

Cuerdas y branas: ¿de qué está hecho nuestro universo?



A pesar de los avances logrados para describir la estructura de nuestro universo, resulta necesario entenderlo en términos aún más básicos. La teoría de cuerdas supone una propuesta en vías de ser completada, unificada y consistente.

Alberto Güijosa

CURIOSIDAD SIN LÍMITES

A lo largo de nuestra historia los seres humanos, curiosos por naturaleza, hemos buscado entender el asombrosamente complejo universo que nos rodea. Quizá lo más sorprendente de todo es que, en esta búsqueda, hemos sido altamente exitosos: en los siglos más recientes nos hemos acercado enormemente a comprender la composición de nuestro universo y la historia de su evolución, así como nuestro propio origen y lugar en él. Hemos descubierto que, detrás de su majestuosa complejidad, se esconden unos cuantos componentes básicos, sujetos a principios relativamente sencillos que aun nuestras débiles mentes pueden aspirar a comprender.

¿De qué está hecho entonces nuestro universo? La materia ordinaria está compuesta de átomos, los cuales, a su vez, están formados

por sólo tres componentes básicos: electrones girando alrededor de un núcleo compuesto de neutrones y protones. Estos últimos resultan estar hechos de partículas más pequeñas llamadas quarks: el neutrón está formado por un quark de tipo *arriba* y dos quarks *abajo*; el protón, por un quark *abajo* y dos *arriba*. Hasta donde sabemos, estos quarks y el electrón no están compuestos de partes más pequeñas; nos referimos por tanto a ellos (y a otras partículas que mencionaremos más adelante) como partículas *elementales* o *fundamentales*.

Vale la pena tratar de visualizar lo pequeñas que son estas partículas. Un átomo típico mide alrededor de una diezmilmillonésima de metro. Su componente mayor, el núcleo, es diez mil veces más pequeño, y por tanto ocupa apenas una billonésima parte del volumen total del átomo. ¡Así que cualquier objeto de nuestra vida cotidiana, por más sólido que nos resulte, es principalmente espacio vacío! Los protones y neutrones son unas diez veces más chicos que el núcleo. Los quarks y el electrón son por lo menos cien veces más pequeños todavía; es decir, miden a lo más una cienmilbillonésima de metro. En otras palabras, aun si los átomos fueran del tamaño de la Tierra, ¡las

partículas fundamentales serían más pequeñas que un balón de fútbol! Los microscopios que usamos para explorar estas distancias tan pequeñas se llaman aceleradores de partículas: en ellos arrojamos unas partículas contra otras a enormes velocidades y observamos los resultados de la colisión.

Estos ladrillos básicos interactúan entre sí a través de diversas fuerzas o interacciones fundamentales. En nuestra vida diaria nos encontramos en todo momento con dos de estas fuerzas. Por ejemplo, la Tierra nos atrae hacia abajo por medio de la fuerza de gravedad; pero afortunadamente el piso se interpone en el camino e impide que caigamos al centro de la Tierra: nos sostiene empujándonos hacia arriba con una fuerza que es de origen electromagnético. Y tienes en este momento otro ejemplo a la vista, literalmente: la luz con la que estás leyendo este texto es una interacción electromagnética entre las partículas de esta página y las de tus ojos.



NUESTRO LENGUAJE BÁSICO

El lenguaje que hemos tenido que desarrollar para describir con precisión a las partículas elementales y sus interacciones incorpora los principios básicos de las teorías que llamamos *relatividad especial* y *mecánica cuántica*. Estos principios resumen propiedades muy interesantes de nuestro universo que van extrañamente en contra del sentido común. Destacaremos aquí sólo dos de las ideas principales. La primera es que, sorprendentemente, el tiempo no es tan distinto del espacio como parece. De hecho, la diferencia entre ambos es hasta cierto punto análoga a la diferencia entre la dirección que queda a nuestra izquierda y aquella que está frente a nosotros. Sabemos que, simplemente con girar, podemos transformar gradualmente la una en la otra. De manera similar, resulta posible en cierta medida *convertir* progresivamente tiempo en espacio y viceversa, ¡y para ello basta simplemente con cambiar de velocidad! Para que este efecto sea notorio es necesario que el cambio en velocidad sea comparable con la velocidad de la luz (300 mil kilómetros por segundo), cosa que resulta difícil para nosotros, pero relativamente fácil de lograr para una partícula elemental. En los aceleradores de partículas, por ejemplo, podemos corroborar diariamente este efecto. Para reflejar esta conexión, hablamos no del espacio y el tiempo por separado, sino del *espaciotiempo*.

La luz con la que estás leyendo este texto es una interacción electromagnética entre las partículas de esta página y las de tus ojos

La segunda idea es que, a pesar de que los objetos macroscópicos que vemos a nuestro alrededor están compuestos por partículas elementales, el comportamiento de éstas últimas es radicalmente distinto a lo que estamos acostumbrados. Por ejemplo, una partícula puede en un momento dado estar, como una canica, en un lugar específico; pero en cierto sentido, ¡también puede estar en varios sitios a la vez! Debido a ello, al describirla nos vemos limitados a hablar sólo de las distintas probabilidades de que se encuentre en cada lugar posible. Esto resulta ser cierto no sólo para la posición de la partícula, sino también para otros de sus atributos. Este extraño comportamiento de las partículas subatómicas está de hecho detrás del funcionamiento de los aparatos electrónicos, y más importante aún, es la razón por la cual la materia es estable: si las partículas obedecieran las mismas reglas que nos resultan familiares para los objetos macroscópicos, ¡los electrones en los átomos caerían todos encima del núcleo que los atrae, en un tiempo extremadamente corto!

Sabemos que dos electrones se repelen electromagnéticamente debido a que poseen cargas eléctricas del mismo signo

Llamamos *teoría cuántica de campos* al lenguaje que incorpora todos estos principios. En este lenguaje existe un campo asociado a cada partícula (por ejemplo, el electrón) que se extiende por todo el espacio; la partícula es básicamente una onda pequeña en este campo (vagamente análoga a una onda en la superficie de una alberca). A la inversa, a cada uno de los campos que asociamos a las fuerzas fundamentales (por ejemplo, el campo electromagnético) le corresponde una partícula (en este caso, el fotón, es decir, una partícula de luz), que actúa como mediadora o portadora de la fuerza en cuestión. En estos términos se obtiene una descripción bastante intuitiva de las interacciones. Por ejemplo, sabemos que dos electrones se repelen electromagnéticamente debido a que poseen cargas eléctricas del mismo signo. Desde el punto de vista microscópico, la repulsión es resultado del intercambio de fotones entre los dos electrones. De hecho, hay una multitud de procesos que pueden contribuir a esta repulsión, y la probabilidad total de que ocurra se obtiene sumando las contribuciones individuales de todos los procesos posibles.

