

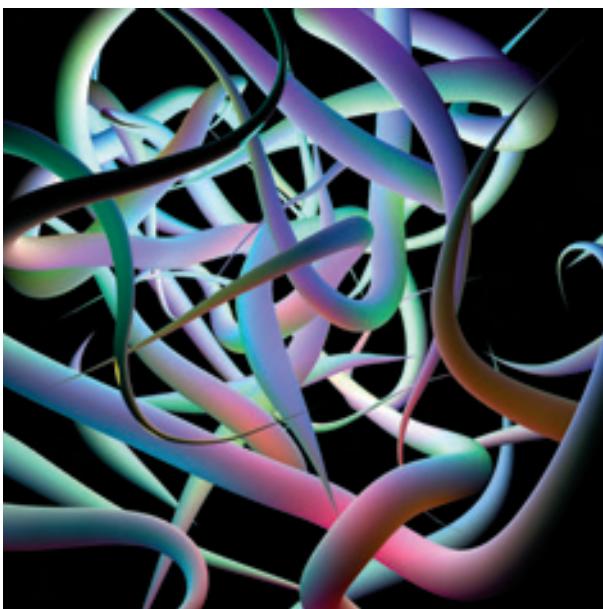
Mirando al Futuro

Luis Álvarez-Gaumé

Al final del siglo XVIII y a lo largo del XIX, la aplicación consciente de las leyes de la mecánica newtoniana (y más tarde de la termodinámica) a las máquinas de la revolución industrial cambiaron de forma radical la vida cotidiana. De la misma forma la aplicación de las leyes de Maxwell que rigen los fenómenos electromagnéticos ha transformado la vida cotidiana a lo largo del pasado siglo. La generación y distribución de potencia eléctrica, el poder enviar señales, fotos, mensajes a la velocidad de la luz, no sólo han acortado las distancias, sino que han transformado la calidad de vida humana hasta hacerla irreconocible si se la compara con el siglo XIX y anteriores.

En cierto sentido la Mecánica Cuántica (formulada en el primer cuarto del siglo pasado) tuvo una profunda influencia no sólo epistemológica sino también tecnológica en el siglo XX. Como explica Leon Lederman (Premio Nobel de Física en 1988) una parte importante del PNB de los países industrializados se debe a la Mecánica Cuántica. Dos ejemplos claros ilustran tal afirmación: El transistor (el “cuanto” fundamental de la electrónica moderna) que depende de las propiedades de materiales semiconductores diseñados aplicando la Mecánica Cuántica a electrones en sólidos; y el láser, donde las propiedades cuánticas de un conjunto de fotones (cuantos de luz) en una cavidad, a través de la estadística de Bose-Einstein de partículas idénticas, producen avalanchas coherentes de luz cuyas aplicaciones se extienden desde la lectura de los códigos de barras en los supermercados hasta la delicadísima cirugía oftalmológica, pasando por láseres con suficiente potencia como para cortar limpiamente planchas de acero en aplicaciones metalúrgicas.

No es difícil pensar que alguien a finales del XVIII o del XIX pudiera imaginar que el próximo siglo cambiaría de forma importante con las aplicaciones respectivas de las leyes de Newton y las de Maxwell, aunque hubiera sido mucho más difícil predecir la profundidad de los cambios que produjeron. De la misma forma hay algunos aspectos de la Física fundamental desarrollada en el pasado siglo que nos permiten imaginar con cierta confianza aplicaciones importantes a nivel tecnológico en el presente siglo. También es cierto que muy probablemente algunos de los interrogantes sobre las leyes básicas del Universo que no obtuvieron respuesta en el llamado Modelo Estándar de las interacciones fundamentales recibirán respuesta en este siglo.



Aunque desde un punto de vista práctico es cierto que los microchips (o computadores de mayor o menor potencia) y los láseres han transformado enormemente casi todos los aspectos de la vida cotidiana, también lo es el hecho de que son sistemas diseñados cuánticamente pero que macroscópicamente tienen un comportamiento clásico. La Mecánica Cuántica sin embargo contiene aspectos mucho más chocantes y que comienzan a encontrar aplicaciones prácticas. La Mecánica Cuántica es profundamente no local, genera correlaciones entre sistemas que desafían completamente la intuición clásica: por ejemplo, la existencia de estados enmarañados (*entangled* en inglés) introducidos por primera vez por Einstein, Podolski y Rosen en 1935 para exhibir las propiedades extrañas del mundo cuántico han dejado de ser material para la diversión de teóricos, e incluso encuentran aplicaciones prácticas. Una breve mirada a la investigación en Física Atómica en las últimas décadas hace fácil imaginar que en algún momento en el siglo XXI, la computación cuántica, la criptografía cuántica o la teleportación cuántica (áreas basadas en gran parte en la utilización de los estados EPR) afectarán la vida cotidiana quizás de forma tan radical como lo hicieran anteriormente el transistor, el láser o los superconductores.

