

Unificación y dualidad en teoría de cuerdas

Las teorías de cuerdas son las más firmes candidatas para lograr una descripción unificada de todas las interacciones fundamentales de la naturaleza. Constituyen, sin embargo, aspectos parciales de la teoría M

Luis E. Ibáñez Santiago

Uno de los objetivos codiciados por los físicos desde hace más de cien años es la consecución de una teoría final o unificada para todas las leyes de la naturaleza. Se trata de hallar una teoría que describa las leyes que rigen todas las interacciones fundamentales unificadas en su diversidad por un número pequeño de principios.

Ante este reto la primera pregunta que surge es si la naturaleza muestra o no interés en la unificación de sus leyes. La experiencia acumulada en los veinte últimos años permite decir que, efectivamente, hay una serie de pistas que indican la existencia de una unidad o relación entre las interacciones, pistas que sugieren una teoría unificada subyacente a todas ellas.

En este sentido, los intentos de Albert Einstein (1879-1955) de unificar la gravitación y el electromagnetismo en los últimos años de su vida fueron prematuros. En su época se desconocían las leyes físicas de las interacciones nucleares. En cambio a finales del siglo XX tenemos un buen punto de partida para intentar el salto hacia una unificación de todas las interacciones.

Los datos experimentales son consistentes con el modelo estándar. Describe éste tres de los cuatro tipos de fuerzas fundamentales: interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes. Estos dos últimos tipos de fuerza son interacciones sólo observables en el dominio nuclear o subnuclear.

Las tres fuerzas vienen descritas mediante un formalismo matemático denominado teoría cuántica de campos. Este formalismo, construido en los años cuarenta y cincuenta, es un esquema general que incorpora los aspectos fundamentales de la mecánica

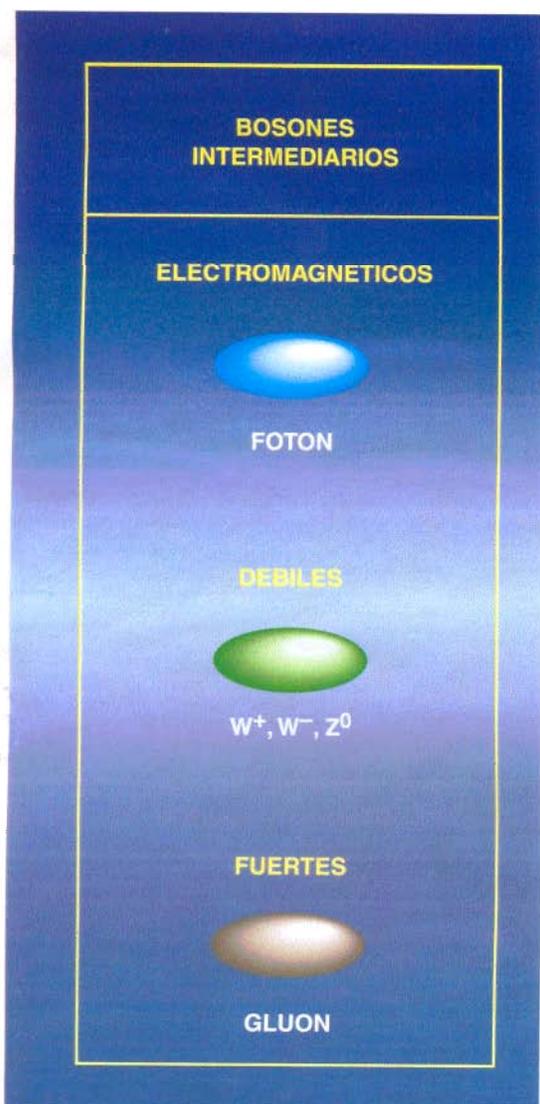
cuántica y la teoría especial de la relatividad. En principio, pueden construirse una infinidad de teorías cuánticas de campos. Los datos experimentales obtenidos en los aceleradores de partículas elementales

en los últimos cuarenta años han permitido estudiar cómo son las tres teorías cuánticas de campos que describen las interacciones electromagnéticas, fuertes y débiles. También hemos aprendido en los últimos trein-

CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES DE LA MATERIA		
	QUARKS	LEPTONES
MATERIA USUAL	u (ARRIBA) 	e (ELECTRON) 
	d (ABAJO) 	ν_e (NEUTRINO DEL ELECTRON) 
MATERIA EXISTENTE A ALTAS ENERGÍAS	s (EXTRAÑO) 	μ (MUON) 
	c (ENCANTO) 	ν_μ (NEUTRINO DEL MUON) 
	b (ABAJO) 	τ (TAU) 
	t (ARRIBA) 	ν_τ (NEUTRINO DEL TAU) 

ta años que toda la materia conocida está constituida por quarks y leptones.

Las interacciones entre partículas elementales según estas teorías tienen lugar mediante el intercambio de otras partículas llamadas genéricamente bosones intermediarios. Así, un par de quarks interactúan intercambiando energía en forma de un fotón, la partícula elemental asociada a la interacción electromagnética; pueden interactuar débilmente mediante intercambio de bosones W , Z^0 (partículas mediadoras de la interacción débil), o fuertemente con intercambio de gluones (mediadores de la interacción fuerte). Hay otras muchas posibilidades de interacciones de formas más complicadas. El modelo estándar nos permite calcular y entender numéricamente las interacciones electromagnéticas, fuertes o débiles entre los constituyentes fundamentales de la materia.



Sin embargo, no contamos en este momento con una teoría cuántica de campos que describa las interacciones gravitatorias de las partículas. Cuando se intenta construirla nos encontramos con que, al efectuar los cálculos, se obtienen cantidades infinitas carentes de sentido: la teoría es inconsistente. En el argot se dice que la teoría es "no renormalizable".