La posibilidad más sencilla es que uno de los dos electrones emita de pronto un fotón, y el otro electrón lo absorba, como se muestra en la figura 1. Una posibilidad más complicada, también indicada en la figura, es que el fotón emitido por el primer electrón se convierta de pronto en, por ejemplo, un tercer electrón y un antielectrón, que más tarde vuelven a juntarse para convertirse en un nuevo fotón, el cual finalmente es absorbido por el segundo electrón.

He aquí otra predicción importante de la teoría de campos, ampliamente confirmada por los experimentos: por cada partícula existe una correspondiente antipartícula, que es simplemente otra partícula con la misma masa pero con las cargas (por ejemplo, carga eléctrica) opuestas. La antipartícula del electrón, también llamada *positrón*, es tan real que se utiliza en la técnica para tomar imágenes del interior del cuerpo humano, conocida como tomografía por emisión de positrones.

La descripción de las interacciones que acabamos de reseñar está asociada a un método de cálculo que permite hacer predicciones cuantitativas para las probabilidades de diversos procesos con base en un conjunto de reglas sencillas. En particular, en el ejemplo anterior, la probabilidad de que un electrón emita o absorba un fotón (o de que un fotón se convierta en un par electrón-antielectrón, o viceversa) está controlada básicamente por el cuadrado de la carga del electrón, que resulta ser aproximadamente $1/100$. La pequeñez de este número refleja el hecho de que los electrones interactúan débilmente, lo cual

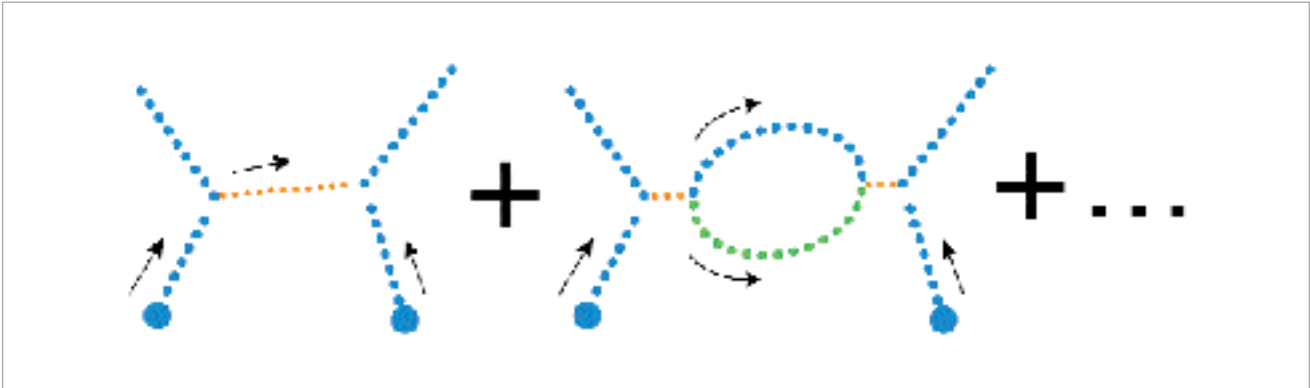


Figura 1. Dos de las maneras en que un par de electrones pueden interactuar entre sí. En el primer proceso, los electrones (en azul) siguen las respectivas trayectorias punteadas y de pronto el electrón de la izquierda emite un fotón (en naranja), que es absorbido después por el electrón de la derecha. En el segundo proceso, el fotón emitido se convierte en un tercer electrón y un antielectrón (en verde), que luego se vuelven a juntar para dar lugar a un nuevo fotón, el cual es absorbido finalmente por el electrón de la derecha. Existe una infinidad de procesos aún más complicados, y todas las posibilidades contribuyen a la probabilidad total de interacción.

facilita enormemente nuestros cálculos. La probabilidad de que ocurra el proceso más sencillo descrito arriba, donde un solo fotón se emite y se absorbe, es proporcional a $1/100 \times 1/100 = 1/10000$; pero la probabilidad del siguiente proceso, donde además aparece y desaparece un par electrón-antielectrón, es unas diez mil veces más pequeña, puesto que es proporcional a $(1/100)^4$. Los procesos más y más complejos son cada vez menos y menos probables, de manera que la probabilidad total (que es más o menos la suma de las probabilidades individuales) se puede aproximar bien tomando en cuenta sólo unos cuantos procesos relativamente simples. Si por el contrario, estuviéramos considerando partículas que interactúan fuertemente (donde en vez de $1/100$ tuviéramos un número mayor o igual a 1), los procesos más y más complejos serían más y más importantes, y perderíamos por completo no sólo nuestro método de cálculo sino también nuestra descripción intuitiva del proceso de interacción.

Un punto muy curioso es que, al calcular la probabilidad del segundo proceso posible (y de los que siguen), en primera instancia no obtenemos un resultado pequeño, ¡sino infinito! Esto está relacionado con el hecho de que el par electrón-antielectrón puede aparecer y desaparecer en cualquier lugar del espacio y cualquier instante del tiempo, por lo cual debemos incluir todas las posibilidades. El infinito viene del caso en el que el par se crea y se destruye en el mismo lugar y al mismo tiempo. Por supuesto, ¡una probabilidad infinita no tiene sentido! La cura para este resultado absurdo se deriva de lo que ya hemos

La probabilidad de que ocurra el proceso más sencillo descrito arriba, donde un solo fotón se emite y se absorbe, es proporcional a $1/100 \times 1/100 = 1/10000$

Todo lo que sabemos
con seguridad respecto
a la composición
microscópica
de nuestro universo
se conoce con el modesto
nombre de *modelo estándar*

aprendido: un electrón puede emitir y luego él mismo absorber un fotón, el cual a su vez se puede descomponer o no en un par electrón-antielectrón, etc. Pero entonces, ¿lo que llamamos electrón es en realidad una combinación de todas estas posibilidades! En otras palabras, lo que sería un electrón aislado se encuentra rodeado de una especie de nube de fotones y otras partículas que continuamente aparecen y desaparecen. Y, mágicamente, al tomar en cuenta que esta nube también contribuye a la masa y la carga del electrón que medimos experimentalmente, desaparecen todos los infinitos.