Desde un punto de vista más teórico, la Mecánica Cuántica todavía nos deparará sorpresas notables. Gracias a la Mecánica Cuántica y a la Teoría Especial de la Relatividad, que se unen armoniosamente en la llamada Teoría Cuántica de Campos (el lenguaje más fundamental conocido para expresar las leyes de la Naturaleza) y a través de una inmensa cantidad de trabajo teórico y experimental a lo largo del siglo XX, se han podido entender los constituyentes fundamentales de la materia así como sus interacciones. La síntesis de este esfuerzo colectivo se resume en el Modelo Estándar de las interacciones electromagnéticas, débiles (relacionadas en parte con la explicación de la radiactividad natural) y fuertes (responsables de la interacción nuclear), que nos permiten describir y entender en detalle un rango increíble de fenómenos naturales, desde distancias microscópicas de 10^{-16} cm hasta distancias de orden cósmico: la estructura y propiedades de los átomos, la estabilidad de la materia, los diferentes tipos de sólidos, los metales, semiconductores y aislantes, el magnetismo, la superconductivi-

dad, el núcleo atómico y la fuerza nuclear responsable de la energía que hace brillar a las estrellas, las supernovas cuyas grandiosas explosiones dieron lugar a todos los átomos pesados que componen nuestro cuerpo, el origen de los elementos primordiales en el Universo primitivo (esencialmente H y He con menores abundancias de D , Li y Be) junto con el fondo de radiación cósmica, la existencia de la antimateria y un largo etcétera.

A pesar de esta impresionante lista de triunfos, la mera formulación del Modelo Estándar también nos informa de sus limitaciones y de los aspectos más notables de nuestra ignorancia sobre muchos aspectos fundamentales de la Naturaleza. El futuro, esperemos que mediato, nos traerá respuestas a algunos si no a todos los interrogantes que se plantean en su seno. El resto de este texto trata de enumerar algunos de los interrogantes más candentes, y a describir una de las teorías (quizá la única por el momento) que pretende proporcionar un esquema conceptual donde estas preguntas hallen respuesta. El veredicto final lo tiene como siempre la Naturaleza, que a veces se deja interrogar de buen grado a través de los experimentos.

Uno de los triunfos intelectuales del pasado siglo fue la formulación y verificación de la Teoría General de la Relatividad, o Teoría relativista del espacio-tiempo. Algunas de sus predicciones son espectaculares. Por ejemplo, la expansión del Universo o la existencia de agujeros negros, sin olvidar algunas clásicas como el corrimiento del perihelio de Mercurio, o la deflexión de la luz por el Sol. Desgraciadamente su formulación es puramente clásica. En los últimos veinticinco años de su vida A. Einstein intentó unificar el electromagnetismo y la Física Cuántica dentro del contexto geométrico clásico de la Relatividad General. Hoy día sin embargo tomamos un punto de vista radicalmente distinto. El mundo en que vivimos es cuántico pero bajo determinadas circunstancias puede comportarse clásicamente a nivel macroscópico. Al intentar aplicar las mismas técnicas que permitieron cuantificar las interacciones electromagnéticas (y las fuertes y débiles) a la Relatividad General nos encontramos con todo tipo de inconsistencias y resultados infinitos a los que no se les pueden aplicar la renormalización de manera adecuada. Técnicamente la teoría no es renormalizable, y esto implica que en su formulación clásica la Relatividad General no es compatible con la Mecánica Cuántica. Desde el punto de vista cuántico la constante de Newton de la Gravitación Universal G define una longitud que se conoce como longitud de Planck, y que está dada por la fórmula:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ cm}, \quad (1)$$

con una energía equivalente asociada, la masa de Planck de:

$$M_p = \frac{\hbar c}{l_p} \approx 10^{19} \text{ GeV}. \quad (2)$$

Donde \hbar es el cuant de acción de Planck y c la velocidad de la luz (también 1 GeV o Gigaelectronvoltio es igual aproximadamente a 1.6×10^{-3} ergios, y es próximo al equivalente energético de la masa del protón). A estas escalas o energías¹



la descripción clásica del espacio-tiempo, con su estructura causal incluida dejan de tener sentido. Las fluctuaciones cuánticas de la geometría del espacio-tiempo requieren el uso de conceptos nuevos y aún más básicos. Es necesario un cambio completo de paradigma. Los métodos de cuantificación que funcionan excelentemente en la descripción de las otras interacciones conocidas fracasan estrepitosamente cuando se intenta construir una Teoría Cuántica de la Gravitación.

