoria tendría, no obstante, un aspecto bastante diferente del que tiene en cuatro dimensiones.

Y encima, como las partículas KK son muy ligeras, serían muy fáciles de producir. Los aceleradores están ya operando a energías suficientemente altas como para producirlas. Hasta algunos procesos físicos ordinarios, como ciertas reacciones químicas, generarían la energía suficiente para crear compañeras KK del gravitón. Si las partículas KK aportasen demasiada energía al bulto de dimensión cinco, habría que desechar la teoría.

Afortunadamente, ninguno de estos asuntos resulta ser un problema. Cuando calculamos las funciones de probabilidad de las partículas KK, descubrimos que las compañeras KK del gravitón interactúan de un modo extremadamente

débil en la Brana de la Gravedad o cerca de ella. A pesar del gran número de compañeras KK del gravitón, todas interactúan tan débilmente que no hay peligro de producir demasiadas de ellas ni de cambiar la forma de la ley de la fuerza gravitatoria en ninguna parte. Si hay algún problema, consiste en que esta teoría imita tan bien la gravedad tetradimensional que ¡todavía no conocemos ningún medio de distinguirla experimentalmente de un mundo verdaderamente tetradimensional! Las compañeras KK del gravitón tendrían un impacto tan insignificante en cualquier cosa observable que todavía no sabemos cómo distinguir la diferencia entre cuatro dimensiones planas y cuatro dimensiones planas complementadas por una quinta arqueada.

Podemos entender la debilidad de las interacciones de las compañeras KK del gravitón a partir de la forma de sus funciones de probabilidad. Como en el caso del gravitón, éstas nos dicen la probabilidad de que una partícula se encuentre en un punto dado de la quinta dimensión. Raman y yo seguimos el procedimiento más o menos estándar para encontrar las masas y las funciones de probabilidad de cada compañera KK del gravitón en nuestra geometría arqueada. Esto implicaba la resolución de un problema de mecánica cuántica.

Para una quinta dimensión plana, el problema de la mecánica cuántica, descrito en el capítulo 6, consistía en encontrar las ondas que encajan en la dimensión enrollada y cuantizar así las energías permitidas[134] . Para nuestra geometría arqueada infinita de dimensión cinco, el problema cuántico parecía bastante diferente, ya que necesitábamos tener en cuenta la energía que había en la brana y en el bulto y que alabeaba el espacio-tiempo. Pero conseguimos modificar el procedimiento estándar para que se adaptara a nuestro contexto. Los resultados fueron fascinantes.

La primera partícula KK que encontramos fue la que no tiene momento en la quinta dimensión. La función de probabilidad de esta partícula está fuertemente concentrada en la Brana de la Gravedad y decrece exponencialmente al alejarnos de ella. Esta forma debería resultarnos familiar: es la función de probabilidad para el mismo gravitón tetradimensional que hemos discutido ya. Este modo KK sin masa es el gravitón tetradimensional que transmite la ley de la fuerza de Newton tetradimensional.

El resto de las partículas KK son, sin embargo, muy diferentes. Es muy poco probable que alguna de estas otras partículas se encuentre cerca de la Brana de la Gravedad. Por el contrario, lo que se descubre es que, para cualquier valor de la masa entre cero y la masa de la escala de Planck, existe una partícula KK con esa masa concreta y la función de probabilidad para cada una de esas partículas se dispara en un punto diferente a lo largo de la quinta dimensión.

De hecho, hay una interpretación interesante de la localización de los diferentes picos. Vimos en el capítulo 20 que en el espacio-tiempo arqueado, para poner a todas las partículas al mismo nivel en la teoría efectiva tetradimensional de modo que todas interactúen con la gravedad del mismo modo, reajustamos las escalas de las distancias, tiempos, energías y momentos diferentemente a lo largo de la quinta dimensión. Según uno se

aleja de la brana, cada punto queda asociado a una energía exponencialmente más baja. Por eso se esperaba que las partículas de la Brana Débil tuvieran una masa de aproximadamente un TeV. La sombra de Atenea cuando viajaba en la quinta dimensión se hacía más grande y Atenea misma se hacía más ligera al alejarse de la Brana de la Gravedad y al aproximarse a la Brana Débil.

Cada punto a lo largo de la quinta dimensión puede asociarse a una masa determinada del mismo modo; la masa está relacionada con la masa de la escala de Planck por el reajuste de escala en ese punto. Y la partícula KK cuya función de gravedad se dispara en ese punto concreto tiene aproximadamente esa masa de Planck reajustada. Al ir adentrándose uno en la quinta dimensión, va encontrando partículas KK cada vez más ligeras, cuyas funciones de probabilidad se disparan allí.

De hecho, podríamos decir que el espectro de Kaluza-Klein exhibe una sociedad muy segregada. Las partículas KK pesadas están desterradas de las regiones del espacio en las que la energía reajustada es demasiado pequeña para producirlas. Y las partículas KK ligeras se encuentran raramente en aquellas regiones que contienen partículas con mucha energía. Las partículas KK se concentran lo más lejos que pueden de la Brana Débil, dada su masa. Sus localizaciones son como la talla de los pantalones de los adolescentes, esto es, lo más holgados posible sin llegar a caerse. Por suerte, las leyes físicas que determinan las localizaciones de las partículas KK resultan más fáciles de comprender que las reglas de la moda adolescente, que son mucho más enrevesadas.

Para nosotros, la propiedad más importante de las funciones de probabilidad de las partículas KK ligeras es que éstas son extremadamente pequeñas en la Brana de la Gravedad. Esto significa que sólo hay una pequeña probabilidad de encontrar partículas KK ligeras en ella o cerca de ella. Como las partículas KK ligeras huyen lo más lejos que pueden de la Brana de la Gravedad, las partículas ligeras (aparte del gravitón, que es excepcional y cuya función de probabilidad se dispara en la Brana de la Gravedad) se producirían muy raramente allí. Además, las partículas KK ligeras no modifican significativamente la ley de la fuerza gravitatoria porque tienden a mantenerse lejos de la Brana de la Gravedad y, por lo tanto, no interactúan mucho con las partículas confinadas en la brana.

Juntándolo todo, Raman y yo llegamos a la conclusión de que habíamos descubierto una teoría que funcionaba. El gravitón localizado en la Brana de la Gravedad es el responsable de la aparición de la gravedad tetradimensional. A pesar de la abundancia de compañeras KK del gravitón, éstas interactúan tan débilmente en la Brana de la Gravedad que su efecto es insignificante. Y, a pesar de la existencia de una quinta dimensión infinita, todas las leyes y los procesos físicos, incluida la ley de la gravedad, parecen concordar con lo que se espera de un mundo tetradimensional. En este espacio fuertemente arqueado es permisible una dimensión extra infinita.

Como se mencionó antes, cabe afirmar que este modelo es frustrante desde el punto de vista de la física de las observaciones. Por sorprendente que parezca, este modelo de dimensión cinco imita las cuatro dimensiones tan

extraordinariamente bien que será sumamente complicado dilucidar si tiene o no vigencia. Los experimentadores de la física de partículas van a vivir, ciertamente, tiempos difíciles.

Los físicos han comenzado, sin embargo, a explorar propiedades astrofísicas y cosmológicas que podrían distinguir los dos mundos. Muchos físicos[135] han examinado los agujeros negros en el espacio-tiempo arqueado y continúan investigando si existen propiedades características que podamos usar para determinar en qué tipo de universo vivimos realmente.

Por ahora, sabemos que la localización es una posibilidad teórica nueva y fascinante para las dimensiones extras en nuestro universo. Yo espero con impaciencia los nuevos avances que podrían finalmente determinar si ésta es o no una propiedad verdadera de nuestro mundo.

LO QUE ES NUEVO:

•Si el espacio-tiempo se arquea adecuadamente, una dimensión puede ser infinitamente larga y, sin embargo, invisible.

•La gravedad puede estar localizada, aunque no esté estrictamente confinada en una región finita.

•En la gravedad localizada, la partícula KK sin masa es el gravitón localizado. Está concentrado en la zona próxima a la Brana de la Gravedad.

•Todas las demás partículas KK se concentran lejos de la Brana de la Gravedad; la forma de sus funciones de probabilidad y las localizaciones donde éstas se disparan dependen de sus masas.

23

UN PASILLO REFLEXIVO Y EXPANSIVO

Some day girl I don’t know when

We’re gonna get to that place

Where we really want to go.

[Algún día, muchacha, no sé cuándo, | llegaremos a ese sitio | al que realmente queremos ir].

BRUCE SPRINGSTEEN

Ike XLII estaba dispuesto a vivir emociones. Quería probar las posiciones más altas del Alicxvr, las que correspondían a muchos megapársecs, gracias a las cuales podría explorar lugares más allá de la galaxia y del universo conocido, y experimentar qué se siente en esas regiones lejanas que nadie ha visto antes.

Ike se estremeció cuando el Alicxvr lo llevó a distancias de 9, 12 e incluso 13 mil millones de años luz. Pero su entusiasmo disminuyó cuando, al intentar ir más lejos, la intensidad de la señal cayó en picado. Cuando pidió 15 mil millones de años luz, su exploración fracasó completamente: ya no recibía información de ningún tipo. Por el contrario, escuchó: «Mensaje 5B73: el cliente del Horizonte con el que desea hablar está fuera de su área de llamadas. Si necesita ayuda, por favor, contacte con el operador de largas distancias de su localidad».

No podía creer lo que oía. Era el XXXI y su servicio del Horizonte seguía proporcionando sólo una cobertura limitada. Cuando Ike trató de ponerse en contacto con el operador, una grabación le dijo: «Por favor, permanezca en la brana. Su llamada será contestada por orden de llegada». Ike sospechó que el operador no respondería nunca y, muy sabiamente, decidió no esperar.

En el capítulo anterior se explicó por qué el arqueo puede emancipar una dimensión extra y permitir que sea infinita, aunque invisible. Pero la dimensión extra infinita no es el final de la historia física: las cosas son todavía más raras. Este capítulo explicará cómo la gravedad tetradimensional (esto es, con tres dimensiones espaciales y una temporal) puede ser verdaderamente un fenómeno local: la gravedad podría parecer muy diferente a distancias muy lejanas. Veremos que no sólo el espacio puede parecer tetradimensional cuando, verdaderamente, tiene cinco dimensiones, sino que podríamos estar viviendo en un hueco aislado con gravedad tetradimensional en un universo de dimensión cinco.

El modelo que consideraremos ahora demuestra que, por sorprendente que resulte, puede parecer que distintas regiones del espacio tengan un número diferente de dimensiones. Mientras investigábamos algunos aspectos desconcertantes de la gravedad localizada, el físico Andreas Karch y yo encontramos un modelo para el espacio-tiempo en el que pasaba eso. La nueva y radical teoría con la que terminamos sugiere que la razón por la que no vemos las dimensiones adicionales podría ser mucho más peculiar de nuestro entorno de lo que nadie nunca hubiera pensado. ¡Podríamos estar viviendo en una sima tetradimensional en la que las tres dimensiones espaciales son un mero accidente de su localización!

Reflexiones

Cuando vuelvo a mirar el archivo de correos electrónicos de la época de la colaboración entre Raman y yo, me abruma, en cierto modo, pensar cómo completamos nuestro trabajo en medio de tantas otras distracciones. Cuando empezamos nuestras investigaciones, yo me hallaba en el proceso de mudanza del MIT a Princeton, donde estaba a punto de tomar posesión de una cátedra, y, asimismo, me encontraba organizando un taller de seis meses, que se desarrollaría en Santa Bárbara el año siguiente. Raman, que había disfrutado de varias becas postdoctorales, intentaba conseguir una oferta de plaza en alguna facultad, de modo que estaba liado preparando conferencias y solicitudes de trabajo. Era difícil de creer. Había realizado trabajos excelentes y, sin embargo, algunas personas y yo misma intentábamos convencerle de que todo saldría bien al final y de que no debía abandonar la física para buscarse otra actividad. Estaba claro que Raman tenía que continuar con la física y que merecía sin ninguna duda una buena plaza en una facultad; con todo, tenía muchos problemas para encontrar un trabajo.

Los correos electrónicos de esa época ilustran el caos: temas físicos interesantes alternan con solicitudes de cartas de recomendación, programación de charlas, tareas vinculadas a mi instalación en Princeton y la organización del taller de trabajo de Santa Bárbara. También había unos pocos correos en los que intercambiábamos ideas sobre nuestro trabajo con otros físicos. Pero no muchos. Aunque el artículo RS2 fue citado finalmente miles de veces y llegó a ser muy bien aceptado, la recepción inicial del trabajo no fue unánime. Pasó un tiempo hasta que la mayoría de los físicos nos comprendieron y nos creyeron. Un colega me cuenta que, al principio, la gente estaba esperando a que alguien encontrara una brecha para así no estar obligados a intentar entender el trabajo. Ciertamente, lo mejor que uno puede decir de la reacción que hubo en Princeton ante una charla que dio Raman es que fue tibia.

Incluso aquellos que sí nos escucharon no nos creyeron necesariamente del todo. Tuvimos una conversación muy iluminadora con el especialista en teoría de cuerdas Andy Strominger, aunque ahora él se ríe cuando se acuerda de que al principio no creía ni una sola palabra de lo que decíamos. Por suerte, no fue tan escéptico como para negarse a escucharnos y a hablar con nosotros.

En la comunidad de los físicos, había unos pocos que, desde el principio

mismo, comprendieron y creyeron lo que estábamos haciendo. Tuvimos la suerte de que estuviera entre ellos Stephen Hawking, quien no dudó en compartir su entusiasmo con el público de sus charlas. Me acuerdo de lo excitado que estaba Raman cuando me contó que las prestigiosas conferencias Loeb que Hawking pronunció en Harvard se habían concentrado en gran medida en nuestro trabajo.

También hubo otros que trabajaron en algunas ideas muy relacionadas con las nuestras. Pero fue en el otoño siguiente, varios meses después de que fuera publicado nuestro artículo (y muchos meses después de que hubiéramos empezado a hablar de él), cuando la comunidad de físicos teóricos como tal empezó a prestarnos atención. Resultó ser una gran suerte que David Kutasov, un físico de Israel que trabaja en la Universidad de Chicago, Misha Shifman, un físico de partículas de origen ruso que trabaja en la Universidad de Minnesota, y yo hubiéramos organizado un taller de seis meses en el otoño de 1999 en el Instituto Kavli de Física Teórica de Santa Bárbara. El propósito original de este taller había sido juntar a los teóricos de cuerdas y los constructores de modelos y aprovechar la incipiente convergencia de intereses de investigación en algunos temas como la supersimetría y las teorías gauge con interacciones fuertes. Habíamos comenzado a organizar el taller con mucha antelación, antes de que el concepto de brana y de dimensiones extras hubieran creado tanto revuelo. Aunque teníamos la esperanza de que se produjera una sinergia positiva entre los teóricos de cuerdas y los constructores de modelos, en el momento en el que comenzamos la organización no sabíamos que, el día en que comenzara el taller, estaríamos pensando en las dimensiones extras.

Pero la ocasión resultó afortunada. El taller proporcionó una excelente oportunidad para desarrollar ideas sobre las dimensiones extras, así como para que los constructores de modelos, los teóricos de cuerdas y los especialistas de la relatividad general compartieran su pericia. Hubo muchas discusiones fascinantes y la geometría arqueada fue uno de los temas principales. Al final, tanto los constructores de modelos como los especialistas en teoría de cuerdas se tomaron en serio la geometría arqueada de dimensión cinco. De hecho, la distinción entre los dos campos se difuminó al formarse equipos para trabajar en problemas similares de la geometría arqueada y otras ideas.

Muchos físicos trabajaron posteriormente en otros aspectos de las geometrías arqueadas, estableciendo conexiones y explorando sutilezas que hacían de la gravedad localizada algo todavía más interesante. Aunque los teóricos de cuerdas habían despachado RS1 (la geometría arqueada con dos branas) como un simple modelo, una vez que se pusieron a investigar descubrieron maneras de configurar la teoría RS1 en la teoría de cuerdas. Cuestiones sobre los agujeros negros, la evolución del tiempo, las geometrías relacionadas y la conexión con ideas de la teoría de cuerdas y la física de partículas han sido áreas fértiles de investigación. La gravedad localizada ha sido ahora investigada en varios contextos y continúan surgiendo nuevas ideas.

Después de que nuestra teoría hubiera sido aceptada y ya nadie pensara que fuera incorrecta, hubo algunos físicos que, de hecho, se pasaron de largo en la dirección contraria, manifestando que nuestra teoría no era nueva. Un

especialista de la teoría de cuerdas fue tan lejos que dedujo que un cálculo del impacto de los modos de Kaluza-Klein incluido en dicha teoría fue la «prueba irrefutable» que demostró que nuestra teoría coincidía con una versión de la teoría de cuerdas que sus teóricos habían estudiado ya. Esto concordaba con el adagio chistoso de la ciencia que dice que una teoría nueva pasa por tres etapas antes de ser aceptada: primero es errónea, después es obvia y, finalmente, alguien manifiesta que otro la había desarrollado antes. En este caso, sin embargo, la prueba irrefutable se esfumó cuando los físicos cobraron conciencia de que el cálculo de la teoría de cuerdas era más sutil de lo que habían pensado y de que la respuesta que se suponía que daba la teoría de cuerdas no había sido, de hecho, correcta.

Lo cierto es que la intersección con las investigaciones de la teoría de cuerdas fue fascinante para todos y que ello condujo a nuevas ideas importantes. La gravedad localizada resultó tener fuertes coincidencias con los desarrollos más importantes del momento en la teoría de cuerdas: tanto nuestro trabajo como las investigaciones de los especialistas en teoría de cuerdas hacían intervenir una geometría arqueada de una forma parecida. De hecho, quizá a causa de que nuestra investigación no desafiaba directamente los modelos de la teoría de cuerdas, la comunidad de la teoría de cuerdas aceptó y reconoció la significación de nuestro trabajo antes que la comunidad de los constructores de modelos. Aunque al principio esto había parecido algo accidental, quizá se tratara de un indicio de que estábamos todos en el camino correcto. Y, felizmente, Raman no tuvo problemas después para encontrar trabajo. (Ahora es catedrático en la Universidad Johns Hopkins).

