

Cuerdas y supercuerdas

Antonio Rincón Córcoles

Una física del siglo XXI que cayó por casualidad en el XX

Gabriele Amati

En los primeros días de diciembre de 2005, el histórico Hotel Métropole de Bruselas abrió sus puertas a la 23ª Conferencia de Solvay, uno de los acontecimientos científicos más esperados del panorama internacional. Esta serie de reuniones, que se iniciara en 1911 por iniciativa del industrial y filántropo belga Ernest Solvay, había cobrado merecida fama a lo largo del siglo XX como un foro único para debatir las ideas avanzadas de la física y la química. En 1927, el más célebre de sus encuentros reunió entre los invitados a 17 vigentes o futuros Premios Nobel y alumbró la presentación formal de los postulados cuánticos que tan profundo impacto tendrían en el pensamiento científico de las siguientes décadas. Fue en este ámbito en el que Einstein rebatió, con ardor y alusiones divinas¹, la idea de una realidad definida por principios de incertidumbre y leyes de probabilidad. Tal fue su insistencia que el danés Niels Bohr, otro prócer de la física y su adversario ideológico, llegó a espetarle: “¡Albert, deja de decirle a Dios lo que tiene que hacer!”.

La huella de aquel encuentro ha marcado el desarrollo de las posteriores citas de Solvay. Con los mejores auspicios y el título general de “La estructura cuántica del espacio y el tiempo”, la Conferencia de 2005 cumplió con su misión de analizar las tendencias de la vanguar-

¹ Einstein resumió gráficamente su postura contra el indeterminismo científico con su famosa frase “Dios no juega a los dados”.



dia científica, esta vez sobre el trasfondo de las dificultades surgidas para conciliar las discrepancias entre los dos pilares de la física contemporánea: la mecánica cuántica y la relatividad general.

En las ponencias y comentarios de los participantes se traslució el creciente interés suscitado por una propuesta que ha conquistado una buena cuota de atención y adeptos en los últimos años, y no sólo entre la comunidad científica: la teoría de cuerdas. En la afanosa búsqueda de un marco conceptual que englobe universalmente las leyes de la física, la hipótesis de las cuerdas tiene el mérito de señalar una senda en la encrucijada para guiar las investigaciones sobre ciertos extraños resultados encontrados en los trabajos experimentales. Con todos sus peros, es hoy por hoy la principal baza de que se dispone para superar la disociación existente entre cuántica y relatividad.

Sin embargo, su apuesta es tan arriesgada y especulativa que se ha ganado también una nutrida legión de escépticos y detractores. No todos están dispuestos a aceptar una visión de la realidad que obliga a creer en dimensiones ocultas, aparte de las habituales de altura, longitud, anchura y tiempo. Tanto más cuando las cuerdas aún no han superado el test más elemental de todo modelo científico que se precie: la convalidación por medio de experimentos u observaciones reproducibles. Como ha escrito Michael Green, uno de sus valedores, en una reseña de la cita del Hotel Métropole, la estructura de la teoría de cuerdas se comprende aún tan insuficientemente que no merece calificarse de tal, sino más bien de “carretera en obras”.

Lo inmenso y lo ínfimo

La primera mitad del siglo XX fue muy generosa en descubrimientos científicos de enorme trascendencia. Entre 1905 y 1915, Einstein propuso su teoría de la relatividad, que modificó sustancialmente las ideas en vigor sobre el espacio, el tiempo y la gravedad. El modelo de la relatividad especial (1905) exploró la extraordinaria conducta de la materia cuando se mueve a velocidades próximas a la de la luz. Entre otros atrevimientos, derribó el mito de la simultaneidad de los sucesos al advertir que el tiempo y el espacio no son entidades absolutas e inmutables, sino

cambiantes según la velocidad y el punto de vista del observador. Es muy gráfico el ejemplo de una nave espacial ultraveloz que fuera capaz de aproximarse a la velocidad lumínica de 300.000 km/s: para un espectador en reposo, los relojes de la nave parecerían retrasarse, los movimientos de los astronautas se congelarían y las dimensiones del vehículo se acortarían de modo inimaginable.

En 1915, Einstein dio una vuelta de tuerca a su modelo con una interpretación sorprendente de la gravedad en la hipótesis de la relatividad general: el espacio-tiempo, una entidad indivisible, se deforma por la presencia de los objetos materiales y la gravedad es el efecto de esta deformación. Así, los planetas giran alrededor del Sol en órbitas elípticas no por motivos y fuerzas de origen misterioso, como pensara Newton, sino porque la estrella, con su enorme masa, alabea el espacio-tiempo circundante y convierte esas trayectorias en las más “cómodas” para los cuerpos planetarios.

El universo de Einstein, en el que la velocidad de la luz es constante e insuperable y energía y masa no son sino formas compatibles de un mismo principio, da cabida a efectos asombrosos como las lentes gravitatorias, los agujeros negros, las ondas gravitacionales y la expansión del cosmos. En el siglo transcurrido desde la publicación de sus trabajos, observaciones fehacientes de estos fenómenos no han hecho sino confirmar los vaticinios del sabio judeoalemán y agrandar su prestigio.

En la década de 1920, un grupo de científicos teóricos recogió el testigo de la inspiración einsteniana centrando sus objetivos en el microcosmos. De la era de la radiactividad y el átomo iniciada a finales del siglo XIX se pasó al nacimiento de la física cuántica, una creación no menos revolucionaria y trascendente que la mecánica relativista. Partiendo de la sencilla hipótesis de que las cantidades físicas están discretizadas en la naturaleza (se intercambian en “cuantos” o paquetes), esta disciplina propone una realidad intrínsecamente probabilista y dominada por el principio de incertidumbre² en la que toda partícula comporta una radiación y a toda radiación se le asocia una partícula (dualidad corpúsculo-onda). La realidad cuántica gobierna el mundo de los átomos, las moléculas y las partículas elementales con el más alto grado de concordancia con los experimentos jamás alcanzado en la historia.