Podemos ser menos ambiciosos y considerar en una primera aproximación que la gravitación es clásica mientras que la materia es cuántica. Este procedimiento funcionó relativamente bien en el tratamiento semicásico de la interacción de los átomos con la radiación (ésta última tratada clásicamente). Las paradojas que resultaban en esta aproximación fueron finalmente resueltas al cuantificar de forma consistente el campo electromagnético. Si intentamos implementar un procedimiento similar para el campo gravitatorio, nos encontramos con paradojas que apuntan claramente hacia lo desconocido. Una diferencia fundamental entre la gravitación y el electromagnetismo es que los gravitones (los hipotéticos cuántos responsables de la interacción gravitacional) "gravitan", mientras que los fotones *per se* no radian. La Relatividad General es una teoría sumamente nolineal. De hecho su propia nolinealidad le conduce a conocer algunos de sus límites. Consideraremos por ejemplo el colapso gravitacional de una estrella muy masiva (basta con que su masa sea varias veces la del Sol). La descripción relativista del proceso de colapso es muy distinta cualitativa y cuantitativamente de la descripción Newtoniana. Como demostraron Penrose y Hawking en los años sesenta bajo condiciones muy generales, si la masa inicial es suficientemente grande, la atracción gravitatoria hará que la estrella colapse sin límite hasta producir una singularidad en el entramado espaciotemporal. En la singularidad la concentración de materia es tal que la densidad es infinita. Aunque clásicamente este estado es una consecuencia inexorable de la Relatividad General, cuánticamente esperamos que a partir de un cierto momento, o densidad, las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo o lo que le reemplace al acercarnos a la longitud de Planck, debieran evitar la formación de una singularidad

¹Bastante altas por cierto. La energía de Planck es el equivalente energético de un paramecio.



clásica, y generar un estado que por el momento no podemos describir, donde la estructura cuántica del espacio-tiempo domina.

Algo inesperado clásicamente sucede cuando la estrella colapsa. Al tiempo que la materia sigue su camino inexorable hacia la singularidad, se genera un velo que la protege del mundo exterior. En situaciones genéricas de colapso gravitacional, la singularidad aparece rodeada de lo que se conoce como horizonte de sucesos más allá del cual es imposible comunicarse con el mundo que se dejó atrás. El horizonte es poéticamente el último mensaje de radio que el astronauta inadvertido habría intentado enviarnos antes de sumergirse en las insondables mareas gravitacionales generadas en el interior del horizonte por el colapso gravitacional.

En términos matemáticos la geometría del espacio-tiempo una vez que el colapso se produce está descrita por la geometría de Schwarzschild (1916) (para un colapso esférico y sin rotación):

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2), \quad (3)$$

donde M es la masa del objeto que colapsa. Para distancias grandes $r \gg 2GM/c^2$ la geometría se aproxima al espacio de Minkowski, y está descrita por la Relatividad Especial. El radio:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad (4)$$

se conoce como el radio de Schwarzschild. Cualquier cuerpo que colapse mas allá de r_s estará completamente desconectado del mundo asintótico a largas distancias. El área del horizonte, $A = 4\pi r_s^2$ tiene propiedades muy peculiares. Hawking, en el contexto de la Relatividad General, demostró que el área del horizonte nunca disminuye. Si dos agujeros negros (dos objetos que han pasado a través de su radio de Schwarzschild) chocan para formar un agujero negro mayor, el área total del horizonte es mayor que la suma de las áreas de los horizontes de partida. La similitud con la Termodinámica se hace irresistible, y tanto Bekenstein como Hawking (y otros) fueron tentados a hacer una analogía bastante acertada entre las leyes de la Termodinámica y las de la dinámi-

ca de agujeros negros. La masa total del objeto colapsado juega el papel de la energía, el área del horizonte se convierte en la entropía, y la temperatura se asemeja con la aceleración gravitatoria en el horizonte. Así tenemos todos los ingredientes para simular la primera ley de la Termodinámica:

$$\Delta E = T\Delta S. \quad (5)$$

La segunda ley está contenida en la ley de áreas al identificar el área del horizonte con la entropía. La elegancia de éstas analogías es evidente, pero también es palpable que su relevancia parece más bien fortuita. El gran aldabonazo lo dió de nuevo Hawking (en 1974) cuando se tomó en serio la posibilidad de hacer Mecánica Cuántica alrededor de un agujero negro. Las fluctuaciones cuánticas en presencia del horizonte de un agujero negro (tipo Schwarzschild por ejemplo) hacen que éste radie, y la radiación emitida está muy bien aproximada por la radiación del cuerpo negro a una temperatura (en grados Kelvin):

$$T = \frac{\hbar c^5}{8\pi G M k}, \quad (6)$$

\hbar, c, G se han definido anteriormente, $k = 1.38 \times 10^{-16}$ erg/K, que da la relación entre grados Kelvin de temperatura y energía, es la constante de Boltzmann. Más aún, Hawking demostró que cuando un agujero negro está en equilibrio con un baño térmico de radiación, su entropía está dada por la formula:

