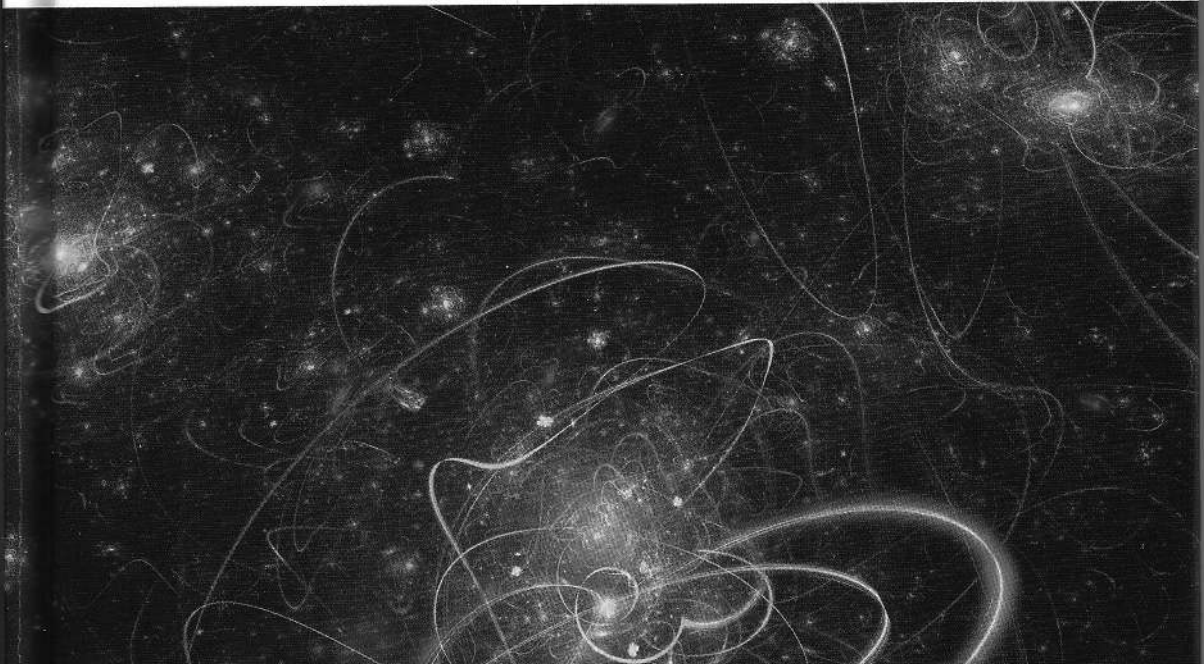
Cuerdas y supercuerdas

La naturaleza microscópica de las partículas y del espacio-tiempo



Un paseo por el
COSMOS

Cuerdas y supercuerdas

La naturaleza microscópica de las partículas y del espacio-tiempo

RBA

Imagen de cubierta: Recreación artística de cuerdas vibrando en el espacio.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

Realización: EDITEC
Diseño cubierta: Llorenç Martí
Diseño interior: tactilestudio
Infografías: Joan Pejoan
Fotografías: Archivo RBA: portada, 66; M.C. Escher Company: 141; The Granger Collection/Age Fotostock: 69; Cynthia Johnson/Getty Images: 31; Nu Xu/Brookhaven National Lab.: 63; Jaime Travezan: 91; Detlev Van Ravenswaay/Science Photo Library/Age Fotostock: 102-103; Yassine Mrabet/Wikimedia Commons: 99.

ISBN: 978-84-473-8387-0
Depósito legal: B-13303-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

¿Por qué cuerdas? A lo largo de la historia de la ciencia se han ido construyendo teorías cada vez más precisas sobre la naturaleza, desde la escala subatómica hasta la cosmológica. En el éxito de esta aproximación sucesiva y acumulativa hay algunas pistas de características profundas y sorprendentes del universo físico. ¿Cómo ha sido posible construir teorías que funcionan muy bien para describir aspectos parciales de la realidad, a pesar de que ignoramos lo que podríamos llamar la teoría final? ¿Cómo es posible describir satisfactoriamente las partes sin comprender el todo? Las ecuaciones de movimiento de Isaac Newton, por ejemplo, funcionan perfectamente para describir el movimiento de un proyectil lanzado al aire, aun si no sabemos de qué está hecho ni cuál es su naturaleza más íntima. Cuando se combinan estas ecuaciones con la también newtoniana ley de la gravitación universal podemos predecir las órbitas de los planetas, a pesar de no saber su orografía, si está habitado o no, su edad, si tiene atmósfera, etcétera.

Esta posibilidad de describir la física a una cierta escala sin la necesidad de conocer los detalles que tienen lugar a escalas más pequeñas no fue comprendida adecuadamente hasta la segunda mitad del siglo XX. Mucho antes, desde los tiempos de la antigua Grecia, la pregunta sobre la constitución última de la materia ya había sido abordada. Si tomamos cualquier material y lo dividimos una y otra vez, ¿llegamos a una unidad mínima e indivisible? Demócrito (460-370 a.C.) y Leucipo de Mileto, de quien no sabemos si fue su maestro o un personaje inventado por el primero para dar un barniz de autoridad a sus ideas, pensaron que sí y llamaron a esa unidad *átomo*; literalmente, «indivisible». Debemos a Aristóteles (384-322 a.C.), un firme y poderoso antagonista de estas ideas, que el atomismo primigenio fuera enterrado por unos cuantos siglos.

Es interesante pensar por un momento en la alternativa al átomo. Si no existiera una unidad mínima, podríamos dividir la materia infinitamente. Un líquido vertido sobre una superficie, por ejemplo una lluvia pertinaz, podría expandirse indefinidamente ya que no habría un límite inferior al espesor del charco formado. Una cucharilla de aceite derramada por descuido en el mar acabaría dando lugar a una delgadísima película que envolvería todos los océanos y mares de la Tierra. Veríamos el tornasol característico de los puertos en cualquier lugar del planeta cubierto de agua. Está claro que esto no es así. Podemos inferir, aun cuando no las hayamos visto, la existencia de unidades mínimas de la materia. Existen las moléculas, cuyas interacciones eléctricas son responsables de lo que llamamos tensión superficial, que es la resistencia que tiene cualquier líquido a aumentar su superficie de contacto con otro medio. De ahí la finitud del charco.

Sabemos que las moléculas están hechas de unidades más elementales, los átomos, y conocemos su clasificación dada por la espléndida tabla periódica del químico ruso Dmitri Mendeléiev (1834-1907). La proliferación de reacciones químicas, sustancias que al combinarse con otras se transforman, o los cambios de una misma sustancia frente a variaciones de temperatura, dan sobrada cuenta de ello. Es importante, particularmente atendiendo a la temática de este libro, subrayar la posibilidad de realizar descubrimientos basados en la inferencia deductiva, aun en ausencia de evidencias experimentales directas. Por supuesto, el escrutinio final en una ciencia natural lo dan los experimentos.

Pero es habitual que estos estén guiados por una intuición que sea fruto del ejercicio exhaustivo y riguroso de la razón pura.

Podemos adentrarnos aún más en la materia, notando que el de átomo es un mal nombre, ya que este es perfectamente divisible. Tiene un núcleo en el que se concentra prácticamente toda su masa, con protones y neutrones, y los electrones más livianos que orbitan a su alrededor. La situación es, en realidad, algo más compleja porque, de ser así, los electrones acabarían por caer al núcleo atómico debido a la radiación electromagnética que, como toda carga acelerada, estarían obligados a emitir. Las leyes de la física cuántica son las que prohíben taxativamente esta inestabilidad del átomo. La perplejidad a la que nos empujan dichas leyes apenas será abordada en estas páginas ya que demandaría un volumen en sí misma.

Pero nos enfrentamos a otro problema. Los protones tienen carga positiva y, por lo tanto, deben repelerse con gran intensidad. Mayor cuanto más cerca estén. Y están casi lo más cerca que es dable estar, apelotonados en el núcleo. De modo que tiene que haber una fuerza atractiva aún más intensa, solo perceptible en la escala del núcleo atómico. Podemos ver esto como un indicio de que los protones están hechos de algo más elemental, los quarks, y que estos constituyentes fundamentales están sujetos a una nueva fuerza —la *interacción fuerte*— que contrarresta a la repulsión eléctrica. Es natural preguntarse si los quarks y electrones no están a su vez hechos de otra cosa. Si acaso la naturaleza íntima de la materia se asemeja a la de una muñeca *matrioshka* sin fin, en la que nuevas sorpresas nos esperan a medida que descendemos en la escalera del tamaño de las cosas. Es útil pensar aquí en la imagen especular de este descenso, mucho más clara para reflexionar sobre este punto, que es el ascenso en la escala de energías. No parece tener sentido preguntarse por los constituyentes de un objeto puntual como el electrón, pero veremos que la noción de punto en física no es exactamente la que aprendemos en las clases de geometría. Por así decirlo, hay puntos más pequeños que otros. Las leyes de la física cuántica, por otra parte, a través del principio de incertidumbre de Heisenberg, liquidan a nivel microscópico la noción estricta de punto.

Los puntos son reemplazados por, digamos, lunares difusos con un tamaño característico que depende del contexto en el cual se esté observando a la partícula.

¿Cuál es la relación entre el tamaño y la escala de energía? Solo podemos determinar el tamaño de un objeto si lo observamos con una resolución adecuada. Si queremos, por ejemplo, determinar los detalles de una superficie rugosa, no apoyamos sobre ella la totalidad de la yema de los dedos sino que intentamos afinar el contacto, poniendo en juego una superficie de la piel de tamaño similar a los detalles que queremos escrutar. La luz tiene una característica análoga a esta propiedad a la que se llama longitud de onda, que es la distancia entre dos de sus crestas (y está relacionada con el color, en el caso de la luz visible). Si queremos observar un objeto más pequeño que la longitud de onda utilizada, simplemente no podremos ver sus detalles porque la resolución será insuficiente. Como si quisiéramos leer braille empleando la palma de las manos en lugar de la punta de los dedos. Así, para poder estar seguros de que un electrón es un punto, deberíamos verlo utilizando luz con longitud de onda arbitrariamente pequeña. Idealmente, con longitud de onda igual a cero. No obstante, al igual que el acortamiento de una cuerda que vibra (por ejemplo, en un instrumento musical) lleva su tono hacia los agudos, cuanto menor es la longitud de onda de la luz, mayor es su frecuencia. Es decir, el número de oscilaciones por segundo. En particular, cuando la longitud de onda tiende a cero la frecuencia tiende a infinito. De los trabajos que escribieron Max Planck y Albert Einstein en los primeros años del siglo XX se deduce que la partícula elemental de la luz, el fotón, tiene una energía proporcional a su frecuencia. Así pues, si la frecuencia se hace infinita, la energía también. Llegamos a la conclusión de que para explorar cuán puntuales son los puntos de la física necesitamos hacer experimentos con energías arbitrariamente altas. Esto es lo que buscan los aceleradores de partículas, como el más potente que tenemos en este momento: el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), ubicado en la sede del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN por sus siglas en francés), cerca de Ginebra, Suiza. La energía alcanzada es ciertamente

muy alta, pero no infinita. La longitud de onda correspondiente a la energía de las colisiones de protones del LHC es de una trillonésima de centímetro. Todavía no hemos encontrado indicios experimentales que indiquen que el electrón o los quarks estén hechos de ladrillos fundamentales más pequeños. Sin embargo, en el plano teórico, en el ejercicio exhaustivo y riguroso del razonamiento deductivo, encontramos motivos de sospecha. Para hablar de ellos, debemos considerar la otra gran teoría del siglo XX.

La teoría de la relatividad general, cuyas ecuaciones fueron escritas por Albert Einstein hace un siglo, nos enseña que el espacio y el tiempo forman un único ente, el espacio-tiempo, y que este es elástico. La materia encuentra allí el escenario de sus vicisitudes; deformándolo, hundiéndose en su tejido flexible, al tiempo que se mueve siguiendo los surcos y hendiduras resultantes. De ello resulta el catálogo de órbitas que definen aquello a lo que identificamos como la interacción gravitatoria y que no son otra cosa que las trayectorias más cortas entre dos puntos de un espacio-tiempo curvo. Una pregunta emerge de forma natural en este contexto. Si la materia tiene unidades fundamentales e indivisibles, ¿las tiene también el espacio-tiempo? ¿Podemos dividirlo una y otra vez, indefinidamente, o nos encontraremos con una unidad mínima, un «átomo de espacio-tiempo»? No nos planteamos estas preguntas en un sentido práctico: todo en nuestra vida cotidiana parece indicar que el espacio y el tiempo son continuos. Pero nuestros sentidos suelen engañarnos. Tanto es así que la materia también nos parece continua. Nuestros órganos sensoriales han sido moldeados por la evolución para desenvolverse en las escalas de tiempo, espacio y materia en las que habitan nuestros cuerpos, nuestros alimentos y depredadores.

Si pudiéramos dividir el espacio-tiempo ilimitadamente, la física cuántica nos depararía un gran dilema. El principio de incertidumbre que formuló el físico alemán Werner Heisenberg en 1927 nos dice que mientras mayor resulte la certeza respecto del instante en el que algún fenómeno ocurre, más grande será la indeterminación de su energía. Algo similar pasa con los volúmenes muy pequeños. En un espacio-tiempo continuo en el que las partículas elementales fueran puntuales, el tamaño cero del punto que estas ocupan iría inexorablemente de la mano de la disponibilidad ilimitada de energía. Ya que una partícula puede estar *a priori* en cualquier sitio, ¡esto valdría para los infinitos puntos del vasto espacio-tiempo! La teoría de la relatividad general, por otra parte, nos dice que la acumulación de suficiente energía en una región pequeña daría lugar a un agujero negro; una singularidad que desgarraría fatalmente el tejido espacio-temporal. De modo que si el espacio-tiempo pudiera dividirse indefinidamente y las partículas elementales fuesen puntuales, ¡el universo estaría infestado de agujeros negros microscópicos!

¿A qué escala del espacio-tiempo es de esperar que el punto de vista clásico de un tejido continuo deje de ser una buena aproximación de la realidad? Una pista nos la brindan las constantes fundamentales de la naturaleza. Estas son cantidades que forman parte de las leyes físicas y que resultan ser las mismas aquí, en Andrómeda y en los confines del universo observable: la velocidad de la luz, la constante de Newton y la constante de Planck. Cada una de ellas representa la marca de identidad de, respectivamente, la relatividad especial, la gravedad y la física cuántica. Existe una única combinación aritmética de estas constantes que da lugar a una escala de longitud. No hay otra forma de generar con ellas algo que pueda medirse en metros. Se la conoce como la escala de Planck y su propia naturaleza deja claro que al llegar a ella crujirán los cimientos de una teoría clásica como la relatividad general. La presencia de la constante de Planck nos indica que la gravitación habrá de ser cuántica a esa escala, y es de esperar que la noción de espacio-tiempo sea reemplazada por otra más exótica y desquiciante, alejada de la percepción de continuidad espacial y temporal a la que estamos habituados.

La escala de Planck es extremadamente diminuta, unas mil billones de veces más pequeña que la que hemos podido explorar hasta este momento con el LHC. Así como en el universo microscópico tenemos dificultades para discernir si un electrón es una onda o una partícula, del mismo modo en que la naturaleza corpórea de los constituyentes de la materia se vuelve elusiva, «sabemos» que al llegar a la escala de Planck la geometría dejará de parecerse a lo que conocemos. Las nociones de punto,

curva y superficie se verán afectadas por el borrón difuso que impregna el principio de incertidumbre. Dicho de un modo más drástico: tenemos buenas razones para pensar que no existe la geometría a esas escalas. Ni el espacio, ni el tiempo. En ese sentido, no es de extrañar que la relatividad general sea incompatible con la física cuántica, cuyas leyes describen con precisión al resto de las interacciones fundamentales. Su reconciliación es fundamental para comprender el evento fundacional de nuestra historia cósmica: los instantes que siguieron al *Big Bang*, momento en que el universo era extremadamente pequeño y energético, es decir, cuántico y gravitacional. Casi nueve décadas de exploración a manos de los físicos más importantes de los siglos XX y XXI no han logrado resolver esta incongruencia de las leyes básicas de la naturaleza. Esto da una idea de la extrema dificultad de la empresa que, en definitiva, intentaremos abordar en estas páginas.

Una posible solución sería pensar que el espacio-tiempo está dividido en celdas fundamentales; como una pared lo está en ladrillos. De ser así, sin embargo, habría inevitablemente direcciones privilegiadas en el espacio-tiempo, como las líneas horizontales o verticales de la pared. Solo las esferas son respetuosas con la simetría, pero podemos comprobar, simplemente con unas pocas naranjas, lo imposible que resulta empaquetarlas sin dejar resquicios. Si bien hay formas sofisticadas de rehuir este argumento, en este libro exploraremos una opción en principio más simple y veremos a dónde nos conduce. Dado que la noción de punto geométrico es puesta en cuestión, exploremos la posibilidad de que las unidades elementales sean minúsculas cuerdas sin espesor. Estamos pensando en cuerdas que no están hechas de nada: son ellas mismas el objeto fundamental. Resulta de esta hipótesis una consecuencia inmediata: tal como ocurre con las de la guitarra, estas cuerdas pueden vibrar y tienen asociado su espectro de notas y armónicos. Para quienes no seamos capaces de discernir los detalles de la diminuta cuerda, lo único que apreciaremos cuando vibre a una frecuencia determinada será la presencia de un objeto que a todos los efectos nos parecerá puntual y cuya masa resultará mayor cuanto más aguda sea la nota. Así, ¡todas las partículas conocidas podrían obtenerse a partir de una única cuerda!

Sin ánimo de socavar precozmente la sorpresa que el lector experimentará al encontrarse con las espectaculares e inesperadas consecuencias de una hipótesis tan simple, y solo a los efectos de dejar asentada en este capítulo introductorio la razón fundamental por la que existen estas páginas, permítasenos adelantar un resultado clave. Al estudiar las propiedades de las partículas que resultan de las vibraciones de estas cuerdas nos encontraremos con una que tiene exactamente las características de un *gravitón*, la partícula cuántica de la gravedad, cuya existencia es aún conjetural. Secreta e inesperadamente, ¡la de cuerdas es una teoría cuántica de la gravedad! De modo que la geometría, a pequeñas escalas, podría no ser otra cosa que una multitud de pequeñas cuerdas vibrando. Nótese que escribimos «una» y no «la» teoría cuántica de la gravedad. Para poder justificar el uso del artículo definido en reemplazo del indefinido necesitaremos el concurso del implacable veredicto de las ciencias naturales: la verificación experimental. Esto nos coloca ante un cuello de botella inusualmente estrecho.

Hay solo tres sistemas físicos que demandan *a priori* una teoría cuántica de la gravedad: el Big Bang, los agujeros negros y el estudio de la colisión de gravitones de muy alta energía (que pudo haber sido relevante en los primeros instantes del universo, cuando este se expandió aceleradamente en un fenómeno al que denominamos *inflación*). Ninguno de ellos es reproducible en un laboratorio. Tendremos que renunciar, indefectiblemente, al dogma del método científico que establece la necesidad de ser capaces de replicar los experimentos. Big Bang ha habido uno solo y habremos de conformarnos con las frágiles evidencias que ha dejado tras de sí. Agujeros negros, en cambio, hay muchos, pero sus rasgos cuánticos son extremadamente difíciles de explorar. Prácticamente imposibles con la tecnología que hoy podemos aventurar. Stephen Hawking demostró que la física cuántica condena a los agujeros negros a tener asociada una temperatura y, debido a ello, a que acaben por evaporarse. Pero resulta de los cálculos que los agujeros negros astrofísicos, cuya

existencia inferimos por lo que vemos en nuestros telescopios, tienen temperaturas absolutas que no superan la diezmillonésima parte de la temperatura del universo y su evaporación insumiría no menos de mil trillones de trillones de trillones de veces su edad.

Es interesante explorar el caso del agujero negro supergigante Sgr A* que se encuentra en el centro de nuestra Vía Láctea, a casi 30 000 años-luz de nosotros. Con una masa que es más de cuatro millones de veces la del Sol, su temperatura es de una diez billonésima de grado sobre el cero absoluto. Como referencia, las fluctuaciones estadísticas del Fondo Cósmico de Microondas (CMB, *Cosmic Microwave Background*) son mil millones de veces más grandes. Un agujero negro cuya temperatura estuviera por encima de la del CMB tendría una masa inferior a la de la Luna: descubrirlo por sus efectos gravitatorios sería extremadamente improbable. Podríamos enfocar, aun así, nuestros telescopios hacia el lugar en el que sabemos que se encuentra Sgr A*. Sin embargo, la potencia de la radiación que emite es tan baja que harían falta diez millones de trillones de trillones de agujeros negros de su tipo para que emitieran lo mismo que... ¡una bombilla doméstica!

En cuanto a la colisión de gravitones de muy alta energía, podríamos ser algo más afortunados ya que, si bien estas habrían tenido lugar en los primeros instantes del universo, inmediatamente después del Big Bang, tendrían que haber dejado una impronta sutil en la polarización de la luz del CMB. Su detección es, en cualquier caso, extremadamente compleja. Hasta la fecha ha sido imposible y es de esperar que sean necesarias varias décadas más de experimentación para poder determinar fehacientemente su eventual existencia.

Ausente la posibilidad de replicar experimentos y condenados a avanzar escrutando minuciosa y rigurosamente las frágiles y escasas evidencias, como lo haría un detective, tendremos que aguzar el ingenio y colocar en el centro de la escena al razonamiento deductivo, dejándolo trabajar con un generoso voto de confianza. No crea el lector que este camino está exento de dificultades o que esta estrategia nos ofrece una arbitrariedad excesiva, incompatible con el método científico. Muy por el contrario, encontraremos duras pruebas de consistencia interna, la necesidad de dar acabada y satisfactoria respuesta a los tres fenómenos descritos en el párrafo anterior y, quizá lo más delicado, tendremos que ser capaces de recuperar la física conocida cuando corresponda: la teoría de la relatividad general y el modelo estándar de las partículas elementales tendrán que emerger como una consecuencia inexorable de esta nueva teoría que a partir de este momento comenzaremos a bosquejar.

La teoría de cuerdas es un tema de frontera en el que no está dicha la última palabra. Es un proyecto de casi medio siglo que permanece aún en construcción. El lector tendrá que aprender a convivir con ello o, mejor aún, disfrutar del vértigo de saber que se trata de un campo en el que están teniendo lugar avances importantes al mismo tiempo en que estas líneas son escritas y leídas. Del frente de batalla llegarán buenas noticias, en ocasiones excelentes. Pero también habrá otras que, sin ser malas *stricto sensu*, arrojarán un manto de sombra, un velo de duda. La inquietud de no saber cuál será el resultado definitivo de esta ambiciosa aventura de exploración. En el peor de los casos, habremos aprendido muchísimo más de lo que el mayor de los optimismos auguraba. En el mejor, habremos conocido la más íntima naturaleza del espacio y el tiempo. No es posible imaginar mayor recompensa. Descubriremos, quizá, que al reunirlos Einstein no hizo más que seguir la taxativa recomendación de un verso que Rudyard Kipling publicó en 1910, a mitad de camino de las dos teorías de la relatividad: «*And treat those two impostors just the same*». El espacio y el tiempo: ¿dos impostores que deben ser tratados por igual?

CAPÍTULO 1

Las cuerdas fundamentales

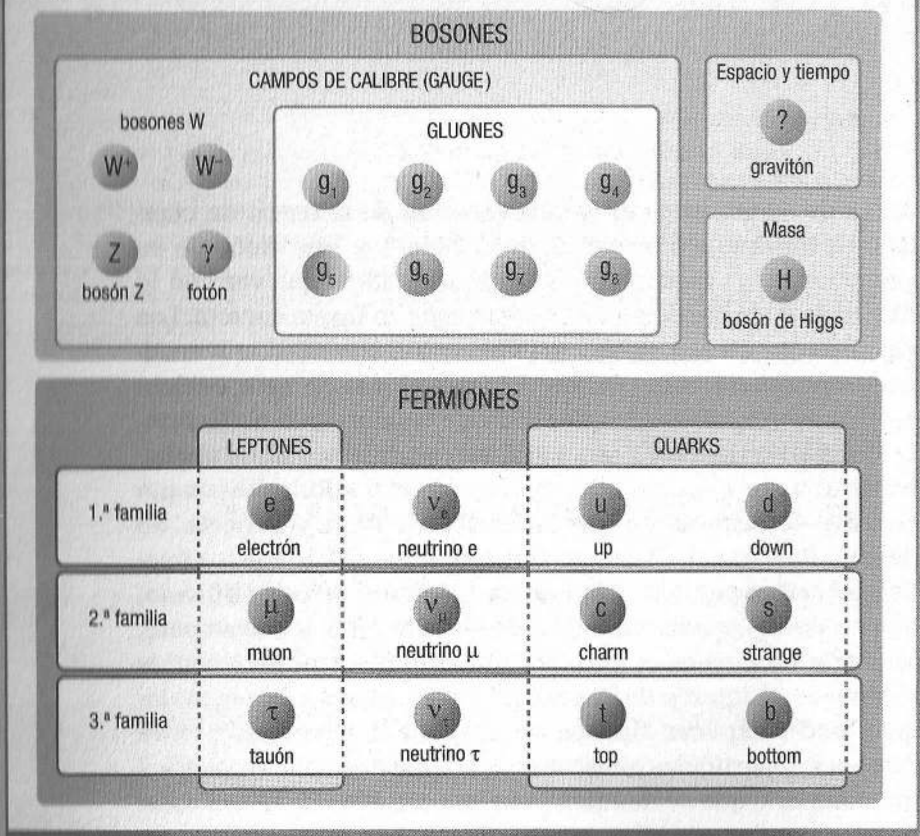
¿Qué consecuencias se desprenden de la hipótesis de que los ladrillos básicos de la naturaleza sean cuerdas? ¿Son estas compatibles con la física de partículas conocida? Discutiremos sobre cuerdas abiertas y cerradas, así como de su longitud, movimientos y simetrías. Y de la extraña manera en que las cuerdas experimentan la geometría del espacio-tiempo.

Antes de adentrarnos en la presentación de la teoría de cuerdas, es inevitable abordar algunos aspectos históricos de su gestación, cuya motivación original nada tiene que ver con lo discutido en la introducción. Lo haremos en forma sucinta. Los cálculos que dieron lugar a la publicación científica universalmente aceptada como la piedra fundacional de este edificio teórico fueron realizados por el físico teórico italiano Gabriele Veneziano (n. 1942) —quien a sus veinticinco años acababa de obtener el doctorado en física en el Instituto Weizmann (Israel)—, en un barco que lo llevaba de Haifa a Venecia. Su destino final era el CERN, en Ginebra, y fue allí donde los finalizó y envió a publicar a la revista italiana *Il Nuovo Cimento*, que recibió el manuscrito el 29 de julio de 1968. Irónicamente, teniendo en cuenta el giro que tomaron los acontecimientos más tarde, el interés de Veneziano era en esencia fenomenológico: poder explicar algunos aspectos de la interacción entre mesones —partículas subatómicas compuestas por un quark y un antiquark, que se mantienen unidos debido a la interacción fuerte— a altas energías, que se observaban en el CERN y en otros laboratorios.

EL MODELO ESTÁNDAR: DONDE SE ENGLOBAN TODAS LAS PARTÍCULAS

El modelo estándar de las partículas elementales es el marco teórico que explica la totalidad de las partículas conocidas hasta el momento y todas las fuerzas que actúan entre ellas, con excepción de la gravitatoria, que no encaja en esta descripción. El conjunto de todas las partículas subatómicas observadas en los aceleradores y en los rayos cósmicos, así como la interacción electromagnética y las fuerzas nucleares débil y fuerte, son descritas por un conjunto de unas pocas partículas representadas en la tabla de la figura 1. Aquellas que componen la materia (*fermiones*; más adelante se explicará el porqué de ese nombre) se organizan en tres familias de idéntica estructura pero distinta masa. La más liviana, integrada por el *electrón*, su correspondiente *neutrino* y los quarks *up* y *down*, constituyentes fundamentales del *protón* y del *neutrón*, da lugar a los átomos que componen toda la materia ordinaria. Las otras dos familias replican la estructura de la primera (el papel del electrón lo juegan el *muon* y el *tauón*), pero su mayor masa lleva a que solo se las observe en situaciones que involucran una energía suficientemente alta. Sabemos que no hay una cuarta familia y tenemos argumentos teóricos muy fuertes para afirmar que tampoco es posible que haya más miembros en cada familia.

FIG. 1



Partículas intermediarias

Las interacciones en el modelo estándar ocurren a través del intercambio de partículas «mediadoras» *(bosones)* como el *fotón* (electromagnetismo), los *bosones* Z y W (nuclear débil) y los *gluones* (nuclear fuerte) (véase la figura 1). También el *gravitón*, mediador de la interacción gravitatoria, de cuya existencia no tenemos aún constancia experimental. A ellos debemos añadir el *bosón de Higgs*, cuya naturaleza y función es algo diferente y no será abordada en estas páginas. No todas las partículas de materia experimentan todas las interacciones, como se representa en la tabla de la figura 2.

Una disposición estilosa

El modelo estándar organiza de manera elegante y sencilla todos estos ingredientes. Por ejemplo, no es casualidad que el número de bosones del electromagnetismo (uno), de la fuerza nuclear débil (tres) y de la nuclear fuerte (ocho) sean exactamente el resultado de elevar los números uno, dos y tres al cuadrado (sustrayendo, en el caso de las fuerzas nucleares, una unidad). La estructura matemática del modelo estándar cae dentro de lo que se conoce como «teorías gauge», hecho que tiene innumerables consecuencias virtuosas de enorme complejidad, imposibles de abordar aquí, las cuales contribuyen a alimentar la certeza de encontrarnos frente a una teoría esencialmente correcta.

FIG. 2

	e	μ	τ	ν_e	ν_μ	ν_τ	t	c	u	d	s	b	$W^\pm$	Z	γ	g_i
Electromagnetismo	✔	✔	✔				✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔			
Fuerza fuerte							✔	✔	✔	✔	✔	✔				✔
Fuerza débil	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔		
Gravedad	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔

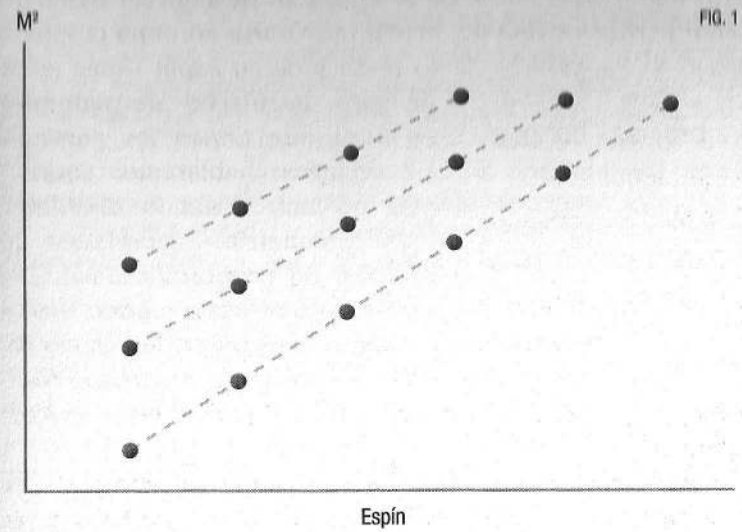
En los experimentos de la época se descubrían frecuentemente partículas de vida media muy corta con una propiedad llamativa: los valores de su masa y de su espín —una suerte de giro intrínseco de naturaleza cuántica que tienen las partículas subatómicas; hablaremos sobre él más adelante, cuando discutamos la supersimetría— guardaban una relación de proporcionalidad. Desde el punto de vista teórico, esto se correspondía con un fenómeno descrito en 1959 por el italiano Tullio Regge, y por ello, en su honor, se le llamó *trayectorias de Regge* (figura 1).

> El camino verdadero pasa por una cuerda, que no está tendida en alto, sino sobre el suelo. Parece preparada más para hacer tropezar que para que se siga su rumbo.
>
> **Franz Kafka**

Todos parecían tener claro que en él se cifraba un aspecto clave de la interacción fuerte. Cabe recordar que en aquella época aún no existía la cromodinámica cuántica (QCD, *Quantum Chromodynamics*), teoría que describe la física de los quarks y los gluones, esas partículas mediadoras de la interacción fuerte que funcionan como un poderoso pegamento (del inglés *glue*) que mantiene unidos a los quarks y antiquarks en el interior de los mesones (y de los bariones: tríos de quarks como los protones y neutrones). Más aún, se creía que la interacción fuerte no estaba gobernada por una teoría cuántica de campos, la clase de teoría utilizada para las interacciones electromagnética y débil, y de allí que se adoptaran formalismos tentativos como el de Regge. Así de providencial es a veces la historia de la ciencia: de haberse formulado la teoría QCD en los años sesenta, quizá no existiría hoy la teoría de cuerdas.

Veneziano propuso una fórmula muy compacta, elegante y robusta para describir la «matriz de colisión» de mesones, la que, entre otras cosas, daba cuenta de las trayectorias de Regge. La fórmula de Veneziano tenía varios atractivos que no pasaron desapercibidos para quienes asistieron, en un congreso en Viena, a su primera presentación en sociedad: poseía de manera natural una simetría frente al intercambio de mesones cuya validez era independiente de los detalles de su modelización.

FIG. 1



La observación de que cierto tipo de partículas compuestas exhibe una curiosa relación entre el cuadrado de su masa (representado en el eje vertical) y su espín o impulso de giro (eje horizontal), que las hace aparecer en líneas rectas denominadas «trayectorias de Regge», sugiere la existencia de alguna razón o mecanismo subyacente.

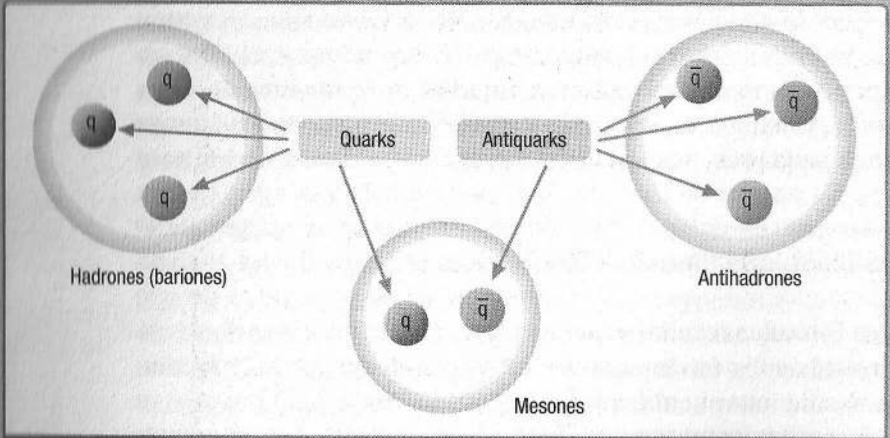
Al año siguiente, el argentino Miguel Virasoro encontró una expresión de apariencia aún más simétrica y elegante que cumplía con el mismo propósito. Otros físicos como Joel Shapiro y Claud Lovelace empezaron a estudiar la naturaleza de estas expresiones, generalizándolas y resolviendo algunos problemas que presentaban, pero sin poder brindar una razón de ser para ellas. Se trataba de fórmulas que, por así decirlo, parecían funcionar pero carecían de fundamento. Hasta que de manera independiente, el japonés Yoichiro Nambu, el danés Holger Nielsen y el estadounidense Leonard Susskind se dieron cuenta de que estas fórmulas resultaban de una hipótesis extraordinariamente simple: la colisión de mesones estaría mediada por el intercambio de una cuerda abierta (Veneziano) o cerrada (Virasoro), y no de partículas puntuales. Todos estos trabajos tuvieron lugar entre 1969 y 1970.

DESCRIBIENDO A QUARKS Y GLUONES CON LA QCD

La cromodinámica cuántica o QCD es la parte del modelo estándar que describe la física de los *quarks* y los *gluones*, partículas mediadoras de la interacción fuerte que funcionan como un poderoso pegamento (del inglés *glue*). La interacción fuerte presenta un rasgo singular que la diferencia del resto de las fuerzas de la naturaleza: a distancias muy cortas los quarks apenas interactúan entre sí, sino que experimentan lo que se conoce como *libertad asintótica*. Si intentamos alejarlos, sin embargo, aparece una fuerza muy intensa que lo impide, manteniéndolos «confinados» en el interior de partículas llamadas *hadrones*. Estas partículas son, como muestra la figura, o bien parejas de quarks y antiquarks *(mesones)* o bien tríos de quarks *(bariones)*.

