La búsqueda de los constituyentes últimos de la materia

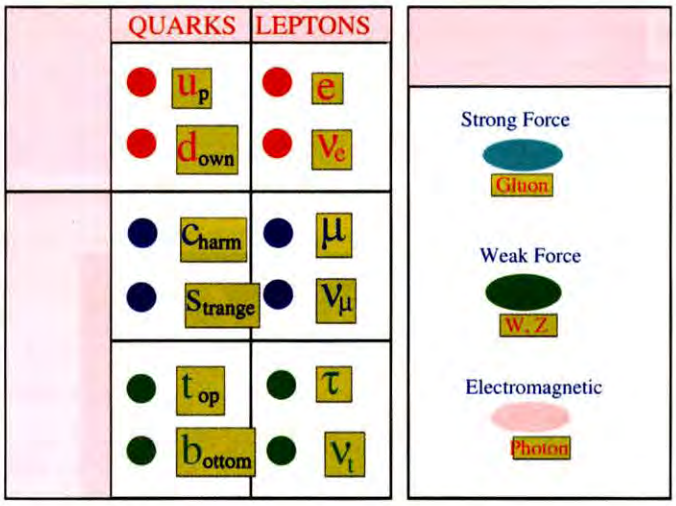
Luis E. Ibáñez

En estas líneas presento una breve introducción a la situación actual del programa de búsqueda de una teoría unificada de las interacciones entre partículas elementales.

1. Las sombras en nuestra comprensión presente

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 interaciones fundamentales en la naturaleza: Fuerzas Nucleares, Débiles, Electromagnéticas y Gravitatorias. Así mismo hemos aprendido como toda la materia conocida está compuesta de partículas elementales: quarks y leptones. El *Modelo Standard* 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 solo esto, a nivel macroscópico el modelo del "big-bang", basado en la gravitación de Einstein, permite entender un buen número de propiedades cosmológicas. No es mi propósito en estas líneas describir en detalle todos estos éxitos ni como aparecieron históricamente, pues muchos de estos temas ya han sido tratados en otros artículos en esta revista. Me voy a detener en justamente todo lo contrario, enumerar algunos de los problemas pendientes de solución en la Física fundamental y en los intentos en los últimos tres decenios por intentar avanzar en la comprensión de los últimos constituyentes de la materia. Para ello resumamos brevemente algunos de los aspectos generales del Modelo Standard.

A día de hoy el resumen de nuestro conocimiento contrastado experimentalmente sobre los constituyentes de la materia está resumido en la Tabla. Esta es la "tabla de Mendeleiev" del siglo XXI. La materia usual está toda constituida por dos tipos de quarks, up y down y dos tipos de leptones: el electrón y su neutrino ν_e. Estas 4 partículas forman lo que se llama la "primera generación" de quarks y leptones. Además existe una segunda generación (quarks c,s; el muón y su neutrino ν_μ) y una tercera (quarks t,b; el τ y su neutrino ν_τ). Estas dos últimas generaciones son partículas inestables y solo se han detectado por producción en aceleradores o bien (algunas de ellas) en rayos cósmicos. Resultados en aceleradores y cosmológicos parecen indicar que solo existen estas 3 generaciones de partículas. Además, se sabe que estas 3 generaciones son elementales en el sentido de que no están compuestas por otras mas fundamentales, al menos con la precisión que permiten los aceleradores actuales. Estos componentes fundamentales de la materia interaccionan por el intercambio de los bosones intermediarios. 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. Estas interacciones vienen



descritas mediante el formalismo de la Teoría Cuántica de Campos. Las teorías asociadas a las interacciones Fuertes y Débiles tienen la forma de generalizaciones no-Abelianas del electromagnetismo de Maxwell. Son teorías de "gauge" basadas en los grupos de simetría $SU(3)$ y $SU(2)$ respectivamente. Como decíamos, a día de hoy todos los datos experimentales han confirmado esta teoría, el Modelo Standard, con gran precisión.