$$S = \frac{k c^3 A}{4\hbar G}, \quad (7)$$

donde A es el área del horizonte, de forma que la ley de áreas deja de tener contenido puramente geométrico y legitimiza su carácter como entropía. Las fórmulas (6,7) presentan aspectos paradójicos que no pueden explicarse dentro de la Teoría Cuántica de Campos. Primero el agujero negro se ha convertido verdaderamente en un agujero gris (de hecho bastante gris para masas grandes). Cuando el agujero radia, su masa disminuye, y paradojicamente, de acuerdo con (6) su temperatura aumenta en lugar de enfriarse. Nos encontramos con un sistema intrínsecamente inestable desde el punto de vista termodinámico. Cuanta más energía emite más se calienta². Más chocante en muchos aspectos es la formula para la entropía (7) que es proporcional al área del horizonte. En Termodinámica y en Teoría Cuántica de Campos la entropía de un sistema en equilibrio crece con su volumen (en los cursos universitarios sobre el tema se dice que la entropía es una cantidad extensiva). Si tenemos en cuenta la gravitación, (7) implica que la entropía máxima de un sistema dentro de una esfera de radio R es proporcional al área de la superficie que lo inscribe. En unidades naturales ($\hbar=c=G=k=1$), hay como máximo un bit de información por cada elemento de área de Planck ($l p^2$, en (1)).

Conviene ahora recordar la comprensión microscópica de la entropía, que es parte de la herencia intelectual de Ludwig

²Es divertido, utilizando las fórmulas anteriores, calcular el tamaño que debería tener un agujero negro si quisieramos utilizar la radiación de Hawking para preparar por ejemplo una tortilla de patatas.

Boltzmann. Esta fórmula fundamental es el epitafio que aparece en su lápida en el cementerio de Viena:

$$S = k \log W, \quad (8)$$

la cantidad desconocida W en (8) es el número de estados accesibles al sistema en las condiciones de presión y temperatura dadas, y crece exponencialmente con el volumen del sistema. Parece pues que interpretar (7) como una entropía va en contra de los resultados que se siguen de la Teoría de Campos. Cuando se tiene en cuenta el efecto de la gravedad no es tan fácil sacar una conclusión definitiva. Un argumento algebraico sencillo debido a G. 't Hooft (premio Nóbel de Física en 1999) pone de manifiesto que en principio no tiene por qué haber contradicción. Consideremos un volumen acotado por una superficie A y supongamos que queremos contar cuantos grados de libertad se encuentran en el interior (es decir cuantos estados independientes podemos contar). Si queremos que estos estados sean visibles para el mundo exterior, debemos insistir en que la energía total en el interior de la superficie sea menor que 1/4 veces la dimensión de la caja esférica, si no, su superficie estaría dentro de su radio de Schwarzschild y los estados no serían visibles. En una teoría de campos ordinaria, podemos contar cual es el máximo número de estados que podríamos tener en el interior de una caja con volumen V y energía E . El estado más probable es un estado en equilibrio a una temperatura T , y la relación entre E, V, T viene dada por la fórmula de equilibrio:

$$E = C_1 V T^4, \quad (9)$$

mientras que la entropía total es:

$$S = C_2 V T^3, \quad (10)$$

Si imponemos que el sistema no esté dentro de su radio de Schwarzschild:

$$2E < \left(V / \frac{4}{3} \pi \right)^{1/3}. \quad (11)$$

Utilizando (9,10) se obtiene inmediatamente:

$$T < C_3 V^{-1/6}, \quad S < C_4 A^{3/4}, \quad (12)$$

donde las constantes $C_{1,2,3,4}$ son todas de orden uno en unidades naturales y son irrelevantes para el argumento en curso. Vemos que la entropía de la teoría de campos es menor que la de un agujero negro cuyo horizonte tiene área A . Si el número máximo de grados de libertad depende del área y no del volumen, el mundo empieza a parecerse a un holograma. La gravedad cuántica, a través de estos experimentos imaginarios puede estarnos pasando el mensaje de que los grados de libertad fundamentales se encuentran en la frontera y no en el volumen. Puede que exista una pantalla holográfica donde los fenómenos de gravedad cuántica pueden ser interpretados, mientras que cualquier interpretación en términos de la Teoría Cuántica de Campos esté abocada al fracaso. Según ésta interpretación, la estructura cuántica del espacio-tiempo estaría muy lejos de una extrapolación ingenua del Modelo Estándar y sus técnicas de cuanti-

ficación. Dentro de este contexto no tenemos ningún procedimiento que permita interpretar (7) en términos de grados de libertad microscópicos asociados al agujero negro. Entender como contar éstos grados de libertad es probablemente un prerrequisito a la hora de entender la gravedad cuántica. Es probable que el futuro más o menos próximo aclare alguno de estos problemas. Como veremos después la Teoría de Cuerdas permite en algunos casos dar descripciones microscópicas de (7).