² El comportamiento de las dualidades corpúsculo-onda se estudia mediante funciones de onda, que no asignan valores únicos a los hechos observables sino distribuciones de probabilidad. Por su parte, el principio de incertidumbre o indeterminación de Heisenberg sostiene que, por razones inherentes a la textura de la naturaleza, es imposible medir con total precisión dos magnitudes físicas conjugadas (por ejemplo, posición y velocidad), pues al aproximar el resultado observable en una se deteriora la exactitud de la otra.

INTERNATIONAL SOLVAY INSTITUTES
Brussels



XXIII^{ème} Conseil de Physique Solvay

Journée grand public
Dimanche 4 décembre 2005, à 14 heures
Aux frontières de la physique moderne

Exposés

"Strings, Black Holes and the End of Space and Time"
Robbert Dijkgraaf (University of Amsterdam)

"The Fabric of the Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality"
Brian Greene (University of Columbia, New York)

L'évènement se déroulera avec interprétation simultanée en français, néerlandais et allemand

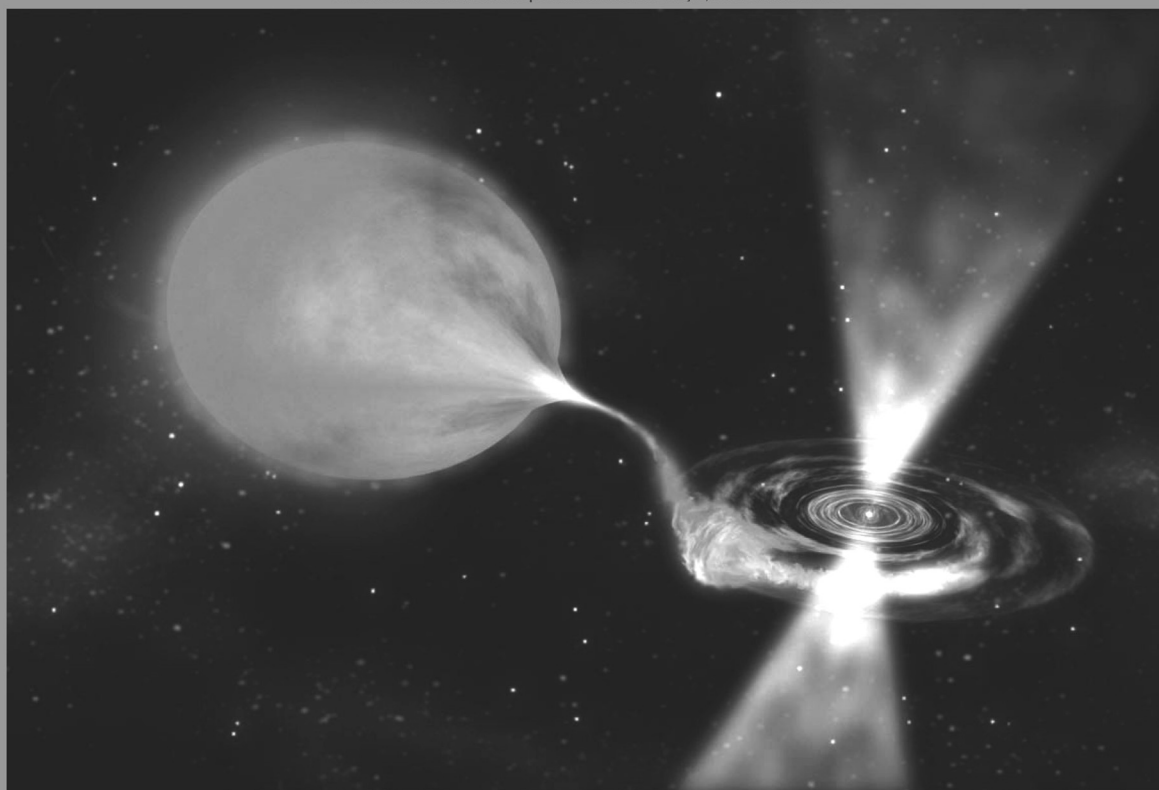


Photo: NASA/Dana Berry

Session questions-réponses

Sous la direction de David Gross (Prix Nobel de Physique 2004, Santa Barbara) et avec la participation de Thibault Damour (IHES),
Robbert Dijkgraaf (Amsterdam), Brian Greene (Columbia), Gerard 't Hooft (Prix Nobel de Physique 1999, Utrecht),
Lisa Randall (Harvard) et Gabriele Veneziano (Collège de France)

Inscription obligatoire, informations et programme sur www.europa.eu.int/solvay2005

Où?

Bâtiment Charlemagne
Rue de la Loi, 170
1040 Bruxelles

Contact

isabelle.juif@ulb.ac.be

Avec le soutien de:



Cartel anunciador de la Conferencia de Solvay de 2005.

El manejo de dos modelos tan exitosos ha propiciado un avance excepcional de la ciencia y la tecnología durante todo el siglo XX. La aplicación de la teoría de la relatividad al escrutinio del universo ha modificado radicalmente nuestra interpretación del cosmos. A su vez, sin las ideas cuánticas y sus aplicaciones tecnológicas no sería explicable el funcionamiento del mundo actual: los paneles solares, los punteros láser, los transistores, los microscopios electrónicos o los equipos de resonancia magnética nuclear son, como otros muchos inventos, deudores de sus hallazgos. En ciernes se encuentran la computación y la criptografía cuánticas, posible germen de una nueva generación de ordenadores y equipos digitales ultrarrápidos.

Por ello resulta tan desazonador para los científicos el desencuentro entre ambas disciplinas en los marcos en que se superponen. No en vano, los objetos grandes (ámbito relativista o gravitacional) están formados, en última instancia, por los diminutos (dominio cuántico), y debe esperarse que tanto en los átomos como en el corazón de las estrellas rijan las mismas leyes físicas elementales. Pero lo cierto es que los intensos esfuerzos realizados por elaborar una teoría cuántica de la gravedad no han cumplido sus expectativas. Por ello se ha recibido tan esperanzadamente la teoría de cuerdas como un prometedor intento de armonizar esta incómoda ambivalencia.