Sin embargo, quedaron algunos escépticos. El modelo preciso que Raman y yo consideramos condujo a cuestiones interesantes que nadie supo responder de buenas a primeras. ¿Dependía la localización de la forma que tuviera el espacio-tiempo a grandes distancias? Cuando la gente intentó encontrar ejemplos del tipo de geometría que Raman y yo habíamos sugerido en las teorías de la supergravedad, la forma de la gravedad lejos de la brana localizadora parecía ser el escollo. Pero ¿esas condiciones eran esenciales? Otra cuestión que queríamos contestar era si el espacio-tiempo parecía necesariamente tetradimensional en todas partes. La gravedad localizada hacía que el universo entero de dimensión cinco se comportara como si la gravedad fuera tetradimensional. ¿Siempre pasaba esto o podía haber algunas regiones que parecieran tetradimensionales y otras que se comportaran de otra manera? ¿Y qué pasa cuando la Brana de la Gravedad no es completamente plana? ¿Funciona igual la localización para una brana con una geometría diferente? Éstas eran algunas de las cuestiones que la teoría de la *gravedad localizada localmente* , que Andreas y yo desarrollamos, podía abordar.

La gravedad localizada localmente

¿Cuántas dimensiones del espacio hay? ¿Lo sabemos realmente? Por ahora, espero que todos estemos de acuerdo en que afirmar que sabemos con seguridad que las dimensiones extras no existen sería extralimitarse. Vemos tres dimensiones del espacio, pero podría haber más que todavía no hemos detectado.

Ahora sabemos que las dimensiones extras podrían estar ocultas, bien porque se encuentran enrolladas y son pequeñas, bien porque el espacio-tiempo está arqueado y la gravedad se halla tan concentrada en una pequeña región que incluso una dimensión infinita resulta invisible. En cualquier caso, ya sean las dimensiones compactas o ya se encuentren localizadas, el espacio-tiempo parecería tetradimensional en todas partes, sin que importe dónde estemos.

Esto podría ser un poco menos obvio en el contexto de la gravedad localizada, en el que la función de probabilidad del gravitón se hace cada vez más pequeña, según uno se adentra en la quinta dimensión. La gravedad se comporta como lo hace en cuatro dimensiones cuando uno está cerca de la brana. Pero ¿qué pasa en los demás sitios?

La respuesta es que en RS2 la influencia de la gravedad tetradimensional es ineludible, se encuentre uno donde se encuentre en la quinta dimensión. Aunque la función de probabilidad del gravitón es más grande en la Brana de la Gravedad, los objetos pueden interactuar entre sí en cualquier parte, intercambiando un gravitón, y, por lo tanto, todos los objetos sentirían la gravedad tetradimensional, independientemente de su localización. La gravedad parece tetradimensional en todas partes porque la función de probabilidad del gravitón nunca es, de hecho, igual a cero: continúa valiendo algo para siempre. En el contexto de la teoría localizada, los objetos que están lejos de una brana tendrían interacciones gravitatorias extremadamente débiles, pero esa gravedad débil se comportaría, no obstante, de un modo tetradimensional. Así, por ejemplo, la ley del cuadrado del inverso de Newton se cumpliría, dondequiera que se encuentre uno en la quinta dimensión.

La función de probabilidad del gravitón, pequeña pero no nula lejos de la Brana de la Gravedad, fue esencial para la solución del problema de la jerarquía que presenté en el capítulo 20. La Brana Débil, localizada lejos de la Brana de la Gravedad en el bulto, siente esa gravedad que parece tetradimensional, aunque lo haga de un modo extraordinariamente débil. Como el agua que, en el ejemplo del aspersor, llega lejos de nuestro jardín, siempre hay algo de agua, aunque no mucha.

Pero supongamos que reflexionamos un poco más y nos preguntamos qué es lo que sabemos con certeza sobre las dimensiones del espacio. No sabemos que el espacio sea en todas partes tridimensional, sino sólo que el espacio que hay *cerca de nosotros* es tridimensional. El espacio parece tener tres dimensiones (y el espacio-tiempo cuatro) a distancias *que podemos ver* . Pero el espacio puede extenderse más allá, por territorios inaccesibles.

Al fin y al cabo, la velocidad de la luz es finita y nuestro universo ha existido sólo una cantidad finita de tiempo. Esto significa que solamente podemos saber algo sobre la región del espacio que nos rodea a una distancia hasta la que la luz haya podido viajar desde el principio del universo. Eso no es infinitamente lejos. Define una región que se conoce como el *horizonte* , la línea divisoria entre la información que es accesible para nosotros y la que no.

Más allá del horizonte, no sabemos nada. El espacio no tiene por qué ser como el nuestro. Periódicamente ponemos al día y revisamos la revolución

copernicana, a medida que conocemos mejor el universo y nos volvemos conscientes de que no en todas partes las cosas han de ser, necesariamente, como vemos que son aquí. Aunque las leyes de la física sean las mismas en todas partes, eso no significa que el escenario en el que se desenvuelven sea el mismo. Podría ser que las branas próximas indujeran en nuestro entorno una ley de fuerza gravitatoria diferente de la que se ve en los demás sitios.

¿Cómo podemos afirmar que conocemos la dimensión del universo que está fuera de nuestro alcance? No habría ninguna contradicción si el universo que hay más allá exhibiera más dimensiones, quizá cinco, quizá diez, quizá más. Pensando en la mera esencia, más que suponiendo que todo, incluso en las regiones inaccesibles, está hecho de espacio-tiempo parecido al nuestro, podemos deducir lo que es realmente fundamental y lo que, en definitiva, es concebible y legítimo.

Lo único que sabemos es que el espacio que experimentamos parece ser tetradimensional. Quizá sea un exceso suponer que todas las demás regiones del universo tienen que ser también tetradimensionales. ¿Por qué un mundo que está extraordinariamente lejos de nosotros, que podría no interactuar en modo alguno con nosotros —o quizá solamente a través de señales gravitatorias extraordinariamente débiles—, tendría que ver la gravedad y el espacio como los vemos nosotros? ¿Por qué no puede tener un tipo de gravedad diferente?

Lo maravilloso es que sí puede. Nuestro mundo de branas podría experimentar tres más una dimensiones, y que no ocurra lo mismo con las regiones externas. Para nuestro asombro, en 2000, Andreas Karch y yo desarrollamos una teoría en la que el espacio parece tetradimensional en la brana o cerca de ella, pero la mayor parte del espacio que hay lejos de la brana parece de dimensión superior. Esta idea está ilustrada esquemáticamente en la figura 90.

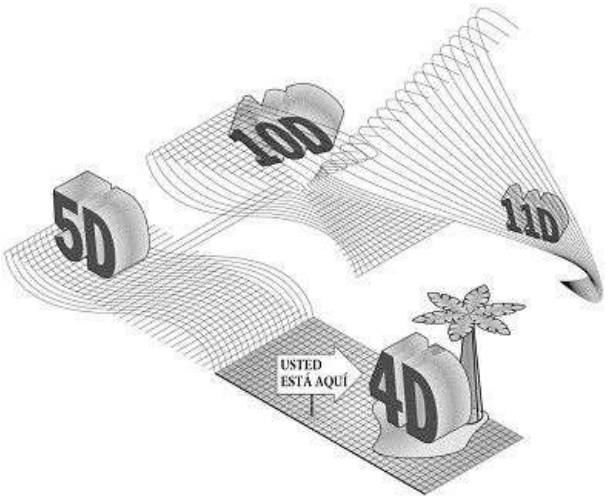


FIGURA 90. Podríamos estar viviendo en una sima tetradimensional en un espacio de dimensión superior.

Llamamos a nuestra teoría *gravedad localizada localmente* porque la localización produce un gravitón que comunica las interacciones gravitatorias tetradimensionales sólo en una región próxima, y el resto del espacio no parece tetradimensional. El mundo tetradimensional[136] existe sólo en una «isla» gravitatoria. La dimensionalidad que vemos depende de nuestra localización en el bulto de dimensión cinco.

Para comprender la localización local, volvamos a los patos del estanque. Quizá el lector no haya estado de acuerdo conmigo cuando dije que el tamaño del estanque no tenía importancia. Si el estanque fuera realmente inmenso, los patos de la otra orilla del estanque no se congregarían con los patos de nuestra orilla. De hecho, sería muy extraño que pudiéramos influir en los patos que están lejísimos. Los patos alejados no verían el pan y, ajenos a nosotros, seguirían nadando en una parte remota del lago.

La idea básica que yace bajo la gravedad localizada localmente es muy parecida. La localización de la gravedad en una brana no debería depender necesariamente de lo que esté ocurriendo en regiones distantes del espacio. Aunque el modelo que estudié con Raman tenía un gravitón cuya función de probabilidad decaía exponencialmente pero nunca era cero del todo —y en él la gravedad tetradimensional se sentiría en todas partes— el comportamiento de la gravedad en regiones lejanas no sería esencial para determinar si existe o no una gravedad tetradimensional en el entorno de la brana.

Ésta es la esencia de la gravedad localizada localmente. Un gravitón puede estar localizado y generar una fuerza gravitatoria tetradimensional en el entorno de una brana sin afectar a la fuerza gravitatoria a grandes distancias. La gravedad tetradimensional puede ser un fenómeno completamente local, relevante sólo en una porción del espacio.

Irónicamente, Andreas, que es un físico excelente y muy buen chico, había empezado a pensar en el modelo que probó que esto era posible cuando estaba trabajando en un proyecto de investigación con uno de mis antiguos colegas del MIT, quien había intentado poner a prueba el trabajo de Raman y mío. (Felizmente para nosotros, su colaboración produjo un trabajo magnífico que probaba que nuestra teoría era correcta). En el curso de su proyecto, Andreas identificó un modelo que estaba íntimamente relacionado con el que Raman y yo habíamos desarrollado, pero que tenía algunas propiedades muy peculiares. Cuando Andreas visitó Princeton, vino a hablar conmigo sobre este modelo. Finalmente concluimos que dicho modelo tiene algunas implicaciones sorprendentes. Al principio, Andreas y yo colaboramos a través del correo electrónico y en las visitas que cada uno hacía a la institución del otro, y después, más fácilmente, cuando volví a Boston. Y lo que descubrimos fue muy notable.

Este modelo era muy parecido al que había estudiado con Raman: tenía una única brana en un espacio arqueado de dimensión cinco. Pero la diferencia en este caso radicaba en que la brana no era exactamente plana. Esto era así porque portaba una pequeña cantidad de energía negativa del vacío. En la relatividad general, como hemos visto, no sólo la energía relativa es significativa, sino también la cantidad total de energía. La energía total le

dice al espacio-tiempo cómo debe curvarse. Por ejemplo, la energía constante negativa en el espacio-tiempo de dimensión cinco produce el espacio-tiempo arqueado que hemos estado discutiendo en los últimos capítulos. Sin embargo, en ese caso las branas mismas eran planas. Aquí, la energía negativa que hay en la brana hace que la brana misma esté ligeramente curvada.

La energía negativa de la brana conduce a una teoría todavía más interesante. Sin embargo, a nosotros no nos interesaba la energía negativa en sí misma: si vivimos en una brana, nuestra brana tendría, de hecho, una pequeña energía positiva para concordar con las observaciones. Andreas y yo decidimos estudiar este modelo únicamente por sus implicaciones fascinantes desde el punto de vista de las dimensiones.

Para comprender lo que descubrimos, volvamos brevemente a un modelo con dos branas, sabiendo que después suprimiremos la segunda de ellas. Cuando la segunda brana estaba suficientemente lejos, descubrimos que había dos gravitones *diferentes* , cada uno localizado cerca de una de las branas. Cada una de las funciones de probabilidad del gravitón se disparaba cerca de una de las dos branas y decrecía exponencialmente muy rápido cuando uno se alejaba.

Ninguno de los gravitones era el responsable de la gravedad tetradimensional en el espacio entero. Ambos producían la gravedad tetradimensional solamente en la región adyacente a la brana en la que estaban localizados. Las gravedades que se experimentaban en las distintas branas eran diferentes. Podían incluso tener intensidades muy diferentes. Y los objetos de una brana no interactuaban gravitatoriamente con los objetos de la otra.

El modelo con dos branas muy separadas puede compararse con la situación en la que alguien está en la orilla opuesta, que está muy lejos, alimenta también a los patos. Esos patos podrían incluso ser de diferente tipo; quizá nosotros atraemos a los somormujos, mientras que en la orilla opuesta esa persona atrae a los patos joyuyos. En este caso, habría una segunda concentración de patos a lo largo de la orilla opuesta, análoga a la segunda función de probabilidad del gravitón, que está localizada cerca de la segunda brana.

La aparición de dos partículas diferentes que se parecen ambas al gravitón tetradimensional fue una gran sorpresa para nosotros. Se suponía que los principios físicos generales aseguraban que solamente hay una teoría de la gravedad. Y, en efecto, sólo hay una única teoría de la gravedad de dimensión cinco. Sin embargo, resulta que el espacio-tiempo de dimensión cinco contiene dos partículas distintas, cada una de las cuales transmite una fuerza gravitatoria que actúa como si fuera tetradimensional, cada una en una región distinta del espacio de dimensión cinco. Parece que las dos diferentes regiones del espacio contienen ambas una gravedad tetradimensional, pero el gravitón que transmite la fuerza gravitatoria tetradimensional en esas teorías es diferente.

Pero había también una segunda sorpresa. Según la relatividad general, el gravitón no tiene masa. Como el fotón, viajaría a la velocidad de la luz. Pero

Andreas y yo descubrimos que uno de los dos gravitones tenía una masa no nula y no viajaba a la velocidad de la luz. Esto era realmente sorprendente, pero también turbador. La bibliografía de la física decía que ningún gravitón que tuviera masa podría producir nunca una fuerza gravitatoria que concordara con todas las observaciones. De hecho, como discutimos en el caso de un bosón gauge pesado en el capítulo 10, un gravitón con masa tendría más polarizaciones que uno sin masa. Y los físicos demostraron, comparando las mediciones de procesos gravitatorios diferentes, que nunca se había visto ningún efecto de ninguna polarización extra del gravitón. Esto nos tuvo perplejos durante un tiempo.

No obstante, el modelo fue más listo que la sabiduría convencional. Una vez descubierto este modelo, Massimo Porrati, un físico de la Universidad de Nueva York, y Ian Kogan, Stavros Mousopoulos y Antonios Papazouglou, de la Universidad de Oxford, descubrieron que en ciertos casos el gravitón podía, de hecho, tener masa y, sin embargo, producir predicciones gravitatorias correctas. Analizaron detalles técnicos de la teoría y demostraron la brecha lógica que había en el argumento que decía que un gravitón con masa no concordaría con los procesos gravitatorios observados.

Y el modelo tiene consecuencias todavía más raras. Pensemos ahora qué pasa si eliminamos la segunda brana. Las leyes físicas seguirán pareciendo tetradimensionales en la brana que queda, la Brana de la Gravedad, a pesar de la dimensión extra infinita. La gravedad que hay cerca de la Brana de la Gravedad es virtualmente idéntica a la del modelo RS2. A las cosas de la Brana de la Gravedad, el único gravitón que hay les transmite la fuerza de la gravedad, y esta gravedad parece ser tetradimensional.

Sin embargo, hay una distinción importante entre este modelo y RS2. En este modelo, que es diferente sólo por la existencia de energía negativa en la brana, el gravitón que está localizado cerca de la brana no domina la fuerza gravitatoria sobre el espacio entero. El gravitón no interactúa con los objetos que hay en cualquier punto del espacio; produce la gravedad tetradimensional solamente en la brana o cerca de ella. Lejos de la brana, ¡la gravedad ya no parece tetradimensional[M38] !

Podría parecer que esto contradice lo que he dicho antes, a saber: que la gravedad debe existir en todas partes en el bulto de dimensión superior. Ésta no es una afirmación falsa; la gravedad de dimensión cinco está en todas partes. Sin embargo, al contrario de lo que pasaba en las teorías extradimensionales que hemos considerado hasta ahora, en las que la física siempre tiene una interpretación tetradimensional, esta teoría parece tetradimensional sólo para las cosas que están en la brana o cerca de ella. La ley de la fuerza gravitatoria de Newton se aplica sólo en la brana o cerca de ella. En todas las demás partes, la fuerza gravitatoria es de dimensión cinco.

En este contexto, la gravedad tetradimensional es un fenómeno completamente local, que se experimenta sólo en el entorno de la brana. La dimensionalidad que deduciríamos del comportamiento de la gravedad dependería de dónde estamos en la quinta dimensión. Si este modelo es correcto, tendríamos que vivir en la brana para sentir la gravedad tetradimensional. Si estuviéramos en cualquier otro sitio, la gravedad

parecería de dimensión cinco. La brana es un rincón tetradimensional para la gravedad: una isla de gravedad tetradimensional.

Por supuesto, no sabemos todavía si la gravedad localizada localmente se da o no en el mundo real. Ni siquiera sabemos si existen las dimensiones extras, ni, de existir, qué ha sido de ellas. Sin embargo, si la teoría de cuerdas es correcta, hay dimensiones extras. Y si esto es así, podrían estar ocultas por la compactación o por la localización (o por la localización local), o por una combinación de ambas. Muchos especialistas de la teoría de cuerdas siguen pensando que la compactación es la respuesta, pero como hay tantos enigmas en la gravedad que surge de la teoría de cuerdas, nadie puede estar seguro. Yo veo la localización como una nueva opción. Cuando la gravedad está localizada, las leyes físicas se comportan como si las dimensiones no estuvieran allí, al igual que en el caso de las dimensiones enrolladas. La gravedad localizada complementa, por lo tanto, nuestra caja de herramientas para la construcción de modelos e incrementa las probabilidades de descubrir una encarnación de la teoría de cuerdas que concuerde con las observaciones.

Me gusta cómo la gravedad localizada localmente se concentra en lo que podemos verificar de manera explícita. Dice solamente que el universo tiene que parecer tetradimensional allí donde podemos verificarlo, y no dice que deba *ser* tetradimensional. Nuestras tres dimensiones espaciales podrían ser un mero accidente de nuestra localización. Esta idea tiene que ser explorada todavía a fondo. Pero no está fuera de lugar pensar que podría parecer que diferentes regiones del espacio tienen un número diferente de dimensiones. Al fin y al cabo, cada vez que sondeamos distancias más cortas que las que habíamos visto antes se descubre física nueva. Quizá esto mismo sea cierto cuando se trata de largas distancias: si vivimos en una brana, ¿quién sabe lo que hay más allá de ella?