Esta situación es una ironía de la historia de la ciencia: la primera interacción fundamental de la naturaleza que empezó a entenderse con el advenimiento de la ciencia moderna en el siglo XVII fue la gravitación (Newton). Sin embargo, dicha interacción se resiste a una explicación en el contexto de la mecánica cuántica y va a ser la última en entenderse a nivel microscópico. Este es, sin duda, el gran problema que la triunfante física fundamental del siglo XX dejará pendiente para el siglo XXI. En los últimos quince años ha surgido una clase de teorías que constituyen, al parecer de muchos físicos, unas fuertes candidatas para la obtención de una teoría cuántica de la gravitación. Son las teorías de "supercuerdas". Estas teorías no sólo parecen prometer una solución al problema de la gravitación cuántica, sino que constituyen, además, teorías unificadas de todas las interacciones de la naturaleza. Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, ha llegado a afirmar que las teorías de supercuerdas son un trozo de física del siglo XXI milagrosamente descubierto en el siglo XX.

Un primer obstáculo contra la idea de una teoría unificada es la disparidad entre las cuatro fuerzas en cuestión. Las interacciones fuertes son mucho más intensas que las electromagnéticas. Para que el lector se haga una idea intuitiva, son las interacciones fuertes las que están en juego en una explosión nuclear, mientras que en el caso de un explosivo como la dinamita se trata de interacciones electromagnéticas. Por otra parte, las interacciones débiles (causantes de la radiactividad) son mucho menos intensas que las electromagnéticas. Las

gravitatorias son las más débiles de todas: es imposible notar la atracción gravitatoria entre dos objetos en la vida cotidiana. Sólo nos percatamos de la interacción gravitatoria cuando las masas consideradas son enormes y compensan la debilidad de la interacción. Tal es el caso del peso de los objetos en la superficie terrestre, producido por la enorme masa de la Tierra que compensa la debilidad de la interacción gravitatoria.

¿De qué modo pueden las cuatro interacciones, de intensidad y propiedades diferentes, formar parte de una misma teoría unificada? La respuesta se ha ido elaborando a lo largo de los últimos 30 años. El punto fundamental puede expresarse de la siguiente manera: la forma de las leyes fundamentales de la naturaleza depende de la energía en que se producen las interacciones. Esto quiere decir que, por ejemplo, las leyes que rigen el choque entre dos electrones cambian al hacerlo la energía con que chocan. No debe extrañar que el resultado de una colisión entre dos partículas dependa de la energía con que chocan (es manifiesto que el resultado de un golpe frontal de dos vehículos que marchan el uno contra el otro a 5 km/h difiere del resultado obtenido cuando van a 200 km/h). Lo sorprendente es que cambie la propia forma de las leyes fundamentales de la física. Esta idea abre la puerta a la posibilidad de una teoría unificada de las interacciones fundamentales.

Es posible, en efecto, que las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles, cuyas intensidades y leyes difieren entre sí cuando se estudian a las energías asequibles en los laboratorios actuales, muestren un parecido creciente conforme vamos aumentando las energías. En ello estriba una de las razones principales por la cual los físicos de partículas elementales persiguen la construcción de aceleradores de partículas con cada vez mayor energía. No se trata sólo de estudiar el comportamiento del modelo estándar a mayores energías, sino, sobre todo, de descubrir si, a partir de cierta energía, cambian las leyes de la física.

1. TABLA DE LOS CONSTITUYENTES fundamentales de la materia. Toda la materia conocida está compuesta por seis tipos de quarks y seis de leptones. Los protones y neutrones de los átomos están constituidos por quarks u y d . Alrededor de los núcleos de los átomos orbitan los electrones, uno de los seis leptones existentes en la naturaleza. Las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes entre las partículas tienen lugar mediante el intercambio de otras partículas llamadas bosones intermediarios.

LUIS E. IBAÑEZ es profesor en la Universidad Autónoma de Madrid, donde se doctoró en 1978. Pasó ocho años en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), en las cercanías de Ginebra. Ha trabajado en teorías unificadas, supersimetrías y supercuerdas. En marzo de 1997 recibió el premio Iberdrola de Ciencia y Tecnología.

La intensidad de las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles viene medida por las constantes de acoplo, magnitudes numéricas de un valor aproximado de $1/8$, $1/128$ y $1/24$ respectivamente.

Utilizando las reglas de la teoría cuántica de campos se puede extrapolar y calcular cuáles serían dichas intensidades a energías más altas. Dicho cálculo fue realizado en 1974 por H. Georgi, H. Quinn y S. Weinberg, en la Universidad de Harvard. Mostraron que las constantes de acoplo de las tres interacciones se acercan a medida que aumenta la energía. La intensidad de las tres fuerzas se hace aproximadamente la misma a energías del orden de 10^{16} GeV (un GeV equivaldría a la energía liberada en un proceso ideal en que un átomo de hidrógeno se desintegrara en pura energía siguiendo la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$). Para estas energías altísimas, las tres interacciones se vuelven de intensidad comparable y bien pudieran corresponder a tres diferentes manifestaciones de un solo tipo de fuerza. La teoría unificada asociada sería rigurosamente válida a dichas energías e incluiría el modelo estándar como un caso particular. A energías inferiores a la de unificación, reaparecerían las tres interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas, diferenciadas.

La energía mayor que se puede alcanzar hoy en un acelerador de partículas es del orden de 1000 GeV. Necesitaríamos multiplicar por un billón dichas energías para poder estudiar en el laboratorio si acontece efectivamente tal unificación. Por muchas razones resulta inviable la construcción de un laboratorio de estas características; los físicos deben, pues, buscar pruebas indirectas de la existencia de una teoría unificada.

Sería extraño que se diera sólo unificación entre tres de las interacciones fundamentales de la naturaleza y la cuarta permaneciera al margen. La gravitación es la más débil de las

cuatro interacciones. Ello se debe a la extrema pequeñez de la constante de la gravitación universal de Newton. Según es sabido, la teoría de la relatividad establece una equivalencia entre masa y energía; por tanto, otra forma de obtener interacciones gravitacionales grandes es estudiar procesos gravitatorios en presencia de muy altas energías (en vez de masas muy grandes).