Inconsistencias de los modelos físicos

La exposición de la teoría de cuerdas requiere un repaso somero de las interacciones fundamentales de la física. Tras una tarea continuada de filtro y sistematización de los modelos vigentes, en el estado actual de los conocimientos científicos se definen cuatro interacciones básicas en la naturaleza: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. La primera, conocida desde muy antiguo, es la responsable de las fuerzas de atracción entre los astros o de la gravedad que nos une ineluctablemente al suelo. La interacción electromagnética, por su parte, explica el comportamiento de la luz, las cargas eléctricas y los imanes. La nuclear fuerte da cohesión a los núcleos

de los átomos, y la nuclear débil alimenta algunos fenómenos particulares del mundo subatómico como la radiactividad por desintegración beta.

El modelo estándar de partículas, acorde con la mecánica cuántica, explica la esencia de estas interacciones como el intercambio en los sistemas implicados de unas partículas elementales llamadas mensajeras, “partículas de fuerza” o, simplemente, bosones³. Por ejemplo, la interacción electromagnética se debe al intercambio de fotones, sus partículas portadoras, en un fenómeno bien conocido y observado. Tal sucede en el efecto fotoeléctrico: una fuente emite una radiación electromagnética que incide sobre un material diana, de modo que algunos de los fotones (cuantos de luz) de dicha radiación impactan contra sendos electrones de los átomos del material; estos electrones absorben la energía de “su” fotón, se excitan y se aceleran, abandonando el espacio confinado de su átomo para circular libremente por el material. Con esta interacción electromagnética mediada por fotones se engendra una corriente eléctrica capaz de abrir una puerta automática o de delatar a un ladrón con un detector de movimiento.

De igual forma, se han propuesto y observado partículas mensajeras o mediadoras de las interacciones fuerte (los gluones) y débil (bosones gauge). En cambio, el bosón postulado para la interacción gravitatoria, bautizado como gravitón y descrito teóricamente, no ha sido descubierto y constituye una de las asignaturas pendientes de la física actual.

En este marco teórico, algunos equipos científicos lograron interrelacionar varias de las interacciones básicas en su busca de una teoría unificada de las fuerzas físicas. Sheldon Glasgow, Abdus Salam y Steven Weinberg demostraron que en las fuerzas electromagnética y débil subyace un mismo fenómeno, la “fuerza electrodébil”, pues por encima de un umbral de energía⁴ ambas interacciones se funden en un solo tipo. Es decir, a temperaturas superiores a este umbral las conductas de los fotones y los bosones gauge son básicamente indistinguibles. A su vez, la cromodinámica cuántica, o teoría cuántica de la interacción fuerte, ha dado respaldo a las pretensiones de lograr una “teoría de la gran unificación”, el anhelado sueño de Einstein durante la segunda parte de su vida.

³ Las partículas “de materia”, como las constituyentes de los átomos (electrones, quarks), junto con los muones, neutrinos y sus respectivas antipartículas, reciben el nombre genérico de fermiones. Protones y neutrones no son partículas elementales, sino integradas por fragmentos de menor dimensión denominados quarks. Los gluones son portadores de la interacción nuclear que mantiene cohesionados los quarks.

⁴ Cifrado en unos 100 gigaelectrón-voltios (GeV). Una molécula típica en la atmósfera tiene una energía de 0,03 eV. Las que participan en las reacciones nucleares de una bomba atómica oscilan entre 0,3 y 3 megaelectrón-voltios (MeV).

Interacción	Descripción	Partícula portadora	Masa	Carga	Espín	Alcance	¿Observado?
Gravitatoria	Atracción de la materia, que mantiene las órbitas de los objetos celestes y nos sujeta al suelo. Rige en la escala macroscópica.	Gravitón	0	0	2	Infinito	No
Electromagnética	Atracción-repulsión entre cargas eléctricas, que explica también el fenómeno luminoso. Al principio se pensó que atañía a dos fenómenos independientes, electricidad y magnetismo, que desde el siglo XIX se describen por un solo conjunto de ecuaciones (leyes de Maxwell). Rige en la escala atómica y molecular.	Fotón	0	0	1	Infinito	Sí
Nuclear fuerte	Cohesión de los núcleos atómicos, muy superior a la interacción eléctrica de repulsión entre los protones que los integran. Rige en la escala nuclear.	Gluón	0	0	1	10^{-13}	Indirectamente
Nuclear débil	Asociada a fenómenos como la radiactividad beta, explica los cambios de unas partículas elementales en otras de diferentes masas y energías.	Bosones gauge	~ 80.000	+1 / 0 / -1	1	10^{-16}	Sí

Las cuatro interacciones fundamentales y los bosones (partículas elementales de "fuerza")

Sin embargo, los problemas para encajar la gravitación en el marco de la cuántica han impedido, por el momento, que este sueño tenga visos de materializarse. La incapacidad de encontrar gravitones en los experimentos no es el único inconveniente. Podría pensarse que, dado que la teoría gravitatoria de Einstein explica con gran precisión los fenómenos cósmicos y la mecánica cuántica responde de los hechos subatómicos, no habría motivo para la inquietud. Bastaría con emplear estos dos esquemas por separado para unos objetos de estudio que son, a primera vista, acusadamente distintos. Pero la realidad no es tan sencilla. Algunos modelos físicos, en particular los que describen los agujeros negros⁵ y el *big bang* (gran explosión primordial), se extienden a ambos dominios, el cósmico y el microscópico. Y los resultados que se obtienen de las ecuaciones en tales casos son claramente absurdos: algunos objetos deberían tener dimensiones infinitas o nulas. Estos "comportamientos patológicos" del espacio-tiempo surgidos de la aplicación de la relatividad a casos tan especiales se

conocen en la jerga como problemas de las singularidades y han sido desbrozados, entre otros, por Stephen Hawking en su estudio de los agujeros negros.

Los expuestos no son los únicos problemas pendientes en el panorama de la física actual. Ningún campo como el de la astronomía revela la dolorosa condena del pensador, que cuanto más amplía sus conocimientos más terrenos incógnitos descubre ante su mirada. Tras una cadena de hallazgos excepcionales, los astrónomos dibujan hoy un modelo de universo surgido de la nada (de la singularidad del *big bang*) hace unos 13.000 millones de años y, una fracción de microsegundo después, sometido a un proceso inflacionario de descomunal intensidad que dio paso a la "lenta" formación de galaxias, estrellas y demás cuerpos celestes a partir de los grumos o irregularidades del espacio-tiempo primordial.