Mesones y bariones

Ninguno de los mesones es estable; por lo que no aparecen explícitamente en la física de la vida cotidiana, aunque sí lo hacen como agentes intermedios en procesos tan relevantes como mantener a los protones y neutrones unidos dentro del núcleo atómico. El mesón más liviano es el *pion*, cuya masa es una séptima parte de la de un protón; su vida media es apenas superior a la centésima de un microsegundo. Los bariones, por su parte, constituyen una familia de partículas cuyos ejemplares más conocidos son los más livianos: *protones* y *neutrones*. Se trata de tríos de quarks: dos up y un down en el caso del protón y un up y dos down en el del neutrón. No es difícil deducir, a partir de esta constitución, y sabiendo que los quarks up y down son intercambiables por efecto de la interacción nuclear débil, que protones y neutrones pueden transmutar entre sí. Esto ocurre mediante lo que se conoce como *decaimiento beta*, y el hecho de que este sea posible es crucial para que el universo macroscópico presente el aspecto que observamos. Existen bariones con sus tres quarks up o down, o incluso con la misma constitución que los protones y neutrones pero distinto espín. Todos ellos son inestables. Hoy sabemos que es posible ensamblar partículas con cuatro, cinco y hasta seis quarks.



La situación sufrió un giro vertiginoso en 1973, cuando Peter Goddard, Jeffrey Goldstone, Claudio Rebbi y Charles Thorn se tomaron en serio de forma conjunta la posibilidad de que hubiera una cuerda fundamental en juego y, teniendo en cuenta su tamaño microscópico, procedieron a aplicarle las preceptivas leyes de la física cuántica. Stanley Mandelstam, por su parte, tuvo en consideración la posibilidad de que estas cuerdas interactuaran entre sí. Finalmente, en abril de 1974, Jöel Scherk y John Schwarz obtuvieron un extraordinario resultado que nos devuelve al hilo argumental abandonado más arriba: se dieron cuenta de que la cuerda cerrada contiene estados sin masa de espín igual a dos, exactamente lo que se espera de los gravitones, cuantos del campo gravitatorio. Más espectacular aún, demostraron que la dinámica de dicho campo estaba dada por las ecuaciones de Einstein. Así, la teoría de la relatividad general, posiblemente la construcción más elaborada de la historia de la física teórica, resultaba ser un mero corolario de la imposición de las leyes de la física cuántica a las vibraciones de una cuerda cerrada. La longitud de la cuerda debía ser unas cien veces mayor que la de Planck para reproducir correctamente los valores conocidos de la carga del electrón y la constante de Newton —posteriormente se encontraron en la teoría de cuerdas múltiples razones por las que este argumento resultó frágil o cuestionable; lo cierto es que la longitud podría ser mayor, como comentaremos más adelante—. En el trabajo de Scherk y Schwarz nació la concepción de la teoría de cuerdas como una formulación cuántica de la interacción gravitatoria. Buen momento para que el recuento histórico dé paso a la anhelada presentación de los fundamentos de esta teoría.

LAS CUERDAS COMO OBJETOS FUNDAMENTALES

Nos vemos, así, ante nuestra hipótesis de partida: tanto los constituyentes fundamentales de la materia como las distintas formas de interacción entre ellos (partículas mediadoras de las fuerzas de la naturaleza) no serían entes puntuales, tal como la física de partículas elementales propone, sino objetos unidimensionales infinitamente delgados denominados cuerdas. Estos objetos remedan pequeñísimos cordeles elásticos que, al igual que las partículas, pueden surcar el espacio y colisionar entre sí, pero que, además de ello, y diferenciándose así de las partículas, pueden también moverse en forma serpenteante, vibrar en diferentes frecuencias, enroscarse y rotar.

Las ventajas de reemplazar la noción de partícula elemental por la de cuerda fundamental son muchas y a lo largo de este libro repasaremos las más relevantes; pero ahora adelantaremos las dos principales. La primera, como ya vimos, es la posibilidad de dar una descripción de la gravedad compatible con las leyes cuánticas. De hecho, el éxito que la teoría de partículas ha tenido a la hora de describir los constituyentes de la materia y las interacciones nucleares y electromagnéticas es tan cierto como el fracaso rotundo que ha sufrido siempre que ha intentado extender su dominio al terreno de la gravedad. La interacción gravitatoria, a diferencia de las otras fuerzas de la naturaleza, se resiste a ser descrita en términos de partículas elementales, mientras que en el marco de la teoría de cuerdas no solo encaja consistentemente sino que lo hace de una manera inextirpable: es imposible hablar de cuerdas sin hacerlo de la gravedad cuántica.

La segunda ventaja que la hipótesis de cuerda fundamental tiene sobre la de partícula elemental es de carácter estético-conceptual, y no por eso menos apreciable. Se trata de su potencial carácter unificador, al lograr explicar cómo todas las distintas especies de elementos subatómicos existentes, fotones, electrones, quarks, neutrinos... podrían no ser sino diferentes modos de manifestación de un único ente fundamental, la cuerda, que, vibrando a distintas frecuencias o enrollándose de variadas maneras, cumple con expresar las diversas propiedades que asignamos a las partículas y sus interacciones. Según la teoría de cuerdas, no habría distintos elementos fundamentales, sino distintas formas en las que el único elemento fundamental puede vibrar, enrollarse, girar o moverse. En un universo que, según todas las evidencias, nació hace 13 800 millones de años en una minúscula región del espacio, este carácter unificador se

antoja algo más que un capricho estético. Es casi un imperativo ontológico.

Para entender la teoría de cuerdas y cómo esta extiende y empodera a aquellas ideas provenientes de la física de partículas, es conveniente primero repasar esta última. Dediquemos, pues, unos párrafos a explicar cómo se describe el movimiento e interacción de las partículas elementales.

Las leyes de la física clásica establecen que si una partícula surca el espacio sin que actúe sobre ella fuerza alguna, entonces su trayectoria corresponderá a aquella en la que, establecidos el punto de partida y la velocidad inicial —o, en su defecto, los puntos de partida y llegada—, el tiempo empleado para realizar el recorrido sea el mínimo posible. Así, una partícula que se mueve libre de fuerzas lo hace en línea recta, porque es la trayectoria en la que la distancia es más corta. Esta idea se extiende, *mutatis mutandis*, al caso en el cual actúa sobre la partícula la fuerza gravitatoria. La teoría de la relatividad general nos dice que los efectos del campo gravitatorio pueden ser repensados, ya no en términos de una fuerza propiamente dicha, sino como el efecto de la curvatura del espacio-tiempo sobre la partícula que en él se propaga. Según esta interpretación, el campo gravitatorio no induce una deflexión de la trayectoria debido a que una fuerza actúe sobre la partícula, sino como fruto de que el espacio-tiempo se curve debido a tal campo; de este modo, la trayectoria cumplirá con el mandato de ceñirse a tal deformación. Es así como las órbitas que uno observa en cuerpos sometidos a la acción de la gravedad —como planetas, satélites, cometas o asteroides— no son sino «trayectorias de distancia mínima», pero en un espacio-tiempo curvado por el enorme campo gravitacional generado por el Sol. La Luna, por ejemplo, sigue la trayectoria más corta en la geometría espacio-temporal curva generada por la Tierra. No hay fuerza de atracción entre ellos. Lo que hay es curvatura.

Ahora bien, en su andar por el espacio-tiempo, incluso si no oficia sobre las partículas ninguna fuerza o campo externo, estas pueden colisionar con sus pares e interaccionar entre ellas de diferentes maneras. Por ejemplo, dos electrones moviéndose en el espacio se verán repelidos mutuamente debido a que poseen la misma carga eléctrica. Por lo tanto, la trayectoria de cada uno de ellos se verá alterada por la presencia del otro. Para describir este tipo de interacciones, la teoría de partículas propone que la fuerza entre las distintas partículas fundamentales es, a su vez, portada también por una partícula. De esta manera, los dos electrones del ejemplo anterior se propinan impulso el uno al otro mediante el intercambio de una tercera partícula mediadora llamada fotón, que se encarga de portar la fuerza electromagnética entre ellos. Esto se ilustra con un diagrama que muestra cómo dos partículas, etiquetadas con las letras A y B, interaccionan repeliéndose por una fuerza que es materializada a través del intercambio de la partícula portadora C (figura 2).

Los diagramas espacio-temporales, que llevan el nombre de Richard Feynman, son utilizados para ilustrar las interacciones entre partículas elementales. En ellos se representa a cada partícula por un segmento, como si se dibujara la estela que deja al moverse, y las interacciones están dadas por los vértices en los que confluyen tres o más partículas. El tiempo puede pensarse como el recorrido del diagrama de izquierda a derecha. Los segmentos internos (líneas punteadas) corresponden a partículas intercambiadas, portadoras de la interacción entre las partículas A y B. Son útiles para hacerse una representación mental del proceso físico, pero su importancia principal estriba en que los diagramas de Feynman son un lenguaje con un correlato matemático preciso que nos permite organizar los cálculos asociados de un modo eficiente y significativo.

Pero esto no es todo. La partícula mediadora C, por su propia naturaleza, puede a su vez realizar durante su corta existencia todo tipo de peripecias que las desconcertantes leyes de la física cuántica permiten; por ejemplo, desdoblarse en un par constituido por una partícula y su antipartícula, que luego se reconstituye nuevamente en la partícula C, antes de dar en el blanco. En el ejemplo de los electrones, el fotón mediador de la repulsión eléctrica puede desdoblarse en un par electrón-positrón —el positrón es la partícula de antimateria o antipartícula asociada

(misma masa pero carga opuesta) al electrón, cuya existencia fue deducida por Paul Dirac en 1931—, que luego se recombina nuevamente (figura 3).

El cálculo completo de la interacción entre las partículas está dado por la suma de las contribuciones de los distintos diagra-

FIG. 2

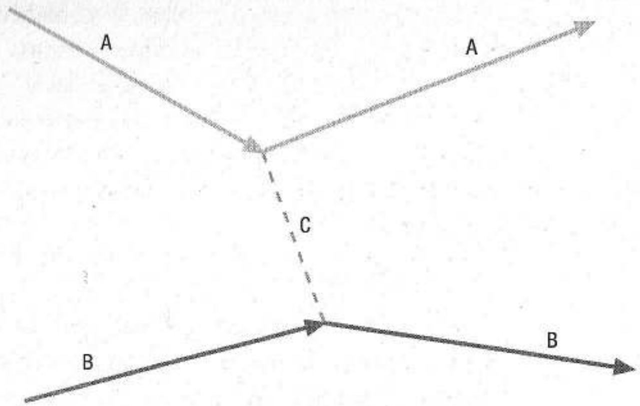


Diagrama de Feynman que representa la interacción de una partícula A y una partícula B. La fuerza de interacción es llevada por una partícula intermediaria C. Podemos pensar, por ejemplo, en el proceso de repulsión eléctrica de dos electrones que se intercambian un fotón mensajero.

FIG. 3

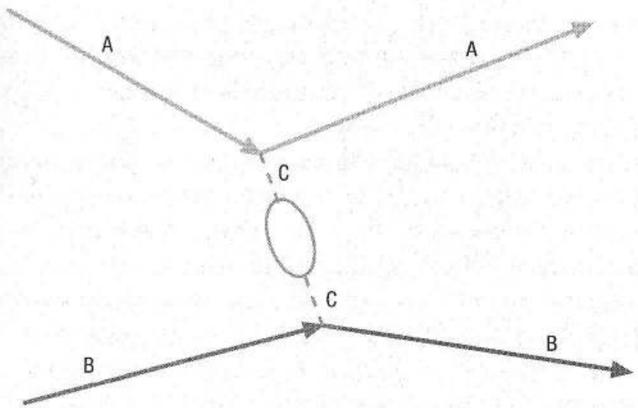


Diagrama de Feynman que representa otro de los infinitos procesos intermedios por los cuales las partículas A y B pueden interaccionar. Este diagrama muestra el caso en el que la partícula intermedia se descompone, a su vez, en un par partícula-antipartícula para reconstituirse inmediatamente después y por último dar en el blanco. Aunque menos probable que el de la figura 2, este proceso también contribuye a la interacción de las partículas A y B.

mas que representan todas las formas en las que las partículas originales, A y B, pueden interaccionar. Cada uno de los diagramas de Feynman trae aparejado un cálculo matemático complejo que los físicos sabemos decodificar y realizar. Vale reiterar aquí que mientras las interacciones nucleares y electromagnéticas pueden ser descritas en términos de partículas intercambiando mediadores de estas fuerzas, a la manera de los diagramas de Feynman, la interacción gravitatoria no admite tal descripción. Esto se debe a que los cálculos matemáticos involucrados, asociados a estos diagramas, arrojan un resultado absurdo; un valor infinito cuya interpretación en términos físicos carece de sentido. La razón última no es otra que la que mencionamos en la introducción: la posibilidad de dividir indefinidamente el espacio-tiempo y el conflicto que esto entraña debido al principio de incertidumbre de Heisenberg. Este inconveniente se resuelve en la teoría de cuerdas de una manera relativamente sencilla, como veremos a continuación.

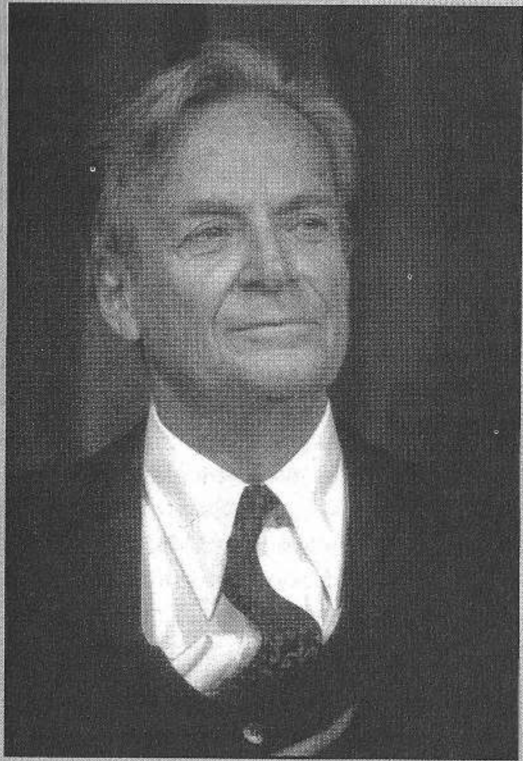
La cosa más importante acerca de la teoría de cuerdas es que es una teoría altamente matemática, y las matemáticas la mantienen unida de forma estrecha y constante. En su estructura básica contiene tanto la mecánica cuántica como la teoría de la gravedad.

Leonard Susskind

La teoría de cuerdas es una generalización natural de la de partículas. Esto es decir que, aunque la teoría de cuerdas vaya mucho más allá, tanto en su poder de cálculo como en su contenido estético-conceptual, no deja de estar definida de tal manera que resulta una extensión natural de ideas que están en germen en la teoría de las partículas elementales. Por ejemplo, de igual manera en que las trayectorias de las partículas corresponden a las curvas de distancia mínima entre dos puntos del espacio-tiempo, las estelas dibujadas por las cuerdas al surcar el espacio-tiempo resultan ser superficies de área mínima entre dos segmentos curvos del espacio-tiempo. Ahondemos en esto. Las cuerdas son objetos unidimensionales sin espesor. Vale decir que, a diferencia de las partículas elementales, que no son puntos pequeños sino puntos sin tamaño alguno, las cuerdas sí tienen una longitud aunque no tengan espesor. Son objetos

PERTURBATIVO VERSUS NO-PERTURBATIVO

La representación de las interacciones a través de los diagramas de Feynman resulta extremadamente útil en física. Esto se debe principalmente a dos motivos. Por un lado, como esbozamos en los párrafos precedentes, ilustran claramente el mecanismo por el cual las partículas elementales se ejercen fuerzas mutuamente. Por otro, los diagramas de Feynman proveen a los físicos de un conjunto de reglas mnemotécnicas para realizar los cálculos matemáticos que, según la teoría, son necesarios para obtener resultados cuantitativos asociados a los procesos de interacción. Por ejemplo, la teoría establece que la probabilidad de que un proceso de interacción ocurra resulta menor cuanto mayor sea la cantidad de vértices que el diagrama contiene. Estrictamente, esto ocurre cuando las interacciones experimentadas por las partículas pueden considerarse como una pequeña perturbación a su libre devenir. Puede suceder, por ejemplo, que cada electrón desvíe su trayectoria por la presencia del otro, pero que ninguno cambie de identidad ni establezca una ligadura persistente con otra partícula, fenómenos ambos que son factibles en el universo subatómico. A este escenario se lo conoce como *régimen perturbativo* y en él se justifica el uso de los diagramas de Feynman.



El todo y las partes

Quizá sea ilustrativo mencionar, por oposición, un fenómeno familiar que es claramente de naturaleza *no-perturbativa*: la asociación de tres quarks para dar lugar a un protón. Estos quarks constituyentes pierden, por así decirlo, su libre devenir individual, su identidad, y se asocian en un proyecto común llamado protón. El todo pasa a ser cualitativamente diferente a la suma de sus partes, y en este caso los diagramas de Feynman no funcionan.

Richard Feynman (1918-1988) inventó un ingenioso lenguaje que permite describir fenómenos perturbativos a través de diagramas espacio-temporales.

elásticos, de cierta tensión, y pueden ser tanto abiertas como cerradas (figura 4).

Al moverse en el espacio-tiempo, las cuerdas dibujan una estela bidimensional que se denomina «hoja de mundo» y que es el análogo de las trayectorias que las partículas dejan al surcar el espacio en el tiempo. Por ejemplo, al moverse y vibrar, las cuerdas cerradas dibujan hojas de mundo tubulares, que se angostan y se ensanchan en función de si la cuerda se contrae o se expande en su vibrar. Por su parte, las cuerdas abiertas se mueven serpenteantes en el espacio y, así, las hojas de mundo por ellas dibujadas parecen cintas ondulantes (figura 5).

La dinámica de las cuerdas, al comprender no solo el movimiento de traslación que ya presentaban las partículas, sino también el ondulatorio-vibratorio propio de ellas, es rica y abstrusa: las cuerdas pueden vibrar mucho o casi no hacerlo, rotar en torno a su eje o no hacerlo, propagarse mientras tanto; dos cuerdas abiertas pueden unirse para formar una cerrada, una cuerda cerrada enrollarse sobre sí misma, etcétera. Es precisamente debido a la gran versatilidad de movimientos del que una cuerda es capaz, que esta teoría resulta fortísima para describir todos los componentes de la materia y sus interacciones a partir de un único objeto primordial.

No obstante, a pesar de la complejidad de movimiento de las cuerdas, la ley física que lo describe es de una naturalidad y simpleza remarcables. De igual manera en que la dinámica de las partículas elementales está descrita por la ley que establece que las trayectorias espacio-temporales de esos objetos han de ser aquellas que minimicen la distancia entre los puntos de partida y de llegada, la ley que describe la propagación de las cuerdas en el espacio-tiempo establece que sus trayectorias serán aquellas que minimicen las superficies de las hojas de mundo que, al propagarse, las cuerdas vinieran a dibujar. En este sentido las cuerdas son, tal como adelantábamos, la generalización natural de las partículas, al tiempo que tienen el potencial de describir con mayor economía de recursos las propiedades de los componentes de la materia debido a la versátil dinámica que poseen como objetos fundamentales.

FIG. 4

Las cuerdas pueden ser abiertas, siendo sus extremos puntuales, como se muestra en la figura de la izquierda, o cerradas, sin extremos, como se muestra en la de la derecha.

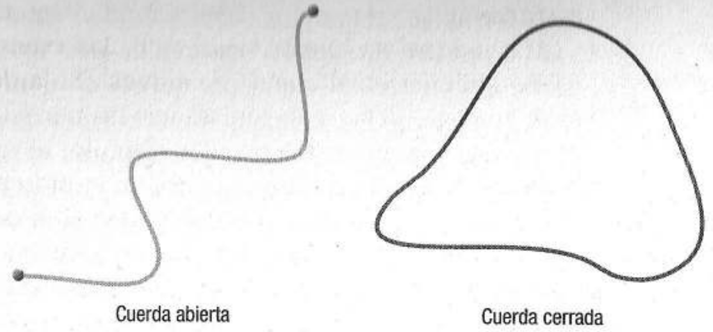
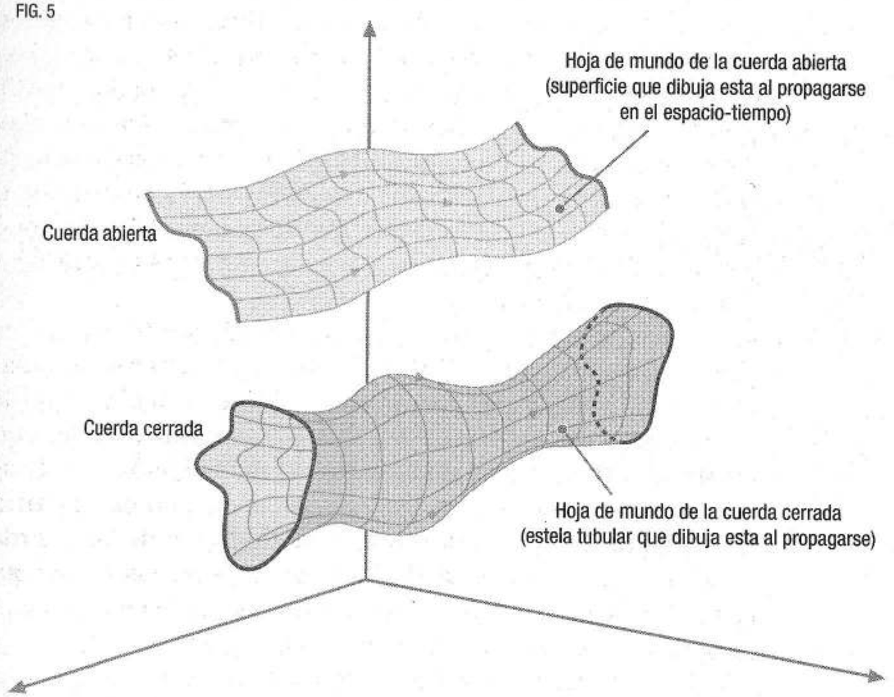


FIG. 5



Al moverse en el espacio-tiempo las cuerdas dibujan estelas denominadas «hojas de mundo». Si se nos permite decir que las hojas de mundo de las cuerdas abiertas remedan cintas de pasta como *«pappardelle»*, entonces las trayectorias de las cuerdas cerradas toman forma de *«rigatoni»*.

Otra de las razones por las cuales las cuerdas, como hipótesis de la forma que toman los objetos fundamentales que describen todo a nuestro alrededor, son mucho más interesantes que las partículas puntuales es que, por decirlo de alguna manera, «sienten» la geometría del espacio-tiempo en el que se propagan de una manera distinta. Al ser objetos de una extensión finita —es decir, que tienen una cierta longitud—, las cuerdas se propagan en el espacio-tiempo experimentando su curvatura en varios puntos a la vez, tal como una lombriz explora el terreno simultáneamente a lo largo de toda su anatomía. Sienten, a su vez, la presencia de una suerte de campo electromagnético al que las partículas son insensibles y que en la teoría de cuerdas es inexorable: el denominado campo de Kalb-Ramond.

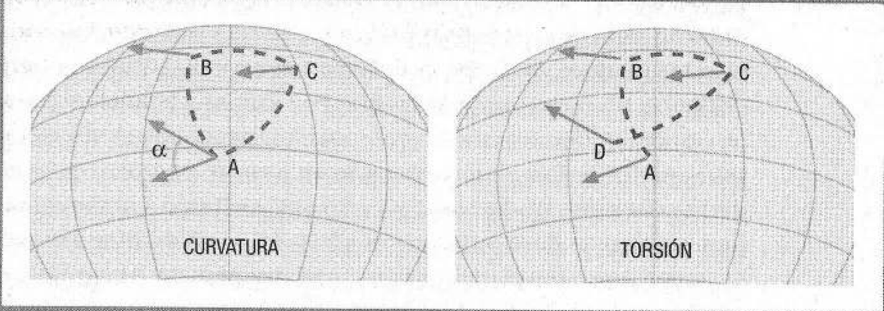
El campo de Kalb-Ramond afecta la dinámica de las cuerdas con la misma intensidad con la que lo hace el campo gravitatorio, siendo imposible en muchos casos escindir un efecto del otro. De hecho, en ocasiones el comportamiento de una cuerda en ausencia de gravedad (es decir, cuando se encuentra muy lejos de cualquier masa), pero sometida a los influjos de dicho campo, es indiscernible del movimiento que la misma cuerda experimentaría si fuera la gravedad y no el campo de Kalb-Ramond el que la compeliera a moverse y oscilar. Por esto se dice que la teoría admite dos (y a veces más) descripciones duales del mismo fenómeno, y es esta clase de simetría de dualidad uno de los capitales más importantes de la teoría de cuerdas. La propiedad de las cuerdas de sentir la presencia de campos a los que las partículas son insensibles, junto con la de llevar ese sentir al punto mismo de confundir la influencia de esos campos con los efectos propios de la gravedad, hacen que la teoría de cuerdas experimente novedosos fenómenos a cortas distancias que nos llevarán a replantearnos las nociones geométricas más elementales. Por ejemplo, habrá circunstancias en las que una cuerda que se desplaza hacia, digamos, adelante y luego a la derecha, no llegará al mismo sitio que si lo hiciera en el orden inverso. De algún modo, esta es la manera en la que las cuerdas fundamentales encuentran una salida a las paradojas planteadas por las escalas pequeñas a las partículas elementales puntuales.

CAMPO DE KALB-RAMOND Y TORSIÓN

El concepto de campo, introducido en el siglo XIX por el británico Michael Faraday (1791-1867), juega un papel fundamental en la física moderna. Se trata de una entidad que toma valores en todos los puntos del espacio, dando cuenta así del *principio de localidad*: en un sistema físico, lo que ocurre en un lugar es afectado directamente por su entorno más inmediato. Un ejemplo sencillo es la temperatura o la presión atmosférica: se puede asociar un valor a cada punto. Si dos puntos cercanos tienen distinta presión, se produce un flujo de aire al que denominamos «viento», que también adopta un valor en cada punto, solo que, además de la intensidad, debemos especificar su dirección y sentido. Es lo que llamamos *campo vectorial*. Coloquialmente, asociamos una flecha a cada punto.

Tensando las cuerdas

El campo electromagnético es un campo pseudovectorial. Si nos referimos más arriba a «una suerte» de campo electromagnético es porque el *campo de Kalb-Ramond*, al que se acopla la cuerda, es de carácter tensorial. Podemos pensar en los «tensores» como si fueran pares de vectores, necesarios para señalar tanto la dirección de la fuerza ejercida sobre la cuerda como el esfuerzo longitudinal a lo largo de esta. Si la gravedad puede representarse como la «curvatura» del espacio-tiempo, este misterioso campo que las cuerdas experimentan puede pensarse hasta cierto punto como su «torsión», cantidad asociada a sus propiedades de paralelismo. Para entender la diferencia entre las nociones geométricas de curvatura y torsión, digamos lo siguiente. Una geometría se dice plana si al trasladar un vector (una flecha) de forma paralela, sin rotarla, a lo largo de cualquier camino cerrado, este regresa al punto de partida apuntando en la misma dirección. Esto no es lo que ocurre si uno lo hace sobre la superficie de un mapamundi, como se aprecia en las figuras. Si el vector regresa apuntando en una dirección distinta (como en el esquema de la izquierda) entonces decimos que la geometría está «curvada». La torsión, por otro lado, es una distorsión más radical de la geometría. A diferencia de lo que ocurre con una geometría curvada, en una «torcida» (derecha) el transporte paralelo de un vector ni siquiera permite que regrese al mismo punto. En otras palabras, la torsión representa una suerte de dislocación del espacio.



EL ESPECTRO DE LAS CUERDAS

Mencionamos anteriormente que las cuerdas tienen cierta tensión y esto les permite vibrar a distintas frecuencias. Para entender este vibrar podemos valernos de la imagen de las cuerdas de una guitarra, las cuales oscilan a distinta frecuencia dependiendo de la tensión a la que son sometidas, de cuán denso sea el material con el que fueron construidas y, además, de la forma peculiar en la que se las haya pulsado o rasgado. Las cuerdas de una guitarra suenan a una frecuencia que está también determinada por la velocidad a la que las ondas de vibración se mueven sobre ellas. Sobre las cuerdas de sonidos más agudos (de frecuencias más altas) viajan ondas de vibración de mayor velocidad, mientras que sobre las cuerdas de sonidos más graves (de frecuencias más bajas) viajan ondas vibratorias con velocidades menores. A su vez, la velocidad de las ondas de vibración sobre una cuerda está dada, como decíamos, por la tensión a la que dicha cuerda esté siendo sometida y por la densidad del material con el que ha sido construida. Es por esto que uno afina la guitarra variando la tensión de sus cuerdas, y por esto mismo que las cuerdas más agudas son las más tensas y delgadas mientras que las más graves son las más holgadas y gruesas.

Ahora bien, a diferencia de las de una guitarra, las cuerdas fundamentales tienen la peculiaridad de que las vibraciones que se propagan sobre ellas solo pueden hacerlo viajando a la velocidad de la luz, ni más rápido ni más lento. Al estar fija esta velocidad, la densidad de estas cuerdas queda unívocamente determinada por su tensión. Uno no puede variar la frecuencia sino variando su tensión, el único parámetro relevante para describir las ecuaciones de la teoría. Por razones históricas que no es oportuno desempolvar aquí y que se remontan al trabajo pionero de Tullio Regge mencionado en la introducción, la tensión de las cuerdas fundamentales suele describirse en términos de una constante denotada por el símbolo α'. Debemos entenderla como una «nueva constante fundamental de la naturaleza», que puede escribirse como la longitud de la cuerda fundamental al cuadrado. La tensión de las cuerdas resulta ser inversamente proporcional a dicha constante: Tensión $= 1/(2\pi\alpha')$. Este valor es enorme. Si quisiéramos compararlo con la tensión habitual a la que es sometida una cuerda de una guitarra, por ejemplo, obtendríamos que la cuerda fundamental podría estar hasta diez mil trillones de trillones de veces más tensa.

Otra diferencia esencial entre las cuerdas de una guitarra y las fundamentales, sobre la que ya hablamos pero es pertinente insistir, es que las últimas no tienen espesor. No es que sean «muy» delgadas sino «infinitamente» delgadas. No es que estén constituidas de elementos aún más pequeños sino que las cuerdas fundamentales son el menor elemento que lo constituye todo, incluso a ellas mismas que, libres de dividirse en más cuerdas, surcan el espacio en una danza que es composición de todo lo que vemos; y son, a su vez, la razón por la que lo vemos. Esta es una idea interesante, «buscar en la música los acordes fundamentales de los cuales, tal vez, derivaría todo el universo».

Las distintas maneras en las que una cuerda puede vibrar representarían, en principio, las diferentes especies de partículas que vemos en los aceleradores más modernos: electrones, muones, tauones, etcétera. Todas estas partículas no serían sino diferentes modos de vibración del mismo objeto. Una cuerda vibrando en su frecuencia más baja, llamada «frecuencia» o «modo fundamental», representa una partícula sin masa. Como por ejemplo, el gravitón, la hipotética partícula mensajera de la interacción gravitatoria. Si la misma cuerda vibrara a una frecuencia más alta, entonces pasaría a comportarse como una partícula con masa, tanto mayor cuanto más pequeña fuera la cuerda. Atendiendo a lo discutido hasta aquí, al ser tan diminutas como para que no hayamos sido capaces de verlas experimentalmente, podemos aventurar de inmediato que la vibración de las cuerdas fundamentales dará lugar a masas enormes.

Tal como ocurre con las cuerdas en una guitarra, al estar fija su tensión, las cuerdas fundamentales no son libres de vibrar a cualquier frecuencia sino que solo pueden hacerlo a algunas muy precisas, múltiplos enteros (es decir, al doble, triple, cuádruple...) de su frecuencia fundamental. Si pulsamos la cuerda de una guitarra sin posar la mano sobre ella, sonará a su frecuencia fundamental (en la práctica también estarán presentes, aunque de forma atenuada, los armónicos). Por ejemplo, la quinta cuerda de una guitarra, siendo una nota *la*, sonará a 440 hercios (Hz) de frecuencia, es decir, oscilará 440 veces cada segundo. Por otro lado, la misma cuerda puede sonar al doble de esa frecuencia si recurrimos al simple truco de acariciar con nuestro dedo izquierdo el punto medio del diapasón; un recurso musical que corresponde a «hacer sonar el primer armónico» de la cuerda, un *la* de una octava más alta. Con un poco más de habilidad se aprende a convencer a la quinta cuerda a sonar en el tercer armónico, y así sucesivamente.

[Alguien cree recordar que Macedonio Fernández dijo que] es muy interesante tratar de buscar en la música los acordes fundamentales de los cuales, tal vez, derivaría todo el universo.

Ricardo Piglia, escritor

Las cuerdas tienen permitido vibrar solo a ciertas frecuencias, múltiplos de su modo fundamental y, por lo tanto, la diferencia entre armónicos sucesivos resulta ser siempre la misma. Es por esto que la hipótesis de las cuerdas fundamentales conlleva la existencia de una variedad de partículas muy precisa, con masas que corresponden a sus frecuencias permitidas. El espectro (recibe este nombre) de la teoría de cuerdas incluye esta colección infinita de partículas con valores tan particulares de sus masas. Sin embargo, el hecho de que las cuerdas puedan también rotar o enroscarse ampliará las posibilidades de su espectro de forma providencial, y esto es algo que merece subrayarse antes de que cunda la alarma por el hecho de que las masas de las partículas elementales conocidas no sean múltiplos enteros de un valor fundamental. En breve volveremos sobre este punto, tan importante como habitualmente mal comprendido.

LOS VÍNCULOS DE VIRASORO

Además de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las cuerdas y que, como ya discutimos, las someten a moverse de forma tal que sus estelas en el espacio-tiempo correspondan a superficies de área mínima, su movimiento se ve restringido por otras dos ecuaciones, conocidas con el nombre de «vínculos de Virasoro». A diferencia de las mencionadas anteriormente, no son «ecuaciones dinámicas» sino «ecuaciones de vínculo», es decir, no nos hablan de la aceleración de las excitaciones sobre la cuerda sino de las velocidades de los movimientos de esta. Los vínculos son usualmente ecuaciones más sencillas que las ecuaciones dinámicas, y por eso mismo más severas. Así, de los distintos movimientos que las cuerdas podrían llegar a realizar según sus ecuaciones dinámicas, los vínculos de Virasoro seleccionan solo algunos de ellos, actuando como un filtro ulterior que restringe el catálogo: de entre todos los movimientos que las ecuaciones dinámicas permiten, solo aquellos que satisfagan las ecuaciones de vínculo habrán de realizarse efectivamente. Un ejemplo sencillo para entender este punto sería el movimiento de un cuerpo sobre la superficie de la Tierra: las ecuaciones que lo gobiernan son las de Newton, sí, pero sujetas a la severa restricción que impone la sujeción al planeta.

Los vínculos de Virasoro son, como decíamos, dos. El primero de ellos nos cuenta algo sencillo: la cuerda no puede moverse ni estirarse en la dirección a lo largo de la cual ella misma se extiende. Consideremos como ejemplo una *cuerda abierta* de longitud fija L que se extiende en la dirección x moviéndose a una velocidad fija v. Mientras las ecuaciones dinámicas permiten que la misma se traslade en cualquier dirección, uno de los severos vínculos de Virasoro prohíbe que lo haga en la dirección x, sometiéndola a hacerlo en alguna de las direcciones transversales, y, z, o la que fuere. Por su parte, el segundo vínculo de Virasoro establece una relación precisa entre la velocidad de la cuerda, v, y su extensión, L, asociando ambas cantidades de una manera que las ecuaciones dinámicas no alcanzaban a «ver». Como resultado de esto, la cuerda abierta se moverá como si tuviera una energía que está relacionada con su longitud.

