

Brian Greene

# El universo elegante

Supercuerdas, dimensiones ocultas  
y la búsqueda de una teoría final



DK

CRÍTICA

# El universo elegante

Supercuerdas, dimensiones ocultas  
y la búsqueda de una teoría final

**Brian Greene**

Traducción castellana de Mercedes García Garmilla

**CRÍTICA**  
BARCELONA

Primera edición en esta nueva presentación: octubre de 2001  
Primera edición: febrero de 2018

*El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original: THE ELEGANT UNIVERSE  
W.W. Norton, Nueva York

© Brian R. Greene, 1999

© de la traducción, Mercedes García Garmilla, 2001

© Editorial Planeta S. A., 2018  
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)  
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

[editorial@ed-critica.es](mailto:editorial@ed-critica.es)  
[www.ed-critica.es](http://www.ed-critica.es)

ISBN: 978-84-17067-67-0  
Depósito legal: B. 670 - 2018  
2018. Impreso y encuadernado en España

El papel utilizado para la impresión de este libro es 100% libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

## Atado con cuerdas

Hablar de una ocultación sería quizás demasiado drástico, pero, durante más de medio siglo —incluso en el preciso momento de alcanzar algunos de los mayores logros científicos de la historia— los físicos han sido conscientes con toda tranquilidad de la existencia de una oscura nube que surgía amenazadora en un horizonte lejano. El problema es el siguiente: existen dos pilares fundamentales en los que se apoya la física moderna. Uno es la relatividad general de Albert Einstein, que proporciona un marco teórico para la comprensión del universo a una escala máxima: estrellas, galaxias, cúmulos (o *clusters*) de galaxias, y aún más allá, hasta la inmensa expansión del propio universo. El otro pilar es la mecánica cuántica, que ofrece un marco teórico para la comprensión del universo a escalas mínimas: moléculas, átomos, y así hasta las partículas subatómicas, como los electrones y los quarks. A lo largo de años de investigación, los físicos han confirmado experimentalmente, con una exactitud casi inimaginable, la práctica totalidad de las predicciones que hace cada una de estas teorías. Sin embargo, estos mismos instrumentos teóricos conducen a otra conclusión inquietante: tal como se formulan actualmente, la relatividad general y la mecánica cuántica *no pueden ser ambas ciertas a la vez*. Las dos teorías en las que se basan los enormes avances realizados por la física durante los últimos cien años —unos avances que han explicado la expansión de los cielos y la estructura fundamental de la materia— son mutuamente incompatibles.

Si usted nunca ha oído previamente hablar de este feroz antagonismo, puede estar preguntándose por qué se produce. No es difícil encontrar la respuesta. Salvo en algunos casos muy especiales, los físicos estudian cosas que son o bien pequeñas y ligeras (como los átomos y sus partes constituyentes), o cosas que son enormes y pesadas (como las estrellas y las galaxias), pero no ambas a la vez. Esto significa que sólo necesitan utilizar la mecánica cuántica, o sólo la relatividad general, y pueden minimizar, con una mirada furtiva, la vociferante advertencia que les lanza la teoría que no están utilizando. Durante cincuenta años

este planteamiento no ha sido tan feliz como la ignorancia, pero ha estado muy cerca de serlo.

No obstante, el universo puede ser un caso extremo. En las profundidades centrales de un agujero negro se aplasta una enorme masa hasta reducirse a un tamaño minúsculo. En el momento del *big bang*, la totalidad del universo salió en erupción de una pepita microscópica cuyo tamaño hace que un grano de arena parezca gigantesco. Estos contextos son diminutos y, sin embargo, tienen una masa increíblemente grande, por lo que necesitan basarse tanto en la mecánica cuántica como en la relatividad general. Por ciertas razones que se irán aclarando cada vez más a medida que avancemos, las fórmulas de la relatividad general y las de la mecánica cuántica, cuando se combinan, empiezan a agitarse, a traquetear y a tener escapes de vapor como un automóvil viejo. Por decirlo menos figurativamente, hay en la física preguntas bien planteadas que ocasionan respuestas sin sentido a partir de la desafortunada amalgama de las dos teorías. Aunque se desee mantener el profundo interior de un agujero negro y el surgimiento inicial del universo envueltos en el misterio, no se puede evitar sentir que la hostilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general está clamando por un nivel más profundo de comprensión. ¿Puede ser realmente que el universo en su nivel más importante esté dividido, requiriendo un conjunto de leyes cuando las cosas son grandes, y otro conjunto diferente e incompatible cuando son pequeñas?

La teoría de las supercuerdas, una advenediza en comparación con los venerables edificios de la mecánica cuántica y la relatividad general, responde con un rotundo no. Una intensa investigación llevada a cabo durante la última década por físicos y matemáticos de todo el mundo ha revelado que este nuevo planteamiento, encaminado a explicar la materia en su nivel más básico, resuelve la tensión existente entre la relatividad general y la mecánica cuántica. De hecho, la teoría de las supercuerdas muestra aún más: dentro de este nuevo marco, la relatividad general y la mecánica cuántica *se necesitan la una a la otra* para que esta teoría tenga sentido. Según la teoría de las supercuerdas, el matrimonio entre las leyes de lo grande y las de lo pequeño no sólo es feliz, sino inevitable.

Esto es sólo una parte de las buenas noticias: porque, además, la teoría de las supercuerdas —abreviadamente, teoría de cuerdas— hace que esta unión avance dando un paso de gigante. Durante tres décadas, Einstein estuvo buscando una teoría unificada de la física, una teoría que entretrejera todas las fuerzas y todos los constituyentes materiales de la naturaleza dentro de un único tapiz teórico. Einstein no lo consiguió. Ahora, iniciado el nuevo milenio, los partidarios de la teoría de cuerdas anuncian que finalmente han salido a la luz los hilos de este escurridizo tapiz unificado. La teoría de cuerdas posee el po-

tencial de mostrar que todos los sorprendentes sucesos que se producen en el universo —desde la frenética danza de esas partículas subatómicas llamadas quarks, hasta el majestuoso vals de las estrellas binarias en sus órbitas; desde la bola de fuego inicial del *big bang*, hasta los elegantes remolinos de las galaxias celestes— son reflejos de un gran principio físico, de una ecuación magistral.