Pero, para que el modelo cuadre, se ha hecho preciso recurrir al concepto de "materia oscura", un conjunto misterioso de partículas no visibles para los

⁵ Los agujeros negros, como es sabido, son concentraciones de masa suficientemente elevadas como para que ninguna partícula o radiación pueda escapar más allá de un límite conocido como horizonte de sucesos (salvo por la posibilidad, controvertida, de un efecto túnel cuántico). Otras singularidades cuya existencia es puramente hipotética son los agujeros de gusano, o "atajos" excepcionales en el espacio-tiempo.

observatorios astronómicos cuya presencia se deduce de sus efectos gravitatorios indirectos. También se ha descubierto que la expansión del universo, predicha por la teoría de la relatividad y avalada por las observaciones astronómicas, no es constante, como se pensaba en un principio, sino que experimenta un impulso de aceleración. Para explicar este hecho se ha recurrido a una enigmática “energía oscura” o quintaesencia para la que se han dado diversas explicaciones no del todo satisfactorias. Materia y energía oscuras suman, según los cálculos aceptados, en torno al 96% de la masa-energía del universo; dicho de otro modo, los astrónomos tienen en el punto de mira de sus telescopios sólo el 4% de la composición del cosmos.

Ante este panorama, tan desolador como estimulante para la investigación y el trabajo en papel, la teoría de cuerdas se postula como un paladín al rescate de la ciencia en apuros. Con un complejo andamiaje argumental, ha propuesto añadir a las dimensiones corrientes siete ocultas, además de un conjunto de partículas espejo denominadas superpartículas. El modelo matemático que la sustenta permite eludir las singularidades antes expuestas e incluye la descripción de la gravedad, en lo cual supera a la mecánica cuántica. Según sus partidarios, las dimensiones adicionales podrían esconder las fuentes de materia y energía oscura que habrían esculpido, fantasmagóricamente, el universo. El problema principal de este seductor planteamiento es que, por el momento, la teoría de cuerdas se vale tan solo, como su gran puntal, de la elegancia de las ideas y de la belleza de las ecuaciones.

Las cuerdas vibrantes

La teoría de cuerdas surge de una intuición relativamente sencilla de entender. Hasta la década de 1970, los desarrollos teóricos de la física se habían basado en un modelo abstracto de “partículas puntuales” sometidas a perturbaciones, interacciones y movimientos acordes con sus propiedades intrínsecas y su entorno. Aquellas partículas descritas en las fórmulas tenían masa, pero no dimensión. Durante el período clásico, sus comportamientos se describían por las leyes de la gravitación de Newton y de la electrostática de Coulomb, ambos ejemplos modelo de las denominadas leyes de la inversa del cuadrado:

- La fuerza de atracción gravitatoria entre dos masas es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la

distancia que las separa (gravitación universal de Newton).

- La fuerza electrostática entre dos cargas, atractiva si son de distinto signo y repulsiva en caso contrario, es proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia (Coulomb).

Las dos ecuaciones son perfectamente válidas en el mundo macroscópico corriente. Sin embargo, su aparente semejanza formal encubre un engañoso espejismo desvelado tras la irrupción de la cuántica y la relatividad. Desde los albores del atomismo y el estudio de lo minúsculo comenzó a circular una pregunta mortificante: ¿qué sucede cuando la distancia que separa a dos partículas tiende a cero, como es propio del mundo subatómico? La respuesta matemática clásica es clara: ambas fuerzas, gravitatoria y electrostática, tienden a infinito. En el ámbito del electromagnetismo, el desarrollo de la mecánica cuántica y el descubrimiento de la interacción nuclear fuerte han permitido solventar el inconveniente. En cambio, la teoría más avanzada para la gravitación (la relatividad general) no consigue resolver el problema, aun cuando se exprese en un formato más complejo que el que Newton enunciara en su día.

Ahora bien, ¿qué ocurriría si las partículas no fueran puntos matemáticos ideales? En su planteamiento original, la teoría de cuerdas propuso que los bloques elementales constituyentes de la materia-energía no son puntos adimensionales, sino bucles de una dimensión (sin grosor), como finísimos cabellos, a los que se llamó cuerdas. La escala de longitud característica de estos “hilos” se situaría en el ámbito de una cantidad infinitesimal denominada longitud de Planck ($1,6 \times 10^{-35}$ m) por lo que, desde un punto de vista macroscópico, una cuerda se asemejaría totalmente a una partícula puntual de dimensión cero. Sin embargo, de la naturaleza no adimensional de las cuerdas se derivan notables implicaciones.

La segunda idea fundacional de las cuerdas es tan luminosa como elegante. Estas entidades unidimensionales estarían sometidas a vibraciones, de manera que cada uno de sus estados vibrantes se expresaría a través de unas propiedades muy definidas. De igual modo que la cuerda de un violín o de un piano emite una serie de armónicos (sonidos oscilantes que se superponen a la nota básica) cuando es pulsada o golpeada por el martillo afelpado, cada “cuerda vibrante” de la teoría emitiría, al vibrar, las distintas partículas elementales. Es decir, la existencia de electrones, fotones, neutrinos o bosones se debe a los distintos modos de oscilación de las cuerdas. Estas vibra-

ciones conformarían la textura del espacio-tiempo e interpretarían la “música del universo”⁶.

Con todo, la historia mítica de la teoría de cuerdas alude a un episodio inicial un tanto azaroso. Al parecer, en 1968 el joven teórico Gabriele Veneziano estaba buscando documentación para sus estudios sobre la interacción fuerte cuando se topó con una fórmula matemática escrita por el insigne Leonhard Euler doscientos años antes: la función beta, inventada en su tiempo como un ocioso instrumento matemático. Para sorpresa de Veneziano, aquella ecuación desempolvada tan inopinadamente daba un sustento teórico extraordinario para explicar las fuerzas nucleares. Dos años más tarde, Yoichiro Nambu, Holger Bech Nelsen y Leonard Susskind dieron significado físico a la fórmula de Euler asimilándola al modelo de cuerdas vibradoras.

