

La teoría de cuerdas y el LHC

La teoría de cuerdas es la candidata más firme a teoría unificada de las interacciones de la naturaleza. El gran colisionador de hadrones, LHC, de Ginebra, podría dar importante información experimental sobre su validez

Luis E. Ibáñez

CONCEPTOS BASICOS

- Según la teoría de cuerdas, las partículas fundamentales del modelo estándar serían vibraciones de energía de cuerdas abiertas de muy pequeño tamaño, mientras que la gravitación surgiría de las vibraciones de cuerdas cerradas. ¿Existe alguna posibilidad de comprobar esta hipótesis en un acelerador de partículas?
- La consistencia matemática de la teoría de cuerdas requiere que cumpla una propiedad, la supersimetría, que despeja también problemas del modelo estándar relativos a la partícula de Higgs, la que les proporciona la masa a las demás partículas.
- La supersimetría predice la existencia de una serie de partículas; entre ellas, los neutralinos, cuya existencia se manifestaría por una aparente no conservación de la energía. Su detección en el nuevo acelerador LHC sería un indicio de la validez de la teoría de cuerdas.

La búsqueda de los constituyentes últimos de la materia ha significado una de las aventuras intelectuales más importantes del siglo xx. En el pasado siglo se han construido los tres pilares básicos de la física moderna: la mecánica cuántica, la teoría de la relatividad y la gravitación de Einstein. Se ha descubierto también la existencia de cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza: fuerzas nucleares, débiles, electromagnéticas y gravitatorias.

El denominado modelo estándar de la física de partículas describe de forma satisfactoria, combinando mecánica cuántica y relatividad, todos los resultados experimentales relativos a las interacciones nucleares, débiles y electromagnéticas. Y no sólo eso. En cosmología, la teoría de la gran explosión, basada en la gravitación de Einstein, permite entender un buen número de las propiedades observadas en el universo.

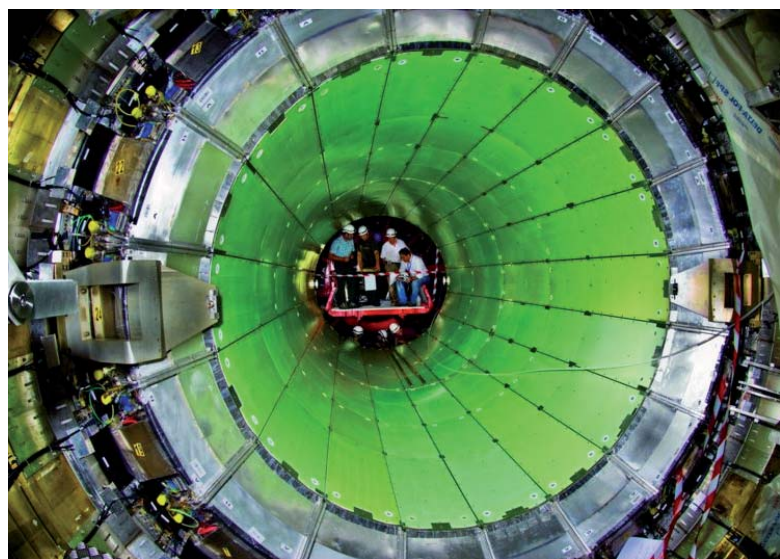
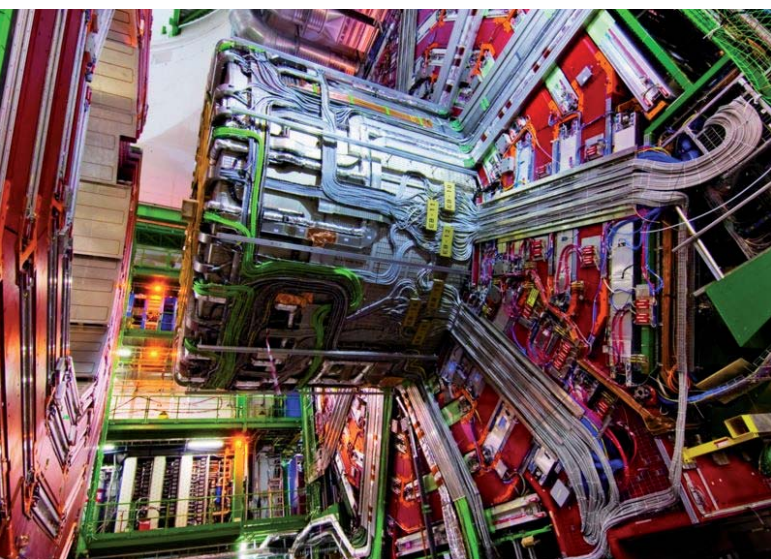
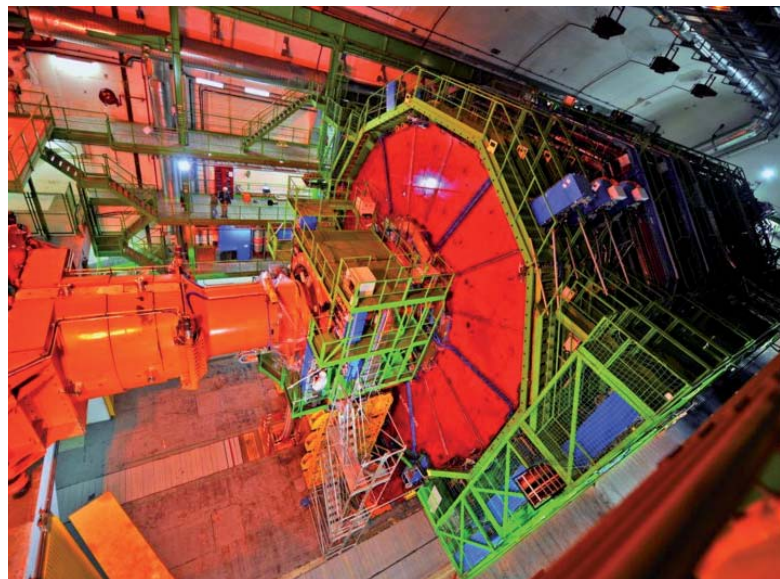
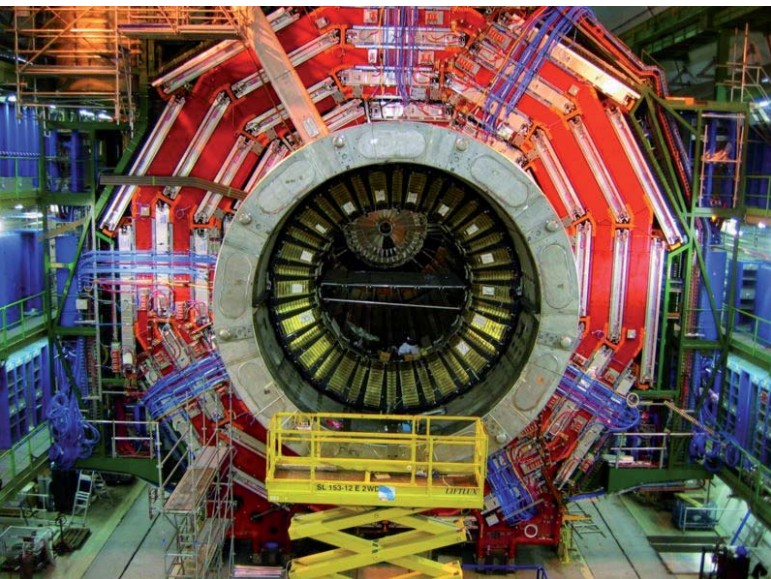
Lo que ya sabemos