Hasta ahora he dado sólo las buenas noticias. Pasemos ahora a dar las malas. He dicho anteriormente que solo hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza. Sin embargo esto no es del todo cierto. Si esto fuera así el Modelo Standard describiría un universo muy poco parecido a lo observado (de hecho no estaríamos aquí para poder observarlo). En realidad el Modelo Standard incluye una nueva partícula vital para que las partículas tengan masas no nulas, el llamado bosón de Higgs, H. A diferencia de los bosones intermediarios, H tiene spin=0 e interacciones directas (tipo Yukawa) con los quarks y leptones, así como un potencial escalar. Las masas de todas las partículas aparecen debido a la existencia de un valor clásico no nulo $\langle H\rangle \neq 0$ de este campo escalar. La existencia de esta partícula no ha sido verificada todavía experimentalmente y su búsqueda es una de las motivaciones principales para el experimento LHC en el CERN, que está previsto empiece a funcionar en 2007. ¿Porqué es esto una mala noticia? La razón es que, a diferencia de las interacciones "gauge" del modelo standard las nuevas interacciones del Higgs no vienen prefijadas por algún principio general de simetría (como la invariancia gauge) sino que contienen parámetros de acoplo arbitrarios. Ello hace que las masas de los quarks y leptones observadas

experimentalmente no puedan ser predichas por la teoría. Lo único que nos ofrece el Modelo Standard en este tema es una exitosa parametrización, pero nada mas. El sector de Higgs del Modelo Standard sufre además un problema de naturalidad que comento mas abajo.

Vemos pues que el origen de la masa de todas las partículas está mal comprendido. Pero no es la única pregunta que los físicos nos hacemos. La misma estructura del Modelo Standard es un poco chocante: ¿porqué existen 3 generaciones de quarks y leptones? Con la primera generación basta para construir toda la materia observada, ¿porqué ese dispendio por parte de la naturaleza? ¿Porque hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza y no mas o menos? ¿Y porqué unas son mucho mas fuertes que otras? ¿Cual es el origen de este sector extraño, el sector de Higgs, necesario para la generación de las masas pero de naturaleza tan especial? Hay otros problemas mas relacionados con la historia del universo: ¿porque hay mucha mas materia que antimateria (en un factor 10^{10}) en el universo si el Modelo Standard parece tener invariancia materia-antimateria? E incluso cuestiones mas básicas como: ¿porqué existen 3 dimensiones espaciales y una temporal y no mas o menos? ¿Es el espacio-tiempo 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 mas difícil de resolver. Mientras que para las interacciones Fuertes, Débiles y Electromagnéticas existe un formalismo relativista y cuántico a la vez (la Teoría Cuántica de Campos) ese no es el caso de la gravitación. A fecha de hoy no existe una teoría cuántica de la gravitación consistente en todos sus extremos.

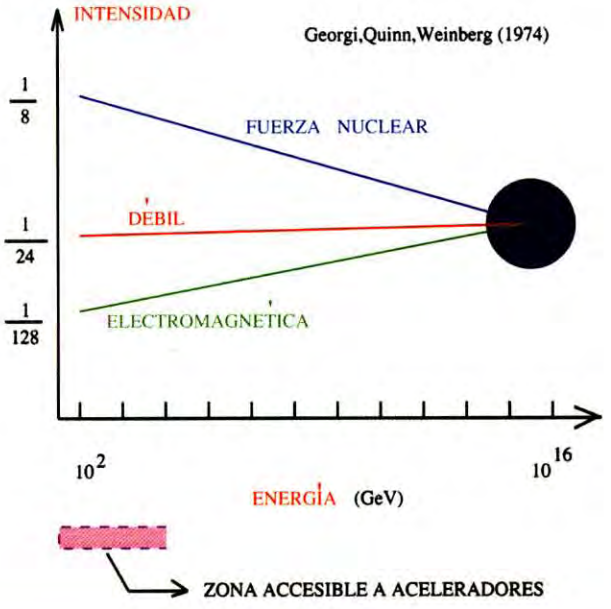


Figura 1

2. Intentando una unificación

La historia de la Física nos ha dado muchos ejemplos de que la búsqueda de una unidad por debajo de la aparente diversidad de las interacciones físicas es una buena idea. Ejemplos clásicos son la unificación de la gravitación terrestre y la planetaria (Newton) y la Electricidad y el Magnetismo (Maxwell). Mas recientemente se ha comprobado como las interacciones Débiles y Electromagnéticas son caras de una misma teoría "Electro-Débil" (Glashow, Salam, Weinberg, 1967). En la última parte de su vida el mismo Einstein intentó con tesón la construcción de una teoría unificada de la gravitación y el electromagnetismo. En perspectiva hoy sabemos que tal intento de unificación estaba abocado al fracaso, pues sabemos que, por ejemplo, el electromagnetismo esta de hecho unificado con las interacciones Débiles. Sin embargo en la época en que Einstein lo intentó era la opción lógica: el electromagnetismo y la gravitación eran las únicas conocidas en profundidad.