En 1974 se produjo un nuevo hito en la historia de las cuerdas cuando John Schwarz, Joel Sherk y Tamiaki Yoneya constataron que la vibración de los objetos unidimensionales de esta clase permitía describir unas propiedades que se correspondían con las del gravitón, partícula mensajera de la interacción gravitatoria⁷. Desde entonces quedó claro que si la teoría de cuerdas conseguía llegar a alguna parte, incluiría entre sus logros la descripción de la relatividad general. Pero su complejidad matemática y su alejamiento de las corrientes en boga entre estudiantes e investigadores, concentrados por entonces en identificar los ingredientes de la gran sopa de partículas que parecía colmar el cielo de los físicos, sumió a la primera teoría de cuerdas en un estado de melancólica y latente hibernación.

Revoluciones en las cuerdas

Los defensores de la teoría de cuerdas explicaron el desinterés inicial hacia sus sugerencias por un defecto de enfoque en los objetivos: en un principio se pensó que este modelo estaba destinado a explicar la física de los hadrones (nombre por el que se conocen las partículas sometidas a la interacción fuerte),

cuando en realidad su ámbito es mucho más extenso. Cuando la fuerza nuclear fuerte pasó a contar con un modelo explicativo satisfactorio y consistente, la cromodinámica cuántica, las cuerdas, desdénadas en muchos campus universitarios como un pasatiempo intelectual, reorientaron sus energías hacia otras empresas.

Cierto es que en este primer fracaso subyacían también graves inconsistencias internas de la teoría. Su primer esquema formal, la hipótesis de las cuerdas “bosónicas”, usaba un argumentario matemático crecientemente complicado para explicar la existencia sólo de los bosones. Nada decía de las partículas fermiónicas que integran la materia, y había de vérselas con un asunto algo embarazoso: una de sus partículas resultantes tenía energía negativa, lo que significaba que podía viajar más deprisa que la luz⁸. Todo iba a cambiar con la aparición de una subyugante idea que actuó como revulsivo de la física teórica: la supersimetría, un artificio matemático que permitía relacionar íntimamente la naturaleza de los bosones y los fermiones.

Entre 1970 y 1984 se escribieron numerosos modelos de teorías de cuerdas, muchos inconsistentes y otros aparentemente incompatibles entre sí. En ellos se manejaban los conceptos de cuerdas abiertas y cerradas, las primeras provistas de dos extremos libres y las segundas, cerradas sobre sí mismas en un bucle completo. Se modelizaron los armónicos de las cuerdas para obtener, siempre por medios matemáticos, descripciones plausibles de las partículas bosónicas (fotones, gluones, gravitones, bosones gauge). Otra tónica dominante de aquellos años fue la necesidad de incluir en las teorías dimensiones adicionales para garantizar su coherencia interna, un recurso tan habitual en el álgebra y la geometría como difícil de interpretar físicamente.

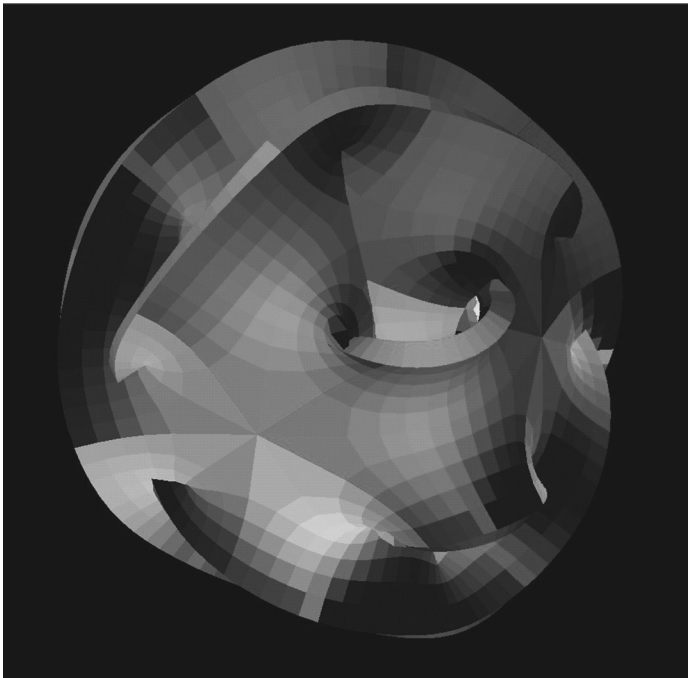
Pese a todas las dificultades señaladas, una idea central animaba a los fogosos abogados de la teoría de cuerdas a proseguir en su empeño: mientras la teoría cuántica de campos convencional hacía imposible la gravedad, para las cuerdas el fenómeno gravitatorio era un imperativo consustancial a la teoría. Una razón de peso para no desistir.

⁶ Así lo ha expresado Brian Greene, gran divulgador de la teoría de cuerdas. La frase recuerda a la “música de las esferas” con que los pitagóricos describieron el movimiento consonante de los astros en la bóveda celeste.

⁷ Schwarz escribió en uno de sus artículos: “Entre los estados de cuerdas sin masa hay uno que tiene espín dos. [...] Esta partícula interacciona como un gravitón, con lo que la teoría incluye la relatividad general. Esto nos llevó a proponer que la teoría de cuerdas podría usarse para la unificación”.

⁸ Esta partícula, llamada taquión, no está prohibida en sentido estricto por la relatividad. En la teoría de Einstein sólo se predice que ningún objeto material puede alcanzar la velocidad de la luz, pues su masa se haría infinita. No niega que ciertas partículas puedan “nacer”, en los albores del tiempo, con velocidades superlumínicas.

De la polvareda de legajos, artículos y escritos del período, en 1974 sobrevivían cinco teorías de cuerdas alternativas cuyos esotéricos nombres (tipo I, tipos IIA y IIB, heterótica $E_8 \times E_8$ y heterótica $SO[32]$) alentaron las chanzas de sus detractores. Aun con su heterogeneidad, estas versiones compartían rasgos comunes. El principal era la inclusión del principio de la supersimetría⁹, que permitió que sus descripciones dejaran de restringirse a las partículas mensajeras (bosones) para comprender también las integrantes de la materia-energía ordinaria: electrones, neutrinos y quarks. Para significar este enriquecimiento, la teoría pasó a llamarse “de las cuerdas supersimétricas”, abreviadamente supercuerdas. Los nuevos postulados, en su tarea de depuración, lograron también evitar las molestas partículas de energía negativa.