Otro ejemplo que ilustra cómo los vínculos de Virasoro restringen el movimiento de las cuerdas aún más de lo que lo hacen las ecuaciones dinámicas, es el de una «cuerda cerrada» que se mueve en el espacio en la dirección z mientras oscila en el plano x, y, contrayéndose y estirándose con una frecuencia precisa. La llamaremos «la cuerda pulsante». Mientras avanza en la dirección z a una velocidad v, la cuerda pulsante se estira y se contrae sucesivamente con una frecuencia que denominaremos f. Podemos pensar que la cuerda tiene una forma circular y corresponde, así, a un círculo que se hace pequeño y grande alternadamente. En este caso la hoja de mundo dibujada al avanzar adoptará la forma de una ristra de chorizos. Pero podemos también pensar en formas más complejas para la cuerda, tales como figuras que asemejan flores con varios pétalos en el plano x, y, que se contraen y estiran. En efecto, las ecuaciones dinámicas de la teoría permiten este tipo de movimientos para las cuerdas siempre y cuando la cantidad de pétalos de esas flores sea proporcional a la frecuencia f. De este modo, la cuerda pulsante podría *a priori* avanzar a una velocidad arbitraria mientras oscila a una frecuencia f que es independiente de v. Pero resulta que los vínculos de Virasoro no están de acuerdo con ello: lo que las ecuaciones dinámicas no alcanzan a saber es que estos están allí para restringir aún más ese movimiento. Los vínculos de Virasoro le impiden a las cuerdas moverse a una velocidad arbitraria; solo aquellas cuerdas cerradas que avancen en la dirección z a una velocidad que obedezca a una relación muy precisa con la frecuencia satisfarán el segundo vínculo y resultarán, por lo tanto, posibles. Por decirlo de alguna manera, el segundo vínculo de Virasoro «sintoniza» el movimiento de traslación de la cuerda con su comportamiento oscilatorio. Así, es este segundo vínculo el que asocia la masa de una cuerda (la energía y la masa, no lo olvidemos, están relacionadas por la icónica fórmula de Einstein, $E=mc^2$) con su estado de vibración. Esto implica, entre otras cosas, que al momento de contraerse y formar un punto, poco antes de expandirse nuevamente, nuestra cuerda pulsante adquiere la máxima velocidad permitida por las leyes de la física, la velocidad de la luz. Los vínculos de Virasoro son responsables, también, de que los extremos de las cuerdas abiertas, cuando están libres, se muevan a esta misma velocidad.

LA LONGITUD DE LAS CUERDAS

Una de las preguntas más inmediatas de quien se ve frente a la teoría de cuerdas por primera vez es acerca de su tamaño. Ya hemos mencionado el cálculo de Scherk y Schwarz que les llevó, en el amanecer de esta teoría, a afirmar que sería cien veces mayor que la longitud de Planck. Por supuesto han de ser minúsculas, ya que de no ser así las veríamos extenderse a nuestro alrededor y no habríamos estado confundidos hasta ahora creyéndolas partículas. Pero aun aceptando esto, cabe preguntar ¿cuán pequeñas son? La respuesta a esta pregunta requiere recordar una vez más que a escalas microscópicas las leyes que rigen el comportamiento de la materia son las de la física cuántica. Según estas, uno no puede determinar con precisión infinita la posición de un objeto si se sabe su energía cinética, siendo esta limitación un aspecto intrínseco de la naturaleza y no debida a nuestras posibilidades tecnológicas. Por esto, aun cuando las partículas elementales fueran pensadas como objetos puntuales, uno no podría sino atribuirles un aspecto borroso al pensar en su posición en el espacio, ya que su ubicación exacta está vetada por la incerteza cuántica.

Las cuerdas, en tanto objetos microscópicos, no escapan a esta suerte. Si bien una cuerda clásica puede ser imaginada en su estado de no-vibración, quieta, tal como las de una guitarra inerme en un ropero, las leyes cuánticas prohíben la quietud de las cuerdas fundamentales. Por lo tanto, aun en su estado de menor energía, estas no pueden sino encontrarse en un estado borroso al que cabe asignarle una vibración mínima, que no es otra cosa que la imposibilidad de discernir si la cuerda se halla quieta o no. Esto es, la cuerda en su estado de mínima energía se presenta como un objeto fantasmagórico ligeramente fluctuante, como si estuviera fuera de foco por una vibración pertinaz e incontrolable. El tamaño de ese borroso objeto puede estimarse y resulta ser igual a la raíz cuadrada de la constante fundamental α', algo menor a una diez billonésima de trillonésima de centímetro, una dimensión significativamente menor que el tamaño de un único protón. En realidad, hay distintas estimaciones para el tamaño característico de las cuerdas que dependen de detalles específicos sobre los que hablaremos en el próximo capítulo; así, este puede tomar valores que van desde una mil billonésima de trillonésima de centímetro hasta una trillonésima de centímetro. Por esto, aunque las cuerdas que vibran con gran energía pueden alcanzar tamaños enormes —y quizá así lo hicieron en los primeros instantes de vida del universo, cuando toda la energía del cosmos estaba concentrada en un volumen minúsculo—, aquellas que vibran a baja energía tienen tamaños inimaginablemente pequeños y se comportan simplemente como partículas puntuales.

Conocidas la longitud de la cuerda y la velocidad de propagación de sus vibraciones, podemos calcular el valor de la frecuencia fundamental, f_0, y utilizar las fórmulas de Einstein ($E=mc^2$) y Planck ($E=hf_0$, donde h es la constante de Planck) para obtener la masa de las partículas más livianas resultantes. La respuesta es descorazonadora: unas mil billones de veces la masa del bosón de Higgs o del quark top, las partículas más pesadas del modelo estándar. Dado que la frecuencia de los armónicos viene dada por múltiplos de la fundamental, esta es también la diferencia de masa/energía entre las partículas más livianas y aquellas que le siguen en el espectro. Así, el valor de la «escala de cuerdas» es enorme y nos aleja de la hipótesis inicial que sugería la posibilidad de que todas las partículas conocidas fueran el resultado de las distintas maneras en las que puede vibrar una única cuerda. De modo que, si bien una cuerda vibrando se vería como una partícula masiva, se trataría de alguna que aún no hemos visto experimentalmente por encontrarse fuera del alcance de nuestros grandes aceleradores. Veremos más adelante que la teoría de cuerdas tiene otros mecanismos por los que, en principio, es posible dar masa a las partículas en concordancia con los valores experimentales.

Si una cuerda se encuentra en un estado de baja energía, podríamos pensar en la posibilidad de hacerla vibrar a través de una colisión ultra energética con otra cuerda. Sin embargo, es tan grande la energía requerida que, mientras este umbral no se alcance, lo único que podrá lograrse es que la cuerda objeto de la colisión simplemente se desplace moviéndose rígidamente, sin

vibrar. Insistimos en este punto porque es importante: la escala de cuerdas —diferencia de energía correspondiente a los distintos armónicos de una cuerda vibrante— es diez billones de veces mayor que la alcanzada en 2016 por el LHC, nuestro acelerador de partículas más poderoso. Solo cuando la energía incidente alcance el umbral que establece la (raíz cuadrada de la) tensión de las cuerdas, entonces la cuerda comenzará a mostrar toda su potencialidad de ente vibratorio. Es por esto que a energías bajas las cuerdas se comportan como si fueran meras partículas: no vibran, solo se mueven.

Dado que acabamos de mencionar las colisiones entre cuerdas, aboquémonos a hablar sobre la forma en que pueden interaccionar. Al igual que en la teoría de partículas estas no solo describen los constituyentes de la materia sino también sus interacciones, en la teoría de cuerdas son las cuerdas mismas las encargadas de portar la fuerza que se propinan mutuamente entre ellas. Y así como este fenómeno está descrito por los diagramas de Feynman en el caso de las partículas, diagramas análogos vienen a representar las interacciones entre cuerdas. Sin embargo, a diferencia de los diagramas de las figuras 2 y 3, que expresan los trazos unidimensionales de las partículas al propagarse en el espacio, los diagramas análogos en teoría de cuerdas corresponden a superficies bidimensionales (figuras 6 y 7), que dan cuenta de las hojas de mundo de dos cuerdas cerradas que interaccionan, fundiéndose en una sola por un pequeño lapso de tiempo, para luego descomponerse y dar origen a dos nuevas cuerdas.

Decimos, entonces, que los diagramas de Feynman en teoría de cuerdas son una versión «inflada» de los de la teoría de partículas; para ver esto basta comparar la figura 6 con la figura 2. Del mismo modo, la figura 7 representa la versión análoga a la figura 3 en teoría de cuerdas, mostrando un proceso de interacción en el que la cuerda intermedia se descompone en otras dos y se recompone nuevamente antes de, finalmente, dar origen a las dos cuerdas resultantes.

Más allá de la analogía, la teoría de cuerdas tiene una ventaja interesante: sus propiedades matemáticas son tales que, de algún modo, resulta más económico calcular diagramas en ella

FIG. 6

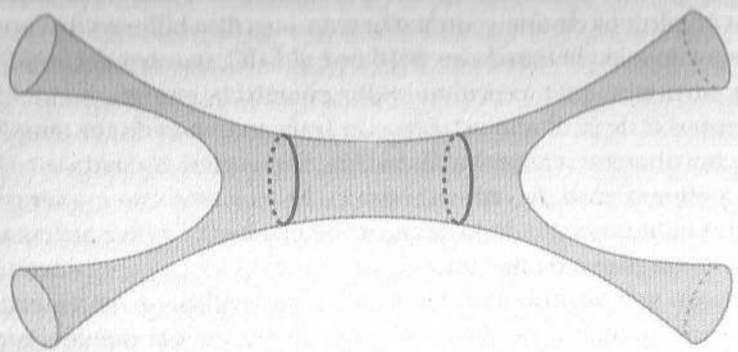


Diagrama de la superficie de la hoja de mundo correspondiente a la colisión de dos cuerdas que, luego de fusionarse en una cuerda intermedia, dan origen a otro par de cuerdas. Este tipo de diagramas es la versión bidimensional (inflada) de los diagramas de Feynman de la física de partículas. La hoja de mundo es la superficie formada por la estela que las cuerdas dibujan al surcar el espacio-tiempo.

FIG. 7

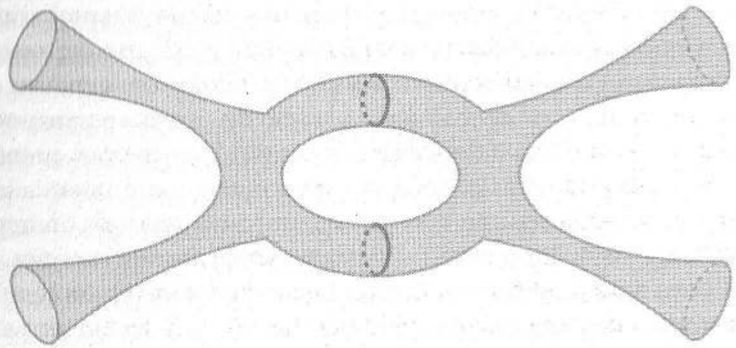


Diagrama que representa el proceso de interacción entre dos cuerdas cerradas en el que la cuerda intermediaria, durante su corta existencia, se bifurca y vuelve a unirse para finalmente desdoblarse en las dos cuerdas finales.

que en la teoría de partículas. La cantidad de diagramas a calcular para alcanzar una precisión determinada es menor. Esta ventaja, sin embargo, se ve compensada por una complicación: aunque se necesiten menos diagramas, la complejidad del cálcu-

lo que estos involucran es sustancialmente mayor. Recordemos que detrás de cada diagrama de Feynman se esconde un complejo cálculo matemático. En particular, las reglas que subyacen a los mismos en la teoría de cuerdas, lejos de ser sencillas, requieren un conocimiento profundo de geometría.

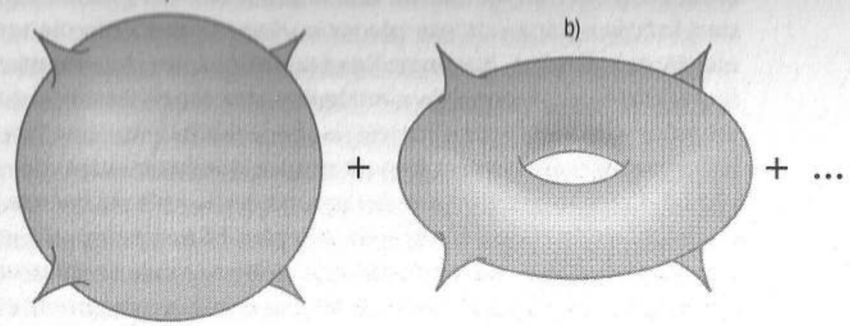
A pesar de la dificultad técnica, no obstante, la idea es simple: la contribución a la probabilidad de que un proceso dado ocurra es menor cuanto mayor sea el número de agujeros que la cuerda intermedia haya dibujado antes de dar en el blanco. Así, por ejemplo, el diagrama de la figura 7, al tener un agujero, representa un proceso menos probable que el de la figura 6, que no tiene ninguno. Si un diagrama contuviera dos agujeros (sería el caso del proceso en el cual la cuerda intermedia se descompone y recompone dos veces en su trayecto), entonces estaría representando un proceso aún menos probable, aunque posible. A efectos de calcular cuán factible es un proceso dado de interacción es necesario tener en cuenta todas las distintas formas en las que la cuerda intermedia pueda llegar a comportarse. Así, debemos sumar los distintos procesos de interacción entre dos cuerdas cerradas que incluyen a los diagramas de las figuras 6 y 7, así como las otras (infinitas) posibilidades clasificadas por el número de agujeros.

La teoría de cuerdas contiene, sutilmente camuflada, una segunda constante fundamental que da cuenta de cuán poco probable es un diagrama dado. Se la denota como g_S. La probabilidad de un proceso de colisión de cuerdas representado por diagramas como los de las figuras de la página anterior es proporcional a la constante g_S elevada a una potencia dada por (el doble de) la cantidad de agujeros que cada uno de ellos presenta: cero en el caso de la figura 6, dos en el de la figura 7, etc. Las constantes fundamentales α' y g_S son las cantidades que definen la teoría. Mientras la interpretación física de la primera, tal como discutimos arriba, es la de determinar cuán tensas son las cuerdas fundamentales (o, equivalentemente, cuán pequeñas son cuando no están vibrando), la interpretación de g_S es la de cuán propensas son las cuerdas a dividirse en dos (y/o a reconstituirse nuevamente en una). Es por esto que g_S recibe el nombre de *constante de acoplamiento de la cuerda.*

Para ser más precisos debemos decir que la teoría de cuerdas comprende la posibilidad de que la propensión de las cuerdas a interactuar no sea la misma en todo punto del espacio o en todo instante de tiempo. Es decir, la constante g_s podría ser, en realidad, una variable que en cada punto del espacio-tiempo toma un valor distinto. La noción que la física acuña para este tipo de funciones del espacio-tiempo no es otra que la de «campo». Así, la mal llamada «constante de acoplamiento» de la cuerda, g_s, podría bien llamarse «campo de acoplamiento», aunque la jerga científica le haya reservado ya el pomposo nombre de *dilatón*. El dilatón es, más precisamente, el logaritmo de g_s y expresa cuán probable es, en un punto dado del espacio y un determinado instante de tiempo, que una cuerda se disocie en dos o, viceversa, dos cuerdas se fundan para formar otra.

Si bien los cálculos involucrados en la teoría de cuerdas son de una complejidad notable, bien podemos aquí describir la idea básica que subyace en ellos. Dijimos que un proceso dado de interacción de cuerdas está descrito por diagramas de Feynman inflados como los de las figuras 6 y 7. El cómputo explícito a realizar, a efectos de calcular cuán probable es cada uno de esos procesos, emplea la rama de la matemática conocida como teoría de las superficies de Riemann —por el matemático alemán Bernhard Riemann, quien revolucionó la geometría como nadie lo había hecho desde Euclides, con su tesis «Sobre las hipótesis que están en los fundamentos de la geometría», presentada el 10 de junio de 1854—. Esquemáticamente, consiste en considerar las superficies más simples que uno pueda imaginar y que contengan la misma cantidad de agujeros que los diagramas en cuestión (por ejemplo, una esfera en el caso de la figura 6 y una rosquilla en el de la figura 7), para luego «pellizcar» dichas superficies de una manera muy precisa, como se muestra en la figura 8, tantas veces como cuerdas estén involucradas en el proceso (cuatro pellizcos en el caso de las figuras 6 y 7, ya que hay dos cuerdas entrantes y dos salientes). Los pellizcos marcan los puntos de impacto de las cuerdas, aquellos en los que colisionarán las entrantes y de los que emergerán las salientes.

FIG. 8



Superficies de Riemann sobre las que se realizan los cálculos matemáticos que permiten obtener como resultado cuán probable es un proceso dado de interacción de cuerdas. Esta figura puede ser pensada como la «matematización» de las figuras 6 y 7: mientras que el cálculo de una esfera con «pellizcos», como se muestra en a), representa un proceso de interacción como el de la figura 6, la rosquilla que se muestra en b) representa uno (menos probable que el anterior) como el de la figura 7.

La manera en la que se realizan esos pellizcos sobre la superficie codifica la forma peculiar en la que cada una de las cuerdas vibraba (entrantes) o vibrará (salientes) cuando se encuentren lejos del sitio en el que ocurrió la interacción. Estos pellizcos matemáticos se conocen con el nombre de *vértices*.

La posibilidad de representar un proceso físico tan complicado, como lo es la interacción de muchas cuerdas fundamentales, mediante un cálculo geométrico simple sobre una sola superficie (una esfera, una rosquilla, etcétera), se debe a una sorprendente y crucial simetría que presenta la teoría de cuerdas. Además de hacer posible tal simplificación, esta simetría tiene una enorme relevancia y está detrás de varios de los resultados más robustos de la teoría. Recibe el nombre de *simetría conforme* y nos dedicaremos a ella en los párrafos siguientes.

SIMETRÍA CONFORME

Le caben a las teorías físicas categorías estéticas tales como la belleza o la fealdad. Y si bien el tipo de placer que un científico encuentra en las teorías de la física, tal como ocurre en el arte o en la gastronomía, demanda una «educación del gusto», siguen siendo los regentes de ese placer nociones tales como la armonía, la simplicidad, la generalidad y, sobre todo, la simetría. La teoría de cuerdas aventaja a cualquier otra teoría antes formulada en este aspecto: su simetría, su generalidad, su simpleza, su belleza, son el eje central de su formulación matemática. Y acaso no deba sorprendernos que así sea, ya que entre sus pretensiones está ser la teoría basal que describe la naturaleza íntima y microscópica del universo. De ella debería poder extraerse la física conocida y por conocer como un corolario inexorable.

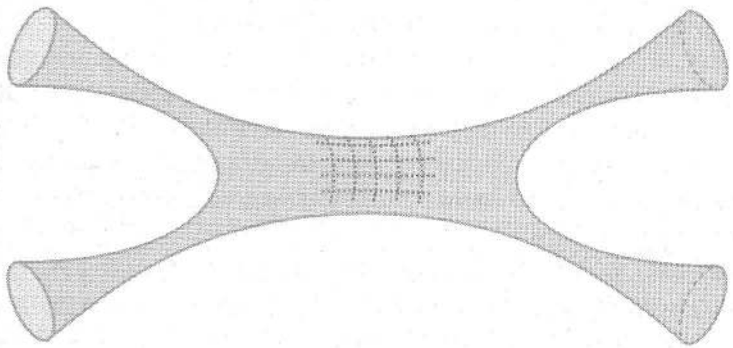
Volvamos por un instante a los diagramas de Feynman de las figuras 2 y 3. En ellos se representa la repulsión de dos partículas a través del intercambio de una tercera. Imaginemos este proceso evolucionando en el tiempo. Si ahora decidimos cambiar la definición de la unidad de tiempo y la velocidad con la que este transcurre, lo único que ocurrirá es que la «película» imaginada transcurrirá más lenta o más rápida, o con cambios de ritmo, pero el proceso de repulsión y, por lo tanto, sus diagramas asociados, serán los mismos. Dicho de otro modo, el tiempo es una coordenada que podemos imaginar parametrizada por múltiples relojes utilizados para medir sus intervalos y la física no puede depender del ritmo que los fabricantes de estos relojes hayan elegido arbitrariamente. Si pasamos de las partículas elementales a las cuerdas fundamentales, es inmediato observar que aparece otro parámetro de naturaleza similar: aquel que utilicemos para recorrer la cuerda a lo largo. La libertad que tenemos tanto para elegir la unidad de longitud empleada como la forma en la que recorremos la cuerda, sin afectar los diagramas de las figuras 6 y 7, se convertirá en una dura prueba de consistencia para la teoría de cuerdas, que demandará una simetría particular en las ecuaciones que la describen: la simetría conforme. Esta es esencial para la teoría y, por lo tanto, resulta imprescindible discutirla aquí.

Entender la simetría conforme es posible y medianamente sencillo si se comienza discutiendo su interpretación geométrica. Para ello, volvamos a los diagramas espacio-temporales que

describen la propagación e interacción de las cuerdas (figuras 6 y 7). Dijimos ya que cada uno de ellos tiene aparejado un cálculo matemático complejo, aun cuando la interpretación física de lo que estos diagramas representan pueda entenderse sin acceder a los aspectos técnicos. Ahora bien, incluso sin interesarnos en el cálculo preciso que se esconde detrás de cada diagrama, parece claro que un elemento necesario para su concreción será la elección de un sistema de coordenadas sobre la geometría de la hoja de mundo que el diagrama subtiende. Esto permitirá etiquetar cada punto de esa superficie, tal como cuando identificamos un sitio sobre la superficie terrestre mediante su latitud y longitud. Así, como paso preliminar del cálculo, es menester definir un sistema de coordenadas (un retículo) que nos permita describir la superficie (figura 9).

Obviamente, la elección del sistema de coordenadas sobre la superficie de la hoja de mundo es una construcción auxiliar, un elemento del cálculo que ha de ser empleado al realizar la matemática que se esconde detrás de cada diagrama, y de ninguna manera el resultado puede depender de dicha elección. Esto es

FIG. 9



Sistema de coordenadas definido sobre la superficie de la hoja de mundo. Siendo una herramienta matemática auxiliar, el resultado del cálculo no puede depender del sistema de referencias elegido o de las características del retículo, de igual manera que las propiedades de los accidentes geográficos no pueden depender de las referencias cartográficas elegidas para ubicarlos.

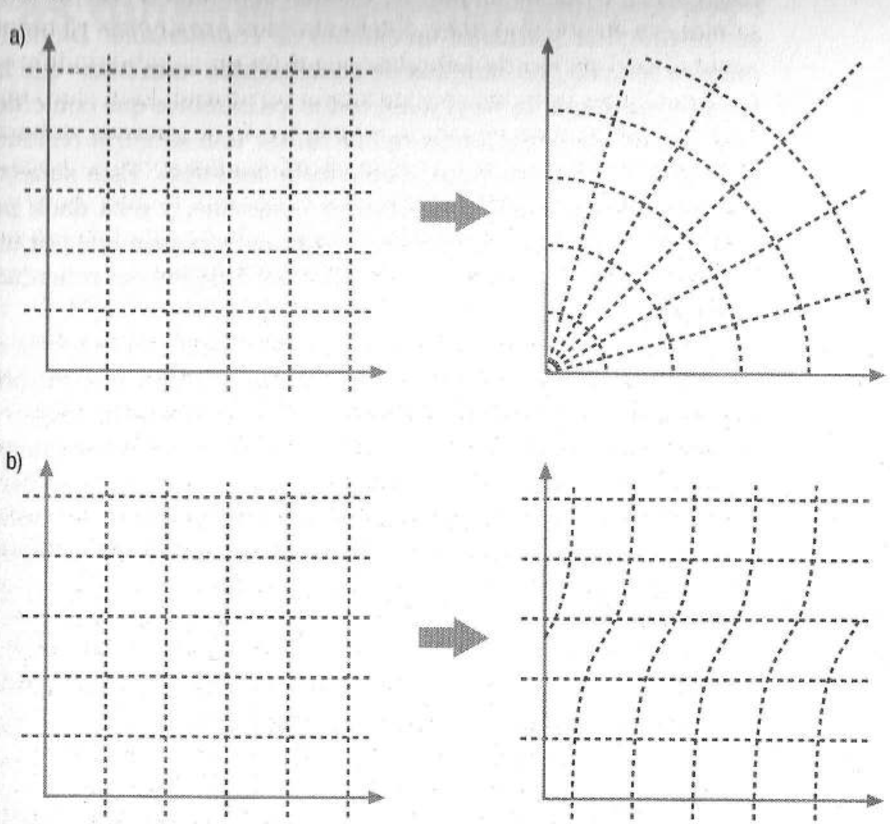
análogo a la afirmación de que los accidentes geográficos y los cauces de los ríos de un país no pueden depender de la caprichosa manera en que uno decida delimitar sus provincias. El monte Vesubio o el peñón de Gibraltar seguirán en su sitio, indiferentes a cualquier tipo de reorganización territorial. Está claro que, sean las que sean las ecuaciones de la teoría de cuerdas, deberán ser invariantes ante cambios de coordenadas sobre la hoja de mundo. Esta invariancia, que recibe el nombre técnico de *simetría ante difeomorfismos*, está relacionada de una manera que veremos a continuación con la simetría conforme.

Para entender la relación entre estas dos invariancias cabe señalar que las ecuaciones de la teoría de cuerdas presentan, además de la insensibilidad ante cambios de coordenadas, una simetría adicional. Se trata de la indiferencia ante la operación geométrica de deformar el retículo de coordenadas definido sobre la hoja de mundo. No hablamos de cualquier deformación sino de aquellos estiramientos que preservan los ángulos del retículo coordenado. Podemos pensar en estas deformaciones como amplificaciones (lo mismo vale para las contracciones, naturalmente), tal como si dispusiéramos una lupa sobre el retículo original. Más aún, esta simetría —llamada *simetría de Weyl*— se extiende a deformaciones mucho más generales, siempre que se preserven los ángulos del retículo originalmente planteado (figura 10).

Así, las ecuaciones de la teoría de cuerdas resultan invariantes ante estiramientos del retículo coordenado, como si este fuera una malla flexible dispuesta sobre cada diagrama. En efecto, muchas veces suele ilustrarse esta simetría de la teoría como la operación de estiramiento o contracción del diagrama mismo, lo que es equivalente.

De esta manera, a la simetría ante cambios de coordenadas se suma la de Weyl y las ecuaciones de la teoría de cuerdas resultan así invariantes tanto ante cambios de coordenadas en la superficie de la hoja de mundo como ante estiramientos (o deformaciones) continuos del retículo. Pero ¿no son estos dos tipos de transformaciones dos maneras distintas de representar la misma clase de deformaciones? Si así fuera, entonces las ecuaciones de la teoría de cuerdas resultarían tener simetrías redundantes. Lo

FIG. 10



La figura a) representa una transformación de coordenadas que respeta los ángulos entre líneas. A pesar del aspecto circular de la imagen de la derecha, tan diferente en apariencia al del reticulado cartesiano de la izquierda, los ángulos entre las líneas en ambos casos son siempre de 90°. En contraste, la figura b) representa una transformación de coordenadas en la que los ángulos no se preservan: el reticulado de la derecha no exhibe siempre ángulos rectos entre sus líneas y, por lo tanto, el caso b) no representa una transformación conforme.

que es lo mismo que decir que si algunas de las amplificaciones del reticulado —o acaso todas ellas— resultaran, a su vez, simples cambios de coordenadas, entonces tales tipos de cambios de coordenadas serían operaciones de simetrías redundantes. Esta intuición es, en efecto, correcta: si bien no todos los cambios de coordenadas equivalen a una transformación de Weyl del retículo, sí es cierto que muchas transformaciones de Weyl pueden ser restauradas mediante un cambio de coordenadas. Dicho de manera sencilla, los cambios de coordenadas «son más» que las transformaciones de Weyl y, así, todos los cambios que coinciden con una de ellas resultarán redundantes; una simetría residual. La teoría de cuerdas tiene «demasiada simetría». Esta simetría residual es la denominada simetría conforme, y está dada por todo cambio de coordenadas que pueda ser representado por una deformación de la grilla que preserve los ángulos del reticulado original.

La simetría conforme es una propiedad clave de la teoría de cuerdas que se convierte en un ingrediente primordial en la construcción de sus ecuaciones. Exigir a las ecuaciones que rigen la dinámica e interacción de las cuerdas que resulten invariantes ante transformaciones conformes conduce a estrictas condiciones que, a su vez, resultan en sorprendentes predicciones sobre la estructura del espacio y del tiempo. Las abordaremos a continuación.

CAPÍTULO 2

Las dimensiones del universo

Según la teoría de cuerdas, el espacio-tiempo tiene diez dimensiones y una simetría entre las partículas y sus interacciones: la supersimetría. Esto es fruto de la invariancia conforme, lo que nos conduce a la teoría de la relatividad general. ¿Cómo es vivir en un universo con más dimensiones de las que experimentamos? ¿Podrían estas ponerse de manifiesto?

La primera, y acaso más sorprendente, de las predicciones de la teoría de cuerdas, que proviene de exigir que sus ecuaciones resulten invariantes ante transformaciones conformes, es la dimensionalidad del espacio-tiempo. Tal como se manifiesta en nuestra experiencia cotidiana, el universo parece existir en tres dimensiones espaciales y en una única dimensión temporal, formando así un entramado espacio-temporal de D = 4 dimensiones que constituye el escenario en el que se despliegan todos los fenómenos físicos a nuestra escala. No obstante, y tal como lo atisbaron tempranamente genios como el de Immanuel Kant, no es del todo improbable que en otras regiones del universo, o a otras escalas muy distintas a las que nos es dado experimentar, este se nos presente en otras formas geométricas, incluso con una cantidad mayor o menor de dimensiones.

¿Cuántas dimensiones tiene una sábana? Vista de lejos diríamos que se trata de una superficie bidimensional. Y así lo experimenta una mosca que camina sobre ella. En un momento dado, el insecto emprende el vuelo, se aleja, y comienza a experimentar una tercera dimensión, perpendicular a la sábana. A distancias más cortas, sin embargo, un mosquito que pretende picar a una persona que yace al otro lado apreciaría que la sábana tiene un espesor, ya que tiene que atravesar con su aguijón algo más que un plano, y concluiría que sus dimensiones son tres. Pero la mayor sorpresa acontecerá al experimentar la sábana como lo haría un ácaro, desde tan cerca que seamos capaces de advertir que se trata de un largo hilo, convenientemente tejido. La hilacha de la sábana revelará su carácter unidimensional. Si nos aproximamos todavía más veremos el grosor del hilo y nos reconciliaremos nuevamente con las tres dimensiones. La dimensionalidad, como vemos, depende de la resolución empleada en la observación del espacio en el que nos movemos.

> Entre tanto, ha habido geómetras y filósofos, e incluso de los más notables, que han dudado de que todo el universo, o más ampliamente toda la existencia, haya sido creada según la geometría euclídea.
>
> **Fiódor Dostoyevski**

Todas las teorías de la física admiten ser escritas en un espacio-tiempo de cualquier número de dimensiones. Esto es así también para la teoría de la relatividad general, cuyas ecuaciones son tan válidas cuando $D=4$ como cuando $D=100$, $D=3200$, etcétera. Y en cierto sentido podríamos ver en ello una incompletitud. Recordemos que dicha teoría es, *a priori*, válida solo a partir de alguna escala microscópica por determinar. A nivel experimental, en lo que concierne a la interacción gravitatoria, la teoría de la relatividad general solo ha podido ser comprobada hasta distancias de una fracción de milímetro, una escala enorme para el resto de las interacciones. No parece descabellado argumentar que la incapacidad de predecir el número de dimensiones del espacio-tiempo proviene del hecho de que se trata de una «teoría efectiva»; esto es, una descripción de la naturaleza cuyo rango de validez está limitado a escalas «suficientemente grandes». La incompatibilidad con las leyes de la física cuántica es una prueba de ello. Así, la teoría es «ciega» a los detalles microscópicos del espacio-tiempo, como si en el ejemplo anterior fuéramos incapaces de ver la sábana de un modo distinto al de la mosca, cuya descripción del espacio-tiempo en el que le ha tocado vivir será diferente a la del ácaro.

Cabe esperar que una teoría cuántica del espacio-tiempo, como lo es la teoría de cuerdas, dé respuesta a la pregunta de cuáles son sus dimensiones. Si bien hemos argumentado que, previsiblemente, ello dependa de la escala a la que se la formula, dada la naturaleza cuántica de esta teoría esperaríamos que su prescripción fuera rotunda e incontestable (¡lo es!) y que correspondiera a la dimensionalidad del espacio-tiempo a escalas cercanas a la de Planck. La teoría de cuerdas no solo es la única teoría de la física que arroja una predicción precisa para el valor de la dimensionalidad del espacio-tiempo, sino que, además, y no sin sorpresa, ese valor resulta muy diferente al que hemos experimentado hasta el presente a escalas mucho mayores. La teoría de cuerdas predice, de hecho, que el espacio-tiempo ha de tener nueve dimensiones espaciales y una temporal; así, la dimensionalidad del espacio-tiempo resulta ser

$$D=10.$$

Parece pertinente hacer una aclaración histórica. La primera predicción que se obtuvo fue $D=26$, pero el cálculo inicial había sido hecho en lo que hoy se conoce como la teoría de la cuerda bosónica, la primera que se estudió y que está afectada por numerosos problemas, como el hecho de ser inestable y de no predecir la existencia de fermiones. La resolución de ambos problemas, en un trabajo publicado en 1984 por dos pioneros de la teoría de cuerdas, Michael Green y John H. Schwarz, tuvo como corolario la reducción del valor de D.

Surge *ipso facto* la pregunta siguiente: si tal como predice la teoría de cuerdas el universo es 10-dimensional, ¿por qué no tenemos evidencia de esas seis dimensiones adicionales? Quizá la tengamos, de un modo insospechado, y debamos aguzar nuestra interpretación de algunos fenómenos físicos. ¿Cuál es el mecanismo que nos impide viajar en esas direcciones, tal como lo hiciera el personaje de *El caso Plattner* de Herbert George Wells? ¿Son acaso esas seis dimensiones adicionales de una naturaleza distinta a las tres en las que nos es permitido movernos? ¿Por qué, en todo caso, son tres las dimensiones espaciales que experimentamos cotidianamente y no dos, cinco u ocho? Responderemos a estas preguntas más adelante; por el momento nos limitaremos a decir que la sorprendente predicción D = 10 proviene de combinar cuatro propiedades fundamentales de la teoría: a) la simetría conforme, b) la denominada supersimetría (sobre la que hablaremos a continuación), c) la compatibilidad con la teoría de la relatividad de Einstein y d) la mecánica cuántica.

Ya hemos hablado suficiente sobre la simetría conforme y a continuación abordaremos el tema de la supersimetría. Sobre las otras dos propiedades fundamentales de la teoría (la compatibilidad con la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica), podemos decir que son los dos pilares fundamentales sobre los cuales se asientan las teorías de la física fundamental, y la teoría de cuerdas no escapa a tal suerte. En efecto, es el hecho de exigir que sus ecuaciones exhiban esas curiosas simetrías (la conforme y la supersimetría) y, a su vez, resulten compatibles con la teoría de la relatividad especial y la mecánica cuántica lo que lleva al curioso resultado expresado por la ecuación D = 10. Esto se debe a lo siguiente. Uno de los estados de oscilación de las cuerdas cerradas, aquel que corresponde a una cuerda vibrando con mínima energía, se comporta como una partícula sin masa. Esta partícula representa al *gravitón*, como mostraremos más adelante; por el momento es suficiente con mencionar que se trata de una partícula sin masa, más allá de cuáles sean sus otras propiedades. Según la teoría de la relatividad, una partícula sin masa debe moverse a la velocidad de la luz, independientemente de la velocidad a la que pueda moverse cualquier observador que la estudie. En particular, esto implica que nadie podría verla en reposo. Esto, que es una consecuencia de la teoría de Einstein, se relaciona estrechamente con el hecho de que las cuerdas, cuando vibran en un modo correspondiente a partículas que se propagan a la velocidad de la luz, han de tener oscilaciones perpendiculares —mas nunca paralelas— a la dirección de su movimiento. Y es que si las vibraciones fueran paralelas a su propio movimiento excederían la velocidad de la luz (ya que su velocidad se sumaría a la de la cuerda como un todo), la cual es un límite infranqueable. Según las ecuaciones de la teoría, la ausencia de vibraciones en la misma dirección en la que la cuerda se mueve es compatible con la simetría conforme sobre la superficie de la hoja de mundo solo si esta trayectoria se desarrolla en un espacio-tiempo de diez dimensiones. Es así como la compatibilidad de las simetrías de las ecuaciones de la teoría de cuerdas y los postulados de la teoría de la relatividad especial arrojan un resultado único e inquietante, al menos inesperado, para la dimensionalidad del espacio-tiempo.