Dado que estas características de la teoría de cuerdas exigen que cambiemos drásticamente nuestra manera de entender el espacio, el tiempo y la materia, llevará cierto tiempo que nos adaptemos a ella hasta instalarnos en un nivel en el que resulte cómodo manejarla. No obstante, como se verá más adelante, vista en su propio contexto, la teoría de cuerdas emerge como un producto impresionante, pero natural, a partir de los descubrimientos revolucionarios que ha realizado la física durante los últimos cien años. De hecho, veremos que el conflicto existente entre la relatividad general y la mecánica cuántica no es realmente el primero, sino el tercero en una serie de conflictos decisivos con los que se tuvieron que enfrentar los científicos durante el siglo pasado, y que se han resuelto como consecuencia de una revisión radical de nuestro modo de comprender el universo.

### Los tres conflictos

El primero de estos conflictos, que ya se había detectado nada menos que a finales del siglo XIX, se refiere a las desconcertantes propiedades del movimiento de la luz. Dicho resumidamente, según las leyes del movimiento de Isaac Newton, si alguien pudiera correr a una velocidad suficientemente rápida podría emparejarse con un rayo de luz que se esté emitiendo, mientras que, según las leyes del electromagnetismo de James Clerk Maxwell, esto es imposible. Como veremos en el capítulo 2, Einstein resolvió este conflicto mediante su teoría de la relatividad especial y así le dio un vuelco completo a nuestro modo de entender el espacio y el tiempo. Según la relatividad especial, ya no se puede considerar al espacio y al tiempo como conceptos universales grabados en piedra y percibidos de forma idéntica por todos los individuos. El espacio y el tiempo surgieron, a partir de la reelaboración llevada a cabo por Einstein, como estructuras maleables cuya forma y modo de presentarse dependen del estado de movimiento del observador.

El desarrollo de la relatividad especial creó inmediatamente el escenario para el segundo conflicto. Una de las conclusiones del trabajo de Einstein es que ningún objeto —de hecho, ninguna influencia o perturbación de ninguna cla-

se— puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Sin embargo, como comentaremos en el capítulo 3, la teoría universal de la gravedad de Newton, que experimentalmente funciona tan bien y es tan grata para la intuición, habla de influencias que se transmiten en el espacio a grandes distancias *instantáneamente*. De nuevo fue Einstein quien intervino en el conflicto y lo resolvió ofreciendo un nuevo concepto de la gravedad en su teoría general de la relatividad de 1915. Del mismo modo que la relatividad especial trastocó los conceptos previos de espacio y tiempo, lo hizo la relatividad general. No es sólo que el espacio y el tiempo estén influidos por el estado de movimiento del observador, sino que, además, pueden alabearse y curvarse en respuesta a la presencia de materia o energía. Tales distorsiones en la estructura del espacio y el tiempo, como veremos más adelante, transmiten la fuerza de la gravedad de un lugar a otro. Por consiguiente, no se puede ya pensar que el espacio y el tiempo sean un telón de fondo inerte en el que se desarrollan los sucesos del universo; al contrario, según la relatividad especial y la relatividad general, son actores que desempeñan un papel íntimamente ligado al desarrollo de dichos sucesos.

Una vez más el modelo se repite: el descubrimiento de la relatividad general, aunque resuelve un conflicto, nos lleva a otro. A lo largo de tres décadas a partir de 1900, los físicos desarrollaron la mecánica cuántica (que se discute en el capítulo 4) en respuesta a varios problemas evidentes que se pusieron de manifiesto cuando los conceptos de la física del siglo XIX se aplicaron al mundo microscópico. Como hemos mencionado anteriormente, el tercer conflicto, el más trascendental, surge de la incompatibilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general. Como veremos en el capítulo 5, la forma geométrica ligeramente curvada del espacio, que aparece a partir de la relatividad general, es incompatible con el comportamiento microscópico irritante y frenético del universo que se deduce de la mecánica cuántica. Dado que hasta mediados de la década de 1980 no se presenta la solución que ofrecía la teoría de cuerdas, a dicho conflicto se le llama con toda razón el problema central de la física moderna. Además, la teoría de cuerdas, que se construye sobre la relatividad general y la relatividad especial, exige también una seria renovación de nuestros conceptos de espacio y tiempo. Por ejemplo, la mayoría de nosotros considera evidente que nuestro universo tenga tres dimensiones espaciales. Sin embargo, según la teoría de cuerdas esto no es así, ya que dicha teoría afirma que nuestro universo posee muchas más dimensiones que las que se perciben a simple vista —dimensiones que están arrolladas apretadamente dentro de la estructura plegada del cosmos. Estas notables características de la naturaleza del espacio y el tiempo son tan esenciales que las utilizaremos como línea directriz en todo el libro de ahora en adelante. En realidad, la teoría de cuerdas es la historia del espacio y el tiempo desde Einstein.

Para valorar lo que es realmente la teoría de cuerdas, necesitamos retroceder un paso y describir brevemente lo que hemos aprendido durante el último siglo sobre la estructura microscópica del universo.

### El universo en sus aspectos más pequeños: lo que sabemos sobre la materia

Los antiguos griegos suponían que la materia del universo estaba formada por diminutos componentes «indivisibles» que ellos llamaban *átomos*. Del mismo modo que el número de palabras posibles en un lenguaje alfabético está formado por el gran número de combinaciones de una pequeña cantidad de letras, los griegos intuyeron que la amplia variedad de objetos materiales podría también resultar de combinaciones hechas mediante un pequeño número de bloques elementales distintos. Fue una intuición presciente. Más de 2000 años después seguimos creyendo que esto es cierto, aunque la identidad de las unidades más fundamentales ha sido sometida a numerosas revisiones. En el siglo diecinueve, los científicos demostraron que muchas sustancias corrientes, como el oxígeno y el carbono, tenían un componente mínimo reconocible; siguiendo la tradición establecida por los griegos, lo llamaron *átomo*. El nombre permaneció, aunque la historia ha demostrado que era un nombre inapropiado, ya que los átomos son ciertamente «divisibles». A principios de la década de 1930, las obras colectivas de J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr y James Chadwick habían establecido la estructura del sistema solar como un modelo atómico que nos resulta conocido a la mayoría de nosotros. Lejos de ser el material constitutivo más elemental, los átomos están formados por un núcleo que contiene protones y neutrones, rodeado por un enjambre de electrones que describen órbitas alrededor de él.