LO QUE ES NUEVO:

•La gravedad localizada es un fenómeno local. No depende de las regiones lejanas del espacio-tiempo.

•La gravedad puede comportarse como si el mundo tuviera diferentes dimensiones en diferentes regiones, ya que un gravitón localizado no se extiende necesariamente sobre todo el espacio.

•Podríamos estar viviendo en un recodo aislado del espacio, el cual parece tetradimensional.

24

DIMENSIONES EXTRAS:

¿ESTAMOS DENTRO O FUERA?

But I still haven’t found what I’m looking for.

[Pero todavía no he encontrado lo que busco].

U2

Los sueños de Atenea sobre Unidilandia, branas y cinco dimensiones fueron pasando de generación en generación. Cuando Ike XLII oyó hablar de ellos, quiso comprobar si había algo de verdad en todo eso. Así que tomó su Alicxvr y lo sometió a una escala muy pequeña, no hasta el punto de que aparecieran las cuerdas, pero sí lo suficientemente pequeña como para poder comprobar si hay o no una quinta dimensión. El Alicxvr respondió la cuestión de Ike enviándolo a un mundo de dimensión cinco.

Pero Ike no estaba satisfecho del todo. Recordaba las cosas raras que habían pasado cuando se puso a jugar con las opciones de hiperpropulsión. Así pues, decidió accionar de nuevo la palanca correspondiente, y otra vez todo cambió drásticamente. Ike fue incapaz de reconocer ni un solo objeto que le resultara familiar. Únicamente pudo asegurar que la quinta dimensión había desaparecido.

Ike estaba desconcertado, de modo que buscó en la red espacial qué se decía de las «dimensiones». Visitó numerosos sitios que pudo reconocer entre los molestos sitios basura, pero pronto vio que tendría que afinar la búsqueda. Cuando comprobó que ni aun así encontraba nada definitivo, no tuvo más remedio que aceptar que le llevaría tiempo comprender el origen fundamental de las dimensiones. Y decidió entonces interesarse por los viajes en el tiempo.

La física ha entrado en una era realmente notable. Ideas que una vez formaron parte del reino de la ciencia ficción pasan ahora a integrar nuestro dominio teórico, y quizá incluso experimental. Descubrimientos teóricos completamente nuevos sobre las dimensiones extras han cambiado irreversiblemente el modo en que los físicos de partículas, los astrofísicos y los cosmólogos piensan ahora sobre el mundo. El número total y el ritmo de los descubrimientos nos dicen que solamente hemos arañado la superficie de las maravillosas posibilidades que nos están esperando. Las ideas han cobrado vida propia.

No obstante, hay muchas cuestiones que esperan una respuesta completa y aún falta mucho para que nuestro viaje termine. Los físicos de partículas todavía quieren saber por qué vemos las fuerzas concretas que vemos y si hay

o no alguna más. ¿Cuál es el origen de las masas y de las propiedades de las partículas familiares? Queremos saber también si la teoría de cuerdas es correcta o incorrecta. Y, si es correcta, ¿cómo se conecta con nuestro mundo?

Observaciones recientes del cosmos apuntan hacia otros misterios que queremos abordar. ¿Qué es lo que compone la mayor parte de la energía y de la materia del universo? ¿Hubo una breve fase de expansión explosiva al principio de la evolución del universo? Y si fue así, ¿qué fue lo que la causó? Asimismo, todo el mundo quiere saber cómo era el universo cuando nació.

Ahora sabemos que la gravedad puede comportarse de modo diferente en diferentes escalas de distancia. A distancias muy cortas, sólo una teoría cuántica de la gravedad, como la teoría de cuerdas, podrá describir la gravedad. En escalas más grandes, la relatividad general funciona muy bien, pero algunas observaciones recientes a lo largo del universo a distancias enormes plantean enigmas cosmológicos, como, por ejemplo, qué es lo que acelera su expansión. Y a distancias todavía más grandes, alcanzamos el horizonte cosmológico más allá del cual no sabemos nada.

Uno de los aspectos intrigantes de las teorías extradimensionales es que tienen, naturalmente, diferentes consecuencias a diferentes escalas. En dichas teorías, a distancias más pequeñas que las dimensiones enrolladas o donde la curvatura es demasiado pequeña para tener efecto, la gravedad exhibe un comportamiento diferente del que presenta a distancias más grandes, donde las dimensiones podrían ser invisibles o donde el arqueo puede ser importante. Esto nos da una razón para creer que las dimensiones extras podrían, finalmente, arrojar luz sobre algunas de las propiedades misteriosas del universo. Si vivimos en un mundo multidimensional, no podremos, ciertamente, hacer caso omiso de sus consecuencias cosmológicas. Ya se han hecho algunas investigaciones en este dominio, pero estoy segura de que son muchos más los resultados interesantes que nos esperan.

¿Hacia dónde pienso que va a dirigirse la física a partir de ahora? Hay demasiadas posibilidades para poder enumerarlas todas. Pero permítaseme describir algunas observaciones intrigantes que sugieren que nos pueden estar esperando más sorpresas teóricas importantes, que acaso se acerquen a su solución en un breve plazo. Estos misterios se centran en una cuestión que, en este punto, podría parecer chocante, a saber:

¿Qué son las dimensiones, después de todo?

¿Cómo puedo plantear esta pregunta a estas alturas del partido? He dedicado gran parte de este libro a discutir el significado de las dimensiones y algunas de las implicaciones potenciales de los hipotéticos mundos extradimensionales. Pero ahora que he dicho lo que comprendemos sobre las dimensiones, permítaseme volver brevemente sobre esta cuestión.

¿Qué significa, realmente, el número de dimensiones? Sabemos que el número de dimensiones se define como el número de cantidades que necesitamos para localizar un punto en el espacio. Pero también presenté en los capítulos 15 y 16 ejemplos que muestran que las teorías de dimensión diez tienen a veces las mismas consecuencias físicas que las teorías de dimensión

once.

Esta dualidad sugiere que nuestra noción de dimensión no es tan firme como parece: hay una plasticidad en la definición que elude la terminología convencional. Las descripciones duales de una única teoría nos dicen que no tiene por qué haber una formulación única que sea necesariamente la mejor. La formulación e incluso el número de dimensiones en la mejor descripción podría depender de la intensidad de los acoplamientos entre cuerdas, por ejemplo. Como no siempre hay una única teoría que sea la mejor descripción, la cuestión del número de dimensiones no siempre tiene una respuesta sencilla. Esta ambigüedad en el significado de las dimensiones y el nacimiento aparente de una dimensión adicional en las teorías con interacciones fuertes son algunas de las observaciones de la física teórica más importantes de la última década. Hagamos ahora una lista de algunos otros intrigantes descubrimientos teóricos recientes que indican que la noción de dimensión es algo más borrosa de lo que, quizá, nos gustaría creer.

I. Geometría arqueada y dualidad

En los capítulos 20 y 22 expliqué algunas de las consecuencias de la geometría arqueada del espacio-tiempo que Raman Sundrum y yo desarrollamos. En esa geometría, las masas y los tamaños de los objetos dependen de su localización a lo largo de la quinta dimensión, y, además, la gravedad está localizada en el entorno de una brana. Pero hay todavía un rasgo más asombroso de este espacio-tiempo arqueado, conocido técnicamente como espacio anti De Sitter, del que tengo pendiente hablar; este rasgo conduce a nuevas cuestiones sobre la dimensionalidad.

La notable propiedad del espacio anti De Sitter, de la que teníamos pendiente hablar, es la existencia de una teoría tetradimensional dual. Hay pistas teóricas que nos dicen que todo lo que ocurre en el espacio anti De Sitter de dimensión cinco puede describirse usando un marco dual tetradimensional en el que hay fuerzas extraordinariamente intensas que tienen propiedades especiales. Según esta misteriosa dualidad, todo en la teoría de dimensión cinco tiene un correlato análogo en la teoría tetradimensional. Y viceversa.

Aunque el razonamiento matemático nos dice que una teoría del espacio anti De Sitter de dimensión cinco es equivalente a una de dimensión cuatro, no siempre conocemos las partículas precisas que contiene esa teoría dual tetradimensional. Sin embargo, Juan Maldacena, un especialista de la teoría de cuerdas, nacido en Argentina y que trabaja ahora en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, desencadenó, en 1997, un ataque de fiebre en la teoría de cuerdas cuando dedujo un ejemplo explícito de una dualidad análoga en la teoría de cuerdas. Descubrió que una versión de la teoría de cuerdas con un gran número de branas D en las que las cuerdas interactúan fuertemente puede describirse o bien con una teoría cuántica de campos tetradimensional, o bien con una teoría gravitatoria de dimensión diez, en la que cinco de las diez dimensiones están enrolladas y las otras cinco están en el espacio anti De Sitter.

¿Cómo pueden una teoría tetradimensional y una de dimensión cinco (o diez) tener las mismas consecuencias físicas? ¿Cuál es el objeto análogo en cuatro

dimensiones de un objeto que viaja en la quinta dimensión, por ejemplo? La respuesta es que un objeto que se mueve a lo largo de la quinta dimensión aparecería en la teoría dual tetradimensional como un objeto que crece o que se encoge. Esto es exactamente igual que la sombra de Atenea sobre la Brana de la Gravedad, que crecía a medida que ella se alejaba de allí a través de la quinta dimensión. Además, los objetos en movimiento que se cruzan a lo largo de la quinta dimensión corresponden a objetos que crecen, encogen y se superponen en cuatro dimensiones.

Una vez que se introducen las branas, las consecuencias de la dualidad son todavía más extrañas. Por ejemplo, el espacio anti De Sitter de dimensión cinco con gravedad pero sin branas es equivalente a una teoría tetradimensional sin gravedad. Sin embargo, una vez incluida una brana en la teoría de dimensión cinco, como hicimos Raman y yo, la teoría tetradimensional equivalente contiene, de repente, la gravedad.

¿Implica esta gravedad que estaba haciendo trampa cuando dije que las geometrías arqueadas eran teorías de dimensión superior? La respuesta es un no rotundo. La dualidad es intrigante, pero realmente no cambia nada de lo que he dicho. Aunque alguien encontrara la teoría tetradimensional dual precisa, dicha teoría sería extraordinariamente difícil de estudiar. Ha de contener un número enorme de partículas e interacciones tan extraordinariamente fuertes que la teoría de las perturbaciones no sería válida (véase el capítulo 15).

Las teorías en las que los objetos interactúan fuertemente son casi imposibles de interpretar sin una descripción opcional con interacciones débiles. Y en este caso, esa descripción tratable es la teoría de dimensión cinco. Sólo la teoría de dimensión cinco cuenta con una formulación lo suficientemente sencilla como para usarla en los cálculos, de modo que tiene sentido pensar en la teoría en términos de dimensión cinco. No obstante, aunque la teoría de dimensión cinco es más tratable, la dualidad sigue haciéndome cavilar sobre el auténtico significado de la palabra *dimensiones* . Sabemos que el número de dimensiones debería ser el número de cantidades que necesitamos para especificar la localización de un objeto. Pero ¿estamos siempre seguros de que sabemos qué cantidades contar?

II. T-dualidad

Otra razón para cuestionarse el significado de las dimensiones es una equivalencia que hay entre dos geometrías superficialmente diferentes, que se conoce como *T-dualidad* . Antes de descubrir las dualidades que he discutido, los especialistas de la teoría de cuerdas descubrieron la T-dualidad, que intercambia un espacio con una dimensión enrollada diminuta y otro espacio con una dimensión enrollada enorme[M39] . Por extraño que parezca, en la teoría de cuerdas las dimensiones enrolladas extraordinariamente pequeñas y las extraordinariamente grandes producen las mismas consecuencias físicas. Un volumen diminuto de espacio enrollado tiene las mismas consecuencias físicas que uno extraordinariamente grande.

La T-dualidad aparece en la teoría de cuerdas con dimensiones enrolladas

porque hay dos tipos diferentes de cuerdas cerradas en el espacio compactado en un círculo, y estas dos cuerdas se intercambian entre sí cuando un espacio con una dimensión enrollada diminuta es sustituido por un espacio con una dimensión enrollada grande. El primer tipo de cuerda cerrada oscila arriba y abajo según rodea la dimensión cerrada, de modo parecido a lo que hacían las partículas de Kaluza-Klein que vimos en el capítulo 18. El otro tipo da vueltas alrededor de la dimensión enrollada. Puede dar una vuelta, dos vueltas o cualquier número de vueltas. Y las operaciones de la T-dualidad, que intercambian un espacio enrollado pequeño y uno grande, intercambian asimismo estos dos tipos de cuerdas.

De hecho, la T-dualidad fue la primera pista de que tenían que existir las branas: sin ellas, las cuerdas abiertas no habrían tenido versiones análogas en la teoría dual. Pero si la T-dualidad es válida y una dimensión enrollada minúscula produce las mismas consecuencias físicas que una dimensión enrollada enorme, eso significaría, una vez más, que nuestra noción de «dimensión» es inadecuada.

Esto es así porque, si imaginamos que hacemos infinitamente grande el radio de una dimensión enrollada, la dimensión enrollada T-dual sería un círculo de radio cero: no habría círculo alguno. Esto es, una dimensión infinita en una teoría es T-dual de una teoría con una dimensión menos (ya que un círculo de radio cero no cuenta como dimensión). Así que la T-dualidad también demuestra que dos espacios aparentemente diferentes podrían dar la impresión de tener un número diferente de dimensiones grandes extendidas y, sin embargo, hacer ambos predicciones físicas idénticas. Otra vez el significado de la dimensión es ambiguo.

III. Simetría especular

La T-dualidad se produce cuando una dimensión está enrollada en un círculo. Pero una simetría todavía más rara que la T-dualidad es la *simetría especular* , que a veces aparece en la teoría de cuerdas cuando hay seis dimensiones enrolladas formando una variedad de Calabi-Yau. La simetría especular dice que seis dimensiones pueden enrollarse para formar dos variedades de Calabi-Yau muy diferentes y, sin embargo, la teoría tetradimensional a largas distancias resultante puede ser la misma. La variedad especular de una variedad de Calabi-Yau podría parecer completamente diferente: podría tener diferente forma, tamaño, contorsión e incluso un número diferente de agujeros[137] . Sin embargo, cuando una variedad de Calabi-Yau tiene una variedad especular, la teoría física en la que seis de las dimensiones están enrolladas en una u otra de las dos variedades, será la misma. Así que, también en el caso de las variedades especulares, dos geometrías aparentemente diferentes producen las mismas predicciones. De nuevo el espacio-tiempo tiene propiedades misteriosas.

IV. Teoría de matrices

La teoría de matrices, una herramienta para estudiar la teoría de cuerdas, proporciona pistas todavía más misteriosas sobre las dimensiones. Superficialmente, la teoría de matrices aparenta ser una teoría cuántica que

describe el comportamiento y las interacciones de las branas D0 (branas como puntos) que se mueven en diez dimensiones. Pero aunque la teoría no contenga explícitamente la gravedad, las branas D0 actúan como gravitones. Así que la teoría acaba teniendo interacciones gravitatorias, aunque el gravitón esté aparentemente ausente.

Además, la teoría de las branas D0 imita a la supergravedad en once dimensiones, no en diez dimensiones. Esto es, parece que el modelo matricial contiene una supergravedad con una dimensión más que la que aparentemente describe la teoría original. Este curioso comportamiento (acompañado de otros indicios matemáticos) ha llevado a los especialistas en la teoría de cuerdas a pensar que la teoría de matrices es equivalente a la teoría M, que también contiene una supergravedad de dimensión once.

Un rasgo especialmente extravagante de la teoría de matrices es la observación que hizo Edward Witten sobre el hecho de que, cuando las branas D0 se aproximan mucho, ya no podemos saber exactamente dónde están. «De modo que para distancias pequeñas no hay ninguna representación del espacio de configuración en términos de las posiciones ordinarias»[138] , como señalaron en su artículo Tom Banks, Willy Fischler, Steve Shenker y Lenny Susskind —los creadores de la teoría de matrices—. Esto es, la localización de una brana D0 ya no es una magnitud matemática con sentido cuando intentamos definirla con demasiada precisión.

Aunque estas extrañas propiedades tornan sumamente atractivo el estudio de la teoría de matrices, actualmente resulta muy difícil utilizarla para hacer cálculos. El problema es que —como casi todas las teorías que contienen objetos con interacciones fuertes— nadie ha encontrado todavía un medio de resolver muchas de las cuestiones más importantes que nos ayudarán a comprender mejor qué es lo que está pasando en realidad. En todo caso, la teoría de matrices es una razón más para preguntarse qué es lo que significan, en realidad, las dimensiones, ya que en esta teoría surge una dimensión extra y además desaparecen las dimensiones cuando las branas D0 se acercan demasiado.

¿Qué podemos pensar?

Aunque los físicos han demostrado estas equivalencias misteriosas entre teorías con un número diferente de dimensiones, evidentemente nos falta todavía una visión de conjunto. ¿Sabemos con seguridad que estas dualidades son válidas, y, si lo son, qué es lo que nos dicen sobre la naturaleza del espacio y del tiempo? Además, nadie sabe cuál sería la mejor descripción cuando una dimensión no es ni demasiado grande ni demasiado pequeña (en relación con la extraordinariamente diminuta longitud de la escala de Planck). Quizá nuestra noción del espacio-tiempo se hunde por completo cuando tratamos de describir algo tan pequeño.

Una de las razones más sólidas para creer que nuestra descripción del espacio-tiempo es inadecuada para la longitud de la escala de Planck consiste en que no conocemos ningún medio, ni siquiera en teoría, para examinar una distancia tan corta. Sabemos gracias a la mecánica cuántica que se precisa

mucha energía para investigar escalas de longitud pequeña. Pero cuando ponemos demasiada energía en una región tan pequeña como la que indica la longitud de la escala de Planck, 10^{-33} cm, obtenemos un agujero negro. Y entonces no hay manera de saber qué pasa dentro. Toda esa información queda atrapada dentro del horizonte de eventos del agujero negro.