La búsqueda de una estructura unificada subyacente a las teorías físicas no es pues un capricho estético, es la misma naturaleza la que nos muestra sus tendencias unificadoras. Desde un punto de vista actual, las interacciones Fuertes, Débiles y Electromagnéticas son descritas las tres por el mismo formalismo como teorías cuánticas de campos "gauge". Es por tanto natural preguntarse si tiene algún sentido decir que estas tres teorías podrían estar unificadas. El obstáculo mas obvio a esa posibilidad es la disparidad entre la intensidad de dichas tres interacciones. La interacción Electromagnética es alrededor de mil veces mas débil que las interacciones Fuertes y unas mil veces mas fuerte que las interacciones Débiles. Sin embargo en la Teoría Cuántica de Campos la intensidad de las interacciones ("constantes de estructura fina") dependen de la energía a la que se mida (Gel-Mann, Low 1954; Callan, Symanzik 1970). Utilizando este hecho, Georgi, Quinn y Weinberg calcularon en 1974 que, extrapolando las intensidades de las tres interacciones a energías muy altas, tendían a unirse para valores del orden de 10^{15} Giga-eV (Fig. 1). A dichas energías extremadamente altas las tres interacciones tendrían intensidades parecidas y podría quizás existir alguna teoría unificada de estas tres interacciones. Modelos de esta clase fueron propuestos por Pati y Salam (1973) y Georgi y Glashow (1974) bajo el ambicioso título de "Teorías de Gran Unificación" (GUTs). La mas sencilla de ellas tiene como grupo de simetría gauge el grupo de Lie $SU(5)$, que es el mas pequeño que contiene como subgrupo el de las simetrías gauge del Modelo Standard , $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. La idea es que la simetría $SU(5)$ solo es exacta a partir de una energía muy alta del orden de 10^{15} Giga-eV. Por debajo de esa energía la teoría se rompe espontáneamente y sólo la simetría mas pequeña del Modelo Standard se observa a las energías habituales.

Aunque este esquema parecía muy prometedor, las teorías mas naturales de este tipo tienen diversos problemas. Tales GUTs mezclan en un solo esquema quarks y leptones y por lo tanto pueden ocurrir procesos de desintegración que violan la conservación del número bariónico y leptónico, como por ejemplo $p^+ \rightarrow \pi^0 e^+$. La vida media del protón se calcula en este GUT que es del orden de 10^{29} años. Para comprobar si el protón se desintegra con esta vida media no hace falta esperar 10^{29} años. Basta con coger 10^{29} protones y esperar un año. Tales experimentos se han llevado a cabo con la conclusión de que la vida media del protón es al menos del orden de 10^{33} años, y el modelo $SU(5)$ mas sencillo esta descartado. Por si fuera poco, cuando los datos experimentales de los valores de las tres constantes de estructura fina fueron mejorando, se vio que su extrapolación a altas energías no se juntan en un solo punto, como debiera de ocurrir en el caso de una unificación. A pesar de ello las GUTs contienen algu-

nos aspectos interesantes que revelan que quizá alguna modificación pudiera tener sentido. Por ejemplo, dan una explicación de por qué las cargas eléctricas del protón y el electrón son iguales y opuestas. Esto, que se da por hecho cuando describimos el átomo de Hidrógeno a nuestros alumnos en la universidad, es algo que requiere una explicación y las GUTs nos proporcionan una elegante respuesta. En un GUT como $SU(5)$ la carga eléctrica es un generador mas de dicho grupo. Los generadores de $SU(5)$ (como las matrices de Pauli para $SU(2)$) son matrices de traza nula, y esa condición da lugar a la expresión $Q(e^-)+3Q(\overline{d}) = 0$, donde $Q(e^-)$ y $Q(\overline{d})$ son las cargas del electrón y del anti-quark de tipo "down". De ahí se desprende que $Q(\overline{d}) = 1/3Q(e^-)$. De forma análoga se obtiene que $Q(u) = -2/3Q(e^-)$ para los quarks de tipo "up". Como el protón está constituido por dos quarks up y uno down, necesariamente dentro de este esquema las cargas del protón y el electrón son exactamente las mismas y de signo opuesto.