EL MODELO ESTÁNDAR

La teoría de campo específica que resume todo lo que sabemos con seguridad respecto a la composición microscópica de nuestro universo se conoce con el modesto nombre de *modelo estándar*. Propone que existen doce ladrillos básicos: seis quarks y seis leptones (más las doce

antipartículas correspondientes). Los primeros tienen nombres curiosos: *arriba* y *abajo* (que ya habíamos mencionado), *encanto* y *extraño*, *cima* y *fondo*. Los *leptones* incluyen a nuestro viejo conocido, el electrón, así como al neutrino electrónico, el muón y el neutrino muónico, el tauón y el neutrino tauónico. Estas doce partículas son todas *fermiones*, lo cual quiere decir que se comportan de una manera altamente antisocial: tienen prohibido hacer lo mismo al mismo tiempo.

Como vimos desde el principio, para explicar la composición de la materia que vemos a nuestro alrededor basta con tener los primeros dos quarks (*arriba* y *abajo*) y los primeros dos leptones (el electrón y su neutrino). Resulta muy curioso entonces que en la naturaleza existan también las otras ocho partículas, cuyas propiedades son una copia de las primeras cuatro, con la única diferencia de que son más pesadas. Todavía no entendemos por qué existen precisamente estas tres familias de cuatro partículas elementales cada una.

En el modelo estándar existen dos fuerzas fundamentales. Una es el electromagnetismo, cuya partícula portadora es, como ya dijimos, el fotón. Si recordamos que el núcleo de un átomo está formado por neutrones y protones, y que los primeros son neutros pero los segundos tienen carga eléctrica positiva, resulta claro que, para vencer la repulsión electromagnética entre los protones y mantener el núcleo unido, debe existir otra fuerza. Le llamamos *interacción fuerte*, precisamente porque a distancias muy pequeñas es más intensa que el electromagnetismo. Su origen microscópico es el intercambio entre los quarks de ocho partículas mediadoras, que llamamos *gluones* (¡aunque quizás un mejor nombre en español hubiera sido *pegamoides!*).

Existe también una tercera fuerza, llamada *interacción débil*, que es en particular responsable de algunos procesos de radiactividad. Son tres las partículas que la portan; se les conoce simplemente como W^+ , W^- y Z^0 . Una de éstas interviene, por ejemplo, en el decaimiento del neutrón. Si bien los neutrones pueden vivir indefinidamente como componentes de algunos núcleos, un neutrón aislado, curiosamente, desaparece al cabo de un impredecible lapso de tiempo (en promedio, unos quince minutos), dejando en su lugar un protón, un electrón y un antineutrino electrónico. Inicialmente se pensó que esto significaba que el neutrón está compuesto de, precisamente, estos tres componentes; pero en la concepción moderna esto no es así. Sabemos ahora que una partícula puede simplemente convertirse en otras (siempre obedeciendo ciertas reglas específicas) sin que esto implique necesariamente que se está partiendo en sus componentes. En el caso del neutrón (compuesto de dos

quarks abajo y uno arriba), su proceso de conversión en un protón (hecho de un quark *abajo* y dos *arriba*) implica la transmutación de un quark *abajo* en un quark *arriba*. Para lograr esto, el quark abajo debe emitir una de las partículas portadoras de la interacción débil, un W^- , el cual a su vez se convierte en un electrón y un antineutrino. Las doce partículas mediadoras de fuerzas son *bosones*, es decir que, al contrario de los fermiones, tienen un comportamiento altamente social: prefieren hacer lo mismo al mismo tiempo.

La razón por la cual dijimos que en el modelo estándar hay dos interacciones fundamentales, a pesar de que mencionamos ya tres, es que desde hace unos treinta años entendimos que el electromagnetismo y la fuerza débil son en realidad dos distintas manifestaciones de una sola interacción básica, que llamamos *fuerza electrodébil*. Esto es un ejemplo de lo que llamamos *unificación de interacciones*. Un ejemplo descubierto mucho antes se encuentra implícito en el nombre *electromagnetismo*: sabemos desde el siglo diecinueve que las fuerzas eléctricas y magnéticas están íntimamente relacionadas y son de hecho dos caras de una misma moneda.

El modelo estándar ha sido increíblemente exitoso: sus predicciones han sido verificadas con una muy alta precisión en miles de experimentos. A pesar de ello, sabemos desde ahora que no puede ser la última palabra, puesto que presenta varias limitaciones. En primer lugar, desearíamos poder entender nuestro universo con menos de doce ladrillos básicos (¿será posible que exista en realidad sólo uno?), o con una mayor unificación de fuerzas (¿podrán ser las interacciones fuerte y electrodébil dos caras de la misma moneda?), o pudiendo explicar los diversos patrones y números pequeños que actualmente conocemos, pero no entendemos (por ejemplo, ¿por qué existen tres familias de fermiones?; o, ¿por qué el electrón es tres mil quinientas veces más ligero que su segunda copia, el tauón?). Por supuesto que, en última instancia, éstos no son más que buenos deseos: no existe ninguna garantía de que la estructura fundamental de nuestro universo sea aún más sencilla de lo que hasta ahora hemos descubierto. Pero los seres humanos somos ambiciosos, así que intentamos seguir adelante con nuestra búsqueda de simplicidad. Después de todo, hasta ahora esta estrategia nos ha funcionado de maravilla.

Existen otras limitaciones del modelo estándar que son mucho más importantes. En particular, hemos descubierto en los últimos años que la materia ordinaria constituye sólo un 5 por ciento del universo. Sorprendentemente, a pesar de lo mucho que hemos avanzado, no sabemos a ciencia cierta qué es el 95

No existe ninguna garantía
de que la estructura
fundamental de nuestro
universo sea aún más sencilla
de lo que hasta ahora
hemos descubierto.
Pero los seres humanos
somos ambiciosos,
así que intentamos seguir
adelante con nuestra
búsqueda de simplicidad

por ciento restante. Un 20 por ciento es lo que llamamos “materia oscura”. Sabemos que está ahí porque las galaxias giran demasiado rápido como para mantenerse unidas sólo por la atracción gravitacional de la materia ordinaria (estrellas y nebulosas) que detectamos en ellas. Pero no sabemos de qué está compuesta. Ese 75 por ciento restante tiene que ver con uno de los descubrimientos más sorprendentes de los últimos tiempos. Desde hace cuarenta años sabemos que a lo largo de su historia nuestro universo se ha ido agrandando, y por tanto las galaxias se alejan unas de otras. Dado que las galaxias se atraen gravitacionalmente, durante mucho tiempo supusimos que esta expansión debiera estarse frenando. Pero, hace apenas seis años, ¡descubrimos que la expansión se está acelerando! A la responsable de esta aceleración, quien quiera que sea, le llamamos *energía oscura*, y en la época actual resulta ser la componente dominante (75 por ciento) de nuestro universo.