Recordemos que la materia está constituida por partículas llamadas fermiones, que son de dos tipos, quarks (que interactúan fuertemente) y leptones (que no interactúan fuertemente). La materia usual, la que conocemos en la experiencia cotidiana, está constituida exclusivamente por dos tipos de quarks, *arriba* y *abajo*, y dos tipos de leptones: el electrón y su neutrino ν_e . Todo lo que observamos (incluyéndonos nosotros mismos) está formado

por esos ingredientes. Estas cuatro partículas forman lo que se llama la “primera generación” de quarks y leptones. Además, existe una segunda generación (los quarks *c* y *s*; el muón y su neutrino ν_μ) y una tercera (quarks *t* y *b*; el τ y su neutrino ν_τ). Estas dos últimas generaciones son partículas inestables y sólo se han detectado por producción en aceleradores, o bien (algunas de ellas) en rayos cósmicos que chocan contra la Tierra.

De resultados obtenidos en aceleradores o de tipo cosmológico parece seguirse que sólo existen estas tres generaciones de partículas. Además, se sabe que las tres generaciones son elementales en el sentido de que no están compuestas por partículas más fundamentales, al menos según cabe discernir con la precisión de los aceleradores actuales. Estos componentes fundamentales de la materia interactúan por el intercambio de los bosones intermedarios. El más conocido de ellos es el fotón, que media la interacción electromagnética, mientras que la interacción fuerte o nuclear es mediada por los “gluones”. Finalmente los bosones *W*, *Z* son los causantes de la fuerza débil. A estos tres tipos de bosones intermedarios hay que añadir el gravitón, que es el causante de las interacciones gravitacionales.

Decíamos que sólo hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza. Sin embargo, esto no es del todo cierto. Si así fuera, el modelo estándar describiría un universo muy poco parecido a lo observado (de hecho no estaría-



mos aquí para poder contemplarlo). El modelo estándar incluye una nueva partícula vital para que las partículas tengan masas no nulas, el llamado bosón de Higgs, H . La peculiaridad de esta partícula es que tiene un efecto de frenado sobre todas las partículas; sus efectos se extienden por todo el espacio, dando lugar a la inercia o masa de todas ellas. La existencia de esta partícula no ha sido verificada todavía experimentalmente. Su búsqueda es una de los motivos principales para el experimento LHC en el CERN, que está previsto empiece a funcionar a finales de este año.

Lo que queremos saber

A pesar del éxito del modelo estándar en su explicación del universo observado, quedan muchas preguntas sin respuesta. La misma estructura del modelo estándar es un poco chocante: ¿por qué existen tres generaciones de quarks y leptones? Si con la primera ge-

neración basta para construir toda la materia observada, ¿por qué tal dispendio por parte de la naturaleza? ¿Por qué hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza y no más o menos? ¿Y por qué unas son mucho más fuertes que otras? ¿Cuál es el origen de este sector extraño de la teoría, el bosón de Higgs, necesario para la generación de las masas y de naturaleza tan especial?

E incluso cuestiones más básicas como: ¿Por qué existen tres dimensiones espaciales y una temporal, y no más o menos? ¿Es el espaciotiempo un concepto fundamental de la teoría o un concepto derivado?

A todas estas y otras muchas preguntas se suma uno de los problemas que se ha revelado más difícil de resolver. Mientras que para las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas existe un formalismo relativista y cuántico a la vez (la llamada teoría cuántica de campos), no acontece así con la gravitación. A fecha de

1. SE SUELE SUPONER que la teoría de cuerdas no se podrá comprobar en un acelerador de partículas porque las energías a que la estructura de cuerdas de la materia se manifestaría son demasiado altas. Si se cumplieren ciertas condiciones, sin embargo, caerían quizá dentro de lo que el nuevo Gran Acelerador de Hadrones (LHC) del CERN alcanzará. Pero aunque no fuera así, el descubrimiento de una nueva clase de partículas, las partículas supersimétricas, respaldaría en parte la validez de la teoría de cuerdas. En estas fotografías se ve uno de los detectores del LHC, el Solenoide Compacto de Muones.



2. AL COMUNICAR UNA ENERGÍA MUY GRANDE a una partícula aparentemente puntual se revelaría su estructura de cuerda. Las vibraciones más ligeras corresponden a la partícula, mientras que las vibraciones de mayor frecuencia, los armónicos, tienen una masa muy grande y no son observables a bajas energías.

hoy, no existe una teoría cuántica de la gravitación coherente en todos sus extremos.

Efectivamente, a diferencia de las otras tres interacciones fundamentales, la teoría de la gravitación presenta inconsistencias en el nivel cuántico. Cálculos en teoría cuántica de campos que involucran la gravitación dan resultados numéricamente infinitos de difícil interpretación física. Se dice que la teoría es “no renormalizable”. Este problema parece necesitar una revisión de algunos puntos de vista básicos de la física del siglo xx. Muchos piensan que hay que abandonar la idea de que los constituyentes fundamentales de la materia son partículas carentes de estructura interna. Es el carácter estrictamente puntual que la teoría supone para las partículas lo que parece dar lugar a los infinitos. De esta idea fundamental parten las teorías de cuerdas.

Por qué las cuerdas

Las teorías de cuerdas tienen como premisa que, a muy altas energías, las partículas no son puntuales, sino que tienen estructura de cuerda. Para ‘estirar’ los extremos de la cuerda y ver la estructura extensa de una partícula se necesitaría una enorme energía. Las partículas observadas corresponderían a los modos de vibración más ligeros de la cuerda, que son los observados experimentalmente. En este esquema hay potencialmente una total unificación: todas las partículas son diferentes “notas” de un solo “instrumento”, la cuerda.