Dejemos por el momento la gravedad y concentrémonos en otro aspecto del Modelo Estándar al que sería importante dar una explicación que manifiestamente no se halla en su interior: ¿Por qué todas las interacciones fundamentales conocidas (electromagnéticas, débiles, fuertes, y en cierto sentido también las gravitatorias) son interacciones gauge? Toda la teoría clásica del electromagnetismo puede formularse exclusivamente en términos de campos eléctricos y magnéticos. La utilización de los potenciales escalar y vector sólo es imprescindible cuando queremos estudiar las propiedades electromagnéticas de los sistemas cuánticos. En el caso no relativista, la ecuación de Schrödinger de una partícula en presencia de un campo electromagnético es:

$$\left[\left(\frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right)^2 + e\phi \right] \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (13)$$

Los campos eléctricos y magnéticos no cambian si transformamos los potenciales ϕ, \mathbf{A} de acuerdo con la ley:

$$\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} - \nabla \chi, \quad \phi \rightarrow \phi + \frac{1}{c} \frac{\partial \chi}{\partial t}, \quad (13)$$

y para que la ecuación de Schrödinger no cambie, es necesario transformar la función de onda Ψ al mismo tiempo:

$$\Psi \rightarrow e^{i\chi/\hbar c} \Psi, \quad (14)$$

Las transformaciones (14,15) se conocen como transformaciones gauge. En Mecánica Cuántica sabemos que la fase global de la función de onda no es medible, pero sí es medible la fase relativa entre dos funciones de onda superpuestas. Lo que la invariancia gauge garantiza es que podemos elegir nuestro convenio de fase localmente aquí de forma completamente independiente de lo que le pase a la función de onda en la cara oculta de la Luna. Para poder tener la posibilidad de cambiar la fase de forma independiente en regiones distintas es necesario incluir los campos electromagnéticos, y por eso se dice que la interacción electromagnética es una interacción gauge de tipo³ $U(1)$. En el Modelo Estándar se generaliza la invariancia frente a cambios locales de la fase a otras transformaciones. Por ejemplo, los quarks (las partículas que constituyen el protón y el neutrón) tienen tres tipos de "colores" posibles, y en analogía con el electromagnetismo se exige que la teoría sea invariante frente a cambios locales arbitrarios del color. De forma similar en las interacciones débiles los leptones (electrones y neutrinos por ejemplo) están caracterizados por otro número cuántico que toma dos valores, el isospín débil. De nuevo la teoría exige que la

³El grupo $U(N)$ es el grupo formado por todas las matrices complejas de dimensión N que son unitarias.



simetría sea local. Técnicamente el grupo gauge del Modelo Standard es $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, con un total doce campos similares (e incluyendo) al fotón. Esta teoría gauge ha sido verificada experimentalmente sin lugar a dudas hasta las más altas energías accesibles. Explica una cantidad enorme de fenómenos, pero no tenemos idea de por qué la Naturaleza ha decidido copiar al electromagnetismo a la hora de diseñar las otras interacciones.

Finalmente otro de los rompecabezas más profundos que encontramos en el Modelo Estándar es por qué los leptones y los quarks aparecen en tres familias con los mismos números cuánticos respecto a las interacciones básicas, diferenciándose solamente en su masa. Es difícilmente comprensible por qué los leptones e^- , μ^- , τ^- tienen las mismas propiedades electromagnéticas y débiles, y sin embargo sus masas están en la razón:

$$m_e : m_\mu : m_\tau \approx 1:200:3560.$$

Argumentos numéricos similares pueden hacerse para las masas de los quarks de las diversas familias.

Hay muchas otras preguntas abiertas dentro de nuestra comprensión básica de la Naturaleza, muchas de carácter cosmológico, pero no entraremos en ellas.

Después de este largo planteamiento de problemas fundamentales queríamos concluir con una somera visita a la Teoría de Cuerdas que da respuestas (al menos parciales) a algunos de ellos, y que promete tender los puentes que nos guíen al futuro. Una fracción importante de la comunidad de físicos teóricos ha invertido una gran parte del último cuarto de siglo tratando de desentrañar las propiedades básicas de ésta teoría que todavía no tiene verificación experimental clara. Cuando la historia les juzgue dentro de cien años puede que pasen por visionarios que intuyeron el porvenir, o en el peor de los casos serán considerados como una especie de círculo de poetas muertos. Intentar adelantarse a los tiempos es una ruleta peligrosa donde lo más probable es que uno pierda todos sus haberes.

La Teoría de Cuerdas, que tiene sus antecedentes a finales de los años sesenta en modelos que pretendían explicar la enorme multiplicidad de partículas hadrónicas que aparecían como consecuencia de las interacciones fuertes, parte de un planteamiento radical: los objetos básicos en el Universo no son objetos puntuales (las partículas elementales) sino obje-

tos extendidos unidimensionales, y lo que nos parecen partículas elementales no son más que vibraciones de baja energía de las cuerdas, como las notas de una cuerda de guitarra. A primera vista no parece un cambio tan radical, y sin embargo lo es. La formulación de una teoría de objetos unidimensionales compatibles con la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica es una tarea ardua que después de muchos avatares parece tener una respuesta única. Hay buenas razones para pensar que lo mismo no sucedería si se postulara que los objetos más elementales tuvieran extensión en dos o más dimensiones, aunque de momento no existe ningún teorema riguroso que lo pruebe.