3. El problema de la jerarquía de escalas. Supersimetría

Mencionaba arriba como la partícula de Higgs ("el Higgs", para abreviar) sufre un cierto problema de naturalidad. La idea esencial es que una partícula de spin cero como esta tiende a adquirir debido a correcciones cuánticas una masa enorme (incluso infinita). Esto no es así para los fermiones como el electrón, un fermión sin masa permanece así incluso después de las correcciones cuánticas. Pero si que lo es para la partícula de Higgs que tiene spin cero. Esta enorme masa viene de la probabilidad cuántica de que el Higgs se transforme en un par de partículas del Modelo Standard en un tiempo infinitesimal, para volver a convertirse en el Higgs inicial. Esto se muestra esquemáticamente en la Fig.(2-a). Si el Higgs es muy, muy masivo, desaparece a todos los efectos de la teoría y no puede pues ser el origen de todas las masas observadas. Este es el llamado problema de la jerarquía de escala, llamado así por que sin un Higgs no entendemos como se genera la escala de masas de las partículas. Una de las posibilidades mas atractivas para poder solventar este problema es hacer una extensión del Modelo Standard capaz de contener una nueva simetría: la Supersimetría. Se trata de una simetría que asocia a cada bosón un fermión con spin inferior o superior en 1/2 al del bosón inicial. Así, si existe el fotón (spin=1) debe existir el *fotino* (spin=1/2), y el electrón tiene que tener un compañero de spin=0, el *selectrón*. El Higgs tiene un compañero de spin=1/2, el *Higgsino*, y asi 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, tenemos que incluir en el cálculo todas estas nuevas partículas (Fig. 2-b). Lo interesante es que un fermión (p.e. un electrón) y su compañero (el selectrón) contribuyen la misma cantidad pero con signo opuesto a la masa del Higgs. De manera que hay una cancelación total de las correcciones cuánticas a la masa del Higgs y el problema de la jerarquía de escalas es resuelto de una forma elegante.

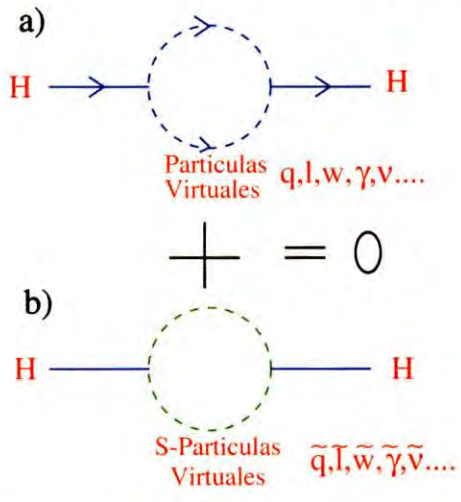


Figura 2

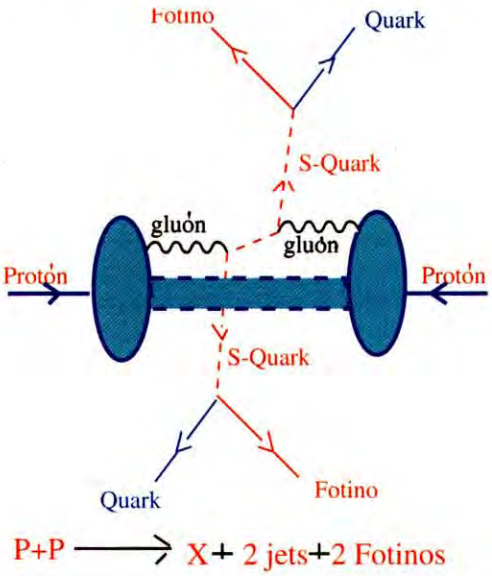


Figura 3

Experimentalmente no hay trazas hasta este instante de la existencia de ninguna partícula supersimétrica. Sin embargo hay razones teóricas para esperar que la masa de dichas nuevas partículas debe de ser bastante mayor que la de las partículas del Modelo Standard , del orden de 200-1500 Giga-eV. Tales energías serán alcanzables en el acelerador LHC del CERN, que nos permitirá así verificar o no si la Supersimetría es la respuesta correcta al problema de la jerarquía de escalas. Existe sin embargo algún indicio de que la idea de una versión supersimétrica del Modelo Standard es buena. Si volvemos a hacer el cálculo de la extrapolación de las tres constantes de estructura fina de las tres interacciones del Modelo Standard , pero ahora incorporando las nuevas partículas supersimétricas, las tres se juntan con una gran precisión para energías del orden de 10^{16} GeV (Georgi, Dimopoulos; Ibáñez, Ross 1981). Ello parece substanciar la idea de una unificación supersimétrica a altísimas energías. Por otra parte, al calcular la vida media de desintegración del protón en estas teorías se obtienen valores consistentes con los limites experimentales presentes. En cualquier caso, en pocos años, con la entrada en funcionamiento del LHC podremos salir de dudas. Si la supersimetría es la solución al problema de las jerarquías, será posible producir y detectar partículas supersimétricas en dicho acelerador. Como muestra la Fig. 3, en el LHC se colisionarán protones a alta energía y si existen, por ejemplo, los squarks, se producirán a