Formas de Calabi-Yau. La consistencia interna de las teorías de cuerdas exige un mundo físico integrado por diez (u once, en la teoría M) dimensiones, las tres perceptibles del espacio cotidiano, el tiempo y otras seis (o siete) adicionales cuya interpretación es altamente controvertida. Este empeño especulativo encontró en los llamados espacios de Calabi-Yau, un desarrollo matemático anterior, el sustrato teórico necesario para avanzar en los cálculos. Los espacios de Calabi-Yau permiten obtener infinidad de formas de objetos en seis dimensiones, como el ilustrado en la imagen, que cimentan el sustrato geométrico de la teoría de cuerdas. Si la hipótesis de las cuerdas estuvieran en lo cierto, estas formas se encontrarían enormemente compactadas y pasarían desapercibidas, aun cuando nos rodeen por todas partes.

⁹ En esencia, la supersimetría predice la existencia para cada una de las partículas elementales conocidas de una superpartícula compañera cuya masa estaría situada en el rango de 100 GeV a y 1 TeV. Estas superpartículas han recibido ya nombres curiosos (fotino, neutralino, higgsino, etc.), y su posible detección es un objeto primordial de los experimentos diseñados para la próxima generación de aceleradores de partículas.

Las cinco teorías propuestas formulaban un modelo cuya consistencia matemática exigía manejar un espacio-tiempo de diez dimensiones, seis más de las que habitualmente percibimos. Esta aparente inconveniencia se tornó en entusiasmo cuando pudo encontrarse un encaje teórico salvador en un tipo de estructura matemática denominada espacio de Calabi-Yau. El apasionamiento desatado dio paso a un enfervorecido esfuerzo de investigación que ha dado en llamarse “primera revolución de las supercuerdas”.

La segunda revolución de las cuerdas hubo de esperar hasta 1995 y vino de la mano del admirado Edward Witten. En una renovación conceptual de gran finura, Witten comprendió que las teorías de cuerdas existentes podían entenderse como versiones parciales y mutuamente complementarias de una única base fundamental, a la que llamó teoría M. Al igual que la gravitación de Newton ha demostrado ser una aproximación de la relatividad de Einstein para valores bajos de la velocidad, las cinco versiones propuestas de las cuerdas (más una sexta, de la supergravidad en once dimensiones) no serían sino particularidades de una teoría M central para determinadas condiciones excepcionales de las variables estudiadas.

Una década después, la “teoría misteriosa”, como algunos la denominan en un irónico juego verbal acerca del significado de la M (no desvelado por Witten), sigue despertando recelo y admiración. Abstrusa e incompleta, obligada a introducir una dimensión oculta más (hasta sumar once) para su validez formal, la teoría M parece estar reclamando, según confiesa el propio Witten, la invención de un lenguaje matemático aún por desarrollar.

||| Naturaleza cuántica del espacio-tiempo

El gran salto conceptual para la teoría de cuerdas propuesto por Witten se inspira en el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica. Propuesto originalmente por Heisenberg en 1927, este principio postula que existe un límite en la precisión con que se puede medir el valor de dos variables físicas conjugadas, como la posición y la velocidad. Por debajo de

este umbral, cuanto más se aproxima el valor de una variable (por ejemplo, la posición de una partícula subatómica) más exactitud se pierde en el de su conjugada (la velocidad). El hecho de que la realidad cuántica esté marcada por una indeterminación intrínseca y fundamental en la medida de las variables físicas aboca a un conocimiento inevitablemente “difuso” de la naturaleza.

En la analogía establecida por Witten, este carácter neblinoso se extiende a la esencia íntima del espacio-tiempo, y no sólo a la descripción de los fenómenos que acontecen en su seno (el movimiento de las partículas). El umbral de la “incertidumbre de Witten” viene dado por la dimensión de cada cuerda elemental. Según reza la teoría, una cuerda puede vibrar o no, de manera que cuando lo hace se expresa como una partícula. Pero el hecho de que la cuerda experimente o no una vibración resulta intrínsecamente impredecible. Ello modifica la concepción del espacio-tiempo dada por Einstein, que no es ya una entidad sólo dinámica, como éste defendió, sino también inherentemente difusa por debajo de una cierta escala. En palabras de Witten, “al igual que la mecánica cuántica impone un límite a la precisión con que puede definirse la trayectoria de una partícula, la teoría de cuerdas limita la precisión con la que es posible definir el espacio-tiempo”¹⁰.

En su explicación teórica de las dimensiones ocultas, Witten acude nuevamente a la analogía cuántica. En esta disciplina se manejan aún fenómenos “deterministas”, que son los basados en las interacciones físicas o, dicho de otro modo, en las partículas de fuerzas como el fotón o el gravitón. Magnitudes asociadas a estos fenómenos, como el espacio, el tiempo o el campo eléctrico, pueden medirse en cantidades numéricas concretas, no afectadas por la incertidumbre cuántica. Witten las llama “variables bosónicas”, para diferenciarlas de las que sufren los efectos de la indeterminación de Heisenberg. Electrones, quarks y neutrinos (fermiones) tienen, según este lenguaje, propiedades de carácter “fermiónico”.

Así pues, las dimensiones habituales del espacio-tiempo (altura, longitud, anchura y tiempo) pueden decirse “bosónicas”, esto es, perceptibles y mensurables. Sin embargo, las dimensiones adicionales de la

teoría de cuerdas, de naturaleza “fermiónica”, están sometidas al dictado de la incertidumbre cuántica del espacio-tiempo. Tales dimensiones no serían medibles por los procedimientos convencionales.

En esta línea de pensamiento, se ha aventurado asimismo cuál sería el camino para demostrar la plausibilidad de las hipótesis. Como se ha explicado, las partículas elementales conocidas pueden entenderse como modos de oscilación de las cuerdas en las dimensiones bosónicas (las ordinarias). Por otra parte, la supersimetría predice que debería haber otras partículas “espejo” que cabría interpretar como correspondientes a cuerdas vibrantes en las dimensiones fermiónicas (ocultas). Por tanto, el eventual hallazgo de partículas supersimétricas, uno de los objetivos de la inminente generación de aceleradores de partículas, sería un espléndido aval para el futuro de la teoría de las supercuerdas.

||| ¿Por qué no se ven las dimensiones adicionales?