La construcción de la Teoría de Cuerdas no sigue un camino análogo al de la Relatividad General donde tras postular y analizar un conjunto mínimo de hipótesis se puede deducir la teoría y sus consecuencias. Por el momento no tenemos nada similar al principio de equivalencia ni al principio de covariancia general. Lo que se utiliza es fundamentalmente un conjunto bastante rico de condiciones de consistencia interna. El libro de Polchinski que se cita en la bibliografía contiene todos los detalles técnicos. Con tanto protagonismo el lector estará interesado en saber por qué tantos físicos han hecho una inversión tan colosal de tiempo y energía en estudiar una teoría que de momento no parece tener principios. Para ello describiremos algunas de sus consecuencias básicas que probablemente formarán parte de la formulación final.

Hay dos variedades de cuerdas: las abiertas y las cerradas, que topológicamente son similares a intervalos y círculos respectivamente. A diferencia de las partículas, las cuerdas sienten la geometría y topología del espacio donde se mueven. Para que una cuerda pueda encontrarse y evolucionar en un cierto espacio-tiempo, éste tiene que satisfacer las ecuaciones de Einstein de la Relatividad General (de hecho una generalización). La razón profunda radica en el hecho de que entre las excitaciones de baja energía la cuerda contiene una partícula de masa nula y espín dos: el gravitón, el agente trasmisor de las interacciones gravitatorias. La única forma consistente de acoplar el gravitón a las demás partículas es satisfaciendo los principios de la Relatividad. Si todo ésto sólo sucediese a nivel clásico sería interesante pero más bien anecdótico. Lo más interesante es que las correcciones cuánticas son controlables a cualquier orden, incluyendo tantos procesos virtuales como se quiera. Los resultados son finitos sin necesidad de renormalización. Se pueden calcular procesos a cualquier orden de teoría de perturbaciones con energías tan altas como se quiera para los estados inicial y final. Es la primera vez que algo así se puede hacer. A bajas energías (largas distancias) la teoría reproduce las ecuaciones de Einstein, pero al mismo tiempo interpola consistentemente la interacción gravitatoria con sus correcciones cuánticas hasta energías comparables a la masa de Planck y más allá.

En páginas anteriores hemos detallado algunos de los enigmas que aparecen al hacer teoría cuántica cerca de un agujero negro. Si bien el resultado de controlar procesos de dispersión es interesante, es lógico preguntarse si la entropía (7) encuentra una explicación microscópica. En 1995 A. Strominger y C. Vafa fueron capaces de obtener de forma microscópica la fórmula (7) para ciertos tipos de agujeros negros (incluyendo los factores numéricos). Su trabajo se

extendió a una gran cantidad de agujeros negros, pero de momento el de Schwarzschild sigue estando lejos de nuestras habilidades técnicas. Más aún, en uno de los desarrollos más interesantes de los últimos años, la Teoría de Cuerdas da una descripción holográfica de la gravitación cuántica, de tal forma que la teoría en la pantalla que describe los grados de libertad relevantes es una teoría gauge con comportamiento controlable. Esta imagen holográfica es el resultado de la Conjetura de Maldacena (1997), que aunque no está demostrada rigurosamente, la evidencia (teórica) en su favor empieza a ser abrumadora.

Otro aspecto importante de las cuerdas, es que *necesariamente* todas las interacciones a bajas energías deben ser interacciones de tipo gauge. Entre las excitaciones de baja energía de la cuerdas que pueden ser descritas por una teoría de campos, nos encontramos con partículas de masa cero pero con espín igual a uno. Este es el sello de los fotones y otros agentes de interacción como los gluones que aparecen en el Modelo Estándar. De nuevo las condiciones de consistencia de la teoría implican necesariamente que éstas partículas deben interaccionar de acuerdo con principios de simetría gauge. La Teoría de Cuerdas es la única que hasta ahora ha podido explicar ésta propiedad fundamental de la física de altas energías.