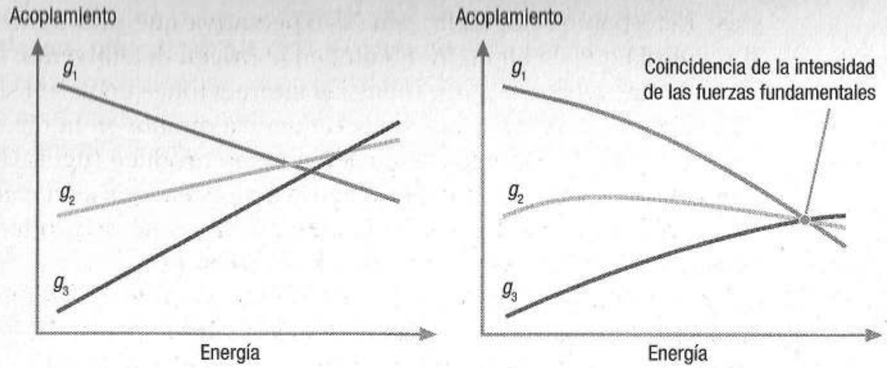
NO ES UNA QUIMERA SUPERLATIVA: ES LA SUPERSIMETRÍA

Fermiones y bosones tienen roles tan distintos y diferencias tan abrumadoras que parecería descabellada la sola idea de que también ellos fueran distintas caras de un mismo dado. Que, por lo tanto, diera lo mismo ser partícula que interacción, intercambiables por la acción de una simetría que convertiría al universo en, como reza el tango argentino, «la vidriera irrespetuosa de un gigantesco cambalache» en el que el trueque de unos por otros fuera tan inocuo, tan imperceptible, como la rotación alrededor de una esfera perfecta. Se trataría de una simetría superlativa, exagerada. Por eso, cuando a principios de los setenta aparecieron los primeros indicios de que, al menos a nivel teórico, la posibilidad de semejante quimera podría tenerse en consideración, solo cabía un nombre para ella: *supersimetría*. Hay varias razones para tomar en serio esta posibilidad, a pesar de que parezca absurda en las escalas de energía que han sido exploradas hasta el momento.

El principal motivo proviene de la unificación de las interacciones fundamentales. Las leyes de la cuántica implican que la intensidad de estas interacciones no es constante, sino que depende de la energía involucrada en un proceso dado. Por ejemplo, la intensidad de la interacción electromagnética no es la misma en el corazón del LHC que en la corona solar o en la física que gobierna la llegada a la atmósfera de partículas ultra energéticas, un fenómeno al que llamamos rayos cósmicos. Lo mismo ocurre con las interacciones débil y fuerte. Si hacemos el cálculo que nos indica cómo cambian estos acoplamientos con la energía, vemos que la tendencia es hacia la unificación a grandes energías. Esto parece coincidir con la expectativa que uno tendría si recuerda que en algún momento, en el origen del universo, es decir, a muy altas energías, todas las interacciones debieron ser una sola. Sin embargo, aunque la tendencia apunta en la dirección correcta, la esperada unificación no se produce (figura 1). Suponer la existencia de supersimetría a altas energías, en cambio, corrige los cálculos de modo tal que, ¡ahora sí!, se produce la esperada unificación. ¿Casualidad? No lo parece.

Una segunda razón de peso para tomar en serio a la supersimetría viene dada por el famoso e inefable bosón de Higgs. Como mencionamos antes, se trata de la única partícula del modelo estándar que no tiene espín. Esto conlleva un problema técnico de cierta envergadura. El cálculo de la masa del bosón de Higgs utilizando las técnicas habituales de la teoría cuántica de campos implica, inexorablemente, contribuciones enormes, positivas y negativas, mucho mayores que el propio valor determinado experimentalmente, que corresponde a unas 125 veces la masa del protón. Si bien por esta misma razón no es posible hacer el cálculo exacto a nivel teórico, el hecho de que la suma de muchos números, todos ellos inmensamente más grandes que la masa experimental del bosón de Higgs, dé un resultado comparativamente tan pequeño, lleva a una encrucijada que los físicos teóricos denominamos genéricamente «problema de ajuste fino». Es poco creíble que las ajustadas cancelaciones que tienen que producirse para que se dé este fenómeno hayan ocurrido por casualidad. Es como si un *broker* en la Bolsa que compra y vende por millones de euros a lo largo de toda la semana encontrara que el saldo neto de todas sus operaciones fue de un céntimo de euro. Puede ocurrir azarosamente, claro está, pero es inverosímil. No queda otra que pensar que el *broker* ha estado calculando sus operaciones minuciosamente, ajustando finamente cada una de ellas, para alcanzar un balance final tan preciso. Es necesaria una voluntad detrás de esta clase de fenómenos. Que ocurran al azar es extremadamente improbable. A este misterioso enigma se lo conoce como el «problema de la jerarquía» porque se trata

FIG. 1



El gráfico de la izquierda muestra lo que, según el modelo estándar, le ocurre al valor de las constantes de acoplamiento que marcan la intensidad de las tres fuerzas fundamentales (electromagnética, débil y fuerte) a medida que la energía de un proceso de interacción crece. El de la derecha, en cambio, muestra la predicción que resulta de incluir la supersimetría en el modelo estándar: a altas energías hay un momento en el cual las tres fuerzas de la naturaleza tienen exactamente la misma intensidad, sugiriendo que, a tales energías, podrían derivar de una única estructura matemática más simple, unificadora y, en definitiva, bella.

de buscar alguna explicación al hecho de que dos escalas tan dispares, la de la masa del bosón de Higgs y la de Planck, mantengan la relación jerárquica que las separa y no se mezclen. La supersimetría tiene la virtud de provocar de forma inexorable el sinfín de «milagrosas» cancelaciones que son necesarias para resolver este problema.

La unificación de las interacciones fundamentales y el problema de la jerarquía son razones de peso para tomar en serio a la supersimetría. No podemos dejar de mencionar, no obstante, otros argumentos estético-matemáticos que la respaldan. Observemos lo siguiente. Una teoría cuántica de la gravedad debe lidiar con el espacio-tiempo al igual que el modelo estándar se las ve con los campos correspondientes a las partículas elementales y las mediadoras de sus interacciones. Estas son, respectivamente, fermiones y bosones. Podemos argumentar que el espacio-tiempo es bosónico: si damos una vuelta en torno a un punto, habremos regresado al punto de partida. ¿Podrían existir dimensiones fermiónicas en el espacio-tiempo? ¿Cómo las experimentaríamos? Desde luego que si pensamos en la posibilidad de explorarlas llegaríamos a conclusiones sorprendentes: en el espacio-tiempo ordinario, podemos ir de un punto a otro siguiendo una sucesión de caminos, sin importar el orden, algo que no ocurriría con las dimensiones fermiónicas. Más aún, si hiciéramos una excursión en ellas intentando regresar al punto de partida encontraríamos que, sin habérnoslo propuesto, al volver estaríamos en otro sitio. Las dimensiones fermiónicas son tan extrañas que, por así decirlo, dar dos pasos a lo largo de ellas equivale a no dar ninguno.

> Soy muy fan de la supersimetría porque parece ser la única vía que permite poner a la gravedad dentro del esquema. Quizá no sea suficiente, pero es un camino a seguir.
>
> PETER HIGGS

Si bien la fenomenología de las dimensiones fermiónicas parece desquiciante, es posible llevar adelante la construcción de lo que llamamos el súper espacio-tiempo —se lo conoce como *superespacio* a secas— y demostrar que una teoría cuántica de campos como el modelo estándar, al ser descrita en este curioso tejido geométrico, da lugar a las teorías supersimétricas que unifican las interacciones y resuelven el problema de la jerarquía. Es decir, podemos pensar en extender la simetría de modo que esta permita el intercambio entre bosones y fermiones o, alternativamente, pedirle a nuestras teorías que extiendan su dominio del espacio-tiempo al superespacio. En ambos casos, llegaremos al mismo sitio. Y todo ello de un modo que, como mínimo, merece el calificativo de elegante.

Así como las coordenadas bosónicas son varias, podemos pensar en la posibilidad de que ocurra lo mismo con las fermiónicas. Si exploramos esta alternativa nos encontramos con que hay un número máximo admisible de direcciones fermiónicas, n, que guarda una relación estrecha con las bosónicas: para un espacio-tiempo tetradimensional, por ejemplo, es $n=4$. Hay una única forma de trasplantar la teoría básica del modelo estándar al *superespacio máximo* que tiene $n=4$ y da lugar a la llamada *teoría $n=4$ SYM.*

LA TEORÍA $N=4$ SYM: CAMINO AL SUPERESPACIO

Al formalismo matemático que constituye la columna vertebral del modelo estándar se lo conoce como *teoría de Yang-Mills*; por Chen Ning Yang y Robert Mills, quienes construyeron esta clase de teorías —a las que se denomina también *teorías gauge*— en 1954. «Esta clase», lejos de referirse a un formalismo esotérico, hace mención al tipo de teorías que describen las interacciones fundamentales: la cromodinámica cuántica (QCD) y la teoría electrodébil o modelo estándar. Si trasplantamos esta teoría desde el espacio-tiempo ordinario al superespacio máximo, obtendremos como resultado una teoría conocida como *$n=4$ súper Yang-Mills* ($n=4$ SYM). Cuantas más direcciones fermiónicas agreguemos, mayor será el número de restricciones sobre una teoría que «viva» en ese superespacio. Incursionando en las dimensiones fermiónicas, yendo y viniendo, acabamos en distintos puntos del espacio-tiempo ordinario, como mencionamos anteriormente. La consistencia interna de todas las posibilidades que se nos presentan para unir dos puntos cualesquiera a través de caminos en el superespacio resulta un corsé tanto más severo cuanto mayor sea el número de estas dimensiones.

Simétricamente superabundante

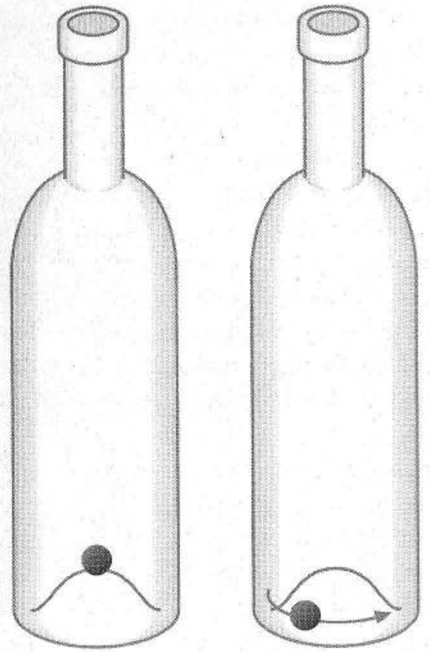
La teoría $n=4$ SYM tiene el número máximo de direcciones fermiónicas y, por lo tanto, es la teoría cuántica de campos más robusta que podemos concebir en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones. De hecho, la teoría $n=4$ SYM es única, ¡tan restrictiva es la superabundancia de simetrías! Es más, la existencia de un número máximo de direcciones fermiónicas trae de regalo una simetría adicional de la que ya hemos hablado antes: la invariancia conforme. La teoría $n=4$ SYM posee esta invariancia, del mismo tipo que la de la teoría de cuerdas. Por lo tanto, dado que esta simetría incluye los cambios arbitrarios de escala, podemos concluir que la teoría $n=4$ SYM no tiene incorporada una noción de escala: en ella no hay ni grande ni pequeño.

Chen Ning Yang y Robert Mills en 1999.

No existe ninguna evidencia experimental que revele la existencia de la supersimetría en la naturaleza. Quizá debamos ser algo más cautos, ya que el LHC está tomando datos de colisiones de protones a 14 TeV —el doble de la energía más alta explorada hasta ahora— cuyo análisis, en los próximos años, podría proporcionar las primeras evidencias de su existencia. En todo caso, sabemos que, de existir, la supersimetría tiene que estar «rota» porque no observamos fermiones y bosones con la misma masa, su predicción más inequívoca. Una simetría que se rompe «espontáneamente» puede entenderse si pensamos en la base de una botella de vino (figura 2).

Si apoyáramos una pequeña esfera en el tope de la protuberancia que allí existe y la botella no tuviera etiquetas, todas las direcciones a su alrededor serían idénticas. Sin embargo, cuando la esfera inexorablemente caiga a su configuración de menor

FIG. 2



Ejemplo de ruptura espontánea de simetría. La base de una botella de vino es simétrica respecto de rotaciones a su alrededor. Si colocáramos una esfera en la posición más alta de la base (izquierda), seguiríamos teniendo la mencionada simetría. Sin embargo, cuando la esfera caiga a una posición de menor energía, pudiendo hacerlo en principio en cualquier dirección, lo hará en alguna determinada (derecha), rompiendo para siempre la simetría original.

energía, la dirección de su caída, azarosa, marcará el fin de la simetría precedente: ahora habrá una dirección especial, aquella en la que cayó la esfera, y a partir de ella podremos caracterizar cualquier otra mediante el ángulo que ambas forman. Es el mismo mecanismo para la ruptura de simetría, propuesto por Peter Higgs, por el que las partículas elementales poseen masa a pesar de que las simetrías del modelo estándar predicen su ausencia. Del mismo modo se espera que se justifique la aparición de una diferencia en la masa de fermiones y bosones, contra el dictado de la supersimetría. De existir esta, su detección experimental depende de las particularidades del mecanismo de ruptura.

INVARIANCIA CONFORME Y ECUACIONES DE EINSTEIN

Hagamos una pausa antes de enfrentarnos a la predicción más asombrosa de la teoría de cuerdas y no indaguemos aún en su conflicto aparente con la dimensionalidad del espacio-tiempo que experimentamos. Sería absurdo celebrar dicha predicción si, por otra parte, la teoría no nos dijera nada sobre la dinámica del espacio-tiempo a esas minúsculas escalas. Las ecuaciones de Einstein se aplican maravillosamente en nuestro universo aparentemente 4-dimensional, pero ¿cuáles son las ecuaciones que obedece el tejido espacio-temporal en las minúsculas escalas en las que despliega su naturaleza 10-dimensional? Notablemente, la invariancia conforme no solo determina la dimensionalidad precisa que ha de tener el espacio-tiempo, sino que, además, lleva a predecir «las formas» que ese espacio-tiempo 10-dimensional puede adoptar: las ecuaciones que debe satisfacer; su dinámica.

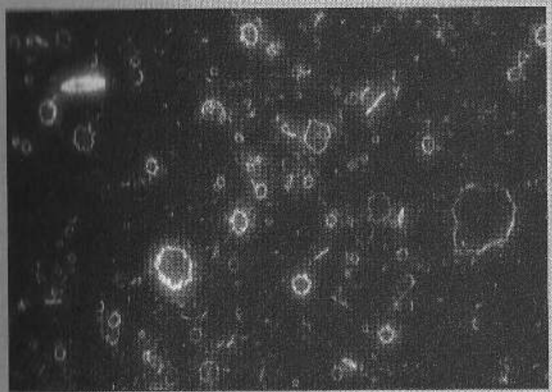
A diferencia de las partículas elementales, las cuales pueden propagarse en un espacio-tiempo de curvatura arbitraria siempre que lo hagan sometiéndose a la regla de que sus trayectorias sean las curvas de distancia mínima, las cuerdas no son tan mansas. Simplemente, no hay ninguna posibilidad de que existan en cualquier forma del espacio-tiempo. En efecto, las cuerdas establecen una suerte de conversación con el espacio-tiempo sobre el que se

UNA TEORÍA ÚNICA: *N*=8 SUGRA

Del mismo modo que podemos pensar en la gravedad como la teoría resultante de deformar el espacio-tiempo, el resultado de deformar el superespacio es lo que se conoce como *supergravedad*. Dicha deformación permite duplicar el número de dimensiones fermiónicas. Así, la teoría de gravedad más simétrica de todas es la *supergravedad* $n=8$ (conocida por la abreviatura $n=8$ SUGRA). Explicar con profundidad esta maravillosa teoría daría material suficiente para escribir todo un libro, por lo que tan solo haremos algunas observaciones sencillas. Al igual que la teoría $n=4$ SYM, la teoría $n=8$ SUGRA es única. Esta teoría fue estudiada con mucho detalle y entusiasmo por su unicidad, pero fundamentalmente por la conjetura de que sus simetrías eran tantas que es probable que estuviera condenada a ser una teoría de la gravedad compatible con las leyes de la cuántica. El argumento subyacente es el mismo que está detrás de la resolución del problema de la jerarquía: cuando se escriben diagramas de Feynman, múltiples cancelaciones tienen lugar debido a las distintas partículas supersimétricas que pueden propagarse en sus líneas internas. La rigidez implacable de la supersimetría se encarga de estas «milagrosas» cancelaciones.

Una conexión íntima entre teorías

Si bien la teoría $n=8$ SUGRA tiene el potencial para cumplir con estas expectativas, en la década de 1980 se llegó a la conclusión de que esto no era así, y los problemas de la relatividad general con las leyes cuánticas, si bien ligeramente aliviados, persistían en ella. Este resultado fue fundamental para devolver el interés de la comunidad de físicos teóricos a la teoría de cuerdas. Más adelante, sin embargo, como veremos, se encontró que las dos teorías están relacionadas íntima e inesperadamente. De hecho, se puede argumentar que la teoría $n=8$ SUGRA, secretamente, tiene once dimensiones espacio-temporales: es una versión camuflada de la supergravedad en once dimensiones que había sido construida por Eugène Cremmer, Bernard Julia y Jöel Scherk en 1978, y que también había llamado la atención por su unicidad. Es interesante mencionar que en el siglo XXI, a partir de otros avances teóricos, se han revisado los cálculos que habían demostrado la incompatibilidad de la teoría $n=8$ SUGRA con las leyes de la física cuántica, encontrándose que no solo había un error en ellos, sino que la compatibilidad entre ambas de entrada es factible, aunque incierta hasta la fecha.



Las cuerdas en el estado mínimo de energía que interactúan débilmente dan lugar a lo que se conoce como «supergravedad».

propagan y seleccionan de entre todas sus formas geométricas aquellas que satisfacen una propiedad muy especial. La razón de esto es, una vez más, la simetría conforme que han de exhibir sus ecuaciones —originada, recordemos, en la posibilidad de hacer cambios de coordenadas en la hoja de mundo de la cuerda que no cambien los ángulos del retículo—, ya que esta no puede alcanzarse sobre cualquier geometría espacio-temporal. Lo que resulta de un interés capital es que esa «propiedad muy especial» del espacio-tiempo no es cualquiera sino que corresponde a exigirle a la geometría que esté gobernada por… ¡las ecuaciones de Einstein! La consistencia interna de la teoría de cuerdas lleva inexorablemente a que el espacio-tiempo en el que estas se propagan sea solución de las ecuaciones de la teoría de la relatividad general, a cuyo autor vemos en la fotografía de la pág. 69.

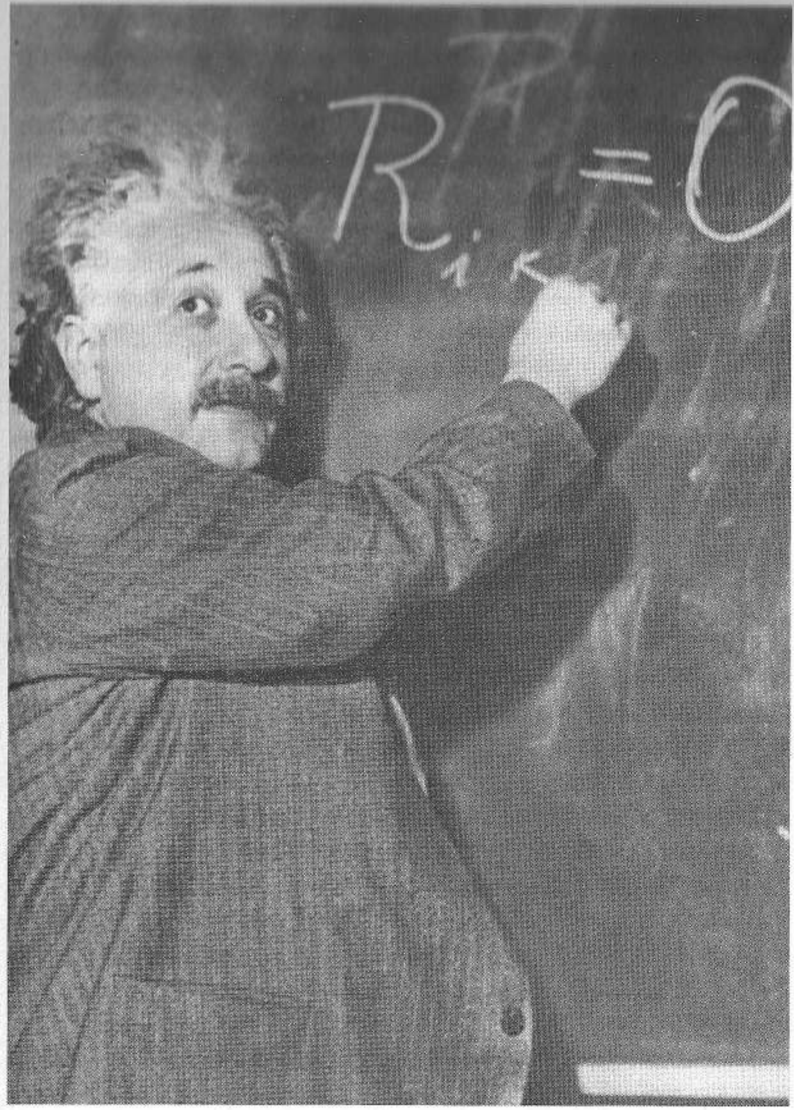
Este es un corolario inesperado de nuestras consideraciones iniciales; es de la clase de resultados que superan con creces la modestia de las hipótesis de partida. Pretendimos describir simple y consistentemente las vibraciones de cuerdas cerradas cuánticas y llegamos a la insospechada conclusión de que esto solo puede acontecer en un espacio-tiempo 10-dimensional que es solución de las ecuaciones de Einstein. Así, ¡la teoría de la relatividad general se yergue como una «predicción» de la teoría de cuerdas!

Debemos hacer una precisión importante en este punto. Las ecuaciones de Einstein emergen en la teoría de cuerdas como una aproximación de la realidad. Corresponden a la situación en la que, si bien usamos la naturaleza 1-dimensional de la cuerda para estudiar sus modos de oscilación, suponemos que ella se propaga a través del espacio-tiempo como una partícula puntual. Es la aproximación de bajas energías referida en el capítulo anterior. La teoría de cuerdas predice, además, correcciones a las ecuaciones de Einstein y permite calcularlas. Estas modificaciones están acompañadas por alguna de las dos constantes fundamentales de la teoría, α' y g_S, por lo que son intrínsecamente pequeñas. Para ser algo más precisos, las correcciones que tienen que ver con α' son las que incorporan la naturaleza unidimensional de la cuerda en su propagación —por lo tanto, adquieren relevancia cuando exploramos distancias muy pequeñas, del orden de la longitud de la cuerda—, mientras que aquellas que están gobernadas por g_s son pequeñas por involucrar más agujeros en los diagramas de Feynman «inflados». Esta desviación respecto a las ecuaciones de Einstein que predice la teoría de cuerdas tiene importantes consecuencias. La más relevante es que su presencia resulta ser la primera señal de que la teoría tiene los ingredientes necesarios para resolver las inconsistencias que la teoría de la relatividad general ofrece al intentar imponerle las leyes de la física cuántica.

LAS DIMENSIONES OCULTAS

Un entramado espacio-temporal dinámico 10-dimensional: esta es la estructura que la teoría de cuerdas predice para nuestro universo. Al embelesamiento que esta idea tan asombrosa nos produce le sobreviene el desconcierto. La idea de la existencia de dimensiones extra en el universo nos propone un aluvión de interrogantes: ¿dónde están las seis dimensiones que no vemos? ¿Cuál es el mecanismo que nos impide verlas o viajar por ellas? ¿Son esas dimensiones materiales? Y, nuevamente, ¿por qué diez? ¿Por qué solo una de ellas es tiempo y las restantes son espacio? Todas estas son preguntas en las que nos centraremos de inmediato.

Si bien la idea de las dimensiones extra puede encontrarse en publicaciones anteriores, la forma en la que hoy la entendemos nace a partir del trabajo del físico y matemático alemán Theodor Kaluza, quien a comienzos de la década de 1920 hizo una más que notable observación: si supusiéramos que nuestro espacio-tiempo no es tetradimensional sino pentadimensional, entonces la fuerza gravitatoria de esa quinta dimensión, a la que no accedemos, se manifestaría en nuestro mundo como si, además del campo gravitatorio, hubiera un campo electromagnético. Es decir, Kaluza mostró que la sola presencia de la gravedad en un espacio-tiempo de cinco dimensiones equivaldría a la suma de la gravedad y el electromagnetismo en una dimensión menos. Nace



Icónica imagen de Albert Einstein escribiendo sus ecuaciones de la teoría de la relatividad general. La teoría de cuerdas, debido a la exigencia de la simetría conforme que deben exhibir sus ecuaciones, arroja como resultado que las cuerdas solo pueden propagarse en un espacio-tiempo cuya estructura geométrica sea consistente con las ecuaciones de Einstein. Es por esto que la teoría del campo gravitatorio de Einstein (la teoría de la relatividad general) se cuenta entre las predicciones de la teoría de cuerdas.

así la sugerente idea de pensar que el campo electromagnético que observamos en nuestro universo podría no ser sino la «sombra» de la gravedad fluyendo en una dimensión a la que, de otro modo, no podemos acceder.

La teoría de Kaluza fue recibida con entusiasmo por Einstein, quien fue uno de los que insistió con la idea de que la dimensión extra debía —o al menos podía— ser pensada como una «dimensión real» de nuestro mundo. El entusiasmo de Einstein por la teoría de Kaluza no fue eterno, pero durante un tiempo prudencial, sobre todo a finales de los años treinta y comienzos de los cuarenta, trabajó con entusiasmo en ella. El atractivo que encontraba en la teoría pentadimensional era su carácter unificador, al proponer que tanto la gravedad que experimentamos, como la electricidad y el magnetismo, no serían más que distintas manifestaciones de la gravedad pura en un universo con una dimensión espacial más. La teoría de Kaluza predecía, además, que la carga eléctrica de las partículas fundamentales debía tomar indefectiblemente valores discretos, múltiplos de una única carga mínima. Y dado que este fenómeno en efecto se observa en la naturaleza, no es solo la unificación de las fuerzas lo que la hacía atractiva, sino también la posibilidad de explicar otros fenómenos físicos que permanecían hasta el momento como preguntas abiertas.

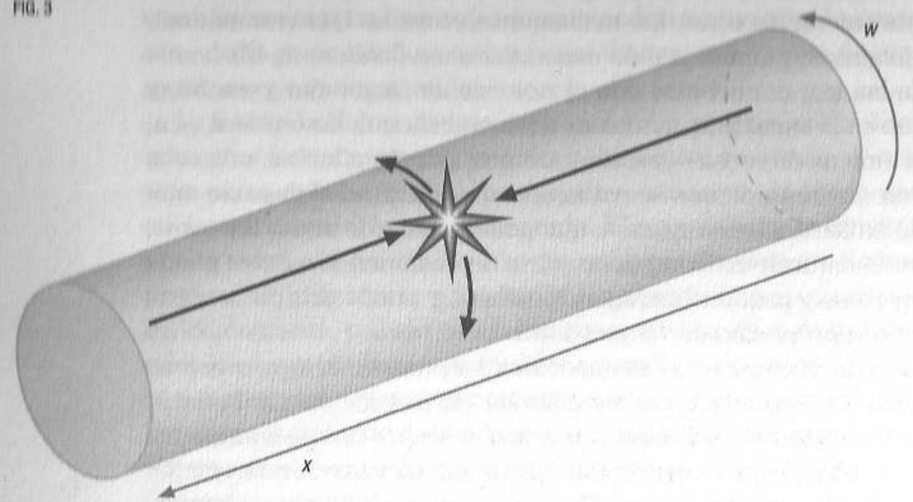
El carácter discreto de la carga eléctrica y de la masa de las partículas elementales, el origen de las simetrías que las teorías de física de partículas exhiben, entre otros, serían fenómenos que la teoría pentadimensional podría explicar de manera simple y elegante. Ahora bien, ¿por qué podemos movernos hacia delante y hacia atrás, a derecha y a izquierda, hacia arriba y hacia abajo, pero no podemos hacerlo en ninguna de esas dimensiones adicionales? ¿Cómo es que estas nos eluden? La respuesta a estas preguntas llegó de la mano de Oskar Klein pocos años después. El mecanismo imaginado por Klein para «esconder» las dimensiones extra es, en efecto, un elemento central en la construcción de la teoría de cuerdas. Y si bien estas ideas datan de muchas décadas antes de la formulación de esta última, se las identifica como el *mecanismo de Kaluza-Klein*.

La idea de Klein fue la siguiente. Las dimensiones extra, aunque tan reales como las tres espaciales en las que nos es dado movernos, pueden ser de una naturaleza distinta. A diferencia de las que conocemos con el nombre de largo, alto y ancho, y que en la escuela aprendemos a renombrar con las letras x, y, z, la dimensión extra —consideraremos, por simplicidad, una sola, pero los argumentos se extienden sin dificultad al caso de múltiples dimensiones extra—, que podemos desde ahora llamar w, es de naturaleza «compacta». Esto es, la dimensión extra puede ser finita y pequeña en lugar de infinita, y puede exhibir la maravillosa propiedad de ser periódica.

Para entender esta idea podemos valernos de la siguiente analogía. Pensemos en un corredor de un hotel, extremadamente largo y angosto, poblado de puertas a ambos lados, con las habitaciones de numeración par a la izquierda y las de numeración impar a la derecha. Las tres dimensiones que nos resultan familiares, x, y, z, estarían representadas por la extensión del pasillo, a lo largo del cual podemos movernos tanto como lo deseemos. La dimensión compacta, w, vendría dada por el ancho del estrecho pasillo. El carácter compacto y periódico de esa dimensión se expresa en que, no sin sorpresa, como si se tratara de una película de los hermanos Marx, al observar a los huéspedes de este hotel imaginario advertimos que las habitaciones son de alguna manera mágicas, y que aquellos que entran a la 233, ubicada a nuestra derecha, al cabo de un instante vuelven a aparecer en el pasillo por la izquierda, reingresando en la escena a través de la puerta de la habitación 234, ubicada frente a la anterior. Lo mismo ocurre con cada par de habitaciones enfrentadas. Es decir, el universo definido por este hotel luce normal cuando lo exploramos moviéndonos a lo largo del pasillo, pero resulta mágico si tratamos de movernos de izquierda a derecha, mostrándose como un espacio cíclico en el que los huéspedes estarán condenados a regresar al pasillo cada vez que pretendan entrar a una habitación.

Otra forma de ilustrar la idea de una dimensión compacta es la que se sugiere en la figura 3, que representa a nuestras dimensiones espaciales, incluyendo la dimensión extra, como un cilindro. La dimensión larga (no-compacta) que va paralela al eje

FIG. 3



El espacio está aquí representado por un cilindro. Las tres dimensiones no-compactas que experimentamos en nuestra vida cotidiana están expresadas por la dimensión *x*, que se extiende en línea recta a lo largo del cilindro. La dimensión extra, a la que llamamos *w*, corresponde a un círculo, es decir, es una dimensión cíclica, compacta, cuya circunferencia debe ser pequeña comparada con los átomos si queremos explicar por qué no tenemos evidencia de ella.

del cilindro, etiquetada como x en el dibujo, representa nuestras tres coordenadas espaciales habituales, x, y, z; mientras que la dimensión compacta, w, corresponde a la dirección circular, alrededor del cilindro.

Si un observador tuviera un tamaño pequeño comparado con el radio del círculo —podemos pensar en un pequeño ratón que intenta subir a un barco caminando sobre los gruesos cabos que lo amarran a puerto, pisando firme sobre ellos por no percibirlos tan peligrosamente delgados, como sí lo haría un marinero—, entonces podría confundir la dimensión compacta con una usual, no-compacta, ya que la extensión del círculo w, aunque limitada, sería para él aún grande. Si se adentrara en la dimensión compacta, emergería por el otro lado al dar la vuelta al cilindro, tal como ocurría en el hotel de los hermanos Marx. Si el tamaño del observador, por el contrario, fuera mucho más grande que la

extensión de w, entonces no habría diferencia sustancial entre considerar al cilindro, sencillamente, como un hilo infinitamente delgado de una sola dimensión. Seguimos esta intuición muy a menudo; por ejemplo, lo hacemos cuando, al dibujar, reemplazamos por líneas aquellas cosas que, en realidad, no son líneas sino simplemente cosas delgadas. De igual manera, la física de objetos macroscópicos —cuya extensión es mucho más grande que el radio de la circunferencia de la dimensión extra— encuentra irrelevante la existencia de esta dimensión, y solo los objetos microscópicos pueden adentrarse en ella.

Ahora bien, en un ejercicio de mayéutica, permítasenos oficiar de abogados del diablo y contrargumentar de la siguiente manera: ¿No son acaso las cuerdas objetos microscópicos y no estamos todos nosotros hechos de cuerdas? ¿No deberíamos, según esta lógica, experimentar la presencia de dimensiones compactas como la descrita por la coordenada w? La respuesta es negativa, ya que, debido a la mecánica cuántica, que el tamaño de un objeto sea pequeño es una condición necesaria pero no suficiente para que este pueda moverse en la dirección w. Para lograrlo se necesita, además de ser pequeño, tener una energía suficientemente grande; tan grande cuanto pequeña sea la circunferencia de la dimensión extra. Expliquemos esto último. La mecánica cuántica propone que muchos de los procesos físicos ocurren involucrando cantidades mínimas —y de allí el apelativo de «cuántica», que proviene de la voz latina *quantum*, que hace referencia a ese paquete mínimo—. Por ejemplo, la emisión de luz en muchos procesos físicos se da en cantidades mínimas o en múltiplos enteros de ellas, y no puede darse en menor medida que ese quantum. Esta es la base, por ejemplo, del efecto fotoeléctrico, cuya explicación le valió un premio Nobel a Einstein.

Lo mismo ocurre con la energía transmitida en las dimensiones extra, cuando son compactas. Cuando pensamos en ellas en el contexto de la mecánica cuántica, advertimos que solo es posible moverse a lo largo de la dimensión w con una energía que sea, al menos, una energía mínima, a la que podemos referirnos como «energía de umbral». Así, una cuerda fundamental solo podrá moverse a lo largo de la dimensión compacta de la figura 3 si le es dado alcanzar, cuando menos, esa energía de umbral. Si no llega a disponer de tal energía cinética, entonces se verá constreñida a moverse solo a lo largo de las dimensiones no-compactas usuales. Por otro lado, dicha energía de umbral, necesaria para adentrarse en la dimensión compacta, resulta ser inversamente proporcional al radio de la circunferencia que dicha dirección representa. Por lo tanto, cuanto más pequeña sea la dimensión compacta w, mayor será la energía mínima necesaria para moverse a lo largo de ella y, por lo tanto, menos accesible resultará tal forma de movimiento. Es por esto mismo que no esperamos que las partículas —o, mejor dicho, las cuerdas, a las que vemos como partículas puntuales a bajas energías— que producimos en los aceleradores actuales lleguen a escaparse hacia las dimensiones extra, ya que nuestras máquinas no alcanzan la energía suficiente para propinarles el empujón necesario para lograrlo.

La figura 3 ilustra cómo sería una colisión frontal de dos partículas que se mueven en la dirección no-compacta x. Una posibilidad lógica, y que típicamente ocurre cuando las energías no son muy altas, es que las partículas, luego de colisionar, reboten y retomen el camino por el que vinieron. Este tipo de colisión es usual. Ahora bien, si la energía de las partículas al incidir es lo suficientemente alta, entonces existe otra posibilidad lógica: luego de colisionar las partículas podrían quedar moviéndose en círculos a lo largo de la dimensión extra w, en direcciones opuestas. Desde la perspectiva de un observador que no supiera de la existencia de la dimensión extra, este fenómeno sería muy desconcertante ya que, desde su óptica, las partículas permanecerían en una posición x fija luego de la colisión. En su desconocimiento de la existencia de la dimensión w, concluiría erróneamente que en la colisión se ha perdido energía repentinamente, ya que antes del choque veía a dos partículas encimarse rápidamente una sobre la otra y tras la colisión esas dos partículas parecerían permanecer quietas. Quienes tuvieran conocimiento de la existencia de la dimensión extra, en cambio, sabrían que no es cierto que las partículas se encuentren quietas, sino que se mueven como se espera tras una colisión elástica, pero lo hacen en una dimensión que no todos logran ver. La energía, por lo tanto, se conserva, pero para saberlo hay que tener conocimiento de la presencia de la dimensión compacta. Es debido a esto que el síntoma de la existencia de dimensiones extra que se podría llegar a observar en los futuros aceleradores de partículas es, precisamente, la pérdida aparente de energía, como resultado del flujo de esta hacia las dimensiones extra.