Una de las propiedades más interesantes de la teoría de cuerdas es que predice la existencia de una partícula, de un bosón intermedio

sin masa que se acopla universalmente a toda forma de materia: el gravitón. Se puede decir que la consistencia de la teoría requiere la existencia de la gravitación. Por otra parte, mientras que las partículas del modelo estándar se asocian con los modos más ligeros de cuerdas abiertas, el gravitón aparece como el estado de vibración más ligero de la cuerda cerrada.

Otra propiedad a resaltar es que el carácter extenso (no puntual) de las cuerdas hace que desaparezcan los infinitos cuando se combinan gravitación y mecánica cuántica. Todos los cálculos en la teoría dan resultados finitos. Se trata del aspecto más interesante de la teoría: las de cuerdas son las primeras teorías encontradas que compatibilizan en principio mecánica cuántica y gravitación. Para ello se requiere que las cuerdas gocen de una propiedad, la de supersimetría, que da nombre a las “teorías de supercuerdas”; de la propiedad en cuestión nos ocuparemos más adelante.

Hay un ingrediente bastante exótico en la teoría de cuerdas. Se define de forma natural con seis dimensiones espaciales extra. Es decir, requiere que haya en principio nueve dimensiones espaciales y una temporal. La idea de la posible existencia de dimensiones físicas adicionales no constituye ninguna novedad. Propuesta en 1921 por Teodoro Kaluza, fue elaborada por Oscar Klein en 1926. ¿Por qué no se ha visto hasta ahora la existencia de dimensiones extra?

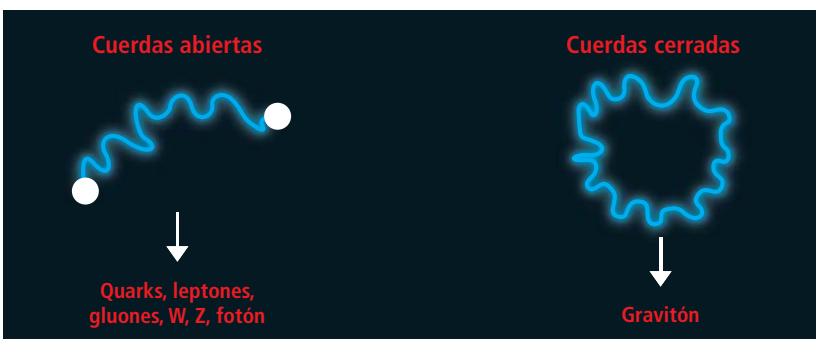
De acuerdo con la explicación de Kaluza y Klein, las dimensiones extra están curvadas sobre sí mismas en un círculo de radio R extremadamente pequeño. En tal caso, las partículas habituales serían las únicas que observaríamos experimentalmente en la vida corriente. Por otra parte, existirían réplicas de las partículas habituales que tendrían una masa más alta, dada por n/R , con n cualquier número entero positivo. Al ser el radio R de las dimensiones adicionales tan pequeño, dichas réplicas tendrían una masa muy, muy grande y, por lo tanto, no resultaría posible producirlas en los aceleradores existentes.

En el caso de la teoría de cuerdas tenemos seis dimensiones extra cuya geometría es bastante más complicada que seis círculos. En general, si queremos que la teoría se parezca a bajas energías lo más posible al mundo observado, las seis dimensiones adicionales deben de corresponder a espacios con ciertas propiedades matemáticas muy especiales, que no describiremos aquí.

Escalas de energía

Es conveniente recordar las unidades de energía que estamos considerando. Una unidad

3. LAS VIBRACIONES MENOS ENERGÉTICAS de las cuerdas abiertas dan lugar a la materia habitual: quarks, leptones y bosones intermedios. Las vibraciones de las cuerdas cerradas sobre sí mismas dan lugar al gravitón, es decir, a la interacción gravitacional.

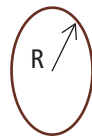
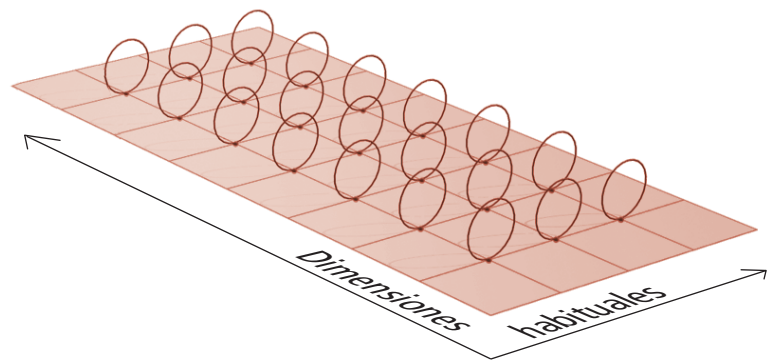


de energía habitual en la física de partículas elementales es el GeV (gigaelectronvolt). La teoría de la relatividad nos dice que hay una relación entre masa y energía, y que masa y energía se pueden transformar una en otra. Es consecuencia de la relación de Einstein, $E = mc^2$, donde E es la energía de una partícula, m su masa y c la velocidad de la luz. Así, una energía de un GeV correspondería a la energía que se obtendría en un proceso (imaginario) en el que un átomo de hidrógeno se desintegrara en pura energía. La energía que será capaz de concentrar el acelerador LHC en cada interacción dentro del detector es del orden de 10^4 GeV.

Volviendo a la teoría de cuerdas, hay dos escalas de energía fundamentales en la teoría: la escala de la cuerda M_{cuerda} y la de las dimensiones extra M_{KK} . La primera mide la escala por encima de la cual la estructura extensa de la cuerda se revela; la segunda, la energía necesaria para percibir la existencia de dimensiones extra. El cociente entre escalas está relacionado con la constante de la gravitación de Newton. Joel Scherk y John Schwarz en 1974, los primeros en considerar las cuerdas para una teoría unificada, supusieron que ambas escalas de energía eran iguales; era la elección más natural. Si es así, la escala de la cuerda será del orden de 10^{18} GeV, unos mil billones de veces mayor que las energías que obtendremos en el acelerador LHC. Por lo tanto, la teoría de cuerdas no se podría comprobar de manera directa en aceleradores presentes o futuros.

Sin embargo, Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Gia Dvali demostraron en 1998 que la escala de la cuerda M_{cuerda} puede ser en principio relativamente baja, incluso accesible al acelerador LHC (véase Nuevas dimensiones para otros universos, por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Gia Dvali, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2000). Se tendría un valor de M_{cuerda} tan bajo si la escala M_{KK} de las dimensiones extra fuese aún muchísimo más baja, del orden de 100.000 veces menor que M_{cuerda} , es decir, del orden de unos 0,01 GeV, la centésima parte de la energía correspondiente a la masa de un átomo de hidrógeno.