pares. Dichos squarks se desintegrarían cada uno a quark+fotino y, aparte de otras partículas no relevantes en el proceso (denotadas por X en la figura) al final se observarían dos chorros (jets) de partículas provinientes de los quarks y la no conservación (solo aparente) del momento lineal y la energía. Esta aparente no conservación se debería a los fotinos que interaccionan muy débilmente y no serían pues vistos en los detectores. Este tipo de señales experimentales están entre las que se buscarán con mayor interés en el acelerador LHC a partir de su puesta en funcionamiento en 2007. Hay otra interesante consecuencia de la supersimetría. La teoría predice la existencia de una nueva partícula estable en la naturaleza (mas allá del protón y el electrón), los *neutralinos* (relacionados con fotinos y Higgsinos). Los cálculos establecen que dichos neutralinos pueden estar presentes en el universo en una cantidad consistente con la cantidad de materia oscura necesaria para explicar datos astrofisicos y cosmológicos.

A pesar de todos estos aspectos atractivos, hay que señalar, sin embargo, que la Supersimetría no nos dice nada sobre muchos de los problemas del Modelo Standard que resumíamos antes. En particular, no aborda de manera específica problemas como por ejemplo el origen de los valores de las masas de los quarks y leptones. Es posible que se trate de un paso más en la buena dirección, pero ciertamente no se trata de una teoría unificada completa capaz de responder a todas nuestras preguntas. Tampoco nos da ninguna solución para el problema de la construcción de una teoría cuántica de la gravitación. Para este problema ha surgido, sin embargo, en los últimos veinte años una teoría muy prometedora: la Teoría de Cuerdas.

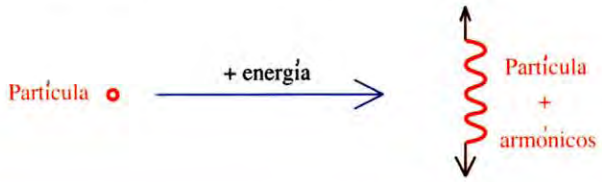


Figura 4

4. Las partículas como vibraciones de una cuerda

A diferencia de las otras tres interacciones fundamentales, la teoría de la gravitación presenta inconsistencias a nivel cuántico. Cálculos en Teoría Cuántica de Campos que involucran 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 en la Física del siglo XX. Muchos físicos piensan que hay que abandonar la idea de que los constituyentes fundamentales de la materia son partículas sin ninguna estructura interna. Es el carácter estrictamente puntual que la teoría supone para las partículas la que parece dar lugar a los infinitos. Esta es la idea fundamental que subyace en las Teorías de Supercuerdas.

Las Teorías de Supercuerdas postulan que a muy altas energías, donde la unificación de las cuatro interacciones fundamentales ocurre, 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 (Fig. 4). La idea es que las partículas observadas corresponden a los modos de vibración mas ligeros de la cuerda, y son esos 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 mas interesantes de la teoría de cuerdas es que predice la existencia de una partícula de "spin 2" sin masa : el gravitón. Se puede decir que la consistencia de la teoría requiere la existencia de la gravitación. Mientras las partículas del Modelo Standard se asocian con los modos mas ligeros de cuerdas abiertas, el gravitón aparece como el estado de vibración mas ligero de la cuerda cerrada (Fig. 5). Por otra parte el carácter extenso (no puntual) de la cuerdas hace que desaparezcan los infinitos al combinar gravitación y mecánica cuántica. Todos los cálculos en la teoría dan resultados finitos. Este es, evidentemente, el aspecto mas interesante de esta teoría: las supercuerdas son las primeras teorías encontradas que compatibilizan en principio mecánica cuántica y gravitación. Para que esto sea así es necesario, como en el caso del problema de la jerarquía de escalas, que las cuerdas tengan la propiedad de supersimetría que mencionábamos antes, de ahí el nombre de *supercuerdas*.

Figura 5

Hay otro ingrediente bastante exótico en la teoría de cuerdas, y es que se define de forma natural con 6 dimensiones espaciales extra. Es decir, requieren que haya en principio nueve dimensiones espaciales y una temporal. La idea de la posible existencia de dimensiones físicas extra es bastante vieja. Ya en 1921 T. Kaluza la sugirió, y fue posteriormente elaborada por O. Klein en 1926. ¿Cómo es que no se ha visto hasta ahora la existencia de dimensiones extra? La explicación de Kaluza y Klein es que las dimensiones extra (una sola en la Fig. 6) estan curvadas sobre si mismas en un circulo de radio R extremadamente pequeño. En esa situación las partículas habituales serían las únicas que observaríamos experimentalmente en la vida corriente. Por otra parte existirían réplicas de las partículas con masa del orden de n/R, con n cualquier entero positivo. Al ser el radio R de las dimensiones extra extraordinariamente pequeño, dichas réplicas serían muy, muy, masivas y por lo tanto no sería posible producirlas en los aceleradores existentes. En el caso de la teoría de cuerdas tenemos seis dimensiones extra y la geografía de dichas dimensiones es en general bastante mas complicada que seis circulos. En general, si queremos que la teoría a bajas energías se parezca lo mas posible al mundo observado, las seis dimensiones extra deben de corresponder a variedades con ciertas propiedades matemáticas que no podemos describir aquí.