Utilizando el valor conocido de la constante de Newton y rudimentos de la mecánica cuántica, se comprueba que la interacción gravitatoria se convierte en una fuerza de intensidad grande (comparable con las otras tres) para energías del orden de 10^{18} GeV. A esta escala de energías característica de la gravitación se le llama energía de Planck. La proximidad entre la energía de Planck (10^{18} GeV) y la de unificación de las otras tres fuerzas (10^{16} GeV) sugiere una unificación mayor dentro de una teoría superunificada que incluiría esta vez las cuatro interacciones. En esta "teoría del todo", las cuatro serían aspectos diferentes de una interacción fundamental única.

Aunque el esquema indicado parece sugerente, la teoría unificada de las cuatro interacciones está todavía por llegar. El hueso más duro estriba en la interacción gravitatoria: carecemos de una teoría cuántica de la gravitación. Lo ideal sería encontrar una teoría consistente de la gravitación que además fuese parte de una teoría unificada de las cuatro interacciones fundamentales.

Todo parece indicar que para afrontar este ambicioso programa se tendrá que ir más allá de las técnicas utilizadas con las otras tres interacciones (la teoría cuántica de campos). Las indeseadas, por inconsistentes, cantidades infinitas que aparecen cuando se aplican dichas técnicas a la interacción gravitatoria así lo aconsejan.

En este punto aparecen las teorías de cuerdas. Formuladas en los años sesenta y setenta, para describir las interacciones fuertes antes de que el modelo estándar quedara bien establecido, fracasaron en dicho intento. En 1974, J. Scherk, de la Escuela Normal Superior de París, y J. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California, sugirieron su utilización como candidatas a teorías cuánticas de la gravitación.

Las teorías de cuerdas iban más allá de cualquier teoría precedente en un punto decisivo. Hasta entonces, todas las teorías suponían que las

partículas elementales (quarks, leptones, etcétera) eran partículas puntuales, carentes de estructura interna ("elementales"). Las teorías de cuerdas postulan que los auténticos componentes fundamentales de la materia (al menos cuando se examina ésta a energías comparables con la de Planck) no son objetos puntuales (partículas), sino objetos extensos con estructura (cuerdas).

Se puede representar la idea de cuerda mediante dos puntos X_a y X_b unidos por una goma elástica. Una partícula que se mueve en el espacio describe una línea; una cuerda barre, al desplazarse en el espacio, una superficie. Puede haber cuerdas cerradas sobre sí mismas. La partícula tiene por magnitud característica su masa, m ; la cuerda tiene, por magnitud característica de su inercia, la tensión de la cuerda, T . La tensión de las cuerdas se mide en unidades de energía, y se postula que T es del orden de la energía de Planck, 10^{18} GeV.

En física las nuevas teorías nunca aparecen destruyendo las existentes. Siempre consisten en extensiones de las teorías preexistentes; en cierto límite se recuperan de nuevo las teorías anteriores. Tal es el caso, por ejemplo, de la teoría especial de la relatividad, que no invalida la mecánica de Newton, sino que la complementa para el caso de cuerpos que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. De igual manera, hay que exigir que en cierto límite las teorías de cuerdas den lugar de nuevo a la noción de partícula elemental.

Si representamos una cuerda abierta mediante dos puntos unidos por una cuerda elástica, la tensión de la cuerda T nos mide cuán fuerte es la "goma" que une los dos puntos. En una cuerda con una tensión muy grande, los puntos apenas se podrán separar; a todos los efectos, se recupera la noción de partícula elemental cuando la tensión de la cuerda se hace muy grande. Una cuerda no se distingue esencialmente de una partícula elemental, a no ser que se le comunique una energía enorme, del orden de T (10^{18} GeV). Sólo a esas energías la estructura no puntual de las cuerdas se hace manifiesta.

Hasta cierto punto, una cuerda equivale a un conjunto infinito de partículas elementales. De este infinito conjunto de partículas, todas salvo unas pocas tienen masas del orden de la energía de Planck. En la experiencia

cotidiana no nos percatamos de la existencia de esta infinidad de partículas supermasivas porque las energías a nuestra disposición son ridículas comparadas con la energía de Planck. Aparte de estas partículas supermasivas inobservables, existen otras sin masa tan enorme. Son las que debemos identificar con las partículas del modelo estándar: quarks, leptones, fotones, etcétera; forman la materia observable en la vida cotidiana.

Pese a no ser directamente observables, la existencia de este conjunto de infinitas partículas supermasivas es crucial para obtener la propiedad más importante de las teorías de cuerdas. Confesábamos que no disponíamos de una teoría cuántica de la gravitación por culpa de la aparición de cantidades infinitas en los cálculos. Pues bien, estas torres de infinitas partículas cancelan justamente tales infinitos. Las teorías de cuerdas son las primeras teorías cuánticas consistentes de la gravitación. Y las únicas existentes. Para ser precisos, sólo las teorías de cuerdas que gozan de supersimetría—principio de simetría que trata por igual a bosones y fermiones— pueden cancelar los infinitos. Se les llama teorías de supercuerdas.

El que algunas teorías de cuerdas podrían solucionar el problema de los infinitos de la gravitación cuántica era sabido desde los trabajos de M. Green, del Colegio Queen Mary de Londres, y Schwarz a principios de los ochenta. Sin embargo sólo un número pequeñísimo de físicos teóricos trabajaban en este tema, pues las teorías de cuerdas entonces consideradas no parecían muy prometedoras en la unificación de las cuatro interacciones; se las presumía incapaces de describir, además de la gravitación, el resto de las interacciones.

Tampoco parecía posible reobtener el modelo estándar como

2. INTERACCIONES entre partículas elementales. En *a*, se ilustra un par de quarks *q* en interacción electromagnética mediante intercambio de un fotón. Las interacciones débiles vienen mediadas por el intercambio de los bosones intermedios *W* y *Z*⁰ (*b*). Por fin, en *c* se muestra dos quarks que interaccionan fuertemente mediante el intercambio de un gluon.

un límite de la teoría de supercuerdas. Se conocían en aquella época tres tipos de teorías de supercuerdas: Tipo IIA, Tipo IIB y Tipo I. Los dos primeros eran teorías de cuerdas cerradas y bastante análogas entre sí, no obstante poseer dos versiones de supersimetría diferentes. Aunque abarcaban la fuerza gravitatoria, no se entendía cómo podrían obtenerse interacciones mediadas por bosones in-

termediarios cargados, como los que aparecen en el modelo estándar.

