

TEMAS 10

INVESTIGACION *y* CIENCIA

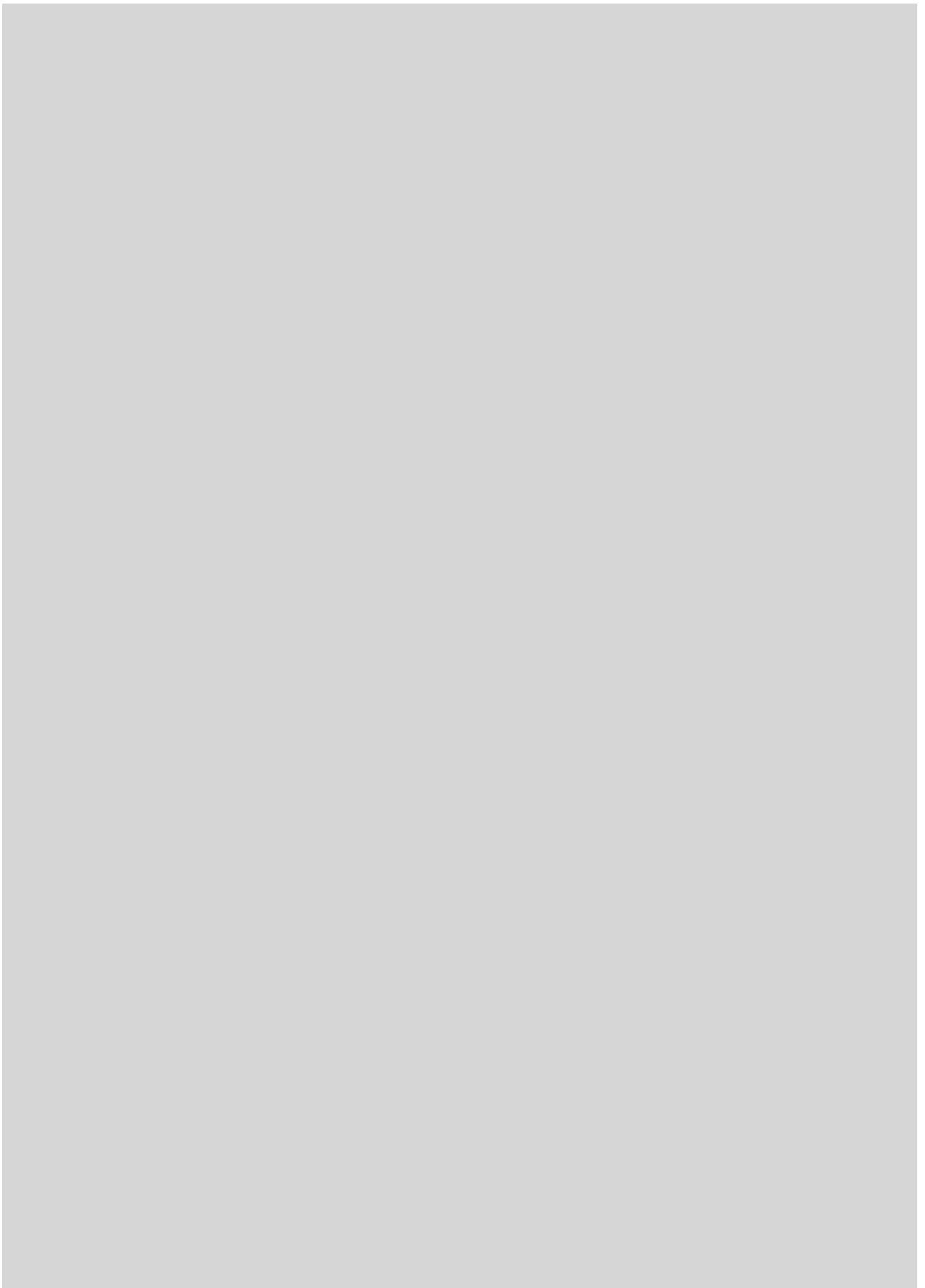
Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

Misterios de la física cuántica

4º trimestre 1997

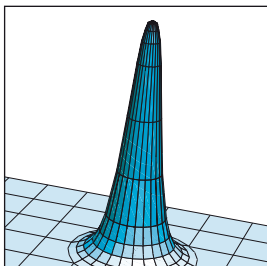


P.V.P. 1000 PTAS



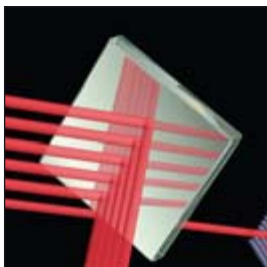


Sumario



Introducción 2
Adán Cabello

La concepción física de la naturaleza 4
P. A. M. Dirac

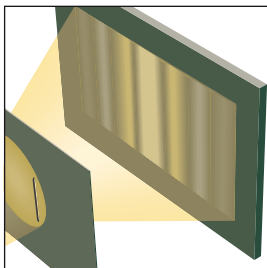


Teoría cuántica y realidad 13
Bernard d'Espagnat

Realidad del mundo cuántico 28
Abner Shimony

Filosofía cuántica 36
John Horgan

¿Más veloz que la luz? 46
Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat y Aephraim M. Steinberg