Según el observador al que la dimensión extra le resulta inaccesible, la configuración de dos partículas girando en torno a la circunferencia w se ve como una única partícula quieta pero de masa considerable. Esa «masa», en realidad, no es tal, sino simplemente energía cinética —recordemos que masa y energía están relacionadas a través de la icónica fórmula de Einstein, $E = mc^2$— que fluye en las dimensiones extra. Así llegamos a una nueva y espectacular conclusión de la teoría de Kaluza-Klein: la masa en reposo de las partículas elementales que observamos podría deberse, simplemente, a que en realidad estas no se encuentran en reposo sino moviéndose a grandes velocidades pero en dimensiones a las que no tenemos acceso. ¿Es la masa energía en reposo tal como lo entendemos desde Einstein, o es energía de movimiento en una dirección que no vemos? Según la teoría de cuerdas, todas las partículas elementales observadas hasta el presente deben a la existencia de las dimensiones extra la masa que les asignamos —si bien los mecanismos para que ello ocurra no se agotan en el aquí presentado— y no a las oscilaciones de la cuerda, que involucran energías inconmensurablemente mayores.

UNA FÍSICA MULTIDIMENSIONAL

Antes de continuar con la descripción de la teoría de cuerdas, la que ya sabemos 10-dimensional, dediquemos una sección a pensar cómo sería la física en un universo cuyas dimensiones espaciales ya no fueran tres, sino un número distinto, mayor. ¿Cuáles serían las novedades? ¿Qué fenómenos deberíamos esperar en un universo D-dimensional? ¿Cómo habrían de ser las leyes de la física en un espacio de tales características?

Como ocurre siempre que emprendemos la tarea de «generalizar» las leyes de teorías que conocemos en alguna dirección inexplorada, con el consiguiente riesgo de que algunas de nuestras certezas puedan perder sustento, debemos asirnos de algo que, por buenas razones, decidamos preservar a toda costa. Así, nociones tales como la libertad de efectuar cambios generales de coordenadas —esencial en la teoría de la relatividad general—, la conservación de la energía y las leyes de la mecánica cuántica constituirán el puñado de certezas de cuya mano exploraremos la física D-dimensional. Por el contrario, otros aspectos sí serán diferentes a lo que conocemos de la física en el espacio tridimensional y deberemos, pues, resignar algunos de nuestros presupuestos y conocimientos escolares.

La física en un espacio D-dimensional es sorprendente, esquiva a la intuición y es, a su vez —o quizá precisamente debido a ello—, divertida. Comencemos hablando de operaciones geométricas básicas, tales como las reflexiones en un espejo o las rotaciones en torno a un eje. Resulta difícil imaginarnos que algo sorprendente pueda surgir al lidiar con nociones tan básicas y simples, aun cuando nos propongamos repensarlas en un escenario multidimensional. No obstante, cuando en el lenguaje matemático se empieza a formular de manera sistemática lo que significa algo tan sencillo como una rotación, aparecen sorpresas que llevan a reconsiderar la física de cabo a rabo. Esto deja en evidencia cuántos de los conceptos que creemos naturales e «intuitivos» están, en realidad, viciados de preconceptos que construimos por haber percibido siempre a nuestro entorno como tridimensional. Al fin y al cabo, es eso lo que moldea aquello que llamamos la intuición, educada de la mano de nuestra experiencia cotidiana.

Podemos comenzar contando, por ejemplo, que en un espacio de dimensionalidad mayor que tres ya no tiene sentido la idea de rotar en torno a un eje, ya que existe más de una dirección perpendicular a un determinado plano. En tres dimensiones, es equivalente indicar que uno rota en torno al eje z que decir que uno lo hace en el plano formado por los ejes x e y. Por el contrario, en cuatro dimensiones estas dos cosas no son equivalentes,

ya que rotar en el plano formado por los ejes x e y puede significar hacerlo en torno al eje z, pero también hacerlo en torno al —antes inexistente— eje w; o en torno a ambos, o un poco en torno a cada uno de ellos. Un objeto que rota en nuestro espacio tridimensional —pensemos en una pelota de fútbol— siempre lo hace en torno a un único eje, pero en un espacio D-dimensional, con $D>3$, este puede rotar en torno a D-2 ejes simultáneamente. En un espacio bidimensional, por otro lado, un objeto no puede rotar en torno a nada ya que el eje transversal no pertenece al espacio mismo. Entonces, uno concluye que la noción de «rotar en torno a un eje» solo tiene sentido, por accidente, en el espacio tridimensional, mientras que en dimensiones mayores lo único que tiene sentido es «rotar en un determinado plano».

Otra idea simple e importante es la relación entre reflexión, rotación y la noción de identidad de un objeto geométrico. Por ejemplo, pensemos en un espacio unidimensional, un mundo en el que solo tiene sentido moverse hacia delante o hacia atrás, pero no de derecha a izquierda ni de arriba abajo. Este mundo estaría poblado de seres tipo lombrices a los que ni siquiera les sería posible ondular, ni adelantarse unos a otros, sino solo moverse en hilera de adelante hacia atrás o viceversa. Supongamos que uno de esos seres se lanza a la exploración de ese mundo y, en su andar, se topa con un extraño objeto, algo parecido a una flecha que apunta hacia la izquierda. Luego, decide aventurarse hacia el lado opuesto hasta que topa con otro objeto, una flecha que apunta hacia la derecha. El ser-lombriz, nacido y educado en su mundo unidimensional, percibirá a las dos flechas como objetos de naturaleza distinta, como si una fuera la inversión especular de la otra, su reflexión, pero nunca advertirá que las dos podrían ser, de hecho, el mismo objeto, mediante una simple rotación en el plano que es incapaz de concebir. Su intuición no se forjó en un marco de familiaridad con la existencia de una segunda dimensión espacial, por lo que no puede imaginar a una de las flechas como rotación de la otra. Un ser bidimensional, en cambio, lo encontraría evidente: en efecto, las dos flechas son el mismo objeto aunque ubicado en dos posiciones diferentes; una flecha hacia la derecha es el resultado de haber rotado 180° en el plano otra flecha que apuntaba hacia la izquierda, de la misma manera en la que el símbolo del número 6 es el mismo que el del 9, pero habiéndolo rotado. Así, lo que en una dimensión corresponde a dos imágenes especulares distintas, en dos dimensiones serían tan solo dos posiciones —de las infinitas posibles— del mismo objeto.

Ahora bien, ¿qué ocurre si en lugar de comparar el símbolo del número 6 y el del 9, le pidiéramos al ser-plano que intentara relacionar las letras b y d? Fracasaría al tratar de obtener una como rotación de la otra, ya que está confinado en el plano y, por ende, no le es accesible rotar despegándose del mismo. Ni siquiera puede concebir que una tercera dimensión lo haga posible. Su intuición no está preparada para ello. Por ello, mientras el ser-plano reconocería fácilmente que la letra d y la letra p sí pueden ser pensadas como el mismo dibujo rotado en 180°, su cerebro chato no podría relacionar de la misma manera las letras b y d, a las que clasificaría como imágenes especulares. Por el contrario, seres tridimensionales como los que presumiblemente leen estas líneas se verán libres de rotar la letra b en el espacio, despegándola de la hoja de papel e invirtiéndola mediante un imaginario giro en el aire, como el que se hace al pasar la página, y así concluirá que las letras b y d son tanto la misma cosa como lo son los números 6 y 9; el mismo garabato que simplemente ha sido rotado. Imaginar esa rotación que obliga a salirse de la hoja no es complicado, porque se trata de una operación tridimensional que ya es parte del acervo de nuestra intuición.

Surge de inmediato la pregunta siguiente: ¿qué ocurre con los objetos que en nuestro mundo tridimensional percibimos como imágenes especulares, tales como una mano derecha, que no puede ser rotada para obtener la fisiología de una mano izquierda? ¿Es un zapato izquierdo la rotación de un zapato derecho en un mundo 4-dimensional aun cuando en nuestro universo tridimensional nos sea imposible concebirlo? La respuesta es sí. Tal como Gottfried Plattner, el personaje del cuento de Herbert G. Wells, quien luego de una travesía por la cuarta dimensión regresa a nuestro mundo con su corazón del lado derecho, la geometría nos enseña que si pudiéramos lanzar nuestro zapato

hacia la cuarta dimensión, este podría volver siendo el del pie equivocado.

Esto nos muestra que existe una relación íntima entre rotación, reflexión y la posibilidad de considerar objetos de apariencia diferente como manifestaciones diversas del mismo objeto; y que la dimensionalidad del espacio juega un papel relevante en ella. Y dado que la forma en la que entendemos a las partículas elementales, la arquitectura del modelo estándar, se basa en cómo actúan las distintas operaciones geométricas sobre los objetos matemáticos que las describen, resulta providencial y oportuno tener en cuenta que las propiedades de las partículas —y las cuerdas— en nueve o diez dimensiones espaciales no son las mismas que conocemos en tres dimensiones. Por ejemplo, los neutrinos son partículas elementales cuyas propiedades ante la reflexión son abstrusas: no se comportan de manera simétrica entre derecha e izquierda, es decir, distinguen entre lateralidades. En términos técnicos se dice que son «quirales». Y por culpa de ellos nuestro universo no puede «mirarse al espejo»: ¡la reflexión especular no obedecería las leyes de la física! Pero si la reflexión en tres dimensiones corresponde a una mera rotación en dimensiones mayores, debemos tener muchísimo cuidado al pensar desde la física D-dimensional una explicación consistente del carácter quiral de los neutrinos que experimentamos en nuestra cotidianeidad tridimensional. Este es solo un ejemplo de los detalles a los que uno debe atender cuando intenta pensar en partículas y campos en D dimensiones.

> La teoría de cuerdas es un pedazo de la física del siglo XXI que cayó por casualidad en el siglo XX.
>
> **Daniele Amati**

No solo los neutrinos sino todas las partículas elementales tienen sus propiedades especiales de transformación a las que es necesario prestar atención. El campo eléctrico, por ejemplo, es representado por un vector. Es decir, en el mundo tridimensional al campo eléctrico se le asignan tres valores numéricos en cada punto del espacio. En cambio, el campo magnético no es un vector, sino un ente geométrico denominado 2-forma (de la que hablaremos más adelante). Resulta que en tres dimensiones una

2-forma tiene por casualidad también tres componentes, y esta coincidencia es la que induce a confusión, concluyendo (erróneamente) que el campo magnético es también un vector. La diferencia entre ambos, sin embargo, se hace evidente en un espacio D-dimensional. Por ejemplo, en un espacio 4-dimensional una 2-forma como el campo magnético tiene seis componentes, mientras que un vector como el campo eléctrico tiene cuatro. Es solo una ilusión (una casualidad del espacio tridimensional) que los campos eléctrico y magnético tengan la misma cantidad de componentes. Algo similar ocurre con las propiedades de otros campos de fuerza. Muchas coincidencias se deben solo a curiosidades de la naturaleza tridimensional del espacio y no a una razón profunda. Por esto, antes de emprender la tarea de formular una teoría (de cuerdas) en un espacio D-dimensional, tenemos que aprender a distinguir qué cosas que sabemos de física debemos resignar y cuáles mantener.

Otro ejemplo importante es el del campo gravitatorio, cuyas ondas (detectadas por vez primera en 2016), al igual que las del campo electromagnético —la luz—, tienen dos polarizaciones, es decir, que pueden oscilar con dos orientaciones diferentes. En un espacio 4-dimensional, por ejemplo, esto ya no es cierto: la luz tendrá tres y no solo eso: las ondas gravitacionales pasarán a tener cinco polarizaciones, ni siquiera el mismo número (otra casualidad de las tres dimensiones). Lo mismo ocurre con los entes geométricos que describen a los fermiones, que mientras en nuestro espacio tridimensional tienen una cantidad de componentes comparable a la de los vectores, en un espacio de dimensionalidad mayor tienen muchísimas más. Y las leyes que rigen la dinámica de los campos también se modifican: mientras que, tal como aprendimos en la escuela, en nuestro espacio tridimensional la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos decrece de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos, en un espacio D-dimensional el decaimiento es más abrupto y la fuerza gravitatoria resulta inversamente proporcional a la distancia elevada al número D-1.

Muchas ecuaciones han de ser modificadas al tener en consideración que el espacio ya no es de dimensión tres, sino de dimensión nueve. También la variedad y complejidad de la geometría aumenta con la dimensionalidad: mientras que en una dimensión nos conformamos con rectas, semirrectas, círculos, etcétera, en dos dimensiones tenemos esferas, rosquillas (entiéndase que nos referimos a la superficie exterior de estas), botellas de Klein y bandas de Möbius. En tres dimensiones el catálogo aumenta aún más y aparecen objetos sólidos así como objetos porosos que albergan burbujas en su interior, entre otras rarezas. No es difícil hacerse una idea de la desasosegante extensión que ha de tener el bestiario de geometrías posibles en un mundo con nueve dimensiones espaciales.

Todas las cuerdas, la cuerda

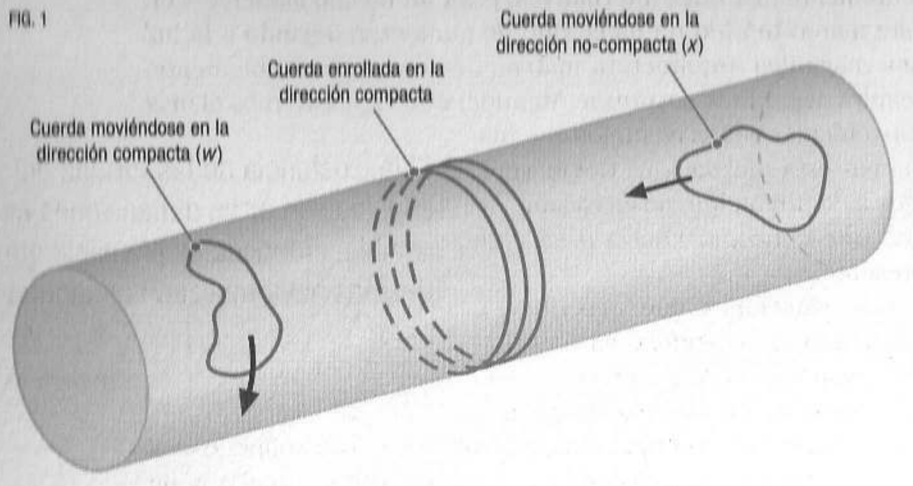
Las cuerdas experimentan las dimensiones extra de forma tan sorprendente que algunas formulaciones de la teoría son distintas solo en apariencia. Ciertas simetrías de dualidad igualan formulaciones *a priori* muy diferentes, como la teoría-M, que encierra un universo 11-dimensional. Así, lo que percibimos como un universo podría ser un rincón perdido de una estructura aún mayor llamada multiverso.

Los movimientos de las cuerdas, de cuya versatilidad ya hablamos, son mucho más interesantes cuando se tiene en cuenta la presencia de dimensiones compactas. Esto se ilustra en la figura 1, que nos muestra tres comportamientos bien diferenciados que estas pueden adoptar. Las cuerdas pueden moverse a lo largo de una dimensión no-compacta x, hacerlo a lo largo de una dimensión compacta w, o enrollarse alrededor de esta. Son posibilidades que las cuerdas pueden y deberán explorar, al tiempo que, naturalmente, también pueden vibrar.

Sabemos que las cuerdas, al vibrar, se comportan como partículas de masa enorme, que va creciendo a medida que aumenta la frecuencia de oscilación. De hecho, la masa (al cuadrado) de una cuerda resulta proporcional a su frecuencia de vibración multiplicada por su tensión.

Pero existen otras maneras por las que una cuerda puede adquirir masa. Aun si no vibra, puede hacerlo por el hecho de estar moviéndose a lo largo de la dimensión w. En este caso, *a priori*, la masa no es tan elevada como la debida a la vibración: resulta inversamente proporcional al perímetro de la circunferencia w, es decir, es mayor cuando más pequeña es la dimensión extra.

FIG. 1



A diferencia de las partículas puntuales, las cuerdas pueden explorar las dimensiones extra, de naturaleza compacta, de muchas maneras. Pueden moverse en las direcciones compactas, tanto como pueden hacerlo en las no-compactas, pero pueden también enrollarse en torno a las dimensiones compactas, algo que está fuera del alcance de las partículas.

Un tercer mecanismo por el cual una cuerda puede adquirir masa es el enrollamiento a lo largo de la dimensión extra compacta. Una cuerda (figura 1) puede enrollarse una o varias veces en la circunferencia w. En tal caso, la cuerda termina adquiriendo una masa que es proporcional a la cantidad de vueltas del enrollamiento y al perímetro de la dimensión compacta. No existe nada parecido en el universo de las partículas puntuales.

Una de las propiedades más sorprendentes de la teoría de cuerdas es que, existiendo tantas maneras diferentes en las que estas pueden adquirir masa (vibrando, moviéndose o enrollándose en direcciones compactas), muchas de ellas resultan ser, aunque de aspecto muy distinto, matemáticamente equivalentes. Esto se conoce con el nombre de «dualidad», un término clave que ya empleamos en el capítulo anterior. Desde su propia gestación, cuando lo que hoy llamamos teoría de cuerdas se conocía bajo el nombre de «modelos duales», la identificación de dualidades —es decir, la existencia de dos descripciones aparentemente distintas, alternativas, para un mismo sistema— en este marco teórico no ha cesado de aumentar, dejando a la luz una magnífica arquitectura matemática que, presumiblemente, seguirá deparando sorpresas. Más adelante exploraremos el más espectacular de los ejemplos que respaldan esta afirmación. Como veremos a continuación, no es casualidad que este concepto vuelva a hacerse presente.

> **Si la existencia de las formas del espacio con otras dimensiones es posible, entonces es plausible que Dios las haya realizado en alguna parte.**
>
> IMMANUEL KANT

Las ecuaciones que describen a una cuerda moviéndose en un espacio-tiempo en el que algunas de sus dimensiones son compactas presentan una curiosa simetría: la masa de una cuerda enrollándose N veces en torno a una circunferencia de radio R es igual a la de otra cuerda que no se enrolla sino que se mueve con una energía cinética que es N veces la mínima requerida —anteriormente nos referimos a ella como «energía umbral»— para aventurarse en una dimensión compacta de radio proporcional a $1/R$. Es decir, para una cuerda, moverse a lo largo de una dimensión compacta de radio pequeño es equivalente a enrollarse en torno a una dirección compacta de radio grande, y viceversa. Este curioso y sorprendente resultado no es sino otra evidencia de que las cuerdas, a diferencia de las partículas puntuales, «sienten» el espacio-tiempo de manera distinta, al punto de «confundir» sofisticadamente geometrías que una partícula puntual juzgaría diferentes. Ya hemos hablado sobre un fenómeno similar cuando decíamos que las cuerdas en presencia de curvatura se comportan igual que en un espacio-tiempo plano, sin gravedad, pero bajo el influjo de una suerte de campo electromagnético, el campo de Kalb-Ramond. Esta «forma dual» en que las cuerdas experimentan los campos de fuerza se relaciona estrechamente con la que acabamos de describir.

El que las cuerdas vivan el espacio-tiempo de una manera tan diferente a como lo hacen las partículas puede atribuirse al hecho de que no sean objetos puntuales sino extendidos. Por lo tanto, no puede sorprendernos que su exploración de las formas del espacio sea no-local, es decir, que tanteen distintas regiones del espacio circundante al mismo tiempo, a diferencia de las partículas, que solo tienen acceso al espacio en el mismo punto en el que se encuentran.

LAS DIMENSIONES Y LOS ÁNGELES

A esta altura debería estar claro que el concepto de vivir en un universo multidimensional, con más de tres dimensiones espaciales, no tiene por qué ser un problema. Si bien la idea parece fantástica al comienzo, cobra sentido cuando comprendemos la naturalidad que subyace a las razones por las que podríamos no haberlas visto aún. Si las dimensiones extra son muy pequeñas, simplemente podríamos no haber alcanzado en nuestros aceleradores el valor de la energía umbral que, según la mecánica cuántica, es necesario para poder aventurarnos en ellas. O, incluso, aprendimos que podríamos haberlo hecho sin que nos resultara obvio, a través de sus efectos —predichos por la teoría de Kaluza-Klein— en las masas y cargas de las partículas elementales y sus interacciones en el modelo estándar.

De todos modos, que una idea sea plausible no es suficiente para que sea satisfactoria desde el punto de vista científico. Si bien hemos descrito el mecanismo por el cual las dimensiones extra podrían ser inaccesibles para nosotros, genera desazón pensar que la afirmación de su existencia sea incontrastable, tal como la existencia de los ángeles. No obstante, esto no es así. A pesar de la inaccesibilidad directa de las dimensiones extra, sí es posible tener evidencia física de ellas. En efecto, aun cuando no pudiéramos acceder a ellas, su existencia sería determinante para algunos fenómenos físicos que experimentamos en nuestra modesta rebanada tridimensional del espacio. Esto se relaciona con los distintos mecanismos que discutimos antes por los cuales una cuerda puede adquirir masa. No se trata únicamente de su posibilidad de vibrar, sino también de la de moverse en dimensiones compactas y enrollarse en torno a estas. La mecánica cuántica, como ya discutimos, establece una energía cinética

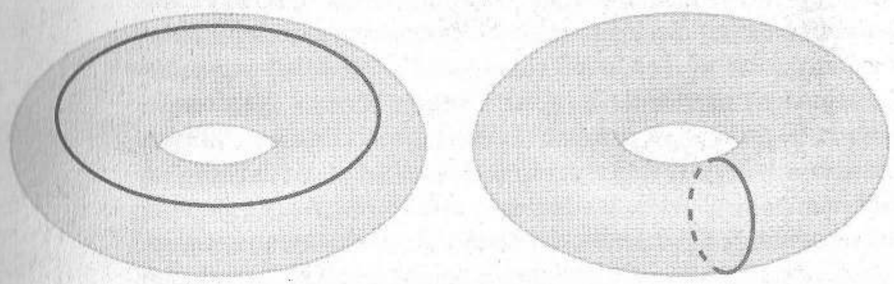
mínima para que se produzca movimiento a lo largo de la misma, inversamente proporcional al radio de la dimensión compacta, y solo puede ser un múltiplo entero de esta energía umbral. Por lo tanto, los valores de las masas del catálogo de partículas elementales que encontramos en los aceleradores de nuestro mundo tridimensional estarán signados, de una u otra manera, por el tamaño y la forma que las dimensiones extra adopten. Esto implica que, aun cuando no tengamos acceso a viajes multidimensionales, sí podríamos tener evidencia indirecta de esas dimensiones ocultas.

En el ejemplo elegido en la figura de la pág. 72 y en la figura 1 de este capítulo para ilustrar la noción de dimensión extra, solo hemos incluido una dimensión no-compacta, x, y una compacta, w. No obstante, sabemos que las dimensiones no-compactas de nuestro mundo son tres, y ya dijimos que la teoría de cuerdas predice la existencia de otras seis. Esto último conlleva la posibilidad de que las dimensiones extra adopten formas bastante más abstractas que la de una sencilla circunferencia. Se llama *compactificación* al procedimiento de elegir una «geometría compacta» para las dimensiones extra —es decir, una forma de apretujarlas—. Agotar el bestiario de geometrías compactas 6-dimensionales sería una tarea «sisífica», a menos que invoquemos un principio que establezca alguna restricción sobre el infinito catálogo de posibilidades: la supersimetría, sujeto prácticamente inalienable de la teoría de cuerdas. Si la supersimetría fuera una invariancia de la naturaleza a muy altas energías, veríamos «limitado» el menú de posibilidades que las dimensiones extra pueden adoptar. Usamos las comillas porque lo cierto es que la extensión del menú pasaría de ser infinita a ser apenas enorme. El matemático Eugenio Calabi conjeturó a mediados de la década de 1950 que debían existir geometrías de dimensión par con un conjunto de propiedades que, como se demostró más adelante, están relacionadas con la posibilidad de que sobre ellas se pueda formular una teoría supersimétrica. Dos décadas después, su colega Shing-Tung Yau demostró la conjetura, una de las razones por las que obtuvo la medalla Fields en 1982.

Así, si la naturaleza fuera supersimétrica a muy altas energías —de no serlo, la teoría de cuerdas perdería sensiblemente su potencial predictivo dada la infinitud de posibilidades que se presentarían para las dimensiones compactas, además de otros problemas técnicos que no discutiremos aquí—, las seis dimensiones espaciales compactas habrían de adoptar formas geométricas complejas conocidas con el nombre de *variedades de Calabi-Yau*. Estas geometrías son inimaginables para seres tridimensionales como los que escribimos estas líneas, pero bien puede intentarse un croquis de ellas, pensándolas como espacios porosos y enroscados, con agujeros —llamados «ciclos»— en los que las cuerdas pueden enrollarse. Es útil pensar, por ejemplo, en la superficie bidimensional de una rosquilla (figura 2), y observar que se podrían dibujar en ella circunferencias que den la vuelta en torno al agujero central o alrededor de su cuerpo «cilíndrico»; estas líneas serían los ciclos y en ellos las cuerdas pueden enrollarse.

Más estrictamente, estos ciclos pueden tener distintas dimensiones dado que el espacio que los alberga tiene seis. Del mismo modo en que una cuerda puede enrollarse en un círculo, una membrana podría hacerlo «envolviendo» una esfera, y así sucesivamente. Más adelante veremos que la teoría de cuerdas

FIG. 2



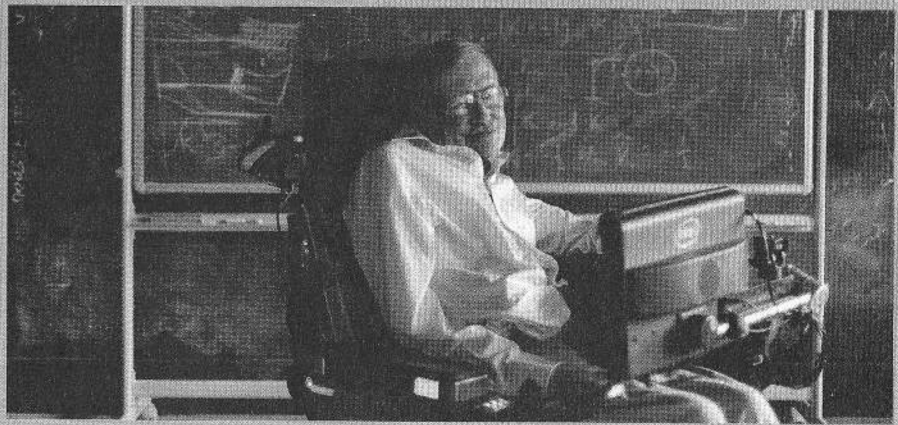
La rosquilla o toro tiene dos ciclos independientes en los que una cuerda se puede enrollar. En geometrías de Calabi-Yau 6-dimensionales, proliferan los ciclos de distintas dimensiones, y estos juegan un papel importante en la fenomenología de la teoría de cuerdas.

EL TIEMPO ÚNICO

Una de las preguntas inmediatas que surge al saber que el universo podría ser multidimensional es ¿por qué solo una de esas dimensiones es temporal mientras que todas las otras son espaciales? Al fin y al cabo, la teoría de la relatividad trata a ambas dimensiones en pie de igualdad. ¿No podría haber, acaso, un reparto más equitativo, tal como cinco dimensiones espaciales y cinco temporales, o cualquier otra distribución parecida? La existencia de dos (o más) dimensiones temporales ha sido estudiada con algún detenimiento, ya que ofrecería una curiosa y deseable alternativa a la fatalidad determinista de una realidad con un único tiempo. Del mismo modo que uno puede evitar pisar un hueco, sorteándolo, en una avenida suficientemente ancha, en tanto que estaría condenado a caer en él en una calle angosta, las amplias avenidas que ofrecerían dos o más tiempos nos permitirían acometer rodeos elusivos, evitando así episodios inconvenientes como, por ejemplo, la propia muerte.

La estabilidad depende de un tiempo

Dejando de lado esta argumentación que probablemente sea el resultado de nuestra incapacidad para imaginar la existencia de más de un tiempo, similar a la que experimentamos a la hora de intentar concebir un espacio de Calabi-Yau, podemos intentar una respuesta más rigurosa. Y esta viene de la mano de la estabilidad del espacio-tiempo. Es posible demostrar que un universo con más de un tiempo desarrollaría inestabilidades que lo harían desaparecer. Aun con un solo tiempo la estabilidad de las distintas geometrías del espacio-tiempo requiere de un cuidadoso balance de términos y de la existencia de simetrías «protectoras». La presencia de más de una dimensión temporal hace prácticamente imposible tal equilibrio. En ese sentido, la inexorabilidad de un tiempo único se podría atribuir a la propia necesidad de disponer de una formulación consistente de la teoría de cuerdas.



Stephen Hawking, autor de *Una breve historia del tiempo*, investigó la naturaleza de su origen junto a Roger Penrose.

tiene membranas de diversa dimensionalidad a las que se conoce como D-branas. El catálogo de posibles «enrollamientos» se engrosará irremediablemente, pero lo hará en una dirección más que interesante y matemáticamente rigurosa. Así, los espacios de Calabi-Yau podrán dar cobijo a estos objetos extendidos. Toda la casuística de fenómenos que ocurren en ese micromundo 6-dimensional, diminuto y escondido, determinará la física que observamos en nuestra limitada rodaja tridimensional del espacio-tiempo. Por así decirlo, nuestra realidad física tridimensional no sería sino una proyección de la profunda complejidad —aunque elegante— de la realidad que tiene lugar en las entrañas de un universo multidimensional.

LAS CINCO CARAS DE LA TEORÍA DE CUERDAS

La consistencia matemática interna de la teoría de cuerdas es extremadamente severa y no permite muchas posibilidades. La teoría se encuentra fuertemente constreñida y todos los elementos de su construcción matemática deben encajar con precisión quirúrgica para que tenga sentido. Por decirlo de alguna manera, a partir de la relativamente simple hipótesis de partida, la teoría de cuerdas «se dicta a sí misma» casi completamente. Este es uno de los aspectos más atractivos y sugerentes de la teoría ya que, si lo que se está buscando es una explicación de la estructura subyacente de todo cuanto existe, ¿no es nuestra íntima pretensión que esta resulte en algún sentido única? Asimismo, la poca libertad de acción al momento de construir la teoría es la razón última de su poder de predicción, como si la teoría se dictara a sí misma casi completamente. Pero hablemos algo más detenidamente del adverbio de cantidad «casi» en esta expresión.

La teoría de cuerdas, en efecto, es casi única, y su ensamblado requiere que cada pieza encaje de manera muy precisa. Aun así, hay una pequeña libertad a la hora de elegir ciertos elementos constitutivos. Por ejemplo, algunos tipos de vibraciones sobre la hoja de mundo pueden ser elegidos de forma tal que se comporten de manera simétrica cuando van de derecha a izquierda

respecto a como lo hacen al ir de izquierda a derecha, o que tengan signo contrario; ambas posibilidades son buenas. También se puede concebir una teoría que solo incluya cuerdas cerradas o una que tenga tanto cerradas como abiertas —lo recíproco no es posible: la presencia de cuerdas abiertas implica inevitablemente la existencia de cuerdas cerradas, debido a que la dinámica de las primeras es tal que manifiestan una propensión a unirse y formar cuerdas cerradas—. Otra libertad que uno tiene al confeccionar una teoría de cuerdas reside en las diferentes simetrías matemáticas que la teoría puede contener en sus ecuaciones. Además de las ya mencionadas simetría conforme y supersimetría, lo natural sería que se pudiera incorporar una simetría adicional del tipo de la que encontramos en el modelo estándar. Sin embargo, razones de consistencia obligan a elegir apenas entre dos posibilidades, a pesar de que la matemática ofrece, de entrada, un menú infinito de ellas. Se trata, pues, de una restricción muy severa.

El resultado final de la lista de libertades y restricciones que acabamos de enumerar arroja un total de cinco posibilidades distintas con las que habremos de lidiar. Es decir, existen cinco variedades de la teoría de cuerdas. Habiendo quedado atrás el tiempo en el que los físicos se inclinaban por nombres elegantes para sus teorías, tales como «relatividad» o «cuántica», las cinco teorías de cuerdas posibles recibieron nombres menos atractivos: tipo I, tipo IIA, tipo IIB, heterótica SO(32) y heterótica $E_8 \times E_8$. Mientras que la teoría tipo I describe tanto cuerdas abiertas como cerradas, las teorías tipo IIA y IIB involucran solo cuerdas cerradas —estrictamente, pueden incluir también cuerdas abiertas, pero solo de una manera muy especial que discutiremos más adelante, cuando hablemos de D-branas—. Los rótulos SO(32) y $E_8 \times E_8$ en el caso de las teorías heteróticas hacen referencia a las únicas dos simetrías internas, dentro del menú infinito de posibilidades, que sus ecuaciones admiten.

De cualquier manera, cinco teorías es demasiado para la pretensión unificadora de la teoría de cuerdas. En la búsqueda de lo que por momentos se dio en llamar la «teoría del todo», hubo físicos que se abocaron a mostrar que tal teoría, de existir, habría de ser única. Así, la idea original fue intentar descartar algunas de las cinco posibilidades, dejando idealmente una sola de ellas en pie. La respuesta fue mucho más sorprendente y elegante. La teoría es única, sí, pero no porque cuatro de las cinco posibilidades sean erróneas matemáticamente, sino porque, aunque de manera muy poco evidente, las cinco son... ¡la misma! Edward Witten mostró a mediados de los noventa que, en efecto, lo que creíamos que se trataba de un frugal menú de cinco platos no era sino uno de plato único, pero no por ello menos suculento —es justo mencionar la existencia de un trabajo previo de los británicos Christopher Hull y Paul Townsend que fue clave para el hallazgo de Witten—.

Las cinco teorías eran diferentes expresiones de la misma. Esta afirmación debe resultar necesariamente sorprendente, ya que algunas de ellas contienen cuerdas abiertas mientras que otras no. Pero dijimos ya que la teoría de cuerdas suele percibir objetos de forma «dual», siendo que se comporta de igual manera cuando se la somete a factores externos que *a priori* lucen muy distintos, como los ya mencionados campos de Kalb-Ramond a los que las cuerdas «confunden» con la curvatura de un espacio-tiempo. Lo mismo ocurre con las cinco versiones de la teoría: las simetrías de dualidad son tales que, a pesar de sus disímiles apariencias, no son más que cinco formas alternativas de describir la misma dinámica fundamental.

Para ilustrar cómo es posible que teorías tan aparentemente diferentes describan al mismo sistema físico, consideremos la siguiente analogía. Imaginemos que queremos describir el comportamiento del vapor de agua. Para ello, teniendo en cuenta que las moléculas de agua se encuentran muy alejadas las unas de las otras, utilizamos la teoría de los gases. Si reducimos la temperatura por debajo del punto de ebullición del agua, el vapor comenzará a condensarse. Las moléculas se acercan y, por ello, desarrollan interacciones eléctricas más intensas que hacen inútil seguir analizándolas como unidades individuales. El sistema físico es el mismo pero al haber disminuido la temperatura debemos recurrir a otra teoría, la de los líquidos, porque aquella que estábamos utilizando perdió su rango de validez. Si continuamos con el enfriamiento, ahora por debajo del punto de fusión del agua, el sistema se convertirá en hielo y, nuevamente, tendremos que cambiar el marco teórico para estudiar un sistema físico que no ha dejado de ser el mismo. En el ejemplo aquí presentado, la variable que valida o invalida los distintos marcos teóricos es la temperatura (en realidad, también es importante la presión), y las distintas descripciones son complementarias: nunca son válidas al mismo tiempo.

> Cinco variantes de una teoría que, aunque insuficientemente entendida, es la gran candidata a unificar las fuerzas de la naturaleza.
>
> **Edward Witten**

Ahora bien, cabe aquí la siguiente digresión: se podría argüir que la razón por la cual la descripción de las diferentes fases del agua requiere de diferentes teorías (la de los gases, la de los líquidos, la de los sólidos) es que, en realidad, ninguna de estas es una «teoría fundamental» sino meras teorías que describen al sistema físico solo en alguna medida, bajo ciertas condiciones. En efecto, sí existe una «teoría unificadora» con el potencial de describir todas las fases del agua en un único marco teórico: la teoría cuántica de un conjunto de moléculas H_2O. Esta teoría, aunque inmanejable a fines prácticos por la gran cantidad de moléculas que una simple gota de agua contiene, lleva en su seno el germen de la explicación de todas las fases del agua en un solo esquema teórico. Entonces, cabe la pregunta siguiente: ¿no estaremos acaso frente a una situación similar en teoría de cuerdas? ¿No serán sus cinco versiones más que diferentes descripciones efectivas de una única teoría, aún más fundamental? Esto es lo que hoy creemos, y lo hacemos con tal entusiasmo que incluso la hemos bautizado con un nombre majestuoso y misterioso a la vez: la *teoría M*.