Durante cierto tiempo muchos físicos pensaron que los protones, los neutrones y los electrones eran los «átomos» griegos. Pero, en 1968, los científicos que realizaban experimentos en el Stanford Linear Accelerator Center, valiéndose de una capacidad tecnológica cada vez mayor para comprobar las profundidades microscópicas de la materia, descubrieron que los protones y los neutrones no eran las partículas fundamentales. Demostraron que cada una de ellas estaba constituida por tres partículas menores, llamadas *quarks* —un nombre caprichoso que aparece en un pasaje de *Finnegan's Wake* de James Joyce y que fue adoptado por el físico teórico Murray Gell-Mann, quien previamente había intuido su existencia—. Los científicos que realizaron los experimentos confirmaron que los propios quarks existen en dos variedades, llamados, un poco me-



nos creativamente, *arriba (up)* y *abajo (down)*. Un protón está formado por dos quarks arriba y un quark abajo; un neutrón está formado por dos quarks abajo y un quark arriba.

Todo lo que vemos en la tierra y en el cielo resulta estar hecho de combinaciones de electrones, quarks arriba y quarks abajo. Ninguna evidencia experimental indica que alguna de estas tres partículas esté constituida por algo menor. Pero muchas pruebas indican que el propio universo posee otras partículas adicionales. A mediados de la década de 1950, Frederick Reines y Clyde Cowan encontraron pruebas experimentales concluyentes de la existencia de un cuarto tipo de partícula fundamental llamada *neutrino* —una partícula cuya existencia ya había predicho Wolfgang Pauli a principios de la década de 1930. Los neutrinos resultaron ser muy difíciles de encontrar porque son partículas fantasmas que rara vez interactúan con otro tipo de materia: un neutrino dotado de una energía media puede atravesar fácilmente muchos miles de billones de kilómetros de plomo sin que en su movimiento se produzca el más leve efecto. Esto puede tranquilizarle, ya que, mientras usted está leyendo esto, miles de millones de neutrinos lanzados al espacio por el Sol están atravesando su cuerpo y también la Tierra, como parte de su largo viaje a través del cosmos. A finales de la década de 1930, otra partícula llamada *muón* —idéntica a un electrón, salvo por ser 200 veces más pesada que éste— fue descubierta por unos físicos que estudiaban los rayos cósmicos (lluvias de partículas que bombardean la Tierra desde el espacio exterior). Dado que no había nada en el orden cósmico, ni tampoco un rompecabezas sin resolver, ni un nicho hecho a la medida que necesitara la existencia del muón, el físico de partículas galardonado con el Premio Nobel, Isidor Isaac Rabi, saludó el descubrimiento del muón diciendo con muy poco entusiasmo «¿Quién había pedido esto?». Sin embargo, ahí estaba. Y aún vendría más.

Utilizando una tecnología todavía más poderosa, los físicos han continuado juntando a golpes trozos de materia con una energía cada vez mayor, recreando en cada instante unas condiciones que no se habían dado desde el *big bang*. En los escombros resultantes han buscado nuevos componentes fundamentales, para añadirlos a la lista, cada vez más larga, de partículas. He aquí lo que han hallado: cuatro quarks más, llamados *encanto (charm)*, *extraño (strange)*, *fondo (bottom)* y *cima (top)*, y un pariente aún más pesado del electrón, al que se ha denominado *tau*, así como otras dos partículas con propiedades similares a las del neutrino, que se llaman *neutrino del muón* y *neutrino del tau*, para distinguirlas del neutrino original, que actualmente se denomina *neutrino del electrón*. Estas partículas se producen como resultado de colisiones a altas energías y tienen una existencia efímera; no son constituyentes que podamos

percibir en nuestro entorno habitual. Sin embargo, tampoco acaba aquí la historia. Cada una de estas partículas tiene como pareja una *antipartícula*, es decir, una partícula de masa idéntica pero que es opuesta a ella en algunos otros aspectos, como, por ejemplo, su carga eléctrica (así como sus cargas en relación con otras fuerzas de las que hablaremos más adelante). Por ejemplo, la antipartícula de un electrón se llama *positón*, y tiene exactamente la misma masa que un electrón, pero su carga eléctrica es  $+1$ , mientras que la carga eléctrica del electrón es  $-1$ . Cuando se ponen en contacto, la materia y la antimateria pueden aniquilarse mutuamente para producir energía pura; esta es la razón por la cual la existencia de la antimateria en el mundo que nos rodea es extremadamente poco natural.

Los físicos han observado entre estas partículas una pauta que se refleja en la tabla 1.1. Las partículas que constituyen la materia se clasifican en tres grupos que, a menudo, se denominan *familias*. Cada familia contiene dos quarks, un electrón o uno de sus parientes, y además una partícula de la especie de los neutrinos. El tipo de partícula correspondiente en las tres familias tiene propiedades idénticas, salvo en lo relativo a su masa, que se hace mayor a medida que pasamos de una familia a la siguiente. El resultado es que los físicos han comprobado ya la estructura de la materia hasta escalas de alrededor de una trillonésima de metro y han demostrado que *todo* lo que se ha encontrado hasta ahora —tanto si se encuentra en la naturaleza, como si se produce artificialmente en gigantescos aceleradores de partículas atómicas— consiste en una cierta combinación de partículas de estas tres familias y de sus parejas de antimateria.

Si echamos un vistazo a la Tabla 1.1, nos quedaremos, sin duda, con una fuerte sensación de perplejidad similar a la de Rabi cuando se descubrió el muón. El agrupamiento en familias produce al menos la impresión de algo ordenado, pero surgen innumerables preguntas que empiezan por «¿Por qué...?». ¿Por qué existen tantas partículas fundamentales, cuando parece que la gran mayoría de las cosas que se encuentran en el mundo que nos rodea sólo necesitan electrones, quarks arriba y quarks abajo? ¿Por qué hay tres familias? ¿Por qué no una familia o cuatro familias, o cualquier otro número? ¿Por qué tienen las partículas una variedad de masas aparentemente aleatoria? ¿Por qué, por ejemplo, el tau pesa alrededor de 3 520 veces lo que pesa un electrón? ¿Por qué el quark cima pesa cerca de 40 200 veces el peso de un quark arriba? Son unos números extraños, aparentemente aleatorios. ¿Son así por azar, por algún designio divino, o existe una explicación científica comprensible para estas características fundamentales de nuestro universo?