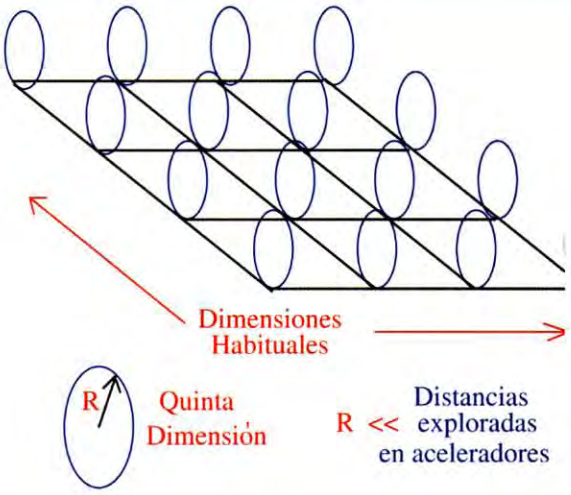


Figura 6

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 a partir de la cual la estructura extensa de la cuerda se revela y la segunda la energía necesaria para percibir la existencia de dimensiones extra. Dichas escalas están relacionadas con la constante de la gravitación de Newton de la siguiente forma:

$$\frac{1}{G_{Newton}} = \frac{M_{cuerda}^8}{M_{KK}^6} = 10^{38}\, GeV^2 \qquad (1)$$

J. Scherk y J. Schwarz en 1974, los primeros en considerar las cuerdas como teorías unificadas, tomaron $M_{KK} = M_{cuerda} = 1/\sqrt{G_{Newton}} = 10^{19}$ GeV. Dicha elección es compatible con las ideas de supersimetría y unificación de interacciones que antes comentábamos, pues la escala de unificación esta efectivamente cercana a 10^{19} GeV. Pero implican que la escala de la cuerda y/o las dimensiones extra serían inalcanzables para los aceleradores de partículas presentes o futuros. Sin embargo, N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos y G. Dvali en 1998 demostraron que la escala de la cuerda M_{cuerda} puede ser en principio relativamente baja, incluso accesible al acelerador LHC , que explorará energías $\cong 10^3$ GeV. En realidad, mirando a la fórmula que relaciona M_{cuerda} y M_{KK} con la constante de la gravitación se ve que basta con tener $M_{KK} = 10^{-19/3}\, M_{cuerda}^{4/3} = 10$ MeV para tener un valor para M_{cuerda} del orden de 10^3 GeV, y por lo tanto accesible al acelerador LHC. La posibilidad de tener un valor de M_{cuerda} tan bajo no había sido considerada en el pasado pues no hay evidencia experimental de partículas de Kaluza-Klein tan ligeras como 10 MeV de masa. ¿Como es posible que las réplicas de Kaluza-Klein del Modelo Standard con masas del orden de 10 MeV no hayan sido observadas experimentalmente? J. Polchinski en 1995 señaló como en teoría de cuerdas las partículas diferentes del gravitón no siempre tienen réplicas de Kaluza-Klein, aunque haya dimensiones extra. La idea es que en teoría de cuerdas las partículas habituales (quarks, leptones, bosones de gauge) pueden estar confinadas a vivir en un subespacio del total de 9+1 dimensiones en que se define la teoría. A esos subespacios a los que se ven obligadas a vivir por razones dinámicas se les llama "Dp-branas" (Fig. 7). Estos subespacios tienen dimensión igual a p+1, de tal manera que en la situación mas sencilla uno podría asociar el universo observado a una D3-brana. De esta manera las partículas del Modelo Standard no tendrían réplicas de Kaluza-Klein mientras que el sector gravitacional si que las tiene. Existe entonces en principio la posibilidad de producir réplicas KK del gravitón en aceleradores de partículas como el LHC. Sin embargo, al interactuar tan solo gravitacionalmente, no dejarían traza en los detectores, su efecto sería observable solo de forma indirecta por una violación aparente de la conservación de la energía, como pasa con los fotinos de las teorías supersimétricas. La detectabilidad depende de cuantas de las 6 dimensiones extra son muy grandes. La observabilidad óptima se obtiene si 2 de las dimensiones extra son del orden del milímetro, y las otras 4 del orden de la escala de la cuerda (1000-10000 GeV). Además, si la escala de la cuerda fuera $M_s \cong$ 1000–10000 GeV, se podrían producir en el LHC estados excitados de la cuerda o incluso, se ha especulado, agujeros negros. Sin embargo hay que señalar que estas posibilidades requerirían, como decimos, que la escala M_{cuerda} fuera inesperadamente baja, del orden de 1000-10000 GeV.