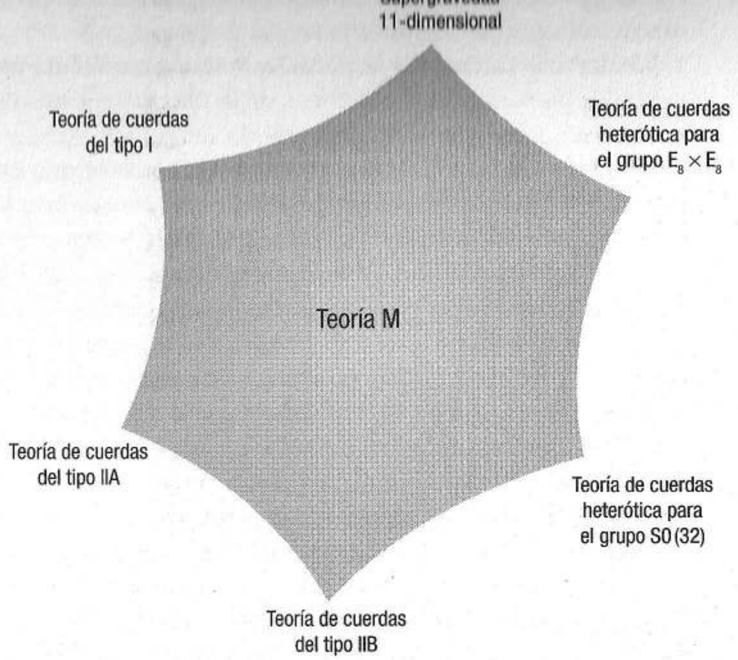
LA TEORÍA M Y SUS ONCE DIMENSIONES

Las dualidades que relacionan a las cinco teorías de cuerdas son, como dijimos, de una naturaleza parecida a las transiciones de fase del agua, por lo que podemos representarlas como diferentes rincones de una suerte de «diagrama de fases» representado esquemáticamente en la figura 3.

En lugar de la temperatura, lo que nos lleva de una «fase» a la otra es la variación de algún parámetro que puede estar dado por el tamaño de alguna dimensión extra o el valor de algún campo —recordemos, por ejemplo, que el dilatón es responsable de la intensidad del acoplamiento de las cuerdas—. Cuando la intensidad de las interacciones de una de las fases se hace muy grande y su descripción se vuelve intratable, existe una formulación «dual», dada por alguna de las otras fases, que es de naturaleza perturbativa por lo que admite el uso de diagramas de Feynman. Tal como ocurre cuando nos vemos obligados a abandonar la teoría de los líquidos y utilizar la de los gases para describir el agua a la temperatura de ebullición. El cambio continuo que lleva de una fase (o teoría) a la otra puede pensarse esquemáticamente como el desplazamiento entre los correspondientes rincones de la figura 3. Si bien es difícil encontrar algún fenómeno que pueda ser calculado simultáneamente en ambas teorías como para poder comparar sus resultados, lo cierto es que estos existen y son los que han permitido respaldar estas ideas con un conjunto de demostraciones parciales de su validez.

Una de las mayores sorpresas que se encontró Witten al investigar las «transiciones de fase» que subyacen a la teoría M tuvo lugar cuando estudió lo que ocurre con la teoría tipo IIA. La constante de acoplamiento de esta teoría está dada, como ya dijimos, por el valor que toma su dilatón, de modo que el régimen no-perturbativo tiene lugar cuando este toma valores muy grandes. En la teoría de Kaluza-Klein, discutida en el capítulo anterior, omitimos mencionar que el valor del radio de la circunferencia —la dimensión extra— es una variable dinámica, es decir, una cantidad que puede tomar valores diferentes en distintos puntos del espacio y evolucionar en el tiempo... ¡como el dilatón! Witten se dio cuenta de que esto era mucho más que una analogía. El dilatón de la teoría tipo IIA debía interpretarse como el radio del círculo de una dimensión extra, ¡la undécima! Así, cuando esta teoría entraba en su régimen no-perturbativo

FIG. 3



Las cinco teorías de cuerdas conocidas pueden ser entendidas como vértices de una teoría única a la que se denominó Teoría M. Este diagrama adquiere sentido bajo el lenguaje de las dualidades. Cuando la descripción deja de ser perturbativa para alguna de estas teorías, resulta otra que lo es. Cuando la teoría de cuerdas IIA se vuelve fuertemente acoplada, una nueva dimensión emerge en el espacio-tiempo, que de este modo se vuelve 11-dimensional.

el radio de esta circunferencia se haría suficientemente grande como para que esta dimensión fuera percibida y explorada. La teoría tipo IIA debía «fluir» en el diagrama de la figura 3 hacia una novedosa fase cuya descripción demandaba una dimensión espacial extra adicional: ¡un rincón 11-dimensional de la teoría M que se venía a sumar a los otros cinco conocidos!

La teoría de cuerdas era capaz, así, de algo insólito: hacer crecer una dimensión espacial adicional si se daban las condiciones adecuadas. De las diversas pistas que Witten utilizó para este genial hallazgo, la más sencilla de explicar es que había una manera muy precisa de relacionar a la descripción de bajas energías de la teoría tipo IIA —es decir, cuando podemos ignorar las vibraciones de las cuerdas— con una teoría de la que ya hemos hablado y que durante un tiempo se pensó que era la candidata ideal para describir las vicisitudes cuánticas de la fuerza de gravedad: la supergravedad en once dimensiones de Cremmer, Julia y Scherk. Luego, como la teoría de cuerdas tipo IIA se relaciona con todas las otras a través de distintas dualidades, se llega a la conclusión representada en la figura 3: tanto las cinco teorías de cuerdas como la apreciada (por su unicidad y elegancia) supergravedad en once dimensiones son expresiones particulares —distintas fases— de una única teoría, más «ancha» y conjetural; una «teoría madre» de la que solo conocemos algunos detalles. Witten la bautizó con el nombre de teoría M, sin aclarar jamás si la letra M provenía, como parece y aquí se sugiere, de «Madre». Esta teoría, aún pobremente comprendida, se comporta bajo distintas condiciones como si fuera 10-dimensional u 11-dimensional. En algunas circunstancias se expresa como una teoría de cuerdas cerradas; en otras, como una de cuerdas abiertas y cerradas.

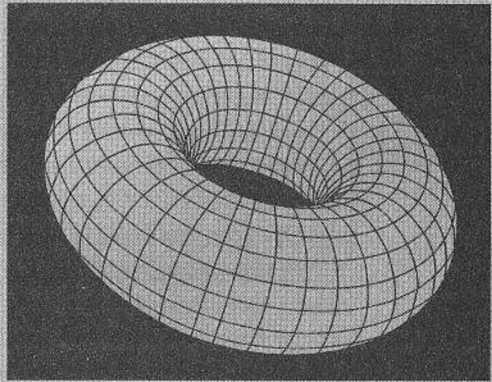
El aspecto 11-dimensional de la teoría M es el que mejor conocemos, mientras que su rostro 10-dimensional es accesible solo a través de las propiedades que imprime sobre sus hijas, las cinco teorías de cuerdas (en especial la tipo IIA). El rincón del diagrama de fases de la teoría M que está descrito por la supergravedad 11-dimensional es su régimen de bajas energías. Además del campo gravitatorio, ineludible componente de cualquier teoría de cuerdas, la teoría M incluye en este régimen otros dos ingredientes: los gravitinos —partículas de espín 3/2—, presentes en toda teoría de gravedad supersimétrica, y una suerte de inusual «campo electromagnético» que, al igual que sucedía con el campo de Kalb-Ramond, las partículas puntuales no pueden sentir. Conocemos algunos rasgos más de la versión 11-dimensional de la teoría M. En particular, que en ausencia de partículas y de cuerdas, esta presenta objetos bidimensionales denominados M2-branas y pentadimensionales, conocidos como M5-branas, que sí están cargados ante el «campo electromagnético» de esta teoría.

LA TEORÍA F Y SUS DOCE DIMENSIONES

Ya mencionamos la existencia de un régimen en el que la undécima dimensión se convierte en un círculo pequeño y nos vemos empujados a la teoría tipo IIA. Y dijimos también que, desde la perspectiva 10-dimensional, el radio del círculo se traduce en la existencia del dilatón. Fue el físico iraní Cumrun Vafa, alumno de doctorado de Witten, quien, en 1996, sugirió que esta relación entre campos de la teoría de cuerdas y posibles dimensiones camufladas de una teoría «mayor» podría acaso ser más rica. La teoría tipo IIB contiene, además del dilatón, otro campo de características similares denominado *axión*, cuya presencia también podría ser interpretada como la huella de una dimensión extra compacta, convenientemente camuflada. De ser esta idea correcta, tanto el dilatón como el axión podrían provenir de círculos, y así la teoría original habría de ser... ¡12-dimensional! Vafa la denominó *teoría F* (por la primera letra de la palabra «padre» en inglés, *father*). Es decir, de igual manera a como la teoría M da origen a la tipo IIA cuando una de sus once dimensiones es un círculo, cuyo radio da origen al campo dilatón, Vafa sugirió que podría existir una teoría F que diera origen a la tipo IIB cuando dos de sus doce dimensiones fueran sendos círculos, y el radio de dicho par de círculos daría origen a los campos dilatón y axión. Dos círculos —o, mejor dicho, un círculo que en cada uno de sus puntos contiene otro círculo— terminan por formar la geometría de una rosquilla (también denominada «toro»; véase la figura).

De rosquillas y geometrías

Una de las pistas que dio sustento a la versión original de la teoría de Vafa es que una de las simetrías asociada a ciertos cambios de coordenadas que la geometría de la rosquilla exhibe, es precisamente la misma operación de simetría a través de la cual el dilatón y el axión se mezclan en la teoría de cuerdas tipo IIB. Ahora bien, aunque la idea es tentadora y los aspectos geométricos parecen encajar, la teoría F lleva en germen el desafío de pensar un universo 12-dimensional y hacerlo compatible con la física, cosa que no es nada sencilla. Para hacer contacto con nuestro mundo observado la teoría F debería esconder ocho de sus doce dimensiones y, además, debería hacerlo de una manera muy especial. Sus ocho dimensiones compactas deberían ser espacios de Calabi-Yau y ser compatibles, además, con la presencia de la rosquilla dentro de ellos. Esto trae aparejado un amplio catálogo de estructuras matemáticas a las que puede dar origen cuando es compactificada. La visión más moderna de la teoría F no hace referencia tan directa a su origen 12-dimensional sino que se basa más en su conexión con la teoría de cuerdas tipo IIB en diez dimensiones.



EL PAISAJE Y EL MULTIVERSO

Si bien la teoría de cuerdas resulta «única» debido a que su formulación matemática demanda que las piezas encajen de forma milimétricamente precisa, no ocurre lo mismo con sus soluciones. Es decir, aunque la teoría es única, admite muchas soluciones a sus ecuaciones —algo que, por otra parte, es habitual en el resto de las teorías de la física, como la relatividad general o las ecuaciones de Maxwell—. La pregunta es cuántas de ellas cobran sentido físico: ¿cuántas de las soluciones a las ecuaciones de la teoría de cuerdas describen un universo que tenga la forma del nuestro? Preguntas relacionadas son, por ejemplo, ¿cuántas soluciones de la teoría de cuerdas representan seis dimensiones espaciales compactas y tres dimensiones no-compactas tal como observamos a nuestro alrededor? O también, ¿cuántas soluciones de la teoría son estables? Acerca de lo último, cabe señalar que muchas de las soluciones de la teoría de cuerdas son inestables, en el sentido de que ante la mínima perturbación de la configuración se desarman para dar lugar a soluciones totalmente diferentes; como un lápiz puesto en pie sobre su afilada punta, una configuración ciertamente posible pero de existencia fugaz. Entonces, de entre todas las soluciones estables que la teoría permite, ¿hay alguna que describa la fenomenología observada en la naturaleza? Y si la respuesta a esta pregunta fuera afirmativa, ¿cuántos otros universos posibles existen y por qué no se manifiestan? ¿Qué tiene nuestro universo de especial?

Resolver las ecuaciones de la teoría de cuerdas es complicado y más difícil aún es tener una idea de cuán grande es el conjunto de soluciones posibles (al que suele denominarse «el paisaje»). En los últimos años se ha logrado explorar distintas regiones de ese «paisaje» y se descubrió que la cantidad de soluciones (cada una representando un universo de características diferentes) es desesperantemente enorme. Un número más grande que cualquier otro que haya sido escrito en disciplina científica alguna. Esto atenta severamente contra el espíritu de una teoría que pretende dar explicación a todo nuestro universo: la teoría es única, pero la cantidad de universos posibles que ella predice es

escandalosamente enorme. Entonces, ¿por qué vivimos en nuestro universo y no en otro? ¿Por qué el universo tiene la forma que tiene, con seis de sus nueve dimensiones espaciales enrolladas, y no una distinta? Esta es una pregunta profunda cuya contestación podría llegar a no encontrarse jamás. Si bien la teoría de cuerdas no le ha dado (aún) una respuesta, sí es la única teoría física en la que tiene sentido formularla. Y se puede ensayar un bosquejo de respuesta, como veremos a continuación.

Los caminos que pueden llevar a una respuesta a la pregunta de por qué el universo es este y no alguna otra solución de la teoría de cuerdas no son muchos. Por un lado, se puede emprender la tarea de buscar un criterio que excluya las otras posibilidades y nos deje con una solución única. Este fue el camino seguido durante casi un cuarto de siglo. Hubo un arduo trabajo taxonómico, clasificando las posibles soluciones según la física a la que darían lugar. El número de ellas, sin embargo, es tan vasto que el entusiasmo de esta empresa fue desdibujándose. Sobre todo porque no se encontraba ningún criterio que permitiera descartar todas menos una; o, incluso, todas menos unas pocas. Otra posibilidad es aceptar la existencia de otras soluciones y, junto a ello, aceptar, además, que puede haber sido el azar lo que llevó al universo en el que vivimos a adoptar la forma que hoy observamos y no otra. Incluso podemos especular con que esas otras soluciones existan no solo como realidades potenciales sino que, en verdad, se den en regiones distantes o incluso causalmente desconectadas. Esto último es proponer que nuestro «universo» no merezca tal nombre, sino que deba ser degradado a la categoría de «una región» de un «multiverso» (véase la imagen de las páginas siguientes).

Hagamos un paralelismo que podría llegar a servir para fortalecer la idea de que esta línea argumental no es descabellada. Imaginemos que no conociéramos ningún otro planeta más que el nuestro, y que elaboráramos la teoría planetaria perfecta. Habríamos entendido cómo se formó el planeta, lograríamos explicar el porqué de las montañas y de los climas, entre muchos otros aspectos. Sin embargo, cuando quisiéramos responder a partir de nuestra teoría a preguntas del tipo: ¿qué tamaño tiene

LA TEORÍA DEL MULTIVERSO

La teoría de cuerdas permite que nuestro universo y las leyes de la naturaleza que lo rigen adopten variadas formas y no solo aquellas que nos es dado experimentar. Se ha especulado con la idea de que todas esas formas, todos esos universos, podrían generarse en alguna parte, fuera del nuestro. Nace así la idea de multiverso, el ambiente en el que vive el conjunto de todos los universos posibles.

UNIVERSOS BURBUJA
Una manera de representar el multiverso es pensarlo como un conjunto infinito de burbujas, cada una de las cuales contiene un universo posible.

el planeta?, ¿cuántos satélites tiene y de qué tamaño?, ¿a qué distancia de su estrella se encuentra?, ¿qué masa tiene?, ¿tiene atmósfera? y un larguísimo etcétera, comprenderíamos que nos resulta imposible, por mucho que la teoría fuera correcta y única, como nos gusta a los físicos teóricos. Ahora, una vez que alcemos la vista al cielo y descubramos que hay billones de billones de planetas en el universo, habremos comprendido por qué la teoría no podía responder a esas preguntas: es que hay planetas de todos los tamaños, con o sin satélites, con o sin atmósfera, a distintas distancias de la estrella que orbitan, etcétera. La teoría planetaria no arroja respuestas únicas y sabemos que eso está bien porque conocemos la diversidad de planetas que hay en el universo. Podríamos, sin embargo, preguntarnos: ¿por qué habiendo todas esas posibilidades vivimos justo en la Tierra? ¿Por qué no vivimos en Mercurio? A esta última podríamos responder: porque en Mercurio no están dadas las condiciones para que exista vida. Y a la primera solo podríamos responder con un humilde «porque sí». No hay una razón especial *a priori* por la que debamos vivir en la Tierra.

Es interesante mostrar un ejemplo dentro de la propia teoría de cuerdas que ilustre cómo funcionan estos argumentos. Respondamos, por ejemplo, a la pregunta de por qué han de ser seis las dimensiones compactas y no cinco o siete (o cualquier otro número). Supongamos que las nueve dimensiones espaciales hubieran evolucionado en el universo de modo tal que fueran cinco las compactas. Las dimensiones extendidas serían entonces cuatro y las leyes gravitacionales que observaríamos serían, como predice la teoría de cuerdas, las de la relatividad general. Ahora bien, se puede demostrar matemáticamente que las órbitas de un universo 4-dimensional son inestables. De hecho, lo hizo Paul Ehrenfest en 1917, muy poco tiempo después de que Einstein formulara las ecuaciones de la teoría. Por lo tanto, si las dimensiones espaciales fueran cuatro no habría sistema solar, ni Vía Láctea, y en esas condiciones no podría haber vida. De hecho, la misma inestabilidad afectaría a la escala atómica. Presumiblemente, en un universo que resulte de cinco dimensiones compactas no habría ningún tipo de estructura. ¿Es una posible solución de la teoría de cuerdas? Sí, tal como Mercurio es un posible planeta, cuya existencia tenemos la fortuna de poder comprobar con nuestros telescopios. Pero no vivimos en él.

Estas digresiones, de carácter que por momentos roza lo metafísico, nos llevan a lo que se conoce como el «principio antrópico», que no es otra cosa que una colección de argumentos que pretenden mostrar que, de entre todas las soluciones de la teoría, de entre todos los universos posibles y acaso existentes, el nuestro es el único (o uno de los pocos) que reúne las condiciones para ser observado por seres inteligentes, es decir, que tiene el potencial para que se geste la química, luego la biología y finalmente la vida inteligente que pueda observarlo y describirlo. Esta es una idea interesante: acaso el universo no es único sino solo una posibilidad de entre muchísimas otras variantes, pero nosotros observamos el nuestro y no otro porque, de entre tantas posibilidades, la nuestra es la única que permite albergar vida inteligente en él. Por eso estamos nosotros haciéndonos aquí esta pregunta. Gottfried Wilhelm Leibniz, uno de los grandes pensadores de los siglos XVII y XVIII, formuló en *Los principios de la Naturaleza y la Gracia, basados en la razón*, la famosa pregunta «¿por qué hay algo en lugar de nada?» Lo que se intenta responder aquí es una variante de lo mismo, ¿por qué hay esto y no otra cosa?

El principio antrópico aspira a ser una respuesta legítima a esta pregunta. Para muchos, este no es sino una forma de evadir el verdadero problema; para otros, se trata de una posibilidad tan encantadora como lo es toda cosmogonía pluralista. Lo cierto es que es una posibilidad cierta: acaso vivamos en un universo que no es el único, que coexiste con otros muchos en un gran multiverso que los englòba, pero que, a diferencia de los otros tantos universos yermos, el nuestro alberga seres que lo observan, que lo piensan, y lo hacen al extremo de poder imaginar —o concluir— que existen aquellos otros universos fuera del propio. Esta idea puede parecer tan solo una transferencia de la pregunta por las razones de la unicidad del universo al multiverso, pero no es así, por cuanto en el multiverso sí «todo» existe y es posible en él. Y todo cuanto es posible, en principio acontece.

El multiverso es la realización de todo lo que, según la teoría, es posible; mientras que «nuestro» universo es el inexorable rincón en el que nos tocó aparecer; la realización de lo poco que puede ser pensado. Aquí nos excederemos un poco para generalizar este principio antrópico y propondremos un principio meta-antrópico que supera al primero en su espíritu pluralista: ¿y qué, si todo universo puede ser pensado? ¿Y qué, si todo universo «es» pensado? ¿No estarían, acaso, todos los seres de esos otros muchos universos del multiverso igual y legítimamente embelesados por la majestuosidad de sus leyes y preguntándose confundidos «por qué hay esto y no otra cosa»?

CAPÍTULO 4

Membranas y agujeros negros

Las membranas multidimensionales o D-branas ayudan a responder a la pregunta: ¿por qué cuerdas y no objetos de mayores dimensiones? Poseedoras de una dinámica propia, explican el misterioso origen de la entropía de los agujeros negros y juegan un papel central en la fenomenología de la teoría de cuerdas.

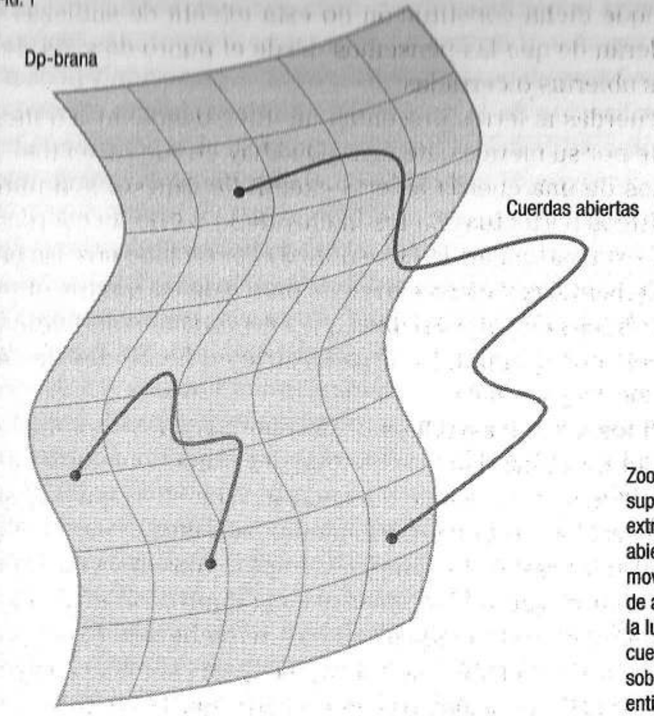
Una de las primeras preguntas que surgen ante la idea de que los ladrillos fundamentales que describen todo cuanto hay en el universo pueden ser objetos extendidos es «¿y por qué cuerdas?». Ya que pensamos en objetos extendidos, ¿no podrían acaso ser objetos de mayor extensión, tales como membranas u objetos tridimensionales? ¿O multidimensionales, ahora que «sabemos» que no debemos dar por sentada la dimensionalidad del espacio-tiempo?

Esta legítima pregunta ya había sido planteada en la década de 1980, pero la respuesta satisfactoria llegó a mediados de la década siguiente, cuando Joseph Polchinski advirtió que la teoría de cuerdas predice no solo la existencia de ellas mismas, sino también la de entidades de dimensionalidad mayor, objetos extendidos como membranas pero de todas las dimensiones posibles (dentro de las diez de la teoría, claro). La inclusión de esos objetos extendidos es requerida por la propia consistencia matemática de la teoría. Así, aunque la formulación comience por la hipótesis de que los objetos mínimos de la naturaleza son cuerdas, la misma teoría lleva inexorablemente a la necesidad de incluir también membranas. Estas, por así decirlo, están formadas por cuerdas, los únicos elementos originarios de la teoría, aunque dicha constitución no está exenta de sutilezas que dependerán de que las pensemos desde el punto de vista de las cuerdas abiertas o cerradas.

Las cuerdas abiertas presentan un interrogante más o menos evidente por su mera existencia. ¿Qué hay en sus extremos? Los extremos de una cuerda abierta exenta de espesor son puntos geométricos perfectos. En los inicios de la teoría de cuerdas se apreció esta particularidad y se utilizó el parecido entre las partículas elementales y estos extremos para asignar a estos últimos características de las partículas que se conocen como números cuánticos; por ejemplo, la carga eléctrica o las cargas de color de los quarks y gluones.

Sabemos que los extremos de las cuerdas abiertas viajan a la velocidad de la luz. Uno puede imaginar una configuración en la cual dichos extremos se encuentran fijos en lo que respecta a una dirección en el espacio, aunque se muevan en las direcciones transversales a esta; por ejemplo, pensemos en un movimiento en el que un extremo de una cuerda abierta coletea vertiginosamente de arriba abajo o de derecha a izquierda, pero sin moverse de adelante hacia atrás; como si estuviera amarrado a una rebanada de espacio-tiempo, pero con libertad de movimiento a lo largo y ancho de esta. En este caso, el extremo de la cuerda dibujaría frente a nosotros una pared imaginaria, definida por el plano que recorre. Esta pared puede ser de un tamaño considerable si pensamos no en una sino en muchas cuerdas moviéndose de la forma descrita. Esas regiones, esas superficies imaginarias definidas por la colección de todos los puntos del espacio en los que los extremos de las cuerdas terminan, emulan membranas que adquieren dinámica propia. En esa pared imaginaria, la tensión de tantas cuerdas coleteando frenéticamente en el espacio acaba por tironear de la membrana misma. Las vibraciones generadas inducen sobre ella una dinámica que puede describirse en términos de una teoría cuántica de campos «sobre la membrana», es decir, con las mismas dimensiones espacio-temporales que tiene la misma (figura 1). Otra forma de comprenderlo es destacando que la densidad de energía acumulada

FIG. 1



Zoom sobre una (hiper) superficie en la que los extremos de las cuerdas abiertas pueden anclarse, moviéndose a lo largo de aquella a la velocidad de la luz. Las vibraciones de las cuerdas inducen una dinámica sobre la Dp-brana, dándole entidad física.

en la región donde las cuerdas abiertas terminan es tan grande, que acaba por curvar el espacio-tiempo como, en definitiva, indica la teoría de la relatividad general. En el último capítulo veremos una consecuencia interesante, derivada de estas dos formas complementarias de entender a estos objetos.

Es interesante detenerse en el hecho de que la existencia de las membranas no resulte algo opcional. Varios argumentos de consistencia interna de la teoría de cuerdas llevan a su existencia inexorable. Las simetrías de la teoría no serían tales si no existieran estos objetos extendidos.

La idea de una membrana es intuitiva para seres tridimensionales como nosotros. Esto se debe a que la «entendemos» como la foliación bidimensional de un espacio tridimensional; una loncha, una hoja infinitamente delgada, lo que usualmente llamamos una «superficie». Pero, dado que en la teoría de cuerdas existen nueve —y no tres— dimensiones espaciales, entonces podemos hacer un pequeño esfuerzo de abstracción y pensar en la generalización de la noción de superficie, lo que conocemos como «hipersuperficie». Por ejemplo, podemos pensar en un espacio 5-dimensional embebido en el espacio ambiente de nueve dimensiones.

Esta generalización de las membranas en el contexto de la teoría de cuerdas recibe el nombre de D-branas; habitualmente las llamaremos Dp-branas, donde la p es un número entero que hace referencia a la dimensionalidad del objeto. Así, una D2-brana es lo que nosotros llamábamos «membrana» y podemos visualizar como una sábana que se agita en el espacio. Pero también podemos hablar de objetos de tres o cinco dimensiones, por ejemplo, a los que llamaremos, respectivamente, D3-branas o D5-branas. En el caso de las cuerdas tipo II, que *a priori* son teorías de cuerdas cerradas, este es el camino que encuentran las cuerdas abiertas para realizarse; lo hacen anclando sus extremos a hipersuperficies que, de ese modo, pasan de ser entidades abstractas e imaginarias a tener una forma de energía a la que llamamos tensión. Pero este anclado no se produce en todos los casos de manera estable. Por ejemplo, las cuerdas abiertas tipo IIA se aferran a D0-branas (objetos puntuales, similares a las partículas), D2-branas (las membranas ya mencionadas) y otras Dp-branas, siendo p un número par. En cambio, las cuerdas abiertas tipo IIB acaban en Dp-branas en las que p es impar, es decir, D1-branas (unidimensionales como las cuerdas, pero de naturaleza diferente), D3-branas, etc. Así, las relaciones de «dualidad» entre las diferentes teorías de cuerdas también implican una dualidad entre los distintos objetos extendidos que contiene cada una de ellas.

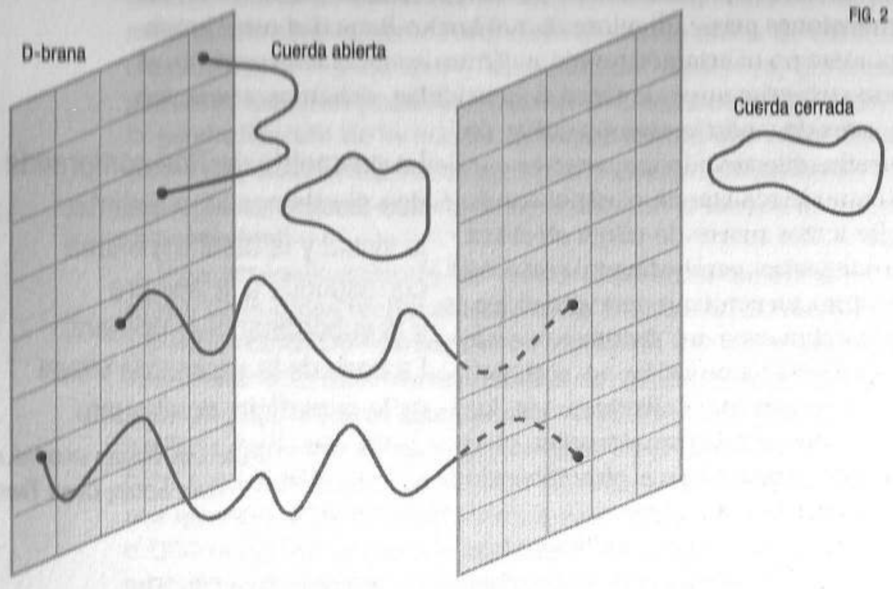
La existencia de D-branas —y ya no solo cuerdas— potencia la versatilidad de la teoría de cuerdas. La cantidad de configuraciones geométricas que la teoría puede adoptar se multiplica y, con ella, su poder para describir distintas formas de materia. Las D-branas, emergentes del movimiento colectivo de muchas

cuerdas abiertas, pueden heredar las propiedades que tienen los extremos de estas: en particular, el hecho de poder estar cargadas eléctrica o magnéticamente. En un sentido más estricto, al estar definidas como entidades extendidas, debemos pensar en un número arbitrariamente alto de cuerdas abiertas que «reparten la carga» por toda la hipersuperficie, dando lugar a una suerte de carga eléctrica o magnética generalizada (esta es una forma excesivamente simplificada de presentar un fenómeno complejo cuya comprensión, en realidad, demanda un uso sofisticado de las dualidades antes mencionadas, algo que va más allá de las aspiraciones de este libro).

> La geometría de Tlön comprende dos disciplinas algo distintas: la visual y la táctil. La última corresponde a la nuestra y la subordinan a la primera. La base de la geometría visual es la superficie, no el punto.
>
> **Jorge Luis Borges en su relato *Tlön, Uqbar, Orbis Tertius***

Esto permite, entre muchas otras posibilidades, enfrentar dos D-branas con la misma carga eléctrica que, por ese motivo, habrían de repelerse. La repulsión eléctrica, sin embargo, puede ser compensada por la atracción gravitatoria que ambas ejercen entre sí y, así, producir una configuración estable. Más estrictamente, estas interacciones se deben al intercambio de cuerdas abiertas y cerradas (figura 2). De hecho, esto es lo que ocurre cada vez que se colocan dos D-branas estables paralelas entre sí: no se ejercen fuerza neta y se las puede acomodar a la distancia que uno desee la una de la otra; acercarse o alejarse sin costo energético.

Es admisible, de hecho, apilar un número arbitrario de D-branas, superponiéndolas; la carga eléctrica total del conjunto es la suma de las cargas de cada D-brana individual y, por lo tanto, proporcional al número N de D-branas alojadas en la misma posición. Nosotros mismos podríamos vivir en una D3-brana (o en una suerte de «milhojas» de D3-branas). Podría ser nuestro universo observable tan solo una foliación tridimensional que, cual sábana al viento, se agita en un ambiente 9-dimensional. Sus ondulaciones corresponderían, según la teoría, a los campos que nosotros experimentamos.



Dos (o más) D-branas paralelas interactúan a través del intercambio de cuerdas abiertas y cerradas. El saldo neto es la ausencia de fuerza entre ellas. Las cuerdas cerradas resultan de cuerdas abiertas cuyos extremos se unen sobre la D-brana, permitiéndoles desprenderse.

Esta posibilidad fue explorada por Lisa Randall y Raman Sundrum, aunque no exactamente en el marco de la teoría de cuerdas. En 1999, demostraron que un escenario como este permitiría dar una explicación sencilla a dos fenómenos importantes y elusivos: el problema de la jerarquía —que discutimos en la sección de supersimetría— y la extrema debilidad de la gravitación frente a las interacciones fundamentales restantes. De las cuatro interacciones conocidas, solo la gravedad podría abandonar nuestra D3-brana y, llevada por las cuerdas cerradas, viajar hacia ese mundo de mayor dimensionalidad (como se ilustra en la figura 2), diluyendo su intensidad.

Las interacciones del modelo estándar, en cambio, son responsabilidad de las cuerdas abiertas. Los extremos de estas permanecen anclados en las D-branas, aunque no necesariamente en la misma. Esto explicaría que no puedan propagarse a través de las dimensiones perpendiculares a nuestra «sábana tridimensional» y por eso no habríamos tenido noticias de las dimensiones extra en los experimentos de física de partículas. Tendríamos que ser capaces de medir la energía que se pierde por el flujo de cuerdas cerradas que abandona nuestro «mundo-brana», algo que se está intentando realizar en el experimento Atlas del LHC.

Podemos pensar también en situaciones más sofisticadas, en las que participen D-branas de distinta dimensionalidad —hay, sin embargo, un conjunto de reglas que no permiten más que unas pocas combinaciones compatibles con la supersimetría—; por ejemplo, un sistema de D3-branas y D7-branas, colocadas de modo tal que las cuatro dimensiones espaciales adicionales de estas últimas estén «enrolladas» en una geometría compacta. En el último capítulo comentaremos algo más acerca de las prometedoras posibilidades fenomenológicas que ofrecen estas configuraciones.

LOS CAMPOS DE LAS CUERDAS

Más cerca que ninguna otra teoría física está la teoría de cuerdas de lograr una descripción microscópica del espacio-tiempo. Por un lado, las cuerdas sienten la curvatura del espacio-tiempo (también llamada «gravedad») y son, a su vez, los constituyentes fundamentales de esa geometría curva (llamados «gravitones»). En efecto, el espacio-tiempo curvo se compone de un colectivo coherente de gravitones (en definitiva, cuerdas cerradas) que le propinan a otras cuerdas circundantes —o sea, a otros gravitones— los pequeños empujones que acaban por obligarles a ceñir sus trayectorias a la geometría espacio-temporal. Lo mismo ocurre con los otros campos de la teoría, como esos «campos electromagnéticos» de los que hemos hablamos en varios momentos. Ellos sí afectan a las cuerdas (no a las partículas, a diferencia del campo electromagnético usual) y son, a su vez, compuestos por un conglomerado coherente de cuerdas.

Aprovechemos este momento para hablar un poco más acerca de estos campos: mencionamos ya al campo dilatón, que todas

CAMPOS ESCALARES, VECTORIALES Y TENSORIALES

¿En qué se asemejan y en qué se diferencian estos campos con el campo magnético usual que medimos con una brújula? Para responder a esta pregunta debemos hablar brevemente de las características geométricas de las distintas cantidades que empleamos en física. Por ejemplo, es usual referirnos a nociones tales como la temperatura, que es el tipo de variable que conocemos con el nombre de *escalar*. Los escalares son variables físicas cuyo valor solo puede depender del punto del espacio y del instante de tiempo. Por ejemplo, podemos pensar que un cuerpo no tiene necesariamente la misma temperatura en todas partes ni al mismo tiempo: decimos así que esta depende de la posición y del tiempo. Ahora bien, su valor en un punto dado del espacio y del tiempo es el mismo si miramos dicho cuerpo desde una perspectiva u otra. La temperatura de un punto de la superficie del Sol, por ejemplo, es la misma desde cualquier lado que se la mida, sea desde Mercurio o desde Plutón.