Familia 1		Familia 2		Familia 3	
<i>Partícula</i>	<i>Masa</i>	<i>Partícula</i>	<i>Masa</i>	<i>Partícula</i>	<i>Masa</i>
Electrón	0,00054	Muón	0,11	Tau	1,9
Neutrino del electrón	$< 10^{-8}$	Neutrino del muón	$< 0,0003$	Neutrino del tau	$< 0,033$
Quark arriba	0,0047	Quark encanto	1,6	Quark cima	189
Quark abajo	0,0074	Quark extraño	0,16	Quark fondo	5,2

**Tabla 1.1** Las tres familias de partículas fundamentales y sus masas (en múltiplos de la masa del protón). Los valores de las masas de los neutrinos no se han podido determinar experimentalmente hasta ahora.

### Las fuerzas o ¿dónde está el fotón?

Cuando tenemos en cuenta las fuerzas que actúan en la naturaleza, lo único que conseguimos es complicar las cosas aún más. El mundo que nos rodea está lleno de medios de ejercer influencia: las pelotas se pueden golpear mediante raquetas o palas, los aficionados al *bungee* se pueden lanzar hacia el suelo desde elevadas plataformas, los imanes pueden mantener a los trenes de alta velocidad sobre carriles metálicos, los contadores Geiger pueden sonar como respuesta a la presencia de material radioactivo, las bombas termonucleares pueden explotar. Se puede actuar sobre los objetos empujándolos, tirando de ellos o agitándolos vigorosamente; también lanzando o disparando otros objetos contra ellos; estirándolos, retorciéndolos o aplastándolos; congelándolos, calentándolos o quemándolos. Durante los últimos cien años, los físicos han acumulado un número de pruebas cada vez mayor de que todas estas interacciones entre objetos o materiales distintos, así como cualquiera de las interacciones que por millones y millones se observan a diario, se pueden reducir a combinaciones de cuatro fuerzas fundamentales. Una de éstas es la *fuerza de la gravedad*. Las otras tres son la *fuerza electromagnética*, la *fuerza nuclear débil* y la *fuerza nuclear fuerte*.

La fuerza de la gravedad es, de las tres, la que nos resulta más familiar. Es la responsable de que nos mantengamos en órbita alrededor del Sol, y también de que nuestros pies permanezcan firmemente plantados sobre el suelo. La masa de un objeto determina la medida de cuánta fuerza de la gravedad puede ejercer o soportar dicho objeto. A continuación, la más familiar para nosotros es la fuerza electromagnética. Es la fuerza que hace funcionar todas las comodidades de la vida moderna —iluminación, ordenadores, televisores, teléfonos— y subya-

ce al poder terrorífico de las tormentas con aparato eléctrico y al suave tacto de una mano humana. Microscópicamente, la carga eléctrica de una partícula desempeña la misma función en relación con la fuerza electromagnética que la que desempeña la masa en relación con la gravedad: determina la fuerza electromagnética que puede ejercer una partícula, o la fuerza con que puede responder electromagnéticamente esa partícula.

Las fuerzas denominadas, respectivamente, nuclear fuerte y nuclear débil nos resultan menos familiares, porque su magnitud disminuye rápidamente a escalas de distancias casi subatómicas; son las fuerzas nucleares. Ésta es también la razón por la que se descubrieron mucho más recientemente que las otras dos fuerzas. La fuerza nuclear fuerte es la responsable de que los quarks se mantengan «pegados» unos a otros dentro de los protones y los neutrones, y de que los propios protones y neutrones estén estrechamente apiñados dentro del núcleo del átomo. La fuerza nuclear débil se conoce sobre todo como la fuerza responsable de la desintegración radioactiva de sustancias como el uranio y el cobalto.

Durante el último siglo, los físicos han descubierto dos características comunes a todas estas fuerzas. En primer lugar, como veremos en el capítulo 5, a nivel microscópico todas las fuerzas tienen asociada una partícula que se puede considerar como el mínimo paquete o haz que puede formar la fuerza. Si se dispara un haz de rayos láser —una «escopeta de rayos electromagnéticos»— se está disparando un chorro de *fotones* que es el haz mínimo de fuerza electromagnética. De manera similar, los constituyentes más pequeños de los campos de la fuerza nuclear débil y de la fuerza nuclear fuerte son partículas llamadas *bosones gauge*\* asociados a la fuerza nuclear débil y *gluones*. (El nombre *gluón* es especialmente descriptivo: se puede pensar en los gluones considerándolos como el componente microscópico del fuerte pegamento (*glue*) que mantiene unidos los elementos de los núcleos de los átomos.) En 1984, los físicos que realizaban experimentos al respecto, ya habían establecido definitivamente la existencia y las propiedades detalladas de estos tres tipos de partículas de fuerza, reseñadas en la Tabla 1.2. Los físicos creen que la fuerza de la gravedad también tiene una partícula asociada —el gravitón— pero su existencia está aún pendiente de confirmarse experimentalmente.

\* N. de la t. : Los científicos no suelen traducir al castellano la palabra *gauge*. En los diferentes términos compuestos en que aparece, se podría traducir como «de calibre» o «de calibración».

<i>Fuerza</i>	<i>Partícula de fuerza</i>	<i>Masa</i>
Nuclear fuerte	Gluón	0
Electromagnética	Fotón	0
Nuclear débil	Bosones <i>gauge</i> asociados a la fuerza nuclear débil	86, 97
Gravedad	Gravitones	0

**Tabla 1.2** Las cuatro fuerzas de la naturaleza, junto con sus partículas de fuerza asociadas y las masas de éstas expresadas en múltiplos de la masa del protón. (Las partículas de la fuerza nuclear débil se presentan de forma variada con las dos masas posibles que figuran en la tabla. Los estudios teóricos realizados demuestran que el gravitón no podría tener masa.)