Y encima, aunque pudiéramos inyectar más energía en esta región minúscula, no conseguiríamos nada. Una vez que hemos puesto toda esa cantidad de energía dentro de la longitud de la escala de Planck, no podemos añadir más sin que la región se expanda. Esto es, el agujero negro crecería si añadiéramos energía. Así que en lugar de conseguir una bonita sonda diminuta para estudiar esa distancia, inflaríamos esa región, convirtiéndola en algo más grande, y no llegaríamos nunca a estudiarla cuando es pequeña. Sería como si, en un museo, tratásemos de estudiar artefactos delicados con un rayo láser fino que, en vez de iluminarlos, los quemara. Incluso en los experimentos puramente mentales de la física nunca se ven regiones tan pequeñas como la longitud de la escala de Planck. Las reglas de la física que conocemos se hunden antes de llegar hasta allí. Es casi seguro que en algún momento, llegando al entorno de la escala de Planck, las nociones convencionales de espacio-tiempo dejan de ser válidas.

Estos hechos tan extraños están pidiendo a gritos una explicación más profunda. Probablemente, una de las lecciones más importantes que nos dejan los descubrimientos chocantes de la última década sea que el espacio y el tiempo tienen descripciones más fundamentales. Ed Witten resumió sucintamente el problema cuando dijo que «el espacio y el tiempo pueden tener los días contados». Muchos especialistas de la teoría de cuerdas están de acuerdo con esta visión. Nathan Seiberg afirmó: «Estoy casi seguro de que el espacio y el tiempo son ilusiones»; y David Gross imagina que, «Muy probablemente, el espacio y quizá también el tiempo tengan componentes; podría resultar que el espacio y el tiempo fueran propiedades que surgen en una teoría con un aspecto muy diferente»[139] . Por desgracia, nadie tiene todavía ninguna idea sobre cuál resultará ser la naturaleza de esta descripción más fundamental del espacio-tiempo. Pero alcanzar una comprensión más profunda de la naturaleza fundamental del espacio y del tiempo sigue siendo, claramente, uno de los desafíos más grandes e intrigantes a los que se enfrentarán los físicos en los años venideros.

25

CONCLUSIÓN (INCONCLUSA)

It’s the end of the world as we know it

(and I feel fine).

[Es el fin del mundo tal y como lo conocemos | (y me siento bien)].

REM

Ícaro Rushmore XLII se valió de su máquina del tiempo para visitar el pasado y avisar a Ícaro III del desastre que le esperaba si seguía conduciendo su Porsche. Ike III quedó tan aterrado por el visitante del futuro que hizo caso de su advertencia. Cambió su Porsche por un Fiat y a partir de entonces llevó una vida más plena, satisfactoria y calmada.

Atenea estaba eufórica por haber recuperado a su hermano y Dieter, feliz de ver a su amigo, aunque ambos se sentían confusos porque les parecía que Ike no se había ido nunca. Atenea y Dieter eran conscientes de que el viaje en el tiempo que Ike les había contado era pura ficción. Ni siquiera en los sueños viajaba el Gato hacia atrás en el tiempo, ni llegaba el Conejo a una parada con dimensiones extras del tiempo; el detective cuántico rechazó incluso la contemplación de un comportamiento tan extraño del tiempo. Pero Atenea y Dieter preferían los finales felices. Así que dejaron en suspenso su incredulidad y, a pesar de todo, aceptaron la fantástica historia de Ike.

A pesar de los impresionantes desarrollos de la física en estos últimos años, todavía no sabemos cómo aprovechar la fuerza de la gravedad o cómo teletransportar objetos por el espacio, y probablemente sea muy pronto para invertir dinero en propiedades que estén en dimensiones extras[M40] . Y dado que ignoramos el modo de conectar universos por los cuales pudiéramos ir y venir en el tiempo con el universo en el que vivimos, nadie sabe construir una máquina del tiempo, y, con toda probabilidad, eso seguirá siendo así en el futuro próximo (o en el pasado).

Pero aunque ideas como éstas sigan estando en el reino de la ciencia ficción, vivimos en un universo maravilloso y misterioso. Nuestro propósito es averiguar cómo encajan sus piezas y cómo han ido evolucionando hasta llegar a su estado actual. ¿Cuáles son las conexiones que todavía no hemos descubierto? ¿Cuáles son las respuestas a cuestiones como las que he planteado en el capítulo anterior?

Aunque todavía tenemos que entender el origen último de la materia a su nivel más profundo, espero haber convencido al lector de que no comprendemos muchos aspectos de su naturaleza fundamental a las escalas

de distancia que hemos estudiado experimentalmente. Y aunque no conozcamos los elementos más básicos del espacio-tiempo, comprendemos sus propiedades para distancias muy distintas de la longitud de la escala de Planck. En estos dominios podemos aplicar los principios físicos que entendemos y deducir los tipos de consecuencias que he descrito. Hemos encontrado muchos rasgos inesperados de las dimensiones extras y de las branas, y esos rasgos podrían desempeñar un papel crucial en la resolución de algunos enigmas de nuestro universo. Las dimensiones extras nos han abierto los ojos y la imaginación ante nuevas posibilidades asombrosas. Ahora sabemos que pueden aparecer situaciones extradimensionales de cualquier número de formas y tamaños. Podrían tener dimensiones extras arqueadas, o acaso dimensiones extras grandes, podrían contener una brana, o dos; podrían contener partículas en el bulto y otras partículas confinadas en branas. El cosmos podría ser más grande, rico y variado de lo que hemos imaginado.

¿Cuáles de estas ideas —si acaso alguna de ellas— describen el mundo real? Tendremos que esperar a que el mundo real nos lo diga. Lo fantástico es que probablemente lo hará. Una de las propiedades más fascinantes de algunos de los modelos extradimensionales que he descrito es que tienen consecuencias experimentales. Es imposible exagerar la importancia de este hecho notable. Los modelos extradimensionales —con nuevas propiedades que tal vez habríamos creído imposibles o invisibles— podrían tener consecuencias que acaso estaríamos en condiciones de ver. Y de estas consecuencias podríamos ser capaces de deducir la existencia de dimensiones extras. Si lo hacemos, nuestra visión del universo quedará alterada irrevocablemente.

Podría haber pruebas del espacio-tiempo extradimensional en la astrofísica o en la cosmología. Los físicos están ahora desarrollando teorías detalladas de los agujeros negros en los mundos extradimensionales y han descubierto que, aunque sus propiedades son análogas a las que tienen en cuatro dimensiones, hay diferencias sutiles. Las propiedades de los agujeros negros extradimensionales podrían ser lo suficientemente características como para permitirnos discernir diferencias reconocibles.

Las observaciones cosmológicas podrían también, en definitiva, decirnos más sobre la estructura del espacio-tiempo. Las observaciones de hoy sondean el aspecto que tuvo el universo hace miles de millones de años. Muchas concuerdan con las predicciones, pero quedan algunas cuestiones importantes. Si vivimos en un universo extradimensional, éste ha debido de ser muy diferente en tiempos más tempranos. Y algunas de esas diferencias podrían ayudar a explicar aspectos desconcertantes de las observaciones. Los físicos están ahora estudiando las implicaciones de las dimensiones extras en cosmología. Podríamos descubrir materia oscura oculta en otras branas o energía cosmológica almacenada en objetos ocultos de dimensión superior.

Pero una cosa es cierta. En los próximos cinco años, el Gran Acelerador de Hadrones del CERN se pondrá en marcha y sondeará regiones físicas que nadie ha observado hasta ahora. Mis colegas y yo estamos esperando con impaciencia ese día. El LHC es una gran apuesta: los científicos no podemos hacer más. Los experimentos en el LHC descubrirán casi con seguridad partículas cuyas propiedades nos darán nuevas ideas sobre la física que hay

más allá del modelo estándar. Lo atractivo es que nadie sabe todavía cuáles serán esas nuevas partículas.

Durante el tiempo que he vivido dedicada a la física, los únicos descubrimientos de partículas nuevas que se han hecho han correspondido a partículas que esperábamos encontrar con casi una total seguridad gracias a consideraciones teóricas. Sin el ánimo de minimizar esos descubrimientos —que fueron logros impresionantes—, hay que decir que descubrir algo auténticamente nuevo y desconocido será mucho más apasionante. Hasta que se ponga en marcha el LHC, nadie puede estar realmente seguro de dónde merece la pena concentrar los esfuerzos. Los resultados obtenidos mediante el LHC probablemente cambiarán nuestra manera de ver el mundo.

El LHC tendrá energía suficiente para producir los nuevos tipos de partículas que prometen ser tan reveladores. Estas partículas podrían resultar ser supercompañeras u otras partículas que predicen los modelos extradimensionales. Pero podrían ser también partículas de Kaluza-Klein, o sea partículas que atraviesan las dimensiones extras. El hecho de que veamos estas partículas KK y el momento en que eso suceda dependerá enteramente del tamaño y de la forma del cosmos en el que vivimos. ¿Vivimos en un universo multidimensional? ¿Y la forma o el tamaño de ese universo hará que sean visibles las partículas KK?

Todos los modelos que abordan el problema de la jerarquía tienen consecuencias visibles en la escala débil. Las firmas de la geometría arqueada que aborda el problema de la jerarquía son especialmente asombrosas. Si esta teoría es correcta, detectaremos las partículas KK y mediremos sus propiedades a partir de las pistas que dejen tras ellas. Si, por el contrario, son otros los modelos extradimensionales que describen el universo, la energía desaparecerá en las dimensiones extras y, en definitiva, detectaremos esas dimensiones a través del desequilibrio resultante en el recuento de la energía.

Ciertamente, no conocemos todavía todas las respuestas. Pero el universo está a punto de abrirse para que podamos indagar en él. Las observaciones astrofísicas explorarán el cosmos en tiempos más antiguos, más lejos y con más detalle que antes. Los descubrimientos del LHC nos informarán sobre la naturaleza de la materia a distancias más cortas de las que hemos podido observar hasta ahora por procesos físicos. A altas energías, podrían empezar a llover sobre nosotros las verdades sobre el universo.

Los secretos del cosmos comenzarán a desvelarse. Yo, por mi parte, me muero de impaciencia.

GLOSARIO

acción a distancia El efecto instantáneo hipotético de unos objetos sobre otros objetos distantes.

acelerador de partículas Instalación física de alta energía que acelera las partículas para que adquieran alta energía.

acoplamiento de cuerdas Magnitud que determina la intensidad de la interacción entre cuerdas.

afinación precisa Apaño consistente en ajustar un parámetro a un valor muy concreto (y muy improbable).

agujero negro Objeto compacto que es tan denso que nada puede escapar del campo gravitatorio que lo rodea.

anomalía Violación de la simetría que surge de las contribuciones cuánticas a una interacción física, pero que no está presente en la teoría clásica correspondiente (en la que no se tienen en cuenta las contribuciones cuánticas).

antipartícula Partícula con la misma masa que otra partícula, pero con carga opuesta.

átomo Ladrillo constitutivo de la materia, que consiste en electrones que orbitan alrededor de un núcleo con carga positiva.

bosón Partícula con espín entero: 1, 2, etc. (una de las dos categorías de partículas establecidas por la mecánica cuántica; la otra es el **fermión**); los fotones y la partícula de Higgs son ejemplos de bosones.

bosón gauge Partícula que transmite una fuerza elemental.

bosón gauge débil Partícula elemental (con tres variedades, W^+ , W^- y Z) que transmite la fuerza débil.

brana Objeto parecido a una membrana que está en un espacio de dimensión superior y que puede portar energía y retener partículas y fuerzas.

brana D En la teoría de cuerdas, brana en la que terminan las cuerdas abiertas.

bulto Espacio completo de dimensión superior.

campo Magnitud física que existe y que tiene un valor determinado en cada

punto del espacio. Son ejemplos de campos el campo eléctrico clásico y los campos cuánticos.

campo de Higgs Campo que participa en el mecanismo de Higgs, que es responsable de la ruptura de la simetría asociada a la fuerza electrodébil.

catástrofe ultravioleta Energía infinita emitida a altas frecuencias predicha por la teoría clásica del cuerpo negro.

CERN Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (que ahora se llama Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire o, en español, Organización Europea para la Investigación Nuclear), planta situada en Suiza, que cuenta con un acelerador de altas energías; futura sede del Gran Acelerador de Hadrones (LHC).

colapso de la función de onda La reducción del estado cuántico después de que una medición precisa fija el valor de la cantidad medida.

colisionador de partículas Acelerador de alta energía que hace chocar las partículas para crear enormes cantidades de energía.

compactado Un espacio compactado es aquel que está enrollado en un recinto finito.

constante cosmológica Valor de la densidad de energía de fondo constante que no está en forma de materia.

constante de acoplamiento Número que determina la intensidad de interacción.

constante de Planck Magnitud cuántica que relaciona la energía con la frecuencia y el momento con la longitud de onda.

constante gravitatoria de Newton Coeficiente global que determina la intensidad de la atracción gravitatoria en la ley de Newton de la gravedad; es inversamente proporcional al cuadrado de la masa de la escala de Planck.

contribución cuántica Contribución a un proceso físico debida a partículas virtuales.

cosmología La ciencia de la evolución del universo.

cuanto Unidad discreta irrompible de una magnitud medible; la unidad más pequeña de esa magnitud.

cuasicristal Material sólido cuya estructura cristalina se deriva de dimensiones superiores.

cuerda Objeto que se extiende en una dirección espacial cuyas oscilaciones constituyen las partículas elementales.

cuerda abierta Una **cuerda** con dos extremos.

cuerda cerrada Una **cuerda** que se cierra sobre sí misma y que no tiene cabos.

cuerpo negro Objeto idealizado que absorbe todo el calor y la energía y los vuelve a emitir de un modo determinado únicamente por su temperatura.

curvatura Magnitud que describe la deformación o pandeo de un objeto, espacio o espacio-tiempo.

desintegración beta Desintegración radiactiva en la que un neutrón se descompone en un protón, un electrón y un neutrino.

desplazamiento hacia el rojo Disminución de frecuencia de una onda cuando el objeto que emite la onda se aleja (efecto Doppler) o resulta frenado por un campo gravitatorio fuerte (desplazamiento gravitatorio hacia el rojo).

diagrama de Feynman Diagrama que ilustra esquemáticamente las interacciones permitidas en la física de partículas.

dimensión Dirección independiente en el espacio o en el tiempo.

dimensionalidad Número de cantidades necesarias para determinar unívocamente un punto.

dimensionalidad de una brana Número de dimensiones en las que las partículas confinadas en una brana tienen permitido viajar.

dispersión de Compton Dispersión de un fotón a partir de un electrón.

dispersión profunda inelástica Experimento con el que se descubrieron los quarks al dispersar electrones a partir de protones y neutrones.

ecuaciones de Einstein Ecuaciones de la relatividad general mediante las que determinamos la métrica (y, por lo tanto, el campo gravitatorio) a partir de la distribución de materia y energía.

electromagnetismo Una de las cuatro fuerzas conocidas; el electromagnetismo describe la electricidad y también el magnetismo.

electrón Partícula elemental muy ligera con carga negativa.

energía cinética Energía debida al movimiento.

energía de la escala de Planck Energía a la que la gravedad se convierte en una fuerza intensa y en la hay que tener en cuenta las contribuciones cuánticas.

energía de la escala débil Energía a la que la fuerza débil se rompe

espontáneamente. La energía de la escala débil determina las masas de las partículas elementales.

energía del vacío Energía que porta el vacío, el estado en el que no hay partículas; conocido también como **constante cosmológica** .

energía oscura Energía del vacío medida en el universo. Constituye aproximadamente el 70% de la energía del universo, pero no existe en forma de materia de ningún tipo.

energía potencial Energía almacenada que puede ser liberada como energía cinética.

espacio anti De Sitter Espacio-tiempo con curvatura negativa constante.

espacio compacto Espacio finito.

espacio De Sitter Espacio-tiempo con curvatura positiva constante.

espacio-tiempo Concepto que unifica el espacio y el tiempo en un marco único; la formulación matemática de la región en la que pueden ocurrir los fenómenos físicos.

espectro Función que da la propagación de energía emitida a todas las frecuencias.

espín Véase **espín intrínseco** .

espín intrínseco (espín) Número que caracteriza el modo en que se comporta una partícula, como si estuviera girando. El espín puede ser un número entero o semientero.

estructura Componentes de la materia.

éter Sustancia invisible hipotética (ahora descartada) cuyas vibraciones se suponía que eran las ondas electromagnéticas.

eV (electronvoltio) Energía necesaria para mover un electrón contra una diferencia de potencial de 1 voltio.

experimento mental Experimento físico imaginado mediante el cual podemos evaluar las consecuencias de un conjunto dado de hipótesis físicas.

factor de arqueo Escalado global de una métrica que varía con respecto a una coordenada.

familia Véase **generación** .

Fermilab Instalación de aceleradores que está en Illinois, sede del **Tevatrón** .

fermión Partícula con espín semientero: $^{1}/_{2}$, $^{1}/_{3}$, etc. (una de las dos categorías de partículas establecidas por la mecánica cuántica; la otra es el bosón); los quarks y los electrones son ejemplos de fermiones.

física clásica Leyes físicas que no tienen en cuenta ni la mecánica cuántica ni la relatividad.

física de partículas Estudio de los ladrillos constitutivos más elementales de la materia.

flujo Enjambre energético de partículas, con fuertes interacciones que rodean a un quark o gluón con energía, y que se mueve en una dirección determinada.

fotino Supercompañero del fotón.

fotón Partícula elemental que comunica la fuerza electromagnética, el cuanto de luz.

fuerza débil Una de las cuatro fuerzas conocidas; la fuerza débil es, por ejemplo, la responsable de la desintegración beta de los neutrones para dar protones.

fuerza fuerte Una de las cuatro fuerzas conocidas; la fuerza fuerte es la responsable de mantener trabados los quarks del protón o del neutrón, por ejemplo.

función de onda Función de la mecánica cuántica que determina la probabilidad relativa de que el objeto correspondiente esté en un punto dado del espacio.

función de probabilidad El cuadrado del valor absoluto de la función de onda que determina la probabilidad de encontrar una partícula en una localización dada.

gaugino Supercompañero de un bosón gauge portador de fuerza.

generación Cada uno de los tres conjuntos del complemento completo de los tipos de partículas (leptón cargado dextrógiro y levógiro, quark de tipo up, quark de tipo down y neutrino levógiro).

geodésica En el espacio, el camino más corto entre dos puntos; en el espacio-tiempo, el camino que seguiría un observador en caída libre (o sea, sin que ninguna fuerza actúe sobre él).

geometría arqueada del espacio-tiempo Espacio-tiempo que sería plano (más generalmente, en el que cada rodaja tendría la misma forma) si no es por un escalado global que varía con la posición en una determinada dirección.