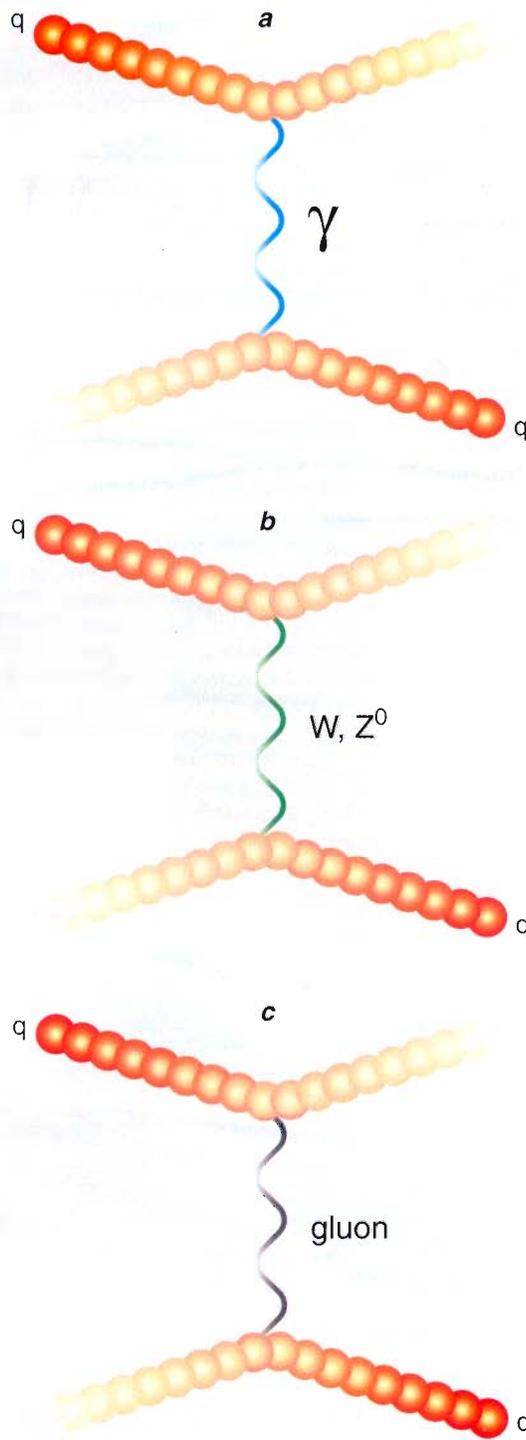
Las cuerdas Tipo I eran, en cambio, teorías de cuerdas cerradas y abiertas. Permitían tener interacciones de la clase deseada. Pero se vio en seguida que tales cuerdas Tipo I parecían inconsistentes con la mecánica cuántica; adolecían de anomalías.

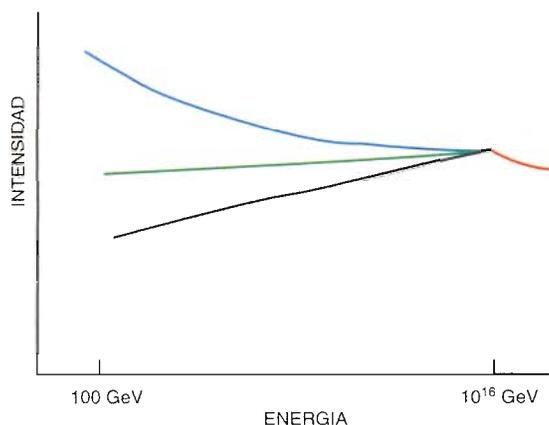
El panorama cambió en 1984, cuando Green y Schwarz demostraron que las teorías de supercuerdas de Tipo I están libres de anomalías para determinada clase de interacciones con bosones intermedios correspondientes a una simetría denominada *SO*(32). Pocos meses después, D. Gross, J. Harvey, E. Martinec y R. Rohm, de la Universidad de Princeton, descubrieron dos nuevas teorías de cuerdas cerradas consistentes y sin anomalías; las bautizaron con los nombres de heterótica *SO*(32) y heterótica $E_8 \times E_8$.

Lo mismo que en las cuerdas Tipo I con simetría *SO*(32), esas dos nuevas teorías comprenden interacciones de tipo gravitatorio e interacciones con bosones intermedios cargados, con simetrías denominadas *SO*(32) y $E_8 \times E_8$, respectivamente; por tanto, podían contener, de una manera consistente, las otras tres interacciones fundamentales de la naturaleza, no sólo la gravitación. Semejante avance provocó que una avalancha de físicos teóricos se lanzaran de lleno al estudio de dichas teorías.

Para comienzos de 1985 se contaba ya con las cinco teorías de supercuerdas consistentes que conocemos: las cuerdas cerradas Tipo IIA, Tipo IIB, heterótica *SO*(32), heterótica $E_8 \times E_8$ y las cuerdas Tipo I (que incluyen cerradas y abiertas). Las cinco teorías se hallan definidas en un espacio-tiempo insólito, con nueve dimensiones espaciales y una dimensión temporal. Si quisiéramos describir el universo físico conocido tomaríamos sólo las tres dimensiones espaciales usuales (arriba-abajo, derecha-izquierda, delante-detrás) más el tiempo.

Ya en los años veinte Theodor Kaluza y Oskar Klein explicaron que podría haber dimensiones extra más allá de las tres habituales en tanto en cuanto estas dimensiones adicionales estén curvadas sobre sí mismas y tengan un tamaño pequeñísimo, de suerte que en la vida





3. A LAS ENERGÍAS de los laboratorios actuales de física de partículas, las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas tienen intensidades diferentes. La teoría cuántica de campos nos permite estimar qué intensidades alcanzarían las tres fuerzas a energías mucho mayores. El resultado de este cálculo muestra que las tres interacciones tienen intensidades comparables a energías 100.000.000.000.000 de veces mayores que las que se obtienen ahora en los laboratorios. En la figura se ha representado la intensidad de cada una de las tres interacciones en función de la energía. La intensidad de las tres fuerzas se iguala a energías del orden de 10^{16} gigaelectronvolt. (Un Gev vendría a ser la energía liberada en un proceso ideal de desintegración de un átomo de hidrógeno en pura energía, de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$.)

cotidiana (o incluso con el mejor microscopio o acelerador de partículas que uno pueda construir) sea imposible percibirse de la existencia de estas dimensiones adicionales. Al proceso físico por el cual seis de las nueve dimensiones espaciales de las supercuerdas se curvan sobre sí mismas tomando ta-

maños mínimos se le llama compactación.