Una escala para las dimensiones extra tan baja parece incompatible con los experimentos, pues las réplicas de Kaluza-Klein de las partículas elementales usuales deberían haber sido observadas experimentalmente, si su masa fuese más pequeña que la de un átomo de hidrógeno. ¿Cómo sería posible que las réplicas de Kaluza-Klein del modelo estándar no se hubiesen observado ya en los experimentos? Joe Polchinski señaló, en 1995, que en la teoría



Quinta dimensión

$R \ll$ Distancias exploradas en aceleradores

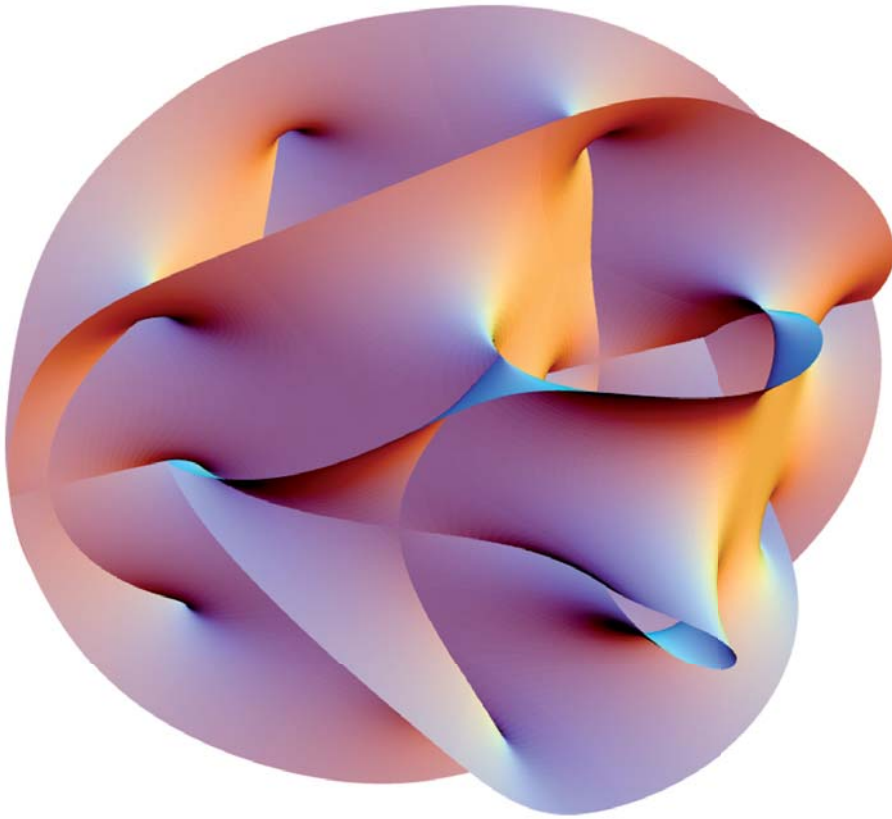
4. ESQUEMA DE UN ESPACIO CON UNA QUINTA DIMENSION. En cada punto de las dimensiones habituales hay otra dirección posible, correspondiente a una quinta dimensión más allá de las tres dimensiones espaciales habituales y el tiempo. Esta quinta dimensión está curvada sobre sí misma en un círculo de radio R de tamaño extraordinariamente pequeño, lo cual hace a esta dimensión invisible. El tamaño de la dimensión extra es mucho más pequeño que las distancias exploradas en los aceleradores hasta ahora existentes.

de cuerdas las partículas del modelo estándar no siempre tienen réplicas de Kaluza-Klein, aunque haya dimensiones extra.

La idea es que en teoría de cuerdas las partículas habituales (quarks, leptones, etcétera, pero no el gravitón) pueden existir tan sólo confinadas en un subespacio más pequeño que el total de $9 + 1$ dimensiones en que se define la teoría. A esos subespacios en los que se ven obligadas a vivir por razones dinámicas se les llama 'Dp-branas'. Estos subespacios tienen dimensión igual a $p + 1$ (p dimensiones espaciales y una temporal), de tal manera que en la situación más sencilla se podría asociar el universo observado a una D3-brana. De esta manera, las partículas del modelo estándar no tendrían réplicas de Kaluza-Klein, mientras que el sector gravitacional sí las tendría. Existe entonces, en principio, la posibilidad de producir réplicas de Kaluza-Klein del gravitón en aceleradores de partículas como el LHC, como luego comentaremos.

La forma de las otras dimensiones

La teoría de cuerdas nos da una solución para el viejo problema de hacer compatible la teoría de la gravitación con la mecánica cuántica. Cabe ahora preguntarse si será capaz de describir correctamente las otras tres interacciones de la naturaleza dadas por el modelo estándar. Para que tal ocurra, el número de dimensiones espacio-temporales debe ser el correcto. Como decíamos, la teoría de cuerdas está formulada de forma natural en diez dimensiones y para



5. SEGUN LA TEORIA DE CUERDAS, el espacio no sólo tiene las cuatro dimensiones ordinarias, sino otras seis, curvadas, eso sí, sobre sí mismas de modo que nos resulten inaccesibles. De la manera en que se curven depende el número partículas elementales y la naturaleza de las interacciones físicas. La ilustración muestra una sección bidimensional proyectada en tres dimensiones de un espacio de Calabi Yau de seis dimensiones. La forma de las seis dimensiones adicionales se describe mediante ese tipo de objetos matemáticos.

hacer contacto con las cuatro observadas en la vida diaria las seis dimensiones extra deben hallarse curvadas sobre sí mismas, con un tamaño diminuto. La idea es que existe un proceso dinámico denominado “compactificación” en el cual estas seis dimensiones extra se contraen y se hacen diminutas y prácticamente inaccesibles.

Sin embargo, y a pesar de esa aparente inaccesibilidad, la estructura de las seis dimensiones extra, su forma y geometría, tiene directas implicaciones físicas. Su geometría determina, por ejemplo, el número de generaciones de quarks y leptones. Vimos que hay tres generaciones de quarks y leptones en la naturaleza. La teoría de cuerdas nos da una explicación de por qué puede existir más de una generación: es una consecuencia de la estructura de las dimensiones extra. Otras propiedades físicas, como el número y forma de las interacciones fundamentales, así como los valores de las masas de los quarks y leptones, dependen también de dicha estructura.

Durante los últimos veinte años se han venido investigando soluciones —geometrías para las dimensiones extra— que sean coherentes con las características fundamentales del modelo estándar. Es lo que se ha dado en llamar fenomenología de la teoría de cuerdas. Se han ido descubriendo nuevas formas de compactificar las seis dimensiones extra. Con ello se han ido obteniendo soluciones de la teoría más y más cercanas a las propiedades del modelo estándar. Se trata de un programa de

investigación mundial que tiene algún parecido a la exploración de la geografía de la Tierra durante los siglos xv al xviii. El objeto de la exploración es ahora las seis dimensiones adicionales; las naves que permiten la exploración, la consistencia matemática y el acuerdo con la estructura observada del modelo estándar.