Desde hace cuarenta años
sabemos que a lo largo
de su historia nuestro
universo se ha ido
agrandando, y por tanto
las galaxias se alejan
unas de otras

Pero la más notoria de todas las limitaciones del modelo estándar es que ¡no describe a la gravedad! A nivel macroscópico, la gravitación se describe a través de la llamada relatividad general. En esta descripción, una masa grande deforma apreciablemente el espacio y el tiempo a su alrededor, y es esta deformación la que afecta a las otras masas en su vecindad. Así que la Tierra, por ejemplo, gira alrededor del Sol simplemente porque está tratando de viajar tan recto como le es posible en el espaciotiempo curvado por el Sol. La relatividad general describe correctamente el comportamiento de planetas, estrellas, galaxias, e incluso del universo en su conjunto. Pero lo que no tenemos aún es una buena descripción de la gravedad a nivel microscópico.

La dificultad aquí tiene al menos dos facetas. Por una parte, se trata de un problema técnico. Si suponemos que la relatividad general sigue siendo válida para distancias arbitrariamente pequeñas, podemos tratar de aplicarle los mismos métodos que sirvieron para las otras fuerzas, entendiendo a la gravedad como resultado del intercambio de bosones mediadores que llamaríamos *gravitones*. El intercambio de un solo gravitón da los resultados esperados; para procesos más complicados se encuentran, como en el caso de las otras interacciones, resultados infinitos. El problema es que, en el caso de la gravitación, estos infinitos no se pueden hacer desaparecer, así que la descripción no tiene sentido. Tenemos entonces dos opciones: tratar de modificar nuestra descripción de la gravedad a distancias pequeñas de tal manera que los métodos habituales funcionen, o buscar nuevos métodos que funcionen para la relatividad general sin modificaciones.

Por otra parte, la búsqueda de una descripción microscópica de la gravedad es un problema conceptual bastante profundo. El punto central es que, como ya dijimos, la fuerza de gravedad, a diferencia de las otras interacciones, tiene que ver con la curvatura del propio espaciotiempo. De manera análoga al caso de las partículas, al describir el espaciotiempo a nivel microscópico nos vemos limitados entonces a hablar de la probabilidad de que esté curvado de tal o cual forma. ¡Y necesitamos entonces comprender qué queremos decir cuando hablamos de partículas que se mueven en un espacio tan indeciso!

MÁS ALLÁ DE LO CONOCIDO: ¿TODO CON CUERDA?

Hemos visto entonces que, a pesar de los impresionantes logros del modelo estándar, resulta necesario entender nuestro universo en términos aún más básicos. Son varios los caminos que

se han intentado seguir para lograrlo, pero durante los últimos veinte años ha surgido uno en particular que quizás pueda resolver muchas de las interrogantes. Este camino está basado en una idea muy sencilla: proponer que las partículas elementales en realidad no son, como las imaginamos normalmente, *puntitos* sin estructura interna alguna, sino *curvitas*. Les llamamos entonces *cuerdas* en lugar de partículas; las podemos visualizar como trozos de hilo extremadamente delgados, que pueden tener extremos o estar cerrados sobre sí mismos, como una liga. De entrada, consideraremos sólo esta segunda posibilidad; pero nos encontraremos con la primera más adelante.

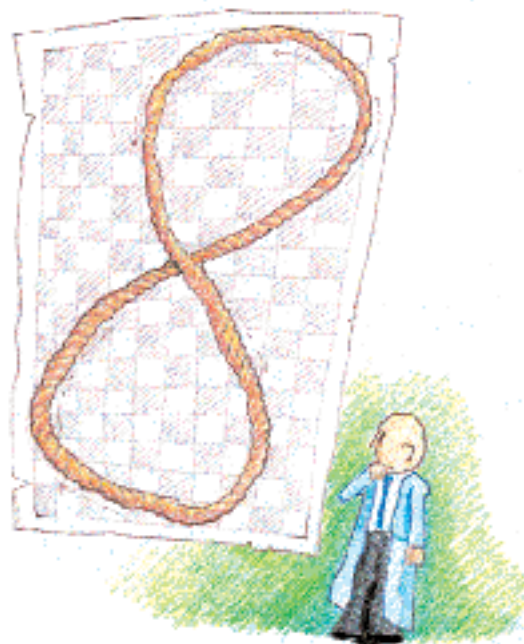
Estas cuerdas deben ser muy pequeñas, pues de otra manera nos habríamos dado cuenta ya de que el electrón, por ejemplo, no es un punto. De hecho, durante muchos años se pensó que la única manera en que no habríamos visto aún las cuerdas como tales es si fueran extraordinariamente pequeñas: ¡unas cien millones de billones de veces más chicas que un protón (10^{-35} metros)! Pero en años recientes se ha considerado seriamente una posibilidad distinta, en la cual las cuerdas podrían ser tan grandes como una centésima del tamaño del protón, en cuyo caso estarían a punto de ser descubiertas experimentalmente, en los aceleradores de partículas que actualmente están en etapa de construcción.

¿Qué ganaríamos con esta sencilla modificación, el paso de partículas a cuerdas? La diferencia crucial es que un punto no puede hacer nada más que moverse; pero una cuerda puede además oscilar de diferentes maneras, justo como una cuerda de violín o de guitarra. Y resulta que, cuando una cuerda oscila de una manera específica (vibrando con una cierta *nota*), parece una partícula con propiedades específicas. De esta manera lograríamos interpretar las diferentes partículas que conocemos como distintas manifestaciones de un solo objeto básico, una cuerda.

Sorprendentemente, al estudiar las maneras en que la cuerda puede oscilar, se encuentra que una de ellas le confiere justo las propiedades de un gravitón; algunas más hacen que se comporte como los otros bosones portadores de fuerzas (el fotón, los gluones, etcétera), y otras más dan lugar a fermiones (como los quarks y los leptones). ¡Precisamente los ingredientes que necesitamos! En otras palabras, si la cuerda oscila de cierta manera, entonces nosotros, desde lejos, como somos incapaces de discernir que se trata realmente de una cuerda, vemos un electrón. Pero si la misma cuerda oscila de otra manera, entonces vemos un fotón, o un quark, etcétera. De modo que, si esta propuesta es correcta, ¡nuestro universo entero está hecho sólo de cuerdas!