El fenómeno de la compactación presenta propiedades y consecuencias importantes. Existe una simetría llamada dualidad-T bajo la cual son equivalentes dos cuerdas cerradas con una dimensión compacta de radio R o $1/R$ (véase el recuadro). Cuando se aplica esta simetría de dualidad-T a las cinco supercuerdas, se encuentra una interesante unificación: la teoría Tipo IIA con una dimensión compacta con radio R es equivalente a la teoría Tipo IIB con una dimensión de radio $1/R$; hay, pues, una dualidad-T entre estas dos teorías. Igualmente se advierte que la cuerda heterótica $SO(32)$ con una dimensión de radio R es T-dual a la otra cuerda heterótica $E_8 \times E_8$ con una dimensión de radio $1/R$. Vemos, por tanto, que, de las cinco supercuerdas existentes, la dualidad-T vincula dos pares de ellas y quedan sólo tres teorías independientes: Tipo I, Tipo II y heterótica.

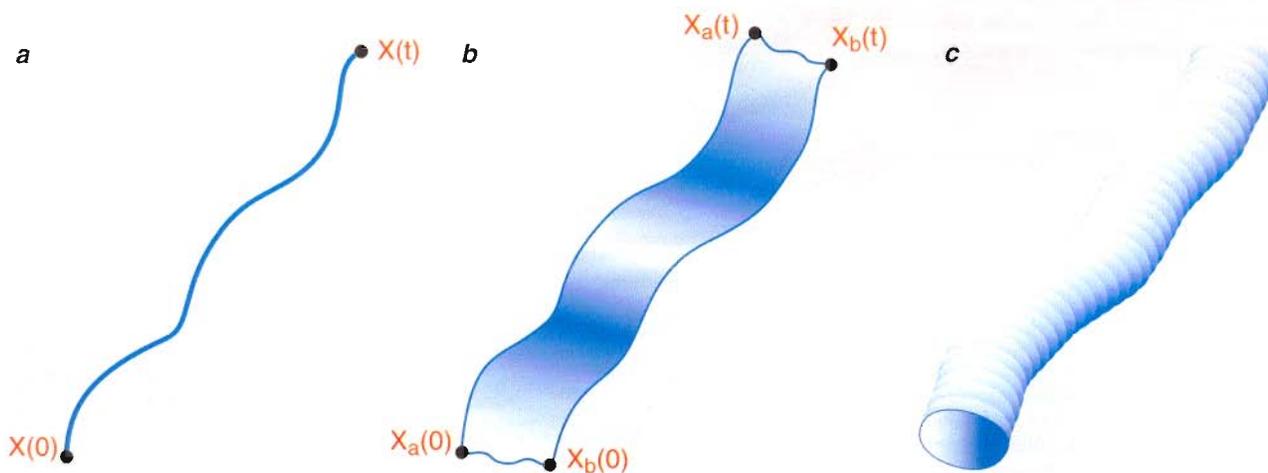
En 1990 A. Font, D. Lüst, F. Quevedo y el autor de estas líneas propusimos la existencia de una nueva simetría de dualidad en la teoría de cuerdas: la dualidad-S (véase el recuadro). Ya hemos indicado que la intensidad de las interacciones se mide en términos de las constantes de acop-

lo. En teoría de cuerdas, la intensidad de las interacciones no viene dada por constantes numéricas, sino por una variable continua que lleva por nombre dilatón, ϕ . La dualidad-S es una simetría de la teoría bajo el intercambio de ϕ y $1/\phi$. Ello implica que una teoría que opere con interacción de intensidad débil (ϕ pequeño) equivale a la teoría que interaccione con fuerte intensidad, pues $1/\phi$ sería entonces grande. Se aprecia así una manifiesta analogía con la dualidad-T, salvo que ahora no se trata del radio R de una dimensión compacta, sino de la misma intensidad de las interacciones. Se trata de una equivalencia entre interacciones muy intensas y poco intensas.

La propuesta de la dualidad-S de 1990 fue acogida con interés, no exento de escepticismo. Sin embargo, los posteriores trabajos de A. Sen, del Instituto Tata de Bombay, y Schwarz, en los que verificaron que ciertos estados de monopolo magnético predichos por la dualidad-S existían en las ecuaciones para las cuerdas heteróticas, fueron disipando la reticencia.

Al cambiar la actitud de la comunidad científica hacia la existencia de dualidades entre acoplo fuerte y acoplo débil, conjeturas y desarrollos teóricos llevaron a la segunda revolución de la teoría de cuerdas en 1995 (la primera fue la de 1985).

Es difícil describir en orden cronológico todos los conceptos sobre teoría de cuerdas que han cambiado desde hace tres años. Nos limitaremos a exponer los resultados que guardan una relación más directa con



4. UNA PARTICULA en movimiento describe una línea según se desplaza (a). Una cuerda abierta de extremos X_a y X_b describe una cinta al moverse (b). Los extremos X_a y X_b tienden

a unirse, debido a la tensión de la cuerda, y sólo cuando la cuerda tiene suficiente energía los extremos llegan a separarse. Una cuerda cerrada (c) describe, cuando se desplaza, un tubo.

Dualidad-T

El caso más sencillo de compactación es aquel en que una sola dimensión está curvada formando un círculo microscópico de radio R . Si R es suficientemente pequeño, no notaremos la existencia de esta dimensión. Consideremos ahora, por ejemplo, una de las cuerdas cerradas con esta dimensión compactada. Se puede ver que los posibles valores de los cuadrados de las energías E de las excitaciones de la cuerda en esta situación tendrán la forma:

$$E^2 = \frac{m^2}{R^2} + n^2 T^4 R^2$$

donde n y m pueden tomar cualquier valor entero $m, n=0, \pm 1, \pm 2, \text{ etc.}$ y R es el radio del círculo en el que está compactada la dimensión extra. T es la tensión de la cuerda.