Para hacer contacto con las partículas observadas del modelo estándar, las diferentes vibraciones de la cuerda corresponden a partículas distintas. La mayoría de dichas vibraciones corresponden a partículas con masas muy grandes, del orden de M_{cuerda} . Tales partículas no pueden ser identificadas con los quarks y leptones observados, de masas mucho menores. Las partículas físicas corresponden a vibraciones de masa nula, de tal forma que en primera aproximación todas las partículas del modelo estándar aparecerían con masa nula. Sin embargo, entre las vibraciones sin masa de la cuerda debe de existir una correspondiente al bosón de Higgs, que es el que dará lugar a las masas observadas para todos los quarks y leptones, como en la descripción habitual del modelo estándar.

Aligerar el Higgs

Aquí reaparece un viejo problema, al que se ha venido en llamar el problema de las jerarquías de escala. Estriba en que la partícula de Higgs tiende a adquirir, debido a correcciones cuánticas, una masa enorme. Esta masa imponente sale de la probabilidad cuántica de que el Higgs se transforme en un par de partículas del modelo estándar en un tiempo infinitesimal, para volver a convertirse en el Higgs inicial. Si el bosón de Higgs tiene una masa muy, muy grande, desaparece a todos los efectos de la teoría y no puede, pues, ser el origen de todas las masas observadas. Nos referimos al problema de la jerarquía de escala, llamado así porque sin un bosón de Higgs no entenderíamos cómo se genera la escala de masas de las partículas.

Una de las posibilidades más atractivas para solucionar el problema consiste en crear una extensión del modelo estándar, capaz de contener una nueva simetría: la supersimetría.

Se trata de una simetría que asocia a cada bosón un nuevo fermión y a cada fermión un nuevo bosón. Así, si existe el fotón debe existir el fotino, y el electrón ha de tener un compañero supersimétrico, el selectrón. El bosón de Higgs presenta un compañero fermiónico, el higgsino, y así sucesivamente. Hay, pues, en la teoría igual número de fermiones y bosones.

Si ahora volvemos al cálculo de las correcciones cuánticas a la masa del Higgs, deberemos incluir en dicho cálculo la contribución de las nuevas partículas aducidas. Lo interesante

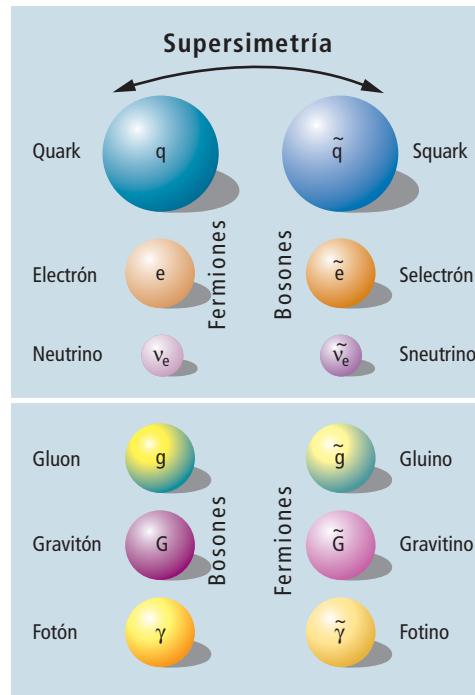
es que un fermión (por ejemplo, un electrón) y su compañero (el selectrón) contribuyen con la misma cantidad, aunque con signo opuesto, a la masa del Higgs, de manera que hay una cancelación total de las correcciones cuánticas de ésta y el problema de la jerarquía de escalas queda resuelto de una forma elegante: el Higgs permanece ligero y puede así dar masa a todas las partículas elementales.

Dentro de la teoría de cuerdas, esto quiere decir que debemos restringirnos a compactificaciones que tengan esta propiedad de supersimetría, de tal forma que las vibraciones de masa nula de la cuerda deben incluir no sólo las partículas del modelo estándar, sino también sus compañeras supersimétricas (squarks, gluinos etcétera).

S-partículas

Un punto importante: para que el mecanismo de protección que la supersimetría da a la partícula de Higgs sea operativo, es necesario que las nuevas partículas supersimétricas tengan una masa no mucho mayor que la masa del Higgs. Por otra parte, sabemos que la partícula de Higgs ha de poseer una masa del orden de la que el acelerador LHC es capaz de proporcionar. De esa forma, si la supersimetría es una idea correcta, el LHC deberá ser capaz de producir partículas supersimétricas.

En el LHC colisionarán protones a alta energía y, si existen, los squarks se producirán a pares. Dichos squarks se desintegrarían cada uno en un quark y un neutralino (una mezcla de fotino y de higgsino) y, aparte de otras partículas no relevantes en el proceso, al final se observarían dos chorros (*jets*) de partículas provenientes de los quarks y la no conservación (sólo aparente) de la energía. Esta aparente no conservación se debería a los neutralinos, que interaccionan muy débilmente y no serían vistos, pues, en los detectores. Este tipo de señales experimentales se cuenta entre las que se buscarán con mayor interés



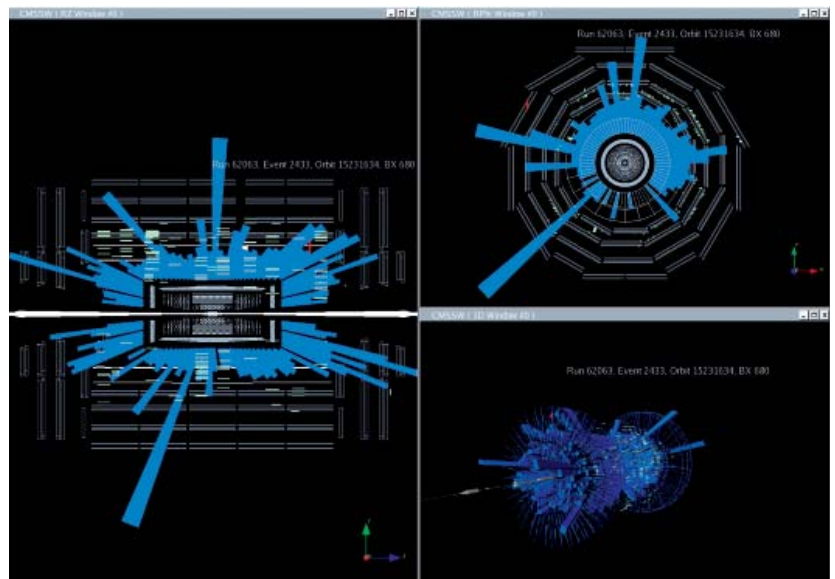
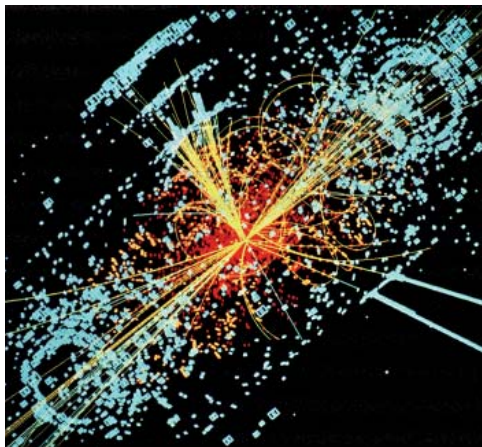
6. LA SUPERSIMETRÍA asocia a cada fermión —componente de la materia— del modelo estándar un bosón no incluido en el modelo estándar, y a cada bosón —transmisor de fuerza—, un fermión. El LHC podrá quizá descubrir esas “partículas supersimétricas”, hasta ahora sólo hipotéticas.