Más aún, en esta propuesta habría una sola interacción: el único proceso posible es que una cuerda se deforme para formar una especie de figura ocho, y luego se parta en dos (o viceversa: que dos cuerdas se junten y formen una sola). Dependiendo de los estados de vibración en que se encuentren la cuerda inicial y las dos cuerdas finales, esta única interacción puede reproducir a la interacción gravitacional, fuerte o electrodébil. Como en el caso de, por ejemplo, la interacción electromagnética, existe un número que controla la intensidad de las interacciones entre las cuerdas (es decir, la probabilidad de que una cuerda se parta en dos) y nuestra descripción está bajo control sólo si este número es mucho más pequeño que 1.

Así que, a partir de una cuerda, ¡podemos obtener la relatividad general y, en cierto sentido, el modelo estándar! Esta propuesta, conocida como teoría de cuerdas, nos da entonces una posible descripción completa, unificada y consistente de la estructura fundamental de



nuestro universo. Cada adjetivo en la oración anterior está cargado de significado: la descripción es apenas *posible* porque falta todavía confirmar su validez experimentalmente; sería *completa* ya que por primera vez se incluye a la gravedad; es *unificada* porque hay un solo componente básico y una sola fuerza fundamental; y es *consistente*, a diferencia de los intentos anteriores de entender la gravitación a nivel microscópico. Este último punto en particular implica en realidad una restricción enorme. Uno se pudiera imaginar que en la búsqueda de una teoría unificada, y a falta de evidencia experimental directa, uno podría escribir prácticamente cualquier cosa. Pero no es en absoluto así: resulta de hecho extremadamente difícil desarrollar una teoría que siquiera se asemeje a lo que conocemos acerca de nuestro universo, y que a la vez no dé lugar a contradicciones internas o predicciones carentes de sentido.

De hecho, lo que obtenemos no es exactamente la relatividad general, sino algo que coincide con ella en las distancias en las cuales sabemos que funciona, pero difiere a distancias tan pequeñas como las cuerdas, justo de la manera necesaria para que los métodos

Así que, con la teoría de cuerdas, podríamos finalmente entender la gravedad a nivel microscópico

que habíamos aplicado ya con éxito a las otras fuerzas funcionen también en este caso. De manera similar, de las cuerdas quisiéramos obtener el modelo estándar con algunas correcciones que sólo fueran apreciables a distancias comparables con el tamaño de las cuerdas; pero ésta es una meta que sólo se ha alcanzado parcialmente.

Para tratar de precisar el sentido en el cual a partir de la teoría de cuerdas se obtiene el modelo estándar, nos conviene trazar una analogía entre éste último y un pastel. El modelo estándar es la lista de ingredientes básicos de nuestro universo, en cantidades y con propiedades específicas, y con un conjunto de reglas precisas respecto a cómo estos ingredientes pueden combinarse entre sí. De igual manera, para preparar un pastel específico nos hace falta una lista de ingredientes (harina, huevos, leche, chocolate) y una receta, en donde se especifiquen las cantidades deseadas de cada ingrediente (760 gramos de harina, 3 huevos, 2 tazas de leche y 200 gramos de chocolate) y la manera de combinarlos.

A partir de la teoría de cuerdas, lo que obtenemos es una larga lista de posibles ingredientes (harina, huevos, leche, chocolate, fresas, canela,...) y muchas posibles recetas—; es decir, la posibilidad de preparar muy diversos pasteles. El que los ingredientes deseados figuren en nuestra lista ya de por sí es un avance importante, puesto que, a diferencia del modelo estándar, aquí suponemos para empezar que existe un solo componente básico, la cuerda. En cuanto a las recetas, la gran mayoría de ellas dan lugar a pasteles que no se parecen en absoluto al del modelo estándar; pero unas cuantas son casi lo que buscamos: utilizan justo los ingrediente correctos, pero no están completamente de acuerdo en las cantidades; o fallan quizás por el tiempo de horneado; o tienen alguna falta de ortografía en las letras del betún... Queda por verse si entre todos los pasteles posibles, hay al menos uno que coincida exactamente con el del modelo estándar. Los que hemos revisado hasta el momento sólo llegan a tener un enorme parecido, lo cual, hay que decirlo, no es poca cosa. Y a partir de cuerdas obtenemos también algo más: ¡la gravedad, que equivale a las velas para el pastel!

La gravedad indudablemente existe, así que más nos vale poder describirla; ¡ciertamente sin las velas del pastel no podremos cantar *Las mañanitas*! Con las cuerdas obtenemos justo lo que no podemos con las partículas: una descripción de la atracción gravitacional entre, por ejemplo, dos electrones (es decir, cuerdas vibrando en una cierta nota), en términos de intercambios de gravitones (que serían simplemente otras cuerdas, vibrando en una nota diferente). Y, sorprendentemente, ¡en esta

descripción no encontramos en ningún momento resultados infinitos! Así que, con la teoría de cuerdas, podríamos finalmente entender la gravedad a nivel microscópico. Para ser más precisos, lo que entenderíamos sería la atracción gravitacional entre unas cuantas partículas que interactúan débilmente. Lo que hemos dicho hasta ahora no bastaría para entender interacciones gravitacionales fuertes, que corresponden a deformaciones significativas del espaciotiempo. Volveremos a este punto más adelante.

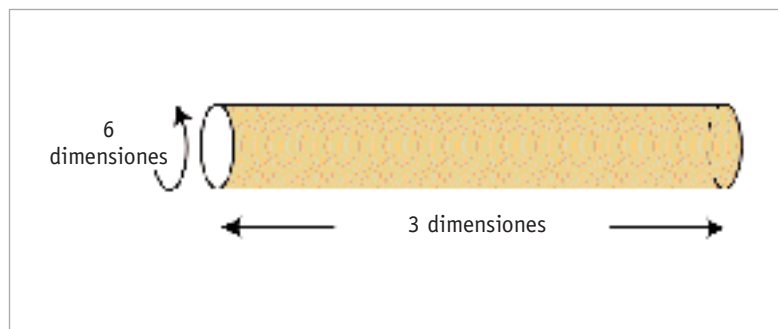
Como dijimos antes, la consistencia de una teoría que incluye a la gravedad resulta ser un requisito enormemente restrictivo. Al ver los detalles, se encuentra que, para ser consistente, una teoría de cuerdas debe satisfacer en particular dos requisitos. En primer lugar, debe ser supersimétrica. En términos prácticos, esto simplemente quiere decir que por cada bosón que conocemos, debe existir también un fermión con propiedades estrechamente relacionadas, y viceversa. Independientemente de la teoría de cuerdas, muchos físicos teóricos consideran que la supersimetría es una propiedad muy atractiva, y quizás contamos incluso con evidencia indirecta de su existencia. La búsqueda de las *superparejas* de las partículas conocidas está planeada como una de las principales tareas de los aceleradores de partículas que se están construyendo en la actualidad.