En esta fórmula el primer término (proporcional a $1/R^2$) no es especial de teoría de cuerdas. La mecánica cuántica nos enseña que las energías de las partículas, cuando han de vivir en un espacio de tamaño finito, son múltiplos enteros del inverso del tamaño (R) de dicho espacio finito. Esto es análogo a las frecuencias de vibración de las cuerdas de una guitarra, que guardan también relación con la longitud de las cuerdas.

El segundo término (proporcional a R^2) es puramente *cuerdístico*, como revela el hecho de que aparezca la tensión de la cuerda T . Representa la posibilidad de que la cuerda cerrada esté enrollada n veces alrededor del círculo de radio R en que se halla curvada la dimensión ex-

tra. A mayor radio R , la cuerda enrollada mostraría a su vez tensión creciente; por tanto, la energía aumenta al hacerlo R , lo que revela la fórmula. Es como si tuviéramos enrollada una goma elástica alrededor de un cilindro cuyo radio aumentara: la goma sufriría una tensión progresiva (energía).

La fórmula presenta una curiosa propiedad de simetría observada por K. Kikkawa y M. Yamanaka en 1984. Para simplificar las cosas tomemos unidades de energía en las que se tenga $T=1$. La fórmula sigue teniendo el mismo aspecto si hacemos el siguiente intercambio:

$$m \leftrightarrow n; R \leftrightarrow \frac{1}{R}$$

Desde un punto de vista matemático, esto es una mera curiosidad, pero desde un punto de vista físico la invariancia de la fórmula en este intercambio indica que las energías de las excitaciones de una cuerda, cuando hay una dimensión extra de radio R , es la misma que la de una cuerda cuando el radio es $1/R$. No ya las energías, sino todas las propiedades físicas de ambos sistemas, uno con una dimensión extra de radio R y otro con radio $1/R$, son exactamente las mismas. Una equivalencia que llama la atención, pues cuando R aumenta $1/R$ decrece; parece, en efecto, contradecir la experiencia de la vida diaria, que nos dice que las cosas pequeñas difieren de las grandes. Para una cuerda ello no es así. La simetría en cuestión constituye el caso más sencillo de lo que se ha venido en llamar dualidad-T.

Dualidad-S

En teoría de cuerdas la intensidad de las interacciones no viene dada por constantes numéricas, sino por una variable continua denominada dilatón, ϕ . Se pueden estudiar las ecuaciones e interacciones de una supercuerda (por ejemplo, la heterótica) con las seis dimensiones extra compactadas en círculos de radio R muy pequeños. Nos encontramos entonces con que R y ϕ aparecen de forma muy análoga en las ecuaciones. Ello parecería indicar algún tipo de parentesco entre R y ϕ . Sin embargo, no se ve a primera vista qué analogía pueda darse entre una cantidad R que mide el radio de una dimensión extra y una cantidad ϕ que mide la intensidad de las interacciones. Una posibilidad sugerente es que hubiera siete dimensiones extra, en vez de seis. En este caso la teoría en total tendría $7+3+1=11$ dimensiones espaciotemporales.

En tal situación el dilatón aparece como el radio R_{11} de la dimensión extra añadida. En ese marco cabría entender la similitud entre los valores R y el dilatón ϕ : este último sería otro radio R_{11} más. Si la analogía entre R y el dilatón ϕ fuese cierta, deberíamos admitir la existencia de una simetría en la que $\phi \leftrightarrow 1/\phi$, como ocurría con dualidad-T. Sin embargo, esta nueva hipótesis parece tener bastante más alcance que la dualidad-T. En efecto, si la teoría es invariante bajo el intercambio de ϕ y $1/\phi$, ello quiere decir que la teoría en interacción débil (ϕ pequeño) es equivalente a la teoría en interacción fuerte, pues $1/\phi$ sería ahora grande. Una sorprendente equivalencia entre interacciones muy intensas y poco intensas.

En 1975 Claus Montonen y David Olive, del CERN, habían considerado la posibilidad de una simetría análoga, aunque no en teoría de cuerdas. Estudiaban un tipo de teoría de campos en la que había a la vez partículas con carga eléctrica q_e normales (un electrón, por ejemplo) y partículas compuestas con carga magnética ele-

mental q_m , los llamados monopolos magnéticos. Sugirieron que la física de cargas eléctricas con constante de acoplamiento grande era equivalente a la física de monopolos magnéticos con constante de acoplamiento pequeña. Esta dualidad de Olive-Montonen pasó inadvertida. En particular, la teoría por ellos considerada no parecía tener nada que ver con las teorías de las interacciones físicas conocidas.

Las analogías con dualidad-T y la existencia de estudios precedentes generalizándolo al caso con supersimetría parecía dar fuerza a la hipótesis de dualidad-S. Las analogías llegaban más lejos. En esas teorías con cargas eléctricas y magnéticas hay un tipo de partículas estables cuyas masas vienen expresadas así:

$$M^2 = q_e^2 \alpha + \frac{q_m^2}{\alpha}$$

donde q_e y q_m son las cargas eléctrica y magnética de la partícula, respectivamente, y α representa la constante de acoplamiento que da la intensidad de la interacción. El primer término a la derecha de la ecuación corresponde a las partículas con carga eléctrica no nula y el segundo a las partículas con carga magnética no nula. Salta a la vista el parecido entre esta fórmula y la observada para la dualidad-T. En teoría de supercuerdas, en vez de α , se tiene el dilatón ϕ ; los valores de q_e, q_m son números enteros.