GeV (gigaelectronvoltio) Unidad de energía igual a mil millones de eV.

gluón Partícula elemental que comunica la fuerza fuerte.

gran teoría unificada (GUT) Teoría hipotética en la que las tres fuerzas no gravitatorias conocidas se fusionan en una única fuerza a altas energías.

gravedad cuántica Teoría de la gravedad que incorpora la mecánica cuántica y la relatividad general.

gravedad localizada Alta concentración de un campo gravitatorio en una región determinada del espacio; la gravedad aparece como de dimensión inferior porque no está diluida en una dimensión extra.

gravedad localizada localmente Teoría en la que la gravedad tetradimensional no llega a todas partes, sino sólo a la región del espacio donde se concentra la función de probabilidad de la partícula, que actúa como un gravitón tetradimensional.

gravitino Supercompañero del gravitón.

gravitón Partícula que comunica la fuerza de la gravedad.

grupo de renormalización Cálculo técnico para relacionar magnitudes referidas a diferentes regímenes de energía o distancia.

hadrón Objeto sumamente compacto constituido de quarks y/o gluones.

hipercubo Generalización del cubo a más de tres dimensiones.

hipótesis del desierto Suposición de que no hay partículas, aparte de las incluidas en el modelo estándar, que puedan producirse a una energía inferior a la energía de unificación.

horizonte Región más allá de la que nada puede escapar.

interacción de Fermi Interacción generada por el intercambio de uno de los bosones gauge débiles con masa.

interacción local Interacción entre objetos adyacentes o coincidentes.

invariancia rotacional La independencia de los resultados de los experimentos con respecto a la orientación (o dirección).

invariancia traslacional La independencia de las leyes físicas con respecto a la localización en el espacio.

ión Estado con carga de un núcleo y los electrones; un átomo con electrones de más o de menos.

lente gravitatoria Efecto de descomposición de la luz en imágenes múltiples al doblarse alrededor de un objeto con mucha masa.

leptón Partícula fermiónica elemental que no siente la fuerza fuerte.

ley de la fuerza gravitatoria de Newton Ley clásica de la gravedad que dice que la intensidad de la gravedad entre dos objetos con masa es proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

ley del cuadrado del inverso Regla que describe aquellas fuerzas cuya intensidad decrece como el cuadrado de la distancia entre los objetos; las fuerzas eléctrica y gravitatoria clásicas obedecen a leyes del cuadrado del inverso.

LHC (Gran Acelerador de Hadrones) Acelerador de partículas de alta energía que hace chocar haces de protones de 7 TeV y que produce partículas con masa de unos cuantos TeV.

líneas espectrales Frecuencias discretas a las que los átomos no ionizados emiten o absorben la luz.

longitud de la escala de Planck Escala de longitud a la que la gravedad es fuerte y en la que hay que incluir los efectos cuánticos en las predicciones gravitatorias.

longitud de la escala débil La longitud, 10^{-16} cm, o la diez mil billonésima parte de un centímetro, que corresponde (mediante la mecánica cuántica y la relatividad especial) a la energía de la escala débil. Es el rango de la fuerza débil; la distancia máxima entre partículas que pueden influir unas en otras mediante esta fuerza.

marco inercial de referencia Marco de referencia que se mueve a una velocidad fija con respecto a un marco de referencia fijo, como, por ejemplo, el que está en reposo.

masa de la escala débil La masa que está relacionada con la energía de la escala débil (de 250 GeV) mediante la velocidad de la luz. En unidades de masa convencionales, la masa de la escala débil es de 10^{-21} gramos.

materia oscura Materia no luminosa que constituye aproximadamente el 25% de la energía del universo.

mecánica cuántica Teoría que se basa en la hipótesis de que toda la materia consiste en partículas elementales discretas que llevan asociadas funciones de onda.

mecanismo de Higgs Ruptura espontánea de la simetría electrodébil que permite a los bosones gauge y a otras partículas elementales adquirir masa.

mediación de anomalías Comunicación de la ruptura de la supersimetría por efectos cuánticos.

mediación de gauginos Comunicación de la ruptura de la supersimetría mediante gauginos.

mediar Comunicar la influencia de una partícula (mediante una partícula intermediaria).

métrica Magnitud o magnitudes que establece la escala de medida que determina las distancias y los ángulos físicos.

modelo Teoría candidata.

modelo estándar (de la física de partículas) La teoría efectiva que describe todas las partículas conocidas y las fuerzas no gravitatorias, así como las interacciones entre ellas.

modo de Kaluza-Klein (KK) Partícula tetradimensional con origen de dimensión superior; los modos KK se distinguen por sus momentos extradimensionales.

molécula Estado de dos o más átomos en el que los electrones se comparten entre ellos.

multiverso Generalización hipotética de un universo que contiene regiones que no interactúan o que lo hacen sólo muy débilmente.

mundo brana Contexto físico en el que la materia y las fuerzas se encuentran retenidas en branas.

muón Versión más pesada y de vida breve del electrón.

neutrino Partícula elemental fundamental que interactúa sólo a través de la fuerza débil.

neutrón Ingrediente del núcleo atómico en el que dos quarks down y un quark up están fuertemente entrelazados.

núcleo Componente central, duro y denso, del átomo.

nucleón Protón o neutrón.

objeto neutro Objeto que es inmune a una fuerza; los objetos neutros tienen carga total igual a cero.

p-brana Solución a las ecuaciones de Einstein que se expande infinitamente lejos en algunas direcciones espaciales, pero que en las restantes direcciones actúa como un agujero negro, atrapando los objetos que se acercan demasiado.

partícula alfa Núcleo de helio (consistente en dos protones y dos neutrones).

partícula virtual Partícula efímera permitida sólo por la mecánica cuántica; las partículas virtuales portan la misma carga que las correspondientes partículas físicas auténticas, pero tienen una energía incorrecta.

partículas (internas) intermediarias Partículas virtuales cuyo intercambio transmite las interacciones con otras partículas.

partículas externas Partículas físicas reales que pueden entrar en una región de interacción o salir de ella.

perturbación Pequeña modificación de una teoría conocida.

polarización Dirección de oscilación de una onda.

polarización longitudinal Onda de oscilación a lo largo de la dirección del movimiento.

polarización transversal Oscilación de la onda que es perpendicular a la dirección del movimiento.

positrón La antipartícula, con carga positiva, del electrón.

preferencia de mano Dirección del espín, hacia la izquierda o hacia la derecha.

principio antrópico Razonamiento que dice que, de todos los posibles universos, sólo podríamos vivir en aquéllos en los que podría haberse formado la **estructura** .

principio de anarquía La afirmación de que todas las interacciones que no están vetadas por las simetrías ocurrirán.

principio de equivalencia Principio que dice que la aceleración uniforme y la gravedad son indistinguibles.

principio de exclusión de Pauli Afirmación de que dos fermiones idénticos no pueden ocupar una misma posición.

principio de incertidumbre Principio básico subyacente a la mecánica cuántica; limita la exactitud con la que se pueden medir simultáneamente algunas parejas de magnitudes (como la posición y la velocidad).

problema de la jerarquía La cuestión de la debilidad de la gravedad o, equivalentemente, de por qué la masa de la escala de Planck que caracteriza la intensidad de la gravedad es dieciséis órdenes de magnitud más grande que la masa de la escala débil asociada a la fuerza débil.

problema del sabor (de la supersimetría) La predicción, en gran medida sobredimensionada (a causa de los squarks y de los sleptones virtuales), de los procesos que intercambian sabores, que asedia a la mayoría de los modelos de la ruptura de la supersimetría.

Protón Ingrediente del núcleo atómico en el que dos quarks up y un quark down están fuertemente entrelazados.

proyección Receta definida para crear una representación en dimensión inferior de un objeto de dimensión superior.

QCD (cromodinámica cuántica) Teoría cuántica de la fuerza fuerte.

QED (electrodinámica cuántica) Teoría cuántica del electromagnetismo.

quark Partícula elemental fermiónica que siente la fuerza fuerte.

quark bottom Versión más pesada y de vida breve de los quarks down y extraño.

quark con encanto Una versión más pesada y de vida breve del quark up.

quark down Uno de los quarks elementales que componen el protón y el neutrón.

quark extraño Versión más pesada y de vida breve del quark down.

quark top Versión más pesada y de vida breve del quark up; el quark conocido más pesado.

quark up Uno de los quarks elementales que componen el protón y el neutrón.

quiralidad La **preferencia de mano** de una partícula con espín.

radiación del cuerpo negro Radiación emitida por un cuerpo negro.

relatividad Una de las dos teorías de Einstein del espacio-tiempo: relatividad especial, que unifica el espacio y el tiempo, y relatividad general, que explica la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo.

relatividad especial Teoría de la gravedad que describe el movimiento en sistemas de referencia inerciales.

relatividad general Teoría de la gravedad que describe el campo gravitatorio debido a cualquier fuente de materia y energía, incluida la almacenada por el campo gravitatorio mismo, en cualquier sistema de referencia; la relatividad general engloba el campo gravitatorio en la curvatura del espacio-tiempo.

sabor Etiqueta que distingue los distintos tipos de quarks o de leptones (usada a menudo para distinguir los quarks y los leptones de generaciones diferentes).

secuestro Separación física entre diferentes tipos de partículas elementales en las dimensiones extras.

selectrón Supercompañero del electrón.

simetría Propiedad de un objeto o de una ley física que hace que ciertas operaciones físicas sean imposibles de detectar.

simetría con ruptura espontánea Simetría que es conservada por las leyes físicas, pero que resulta rota por el estado físico real de un sistema.

simetría de sabores Simetría que intercambia diferentes sabores de una categoría determinada de partículas.

simetría interna Simetría en la que las leyes físicas no cambian para un conjunto de transformaciones que no altera la posición geométrica de las partículas, sino sólo algunas propiedades o etiquetas internas.

singularidad Región en la que la descripción matemática de un objeto falla porque alguna magnitud se hace infinita.

sistema de referencia Punto de observación privilegiado o un conjunto de coordenadas para describir sucesos en el espacio o en el espacio-tiempo.

sleptón Supercompañero del leptón.

squark Supercompañero del quark.

subestructura Ingredientes más elementales de los componentes de la materia.

supercompañera (de una partícula) Partícula que se empareja, en virtud de la supersimetría, con otra partícula; si la partícula original es un bosón, la supercompañera es un fermión, y viceversa.

superespacio Espacio abstracto que incorpora las cuatro dimensiones familiares y también las dimensiones fermiónicas teóricas.

supergravedad Teoría supersimétrica que incluye la gravedad.

supersimetría Simetría que intercambia los bosones y fermiones asociados.

taquión Partícula que señala una inestabilidad y que, superficialmente, parece tener masa cuadrada negativa.

tau Partícula de vida breve con carga idéntica a la del electrón y a la del

muón, pero más pesada que cualquiera de estos dos.

T-dualidad Equivalencia entre fenómenos físicos en un universo con una dimensión pequeña enrollada y otro universo con una dimensión grande (el tamaño del radio de la dimensión enrollada se intercambia con su inverso).

tensión Resistencia al estiramiento que determina cuán fácilmente oscilará una cuerda y producirá partículas pesadas.

teoría Conjunto definido de elementos y principios, con reglas y ecuaciones para predecir cómo interactúan esos elementos.

teoría cuántica de campos Teoría usada para estudiar la física de partículas, con la que es posible calcular los ritmos de los procesos en los que las partículas pueden interactuar, crearse o destruirse. Según la teoría cuántica de campos, las fluctuaciones de los campos se manifiestan como partículas.

teoría de cuerdas Teoría que postula que los ingredientes del universo son cuerdas fundamentales y que incorporaría de modo consistente la mecánica cuántica y la relatividad general.

teoría de Hořava-Witten Versión de la teoría de cuerdas con cuerdas heteróticas fuertemente acopladas, o, equivalentemente (por dualidad), versión de la teoría de cuerdas con dos branas que están separadas por una undécima dimensión, en la que las dos branas alojan las fuerzas de la cuerda heterótica.

teoría de la perturbación Cuando la teoría en la que estamos interesados se distingue de una teoría resoluble (normalmente sin interacciones) por un parámetro pequeño (que podría ser una pequeña fuerza de interacción, por ejemplo), la teoría de la perturbación nos permite extrapolar información de la teoría resoluble a la teoría que nos interesa mediante un desarrollo sistemático en ese parámetro. Los resultados se expresan como desarrollos de potencias del correspondiente parámetro, normalmente la constante de acoplamiento.

teoría de matrices Teoría cuántica de dimensión diez que podría ser equivalente a la teoría de cuerdas.

teoría de supercuerdas Versión supersimétrica de la teoría de cuerdas sin **taquiones** , que incluye fermiones, además de la gravedad y de los bosones gauge.

teoría efectiva Teoría que describe aquellos elementos y fuerzas que, en principio, son observables a la distancia o a las escalas de energía sobre las que se aplica.

teoría efectiva de campos Teoría cuántica de campos que, definida a una energía determinada, describe aquellas partículas y fuerzas que son relevantes para las energías a las cuales se aplica.

teoría electrodébil Teoría que incorpora el electromagnetismo y también la fuerza débil; es un componente esencial del modelo estándar de la física de partículas.

teoría heterótica de cuerdas Versión de la teoría de cuerdas en la que los modos de oscilación que viajan en el sentido de las agujas del reloj son diferentes de los modos que viajan en el sentido contrario a las agujas del reloj.

teoría M Teoría hipotética que lo abarca todo y que unifica todas las versiones conocidas de la teoría de cuerdas de dimensión diez y de la supergravedad de dimensión once.

teoría sin anomalías Teoría en la que las simetrías de la teoría clásica son también simetrías de la teoría con las contribuciones cuánticas incluidas.

teorías duales Dos descripciones equivalentes de una única teoría que, superficialmente, podrían ser por entero diferentes.

TeV (teraelectronvoltio) Unidad de energía igual a un billón de eV.

Tevatrón Acelerador de alta energía que está operando actualmente en el Fermilab y que hace chocar haces de protones con varios TeV de energía contra antiprotones con varios TeV de energía.

transformación simétrica Manipulación de un sistema físico que no cambia sus propiedades o su comportamiento; la acción que transforma unas en otras las diferentes configuraciones que están relacionadas por la simetría.

vacío Estado del universo con la mínima energía posible y sin ninguna partícula.

variedad de Calabi-Yau Espacio compacto de dimensión seis, definido por sus propiedades matemáticas específicas, que desempeña un papel importante en la teoría de cuerdas.

vector velocidad Magnitud que especifica tanto la celeridad como la dirección del movimiento.

vieja teoría cuántica Antecesora de la mecánica cuántica que postulaba reglas cuantizadas, pero que no las determinaba sistemáticamente ni describía la evolución de un estado cuántico a lo largo del tiempo.

PERMISOS

La autora y los editores desean agradecer a las corporaciones siguientes por los permisos que han concedido para reproducir letras de canciones:

As Time Goes by , escrita por Herman Hupfeld. Usada con permiso de Carlin Music Publishing Canada, Inc, en nombre de Redwood Music Ltd.

The Rock in This Pocket , letra y música de Suzanne Vega. Copyright © 1992 WB Music Corp. and Waifersongs Ltd. Todos los derechos administrados por WB Music Corp. Todos los derechos reservados. Usado con permiso. Warner Brothers Publications, U. S. Inc., Miami, Florida 33014.

Once in a Lifetime , por David Byrne, Chris Frantz, Jerry Jarrison, Tina Weymouth y Brian Eno. Copyright © 1981 Index Music, Inc., Bleu-Disque Music Co. y E. G. Music Ltd. Todos los derechos en nombre de Index Music, Inc. y Bleu Disque Music Co., Inc. administrados por WB Music Corp. Todos los derechos reservados. Usado con permiso. Warner Brothers Publications, U. S. Inc., Miami, Florida 33014.

It's the End of the World as We Know It (and I Feel Fine) , por William T. Berry, Peter L. Buck, Michael E. Mills y John M. Stipe. Copyright © 1989 Night Garden Music. Todos los derechos en nombre de Might Garden Music administrados por Warner-Tamerlane Publishing Corp. Todos los derechos reservados. Usado con permiso. Warner Brothers Publications, U. S. Inc., Miami, Florida 33014.

Chain of Fools , por Donald Covay. Copyright © 1967 (renovado) Pronot Music, Inc. y Fourteenth Hour Music, Inc. Todos los derechos administrados por Warner-Tamerlane Publishing Corp. Todos los derechos reservados. Usado con permiso. Warner Brothers Publications, U. S. Inc., Miami, Florida 33014.

I've Got the World On a String , por Harold Arlen y Ted Koehler. Usado con permiso de Carlin Music Publishing Canada, Inc., en nombre de Redwood Music Ltd.

Das Modell , por Kraftwerk. Copyright © 1978 Kling Klang Musik GmbH, Edition Positive Songs. Todos los derechos en nombre de Kling Klang Musik GmbH administrados por Sony/ATV Music Publishing, 8 Music Square West, Nashville, TN 37203. Todos los derechos reservados. Usado con permiso.

Suite: Judy Blue Eyes , por Stephen Stills. Copyright © 1970 Gold Hill Musics Inc. Todos los derechos administrados por Sony/ATV Music Publishing, 8 Music Square West, Nashville, TN 37203. Todos los derechos reservados. Usado con permiso.