En segundo lugar, una teoría de cuerdas consistente predice que el universo debe tener nueve dimensiones espaciales, es decir, seis más de las tres que conocemos (arriba-abajo, izquierda-derecha, frente-detrás). Ésta es, de hecho, la primera vez que una teoría física conduce a una predicción sobre el número de dimensiones; ¡pero lo que parece descorazonador es que la predicción sea el triple del número esperado! Ante esto, la pregunta que debemos plantearnos es: ¿es en realidad posible que nuestro universo tenga dimensiones adicionales que hasta ahora no hemos descubierto? Sorprendentemente, ¡la respuesta es que sí! En particular, no habríamos notado la existencia de dimensiones que fueran suficientemente pequeñas. Para visualizar esto, imaginémosnos que una de las dimensiones conocidas, digamos arriba-abajo, es en realidad un gigantesco círculo. Es decir, consideremos la muy real posibilidad de que pudiéramos circunnavegar el universo (justo como Magallanes le dio la vuelta a la Tierra): partiendo de la Tierra en una nave espacial (¡con mucho combustible!) dirigida

hacia arriba y manteniendo siempre nuestro curso, ¡eventualmente regresaríamos a la Tierra por la dirección opuesta! Imaginémosnos ahora que vamos encogiendo ese círculo, hasta llegar al tamaño de una persona. Si lo achicamos aún más tendríamos por supuesto que acortarnos nosotros también, para caber en él. Si hacemos el círculo tan pequeño como un átomo, entonces hasta el siglo veinte hubiéramos jurado que nuestro universo tiene sólo dos dimensiones. Y si lo hacemos más chico que las distancias que hemos explorado hasta ahora, ¡no lo hubiéramos detectado aún!

Ésta es entonces la propuesta tradicional de la teoría de cuerdas (hablaremos de otra posibilidad más adelante), resumida en la figura 2: que nuestro universo es análogo a la superficie de una manguera, con tres dimensiones muy

Figura 2. Dimensiones ocultas. Además de las tres dimensiones enormes que conocemos, nuestro universo pudiera tener seis dimensiones adicionales extremadamente pequeñas, que no hubieran sido aún detectadas. En la ilustración, nuestro universo sería solo la *superficie* (en café) del cilindro; el interior y exterior del cilindro no significan nada.



grandes (por lo menos diez mil millones de años luz, es decir, 10^{26} metros) y seis dimensiones tan pequeñas como las mismas cuerdas (10^{-35} metros). Esto, de hecho, no es tan descabellado como parece, porque sabemos que a lo largo de la historia de nuestro universo las tres dimensiones que conocemos se han ido agrandando, y hace unos quince mil millones de años eran también extremadamente pequeñas. Lo que habría que entender entonces es por qué las otras seis dimensiones no se agrandaron.

Los requisitos de consistencia son tan restrictivos que hasta 1994 se habían encontrado solamente cinco teorías de cuerdas consistentes

(todas supersimétricas y con nueve dimensiones espaciales). Les llamamos I, IIA, IIB, HO y HE; difieren en varias de sus propiedades físicas. Por ejemplo, solamente en la teoría I las cuerdas cerradas se pueden abrir; las otras cuatro teorías tienen sólo cuerdas permanentemente cerradas. Otro ejemplo es el hecho de que en la teoría IIA la derecha es intercambiable con la izquierda, pero en las otras cuatro teorías hay una diferencia entre ambas (como de hecho la hay en nuestro universo, cosa que descubrimos apenas hace cincuenta años). Hasta 1994 entendíamos estas teorías sólo en situaciones donde las cuerdas interactúan débilmente.

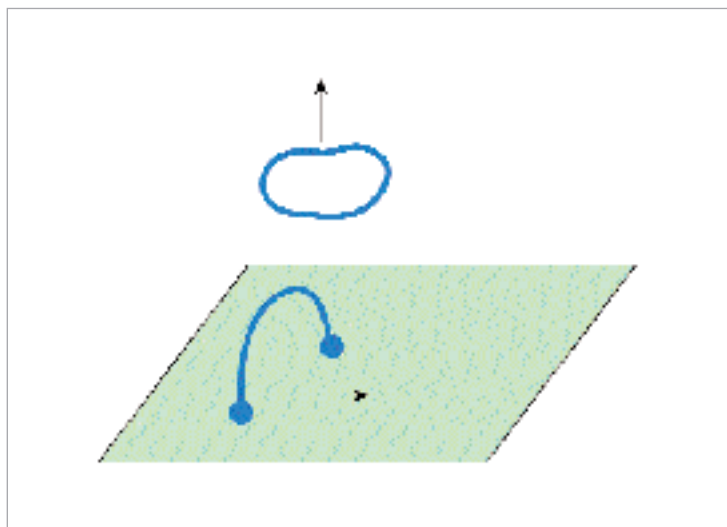
Y...

El panorama ha cambiado radicalmente en los últimos diez años, principalmente en dos aspectos. Primero, hemos descubierto que en las cinco teorías existen objetos que no son cuerdas, llamados genéricamente *branas* (el nombre provino de generalizar *membranas*). Una *cero-brana* es un objeto con cero dimensiones, es decir, una partícula. Una *uno-brana* tiene una dimensión: es una cuerda (por supuesto, cada pedazo de la cuerda se puede mover en las nueve dimensiones que tendría el espacio; pero caminando sobre la cuerda, en sí sólo tenemos una opción para decidir hacia dónde ir). Una *dos-brana* tiene dos dimensiones, como una hoja infinitesimalmente delgada: es una membrana. Y así sucesivamente.

Éste es por cierto otro ejemplo del hecho de que no podemos simplemente poner o quitar cosas en estas teorías a nuestro antojo: nos guste o no, estos objetos están ahí. En cada teoría de cuerdas existen de hecho branas de varios tipos. Un tipo

que ha resultado particularmente importante en los avances de los años recientes son las llamadas *D-branas* (las hay con varias dimensionalidades, dependiendo de la teoría). Éstas tienen una propiedad muy curiosa: lejos de ellas, las cuerdas sólo pueden estar cerradas, pero si una cuerda se acerca a una D-brana puede abrirse, siempre y cuando sus extremos queden atorados en la brana. Las cuerdas abiertas, entonces, únicamente pueden existir cuando hay D-branas presentes, y están restringidas a deslizarse sólo a lo largo de estas últimas, a diferencia de las cuerdas cerradas, que pueden moverse por donde les dé la gana. Esta diferencia se resume en la figura 3.