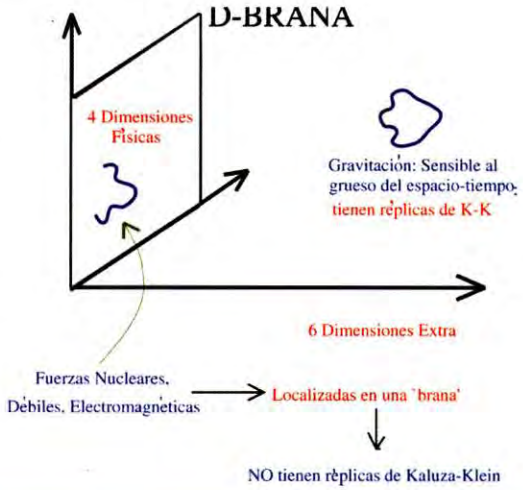


Figura 7

5. Simetrías de dualidad y la unificación de las teorías de cuerdas

Como comentábamos, en la teoría de cuerdas todas las partículas aparecerían como distintas vibraciones de un solo objeto, la cuerda en sí. Por lo tanto se trata de teorías unificadas. Sin embargo hay cinco tipos de teorías de supercuerdas aparentemente consistentes. Llevan los nombres de teoría tipo I, tipo II-A, tipo II-B y las dos cuerdas llamadas "heteróticas" que existen en dos variedades diferentes denominadas $SO(32)$ y $E_8 \times E_8$, de acuerdo con la simetría gauge que tienen. ¿Cual es la buena? En 1995 se comprobó que estas cinco teorías no son sino diferentes limites de una sola teoría. Ciertas simetrías de dualidad relacionan unas supercuerdas con otras de tal forma que en realidad existe una sola teoría subyacente. Las simetrías de dualidad son un poco sorprendentes. Una primera dualidad se llama dualidad T y establece la equivalencia entre una teoría de cuerdas con dimensiones extra de tamaño R y una teoría con tamaño $1/R$ en unidades de masa de la cuerda. Es sorprendente puesto que viene a decir que tamaño grande es equivalente a tamaño pequeño, al menos en cuanto a la teoría fundamental se

refiere. Obviamente esto no quiere decir que en el mundo habitual de 3+1 dimensiones pequeño sea igual a grande, se refiere solo al tamaño de las dimensiones extra. A final de los años 80 se vio que, gracias a esta simetría, las teorías tipo IIA y IIB son equivalentes. También son equivalentes entre sí las dos variedades de cuerdas heteróticas. El otro tipo de dualidad se llama dualidad-S y establece que ciertas teorías de cuerdas interaccionando fuertemente con intensidad "g" son equivalentes a otras interaccionando débilmente (con intensidad $1/g$). En el año 1995 se vio que gracias a esta simetría la teoría de cuerdas de tipo I es equivalente a las heteróticas y que la teoría de tipo IIB es autodual. Vemos pues que debido a las dualidades T y S se ha podido establecer la conexión entre las cinco teorías de cuerdas existentes. Esquemáticamente esto se muestra en la Fig. 8. La figura muestra un esquema de las conexiones por dualidad S y T entre las cinco teorías de cuerdas existentes. Las flechas con la letra C indican el paso a una teoría de una dimensión espacial menos al curvarse dicha dimensión sobre un circulo C. Todas estas conexiones se entendieron en el año 1995 gracias al trabajo, entre otros, de Townsend, Hull, Witten y Polchinski. En dicha fecha también se encontró una sorpresa, la conexión de las teorías de cuerdas con una teoría en once dimensiones denominada "teoría M". El límite de bajas energías de dicha teoría, es decir, las partículas ligeras, coinciden con una teoría descubierta a principios de los años 80, la teoría de supergravedad en once dimensiones. Dicha teoría fué abandonada a mediados de los 80 puesto que no parecía resolver los problemas de la combinación de gravedad y mecánica cuántica, no era "renormalizable". En su nueva reencarnación dentro del esquema de la teoría de cuerdas la teoría M aparece como unificadora de todas las teorías de cuerdas y es en estos momentos la única candidata presente a teoría unificada de todas las interacciones. Aunque todavía no se tiene una formulación completa de la teoría , poco a poco nos va revelando su rica estructura que implica nuevas formas de entender el espacio y el tiempo, así como insospechadas conexiones entre las teorías de "gauge" y gravitación. Efectivamente, otro aspecto que nos ha revelado la teoría de cuerdas es que, al menos en ciertos sistemas sencillos, ciertos aspectos de la teoría de la gravitación se pueden describir utilizando teorías de gauge, generalizaciones no-Abelianas del electromagnetismo de Maxwell, y viceversa.