I Miss You , por Björk y Simon Berstein. Copyright © 1995 Sony/ATV Music Publishing UK Ltd, Polygram Publishing, Famous Music Corporation y Björk Gudmundsdottir Publishing. Todos los derechos administrados por Sony/ATV Music Publishing, 8 Music Square West, Nashville, TN 37203. Todos los derechos para Famous Music Corporation y Björk Gudmundsdottir Publishing en Estados Unidos y Canadá administrados por Famous Music Corporation International. Copyright asegurado. Todos los derechos reservados.

Come Together , por Lennon/McCartney. Copyright 1969 (renovado) Sony/ATV Tunes LLC. Todos los derechos administrados por Sony/ATV Music Publishing, 8 Music Square West, Nashville, TN 37203. Todos los derechos reservados. Usado con permiso.

Go Your Own Way , por Lindsey Buckingham. Copyright © 1976, New Sounds Music.

I Will Survive , por Frederick J. Perren, Dino Fekaris. Copyright © 1978 por Universal-Polygram International Publishers Inc., en nombre de sí mismo y Perren-Vibes Music, Inc./ASCAP. Usado con permiso. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

Don't You (Forget about Me) , por Steve W. Schiff y Keith Forsey. Copyright © 1985 Songs of Universal Inc., en nombre de USI B Global Music Publishers/Universal Music Corp., en nombre de USI A Music Publishers/BMI/ASCAP. Usado con permiso. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

White Rabbit , por Grace Slick. Copyright © 1966, 1994 por Irving Music, Inc./BMI. Usado con permiso. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

Insane in the Brain , por Larry E. Muggerud, Louis M. Freeze y Senen Reyes. Copyright © 1987 por Universal Music Corp. en nombre de Soul Assasins Music/ASCAP. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

I Still Haven't Found What I'm Looking For , por Paul Hewson, Dave Evans, Adam Clayton y Larry Mullen. Copyright © 1987 por Universal Polygram International Publishing Inc. en nombre de Universal Music Publishing International B. V./ASCAP. Usado con permiso. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

Like a Rolling Stone , por Bob Dylan. Copyright © 1965 por Warner Bros. Inc. Copyright renovado en 1993 por Special Rider Music. Todos los derechos reservados. Derechos de copia internacionales asegurados. Reimpreso con permiso.

Born to Run , por Bruce Springsteen. Copyright © 1975 Bruce Springsteen. Todos los derechos reservados. Reimpreso con permiso.

No Way Out , por Peter Wolf y Ina Wolf. Copyright © 1984, Jobete Music Co.

Inc. / Perwolf Music / Stone Diamond Music Corp / Kikiko Music, USA. Reproducido con permiso de Jobete Music Co. Inc. / EMI Music Publishing Ltd, Londres WC2U0QY.

Welcome Home (Sanitarium) , por James Hetfield, Lars Ulrichy Kirk Hammett. Copyright © 1986 Creeping Death (ASCAP). Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

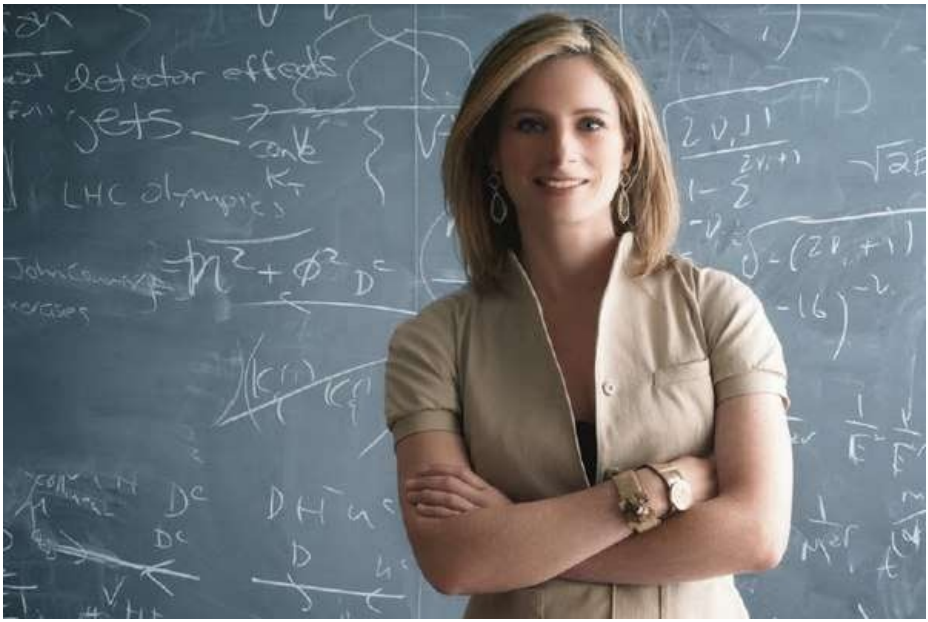
Imagine , por John Lennon. Copyright © 1971, 1999 Lenono Music.

Say Goodbye Hollywood , por Michael Elizondo, Marshall Mathers y Louis Resto. Copyright © 2002 Elvis Mambo Music, Blotter Music, Music of Windswept, Restaurant's World Music, Eight Mile Style Music. Todos los derechos para Eight Mile Style Music administrados por Ensign Music Corporation. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

Stuck on You , por Aaron Schroeder y J. Leslie McFerland. Copyright © 1960 por Gladys Music, Inc. Copyright renovado y asignado a Gladys Music y Rachel's Own Music. Todos los derechos para Gladys Music administrados por Cherry Lane Music Publishing Company Inc. y Chrysalis Music. Todos los derechos de Rachel's Own Music administrados por A. Schroeder International LLC. Derechos de copia internacionales asegurados. Todos los derechos reservados.

You Were Meant for Me , de *Singing in the Rain* y *The Broadway Melody* , escrita por Arthur Freed y Nancio Herb Brown.

Hemos hecho todos los esfuerzos posibles para ponernos en contacto con los titulares de los copyrights. La autora y los editores corregirán con mucho gusto cualquier error u omisión en las futuras reimpresiones de esta obra.



LISA RANDALL. (Nueva York, 1962). Es catedrática de física en la Universidad de Harvard, donde estudia los detalles de la física de partículas y la cosmología. Sus trabajos sobre supersimetría, teoría de la unificación e inflación cósmica la han convertido en la física teórica más citada de los últimos años. Algunas de sus obras de divulgación traducidas al castellano son: *Universos ocultos. Un viaje a las dimensiones extras del cosmos* (2011), *El descubrimiento del Higgs. Una partícula muy especial* (2012) y *Llamando a las puertas del cielo. Cómo la física y el pensamiento científico iluminan el universo y el mundo moderno* (2013).

Notas matemáticas

[M1] Ésta no es realmente una nota matemática, pero el bebé del sábado por la noche es tridimensional [figura A1].



FIGURA A1. Bebé del sábado por la noche.

<<

[M2] Una métrica en un espacio puede tomar la forma $\mathrm{d}s^2 = a_x\,\mathrm{d}x^2 + a_y\,\mathrm{d}y^2 + a_z\,\mathrm{d}z^2$, donde x, y, z son las tres coordenadas del espacio y a_x, a_y, a_z pueden ser números o pueden ser funciones de x, y y z. La métrica determina las longitudes, las distancias y los ángulos entre líneas. Por ejemplo, la longitud de un vector que sale del origen y va hasta el punto de coordenadas (x, y, z) es Si $a_x = a_y = a_z = 1$, tenemos el espacio plano, y las distancias y las longitudes se medirían de la manera familiar. Por ejemplo, la longitud de un vector que sale del origen y va hasta (x, y, z) sería Hay métricas más complicadas que tienen términos cruzados, como $\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y$. En ese caso, la métrica hay que describirla con un tensor con dos índices que dice los coeficientes a_{ij} de cada término de la forma $\mathrm{d}x_i\,\mathrm{d}x_j$ en la métrica. Más tarde, cuando discutamos la relatividad, la métrica tendrá también un término $\mathrm{d}t^2$ y podría también tener términos de la forma $\mathrm{d}t\,\mathrm{d}x_i$. <<

[M3] Una hiperesfera se define por medio de la ecuación Aquí x_i se refiere a la coordenada que ocupa el lugar i (la localización en la dimensión i) y r es el radio de la hiperesfera. La sección de la hiperesfera cuando cruza una localización fija en la dimensión n, $x_n = d$, está descrita por la ecuación Ésta es la ecuación de una hiperesfera de una dimensión menos y radio Así, por ejemplo, cuando $n = 3$ y una esfera cruza Planilandia, los habitantes de Planilandia verán círculos. (Verían discos si ven los círculos y sus interiores,

lo que matemáticamente se describiría con una desigualdad). <<

[M4] Las variedades de Calabi-Yau no son las únicas variedades que las cuerdas ocultan. Sabemos ahora que hay otras, como las llamadas variedades de holonomía G2, que podrían proporcionar también modelos aceptables. <<

[M5] En la teoría de cuerdas, también usamos a veces la palabra *brana* para denominar a las branas que ocupan todo el espacio y que tienen el mismo número de dimensiones que el espacio de dimensión superior. Aquí, sin embargo, nos ocuparemos solamente de las branas que tienen menos dimensiones que el espacio completo de dimensión superior, de modo que me limitaré a usar el término en el sentido descrito en el texto. <<

[M6] Una brana que se extiende en las dimensiones $x\,1$, ..., x_j está descrita por las $n - j$ ecuaciones $x_{j+1} = c_{j+1}$, $x_{j+2} = c_{j+2}$, ..., $x_n = c_n$, donde las x_i son coordenadas, n es el número de dimensiones del espacio y las c_i son constantes fijas que describen la localización de la brana. Las branas más complicadas que se curvan en el sistema coordenado dado se describen con ecuaciones más complicadas que describen la superficie. <<

[M7] En forma de ecuación, la ley de Newton dice que la fuerza gravitatoria es $Gm_1 m_2 / r^2$, donde G es la constante de la gravitación de Newton, m_1 y m_2 son las dos masas que se atraen entre sí y r es la distancia entre ellas. <<

[M8] La gravedad newtoniana respeta la geometría de Euclides. En la geometría euclídea, $x^2 + y^2 + z^2$, la longitud de un vector que parte del origen y acaba en el punto de coordenadas (x , y , z) es independiente del sistema coordenado. Esto es, uno puede rotar las coordenadas pero la distancia a cualquier punto no cambiará, aunque sí que cambian las coordenadas individuales. La relatividad especial introduce el tiempo en esta descripción. Dice que $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ es independiente de la elección de sistema de referencia inercial. Obsérvese que, esta cantidad invariante involucra tanto el espacio como el tiempo, pero el tiempo recibe un trato diferente a causa del signo menos que lleva el término $c^2 t^2$. Obsérvese también que, para que esta cantidad sea independiente del sistema de referencia inercial, los cambios de sistema de referencia han de mezclar los valores de las coordenadas del espacio y del tiempo. Si un sistema de referencia se mueve a una velocidad v con respecto al otro en la dirección x , la transformación de coordenadas de (t , x , y , z) a (t' , x' , y' , z') sería $y' = y$, $z' = z$, donde c es la velocidad de la luz y <<

[M9] Las ecuaciones de Einstein nos dicen cómo deducir la métrica $g_{\mu\nu}$ a partir de una distribución dada de materia y energía:

$R_{\mu\nu}$ es el tensor de curvatura de Ricci y está relacionado con la métrica $g_{\mu\nu}$, $T_{\mu\nu}$ es el tensor de tensión-energía que describe la distribución de materia y energía, G es la constante de gravitación de Newton y c es la velocidad de la luz. Por ejemplo, para materia con densidad de masa ρ en reposo, $T_{00} = \rho$

mientras todos los demás componentes del tensor son 0. <<

[M10] La energía por unidad de frecuencia emitida por un cuerpo negro de temperatura T depende de la frecuencia f según la fórmula $f^3/(e^{hf/kT}-1)$, donde $k = 1{,}3807 \times 10^{-6}$ ergios/K es la constante de Boltzmann, que convierte la temperatura en energía. Obsérvese que a bajas frecuencias la energía aumenta con la frecuencia. Pero a frecuencias en las que la energía de un cuanto, hf, es grande comparada con kT, el espectro cae drásticamente; la energía emitida es exponencialmente más pequeña a frecuencias más altas. <<

[M11] Una función de onda es realmente una función que toma valores complejos. Ésta es la fuente de muchas de las propiedades extrañas de la mecánica cuántica. Cuando sumamos dos funciones complejas y elevamos al cuadrado la suma, generalmente obtenemos un resultado distinto del que obtenemos cuando primero elevamos al cuadrado y luego sumamos. Esto trae como consecuencia fenómenos de interferencia. Por ejemplo, en el experimento de la doble rendija, la probabilidad que queda registrada en una pantalla resulta de la interferencia de las ondas que describen los dos posibles caminos del electrón. <<

[M12] Más precisamente, es el producto de la constante de Planck y el valor absoluto del conmutador de las dos cantidades dividido por 2. <<

[M13] La relatividad especial nos dice que un objeto estacionario con masa en reposo m_0 porta una energía $E = m_0 c^2$. Más generalmente, un objeto que se mueve con velocidad v (con y) portará una energía $E = \gamma m_0 c^2$. La masa en reposo se conoce también como *masa invariante* (independiente del sistema de referencia). Esto es así porque, según las leyes de transformación de la relatividad especial, la cantidad $E^2 - p^2 c^2 = m_0 c^4$ es la misma en cualquier sistema de referencia. Obsérvese que siempre se precisa una energía al menos igual a $m_0 c^2$ para producir un objeto con masa m_0. Obsérvese también que cuando un objeto tiene una masa pequeña comparada con su energía (realmente energía/c^2), la energía y el momento están relacionadas de forma aproximada por $E = pc$. Esta es la razón por la cual la energía y el momento son más o menos intercambiables. <<

[M14] Las ecuaciones de Maxwell son (en unidades c.g.s.) donde **E** es el campo eléctrico, **B** es el campo magnético, ρ es la carga y **J** es la corriente. Éstas son ecuaciones diferenciales de primer orden; combinando dos de ellas podemos deducir una ecuación diferencial de segundo orden que involucra solamente el campo eléctrico o el campo magnético. Esta ecuación asume la forma de una ecuación de onda, esto es, sus soluciones son ondas sinusoidales.

<<

[M15] Realmente, según los principios subyacentes de la relatividad especial, podría haber habido también una cuarta polarización, que oscilaría en la

dirección del tiempo. Pero ésta no existe en todo caso, ya que la misma simetría interna que elimina la tercera polarización (longitudinal) elimina también la «polarización temporal». Como no desempeña ningún papel en la discusión de este capítulo ni en la del siguiente, ya no hablaremos más de ella. <<

[M16] Las auténticas simetrías asociadas con todas las fuerzas son, de hecho, más sutiles y rotan los campos entre sí, los cuales son cantidades complejas. Las simetrías no intercambian simplemente los campos, sino que convierten un campo en una superposición lineal de los otros. La fuerza asociada con el electromagnetismo rota un único campo complejo, mientras que la fuerza débil rota dos campos complejos entre sí, y la fuerza fuerte rota tres. <<

[M17] Para hacer que funcione un modelo de Higgs, al menos uno de los campos de Higgs ha de estar forzado a tomar un valor no nulo. Esto sería cierto si la configuración de energía mínima se da cuando el valor de al menos uno de los campos de Higgs es no nulo. Una manera en que esto puede ocurrir se ilustra en la figura A2, que muestra lo que se llama el potencial del sombrero mexicano, una representación gráfica de la energía que tomaría el sistema para cualquier combinación de valores de los dos campos de Higgs, donde los dos ejes inferiores son los valores absolutos de los dos campos de Higgs y la altura de la superficie tridimensional representa la energía de esa configuración concreta. Este potencial concreto toma la forma donde λ determina cuán abombado es el potencial y v determina el valor que tomará cuando el potencial sea mínimo. La propiedad clave de este potencial es que, cuando ambos campos tienen valor cero, esto se da en un máximo local. Por lo tanto, consideraciones sobre la energía nos dicen que los campos de Higgs no serán ambos cero. Por el contrario, tomarán valores que los coloquen en el fondo del cuenco circular que rodea el origen.

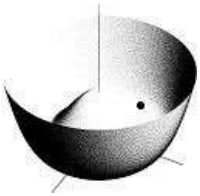


FIGURA A2. El potencial del «sombrero mexicano» para el campo de Higgs.

<<

[M18] Una manera más precisa de describir la simetría de la fuerza débil sería decir que rota los campos, más que intercambiarlos. <<

[M19] Esto simplifica, de hecho, la ruptura de la simetría. Incluso si x e y fueran ambos no nulos —por ejemplo, si x e y fueran ambos 5— la simetría rotacional se rompería ya que se elige una dirección particular, la dirección que apunta desde $x = 0$, $y = 0$ al punto donde $x = 5$, $y = 5$. Una simetría «rotacional» análoga se aplica a Higgs_1 y Higgs_2 , pero he simplificado y descrito la simetría sencillamente como una simetría de intercambio. En la

descripción auténtica, incluso si ambos campos de Higgs toman el mismo valor, la simetría de la interacción débil se rompería, de un modo muy parecido a lo que ocurre cuando el punto $x = 5$, $y = 5$ rompe espontáneamente la simetría rotacional. <<

[M20] Aunque este modelo arranca con dos campos complejos de Higgs, al final solamente hay una única partícula de Higgs. Esto es así porque los otros tres campos (reales) se convierten en los tres campos adicionales que se requieren para convertir tres partículas sin masa con dos polarizaciones físicas en partículas con masa con tres polarizaciones. Tres de los campos de Higgs se convierten en la tercera polarización de cada uno de los tres bosones gauge débiles pesados: los dos W y el Z. El cuarto campo de Higgs que queda crearía auténticas partículas de Higgs. Si este modelo es correcto, el LHC las produciría. <<

[M21] La intensidad de cada una de las fuerzas está determinada por un coeficiente numérico. Los cálculos del grupo de renormalización muestran que los valores de estas cantidades cambian logarítmicamente con la energía. <<

[M22] Mientras que la simetría de la fuerza débil mezcla pares de campos y la simetría de la fuerza fuerte mezcla tres campos, el grupo de simetría de la gran unificación (GUT) de Georgi-Glashow mezcla cinco campos. Algunas de las transformaciones simétricas asociadas con las fuerzas de la GUT coinciden con las transformaciones simétricas de la fuerza débil y de la fuerza fuerte. Las fuerzas se unifican porque un único grupo de simetría de transformaciones incluye todas las transformaciones simétricas del modelo estándar. <<

[M23] Esta conexión con el espacio y el tiempo es, de hecho, más manifiesta cuando se realizan dos transformaciones supersimétricas una tras otra, primero en un orden y luego en el otro, y después se restan. En este caso, los fermiones siguen siendo fermiones y los bosones siguen siendo bosones, pero el sistema se mueve; el resultado neto de la transformación es exactamente el mismo que el de una transformación convencional del espacio-tiempo. El conmutador de las dos transformaciones supersimétricas, que realiza exactamente la misma operación que una única transformación simétrica del espacio-tiempo, demuestra decisivamente que las transformaciones supersimétricas deben estar conectadas con las simetrías que actúan sobre el espacio y el tiempo y mueven las cosas por ahí. <<

[M24] La trayectoria de una partícula es una línea que da la posición de la partícula en función del tiempo. La trayectoria de una cuerda es una superficie que describe la posición de la cuerda entera según se mueve en el tiempo. La superficie representa el movimiento de una cuerda abierta, mientras que el tubo representa el movimiento de una cuerda cerrada. Esto se muestra en la figura A3, que ilustra el movimiento en el tiempo y las interacciones «más suaves» de las cuerdas.