La segunda característica común a estas fuerzas es que, del mismo modo que la masa determina cómo afecta la gravedad a una partícula, y su carga eléctrica determina como le afecta la fuerza electromagnética, las partículas están provistas de ciertas cantidades de «carga fuerte» y «carga débil» que determinan cómo se verán afectadas dichas partículas por la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. (Estas propiedades se detallan en la tabla que aparece en las notas finales correspondientes a este capítulo.<sup>1</sup>) Sin embargo, al igual que sucede con las masas de las partículas, más allá del hecho de que los físicos experimentales han medido minuciosamente estas propiedades, nadie tiene una explicación de *por qué* nuestro universo está compuesto precisamente por esas partículas, con esas masas y cargas de fuerza tan peculiares.

A pesar de sus características comunes, el examen de las propias fuerzas fundamentales sólo sirve para plantear preguntas. Por ejemplo, ¿por qué son cuatro las fuerzas fundamentales? ¿Por qué no cinco, o tres, o quizás sólo una? ¿Por qué tienen estas fuerzas unas propiedades diferentes? ¿Por qué las fuerzas llamadas nuclear fuerte y nuclear débil se limitan a operar a escalas microscópicas, mientras que la fuerza de la gravedad y la electromagnética tienen un alcance ilimitado en su influencia? Y, ¿por qué existe una gama enorme en cuanto a la intensidad intrínseca de estas fuerzas?

Para valorar la última pregunta, imaginemos que sostenemos un electrón con la mano izquierda y otro en la derecha, y que aproximamos estas dos partículas de idéntica carga eléctrica intentando juntarlas. Su atracción gravitatoria mutua favorecerá que se acerquen, mientras que su fuerza de repulsión electromagnética intentará separarlas. ¿Cuál de estas dos fuerzas es más intensa? No hay discusión posible: la repulsión electromagnética es un millón de billones de billones de billones ( $10^{42}$ ) de veces más fuerte. Si el bíceps derecho representa la intensidad de la fuerza de la gravedad, entonces el bíceps izquierdo tendría

que ser tan grande que sobrepasara los límites del universo conocido para poder representar la intensidad de la fuerza electromagnética. La única razón por la que la fuerza electromagnética no aplasta completamente a la fuerza de la gravedad en el mundo que nos rodea es que la mayoría de las cosas están compuestas por una cantidad igual de cargas eléctricas positivas y negativas cuyas fuerzas se cancelan mutuamente. Por otra parte, ya que la gravedad siempre es una fuerza de atracción, no existen cancelaciones análogas —más materia significa una fuerza de la gravedad mayor—. Sin embargo, hablando de partículas fundamentales, se puede afirmar que la fuerza de la gravedad es en este contexto una fuerza extremadamente débil. (Un hecho que explica la dificultad para confirmar experimentalmente la existencia del gravitón. Buscar el haz más pequeño de la fuerza más débil es todo un desafío.) También hay experimentos que han demostrado que la fuerza nuclear fuerte es alrededor de cien veces más fuerte que la fuerza electromagnética y cerca de cien mil veces más fuerte que la fuerza nuclear débil. Pero, ¿dónde está el porqué —la razón de ser— de que nuestro universo tenga estas características?

Ésta no es una pregunta ligada a una actitud de filosofar inútilmente sobre cuál sería la causa de que ciertos detalles resulten ser de un modo en vez de ser de otro; el universo sería un lugar sumamente diferente si las propiedades de la materia y de las partículas de fuerza sufrieran algún cambio, aunque éste fuera muy moderado. Por ejemplo, la existencia de núcleos estables que forman los alrededores de cien elementos de la tabla periódica depende directamente de la proporción entre las magnitudes de la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética. Los protones que se apiñan juntos en los núcleos de los átomos se repelen todos ellos electromagnéticamente entre sí; la fuerza nuclear fuerte que actúa entre los quarks de que están formados, afortunadamente, logra vencer esta repulsión y ata los protones firmemente. Sin embargo, cualquier pequeño cambio en las intensidades relativas de estas dos fuerzas perturbaría fácilmente el equilibrio existente entre ellas y haría que se desintegraran la mayoría de los núcleos atómicos. Aún más, si la masa del electrón fuera unas pocas veces mayor de lo que es, los electrones y los protones tenderían a combinarse para formar neutrones, engullendo los núcleos de hidrógeno (el elemento más sencillo del cosmos, ya que su núcleo contiene un único protón) e impidiendo la producción de elementos más complejos. La existencia de las estrellas se basa en la fusión entre núcleos estables y no se formarían si se produjeran estas alteraciones en la física fundamental. La magnitud de la fuerza de la gravedad también desempeña un papel en la formación de las estrellas. La impresionante densidad de la materia en el núcleo central de una estrella potencia su horno nuclear y es la base de ese resplandor resultante, que es la luz estelar. Si la intensidad de la

fuerza de la gravedad aumentara, la masa estelar se uniría con más fuerza, causando un incremento significativo en la velocidad de las reacciones nucleares. Pero, del mismo modo que una bengala resplandeciente agota su combustible mucho más rápido que una vela que arde lentamente, un incremento en la velocidad de las reacciones nucleares haría que estrellas como el Sol se quemaran mucho más rápidamente, lo cual tendría, como ya sabemos, un efecto devastador en la formación de seres vivos. Por otra parte, si disminuyera significativamente la intensidad de la fuerza de la gravedad, la materia no se uniría formando bloques, con lo que se impediría la formación de estrellas y galaxias.

Podríamos seguir enumerando casos de este tipo, pero la idea ya ha quedado clara: el universo es como es porque las partículas de la materia y de las fuerzas tienen las propiedades que tienen. Ahora bien, ¿es esto una explicación científica de *por qué* tienen estas propiedades?

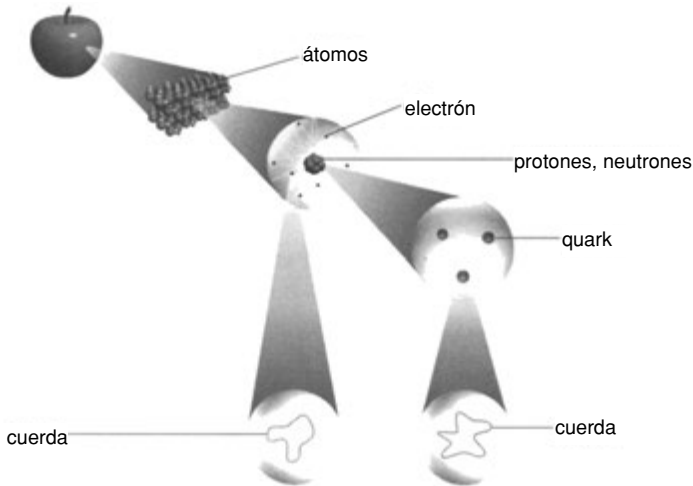
### Teoría de cuerdas: el concepto básico

La teoría de cuerdas ofrece un paradigma conceptual poderoso mediante el cual, por primera vez, ha surgido un marco en el que contestar a estas preguntas. En primer lugar, veamos cual es el concepto básico.