Una predicción fundamental de la Teoría de Cuerdas es la existencia de una simetría totalmente nueva, que se conoce como Supersimetría. Las partículas elementales, como consecuencia de la invariancia relativista, pueden ser de dos tipos: bosones y fermiones, las primeras tiene espín entero, mientras que las segundas tienen espín semientero (de la forma $n+1/2$ con n un entero). Esta nueva y exótica simetría transforma bosones en fermiones y viceversa. Hay muchas consecuencias de la existencia de ésta simetría. La primera es que el número de partículas elementales se dobla automáticamente. Cada partícula conocida tiene un compañero supersimétrico, con nombres un tanto ridículos. Por ejemplo, el foton tiene un compañero que llamamos fotino, los gluones los gluinos, el gravitón el gravitino, los quarks tiene los squarks (por quarks escalares) etc. Si la supersimetría es también una simetría del estado fundamental (el vacío, o estado de mínima energía) entonces las partículas relacionadas a través de una transformación supersimétrica deben tener la misma masa.

Es claro que nunca hemos visto tales partículas adicionales, lo que significa que la supersimetría está presumiblemente rota espontáneamente a energías suficientemente altas como para que la diferencia de masa entre los pares haga que los compañeros supersimétricos no sea observables de momento. En efecto, cuando consideramos un sistema con un número infinito de grados de libertad, puede suceder que las simetrías de las interacciones no se realicen de forma manifiesta en el estado de mínima energía. Por ejemplo, si consideramos las interacciones entre las moléculas en el agua líquida, son invariantes frente a translaciones, sin embargo, a baja energía, o bajas temperaturas, el estado fundamental del agua es el hielo, donde las moléculas ocupan posiciones definidas dentro de una estructura cristalina, y la simetría de translaciones no es en absoluto manifiesta. (Algo similar sucede en el Modelo Estándar, cuando estudiamos la forma de dar masa a las partículas elementales que lo componen, y se conoce como mecanismo de Higgs). Uno de los



objetivos prioritarios en los aceleradores de partículas (el Tevatron en Fermilab cerca de Chicago, y el LHC actualmente en construcción en el CERN, Ginebra) es encontrar éstas partículas. Si no es el caso, puede suceder que la supersimetría esté rota a energías muy altas, o que quizás la Teoría de Cuerdas sea falsa a pesar de sus otras consecuencias atractivas. Uno de los problemas de la teoría es de hecho la comprensión del mecanismo de ruptura espontánea de ésta simetría. Por toda otra serie de razones, muchos físicos que se ocupan de la fenomenología de partículas piensan que las teorías supersimétricas son probablemente los mejores candidatos para formular teorías que vayan mas allá del Modelo Estándar, sin que ello implique que se comprometan con los demás requisitos de la Teoría de Cuerdas.

Otra consecuencia ineludible de la teoría que no podemos ocultar es que predice que el espacio-tiempo debe *necesariamente* tener diez dimensiones (!). La única cura conocida hasta el momento es la compactificación espontánea de seis de ellas a un tamaño suficientemente pequeño como para que por el momento hayan eludido la observación. A pesar de que parece que estamos entrando en una novela de ciencia-ficción, la existencia de dimensiones extra tiene consecuencias fundamentales, como por ejemplo el espectro de partículas de baja energía que forman las familias de quarks y leptones del Modelo Estándar. Desde este punto de vista el viejo sueño de Einstein se hace realidad, los números cuánticos exóticos de las partículas elementales conocidas encuentran su génesis y explicación en la geometría del espacio. Se ha estudiado un número enorme de posibles compactificaciones de las dimensiones extra, y al estudiar su espectro a bajas energías se obtienen con frecuencia modelos bastante cercanos al Modelo Estándar, o a alguna de sus extensiones. Aunque aún no se ha encontrado un candidato suficientemente convincente, la búsqueda continúa con un cierto optimismo.

Merece la pena para terminar exponer la revisión que la Teoría de Cuerdas hace del principio de incertidumbre de Heisenberg. Como en Mecánica Clásica, una cuerda está caracterizada en particular por su tensión. Dimensionalmente la tensión es energía por unidad de longitud. En unidades naturales (con $\hbar=c=1$), la cuerda tiene asociada un parámetro dimensional de longitud, o si se quiere de masa, y no es de

extrañar después de lo expuesto en párrafos anteriores que su valor numérico sea cercano a la longitud o masa de Planck (1,2). Al analizar procesos de dispersión o las propiedades de las compactificaciones compatibles con la teoría, se deduce de forma algo heurística la siguiente forma del principio de incertidumbre:

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{E} + l_p^2 E, \quad (16)$$

donde l_p es la longitud intrínseca asociada a la cuerda, y E es la energía con la que pretendemos explorar una cierta longitud microscópica. El primer término en el miembro de la derecha es básicamente el principio de incertidumbre ordinario, mientras que el segundo es completamente nuevo, y es la consecuencia de las propiedades de la cuerda como objeto extendido. No es difícil ver que como función de E , Δx tiene un mínimo igual a $2\sqrt{\hbar} l_p$. Es como si hubiera una longitud mínima por debajo de la cual la interpretación de la geometría deja de ser clásica, y debe ser reemplazada por conceptos asociados a las cuerdas. Todavía no tenemos ninguna deducción rigurosa de fórmulas similares a (16) pero los ejemplos estudiados hasta la fecha hacen sospechar que algo parecido es muy probablemente cierto.