FIGURA A3. (Figura de la izquierda). El mundo en una línea de una partícula, el mundo en una hoja de una cuerda abierta y el mundo en un tubo de una

cuerda cerrada. (Figura de la derecha). Interacciones de tres partículas y de tres cuerdas.

<<

[M25] La tensión de la cuerda no es siempre tan alta como nos indica la energía de la escala de Planck. Depende de cuán intensamente interactúan las cuerdas. Joe Lykken y otros han considerado la posibilidad de que sea mucho más pequeña, caso en el que las partículas adicionales de la teoría de cuerdas podrían ser mucho más ligeras. <<

[M26] De hecho, según la dualidad que describimos en este capítulo, incluso las sondas que se utilizan para estudiar una versión dada de la teoría de cuerdas cambian de carácter cuando el acoplamiento se hace fuerte. Así que si Ike fuera parte realmente del mundo de las cuerdas, él también cambiaría. <<

[M27] También pueden extenderse en dimensión cero, y entonces son nuevos tipos de partículas que se llaman branas D0, o en dimensión uno, y en ese caso son nuevos tipos de cuerdas llamadas branas D1. <<

[M28] Las branas no interactúan necesariamente a través de cargas ordinarias. Interactúan a través de una generalización en dimensión superior de las cargas. <<

[M29] La simetría de hecho rota unas branas con otras, pero esto está fuera del alcance técnico de este libro (y haría que a Ike le diera vueltas la cabeza). <<

[M30] Normalmente, las masas del gaugino están en una proporción de 1 : 3 : 30, donde el fotino es el más ligero, los winos vienen a continuación (aunque el zino podría ser un poco más pesado o un poco más ligero que los winos) y los gluinos son los más pesados. En los modelos secuestrados la razón es 1 : 2 : 8, donde los winos son los más ligeros, el fotino es más pesado y el gluino es, de nuevo, el más pesado. <<

[M31] Las funciones de onda de los modos de Kaluza-Klein son los modos que aparecen en la descomposición de Fourier generalizada de la función de onda de dimensión superior. <<

[M32] Esto también supone que no hay singularidades en la geometría del espacio-tiempo, es decir, que no hay ningún punto en el que el espacio se colapse y se haga de tamaño cero. <<

[M33] D. Cremades, S. Franco, L. Ibáñez, F. Marchesano, R. Rabadan y A. Uranga también sugirieron una interesante alternativa. Su idea es que las partículas no están confinadas en una brana individual, sino que están, por el contrario, confinadas en las intersecciones de múltiples branas. Como en el caso de las branas separadas paralelas, las cuerdas tendidas entre branas serán generalmente pesadas. Pero las partículas ligeras o sin masa surgen de

las cuerdas de longitud cero, que en este caso estarían confinadas en la región donde se cortan las branas. <<

[M34] También podemos probar esto de un modo ligeramente diferente con un argumento más matemático. Cuando hay dimensiones enrolladas, las líneas de fuerza que parten de un objeto con masa se comportan siguiendo la ley gravitatoria de la teoría de dimensión superior a cortas distancias y siguiendo la gravedad tetradimensional a largas distancias. La única manera de reconciliar las dos leyes que rigen la fuerza y pasar suavemente de la una a la otra es observando que, aproximadamente a la distancia que corresponde a los tamaños de las dimensiones extras, las líneas de fuerza se dispersan como si hubiera solamente cuatro dimensiones, pero con una intensidad reducida a causa del volumen extra del espacio enrollado. Más allá del tamaño de las dimensiones extras, la gravedad se comporta de modo tetradimensional, pero con su intensidad reprimida por su dispersión por el volumen extradimensional.

La ley de la gravitación de Newton dice que cuando hay tres dimensiones espaciales, la fuerza es proporcional a $1/M_{Pl}{}^2 \times 1/r^2$. Si hay n dimensiones adicionales, la ley de la fuerza sería $1/M^{n+2} \times 1/r^{n+2}$, donde M fija la intensidad de la gravedad extradimensional, igual que M_{Pl} fija la intensidad de la gravedad tetradimensional. Obsérvese que la ley de la fuerza de dimensión superior varía más rápidamente con r ya que las líneas de fuerza se dispersarían por una hiperesfera cuya superficie tendría $n + 2$ dimensiones (en vez de la superficie bidimensional de una esfera que da lugar a la ley de la fuerza en el espacio tridimensional). Sin embargo, cuando el volumen extradimensional es finito y las n dimensiones extras tienen tamaño R , la ley de la fuerza será $1/M^{n+2} \times 1/R^n \times 1/r^2$ cuando r es más grande que R y las líneas de fuerza no pueden ya extenderse en las dimensiones extras. Ésta es la forma de una ley de fuerza en tres dimensiones espaciales si hacemos la identificación $M_{Pl}{}^2 = M^{n+2} R^n$. Como R^n es el volumen del espacio de dimensión superior, vemos que la intensidad de la gravedad decrece con el volumen, o equivalentemente (ya que la intensidad de la gravedad es más débil cuanto más grande es la energía de la escala de Planck), la energía de la escala de Planck es grande si el volumen es grande. <<

[M35] Una métrica plana con tres dimensiones espaciales es $\mathrm{d}s^2 = \mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 - c^2\,\mathrm{d}t^2$. Como no hay coeficientes que dependan del espacio o del tiempo, las mediciones son independientes de dónde estamos o de en qué dirección miramos; es decir, el espacio-tiempo es completamente plano. Las tres coordenadas espaciales, así como la coordenada del tiempo (dejando a un lado el signo menos que siempre distingue el tiempo), se tratan igual; esto es, los coeficientes de los términos de la métrica son completamente independientes de la localización en el espacio y en el tiempo. <<

[M36] La métrica en la geometría arqueada es $\mathrm{d}s^2 = e^{-k|r|}(\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 - c^2\,\mathrm{d}t^2) + \mathrm{d}r^2$, donde r es la coordenada de la quinta dimensión. Esto nos dice que en cualquier localización fija de la quinta dimensión, que corresponde a un r fijo, el espacio-tiempo es completamente plano. Sin

embargo, el factor global que depende de r nos dice cómo medir los cambios de tamaño según la posición de un objeto en la quinta dimensión. La naturaleza exponencial negativa del coeficiente, que es el factor de arqueo, es la razón por la que la función de probabilidad del gravitón cae exponencialmente, y también la razón por la que necesitamos reajustar las escalas de la masa, la energía y el tamaño para construir una única teoría efectiva de dimensión cuatro. <<

[M37] Como el espacio no es plano, el volumen extradimensional que entra cuando calculamos M_{Pl} en cuatro dimensiones no es simplemente $M_{Pl}\,3R$, como sería si el espacio fuera plano. Por el contrario, el valor de M_{Pl} depende de la curvatura. Si la métrica tiene la forma $\mathrm{d}s^2 = e^{-k|r|}(\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 - c^2\,\mathrm{d}t^2) + \mathrm{d}r^2$, donde r es la coordenada de la quinta dimensión, entonces, más o menos, ${M_{Pl}}^2 = {M}^3/k$. En otras palabras, el tamaño del espacio es, en gran medida, irrelevante. Esto tiene sentido porque la curvatura del espacio —no el tamaño de la dimensión extra— determina cómo las líneas del campo se extienden en la dimensión extra y de aquí la intensidad de la gravedad tetradimensional. De hecho, hay una pequeña dependencia respecto de R: la fórmula real es ${M_{Pl}}^2 = {M}^3/k\,(1 - e^{-kR})$, pero cuando kR es grande, el término exponencial es, en gran medida, irrelevante y puede ser despreciado. <<

[M38] El factor de arqueo en el modelo de la gravedad localizada localmente que Andreas Karch y yo desarrollamos es la suma de una función exponencial decreciente (como en las geometrías arqueadas que hemos considerado ya) y una función exponencial creciente. Es proporcional a $\cosh(kc - k|r|)$, donde k está relacionada con la energía del bulto y c está relacionada con la energía de la brana. Como el factor de arqueo de la gravedad localizada que hemos considerado ya, este factor de arqueo cae exponencialmente según uno se aleja de la brana. Pero, al contrario que en el caso anterior, el factor de arqueo se da la vuelta y entonces crece exponencialmente. El gravitón tetradimensional está localizado en la región comprendida entre la brana y este «punto de inversión». Más allá de esta distancia, la gravedad tetradimensional ya no tiene ninguna vigencia. <<

[M39] La T-dualidad intercambia el radio de compactación r y su inverso $1/r$ (con las distancias medidas en unidades de longitud de la cuerda). <<

[M40] Los físicos Csaba Csaki, Joshua Erlich y Christophe Grojean han hecho, sin embargo, la interesante observación de que la velocidad de la luz y la velocidad de la gravedad pueden ser diferentes (la velocidad de la gravedad puede, de hecho, ser superior) si hay un espacio-tiempo *arqueado asimétricamente* en el que los ajustes de escala de las coordenadas del tiempo y las espaciales a lo largo de la quinta dimensión son diferentes entre sí. <<

Notas

[1] Discutiremos con más detalle el modelo estándar en el § 7. <<

[2] Éstas son preguntas que en efecto alguna vez me han hecho. <<

[3] Si nos ponemos puntillosos, podemos objetar que también Sam tiene su edad y, por lo tanto, una dimensión más. No obstante, como he supuesto que Sam no ha cambiado nada durante años, su edad no tiene relevancia ninguna. <<

[4] Éste y los demás números precedidos por una «M» (M1, M2, …) que aparecen como superíndices se refieren a las notas matemáticas del final del libro. <<

[5] Roald Dahl, *Charlie and the Chocolate Factory* , Londres, Puffin Books, 1998 [ed. esp.: *Charlie y la fábrica de chocolate* , Madrid, Alfaguara, 2005]. <<

[6] El título completo es *Planilandia: una novela de muchas dimensiones* , Barcelona, Olañeta, 2001. <<

[7] «*Abbott* » suena como «*both* », que en castellano significa «ambos» o «dos»; «*square* » quiere decir «cuadrado». (*N. del T* .). <<

[8] En *Flatland* (1965), película de dibujos animados dirigida por Eric Martin, salían las voces de Dudley Moore y otros actores de la compañía teatral británica de comediantes Beyond the Fringe. Era muy entretenida. <<

[9] Las lonchas de jamón tienen, sin embargo, algo de grosor, de modo que en realidad son finas pero tridimensionales. Su magnitud en esta dimensión extra es tan pequeña que pensar que son bidimensionales resulta una buena aproximación a la realidad. No obstante, incluso en los casos en los que las lonchas bidimensionales sean arbitrariamente finas, es fácil imaginar que al colocarlas de nuevo juntas se reconstruye un objeto tridimensional. <<

[10] De nuevo, para que las páginas fuesen de verdad bidimensionales tendrían que ser infinitamente finas, sin grosor alguno en la tercera dimensión. Por ahora, sin embargo, pensar que unas páginas tan finas como éstas tienen dos dimensiones es una buena aproximación a la realidad. <<

[11] Quizá esta historia sea el resultado de haber iniciado mi educación primaria en la escuela pública número 179, en Queens, llamada Lewis Carroll, nombre quizá no muy atinado. <<

[12] En este capítulo y en el siguiente nos limitaremos a las dimensiones espaciales. Después de presentar la relatividad, pasaremos al espacio-tiempo, y consideraremos el tiempo como una dimensión adicional. <<

[13] Usaré a veces la notación científica para representar números muy grandes o muy pequeños. Cuando una potencia de diez tiene un exponente negativo, como 10^{-33} , indica un número decimal; por ejemplo, 10^{-33} es el número 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 001. Este número es extremadamente diminuto y resultaría muy incómodo escribirlo entero cada vez que aparece. Un número con un exponente positivo, como 10^{33} , tiene 33 ceros después de un 1: 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000; se trata de un número enorme y sería difícil escribirlo entero cada vez. Con frecuencia expresaré un número, la primera vez que lo use, tanto con palabras como con su notación científica. <<

[14] Un orden de magnitud es un factor de diez. Veinticuatro órdenes de magnitud es 1 000 000 000 000 000 000 000 000, o un billón de billones. <<

[15] La manguera de jardín ha sido siempre un símil muy popular para ilustrar las dimensiones enrolladas. Yo lo descubrí en el campamento veraniego para actividades matemáticas y ha sido descrito más recientemente en la obra de Brian Greene *Elegant Universe* , Norton, 1999; Vintage, 2000 [ed. esp.: *El universo elegante* , Barcelona, Crítica, 2001]. Usaré esta misma analogía por ser tan buena y porque quiero desarrollarla más en la próxima sección (y en capítulos posteriores), en la que incluiré también aspersores para explicar la gravedad extradimensional. <<

[16] En este libro, un objeto «masivo» significa un objeto con masa. Hay que distinguir un objeto masivo de un objeto «sin masa», que tiene masa cero (y que viaja a la velocidad de la luz). <<

[17] Sólo un año después de la última vez que los Red Sox de Boston ganaron la Serie Mundial antes de 2004, o sea, hace mucho tiempo. <<

[18] Citado en Anne Midgette, «At 3 score and 10, the music deepens», *New York Times* , 28 de enero de 2005. <<

[19] Discurso dirigido a un grupo de físicos de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, en 1900. <<

[20] Discurso presidencial a la Asociación Británica, 1871. <<

[21] La historia podría ser apócrifa, pero el razonamiento no lo es. <<

[22] Carta de Isaac Newton a Robert Hooke, 5 de febrero de 1675. <<

[23] Gerald Holton, *Einstein, History and Other Passions* , Cambridge, Harvard University Press, 2000 [ed. esp.: *Einstein, historia y otras pasiones* , Madrid,

Taurus, 1998]. <<

[24] Carta a E. Zschimmer del 30 de septiembre de 1921. <<

[25] La velocidad vectorial incluye la velocidad propiamente dicha y su dirección. <<

[26] Peter Galison, *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time* , Nueva York, W. W. Norton, 2003 [ed. esp.: *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré. Los imperios del tiempo* , Barcelona, Crítica, 2005]. <<

[27] No me malinterpreten. Me gustan los trenes. Pero me gustaría que estuvieran mejor gestionados en Estados Unidos. <<

[28] Aunque los trenes americanos no siempre coordinan el tiempo muy bien, Amtrak parece reconocer la teoría de la relatividad cuando dice «el tiempo y el espacio para usarlo» en su frase promocional para el Acela, el tren de alta velocidad que viaja por el corredor del Noreste. Sin embargo, el «tiempo» y el «espacio» no son precisamente intercambiables. Aunque la frase promocional «el espacio y el tiempo para usarlo» sí que describe bastante bien los viajes en tren con retrasos más pesados que he hecho, la frase no sería un anuncio muy irresistible para un tren de alta velocidad. <<

[29] Galileo hizo el experimento cronometrando objetos que dejaba caer rodando por un plano inclinado. <<

[30] Albert Einstein, «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen», *Jahrbuch der Radioaktivität und Electronik* , vol. 4 (1907), pp. 411-462; véase también Abraham Pais, *Subtle is the Lord* , Filadelfia, Asociación Filológica Americana, 1982 [ed. esp.: *El señor es sutil* , Barcelona, Ariel, 1989]. <<

[31] János Bolyai era un genio, pero aunque su padre, Farkas Bolyai, quería que fuera matemático, János era pobre y tuvo que seguir la carrera militar, en lugar de la académica. Hubo quienes, al principio, hicieron dudar a János respecto del valor de su trabajo sobre la geometría no euclídea y, finalmente, lo publicó sólo porque su padre insistió en que apareciera en un libro que estaba escribiendo. Farkas, que era amigo de Gauss, envió a éste el apéndice que había escrito su hijo. Pero János sufrió de nuevo una decepción. Aunque Gauss reconoció el genio del joven, se limitó a responder: «Alabarlo sería tanto como alabarme a mí mismo. Pues todo el contenido del trabajo […] coincide casi exactamente con mis propias meditaciones, que han ocupado mi mente durante los últimos treinta o treinta y cinco años». (Carta de Gauss a Farkas Bolyai, 1832). Así quedó frustrada de nuevo la carrera matemática de János. <<

[32] Como el campo gravitatorio transporta energía, la energía del campo ha de tenerse en cuenta a la hora de usar las ecuaciones de Einstein. Esto hace que resolver el campo gravitatorio de Einstein sea más sutil que hacerlo en el caso de la gravedad newtoniana. <<

[33] Esto lo hizo cuando estaba en el frente ruso, sirviendo en el ejército alemán, durante la primera guerra mundial. <<

[34] Neil Ashby, «Relativity and the Global Positioning System», *Physics Today* , mayo de 2002, p. 41. <<

[35] El nombre se refiere al electrón, no al personaje de la mitología griega. <<

[36] Citado en Gerald Holton y Stephen J. Brush, *Physics, the Human Adventure, from Copernicus to Einstein and Beyond* , Piscataway, Nueva York, Rutgers University Press, 2001. <<