Las partículas que aparecen en la Tabla 1.1 son las «letras» de todo tipo de materia. Igual que sus colegas lingüísticas, parecen no tener otras subestructuras internas. La teoría de cuerdas afirma otra cosa. Según esta teoría, si pudiéramos examinar estas partículas con una precisión aún mayor —una precisión que estuviera en muchos grados de magnitud más allá de nuestra capacidad tecnológica actual— descubriríamos que ninguna es como un punto, sino que cada una de ellas está formada por un diminuto *bucle* unidimensional. Cada partícula contiene un filamento que vibra, oscila y baila como un elástico de goma infinitamente delgado que los físicos han denominado *cuerda*, porque no tienen el talento literario de Gell-Mann. En la figura 1.1 expresamos gráficamente este concepto esencial de la teoría de cuerdas, comenzando con un trozo de materia corriente, una manzana, y ampliando repetidas veces su estructura hasta poder ver los componentes que la forman a escalas cada vez menores. La teoría de cuerdas añade la nueva categoría microscópica del bucle vibrador, que continúa la progresión conocida con anterioridad, es decir, la que va desde los átomos, a través de los protones, neutrones, electrones y quarks.<sup>2</sup>

Aunque no es de ninguna manera obvio, veremos en el capítulo 6 que esta simple sustitución de los componentes materiales de la partícula puntual por cuerdas resuelve la incompatibilidad existente entre la mecánica cuántica y la

relatividad general. Así, la teoría de cuerdas desenmaraña el nudo gordiano central de la física teórica contemporánea. Esto es un logro enorme, pero sin embargo sólo es parte de la razón por la cual la teoría de cuerdas ha generado tanta expectación.



**Figura 1.1** La materia está compuesta por átomos, que a su vez están hechos de quarks y electrones. Según la teoría de cuerdas, todas estas partículas son en realidad diminutos bucles de cuerdas vibrantes.

### La teoría de cuerdas como la teoría unificada de todo

En la época de Einstein, no se habían descubierto aún la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil, pero él opinaba que la existencia de dos fuerzas distintas —la de la gravedad y la electromagnética— era profundamente preocupante. Einstein no aceptaba que la naturaleza se basara en un modelo tan extravagante. Esta opinión puso en marcha su viaje de treinta años en búsqueda de la denominada teoría unificada de campos, de la cual esperaba como resultado la demostración de que estas dos fuerzas fueran en realidad manifestaciones de un único gran principio en el que ambas se basaran. Esta búsqueda quijotesca aisló a Einstein de la corriente principal de la física, que, comprensiblemente, estaba más interesada en profundizar en el marco de la mecánica cuántica, que había surgido recientemente. A principios de la década de 1940 escribía a un



amigo: «Me he convertido en un tipo viejo y solitario que es conocido principalmente por no usar calcetines y al que se exhibe como una curiosidad en ocasiones especiales.»<sup>3</sup>

Lo que sucedía era que Einstein, sencillamente, se anticipaba a su época. Más de un siglo después, su sueño de una teoría unificada se ha convertido en el Santo Grial de la física moderna. Una parte considerable de la comunidad física y matemática está cada vez más convencida de que la teoría de cuerdas puede proporcionarnos la respuesta. A partir de un principio —en su nivel más microscópico, todo consiste en combinaciones de hilos vibradores— la teoría de cuerdas aporta un único marco explicativo capaz de abarcar todas las fuerzas y toda la materia.

La teoría de cuerdas afirma, por ejemplo, que las propiedades que se han observado en las partículas, los datos recogidos en las tablas 1.1 y 1.2, son un reflejo de los distintos modos en que una cuerda puede vibrar. Del mismo modo que las cuerdas de un violín o de un piano tienen unas frecuencias de resonancia predilectas a la hora de vibrar —pautas que nuestros oídos perciben como las diversas notas musicales y sus armónicos más altos— así sucede con los bucles de la teoría de cuerdas. Sin embargo, ya veremos que, en vez de producir notas musicales, cada una de las pautas o modelos de vibración preferidos de una cuerda dentro de la teoría de cuerdas se presenta como una partícula cuyas cargas de fuerza y de masa están determinadas por el modelo de oscilación de la cuerda. El electrón es una cuerda que vibra de un modo, el quark alto es otra que vibra de otro modo, y así en general. Lejos de ser una colección de hechos experimentales, las propiedades de las partículas dentro de la teoría de cuerdas son la manifestación de una única característica física: los resonantes modelos de vibración —es decir, la música— de los bucles de cuerda fundamentales. La misma idea es asimismo aplicable a las fuerzas de la naturaleza. Veremos que las partículas de fuerza también están asociadas con modelos específicos de vibración de cuerdas y por tanto todo, toda la materia y todas las fuerzas, está unificado bajo la misma rúbrica de oscilaciones microscópicas de cuerdas, es decir, las «notas» que las cuerdas pueden producir.

En consecuencia, por primera vez en la historia de la física disponemos de un marco en el que se puede explicar cualquiera de las características fundamentales sobre las que está construido el universo. Por esta razón, se dice a veces sobre la teoría de cuerdas que puede ser la «teoría para todo» (*theory of everything*: T.O.E.\*) o la teoría «última» o «final». Estas expresiones descripti-

\* N. de la t. : Estas siglas se prestan a un juego de palabras en inglés, ya que *toe* significa «dedo del pie» o «punta del pie», es decir, lo último de una extremidad del cuerpo.

vas grandiosas pretenden dar a entender que se trata de la más profunda de las teorías posibles dentro de la física —una teoría que es la base de todas las demás, que no requiere, o ni siquiera permite, una base explicativa más profunda. En la práctica, muchos expertos en teoría de cuerdas adoptan un planteamiento más cercano a la realidad y piensan en una T.O.E. con el sentido más limitado de una teoría que pueda explicar las propiedades de las partículas fundamentales y las propiedades de las fuerzas mediante las cuales dichas partículas interactúan unas con otras y ejercen influencias mutuas. Un reduccionista inquebrantable afirmaría que esto no es en absoluto una limitación y que, en principio, absolutamente todo, desde el *big bang* hasta las ensoñaciones, se puede describir en términos de procesos físicos microscópicos subyacentes en los que participan los componentes fundamentales de la materia. Si se comprende todo sobre los componentes, afirma el reduccionista, se comprende cualquier cosa.