en el acelerador LHC, tras su puesta en funcionamiento en 2009.

Hay otra interesante consecuencia de la supersimetría. La teoría predice la existencia de una nueva partícula estable en la naturaleza (además del protón y el electrón), los neutralinos precisamente. Los cálculos establecen que podrían darse en el universo en una cantidad comparable con la cantidad de materia oscura necesaria para explicar los datos astrofísicos y cosmológicos. De manera que, si estas ideas son correctas, el LHC será capaz también de producir los componentes elementales de la materia oscura del universo.

Los físicos están pendientes de la respuesta que el LHC va a dar a la pregunta de si la

7. SIMULACION de las trayectorias y energías de las partículas que el detector CMS observaría en una de las formas en que podría generarse la partícula de Higgs en el LHC (abajo a la izquierda). Una de las primeras imágenes tomadas por el Solenoide Compacto de Muones, en septiembre de 2008, cuando se envió por el acelerador un haz de protones de prueba hacia un haz blanco (derecha).



CERN (abajo, izquierda); CMS-CERN (abajo, derecha)

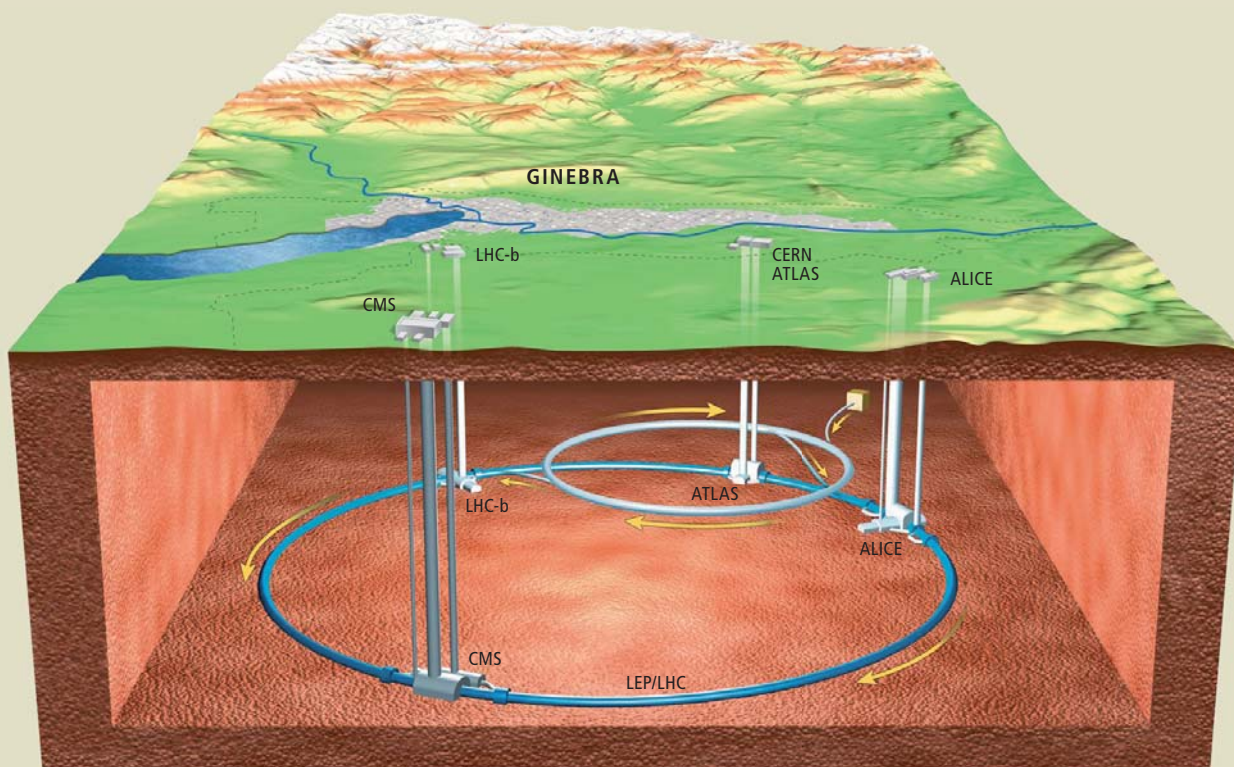
EL GRAN COLISIONADOR DE PARTICULAS LHC

Las herramientas imprescindibles para el estudio de la estructura de la materia a distancias subatómicas son los aceleradores de partículas. En los colisionadores, una clase de aceleradores, chocan a enormes velocidades, cercanas a la de la luz, haces de partículas elementales que viajan en direcciones opuestas. Se las hace colisionar en determinados puntos, donde se concentra así una enorme cantidad de energía; alrededor de dichos puntos se construyen detectores capaces de descifrar y medir las nuevas partículas creadas en los choques. Según la ecuación de Einstein ($E = mc^2$), la energía E puede transformarse en creación de nuevas partículas de masa m ; dichas partículas son las estudiadas por los detectores. En este tipo de experimentos la energía se mide en GeV (gigaelectronvolt). Un GeV es aproximadamente la energía que se obtendría en un proceso (ideal) en el que un átomo de hidrógeno se transformase en energía.

El colisionador LHC (Large Hadron Collider) del CERN (Ginebra) será capaz de obtener colisiones con unos 14.000 GeV, valor unas diez veces mayor que la de previos aceleradores. El acelerador se halla ins-

talado en un túnel circular de alrededor de 27 km de circunferencia a unos cien metros de profundidad, en la frontera entre Francia y Suiza, cerca de Ginebra. Como indica la figura, otro acelerador más pequeño (llamado SPS) inyecta protones en el LHC, que acelera haces de estos en direcciones contrarias.