Figura 3. Cuerdas y D-branas. Dentro de la teoría de cuerdas hemos encontrado otros objetos, llamados *branas*, extendidos en un número de dimensiones que va desde cero hasta nueve. En la ilustración se muestra una "D-brana" (en verde), junto con una cuerda cerrada y otra abierta (ambas en azul). Las cuerdas cerradas pueden existir independientemente de las D-branas, y siempre son libres de moverse por todo el espacio. Las cuerdas abiertas, en cambio, siempre deben terminar en una D-brana, y están restringidas por tanto a moverse sólo a lo largo de las dimensiones en las que la D-brana se extiende. Como se explica más adelante en el texto, esto da lugar a una segunda manera de esconder las dimensiones adicionales, conocida como "mundo brana".



Ahora bien, como ya dijimos, al analizar las posibles notas con que pueden vibrar las cuerdas cerradas siempre se encuentra que una de ellas corresponde a un gravitón. Esto significa que en una teoría de cuerdas, la gravitación siempre se propaga, como las cuerdas cerradas, en tantas dimensiones como tenga el espacio. Pero entre las notas posibles para las cuerdas abiertas resulta que se encuentra no un gravitón, sino partículas como las del modelo estándar: fermiones como los quarks y los leptones, y bosones portadores de fuerzas, como el fotón, los gluones, etcétera. Así que estas partículas sólo podrían moverse a lo largo de las dimensiones que ocupa la D-brana que hizo posible su existencia.

De aquí se desprende una posible aplicación de las D-branas a la descripción del mundo real, que es de hecho la otra manera conocida, que ya habíamos mencionado, de esconder las seis dimensiones que la teoría de cuerdas predice y que nosotros no hemos observado aún (recordemos que la primera manera es postular que dichas dimensiones son extremadamente pequeñas). La propuesta sería que el universo que vemos a nuestro alrededor es ni más ni menos que una D3-brana (es decir, una D-brana con tres dimensiones) que, como en la figura 3, existe en un espacio de nueve dimensiones, análoga a una cartulina horizontal que flota en el aire en cierta posición vertical. La razón por la que sólo vemos tres dimensiones es porque la luz está hecha de fotones, es decir, cuerdas abiertas, que sólo se pueden mover a lo largo de la D3-brana. Nosotros mismos estaríamos hechos de cuerdas abiertas (tres quarks y un leptón), así que tampoco podemos movernos a lo largo de las dimensiones ocultas. De hecho, lo único que podría escapar de nuestra D3-brana sería la gravedad.

Pero el punto es que a nivel microscópico la gravedad es justamente la más débil de todas las fuerzas, por lo cual la precisión con la que la hemos explorado a distancias pequeñas es muchísimo menor que la precisión con la que hemos medido las interacciones del modelo estándar. Así que en esta propuesta, que se conoce como *mundo brana*, las dimensiones ocultas podrían ser bastante grandes sin que nos hubiéramos dado cuenta. En la implementación más sencilla de esta idea, se encuentra que pudieran ser tan grandes como una décima de milímetro, lo cual es una enormidad comparado con, por ejemplo, el tamaño de un átomo. Y de hecho, si las dimensiones adicionales estuvieran curvadas de manera apropiada, ¡resulta que pudieran ser incluso infinitas! Por supuesto no estamos diciendo que esto sea particularmente probable, pero lo que sí es realmente notable es que en pleno siglo XXI se esté considerando

seriamente la posibilidad de que existan dimensiones adicionales en nuestro universo que sean infinitamente grandes y sin embargo no hayan sido aún detectadas.

El segundo avance importante de los últimos años es el descubrimiento de que las cinco teorías de cuerdas anteriormente conocidas son en realidad *diferentes aspectos de una sola teoría*. La idea clave aquí es lo que se conoce como *dualidad*, que significa justamente la equivalencia entre dos teorías aparentemente distintas. Se ha encontrado, por ejemplo, que si consideramos la teoría IIB en un espacio donde una de las direcciones es un círculo gigantesco (digamos, 10^{26} metros, como pudiera ser el caso de nuestro propio universo), resulta que no la podemos distinguir de la teoría IIA en un espacio con un círculo ultrapequeño (en el ejemplo, a lo más 10^{-60} metros). ¡Increíblemente, éstas son sólo dos maneras diferentes

Lo que sí es realmente notable es que en pleno siglo XXI se esté considerando seriamente la posibilidad de que existan dimensiones adicionales en nuestro universo que sean infinitamente grandes y sin embargo no hayan sido aún detectadas

de describir la misma situación física! Este tipo de equivalencia se conoce como *dualidad T*, y es un claro ejemplo de que las cuerdas perciben el espacio en el que se mueven de una manera radicalmente distinta a las partículas, ¡al grado de que tamaños pequeños pueden resultar equivalentes a tamaños grandes! En este caso, la diferencia crucial es que una cuerda, además de poderse mover a lo largo de la dimensión circular, puede enrollarse alrededor de ella, dándole la vuelta un número arbitrario de veces.

Otro ejemplo es la llamada *dualidad S*: ha sido posible mostrar que las cuerdas de la teoría HO (que son todas cerradas), cuando interactúan fuertemente, son equivalentes a las de la teoría I (que pueden ser cerradas y abiertas), interactuando débilmente. Este tipo de

conexión resulta particularmente útil, porque por primera vez nos ha permitido entender qué sucede cuando la intensidad de las interacciones entre las cuerdas es muy grande. Esto incluye en particular a la interacción gravitacional, y de hecho los avances de los últimos años han permitido que comprendamos, por ejemplo, algunas de las propiedades de los agujeros negros. Éstos son los ejemplos por excelencia de situaciones donde el espaciotiempo está altamente curvado: la gravedad en estos objetos es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar de ellos. El éxito de la teoría de cuerdas al describirlos refuerza nuestra confianza en ella como un muy prometedor candidato para describir correctamente a la gravedad en todos los niveles.