La filosofía reduccionista suscita fácilmente un ardiente debate. Muchos piensan que es fatuo y totalmente repugnante afirmar que las maravillas de la vida y del universo sean meros reflejos de unas partículas microscópicas implicadas en una danza sin sentido totalmente coreografiada por las leyes de la física. ¿Es realmente posible que los sentimientos de alegría, pena o aburrimiento no sean más que unas reacciones químicas que tienen lugar en el cerebro, unas reacciones entre moléculas y átomos que, yendo a un nivel aún más microscópico, son reacciones entre algunas de las partículas que figuran en la tabla 1.1, las cuales en realidad no son sino unas cuerdas vibrantes? En respuesta a esta línea de argumentación, veamos las advertencias del premio Nobel Steven Weinberg en *Dreams of a Final Theory*,

En el otro extremo del espectro se encuentran los contrarios al reduccionismo que están horrorizados por lo que consideran la frialdad de la ciencia moderna. En la medida en que ellos y su mundo puedan verse de alguna forma reducidos a una cuestión de partículas o campos y sus interacciones, sienten que esa forma de conocimiento les hace quedar disminuidos... No intentaría responder a esas críticas con un discurso enérgico sobre la belleza de la ciencia moderna. La manera de ver el mundo de un reduccionista es fría e impersonal. Ha de aceptarse tal como es, no porque nos guste, sino porque ese es el modo en que funciona el mundo.<sup>4</sup>

Algunos están de acuerdo con este tajante punto de vista, pero otros no.

Otros han intentado argumentar que planteamientos tales como la teoría del caos nos dicen que, a medida que el nivel de complejidad de un sistema aumenta, entran en juego nuevos tipos de leyes. Entender el comportamiento de un electrón o un quark es una cosa; utilizar este conocimiento para comprender el comportamiento de un tornado es otra muy diferente. La mayoría está de acuerdo con

este aspecto. Sin embargo, las opiniones divergen con respecto a si los fenómenos diversos y a veces inesperados que pueden darse en sistemas más complejos que las partículas individuales son realmente representativos del funcionamiento de los nuevos principios físicos, o si los principios implicados son algo derivado y están basados, aunque sea de un modo terriblemente complicado, en los principios físicos que gobiernan el ingente número de componentes elementales. Mi opinión personal es que no representan ninguna ley física nueva e independiente. A pesar de que sería difícil explicar las propiedades de un tornado aplicando la física de los electrones y los quarks, creo que esto es una cuestión de dificultad en los cálculos, no un indicador de la necesidad de leyes físicas nuevas. Pero, insisto, hay algunos que no están de acuerdo con este punto de vista.

Lo que está en gran medida más allá de toda cuestión y es de primordial importancia para el viaje que se describe en este libro es que, incluso si se acepta el discutible razonamiento del reduccionista inquebrantable, los principios son una cosa y la práctica otra. Casi todo el mundo está de acuerdo en que el hallazgo de la T.O.E. no significaría de modo alguno que la psicología, la biología, la geología, la química, e incluso la física, hubieran resuelto sus problemas o, en cierto sentido, los hubieran incluido en un planteamiento especial. El universo es un lugar tan maravillosamente rico y complejo que el descubrimiento de la teoría final, en el sentido en que lo planteamos aquí, no supondría el fin de la ciencia. Más bien al contrario: el hallazgo de la T.O.E. —la explicación última del universo a su nivel más microscópico, una teoría que no estaría basada en ninguna explicación más profunda— nos aportaría el fundamento más firme sobre el que se podría *construir* nuestra comprensión del mundo. Su descubrimiento marcaría un principio, no un final. La teoría última proporcionaría para siempre un pilar inmutable de coherencia, garantizándonos que el universo es un lugar comprensible.

### El estado actual de la teoría de cuerdas

La preocupación principal de este libro es explicar el funcionamiento de los distintos procesos del universo según la teoría de cuerdas, poniendo un énfasis especial en las implicaciones que esta teoría tiene para nuestra comprensión del espacio y el tiempo. A diferencia de otras muchas explicaciones sobre teorías científicas, la que se ofrece aquí no se refiere a una teoría que haya sido desarrollada de forma completa, confirmada por comprobaciones experimentales rigurosas y totalmente aceptada por la comunidad científica. La razón de esto es, como ya comentaremos en capítulos posteriores, que la teoría de cuerdas es una

estructura teórica tan profunda y complicada que, incluso con los considerables progresos que ha realizado durante las últimas dos décadas, aún nos queda un largo camino antes de que podamos afirmar que hemos logrado dominarla completamente.

Por lo tanto, hay que considerar la teoría de cuerdas como un trabajo que se está realizando y cuyos logros parciales ya han revelado unas asombrosas ideas sobre la naturaleza del espacio, el tiempo y la materia. La armoniosa combinación de la relatividad general y la mecánica cuántica es un éxito importante. Además, a diferencia de lo que sucedía con cualquiera de las teorías anteriores, la teoría de cuerdas tiene la capacidad de responder a cuestiones primordiales que tienen relación con las fuerzas y los componentes más fundamentales de la naturaleza. Igualmente importante, aunque algo más difícil de expresar es la notable elegancia tanto de las respuestas que propone la teoría de cuerdas, como del marco en que se generan dichas respuestas. Por ejemplo, en la teoría de cuerdas muchos aspectos de la naturaleza que podrían parecer detalles técnicos arbitrarios —como el número de partículas fundamentales distintas y sus propiedades respectivas— surgen a partir de aspectos esenciales y tangibles de la geometría del universo. Si la teoría de cuerdas es correcta, la estructura microscópica de nuestro universo es un laberinto multidimensional ricamente entrelazado, dentro del cual las cuerdas del universo se retuercen y vibran en un movimiento infinito, marcando el ritmo de las leyes del cosmos. Lejos de ser unos detalles accidentales, las propiedades de los bloques básicos que construyen la naturaleza están profundamente entrelazadas con la estructura del espacio y el tiempo.