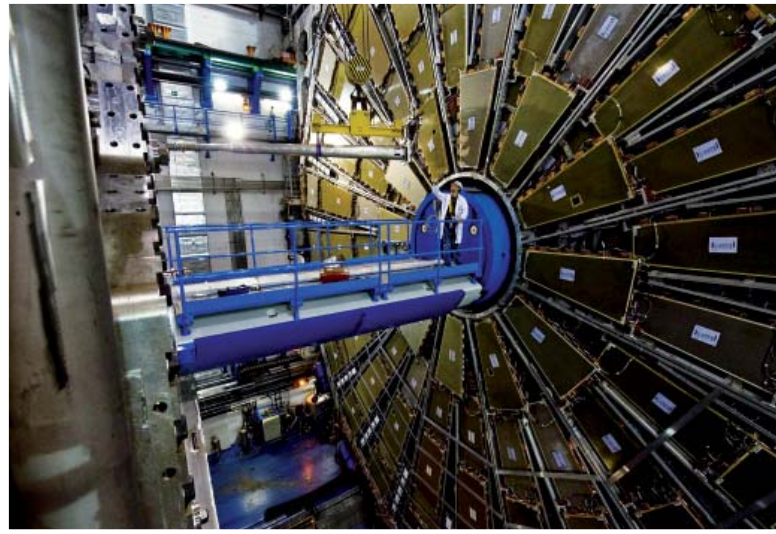
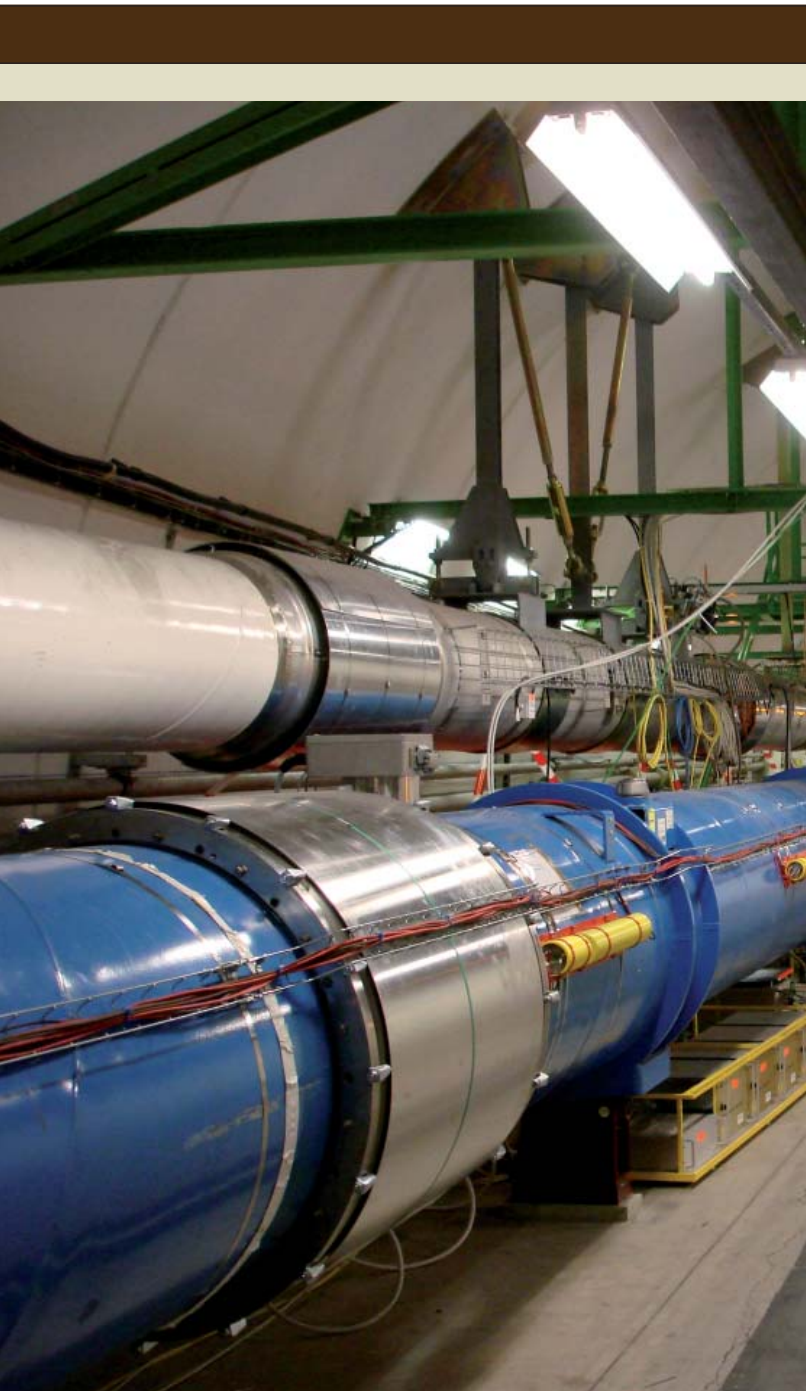
Los haces circulan por tubos de alto vacío (a la derecha) y la aceleración se obtiene mediante enormes campos magnéticos creados por imanes superconductores mantenidos a 1,7 grados kelvin (cerca del cero absoluto de temperaturas) para que puedan funcionar. A los haces de protones se les hace chocar en cuatro áreas experimentales subterráneas donde hay situados detectores de partículas del tamaño de edificios de seis plantas. Dichos detectores llevan por nombres ATLAS, CMS (inserto, a la derecha), LHC-b y ALICE; cada uno de ellos ha sido construido por centenares de físicos e ingenieros de todo el mundo, organizados en colaboraciones internacionales. Entre los objetivos fundamentales del LHC se cuenta la búsqueda del bosón de Higgs y de las partículas supersimétricas.



supersimetría es real o no. Por otra parte, la supersimetría constituye, además, un ingrediente fundamental de la teoría de cuerdas. La noción misma de supersimetría se creó dentro de la teoría de cuerdas, en 1971, por obra de Pierre Ramond, mucho antes de que se señalase su posible utilidad para resolver el problema de las jerarquías de escala y antes también de que se la considerase una candidata a teoría unificada. La supersimetría es necesaria para la consistencia matemática de la teoría de cuerdas. Si se descubre la supersimetría en

el LHC, significará un importante respaldo para la teoría de cuerdas en su calidad de candidata a describir todas las interacciones de la naturaleza.