Así que, por medio de diversas dualidades, hemos logrado conectar entre sí a las cinco teorías que antes pensábamos eran distintas. Y nos hemos llevado una sorpresa todavía mayor: al tratar de entender las teorías IIA y HE en el caso en que sus interacciones son fuertes, ¡hemos descubierto en ellas una nueva dimensión! (¡No la cuarta, sino la décima!) Lo que encontramos es que el número que controla la intensidad de las interacciones entre las cuerdas es ni más ni menos que el tamaño de una décima dimensión espacial. Es por ello que no habíamos notado esta dimensión antes: sólo habíamos logrado entender los casos en que las interacciones eran débiles, y por tanto este número era muy pequeño. Además, hemos entendido que las propias cuerdas tienen un grosor a lo largo de esta décima dirección, ¡de manera que son en realidad membranas!

Nuestra situación antes de 1994 era entonces como la de aquellos cinco ciegos de la fábula hindú: al acercarse a un elefante, cada uno de ellos tocó una parte diferente del animal, y lo percibió por tanto de una manera completamente diferente a los otros cuatro. Nuestro caso se resume en la figura 4. Justo como ellos, nuestras cinco formulaciones distintas de la teoría única estaban al mismo tiempo todas mal y todas bien. Con lo que hemos aprendido, resulta claro ahora que incluso el nombre “teoría de cuerdas” no es adecuado ya: existen objetos que no son cuerdas, las cuerdas en sí son en realidad membranas, y en general, lo que es un tipo de brana desde el punto de vista de una cierta teoría resulta ser un tipo diferente desde la perspectiva de otra de las teorías. Lo que no sabemos todavía es cuál sería el nombre apropiado, puesto que no estamos seguros aún de cuales son los nuevos componentes básicos, es decir, no sabemos con certeza de qué están hechas las cuerdas y las branas. Se están estudiando varias propuestas, pero no se ha dicho aún la última palabra. Por lo pronto, a la nueva y única teoría le llamamos provisionalmente *teoría M*, donde, según las prefe-

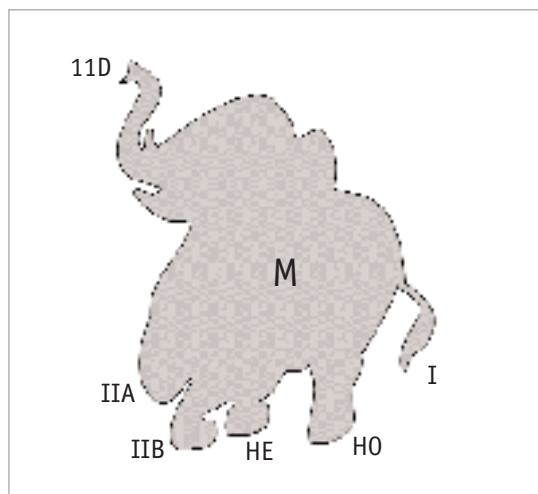


Figura 4. El elefante M. Sorprendentemente, hemos descubierto que las cinco teorías de cuerdas anteriormente conocidas, I, IIA, IIB, HO y HE, son en realidad parte de una sola estructura, que se conoce provisionalmente con el nombre de “teoría M”, y en la cual el espaciotiempo tiene once dimensiones (diez de espacio y una de tiempo).

rencias personales, la “M” puede significar misterio, madre, magia, membrana, matriz y más...

Antes de concluir, regresemos brevemente al tema del contacto con el modelo estándar. La teoría de cuerdas, ahora teoría M, ha sido en ocasiones criticada duramente por no tener aún predicciones experimentales definitivas, lo cual por supuesto es el objetivo de cualquier teoría física. Buena parte de esta crítica, sin embargo, está basada en un profundo malentendido. Para aclarar este punto, es importante destacar que al formular teorías de partículas existe una gran arbitrariedad: uno tiene que escoger “a mano” la dimensión del espacio (que por supuesto fijamos normalmente en tres), el número y tipo de partículas, las fuerzas a que están sujetas, sus masas y cargas, et- cetera. Cuando tratamos con cuerdas, por el contrario, tenemos una sola teoría. El detalle está en que las ecuaciones de esta única teoría tienen muchísimas *soluciones* distintas, y cada una de ellas corresponde a un universo posible; son éstas las que antes habíamos comparado con recetas para pasteles.

Pero el punto es que, después de hacer los cálculos correspondientes, cada una de estas opciones definitivamente sí da lugar a predicciones específicas que pueden ser comparadas con los experimentos. De hecho, la mayoría de ellas se pueden descartar sin tener que hacer muchos cálculos. Por ejemplo, muchas describen universos donde todas las interacciones se propagan en más de tres dimensiones macroscópicas, lo cual claramente no concuerda con nuestras observaciones. Existen, sin embargo, muchas otras soluciones donde las siete dimensiones adicionales están escondidas de alguna manera, por ejemplo porque son muy pequeñas. Al nivel de las distancias que podemos explorar en los actuales aceleradores de partículas, cada elección específica de la forma y el tamaño de estas dimensiones ocultas nos deja, para todo efecto práctico, con una teoría de partículas concreta, definida en tres dimensiones, que como tal puede ser validada o descartada experimentalmente. Querer descartar de un solo golpe la teoría M completa, con todas sus posibles soluciones, es entonces como querer descartar todas las teorías de partículas al mismo tiempo, cosa que nunca nos planteamos como objetivo. Como habíamos dicho ya, la pregunta importante respecto a la teoría M es si por lo menos alguna de sus millones de soluciones corresponde exactamente al modelo estándar, con algunas pequeñas correcciones. El descubrimiento de una solución de este tipo sería un logro monumental: aun antes de la importante confirmación experimental de los *nuevos* efectos predichos por ella, tendríamos por primera vez a nuestra disposición un marco

Lo que encontramos es que el número que controla la intensidad de las interacciones entre las cuerdas es ni más ni menos que el tamaño de una décima dimensión espacial

conceptual que unifica todos los componentes e interacciones de nuestro universo con base en un conjunto extremadamente sencillo de principios. Hasta que ese día llegue, ¡nuestra búsqueda continúa!

Bibliografía

Brian Greene (2001), *El universo elegante: supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*, editorial Grijalbo-Mondadori.

Páginas en la red con información sobre la teoría de cuerdas a nivel divulgación: <http://www.nuclecu.unam.mx/~alberto/physics/cuerdas.html>

Alberto Güijosa es investigador del Departamento de Física de Altas Energías del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México. Su área de especialización es la teoría de cuerdas. Obtuvo su doctorado en Ciencias en la Universidad de Princeton, Estados Unidos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.
alberto@nuclecu.unam.mx