Velocidad y orientación

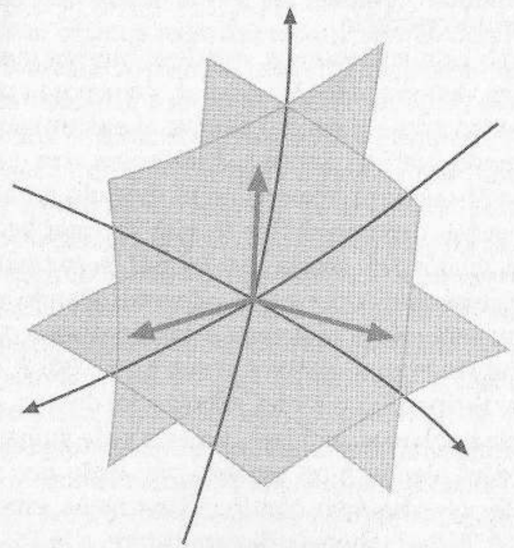
Es distinta la suerte de otras cantidades físicas, tales como la velocidad. Pensemos en un río que fluye. Además de ser cierto que la velocidad de ese fluir puede depender de la posición (el agua cerca de las orillas fluye más lentamente que en el medio del río) y del tiempo (los cauces de los ríos no fluyen de igual manera en diferentes momentos del año), esta también depende de la orientación del observador. Si permanece parado en una orilla verá al río moverse de izquierda a derecha, mientras que si se detiene en la de enfrente verá que la velocidad del agua apunta hacia la izquierda. Es decir, que además de especificar en qué punto del río y en qué momento nos interesa saber su velocidad, la respuesta también dependerá de nuestra orientación. Esto se debe a que la velocidad es una cantidad «vectorial», dado que para especificarla unívocamente no es suficiente con dar un valor en un punto dado del espacio-tiempo, también hace falta una orientación (dirección y sentido), una flecha: un vector. El campo electromagnético usual es similar a la velocidad en cuanto a su carácter vectorial. Es decir, depende del punto del espacio-tiempo, y «apunta» en una dirección específica.

Con los vectores no es suficiente

Ahora bien, la noción de vector está fuertemente arraigada a dos preconcepciones que tenemos de nuestro mundo: la primera es nuestra experiencia tridimensional del espacio; la segunda, el hecho de que pensemos en los componentes de la materia como partículas puntuales y, por lo tanto, como elementos cuyas trayectorias dibujan estelas unidimensionales. Así, para saber cómo influye el campo electromagnético sobre una partícula cargada, nos alcanza la noción de vector, ya que nos es suficiente saber el valor del campo en las coordenadas (x, y, z) donde está la partícula en el instante t, y saber hacia dónde apunta este, para determinar unívocamente cómo se verá afectada la trayectoria de la partícula. Pero ¿qué ocurre cuando el objeto no es puntual? ¿Qué acontece si en lugar de partículas pensamos en cuerdas o membranas? ¿Qué tipo de objetos, ya no solo vectores, pueden afectar el movimiento de entes cuyas estelas al moverse en el espacio-tiempo no dibujan simples trazas unidimensionales sino «hojas de mundo»?

Entes geométricos surcando el espacio

Para tales objetos de dimensionalidad mayor —pensemos, por ejemplo en una Dp-brana, que al surcar el espacio dibuja una estela p+1-dimensional— existen otros tipos de campos que pueden afectarlos. En un espacio-tiempo ambiente multidimensional en el que objetos extendidos tales como cuerdas y membranas se propagan, los campos vectoriales como el electromagnético encuentran a sus hermanos mayores, campos similares que están descritos por entes geométricos conocidos como p-formas. Mientras que un campo escalar corresponde a una 0-forma y uno vectorial a una 1-forma, podemos pensar en campos similares a los electromagnéticos pero que no solo «apuntan» en una dirección dada sino que por cada punto del espacio-tiempo llevan más información, necesaria para especificar en qué dirección se verá afectado cada punto que compone una cuerda o membrana respecto a las dimensiones en las que se extiende. Una situación familiar en la que esto ocurre es al describir las deformaciones de un cuerpo material sometido a fuerzas externas. En un edificio, por ejemplo, el esfuerzo horizontal producido por un terremoto provocará deformaciones horizontales, verticales y transversales de distinta magnitud. Para describirlo, necesitamos cantidades denominadas «tensores», a las que, esquemáticamente, podemos imaginar como pares de vectores, necesarios para definir las direcciones de los esfuerzos y sus correspondientes deformaciones. Una 2-forma es un tipo de tensor; del mismo modo, una p-forma es una cantidad física equivalente, en cierto sentido, a p vectores.



Los tensores son estructuras matemáticas que pueden pensarse como una colección de vectores. Un campo tensorial le asigna un tensor a cada punto del espacio.

las teorías de cuerdas tienen y para el cual la teoría M reserva una elegante descripción geométrica, como radio de la décimo-primera dimensión. También mencionamos al campo de Kalb-Ramond, cuya similitud con el electromagnético empleamos para describirlo. La teoría M, decíamos, también tiene un campo que es reminiscente del electromagnético. Pero pasemos ahora a deconstruir las palabras «similitud» y «reminiscente» discutiendo qué son los campos escalares, vectoriales y tensoriales.

Así como las partículas —a las que podemos llamar D0-branas ya que, en efecto, son objetos 0-dimensionales— cargadas ante el vector (o 1-forma) campo electromagnético desvían sus trayectorias (estelas 1-dimensionales) por efecto de esta interacción, las Dp-branas están cargadas ante campos similares al electromagnético representados por $(p+1)$-formas, viendo desviadas así sus hojas de mundo (estelas $(p+1)$-dimensionales). Las cuerdas fundamentales, por ejemplo, en su carácter unidimensional, están cargadas ante un campo parecido al electromagnético pero que en lugar de ser vectorial está representado por una 2-forma. Este es el campo de Kalb-Ramond al que nos hemos referido con anterioridad.

La teoría M, como ya mencionamos, contiene objetos que recuerdan membranas, denominados M2-branas, y que por lo tanto pueden estar cargados ante un campo similar al electromagnético pero representado por una 3-forma. Esta no es otra que el campo de la teoría M que presentamos en el capítulo anterior. Otros ejemplos son los campos de las teorías de cuerdas. La tipo IIA contiene al dilatón (un escalar o 0-forma), pero también incluye campos representados por otras p-formas, siendo p un número impar. Esto está relacionado con el hecho de que dicha teoría solo contiene Dp-branas estables con p par; $p=0$, 2, 4, 6, 8. Recíprocamente, la tipo IIB contiene, además del dilatón, otra 0-forma de la que ya hablamos, el axión, y a esta se le suman un conjunto de p-formas, siendo p un número par, dado que esta fase de la teoría de cuerdas solo contiene Dp-branas estables con p impar; $p=1$, 3, 5, 7 (excluimos de este listado a la D9-brana, ya que representa un caso atípico: su hoja de mundo 10-dimensional abarca la totalidad del espacio-tiempo).

LA ENTROPÍA DE LOS AGUJEROS NEGROS

Aunque las predicciones de la teoría de cuerdas queden fuera de nuestro alcance tecnológico presente, es posible someterla a pruebas severas que, de no ser sorteadas, atentarían contra su validez. Podemos pensar esto como una variante débil de falsabilidad. Para ser más precisos: si bien en nuestros laboratorios no podemos testear las predicciones de la teoría de cuerdas, sí es posible idear experimentos teóricos —como los célebres *gedankenexperiments* (experimentos mentales) de Einstein— que permitan poner a prueba no solo su consistencia interna como construcción matemática sino también su compatibilidad con los resultados que conocemos de otras ramas de la física. El ejemplo por antonomasia es la descripción de las ya mencionadas propiedades térmicas de los agujeros negros. A esto nos dedicaremos en esta sección, aunque antes debemos decir qué son los agujeros negros.

Podemos comenzar diciendo que los agujeros negros son los entes más extraños —y, sin embargo, abundantes— del universo. Son objetos astrofísicos que surgen tras el agotamiento del combustible nuclear de estrellas de masa considerable cuando estas colapsan por efecto de la —consecuentemente descompensada— atracción gravitatoria. Resultan, por ejemplo, de la explosión de supernova de estrellas masivas. Los agujeros negros son el límite extremo de esa comunión entre gravedad y espacio-tiempo que la teoría de la relatividad general propone. Si según la teoría de Einstein el campo gravitatorio puede ser pensado como la curvatura del espacio-tiempo, entonces los agujeros negros pueden entenderse como las regiones en las que esa curvatura se hace tan grande que el mismo espacio-tiempo se desgarra y la relatividad general deja de valer. En efecto, el campo gravitatorio es tan intenso en la superficie de los agujeros negros que el tiempo, que no escapa a las deformaciones relativistas, llega a detenerse por completo. Además, esa intensidad gravitatoria es tal que la luz no puede abandonar la superficie del astro. Entonces, como la teoría de la relatividad también dictamina que nada puede viajar más rápido que la luz, resulta que absolutamente nada puede escapar de los agujeros negros. Ningún tipo de radiación, materia o forma de energía puede escapar de su interior. Lo que está dentro no puede comunicarse con el exterior; queda causalmente desconectado de lo que acontece fuera. Así, es apropiado y correcto decir que el espacio-tiempo, que por definición es el escenario en el que ocurren los fenómenos físicos, se recorta y acaba allí, en la superficie de los agujeros negros.

Pero como si la afirmación de que en la superficie de los agujeros negros el tiempo se detiene y el espacio se rompe no fuera lo suficientemente sorprendente, la física de los agujeros negros es aún más desconcertante cuando se piensa en sus propiedades térmicas. Según fue conjeturado por Stephen Hawking en la década de los setenta, los agujeros negros tienen una temperatura que resulta inversamente proporcional a su masa. Esto es extraño ya que, entonces, al evaporarse los agujeros negros —puede parecer extraño que un objeto que no deja escapar ni siquiera la luz pueda evaporarse; se trata de un fenómeno que ocurre en la frontera de los agujeros negros, como consecuencia de la «efervescencia» del vacío circundante a nivel cuántico, un tema que excede el alcance de estas páginas—, pierden masa y, al hacerlo, se calientan más y más. Este proceso los lleva a un final inexorable: la evaporación total. Esto implica la desaparición de todo lo que allí dentro existía, un acto de magia perfecto realizado a escalas astronómicas.

La propiedad de los agujeros negros de tener una temperatura inversamente proporcional a su masa se relaciona con otra peculiaridad de su termodinámica: su entropía es proporcional al área de su superficie exterior, conocida como «superficie de eventos». Esto está en franco contraste con la práctica totalidad de sistemas físicos conocidos; por ejemplo, sin ir más lejos, las estrellas que darán lugar a los agujeros negros, para las cuales la entropía resulta proporcional al volumen (y no al área) del gas que le sirve de combustible.

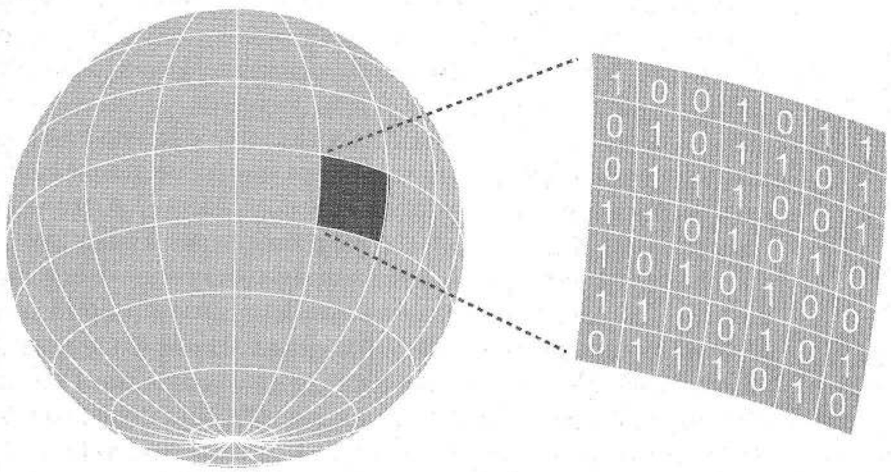
La entropía es una variable termodinámica que mide cuán desordenado se encuentra un sistema físico y corresponde a cuántas formas distintas existen de disponer sus elementos constitu-

tivos de manera compatible con los valores que adoptan sus variables macroscópicas. En el caso de un gas, por ejemplo, las distintas posibilidades en que pueden disponerse las moléculas que lo forman —manteniendo fijas la presión y la temperatura— crecen exponencialmente con la cantidad de estas, y un ejercicio matemático simple lleva a la conclusión de que, debido a esto, su entropía es proporcional al volumen que ocupa.

Los agujeros negros, en cambio, como demostraron Jacob Bekenstein y Stephen Hawking, poseen una entropía que es proporcional al área de la superficie de eventos, un hecho desconcertante que parece indicar que la cantidad de configuraciones posibles que sus elementos constituyentes pueden adoptar —cualesquiera que estos sean— está determinada por aquella que presenten los que se encuentran en su superficie (figura 3).

Debido a esto, la dificultad para describir las propiedades térmicas de los agujeros negros es doble. Por un lado, al tratarse

FIG. 3



La entropía de los agujeros negros reside en la superficie del horizonte de eventos, como demostraron Jacob Bekenstein y Stephen Hawking. Esto quiere decir que allí deberían residir los grados de libertad microscópicos (bits) que codifican la información de todo lo que cae en su interior.

de objetos formados por gravedad pura, y sabiendo ya que esta se resiste a ser descrita en términos de partículas elementales, surge el problema de qué son y cómo describir sus constituyentes internos. En el caso de un gas o un líquido, sabemos que son las moléculas las que podemos calcular usando las reglas de la química y la física estadística. Pero en el caso de los agujeros negros, ¿cuáles son los elementos que los constituyen?

Aun cuando uno tuviera una idea de qué constituye a los agujeros negros, ¿cómo entender un sistema en el que el comportamiento de dichos constituyentes en el interior queda determinado unívocamente por el de los pocos que se alojan en la superficie? ¿Qué ocurriría, en definitiva —tal como le preguntara John Archibald Wheeler, quien acuñó la denominación «agujeros negros», a su estudiante de doctorado Jacob Bekenstein—, con la entropía de una taza de té caliente cuando la arrojamos en el interior de un agujero negro?

Pues bien, este es nuestro laboratorio teórico, nuestro banco de pruebas a las cuales someter a la teoría de cuerdas. En su carácter de candidata a describir todas las fuerzas y constituyentes de la naturaleza —o cuando menos a reconciliar a la relatividad general con la mecánica cuántica—, esta teoría deberá ser capaz de explicar la termodinámica de los agujeros negros. Así, en 1996, Andrew Strominger y Cumrun Vafa mostraron de manera contundente cómo el suponer que los agujeros negros están constituidos por cuerdas lleva, en efecto, al resultado sugerido por Bekenstein y Hawking dos décadas antes: su entropía es proporcional al área de la superficie de eventos. Este cálculo, al que se sumaron de inmediato otros similares realizados por los físicos Curtis Callan, Juan Maldacena y Amanda Peet, convenció a muchos de que la teoría de cuerdas apunta en la dirección correcta. La exactitud del cálculo es impresionante: la entropía de los agujeros negros, cuando es calculada con la teoría de cuerdas, resulta dada por la fórmula que Stephen Hawking había escrito en 1974. Para su realización fue fundamental tener en cuenta la existencia de D-branas en la teoría, y todos los elementos encajaron de manera extraordinariamente precisa.

EL FINAL DEL UNIVERSO ESTÁTICO Y ETERNO

El advenimiento de la teoría de la relatividad general en 1915 permitió repensar el problema cosmológico. La imagen que se tenía entonces del universo era la de un único conglomerado de estrellas, estático y eterno. Esto a pesar de la llamada «paradoja de Olbers». Planteada por Edmund Halley en 1720 y popularizada por Heinrich Olbers un siglo más tarde, consiste en la simple deducción de que un universo de tales características debería presentar un cielo nocturno infinitamente brillante, en lugar de oscuro. En cualquier dirección del cielo que miráramos, más tarde o más temprano habría una estrella que dejaría su impronta lumínica, y como esto vale para todos los puntos de la esfera celeste, la conclusión es inmediata. A menos que, como razonó Edgar Allan Poe en su libro *Eureka: un poema en prosa*, consideremos la posibilidad de que el universo observable haya tenido un comienzo. «La única manera, entonces, de que podamos comprender los abismos cosmológicos que encuentran nuestros telescopios, sería suponer que la distancia hacia ese fondo oscuro es tan inmensa que ningún rayo proveniente de allí haya sido capaz de alcanzarnos aún», sentenció Poe con brillantez. La clave está en el «aún».

Sin duda, un cosmos dinámico

Una de las predicciones más sorprendentes de la teoría de la relatividad general es la expansión del universo. Si suponemos que el universo es homogéneo (en todas partes es similar) e isótropo (en todas direcciones también lo es), entonces indefectiblemente debe ser dinámico: puede que se expanda o se contraiga con el tiempo, pero de ninguna manera permanecer estático. Este aspecto dinámico del universo es inexorable, una conclusión ineluctable de las ecuaciones de Einstein. Muchos advirtieron tempranamente esta consecuencia de la teoría de la relatividad general. El propio Einstein recibió el resultado con renuente escepticismo al comienzo, y muchos otros, como Erwin Schrödinger, intentaron conciliar la idea de un universo estático con la teoría. Einstein creyó por un momento haber logrado detener el universo en sus cuadernos de notas. Para ello introdujo en 1917 un nuevo elemento en sus célebres ecuaciones, el llamado «término cosmológico», que parecía hacer esa función. No obstante, rápidamente se advirtió que si bien ese nuevo y extraño agregado lograba detenerlo ejerciendo una presión negativa que se oponía a la atracción gravitatoria, el universo terminaba desestabilizándose ante la menor perturbación que tuviera lugar y continuaba, así, su expansión (o contracción).

Según el argumento de Olbers, la intensidad de la luz de las estrellas disminuye con el cuadrado de la distancia al observador, pero su número aumenta en la misma proporción, por lo que deberíamos recibir una luz infinita.

Quizá podamos ser un poco más específicos en lo que respecta a este logro de la teoría de cuerdas. Se trataba de obtener una derivación estadística de la entropía de los agujeros negros, por medio de una descripción de los componentes microscópicos de la gravedad y el recuento de todas aquellas configuraciones que dan lugar a las mismas variables macroscópicas —la masa y la temperatura—, como se suele hacer con un gas. Un cálculo de este tipo es complejo, en especial debido a que uno debe zambullirse en el régimen no-perturbativo de la teoría para realizarlo. La forma en la que Strominger y Vafa lograron sortear esta dificultad fue considerar un ejemplo sencillo que, aunque no es exactamente igual a los agujeros negros que observamos en la naturaleza, sí comparte con ellos las propiedades físicas que pretendemos estudiar. Se trata de agujeros negros que viven en un espacio-tiempo 5-dimensional y que poseen, además, un valor elevado de la carga eléctrica. Los agujeros negros que observamos en el universo no tienen carga eléctrica apreciable —ya que se forman a partir de materia eléctricamente neutra—, de modo que son la dimensionalidad y la carga los aspectos en los que el ejemplo considerado difiere de los agujeros negros astrofísicos. En todo lo demás se parecen; en especial, en el aspecto más importante para nosotros: el hecho de que su entropía resulta proporcional al área de la superficie de eventos. El factor de proporcionalidad, además, es el mismo, e involucra tanto a la velocidad de la luz como a las constantes fundamentales de Boltzmann, Newton y Planck —señales de identidad, respectivamente, de la termodinámica (al relacionar cantidades microscópicas y macroscópicas como la energía de cada partícula constituyente y la temperatura), la gravitación y la física cuántica—, lo que convierte a la expresión para la entropía de los agujeros negros en una rara exquisitez del catálogo de ecuaciones del universo físico.

> Cuando entendamos la teoría de cuerdas, sabremos cómo empezó el universo.
>
> Stephen Hawking

Estos agujeros negros idealizados, «modelos de juguete» que nos permiten avanzar sobre los de la realidad, son soluciones «suficientemente sencillas» de las ecuaciones de la teoría de cuerdas, con cinco de sus diez dimensiones «compactificadas». La «sencillez» emana del hecho de que estos agujeros negros aún preservan algo de la supersimetría original, gracias a que sus cargas eléctricas toman un valor enorme, similar al de su masa. La asombrosa precisión numérica del resultado, no obstante, parece minimizar la relevancia de las diferencias entre el ejemplo estudiado y los agujeros negros reales, convirtiéndolas en un detalle menor. Desde la publicación de los resultados de Strominger y Vafa, de hecho, los físicos se encargaron de cubrir un catálogo rico que incluye muchos otros ejemplos de agujeros negros, en diversas dimensiones y con simetrías varias, acercándose cada vez más a los casos realistas, cuyo tratamiento directo sigue siendo muy complejo debido a la ausencia de supersimetría.

EL PROBLEMA CON LA ENERGÍA OSCURA

En 1929, poco más de una década después de que fuera formulada la teoría de la relatividad general, Edwin Hubble obtuvo la primera evidencia observacional de que el universo no solo se movía sino que lo hacía expandiéndose —el sacerdote y astrónomo belga Georges Lemaître había llegado a la misma conclusión dos años antes, pero publicó su trabajo en una revista de astronomía belga de poca difusión y pasó desapercibido—. En primer lugar, Hubble observó que un conjunto de estrellas pertenecientes a lo que hoy conocemos como Andrómeda se encontraba a tan considerable distancia de la Vía Láctea que debían ser interpretadas como pertenecientes a otra galaxia. Así, por primera vez supimos que el universo consistía de más de una galaxia. Hubble, de hecho, observó muchas más, y hoy sabemos que hay al menos cien mil millones de galaxias en el universo observable. Notó que las más distantes presentaban un tono más rojizo del que se esperaba y que ese «tinte» de la luz que nos enviaban podía entenderse como resultante del *efecto Doppler* (un cambio aparente que se da en la frecuencia de una onda cuando la fuente emisora se mueve respecto al observador), signo de que estaban alejándose de la Tierra, más rápidamente cuanto más lejos se encontraban de nosotros. Además, las observaciones efectuadas por Hubble indicaban que la expansión cósmica se daba en todas las direcciones de la misma manera y a la misma velocidad, una observación que inmediatamente invita a aclarar que esa *isotropía* (que es la característica de determinados cuerpos cuyas propiedades físicas son invariables, sea cual sea la dirección desde la que se midan) no se debe a que seamos el centro del universo, sino a que el cosmos parece satisfacer aquellas hipótesis que Einstein había sugerido desde el comienzo: el universo es, en todas partes y en todas direcciones, similar, homogéneo e isótropo. Así, todo punto del cosmos es su centro y todo punto se separa de los otros de igual manera, lo que es una evidencia sustancial de la expansión del universo.

El mismo Einstein tuvo acceso a las observaciones de Hubble y encontró la demostración contundente. Las galaxias se alejan de la nuestra y lo hacen con más velocidad conforme más lejos se hallan. Fue entonces cuando advirtió que su teoría de la relatividad general iba más lejos que sus propias convicciones y preconceptos: ¡había predicho la expansión del universo antes de que esta hubiera sido observada!

Así, remontando su historia hacia el pasado, invirtiendo imaginariamente la flecha del tiempo, podía deducirse —como lo hizo Lemaître en 1931— la más sorprendente predicción de la cosmología: el universo tuvo un comienzo en el que toda la materia se encontraba en un punto, «el átomo primordial». Estas ideas dieron lugar un poco más adelante a la *teoría del Big Bang*.

Pero no sería esta la última gran sorpresa que nos habría de deparar la cosmología. A finales de la década de los noventa se observó que el universo no solo se expande, sino que lo hace cada vez más rápido, ¡acelerándose! Fue esa observación lo que les valió a los astrónomos estadounidenses Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess el premio Nobel de Física en 2011. Esta expansión acelerada del universo es desconcertante en varios aspectos teóricos y entender qué la produce y por qué lo hace en la cantidad observada es, sin lugar a dudas, uno de los problemas más acuciantes de la física moderna.

Irónicamente, el «término cosmológico» introducido por Einstein en sus ecuaciones y al que, tras conocer los resultados de Hubble, se refirió como «la mayor metedura de pata de mi vida», reúne las características adecuadas para ser el responsable de la aceleración cósmica. Las leyes de la física cuántica respaldan la existencia de una «energía del vacío» que permea, tal como lo hacen los campos, cada rincón del espacio-tiempo, exactamente lo mismo que hace el término cosmológico. El principio de incertidumbre de Heisenberg obliga a todos los campos del modelo estándar a tener una energía mínima no nula, una suerte de temblor microscópico que tiene aparejado un valor energético. Si bien en el plano cualitativo este podría ser un buen candidato para lo que hoy llamamos «energía oscura» (un tipo misterioso de energía que impulsa al universo a acelerarse), a nivel cuantitativo la discrepancia entre el valor predicho a nivel teórico —que tiene muchas fuentes de incertidumbre— y el medido experimentalmente es la mayor que se haya registrado en la historia de las ciencias naturales. Desde el punto de vista teórico es difícil entender cómo es que la intensidad de aquello que propina la aceleración cósmica resulta tan pequeña sin llegar a ser cero, cuando los cálculos arrojan un resultado comparativamente enorme.

Los modelos más naturales desde el punto de vista estético-matemático sugieren que el término cosmológico no debería estar presente en las ecuaciones. En particular, es difícil conciliar su existencia con la supersimetría. Lo cierto es que, sin ánimo de entrar en los detalles técnicos, no contamos aún con una descripción teórica satisfactoria para explicar la expansión acelerada del universo. Y esto es doblemente penoso ya que también en sus comienzos este tuvo que haber transitado una fase de rápida expansión acelerada para adquirir la homogeneidad que hoy exhibe. La única explicación satisfactoria que encontramos hasta el momento para esclarecer por qué todo el universo observable tiene la misma temperatura es suponer que todas sus partes estuvieron en contacto, a pesar de que hoy estén a tales distancias que ni siquiera la luz hubiera tenido tiempo de recorrerlas. Una efímera etapa de expansión acelerada lo llevó a multiplicar su tamaño exponencialmente, homogeneizando su temperatura. Esta primera etapa acelerada del cosmos se denomina «inflación», y ocurrió cuando nuestro universo tenía menos de una billonésima de trillonésima de segundo de existencia.

¿Cómo entender, pues, las desconcertantes etapas de aceleración cósmica desde el punto de vista de la física teórica? ¿Cómo se explica la expansión acelerada del universo que hoy observamos y aquella etapa similar —aunque inconmensurablemente más abrupta— que, según parece, tuvo lugar en sus orígenes? ¿Qué tiene la teoría de cuerdas que decir al respecto? En su calidad de candidata a proporcionar una descripción de las leyes de la física que compatibilice la relatividad general con las reglas del universo microscópico, se espera que la teoría de cuerdas dé respuesta acabada al nacimiento y expansión inicial del cosmos, así como a la naturaleza última de la energía oscura. No obstante, vale decir que aún no contamos con una respuesta satisfactoria. A pesar del gran esfuerzo realizado para encontrar en el gran baúl de soluciones de la teoría de cuerdas una que describa un universo acelerado como en el que vivimos, y que, al mismo tiempo, prediga que es estable, la cuestión sigue siendo una de las preguntas abiertas más importantes. La dificultad para describir la aceleración cósmica en el contexto de la teoría de cuerdas reside en que esa clase de soluciones a las ecuaciones parece presentar, inevitablemente, algún tipo de inestabilidad. Como si aceleración e inestabilidad fueran siempre de la mano.

Quizá esto no sea un problema de base, ya que bien podríamos pensar que nuestro universo no es estable, sino una fase metaestable —se llama así a los sistemas físicos que permanecen un tiempo dado en un estado de equilibrio aparente, pero finalmente decaen en otro estado (más) estable; por ejemplo, los núcleos radiactivos—, pero cuyo tiempo característico de desestabilización es muy grande. Esto supone *a priori* un problema técnico, ya que es mucho más difícil encontrar e interpretar soluciones a la teoría de cuerdas que sean metaestables. Sin embargo, no podemos dejar de mencionar que la metaestabilidad es un rasgo genérico de la cosmología inducida por

el «paisaje» de la teoría de cuerdas, del que hablamos cuando discutimos el multiverso. Como fuere, la descripción de la aceleración cósmica sigue siendo una pregunta abierta en teoría de cuerdas. Tanto como lo es en el contexto del resto de teorías de la física fundamental.

El universo holográfico

Hace casi veinte años la teoría de cuerdas dio lugar a su resultado más impactante: la conjetura de Maldacena. Según esta, la elusiva teoría cuántica de la gravedad podría tener una descripción relativamente simple en términos de lo que ocurre en la frontera del espacio-tiempo. ¿Puede ser el universo descrito como un holograma? Algunas razones respaldan esta idea.

Uno de los aspectos más interesantes de las D-branas es que expresan de manera alternativa las simetrías de dualidad que, como discutimos ya, la teoría de cuerdas esconde en el seno de su formulación matemática. Es decir: la existencia de dos maneras equivalentes —pero de apariencia radicalmente distinta— para describir un mismo fenómeno físico. El mejor ejemplo para ilustrarlo está en el propio proceso de interacción entre dos de dichos objetos extendidos.

Consideremos un par de D-branas que interactúan mediante el intercambio de cuerdas. En el diagrama de la izquierda de la figura 1 vemos cómo la fuerza que una D-brana ejerce sobre la otra está representada por el intercambio de una cuerda cerrada que se propaga libremente entre ambas. En el de la derecha, en cambio, la interpretación del proceso de interacción es diferente y responde a cuerdas abiertas que se propagan alrededor del cilindro imaginario que la cuerda cerrada habría dibujado en su andar.

Ambas descripciones deben ser indistinguibles, como se intuye a partir de la figura. Son solo distintas formas de «recorrer» el mismo diagrama. A nivel del cálculo matemático, los resultados son exactamente iguales gracias a una asombrosa propiedad de la teoría. En particular, porque el diagrama de la izquierda involucra el intercambio de gravitones, mientras que estos brillan por su ausencia en el de la derecha. Esto induce a pensar que podría existir una formulación alternativa a la gravedad cuántica en la que, por así decirlo, no haya gravitones. La dualidad entre cuerdas cerradas y abiertas cuyos extremos se encuentran fijos sobre las D-branas es, también, otra muestra de la extraña manera en que las cuerdas «sienten» la estructura espacio-temporal, de una forma dual que nos permite recurrir a uno u otro modo de entender el mismo fenómeno, lo que representa una enorme ventaja de cálculo de la teoría.

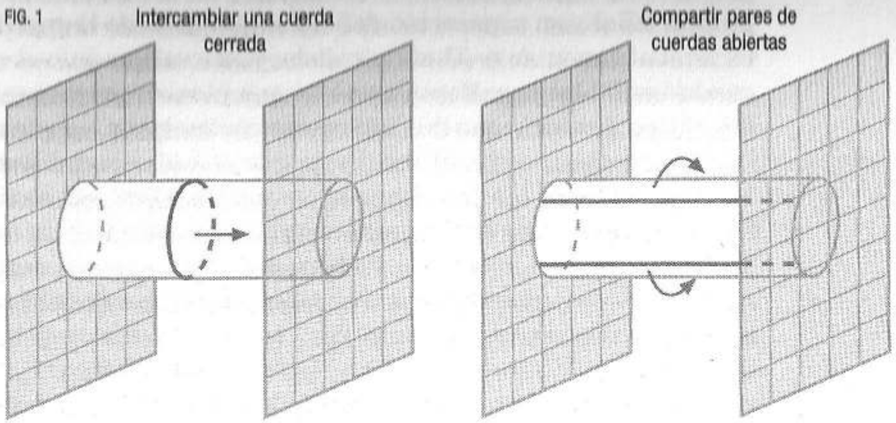
LA CONJETURA DE MALDACENA

Consideremos un conjunto de D3-branas paralelas. Para cada par de ellas, ya lo dijimos antes, es posible demostrar que el saldo neto de todas sus interacciones es cero, es decir, ni se atraen ni se repelen. Esto se debe a que la atracción gravitatoria entre las D3-branas se compensa con la repulsión debida a otros campos ante los cuales están cargadas. Por lo tanto, podemos alejarlas o acercarlas arbitrariamente, siempre respetando que se mantengan paralelas. Podemos tener varios tipos de cuerdas en esta situación. Dentro de las abiertas, estarán aquellas que tienen ambos extremos en una misma D3-brana, pero también habrá cuerdas que tienen cada extremo en distintas D3-branas (figura 2).

Además, tendremos cuerdas cerradas que pueden viajar a través del espacio transverso, alejándose de todas las D3-branas a la vez. Las cuerdas abiertas pueden eventualmente cerrarse, si sus extremos se acercan hasta tocarse, desprendiéndose. De igual modo, el proceso inverso en el que una cuerda cerrada toca a una D3-brana y se engancha, separando sus extremos y convirtiéndose en una cuerda abierta, también es posible. Estos procesos nos permiten deducir cuál es la teoría que describe este sistema de cuerdas y D-branas.

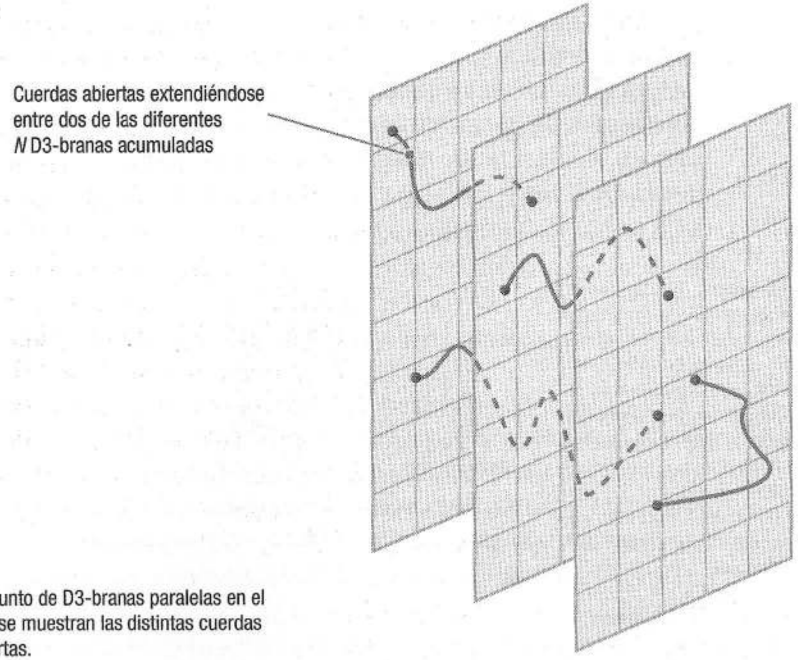
En el nivel más bajo de energía, las oscilaciones de las cuerdas que tienen sus extremos en dos D3-branas distintas presen-

FIG. 1



Dos D-branas que interactúan mediante el intercambio de cuerdas. La posibilidad de interpretar este proceso de más de una manera —como un intercambio de cuerdas cerradas (izquierda) o abiertas (derecha)—, obteniendo naturalmente el mismo resultado, expresa la simetría de dualidad de la teoría de cuerdas.

FIG. 2



Conjunto de D3-branas paralelas en el que se muestran las distintas cuerdas abiertas.

tan, al estar inexorablemente estiradas, estados con una masa proporcional a su separación debido a la tensión de la cuerda. Podemos aumentar o disminuir dicha masa, alejando o acercando las D3-branas. Esto ya nos da una pista importante sobre el tipo de teoría que describe estas oscilaciones, ya que no son muchas las posibilidades disponibles en la caja de herramientas del físico teórico que sean compatibles con este extraño comportamiento. Las cuerdas abiertas con extremos en una misma D3-brana, en cambio, dan lugar a partículas sin masa, ya que pueden contraerse hasta tener tamaño cero. Por último, las cuerdas cerradas que completan esta configuración viajan libremente, por lo que se perciben como un espacio-tiempo plano 10-dimensional. Asimismo, las cuerdas abiertas y cerradas, en principio, interactúan entre ellas.

Imaginemos ahora que acercamos a todas las D3-branas (llamemos N al número de estas) hasta colocarlas arbitrariamente cerca las unas de las otras, es decir, en el mismo lugar del espacio. Son superficies geométricas sin grosor, por lo que esto es posible. Lo único que habrá cambiado significativamente es el comportamiento de aquellas partículas correspondientes a las vibraciones de las cuerdas que unían a D3-branas distintas, que pasarán ahora a tener masa cero por estar juntas. Esquemáticamente, podemos decir que la descripción de este sistema viene dada por la siguiente expresión:

$$S=S_{\text{cuerdas abiertas en N D3-branas}}+S_{\text{cuerdas cerradas lejanas}}+S_{\text{interacción}}$$

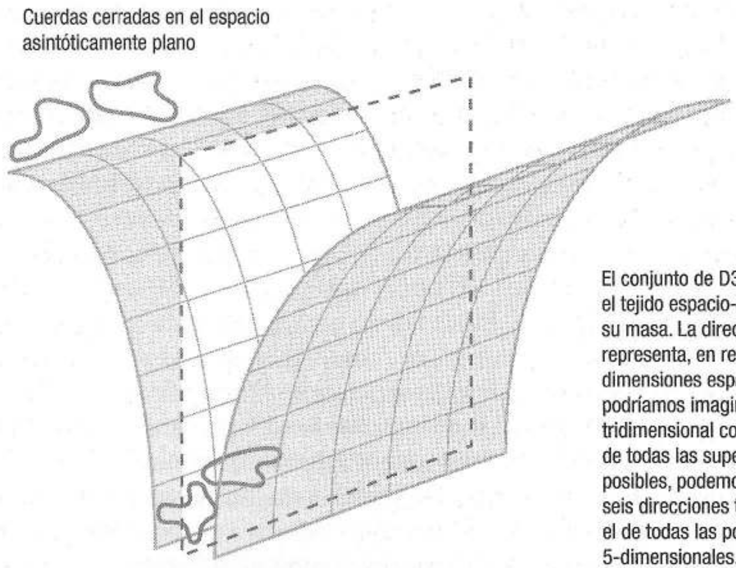
donde la S quiere decir «Sistema». Esta ecuación es una forma esquemática de indicar lo que se describe en el párrafo que la precede. La teoría de cuerdas da cuenta de los tres términos de la expresión anterior, siendo el último el más complejo.