Muchos investigadores se han planteado la influencia que la Teoría de Cuerdas podría tener en Cosmología. Si en la Teoría del Big Bang extrapolamos las ecuaciones de Einstein hasta tiempo cero, nos encontramos con una singularidad inicial en el espacio-tiempo análoga a las que aparecen en el interior de un agujero negro. De nuevo uno esperaría que una teoría cuántica de la gravitación debería ser capaz de resolver la singularidad y sustituirla por algún estado altamente interesante. Quizás también debería poder decirnos si hay algo antes del Big Bang, del origen de la noción de tiempo macroscópico y, por qué no, también debería tener algo que decir sobre las razones por las que el Universo observable es tan grande y tan plano, así como sobre muchos otros enigmas de la Cosmología moderna. De momento se ha progresado poco en ésta dirección, pero de nuevo se trabaja con cierto optimismo a la vista de los resultados parciales obtenidos.

Muchas de éstas preguntas producen vértigo. Al tratar de buscar respuestas satisfactorias algunos investigadores empiezan a tener devaneos con el principio antrópico: si el Universo observable (por improbable que sea o parezca) está ahí para que lo observemos, puede que algunas de las leyes de la Naturaleza conspiren para que nosotros aquí y ahora podamos observarlo con todas sus sutilezas y enigmas. Existen formulaciones más o menos sofisticadas del principio antrópico, pero desde muchos puntos de vista es profundamente insatisfactorio, porque de forma esencial pone en duda la posibilidad de comprender y explicar el mundo en que vivimos. Después de siglos intentando desentrañar los fenómenos naturales, es como si la Naturaleza imitara al gato de Cheshire ofreciéndonos su más bella sonrisa para después correr a esconderse bajo el inescrutable manto de la

proliferación infinita de universos. Puede que sólo tengamos el privilegio de explorar uno de ellos donde nuestra existencia es posible. Desde la revolución Copernicana nuestro puesto en el Universo se hace cada vez más insignificante. La expresión moderna de la Teoría de la Evolución de Darwin nos enseña que la vida en sí no tiene ni propósito ni finalidad. En la misma línea, el principio antrópico, en cualquiera de sus manifestaciones parece decirnos que intentar explicar o calcular alguno de los parámetros del Modelo Estándar, como la constante de estructura fina (cuyo valor bien definido tiene una importancia capital en los fenómenos atómicos, moleculares y biológicos) puede ser una empresa fatua.

El futuro es un lugar al que se mira con anteojos teñidos de humo. La respuesta a algunos de los interrogantes planteados claramente formarán parte de él, pero es menos seguro que teorías como la de cuerdas nos permitan tender los puentes que nos hagan llegar al porvenir. Hay un buen número de experimentos en camino en los años venideros que finalmente disiparán el humo que nos ciega, y nos permitirán ver con luz diáfana una imagen mucho más profunda de la Naturaleza de la que tenemos actualmente.

Bibliografía

La lista de referencias es puramente indicativa, y contiene solamente algunos libros y artículos donde el lector interesado puede encontrar información adicional y una lista más detallada de publicaciones y monografías.

- [1] M.A. NIELSEN Y I.L. CHUANG: *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2000. Contiene una exposición bastante exhaustiva de la teoría y aplicaciones de la computación cuántica, y sólo requiere conocimientos elementales de álgebra y Mecánica Cuántica.
- [2] F.J. YNDURÁIN: *Electrones, Neutrinos y Quarks*. Ed. Drakontos, 2001. Contiene una discusión detallada, en general para no especialistas del Modelo Estándar de la Física de Partículas, incluyendo algunas de las últimas especulaciones.
- [3] J. POLCHINSKI: *String Theory Vol. I,II*. Cambridge University Press, 1998. Un libro que presenta una exposición avanzada y en profundidad de la Teoría de Cuerdas y algunos de sus logros.
- [4] S. HAWKING: *The Universe in a Nutshell*. Bantam Press, 2002. Contiene una discusión amena de agujeros negros, teoremas de singularidad, supercuerdas, dimensiones extra y gran cantidad de temas de actualidad en Física Teórica.
- [5] K.S. THORNE: *Agujeros Negros y Tiempo Curvo*. Ed. Drakontos, 1994. Un magnífico libro de divulgación sobre los agujeros negros, los llamados agujeros de gusano en el espacio-tiempo y sobre la posibilidad de viajar en el tiempo.
- [6] R. BOUSSO: "The Holographic Principle". *Rev. Mod. Phys.* **74**, 825 (2002). Contiene una discusión bastante pedagógica del principio holográfico tanto en el contexto de la Relatividad General y la Cosmología así como en la Teoría de Cuerdas en el contexto de la conjectura de Maldacena.

Luis Álvarez-Gaumé
Theory Division CERN.
Ginebra. Suiza