Sin embargo, en un análisis final, se puede decir que nada sustituye las predicciones definitivas y comprobables que podrán determinar si la teoría de cuerdas ha levantado realmente el velo de misterio que impedía ver las verdades más profundas del universo. Puede que tenga que pasar un tiempo hasta que nuestro nivel de comprensión haya profundizado lo suficiente para alcanzar este objetivo, aunque, como veremos en el capítulo 9, durante los próximos diez años, más o menos, las pruebas experimentales podrían proporcionar un sólido fundamento circunstancial para la teoría de cuerdas. Además, en el capítulo 13 veremos que la teoría de cuerdas ha resuelto recientemente un problema primordial relativo a los agujeros negros, asociado con la llamada entropía de Bekenstein-Hawking, que se había resistido pertinazmente durante más de veinticinco años a ser solucionada con medios más convencionales. Este éxito ha convencido a muchos de que la teoría de cuerdas está en el camino correcto para proporcionarnos la comprensión más profunda posible sobre el modo en que funciona el universo.

Edward Witten, uno de los pioneros y más relevantes expertos en teoría de cuerdas, resume la situación diciendo que «la teoría de cuerdas es una parte de la física del siglo XXI que, por azar, cayó en el siglo XX», una valoración que fue realizada primero por el famoso físico italiano Daniele Amati.<sup>5</sup> Así pues, en cierto modo, es como si a nuestros antepasados de finales del siglo diecinueve se les hubiera puesto delante un superordenador de última generación con el correspondiente manual de instrucciones. Mediante tanteos llenos de inventiva, habrían llegado a ser evidentes ciertos indicios del poder del superordenador, pero obtener una auténtica maestría les habría costado un esfuerzo vigoroso y prolongado. Esos indicios del potencial del ordenador, como lo que nosotros vislumbramos del poder explicativo de la teoría de cuerdas, habrían aportado una motivación extraordinariamente fuerte para lograr un completo manejo. Actualmente, una motivación similar está aportando energía a toda una generación de físicos teóricos para intentar conseguir una comprensión analítica completa y precisa de la teoría de cuerdas.

La observación de Witten y las de otros expertos en el mismo campo indican que podrían transcurrir décadas e incluso siglos antes de que la teoría de cuerdas se desarrolle y se comprenda de una manera completa. Esto puede ser realmente cierto. De hecho, las matemáticas de la teoría de cuerdas son tan complicadas que, hasta ahora, nadie conoce ni siquiera las ecuaciones de las fórmulas exactas de esta teoría. Lo que sí es cierto es que los físicos conocen únicamente unas aproximaciones de dichas ecuaciones, e incluso estas ecuaciones aproximadas resultan ser tan complicadas que hasta la fecha sólo se han resuelto parcialmente. Sin embargo, un inspirador conjunto de avances realizados en la década de 1990 —avances que han dado respuesta a cuestiones teóricas de una dificultad hasta ahora inimaginable— puede muy probablemente indicar que la comprensión cuantitativa completa de la teoría de cuerdas está mucho más cerca de lo que se pensaba inicialmente. Repartidos por todo el mundo hay físicos que están desarrollando técnicas nuevas y poderosas encaminadas a trascender los numerosos métodos aproximados que se han utilizado hasta ahora, y lo hacen colectivamente a una velocidad estimulante, uniendo elementos dispares del rompecabezas que es la teoría de cuerdas.

Sorprendentemente, estos avances están aportando nuevas posiciones ventajosas para reinterpretar algunos de los aspectos básicos de esta teoría que han estado sin respuesta durante cierto tiempo. Por ejemplo, una pregunta inmediata que puede haberse planteado el lector al observar la Figura 1.1 es ¿por qué cuerdas? ¿Por qué no pequeños discos de jugar al Frisbee\*? ¿O unas pepitas

\* N. de la T.: Juego en el que se utiliza un disco ligero de plástico en forma de plato que se lanzan unos jugadores a otros. *Frisbee* es una marca registrada.

como gotas microscópicas? ¿O una combinación de todas estas posibilidades? Como veremos en el capítulo 12, las ideas más recientes muestran que estos u otros tipos de componentes *sí* que tienen un papel importante en la teoría de cuerdas, y han revelado que dicha teoría es en realidad parte de una síntesis aún mayor, llamada actualmente (y por alguna razón misteriosa) teoría M. Estos últimos avances serán el tema de los últimos capítulos del libro.

Los adelantos científicos vienen por rachas. Algunos períodos están repletos de grandes avances, mientras que en otras épocas los investigadores sufren una especie de sequía. Los científicos plantean sus resultados, tanto teóricos como prácticos. A continuación, la comunidad científica debate sobre dichos resultados, que a veces son descartados, otras veces se modifican, y en ocasiones estos logros proporcionan un trampolín inspirador para llegar a un modo nuevo y más preciso de comprender el universo físico. En otras palabras, la ciencia camina por un sendero zigzagueante hacia lo que esperamos que será la verdad última, un camino que empezó con los primeros intentos de la humanidad por comprender el misterio del cosmos y cuyo final no podemos predecir. No sabemos si la teoría de cuerdas es una parada circunstancial en ese camino, un hito crucial o, de hecho, ese destino final que no conocemos. Sin embargo, las últimas dos décadas de investigación llevada a cabo por cientos de físicos y matemáticos de numerosos países nos han proporcionado una bien fundada esperanza de que estamos en un tramo acertado y posiblemente final.

El hecho de que nuestro actual nivel de conocimientos nos haya permitido obtener nuevas perspectivas impactantes en relación con el funcionamiento del universo es un testamento revelador de la rica naturaleza de la teoría de cuerdas y de su largo alcance. En lo que aquí sigue, el hilo central estará constituido por aquellos logros que lleven hacia adelante la revolución en nuestra comprensión del espacio y el tiempo, iniciada ya por las teorías especial y general de la relatividad de Einstein. Veremos que, si la teoría de cuerdas es correcta, la estructura de nuestro universo tiene propiedades que probablemente habrían deslumbrado incluso a Einstein.