Uno de los aspectos más intrigantes de la teoría de las cuerdas es la necesidad de incluir en su descripción matemática hasta seis (o siete, en la teoría M) dimensiones adicionales. Dado que únicamente percibimos las tres comunes del espacio (arriba-abajo, izquierda-derecha, delante-detrás), además del tiempo, cabe preguntarse si esta suposición es un mero artificio matemático o tiene trazas de verosimilitud física.

El argumento de desechar la idea sin más porque no notamos las dimensiones ocultas es fácilmente refutable. Hasta bien entrado el siglo xx el hombre no ha sido capaz de “percibir”, mediante instrumentos científicos y tecnológicos convenientes, hechos hoy tan conocidos como las ondas de radio, los rayos x o los ultrasonidos. Nadie duda de la existencia de estas realidades, pero ¿qué pensaría al respecto un hombre del Renacimiento?

Igualmente, sentimos los efectos de la acción gravitatoria y, desde la primera infancia, aprendemos a equilibrar nuestro peso. También apreciamos el elec-

¹⁰ Hasta la teoría de la relatividad de Einstein se pensaba que el espacio y el tiempo eran entes absolutos, al modo de un escenario inmóvil en el que se representan los fenómenos físicos. Einstein demostró que el espacio-tiempo está íntimamente ligado con la naturaleza y manifestación de tales fenómenos. En la mecánica cuántica, la escala básica de la incertidumbre viene dada por la constante de Planck (10^{-27} erg.s como orden de magnitud). En la teoría de cuerdas se define una nueva constante, la dimensión de la cuerda (10^{-32}), con un papel similar.

tromagnetismo, un fenómeno amable cuando baña nuestros ojos como una luz hermosa pero mortífero si nos golpea con la violencia de un latigazo eléctrico. ¿Pero qué decir de las interacciones nucleares? Para los físicos una realidad incuestionable, quedan fuera de nuestro alcance sensorial.

Inmersos en un omnipresente contexto tecnocientífico, creemos con firmeza en el átomo y la célula, los virus y los microorganismos, la radiactividad y las ondas radioeléctricas que llegan a nuestros teléfonos móviles. Hemos aprendido a confiar en lo que no vemos porque contamos con sofisticados aparatos que “decodifican” lo inaprensible para superar las limitaciones de nuestros cinco sentidos. No se precisaría ninguna revolución intelectual profunda para admitir que la esencia misma del espacio-tiempo tampoco es lo que parece.

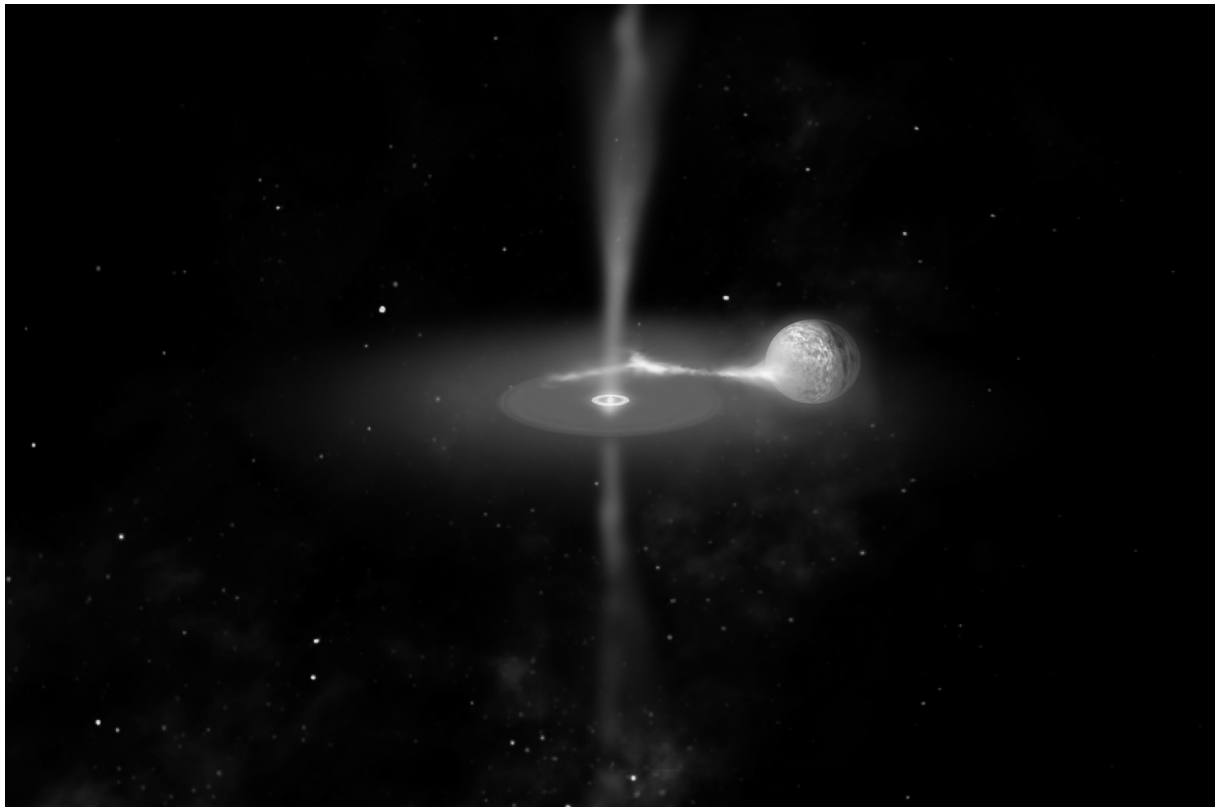
Admitiendo hipotéticamente esta contingencia, se ha apuntado, con argumentos científicos, la posibilidad de que las ondas electromagnéticas sean incapaces de traspasar el límite desde las dimensiones visibles a las adicionales. Ello imposibilitaría tanto su visión como el acceso a estas dimensiones para cualquier dispositivo basado en el uso de luz u otras ondas afines. Cabe recordar también la interpretación

canónica de las dimensiones ocultas: podrían estar arrolladas sobre sí mismas hasta el punto de que cobran todo su sentido para la escala de las cuerdas (longitud de Planck) pero son inaprensibles incluso desde una magnitud atómica.