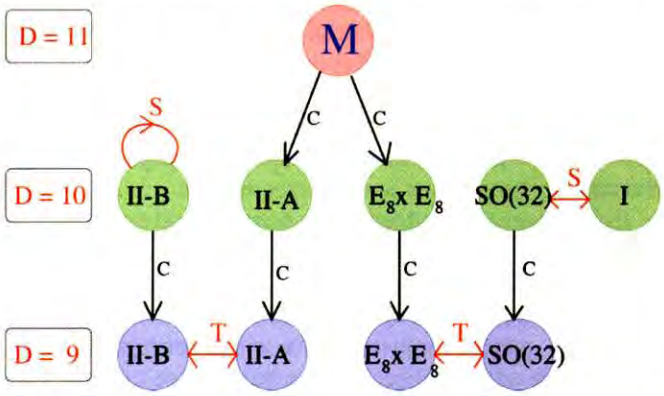


Figura 8

Esta equivalencia, señalada por primera vez por Juan Maldacena en 1998, revela una insospechada equivalencia entre interacciones de gauge e interacciones gravitacionales. En cierta medida esta conexión sería la versión moderna de los fallidos intentos de Einstein por encontrar una teoría unificada de gravitación y electromagnetismo.

La teoría de cuerdas es consistente con una unificación de las tres constantes de estructura fina de las interacciones del Modelo Standard análoga a la de las teorías de Gran Unificación que mencionabamos antes. También lo es con la existencia de partículas supersimétricas accesibles a bajas energías y medibles en aceleradores. Por otra parte en la teoría aparece de forma natural la existencia de varias generaciones de quarks y leptones. Se han encontrado soluciones de la teoría de cuerdas con tres generaciones de quarks y leptones con las interacciones del modelo standard, muy próximas a la física observada. Quedan sin embargo muchos aspectos por entender antes de poder asegurar que la teoría de cuerdas es efectivamente la teoría final buscada. Quizá el problema mas serio, que solo recientemente se ha empezado a abordar, es el de la existencia de muchas soluciones a las ecuaciones de la cuerda, relativamente unas pocas parecidas al universo observado y muchísimas otras totalmente diferentes. Nos falta un mecanismo o un principio o una simetría o... algo que nos diga porque las soluciones parecidas al universo observado han sido escogidas por la naturaleza. Tam-bién nos falta una formulación mas fundamental de la teoría de cuerdas que contenga dentro de si todas las simetrías descubiertas como las dualidades. Aunque mejora día a día, nuestro conocimiento de la teoría actual es solo parcial.

Además de su interés teórico por hacer compatibles Mecánica Cuántica y gravitación, la teoría de cuerdas, en una forma u otra, puede tener implicaciones directas medibles en los aceleradores, y en particular en el LHC: partículas supersimétricas, dimensiones extra, agujeros negros, estados excitados de la cuerda... (estas dos últimas posibilidades solo si la escala M_{cuerda} resulta ser suficientemente baja). Afortunadamente para los jóvenes físicos, quedan muchos retos teóricos y experimentales por afrontar. La búsqueda de los constituyentes últimos de la materia continua en este siglo XXI. Terminemos con un epílogo optimista. En su libro "Sueños de una teoría final", Steve Weinberg decía: *Mi opinión es que existe una teoría final y que somos capaces de descubrirla. Puede ser que experimentos en un supercolisionador proporcionen una nueva información tan esclarecedora que los teóricos sean capaces de completar la teoría final sin tener que estudiar partículas al nivel de la energía de Planck. "Incluso podemos ser capaces de encontrar un candidato para tal teoría final entre las teorías de cuerdas actuales! ¡Que extraño sería que la teoría final fuera descubierta durante nuestra vida! El descubrimiento de las leyes finales de la naturaleza marcará una discontinuidad en la historia del intelecto humano, la mas abrupta que haya ocurrido desde el comienzo de la ciencia moderna en el siglo XVII".*

L. E. Ibáñez
está en el Dpto. de Física Teórica C-XI y en el Instituto de Física Teórica C-XVI. Univ. Autónoma de Madrid