Hay que señalar que la teoría de cuerdas, aunque contiene como ingrediente fundamental la supersimetría, no predice de manera estricta que las partículas supersimétricas (squarks, sleptones, etcétera) deban ser descubiertas en el LHC. La razón es que la teoría puede también ser consistente en una situación en que estas partículas porten una



masa mucho mayor, inalcanzables para el LHC. Sin embargo, parece indudable que la detección de dichas partículas significaría un fuerte espaldarazo para la teoría.

Dimensiones extra y agujeros negros en el LHC

Hay algunas alternativas más exóticas en lo que se refiere a la posible física que se observará en el LHC. Una de ellas es la observación de la posible existencia de dimensiones espaciales extra. Como ya mencionábamos,

en los últimos diez años se ha descubierto que la escala de energías de la teoría puede ser, en principio, muy baja, de unos mil o diez mil GeV, del orden de las energías alcanzables en el LHC. Si ello se confirma, resultaría posible generar réplicas de Kaluza-Klein del gravitón, señales de la existencia de dimensiones adicionales. ¿Cómo podrían observarse en el LHC?

Las partículas en cuestión, al interactuar sólo gravitacionalmente, no dejarían traza en los detectores; su efecto sería observable de

El autor

Luis Ibáñez es catedrático en la Universidad Autónoma de Madrid y director del departamento teórico del Instituto de Física Teórica UAM-CSIC. Fue miembro del CERN durante ocho años y trabaja en física de partículas elementales. Recibió el Premio Iberdrola de Ciencia y Tecnología en 1997; son reconocidas sus contribuciones a la construcción del modelo estándar supersimétrico, así como al estudio de la fenomenología de la teoría de cuerdas.

forma indirecta, por una violación aparente de la conservación de la energía, como pasa con los neutralinos de las teorías supersimétricas, aunque de una manera diferente. La detectabilidad depende del tamaño de las seis dimensiones extra. Además, si la escala de la cuerda fuera de unos 1000 o 10.000 GeV, podrían producirse en el LHC partículas con masa correspondientes a vibraciones de más alta frecuencia de la cuerda: en cierta manera, se vería de forma directa la estructura de cuerdas de la materia.

Con una escala M_{cuerda} tan baja, otra posibilidad es la creación de microagujeros negros en las colisiones de los protones del LHC. Hasta se ha llegado a afirmar que tales agujeros negros supondrían una catástrofe para la Tierra. La idea es que, una vez creados, absorberían la materia entorno y destruirían el planeta. Tales suposiciones carecen de base científica seria. Se ha comprobado que en el caso de que el LHC fuese capaz de producir dichos objetos, se desintegrarían emitiendo fotones (la llamada radiación de Hawking), antes de que pudieran tocar las paredes de los detectores del LHC. Hay incluso una forma indirecta de saber que el LHC nunca podrá crear una catástrofe de este tipo. La Tierra está siendo continuamente bombardeada por partículas y núcleos atómicos muy energéticos, los llamados rayos cósmicos, provenientes de nuestra galaxia y de fuera de nuestra galaxia. Muchos de estos rayos cósmicos poseen energías mucho mayores que las que el LHC será capaz de producir. Llevan bombardeando la Tierra y otros astros visibles desde hace miles de millones de años. La misma estabilidad de la Tierra y de otros objetos estelares durante todo este tiempo demuestra que tal proceso catastrófico no puede suceder. Se puede decir que la naturaleza lleva creando de forma puntual colisionadores como el LHC naturales sin que haya tenido lugar ninguna catástrofe.

Perspectivas del LHC

En resumen: si la escala de la cuerda resulta cercana a las energías abordables al LHC, se podría comprobar la realidad de la teoría de cuerdas de una forma directa. La existencia de dimensiones extra y de la estructura de cuerdas de la materia se comprobaría si se produjesen réplicas del Kaluza-Klein del gravitón, partículas con masa correspondientes a vibraciones de las cuerdas o ambas cosas.

Por otra parte, parece bastante más probable que M_{cuerda} y la escala de las dimensiones extra M_{KK} sean comparables, en cuyo caso las réplicas de Kaluza-Klein y las vibraciones masivas de la cuerda tendrían masas enormes,

con valores del orden de mil billones de veces la energía abordable mediante el LHC. En ese caso, la teoría sólo se podría contrastar de forma indirecta. Entonces, para que las partículas de Higgs puedan conferir masa a las partículas del modelo estándar parece que se requeriría, como ya hemos dicho, la existencia de partículas supersimétricas observables en el LHC.

La detección de partículas supersimétricas en el LHC nos daría importante información acerca de qué estructura concreta de la teoría de cuerdas podría describir el modelo estándar. El trabajo ingente de los últimos veinte años, encaminado a identificar soluciones de la teoría que den lugar a una estructura lo más cercana posible al modelo estándar supersimétrico, ha producido decenas de soluciones que, aunque no reproducen de forma perfecta todos los detalles del modelo estándar, están muy cerca de conseguirlo.

En ciertos tipos de soluciones también es posible calcular relaciones entre las masas de las partículas supersimétricas. Por ejemplo, el cociente entre las masas de los squarks y de los gluinos, o el cociente de las masas de los gluinos y neutralinos. Si en el acelerador LHC se producen estos diferentes tipos de partículas supersimétricas y los resultados para sus masas están de acuerdo con alguna de las soluciones de compactificación, se podrá obtener información valiosa sobre la estructura de la teoría de cuerdas subyacente y confirmar o descartar muchas formas de compactificación.

Estamos viviendo en estos momentos una situación muy especial en la física fundamental. El Gran Colisionador de Hadrones del CERN, esfuerzo colectivo de la ciencia europea e internacional, está a punto de revelarnos la estructura más íntima de la materia. El origen de la masa de las partículas y el descubrimiento del bosón de Higgs es un importante objetivo. Sin embargo, todo parece indicar que habrá más sorpresas: la observación de partículas supersimétricas, dimensiones extra..., o algo inesperado que los físicos no hemos podido imaginar. El LHC aportará información de interés sobre la posible estructura de cuerdas de la materia. La supersimetría es un ingrediente fundamental de la teoría de cuerdas. Si en el LHC se descubren partículas supersimétricas, ello significará una importante prueba circunstancial en favor de la validez de esta ambiciosa teoría.

El LHC tomará datos durante varios años. Su análisis llevará también bastante tiempo. Todos confiamos en que estos datos abrirán nuevas puertas al conocimiento más íntimo de la materia y esperamos con impaciencia los primeros resultados.

Bibliografía complementaria

UNIFICACION Y DUALIDAD EN TEORÍA DE CUERDAS. L. E. Ibáñez en *Investigación y Ciencia*, págs. 62-69; agosto, 1998.

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES. G. P. Collins en *Investigación y Ciencia*, abril, 2008.