[37] Gerald Holton, *The Advancement of Science, and Its Burdens* , Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1998. <<

[38] Citado en Gerald Holton y Stephen J. Brush, *Physics, the Human Adventure, from Copernicus to Einstein and Beyond* , *op. cit* . <<

[39] *Ultravioleta* significa «de alta frecuencia». <<

[40] Un cuerpo negro es, de hecho, una idealización; los objetos reales como el carbón no son cuerpos negros perfectos. <<

[41] «[…] a cualquier precio, esto es, sin que afecte a la inviolabilidad de las dos leyes de la termodinámica». Citado en David Cassidy, *Einstein and Our World* , 2.ª edición, Atlantic Highlands, Nueva York, Humanities Press, 2004. <<

[42] Abraham Pais, *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein* , *op. cit* . <<

[43] Gerald Holton, *Thematic Origins of Scientific Thought* , ed. revisada, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1988. <<

[44] Citado en Abraham Pais, *Inward Bound: On Matter and Forces in the Physical World* , Oxford, Oxford University Press, 1986. <<

[45] Los enteros son los números usuales: 0, 1, 2, 3 y demás. <<

[46] Aquí nos estamos concentrando en los espectros discretos. Cuando un electrón es absorbido por un ión, el espectro de la luz que se emite no es discreto, sino continuo. <<

[47] La longitud de onda es igual a la constante de Planck dividida por el momento. <<

[48] Aunque precisamos tres coordenadas para especificar un punto en el espacio, a veces simplificamos las cosas y hacemos como si la función de onda dependiera sólo de una coordenada. Esto hace que sea más fácil dibujar funciones de onda en una hoja de papel. <<

[49] Ayudó incluso a descifrar la piedra de Rosetta. <<

[50] Las personas podemos, de hecho, detectar fotones sueltos, pero sólo en experimentos cuidadosamente diseñados. Normalmente, lo que vemos es la luz corriente que está hecha de multitud de fotones. <<

[51] Werner Heisenberg, *Physics and Beyond: Encounters and Conversations* , trad. de Arnold Pomerans, Nueva York, Harper & Row, 1971. <<

[52] En la misma obra. Impulsado por su sentimiento nacionalista alemán, participó también en el proyecto de bomba atómica alemán. <<

[53] Gerald Holton, *The advancement of Science, and Its Burdens* , *op. cit* . <<

[54] El GeV es una unidad de energía que explicaré enseguida. <<

[55] Estamos suponiendo en este ejemplo que el grifo gotea uniformemente, lo cual no siempre es cierto en los grifos de verdad. <<

[56] No voy a deducir aquí el número preciso. <<

[57] El razonamiento anterior no es del todo suficiente para explicar plenamente el auténtico principio de incertidumbre, porque nunca podemos estar seguros de que estamos midiendo la verdadera frecuencia si la medimos solamente en un intervalo finito de tiempo. ¿Seguirá goteando el grifo para siempre? ¿O goteó solamente mientras estábamos haciendo las mediciones? Aunque es algo más sutil de demostrar, nunca podremos obtener un resultado mejor que el que predice el auténtico principio de incertidumbre, aunque tengamos un cronómetro más exacto. <<

[58] Ésta es la misma magnitud a la que me referí simplemente como la «longitud de Planck» en capítulos anteriores. <<

[59] El vocablo inglés *spin* significa «giro». (*N. del T* .). <<

[60] Para los que sepan ya algo de física, diré que el espín clásico es el momento angular orbital. <<

[61] A pesar de la denominación de «modelo estándar», hay ambigüedad sobre lo que este nombre abarca. Algunos incluyen también en él la hipotética partícula de Higgs. Sin embargo, el nombre debería referirse solamente a las partículas conocidas, y ésta es la convención que uso yo. Discutiremos la partícula de Higgs en el capítulo 10. <<

[62] Tienen la columna vertebral muy flexible y no tienen clavículas, de modo que pueden retorcer el cuerpo conservando el momento angular. De hecho, este problema se sigue estudiando activamente. <<

[63] Richard Feynman dijo: «Considerada la historia de la humanidad a largo plazo —digamos, por ejemplo, contemplada dentro de diez mil años—, no cabe duda de que se pensará que el suceso más significativo del siglo XIX fue el descubrimiento que hizo Maxwell de las leyes de la electrodinámica» (*The Feynman Lectures on Physics* , Reading, Massachusetts, Addison Wesley Longman, 1970, vol. II). <<

[64] Se ha llegado a esto mediante la medición de una magnitud conocida como el momento magnético anómalo del electrón. <<

[65] El término inglés *gauge* significa «ancho de vía». (*N. del T* .). <<

[66] En el capítulo 11 veremos que estas partículas se denominan también *partículas virtuales* . <<

[67] La electrodinámica cuántica es la teoría cuántica de campos aplicada al electromagnetismo. <<

[68] En la física de partículas, estas fuerzas son las fuerzas fundamentales, dejando de lado la gravedad (esto es, la fuerza débil, la fuerza fuerte y la fuerza electromagnética). <<

[69] Título que no obtuvo únicamente por su trabajo científico, sino también por su oposición a la autonomía de Irlanda. <<

[70] Rutherford presentó sus resultados, pero sabía que, al hacerlo, estaba contradiciendo a Kelvin. La biografía de Rutherford escrita por A. S. Eve cita sus propias palabras: «Entré en la sala, que estaba a media luz, vi en el acto a lord Kelvin entre el público y caí en la cuenta de que la última parte de mi charla, que trataba sobre la edad de la Tierra, podría resultar problemática, ya que en este punto mis opiniones chocaban con las suyas. Para mi alivio, pronto Kelvin se quedó dormido, pero, al acercarme al punto importante, ¡vi cómo el viejo zorro se incorporaba en su asiento, abría el ojo y me lanzaba una funesta mirada! Entonces me vino una inspiración repentina y dije: “Lord Kelvin ha puesto un límite a la edad de la Tierra, al menos mientras no se descubra una nueva fuente de conocimiento. Esa afirmación profética se refiere a lo que estamos considerando esta noche, ¡el radio!”. ¡Increíble! El viejo camarada me sonrió abiertamente». A. Eve, *Rutherford, Being the Life and Letters of the Rt. Hon. Lord Rutherford, O. M.* , Cambridge, Cambridge University Press, 1939. <<

[71] Sin embargo, la interacción débil había sido observada antes, y se sabía que se producían mecanismos nucleares en el interior del Sol. Pero su conexión con la fuerza débil sólo se conoció más tarde. <<

[72] En realidad, es un antineutrino, pero esto no es importante aquí para nosotros. <<

[73] Se conocen las palabras exactas porque fueron reproducidas en una carta que se envió en 1934 a los participantes de un importante encuentro científico, al que Pauli no acudió por ir a un baile. <<

[74] Los neutrinos fueron finalmente detectados en un reactor nuclear por Clyde Cowan y Fred Reines en 1956, eliminando todas las dudas que quedaban. <<

[75] Un modo de ver que la mecánica cuántica y la relatividad especial son importantes para esta relación es que la constante de Planck nos dice que la mecánica cuántica participa en esto y la velocidad de la luz nos dice que eso mismo sucede con la relatividad especial. La distancia sería cero si la constante de Planck fuera cero (y fuera válida la física clásica) o si la velocidad de la luz fuera infinita. <<

[76] Y George Zweig, aunque el artículo de este último nunca fue publicado. <<

[77] James Joyce, *Finnegans Wake* , traducción y versión de la obra completa de Víctor Pozanco, Barcelona, Lumen, 1993, p. 139. <<

[78] Ahora sabemos que son seis. <<

[79] Éste es el origen de la palabra *cromodinámica cuántica. Cromos* es la palabra griega que significa «color». <<

[80] Los neutrinos van adjetivados siguiendo el criterio de los leptones cargados con los que interactúan directamente mediante la fuerza débil. <<

[81] Se refiere al Betatrón, un acelerador de partículas que entró en funcionamiento en 1954 en la Universidad de California en Berkeley y que fue desmantelado en 1993. (*N. del T* .). <<

[82] Estoy describiendo la simetría en términos de las consecuencias de una transformación, pero, como siempre, la simetría es una propiedad del sistema estático. Esto es, el sistema posee simetría aunque, de hecho, no llevemos a cabo la transformación. <<

[83] La galleta Oreo consiste en una suerte de bocadillo hecho con dos pastas redondas con crema entre ellas. <<

[84] Esto va en dirección contraria a la de la terminología de las técnicas de venta estadounidense, que llaman grande a lo que es pequeño. <<

[85] Recuérdese que la mecánica cuántica y la relatividad especial hacen que

las energías y las distancias sean intercambiables. Por claridad, hablaré ahora en términos de la energía, pero los procesos que conciernen a las altas energías son los mismos que aquellos que conciernen a las distancias cortas. <<

[86] Ésta es una versión modificada del término *principio totalitario* de Murray Gell-Mann, pero pienso que el término *principio de anarquía* es una mejor aproximación a la realidad física a la que se aplica. <<

[87] Recuérdese que el principio de incertidumbre relaciona la incertidumbre sobre la longitud con la inversa de la incertidumbre sobre el momento. <<

[88] Howard Georgi y S. L. Glashow, «Unity of all elementary-particle forces», *Physical Review Letters* , vol. 32 (1974), pp. 438-441. <<

[89] Esto se conoce como la *hipótesis del desierto* . <<

[90] Recuérdese que las masas de las partículas virtuales no son las mismas que las masas de las auténticas partículas físicas. <<

[91] Pierre Ramond, Julius Wess, Bruno Zumino, Sergio Ferrara y otros en Europa; e, independientemente, Y. A. Gol'fand, E. P. Likhtman, D. V. Volkov y V. P. Akulov en la Unión Soviética. <<

[92] El universo contiene energía oscura (energía que no está en forma de materia de ningún tipo), que constituye el 70% de su energía total. Aunque podría explicar la materia oscura, ni la supersimetría ni ninguna otra teoría, explica la energía oscura. <<

[93] Téngase en mente que las relaciones de la mecánica cuántica nos dicen que mientras la longitud de la escala de Planck es minúscula, la energía de la escala de Planck es enorme. <<

[94] En realidad lo que se intercambia es un fotón virtual y no un fotón físico real. <<

[95] De hecho, la compactación en una variedad de Calabi-Yau conservaba la cantidad justa de supersimetría precisa para que la teoría reprodujera las características del modelo estándar. Demasiada supersimetría, y sería imposible que hubiera partículas levógiras con interacciones diferentes de las que tienen las partículas dextrógiras. <<

[96] D. Gross, J. Harvey, E. Martinec y R. Rohm, «Heterotic string theory (I): The free heterotic string», *Nuclear Physics B* , vol. 256 (1985), pp. 253-284. <<

[97] Joseph Polchinski, *String Theory, Vol. I: An Introduction to the Bosonic String* , Cambridge, Cambridge University Press, 1998. <<

[98] Aunque podamos usar la teoría de la perturbación cuando el acoplamiento es muy débil, o cuando hay una descripción dual con interacciones débiles de una teoría con interacciones fuertes, no hay modo de utilizar la teoría de la perturbación cuando la intensidad de interacción está en el punto medio, o sea, en torno a 1. Esto significa que incluso cuando hay una descripción dual no tenemos una solución completa de la teoría. <<

[99] En realidad, se trata de una partícula compuesta de branas D0. <<

[100] Igor es el nombre popular que recibe el ayudante jorobado del doctor Frankenstein y, por extensión, de cualquier científico con fama de loco. (*N. del T* .). <<

[101] Francis Bacon, *On Scientific Inquiry* . <<

[102] John Ellis, Costas Kounnas y Dmitri Nanopoulos también habían considerado, anteriormente, ideas análogas en la teoría de cuerdas. <<

[103] K. Square en la historia. Las partículas KK también se conocen como modos de Kaluza-Klein, donde «modos» se refiere a sus momentos cuantizados. <<

[104] Éste es nuestro modo usual de contar las dimensiones del espacio-tiempo. Nuestra discusión previa de Planilandia en el capítulo 1 iba antes de la relatividad y por eso allí sólo contamos las dimensiones espaciales. <<

[105] Recuérdese que hemos supuesto que no hay branas; esta limitación cambiará en los próximos capítulos. <<

[106] Los físicos cuelgan sus artículos en una red cuya dirección comienza por «xxx»: véase en xxx.lanl.gov. Los filtros de Internet han prohibido también alguna vez el acceso a este sitio. <<

[107] Se refiere a la fusión entre AOL (America Online) y Time Warner, que tuvo lugar en 2001 y que fracasó estrepitosamente a los dos años. (*N. del T* .). <<

[108] Para abreviar, me referiré a ellos colectivamente como ADD. <<

[109] Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos, Gia Dvali, «The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter», *Physics Letters B* , vol. 429 (1998), pp. 263-272. <<

[110] Recuérdese que la *longitud* de la escala de Planck es minúscula, pero la *masa* (o *energía*) de la escala de Planck es enorme. <<

[111] Si son planas (véase el § 22). <<

[112] Como vimos en § 18, las dimensiones extras pueden ser uniformes, grandes y planas. El Conejo tiene dudas a este respecto. <<

[113] En esta cuenta entra también una dimensión temporal. <<

[114] A veces usaré la expresión «tres más una» en vez de «cuatro» cuando quiera enfatizar la distinción entre espacio y tiempo. <<

[115] Realmente, todas las rebanadas tienen la misma geometría; en este caso, las rebanadas son todas planas. <<

[116] Recuérdese que la quinta dimensión es la quinta dimensión del espacio-tiempo y la hipotética cuarta dimensión del espacio. <<

[117] Las unidades en las que se mide la distancia están determinadas por la energía de la brana, que a su vez está determinada por la masa de la escala de Planck. <<

[118] Este número se refiere a unidades de la curvatura, que a su vez queda determinada por la energía que hay en la brana y en el bulto. <<

[119] Los nombres brana de Planck, brana de un TeV o Brana Débil son los términos que suelen usarse en la bibliografía física. La Brana de la Gravedad será la Branesville de la historia del próximo capítulo. El nombre de Brana Débil se refiere al hecho de que se espera que la mayoría de las partículas confinadas en esta brana tengan una masa aproximadamente igual a la masa de la escala débil. <<

[120] Kaustubh Agashe, Roberto Contino, Michael J. May, Alex Pomarol y Raman Sundrum se encuentran entre los físicos que han estudiado modelos detallados de lo que podría aparecer. <<

[121] He tomado prestado el título del delicioso libro de Martin Gardner *Alicia anotada* , en el que se explican los juegos de palabras, los acertijos matemáticos y las referencias de los libros de Lewis Carroll *Alicia en el país de las maravillas* y *A través del espejo* . <<

[122] La brana misma es grande y plana y tiene sólo tres dimensiones espaciales. Únicamente la gravedad establece conexiones con la dimensión adicional. Recuérdese que el espacio de dimensión cinco tiene cuatro dimensiones espaciales (y una temporal), mientras que la brana dispone de tres dimensiones espaciales. Seguiré llamando tiempo a la cuarta dimensión y llamaré quinta dimensión a la dimensión adicional. <<

[123] Branesville es la Brana de la Gravedad. <<

[124] El Gato, a diferencia de los habitantes de Branesville, no está confinado en la Brana. <<

[125] Las cosas son más grandes y más ligeras cerca de Brana Débil. La sombra que proyectaba Atenea sobre Branesville creció al acercarse a Brana Débil y alejarse de la Brana de la Gravedad. <<

[126] La quinta dimensión no tiene por qué ser muy grande para resolver el problema de la jerarquía. <<

[127] La gravedad es débil en la Brana Débil, donde la función de probabilidad del gravitón es pequeña. <<

[128] En la Brana de la Gravedad, la gravedad no es más débil que las otras fuerzas. <<

[129] El malhumorado gravitón se queja de que en la Brana Débil la gravedad es mucho más débil que las fuerzas electromagnética, fuerte y débil. La gravedad sería mucho más fuerte (y tendría una intensidad más parecida a la de las otras fuerzas) si estuviera más cerca de la Brana de la Gravedad. <<

[130] En la Brana Débil las cosas son más grandes y el tiempo transcurre con mayor lentitud. La laxitud del conejo se debe al reajuste de escala del tiempo. <<

[131] La geometría de este capítulo es arqueada, como en los anteriores, pero ahora hay una única brana: la Brana de la Gravedad. Aunque esto significa que hay una quinta dimensión infinita, este capítulo explicará por qué esto es perfectamente compatible con el espacio-tiempo arqueado. <<

[132] Considero un aspersor recto, en vez del aspersor circular que consideré anteriormente, porque es más fácil de generalizar en el contexto arqueado. <<

[133] Una analogía de este tipo tomada de la vida real sería el río Colorado, en el que los embalses y la irrigación aseguran que el agua llega a los Estados Unidos del Suroeste, pero al cual, cuando llega a México, sólo le queda una pequeña cantidad de agua. Poner un embalse cerca del golfo de California (que sería como poner otra brana lejos de la Brana de la Gravedad) no afectaría a la cantidad de agua que recibe Las Vegas. <<

[134] El espacio enrollado sigue siendo matemáticamente «plano». Esto es así porque se puede desenrollar la dimensión y obtener algo que reconocemos como plano; pero esto no es cierto en el caso de una esfera, por ejemplo. <<

[135] Entre ellos están Juan García Bellido, Andrew Chamblin, Roberto Emparan, Ruth Gregory, Stephen Hawking, Gary T. Horowitz, Nemanja Kaloper, Robert C. Myers, Harvey S. Reall, Hisa-aki Shinkai, Tetsuya Shiromizu y Toby Wiseman. <<

[136] Este modelo se conoce también como «KR», siguiendo las iniciales de

nuestros apellidos. <<

[137] Las variedades pueden tener un número diferente de agujeros: por ejemplo, una esfera no presenta agujeros, mientras que un toro —una figura en forma de rosquilla— posee uno. <<

[138] T. Banks, W. Fischler, S. H. Shenker y L. Susskind, «M theory as a matrix model: a conjeture», *Physical Review D* , vol. 55 (1997), pp. 51125128. <<

[139] Las citas están tomadas del artículo de K. C. Cole, «Time, space obsolete in new view of universe», *Los Angeles Times* , 16 de noviembre de 1999. <<