Todos los argumentos y analogías mencionados nos llevaron a proponer en 1990 la existencia de una simetría en ciertas teorías de cuerdas bajo la cual se intercambia:

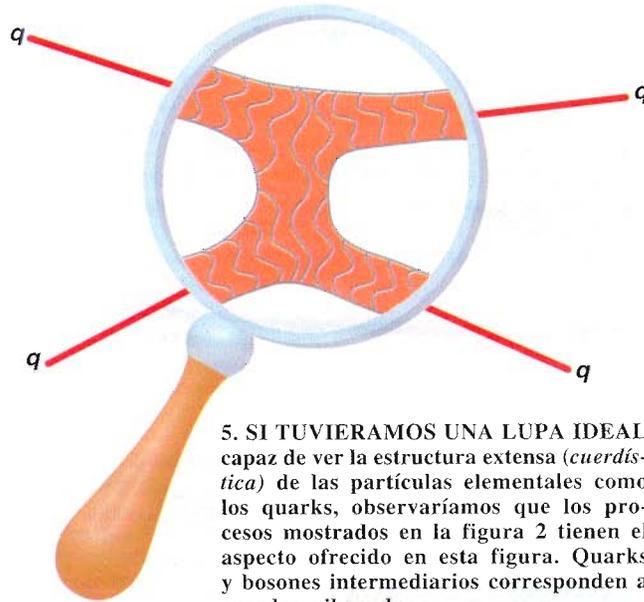
$$q_e \leftrightarrow q_m; \phi \leftrightarrow \frac{1}{\phi}$$

De nuevo, y de forma totalmente análoga al caso de dualidad-T, la fórmula para las masas de estas partículas queda invariante bajo la nueva dualidad.

la unificación entre teorías de cuerdas. En este contexto los trabajos pioneros de M. Duff, P. Townsend y C. Hull, sistematizados y completados por E. Witten en 1995, fueron muy importantes.

Las nuevas dualidades-S reducen el número de teorías independientes. Las cuerdas Tipo I son duales-S a la cuerda heterótica $SO(32)$. Es decir, una cuerda Tipo I con acoplamiento ϕ pequeño es equivalente a la cuerda heterótica $SO(32)$ con acoplamiento $1/\phi$ (acoplamiento grande). Esta dualidad es quizá la menos sorprendente, pues en ambas teorías los bosones intermedios poseen la misma simetría $SO(32)$. Por consiguiente, hay en total dos teorías de cuerdas independientes: Tipo II y heterótica; las demás son duales-T o son duales-S a estas dos.

No acaban aquí las relaciones entre teorías. Se ha descubierto que la teoría IIB es S-dual a sí misma, es autodual. La teoría IIA, sin embargo, presenta una sorpresa: con acoplamiento débil es una teoría de cuerdas en 10 dimensiones, pero conforme aumenta el acoplamiento se revela una dimensión espacial extra desconocida, y se pasa a una teoría en $10+1$, es decir, 11 dimensiones. La teoría IIA corresponde



5. SI TUVIERAMOS UNA LUPA IDEAL capaz de ver la estructura extensa (cuerdística) de las partículas elementales como los quarks, observaríamos que los procesos mostrados en la figura 2 tienen el aspecto ofrecido en esta figura. Quarks y bosones intermedios corresponden a cuerdas vibrando.

a una teoría en 11 dimensiones, en la que una de las dimensiones espaciales queda compactada en un círculo de radio $R_{11} = \phi$. Cuando el acoplamiento ϕ es pequeño, el tamaño de la dimensión extra R_{11} resulta muy pequeño y la teoría es aproximadamente de 10 dimensiones. Si queremos estudiar la teoría IIA con acoplamiento ϕ grande, el radio R_{11} crece, la dimensión extra se torna visible y pasamos a una teoría en 11 dimensiones. He aquí, pues, un nuevo fenómeno sorprendente: según la intensidad de las interacciones (acoplamiento ϕ grande

o pequeño) aparecen o desaparecen dimensiones espaciales extra.

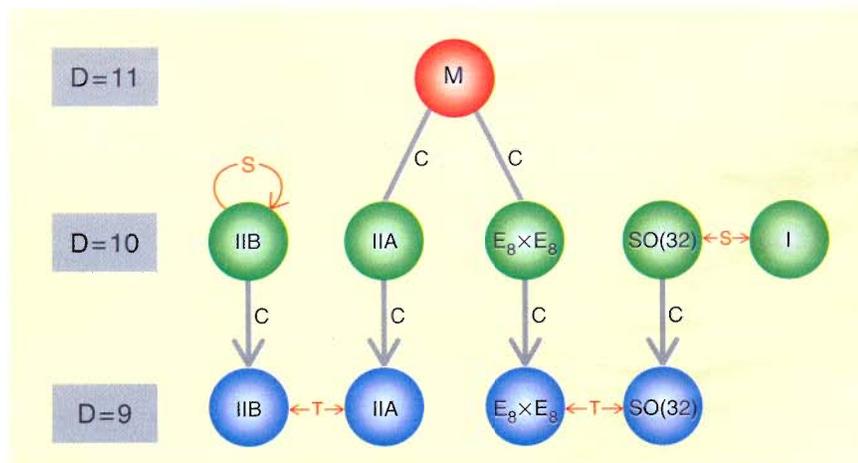
Queda por responder a la misma pregunta, aunque aplicada a la cuerda heterótica. Consideremos la cuerda heterótica $E_8 \times E_8$. Sabemos que, para acoplamiento ϕ pequeño, es una teoría de cuerdas en 10 dimensiones. Cuando el acoplamiento ϕ aumenta, se manifiesta algo muy parecido al caso Tipo IIA, según observaron en 1995 Horava y Witten. Al aumentar el acoplamiento ϕ se revela la existencia de una dimensión extra de radio $R_{11} = \phi$ que aumenta con ϕ . La única diferencia respecto a la teoría Tipo IIA estriba en que la dimensión extra no está

enrollada en una circunferencia, sino que se trata de un segmento de longitud R_{11} con dos extremos.