Observemos ahora al sistema anterior desde un punto de vista distinto. Las D3-branas son hipersuperficies que tienen una tensión y, por lo tanto, una masa. Su tamaño es infinito, de modo que la masa es todo menos pequeña. El conjunto de D3-branas,

entonces, puede ser visto como un cuerpo pesado que deforma al espacio-tiempo, como fruto de su enorme masa. Es posible, de hecho, utilizar las ecuaciones de Einstein para determinar la geometría (la curvatura del espacio-tiempo) que este sistema produce. La representación gráfica de lo que ocurre con el espacio-tiempo 10-dimensional es complicada, pero podemos simplificarla (figura 3).

Allí se puede apreciar que el espacio-tiempo —representado como una superficie reticulada— sufre una marcada hendidura en el sitio en el que se encuentran superpuestas todas las D3-branas, pero con la particularidad de que lejos de ellas es plano, ya que allí su influencia gravitatoria es desdeñable. Cuando se estudia el campo gravitacional —también el electromagnético generalizado— producido por estos objetos, la forma correcta de hacerlo es, esquemáticamente, eliminar a las D3-branas (por

FIG. 3



El conjunto de D3-branas deforma el tejido espacio-temporal debido a su masa. La dirección perpendicular representa, en realidad, a seis dimensiones espaciales. Así como podríamos imaginar un espacio tridimensional como el conjunto de todas las superficies esféricas posibles, podemos representar las seis direcciones transversas como el de todas las posibles esferas 5-dimensionales. Estas encierran N unidades de la «carga eléctrica generalizada» que poseen las D3-branas.

eso las representamos con línea de trazos) y dejar en su lugar a los campos que generan. Así, al no tener D3-branas, nos encontramos ante un sistema de cuerdas cerradas que se mueven en presencia de la geometría y los campos electromagnéticos que aquellas provocaron. Al igual que las partículas elementales tienen la carga eléctrica *cuantizada* —lo que significa que solo puede tomar valores que sean múltiplos enteros de una carga mínima— la mecánica cuántica impone a las D3-branas una forma de carga que está repartida a lo largo de toda su extensión tridimensional, genera campos parecidos al electromagnético y también está cuantizada. Así como pensamos que una carga eléctrica dada se debe a la presencia de cierta cantidad de electrones, diremos que la configuración de D3-branas tiene carga N, para indicar que su descripción microscópica está dada en términos de N D3-branas, cada una de las cuales tiene una unidad de la carga fundamental.

Tenemos, todos los que vivimos,
una vida que es vivida
y otra vida que es pensada.

FERNANDO PESSOA

Hay que recordar que existen seis direcciones transversas —debido a que el espacio-tiempo tiene diez dimensiones mientras que las D3-branas dibujan una estela de cuatro dimensiones al moverse en el tiempo—, algo que no podemos representar en un papel. Así como podríamos concebir un espacio tridimensional como el conjunto de todas las superficies esféricas concéntricas posibles, podemos representar a las seis direcciones transversas como el conjunto de todas las posibles esferas 5-dimensionales. Estas encierran N unidades de la «carga eléctrica generalizada» que poseen las D3-branas; por analogía con el electromagnetismo se dice que las 5-esferas «encierran N unidades de flujo».

Es posible descomponer el sistema de un modo parecido al que utilizamos más arriba cuando lo analizamos desde el punto de vista en el que las D3-branas son hipersuperficies en las que acaban las cuerdas abiertas. Ahora se nos presenta una configuración que involucra solo cuerdas cerradas, pero en un espacio-tiempo curvo. Esquemáticamente, tenemos cuerdas cerradas que viven en el fondo de la hendidura (donde el campo gravitatorio es intenso), otras que lo hacen muy lejos de esta y,

por último, está lo que llamaremos la interacción entre ambas, es decir, aquellas cuerdas que tienen posibilidades de salir o entrar en la hendidura:

$$S = S_{\text{cuerdas cerradas en hendidura \& } N \text{ flujos}} + S_{\text{cuerdas cerradas lejanas}} + S_{\text{interacción}}$$

donde la S quiere decir, nuevamente, «Sistema». ¡Y se trata del mismo sistema que antes! Lo único que hemos hecho es interpretarlo de otro modo, analizándolo como lo haríamos con el Sol en el sistema solar, cuando toda su presencia se resume en el campo gravitatorio que genera y dicta el movimiento de los planetas.

Si bien la interacción se refiere, en cada caso, a cuerdas distintas en situaciones muy diferentes, es posible caracterizar estos términos suficientemente como para darnos cuenta de que, en el hipotético caso de que la longitud de la cuerda fuera arbitrariamente pequeña, estos dos términos también resultarían insignificantes. El cálculo que sustenta esta afirmación había sido realizado por Igor Klebanov, pero fue Juan Martín Maldacena quien se dio cuenta de las profundas consecuencias que esto conllevaba si se complementaba con una suposición adicional: que el número de D3-branas es enorme. Si consideramos que la longitud de la cuerda es muy pequeña, tomando la aproximación en la cual es infinitamente pequeña, los sistemas se parecen cada vez más a una de las antiguas teorías de partículas y campos, basadas en objetos puntuales. En esta aproximación, la energía de los estados oscilatorios de la cuerda se hace infinitamente grande y estos dejan de participar en la dinámica del sistema; en la cuerda de una guitarra, esto se vería en un aumento de la frecuencia al acortarla: en algún momento la nota resultante se hará tan aguda que saldrá de nuestro rango auditivo, sin importar cuán amplio sea.

En la descripción de cuerdas abiertas del sistema (véase la figura 2), considerar un tamaño de las cuerdas arbitrariamente pequeño lleva a una serie de simplificaciones en cada una de las tres partes en las que lo dividimos. La teoría de cuerdas da un resultado muy preciso para la dinámica de las cuerdas abiertas que tienen extremos en las N D3-branas. Se trata de una teoría muy concreta de la que ya hemos hablado: la teoría $n=4$ SYM, prima cercana de la que se utiliza en el modelo estándar. Es decir, la descripción de la dinámica de las D3-branas, en las condiciones discutidas más arriba, está dada, formalmente, por ¡el mismo tipo de teorías que describen la física de las partículas elementales!

Sin embargo, el prefijo $n=4$, como vimos, quiere decir que se trata de una extensión de la teoría de Yang-Mills con la máxima supersimetría posible. Esto nos aleja peligrosamente de la fenomenología: aún no se han encontrado indicios de supersimetría en los aceleradores más energéticos que hemos construido y lo que es seguro es que, de encontrarse, de ninguna manera habrá tanta. La teoría $n=4$ SYM es tan simétrica que incluso posee la simetría conforme que discutimos anteriormente, lo que conlleva una prohibición taxativa de la existencia de masa para las partículas. Esto constituye *a priori* un problema importante ya que, aunque «de la misma clase» que la QCD, la teoría $n=4$ SYM parecería ser «demasiado simétrica» como para ser representativa de nuestro universo físico. Existen otras teorías cuánticas de campos con simetría conforme: a cada una de las cuales se la identifica con el apelativo de CFT (del inglés *Conformal Field Theory*).

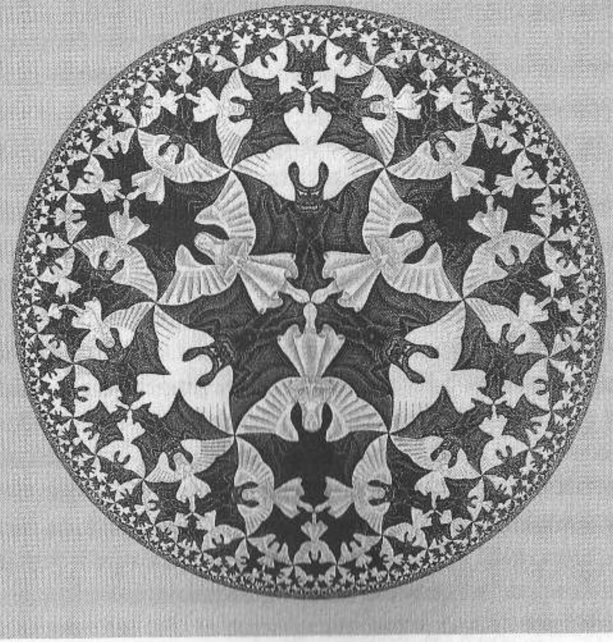
Aunque de momento no parezca esperanzadora, quizá sea oportuno recordar un aspecto de la teoría $n=4$ SYM que ofrece un atractivo singular para los físicos teóricos: es única; no es posible construir ninguna otra con los mismos ingredientes. Tomemos esto como una motivación suficiente para seguir explorando lo que resulta del sistema de la figura 2. La contribución de las cuerdas cerradas lejanas se trivializa: con esto queremos decir que, si las cuerdas son pequeñas y el número de D3-branas es muy grande, se puede demostrar que dichas cuerdas no son más que gravitones que se pasean libremente por un espacio-tiempo plano. Por último —y aquí aparece un aspecto clave del razonamiento que lleva a la conjetura de Maldacena—, las interacciones, el tercer y más complejo elemento del sistema, se ven totalmente suprimidas.

EL ESPACIO-TIEMPO ANTI-DE SITTER

El espacio Anti-de Sitter (AdS) es un tipo de geometría que no le resultará familiar al lector. Aunque se puede formular de manera matemática precisa y consistente sobre el papel, sus propiedades se alejan mucho de la geometría euclídea a la que estamos acostumbrados. Basta con decir que en el espacio AdS, infinito como podría serlo el espacio cartesiano, un rayo de luz puede llegar al infinito y, si se dispusiera allí un espejo, retornar al cabo de un lapso de tiempo. Si en lugar de un rayo de luz lanzáramos una piedra, esta también regresaría al cabo del mismo tiempo, como si se tratara de un bumerán, pero sin haber logrado alcanzar el infinito, ya que eso le demandaría una energía ilimitada. En el espacio AdS se pueden trazar infinitas paralelas a una recta que pasen por un punto ajeno a ella, algo que es imposible de lograr sobre el papel.

Infinita finitud

La representación usual del espacio AdS es la del denominado disco de Poincaré, o geometría de Lobachevsky, que comparten muchas de sus extrañas propiedades. Estas geometrías extrañas se asemejan a algunos de los dibujos de Maurits Cornelis Escher, como el disco que alterna demonios y ángeles, que se hacen pequeños e infinitos a medida que uno se acerca a los bordes del disco (en la imagen). El disco es finito, pero los demonios y ángeles se hacen cada vez más pequeños cerca del borde, de forma tal que se acercan al límite cada vez más, pero siempre sintiéndolo infinitamente lejos.



El artista neerlandés M.C. Escher realizó esta obra, *Cielo e infierno*, en 1960. Es el cuarto y último grabado en madera de la serie *Límite circular*. Muchas de sus obras parecen perseguir la captura del infinito, expresando una serie indefinida de teselados dentro de un espacio finito, un ejemplo de geometría hiperbólica, como el disco de Poincaré.

Así, podemos sintetizar lo discutido hasta aquí indicando que, si suponemos que la longitud de la cuerda es arbitrariamente pequeña y el número de D3-branas muy grande, el sistema S de la figura 2, se ve simplificado a:

$$S = S_{n=4\text{ SYM}} + S_{\text{gravitones libres}}$$

Es interesante explorar lo que ocurre con la descripción de cuerdas cerradas del sistema cuando consideramos el mismo límite. Recordemos que estas se mueven en una geometría muy concreta que se muestra esquemáticamente en la figura 3. En este caso es bastante más sencillo indicar lo que ocurre: el límite estrecha la hendidura y la hace muy profunda. Como resultado, las pequeñas cuerdas cerradas quedan atrapadas en el fondo y la probabilidad de que una de ellas emerja de la hendidura es nula, lo mismo que aquella que contabiliza la posibilidad de que una cuerda cerrada que está fuera se interne en una hendidura en la que, para decirlo coloquialmente, no cabe. Esto quiere decir que el último término, el término de interacción, desaparece completamente.

El primer término describe a las pequeñas cuerdas cerradas que se mueven en una hendidura profunda, la cual adopta una forma muy precisa: la geometría resultante se conoce como «espacio Anti-de Sitter (AdS) en cinco dimensiones».

En realidad, el espacio-tiempo tiene, como ya sabemos, diez dimensiones, pero en este caso ocurre una simplificación afortunada: las otras cinco dimensiones constituyen una sencilla esfera (¡cinco-dimensional!). Esta esfera dejará huellas en la física del sistema y es depositaria de una pieza relevante de información. Recordemos que la configuración estaba caracterizada por un número natural, N, que indicaba el número de D3-branas y que, según la aproximación propuesta por Maldacena, es muy grande. Pues bien, este número persiste en las N unidades de carga encerradas por la 5-esfera, de las que hablamos al principio de este capítulo.

Por último, las pequeñas cuerdas cerradas lejanas ven una geometría plana, ya que toda la curvatura se ciñe a la pequeña región en la que se extiende la hendidura. De modo que, con estas simplificaciones, el sistema resulta:

$$S = S_{\text{gravedad en AdS \& N flujos}} + S_{\text{gravitones libres}}$$

donde es importante remarcar que el primer término corresponde a una teoría de gravedad supersimétrica muy concreta llamada *Tipo IIB*, que se obtiene de la teoría de cuerdas homónima en el régimen de bajas energías. Pero estos dos sistemas, a pesar del disímil aspecto que presentan, ¡son el mismo! Son dos descripciones alternativas de un mismo conjunto de N D3-branas planas. Por tanto, podemos igualar las dos últimas expresiones de S y, tras cancelar el segundo sumando del miembro derecho, que en ambos casos corresponde a pequeñas cuerdas cerradas libres en un espacio-tiempo plano, llegamos a la sorprendente igualdad

$$S_{\text{gravedad en AdS \& N flujos}} = S_{n=4\text{ SYM}}$$

a la que llamaremos, críptica pero significativamente,

$$\text{AdS} = \text{CFT}.$$

Esta maravillosa ecuación, conocida como la conjetura de Maldacena, cuyas consecuencias explicaremos a continuación, es una de las más extraordinarias que se hayan escrito jamás. AdS es una forma económica de escribir «Supergravedad Tipo IIB en $AdS_5 \times S^5$ con N unidades de flujo». Esta es una teoría cuántica por construcción —más estrictamente, lo es la teoría de cuerdas tipo IIB: la supergravedad aparece aquí porque estamos trabajando en el límite de cuerdas muy pequeñas y N es un número arbitrariamente grande—.

Haber conseguido una ecuación en la que en uno de los lados del signo igual se halla una teoría cuántica de la gravedad es un hito extraordinario; un objetivo perseguido durante nueve décadas. Nadie había imaginado, ¡eso sí!, el exotismo de lo que estaría al otro lado del signo igual, algo tan distinto en apariencia: una teoría cuántica de campos con simetría conforme ¡en una dimensión menos! Esto último, el hecho de que la gravedad cuántica pueda describirse haciendo uso de menos dimensiones espaciales, es lo que le da carta de naturaleza holográfica a la también denominada *correspondencia AdS/CFT*. Desde la aparición de la conjetura de Maldacena, el 27 de noviembre de 1997, los trabajos que la han estudiado, puesto a prueba, generalizado y, en general, investigado, se cuentan por miles. Es, en sí misma, tema para un libro. Describiremos algunos resultados obtenidos a partir de esta conjetura y su rol en el contexto de la teoría de cuerdas.

> Si me preguntan cuál es la ecuación más grande jamás escrita, mi preferencia está clara; la de Maldacena: AdS = CFT.
>
> JOSEPH POLCHINSKI

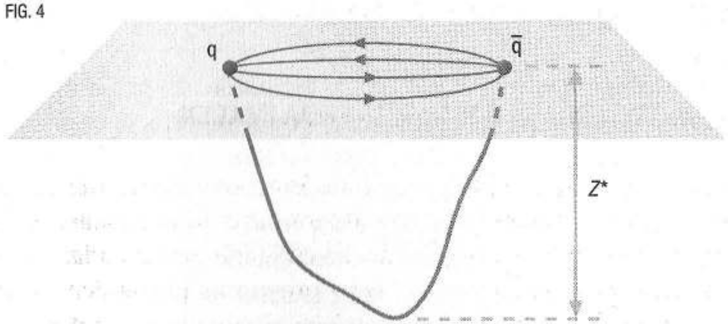
UNA NUEVA MIRADA SOBRE UNA VIEJA IMAGEN

La conjetura de Maldacena proporcionó una nueva mirada sobre antiguos problemas que se remontan a la mismísima génesis de la teoría de cuerdas. Las investigaciones basadas en las ideas fundacionales de Veneziano presuponían implícitamente que las cuerdas eran las responsables de mantener juntos a los quarks; más específicamente, al par quark-antiquark que constituye un mesón. La propia QCD explica que el confinamiento de los quarks es mediado por una suerte de campo electromagnético generalizado: el campo fuerte, cuyas líneas de fuerza, a diferencia de lo que ocurre con las del electromagnetismo —que se esparcen como las púas de un erizo, como podemos comprobar con un imán y un puñado de limaduras de hierro—, se concentran como si formaran un cordón deshilachado que mantiene juntos a los quarks.

Durante mucho tiempo se pensó que, de alguna manera aún por determinar, ese cordón era el objeto descrito por la teoría de cuerdas. Sin embargo, el hecho de que tuviera un ancho característico, una escala de longitud asociada, contradecía al espesor nulo de la cuerda fundamental. La existencia de una quinta dimensión holográfica —es decir, que es perpendicular a las dimensiones de la teoría CFT— da cumplida respuesta a este punto. Una cuerda sin espesor que se adentra en la quinta dimensión llegando hasta un punto y regresando a la frontera adquiere necesariamente una escala: la que le proporciona la profundidad de penetración (figura 4). El grosor del cordón que mantiene unidos al quark y al antiquark es, por así decirlo, la «sombra holográfica» de esa profundidad.

El lector seguramente se siente en este punto escéptico y desconcertado por la existencia de la dimensión holográfica. Sin embargo, cederá más fácilmente si se presenta el resultado

FIG. 4



Un quark y un antiquark que, unidos, forman un mesón (un ejemplo conocido son los piones que se generan en la atmósfera debido a los rayos cósmicos). Según la teoría QCD, el par quark-antiquark se mantiene unido debido a los gluones que dan entidad a las líneas de campo fuerte, representadas aquí por las flechas. Debido a la presencia de la dimensión holográfica, los gluones aparecen como «sombras platónicas» de una cuerda fundamental que se extiende en esa dimensión extra y a la que los quarks y antiquarks, extremos de la cuerda, no pueden acceder. El ancho del cordón fuerte viene dictado por la profundidad de penetración en la dimensión holográfica, Z^*.

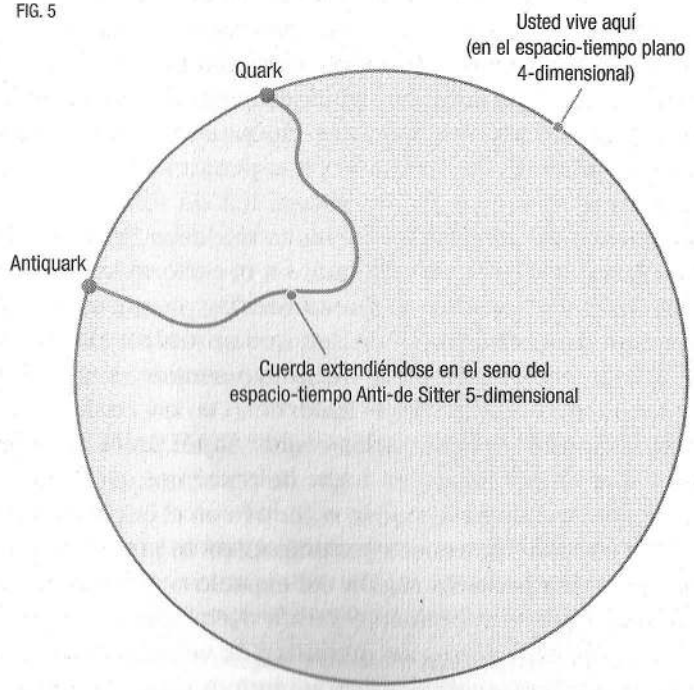
de Maldacena desde otro punto de vista. Así como se puede argumentar que Einstein extendió las dimensiones del universo de tres a cuatro al incorporar al tiempo, pasando del espacio al espacio-tiempo, podríamos afirmar que Maldacena descubrió que, a nivel cuántico, la energía se incorpora de una manera muy especial al espacio-tiempo para dar lugar a un ente 5-dimensional en el que las ecuaciones de la física son más sencillas y adoptan un «sentido superador». Con esto queremos decir lo siguiente: Uno podría insistir en mantener separado al espacio del tiempo en la teoría de la relatividad y formular en ese escenario las ecuaciones. Esto es, desde luego, posible. Lo único que conseguiríamos en tal caso sería un formalismo en apariencia más complejo y, desde luego, bastante menos elegante. Decidir incluir al tiempo junto a las dimensiones del espacio, al margen de sus implicaciones conceptuales, se puede pensar como una opción adecuada para que la teoría adopte una forma más simple. Pero una vez que se realiza esta inclusión, la noción de espacio-tiempo funciona como una puerta abierta a nuevas ideas, superadoras, que eran difícilmente apreciables con el formalismo anterior. El salto conceptual puede pensarse como el regocijante clic que hacen dos piezas al encajar perfectamente.

Lo mismo puede decirse de la inclusión de la «dimensión energía». Aunque no estemos obligados a hacerlo, si la incorporamos a las del espacio-tiempo en una teoría y nos adentramos en el régimen no-perturbativo de esta, comprobaremos que el espacio-tiempo-energía adquiere un nuevo sentido, superador. Lo que nos dice la conjetura de Maldacena es que la física de un sistema semejante «debe» ser pensada en términos completamente distintos. De alguna manera, la lección es que las descripciones de los fenómenos físicos, tales como la gravedad o las interacciones nucleares, en distintos regímenes pueden venir dadas por representaciones espacio-temporales muy diferentes. Mientras que en numerosas ocasiones la descripción adecuada de un fenómeno parece ser la brindada por un espacio-tiempo 4-dimensional como el que se considera en la física de partículas, en otras nos encontramos con fenómenos —acaso correspondientes a la misma fuerza pero en un régimen distinto—, cuya descripción resulta más iluminadora en términos de una teoría en un espacio-tiempo 5-dimensional, o 10-dimensional. Así, la idea de dimensionalidad como un absoluto se desdibuja y, con ella, la imagen que hasta el momento teníamos de aquello que llamamos espacio-tiempo.

Un fenómeno como la interacción nuclear puede ser 4-dimensional en un régimen (cuando los quarks se mueven muy rápido unos respecto a los otros), mientras que deviene 10-dimensional en el régimen opuesto (cuando los quarks se encuentran cerca y se mueven solidarios unos con los otros).

Una representación gráfica que permite entender mejor la naturaleza holográfica de la conjetura de Maldacena es la que brinda la figura 5.

FIG. 5



Representación esquemática del universo holográfico de la conjetura de Maldacena. En el interior del círculo hay una teoría cuántica de la gravedad, cuya descripción holográfica reside en la circunferencia que define la frontera. Alternativamente, si ponemos el foco en la frontera, cuando la teoría que vive allí está en el régimen no-perturbativo, su descripción más apropiada está dada en términos de una teoría de gravedad ordinaria que vive en el interior del espacio-tiempo 5-dimensional.

En ella no se incluye la 5-esfera y, a efectos de que se pueda representar en las dos dimensiones del papel, solo se muestra la dimensión holográfica (la dirección radial del círculo) y una de las cuatro que nuestra realidad sensorial percibe (la dirección angular). Podemos pensar que la física fundamental, la química y la biología, acontecen en el borde del círculo —que, insistimos, es 4-dimensional—, mientras que la dirección radial que nos lleva a su interior solo puede ser explorada por cuerdas con extremos en el borde, tal como aquellas responsables de mantener a la pareja quark-antiquark en el interior de los mesones, como se muestra en la figura, o por cuerdas cerradas que se aventuran hacia el interior de la geometría.

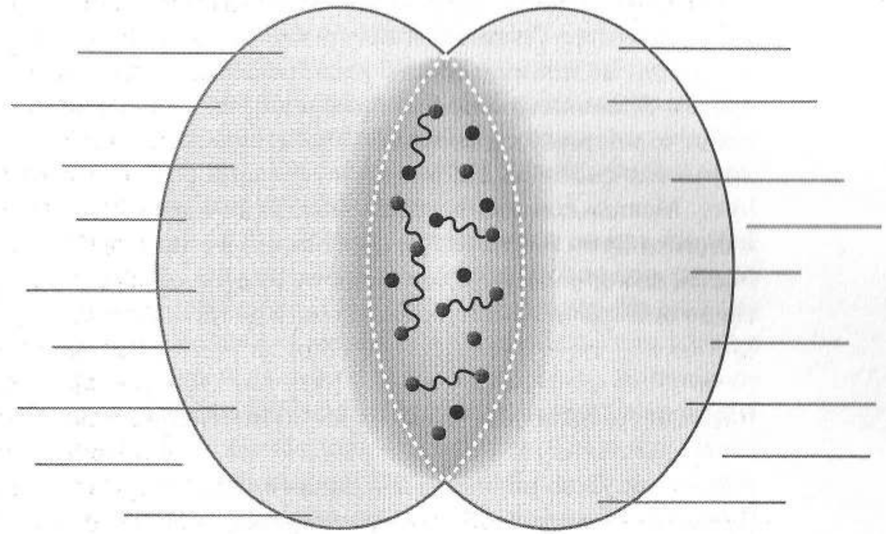
El uso fenomenológico de la conjetura de Maldacena ha proporcionado algunos resultados interesantes. Mencionaremos solo uno, a manera de ejemplo.

Si bien las teorías $n=4$ SYM y QCD encierran diferencias cualitativas, ambas se asemejan notablemente cuando entra en juego la temperatura. El ejemplo paradigmático de un sistema conformado por quarks y gluones a alta temperatura es el denominado «plasma de quarks y gluones», un estado de la materia que pudo ser generado experimentalmente en el año 2000 mediante la colisión muy energética de iones pesados (oro, en el caso del experimento estadounidense *RHIC* (*Relativistic Heavy Ion Collider*, ubicado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Upton, Nueva York), y plomo, en el más reciente experimento europeo, *Alice*, que se realiza utilizando las instalaciones del LHC). En estos experimentos se hacen chocar los núcleos de frente —cada uno de los cuales tiene unos 200 nucleones en su interior— que viajan prácticamente a la velocidad de la luz; así, en lugar de tener una colisión nucleón-nucleón, se tiene un choque colectivo en el que la energía depositada por los numerosos participantes es mucho mayor. Esto produce una pequeña región del espacio con forma de almendra —la razón es meramente geométrica (figura 6)— en la que la temperatura resulta casi un millón de veces la del núcleo del Sol; la misma que tuvo el universo cuando su edad rondaba la millonésima de segundo.

Semejante «caldera» pone a disposición de cada uno de los quarks y gluones que se encuentran allí una enorme cantidad de energía. La teoría QCD dictamina que los quarks y gluones se comportan como si estuvieran libres de toda interacción a energías «suficientemente» altas. La expectativa, pues, era observar en estos experimentos algo parecido a un plasma gaseoso de quarks y gluones que, tras la colisión, salieran despedidos en todas las direcciones por igual: si su interacción es nula o muy pequeña, cada partícula saldría en alguna dirección aleatoria, independiente de las demás, por lo que los detectores no registrarían indicios de la asimetría geométrica de la región de interacción desde la que partieron.

Lo que se observa en los experimentos dista mucho de esto. La asimetría persiste en los detectores, como si el plasma de

FIG. 6



Dos núcleos pesados que colisionan a muy altas energías (su forma se distorsiona por el fenómeno de contracción relativista a lo largo de la dirección del movimiento), lo hacen en una región con forma de almendra en la que se deposita la energía de la colisión. Los resultados experimentales indican que la colección de quarks y gluones en esa región, a muy alta temperatura, se comporta como un fluido de muy baja viscosidad.

quarks y gluones fuera más bien un líquido fuertemente interactuante y ¡de bajísima viscosidad! Al mismo tiempo que los físicos de partículas encontraban grandes dificultades para reproducir desde la teoría este extraño e inesperado comportamiento de la materia, Giuseppe Policastro, Dam Thanh Son y Andrei Starinets hicieron uso de la conjetura de Maldacena para acometerlo, amparados en el hecho de que a altas temperaturas las teorías $n=4$ SYM y QCD tienen unos cuantos parecidos, y el régimen no-perturbativo del problema justifica abordarlo dejando por un momento nuestro universo 4-dimensional para sumergirnos en la quinta dimensión holográfica. El valor que obtuvieron para la viscosidad era compatible con los resultados experimentales, y más tarde se demostró que tenía cierto grado de universalidad.

En la misma línea, la conjetura de Maldacena ha sido utilizada también con éxito razonable para describir otros sistemas fuertemente acoplados (es decir, en el régimen no-perturbativo); por ejemplo, en física del estado sólido o en sistemas de átomos fríos. Ha servido también para realizar valiosos aportes al cálculo de la entropía de entrelazamiento de diversos sistemas, cantidad relevante en el dominio de la llamada *teoría de la información cuántica*. Hablar sobre ello sería material para otro libro. Alcanza con señalar aquí, como frívolo pero contundente indicador de su relevancia y potencial, que el trabajo original de Maldacena es el más citado del que se tenga registro en la historia de la física de las interacciones fundamentales.

HACIA UNA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVITACIÓN

Pero la conjetura de Maldacena también sirve para describir los diferentes regímenes (incluyendo el cuántico) de la fuerza gravitatoria. En este sentido, sus aplicaciones a la teoría de los quarks podrían clasificarse como las de una poderosa herramienta conceptual y de cálculo, pero casi irrelevantes frente a la presunción de ser la portadora del primer marco teórico explícito en el que conviven la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica.

Una de las consecuencias casi inmediatas de la conjetura de Maldacena en el contexto de la interacción gravitacional tiene que ver con la paradoja de la información de los agujeros negros, formulada hace cuarenta años por Stephen Hawking. Si la dinámica cuántica de un agujero negro (al menos en un espacio-tiempo Anti-de Sitter) está descrita holográficamente por una teoría ordinaria en la frontera del espacio, tal como la ecuación AdS = CFT sugiere, y dado que la segunda de estas teorías se sabe perfectamente «unitaria» —es decir, que preserva la cantidad de información—, entonces también la primera deberá serlo. El proceso de evaporación de los agujeros negros, inexorablemente, deberá corresponder a un proceso unitario: lo que equivale a decir que la información atrapada en esos astros no se pierde sino que, de alguna manera abstrusa y no del todo comprendida, es preservada. El truco de recurrir a la descripción dual en la frontera y responder así a interrogantes que necesariamente conducen a la naturaleza cuántica que el espacio-tiempo alberga a escalas microscópicas —como la termodinámica de los agujeros negros— se ha convertido en una herramienta estándar. Nunca antes se dispuso de una propuesta tan concreta para una teoría cuántica de la gravedad. Tampoco se contaba con la posibilidad de utilizarla para poner a prueba aquellos aspectos conceptuales que resultan confusos.

La conjetura de Maldacena se ha convertido en una disciplina en sí misma. Su propio estatus conjetural hace que, por así decirlo, no esté totalmente claro cuál es su alcance. En los años recientes se ha ensayado extender el dominio de esta técnica a los más diversos rincones de la física, desde los sistemas de materia condensada similares a los que controlamos en los laboratorios hasta la cosmología del universo temprano, desde la superconductividad hasta el universo inflacionario. Los más conservadores podrían pensar que, de ser correcta, la conjetura solo se aplicaría al ejemplo brindado por las D3-branas que obtuvo inicialmente Maldacena. Sin embargo, dado que en ese ejemplo lo que subyace es la dualidad entre cuerdas abiertas y cerradas para describir un mismo sistema, parece razonable extender el rango de validez a cualquier conjunto de Dp-branas.

Esto es mucho más importante que un mero ejercicio académico, ya que es posible reproducir una fenomenología compatible con la de nuestro universo 4-dimensional utilizando configuraciones de Dp-branas de diversa dimensionalidad, a través de sus intersecciones y compactificaciones en las dimensiones extra —por ejemplo, una D5-brana enrollada en una esfera pequeña luce como una teoría en cuatro dimensiones a escalas mayores que el radio de la esfera—. Con estos escenarios se puede dar cuenta del modelo estándar y se desprenden genéricamente algunas consecuencias interesantes como la existencia de partículas de mayor masa que podrían ser encontradas en el LHC próximamente.

¿Qué lugar ocupará la teoría de cuerdas dentro de un siglo? Pocas dudas caben de que en las matemáticas persistirá su importancia e interés, habiéndose garantizado con numerosos resultados en campos como la topología y la geometría un sitio permanente en su bibliografía. En física la respuesta es algo más incierta. Michael Atiyah, uno de los matemáticos más importantes del siglo XX y cuyo trabajo se desarrolló siempre en la frontera entre ambas disciplinas, dice que «los matemáticos somos como los abogados: nuestro cliente puede ganar o perder, nosotros siempre ganamos».

Pero en una ciencia natural como la física no hay garantías. Es cierto que los más grandes físicos de finales del siglo XIX, incluyendo al padre de la teoría electromagnética, James Clerk Maxwell, dedicaron parte de su vida a entender la compleja dinámica del éter, para que pocos años después se demostrara su inexistencia y todo su formidable trabajo quedara en el olvido. Pero no lo es menos que las ideas de los sabios griegos Leucipo y Demócrito, tras quedar sepultadas por casi dos mil años, fueron reivindicadas por la ciencia. Hoy es imposible predecir si la teoría de cuerdas tendrá el destino del éter o del átomo. Sabrá comprender el lector que alberguemos una tímida y secreta esperanza de que acontezca lo segundo.

Se puede ponderar una teoría por las respuestas que brinda pero también por la calidad de los interrogantes que abre. Muchas de las preguntas que generó la teoría de cuerdas eran inimaginables antes de su formulación e impregnaron de valiosas ideas a las más diversas áreas de la física teórica. Si tuviéramos la certeza absoluta acerca de los caminos que debemos seguir para explorar lo desconocido, si la física no fuera un puzle de solución incierta, no lo llamaríamos investigación.

ALBERDI, A., *Los agujeros negros. Las fuerzas extremas de la gravedad*, Barcelona, RBA, 2015.
BORGES, J.L., *El aleph*, Madrid, Alianza, 1997.
DAVIES, P., *Supercuerdas: ¿una teoría de todo?*, Madrid, Alianza, 1990.
GREENE, B., *El universo elegante*, Barcelona, Editorial Crítica, 2006.
HAWKING, S., *Breve historia del tiempo*, Barcelona, Planeta-De Agostini, 1992.
NE'EMAN, Y. Y KIRSH, Y., *Los cazadores de partículas*, Barcelona, Gedisa Editorial, 2009.
RANDALL, L., *Universos ocultos. Un viaje a las dimensiones extras del cosmos*, Barcelona, Acantilado, 2011.
THORNE, K., *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Editorial Crítica, 2010.

Cuerdas y supercuerdas

Según la teoría de cuerdas, tanto los constituyentes fundamentales de la materia como las distintas formas de interacción entre ellos no son entes puntuales, tal como propone la física de partículas elementales, sino objetos unidimensionales infinitamente delgados denominados cuerdas. Las cuerdas no tienen espesor: no son «muy» delgadas sino «infinitamente» delgadas. No están constituidas de elementos aún más pequeños, sino que son el menor elemento que lo constituye todo, incluso a ellas mismas, que, libres de dividirse en más cuerdas, surcan el espacio en una danza que es composición de todo lo que vemos, y son, a su vez, la razón por la que lo vemos.

José Edelstein es profesor de Física Teórica en la Universidad de Santiago de Compostela.

Gastón Giribet es profesor de Física Teórica en la Universidad de Buenos Aires.

RBA