Asimismo, se ha conjeturado acerca de que las dimensiones ordinarias sólo difieren de las ocultas en que son perceptibles para la escala humana. Tal vez las primeras se encuentren también arrolladas, pero en una extensión que las hace asequibles para nuestra comprensión. Particularmente gráfica resulta una explicación aportada por Witten. Al igual que percibimos la materia como un todo continuo y no los átomos individuales, “promediando” la visión general de su infinidad de partículas constituyentes, al mirar el espacio-tiempo estaríamos promediando el conjunto de sus dimensiones y únicamente asimilaríamos aquéllas que son aptas para la escala humana.

Cuerdas y membranas

Uno de los atractivos de la teoría de cuerdas fue el abandono del concepto de “partícula puntual”, una abstracción excesiva que había perdido su tradicional



Los agujeros negros constituyen un caso extremo de singularidad en la física, y una piedra de toque fundamental para contrastar la validez de la teoría de cuerdas. (Imagen por cortesía de la NASA).

utilidad teórica con los problemas de las singularidades. Al sustituir el “punto adimensional” por cuerdas de una dimensión se evitaban los ceros en los denominadores de las fórmulas y se dotaba de mayor consistencia a los modelos. Sin embargo, el avance conceptual que ello significó se antojaba insuficiente: ¿por qué la urdimbre elemental del universo habría de estar formada por cuerdas unidimensionales, y no por objetos planos, de volumen o de más tres dimensiones?

El curso natural de los acontecimientos que condujeron a la teoría M situó esta pregunta en el primer plano de los debates. La sacudida que acompañó a la segunda revolución de las supercuerdas llevó aparejada la introducción de objetos básicos en la teoría de dos o más dimensiones llamados membranas o, abreviadamente, “branas”. Pasó así a hablarse de “cero-branas” (dimensión 0, puntos adimensionales), uni-branas (cuerdas o branas de dimensión 1), bi-branas (membranas bidimensionales), tri-branas, o, genéricamente, n -branas. El estudio de las branas se ha constituido en un subdominio específico dentro de la teoría de cuerdas.

Ésta predice que tales estructuras podrían tener el tamaño del universo, acaso sumido en una brana específica tetradimensional (tres dimensiones espaciales y una de tiempo) dentro de un dominio mucho más amplio. Todo el cosmos conocido sería, en consecuencia, poco más que una fina rebanada, asimilable a otras de su clase (universos paralelos), en un “pan” de múltiples dimensiones. Los átomos ordinarios y sus partículas, producto de vibraciones de cuerdas abiertas con los extremos unidos a la brana cósmica, no podrían abandonar la para explorar las dimensiones adicionales. En cambio, los gravitones, descritos como armónicos de cuerdas cerradas sin extremos sujetos, tendrían libertad para trasladarse entre branas, y de ahí la singularidad de unos efectos gravitacionales que estarían diseminados por varios universos. La conjetura llega al extremo de admitir que el inicio de nuestro universo (*big bang*) podría haber surgido de la cataclísmica colisión de dos branas.

Dentro del dominio cosmológico, la teoría de cuerdas abre un abanico de posibilidades insospechadas para la interpretación de la esencia física de la naturaleza. Se ha indicado ya que un problema subyacente al modelo estándar de la cosmología es la escasa representatividad que parecen tener los objetos materiales observados por los astrónomos: la materia-radiación detectada por los instrumentos no llega al 5% del total. El resto se ha relacionado con los conceptos de materia oscura (23%) y energía oscura (73%). La primera se entiende como un conjunto de

partículas materiales de composición desconocida que no emiten ni reflejan la radiación electromagnética y, por tanto, no pueden observarse directamente, aunque dejan su firma gravitacional en el movimiento de los objetos próximos (estrellas, galaxias). Por su parte, la energía oscura es una entidad hipotética que permea todo el espacio y a la que se responsabiliza de la expansión acelerada del universo.

En la búsqueda de los constituyentes de la materia oscura se han propuesto varios candidatos: estrellas enanas marrones, agujeros negros supermasivos, partículas exóticas, etc. La energía oscura se ha relacionado con la densidad de vacío, presunta pulsión existente en el espacio incluso desprovisto de materia debida a un supuesto fenómeno de creación-destrucción rapidísima de partículas virtuales por fluctuaciones cuánticas (el vacío no es tal, sino una furiosa “espuma cuántica” en permanente agitación).

Con la hipótesis de las supercuerdas no se aportan soluciones definitivas a estos enigmas, si bien los conceptos de supersimetría e incertidumbre del espacio-tiempo aportan al debate algunas novedades interesantes. Muchos físicos se inclinan por creer en la existencia de una nube de partículas supersimétricas ligadas gravitacionalmente a las galaxias, lo que podría corresponderse muy bien con las cantidades “ausentes” de materia oscura. Si así fuera, en una década podría disponerse de detectores capaces de descubrir tales superpartículas. El problema de la energía oscura se revela bastante más arduo y, por el momento, los teóricos de las cuerdas no han logrado diseñar un argumento convincente para la densidad de vacío.

El panorama de las cuerdas sigue así cubierto de luces y de sombras. Apasionadas conferencias y seminarios especializados combaten contra opiniones críticas vertidas por encumbrados nombres de la física viva. La afinidad con la supersimetría y las explicaciones sobre los estados cuánticos de los agujeros negros se encuentran entre las líneas más sólidas de trabajo y convalidación posible de las cuerdas. La incapacidad para explicar la densidad de vacío y el curso un tanto errático de su historia, lejos del suelo firme de los experimentos, despiertan serias reticencias en influyentes sectores científicos. Tal vez las palabras de Witten sirvan para comprender el dilema en que se encuentra esta brillante aventura intelectual: “Cuando Einstein desarrolló la teoría de la relatividad, sabía realmente lo que estaba haciendo. Lo que me planteo, mirando hacia delante, es si con nuestros nuevos conocimientos estamos por fin en disposición de contestar a la gran pregunta de qué es la teoría de cuerdas”.