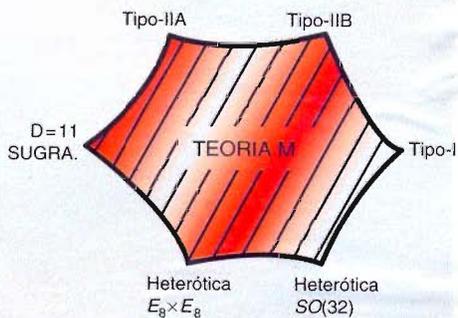
En la teoría Tipo IIA y en la heterótica $E_8 \times E_8$ cuando el acoplamiento ϕ se hace grande se obtiene una teoría en $10+1$, o sea, en 11 dimensiones. La dualidad-T conecta estas dos teorías con las Tipo IIB y heterótica $SO(32)$, respectivamente; la dualidad-S conecta esta última con las cuerdas Tipo I. En último término, las cinco teorías de cuerdas se hallan de una manera u otra conectadas con una teoría en 11 dimensiones. A esta misteriosa teoría se la denomina teoría M. El significado de la letra M es polivalente: M de mágica, madre, membrana y otros.

No se dispone de una formulación completa de qué sea la teoría M. Se sabe que es una teoría en 11 dimensiones que encierra en su formulación membranas, en vez de cuerdas. Las membranas son una generalización de la noción de cuerda donde el objeto que vibra no tiene una dimensión, como la cuerda, sino dos, como el parche de un tambor.

Otra propiedad fundamental de la teoría M es que, si se examina su contenido de partículas sin masa, se ve que es igual al de cierta teoría conocida desde finales de los años setenta, si bien desechada en su día por considerársela inviable para adquirir rango de teoría unificada. Nos referimos a la teoría de supergravedad en 11 dimensiones. La profundización reciente en la misma ha permitido reinterpretar su signifi-



6. EXISTEN CINCO TIPOS DIFERENTES de teorías de supercuerdas definidas en 10 dimensiones: las cuerdas Tipo IIA, Tipo IIB, Tipo I, heterótica $E_8 \times E_8$ y heterótica $SO(32)$. Si se desciende a nueve dimensiones compactando una dimensión, las dos cuerdas Tipo II son equivalentes (T-duales entre sí). También son T-duales entre sí las dos cuerdas heteróticas $E_8 \times E_8$ y $SO(32)$. Por otra parte, las cuerdas Tipo I y $SO(32)$ son S-duales entre sí. Por fin, las cuerdas Tipo IIA y la heterótica $E_8 \times E_8$ se pueden obtener a partir de la teoría M, definida en 11 dimensiones. Pueden conseguirse, pues, todas las teorías a partir de una teoría M, única.



7. LA TEORÍA M es una teoría unificada de todas las supercuerdas y de la teoría de supergravedad en 11 dimensiones. En diferentes límites de esta única teoría (denotados simbólicamente por picos en la figura) se reobtienen esas seis teorías. La teoría M está aquí representada como un fragmento de superficie de forma irregular. En esa superficie cada punto indica diferentes geometrías de la teoría M.

cado y relación con la teoría de cuerdas.

La teoría M designa la estructura que subyace a la teoría de cuerdas y sus extensiones. En razón de la geometría de las 10 dimensiones espaciales de la teoría, se reobtienen como caso particular las cinco teorías de supercuerdas existentes, así como la teoría de supergravedad en 11 dimensiones. Las simetrías de dualidad S y T dan relaciones entre diversas configuraciones de la teoría M. Es teoría única en muchos aspectos. Las conexiones entre sus subteorías presentan una autoconsistencia tal, que es difícil pensar en una teoría alternativa de estas características. Estamos quizás ante la candidata más firme jamás construida para describir las interacciones fundamentales de la naturaleza. Pero quedamos todavía muy lejos de entender toda su compleja estructura. El desentrañar los secretos que encierra la teoría M será, sin duda, uno de los objetivos de la física fundamental en los próximos años.

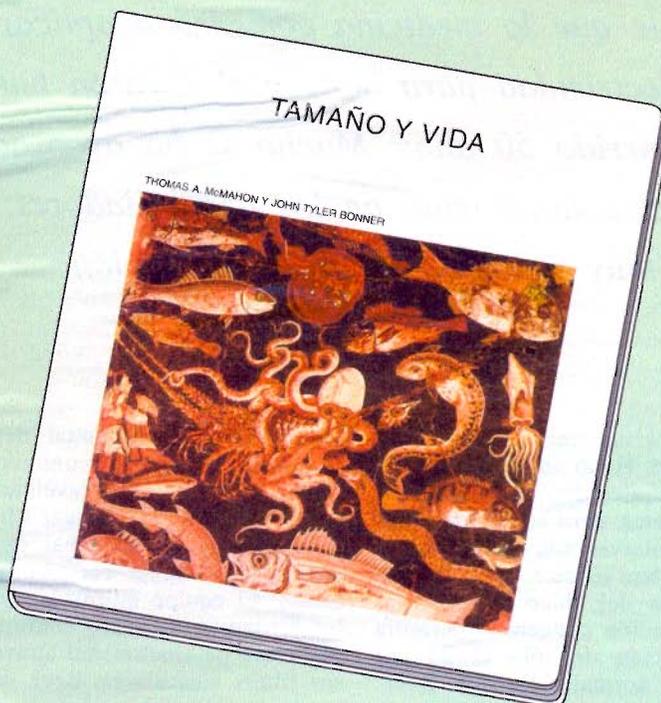
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

UNITY FROM DUALITY. P. Townsend en *Physics World*, página 41; septiembre 1995.

EXPLICACIÓN DEL TODO. Madhusree Mukerjee en *Investigación y Ciencia*, marzo 1996, páginas 70-77.

STRING DUALITY: A COLLOQUIUM. J. Polchinski en *Review of Modern Physics*, vol. 68, pág. 1245; 1996.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN



Un volumen de 22 x 23,5 cm y 255 páginas, profusamente ilustrado en negro y en color.

TAMAÑO Y VIDA

Los autores, biólogo uno y el otro ingeniero, describen las consecuencias que del tamaño y la forma se derivan para los organismos, empezando por el sentido mismo del tamaño en la selección natural. *Tamaño y vida* analiza por qué la talla impone restricciones específicas a la forma (y ésta condiciona a aquella), por qué ciertos diseños resultan físicamente imposibles para los organismos grandes y cómo la selección natural y la física se alían para eliminar los menos dotados.



Prensa Científica, S. A.