Español y estadística 55
Jason Twamley

Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica 57
David Z. Albert

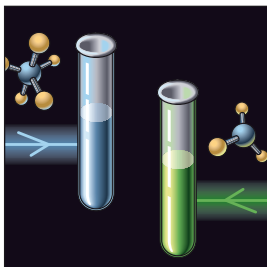
Los experimentos no realizados no tienen resultados 65
Adán Cabello



La dualidad en la materia y en la luz 68
Berthold-Georg Englert, Marlan O. Scully y Herbert Walther

Criptografía cuántica 75
Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur K. Ekert

La frontera entre lo cuántico y lo clásico 84
Philip Yam



Visión cuántica en la oscuridad 91
Paul Kwiat, Harald Weinfurter y Anton Zeilinger

Computación mecánico-cuántica 98
Seth Lloyd

Introducción

Adán Cabello

Desde el descubrimiento de la mecánica cuántica —hacia 1925— nada ha vuelto a ser igual en el mundo de la física. Hasta entonces la física (clásica) era consistente con una concepción de la naturaleza en la que todos los sistemas físicos tenían existencia individual y eran distinguibles unos de otros, en la que todas las propiedades de los sistemas físicos estaban predefinidas, eran independientes de cómo se observasen, y evolucionaban de acuerdo a ecuaciones deterministas. Así, según la física clásica, si uno dispusiese de suficiente información sobre las propiedades iniciales de un sistema, podría predecir su evolución futura, con independencia de que el sistema físico fuese una pelota o la totalidad del universo. La mecánica cuántica acabó con esa concepción de la naturaleza. Según la mecánica cuántica, en la naturaleza hay sistemas esencialmente indistinguibles, en los que muchas de sus “propiedades” no tienen valores predeterminados ni son independientes de cómo se midan. Así, en general, no es posible predecir con certeza el resultado de un experimento, sino sólo la probabilidad de que ocurra uno u otro resultado.

“Nadie comprende realmente la mecánica cuántica”, escribía Richard Feynman a mediados de los años sesenta. (Feynman obtuvo el premio Nobel por sus trabajos sobre electrodinámica cuántica.) Paul Dirac (también premio Nobel y uno de los fundadores de la mecánica cuántica) publicaba en el número de mayo de 1963 de *Scientific American* un artículo, cuya versión española abre este volumen, en el que reconocía que había grandes problemas al intentar elaborar una imagen consistente de la naturaleza a partir de la mecánica cuántica. Pero añadía: “Este tipo de problema no preocupa mucho al físico, quien se da por satisfecho si, tras realizar los cálculos, compara los datos obtenidos con los experimentales y concuerdan.” Esto es algo que la mecánica cuántica hace a la perfección. Sus reglas son claras y sus predicciones están en perfecta consonancia con todos los resultados experimentales conocidos en una amplísima variedad de situacio-

nes. Además, como marco teórico, la mecánica cuántica ha demostrado ser lo suficientemente flexible como para incorporar y explicar partículas elementales, interacciones y fenómenos físicos descubiertos con posterioridad. Este éxito predictivo y esta flexibilidad explican por qué la mecánica cuántica es el pilar más sólido de la física moderna. Sin embargo, no deja de resultar sorprendente que haya conseguido semejante rango tratándose de algo que nadie comprende y que nadie logra conciliar con una concepción consistente de la naturaleza.

¿Qué hemos aprendido desde entonces sobre esta extraña teoría? Muchas cosas, en buena parte debido a que algunos físicos no hicieron caso de la recomendación de Dirac y se preocuparon por problemas fundamentales. Si bien hoy sigue siendo cierto que nadie comprende la mecánica cuántica, en el intento de comprenderla han salido a la luz muchos fenómenos esencialmente cuánticos (sin parangón en la física clásica) y se les ha empezado a encontrar aplicaciones, algunas de las cuales eran impensables (e imposibles) con los recursos de la física clásica.

El debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica empezó en los mismos orígenes de la teoría. Muchos de sus fundadores (Einstein, de Broglie, Schrödinger) manifestaron sus dudas sobre la que se ha llamado interpretación ortodoxa (o interpretación de Copenhague) de la mecánica cuántica (defendida por Bohr, Heisenberg, Born y Pauli). Pero tras un periodo de intensa polémica, la mayoría de la comunidad científica adoptó la interpretación ortodoxa. Fueron pocos los que se negaron a asumir este estado de cosas (Einstein, Bohm) y siguieron investigando en busca de alternativas.

El problema de si era posible una teoría más completa que la mecánica cuántica, que hiciese predicciones compatibles con las suyas (con lo que compartiría su éxito experimental) y a la vez estuviese dotada de ciertos atributos clásicos (lo cual facilitaría la elaboración de una concepción de la naturaleza), era un problema sin consecuen-

cias experimentales y, por tanto, de poca relevancia científica, según se creía hacia 1964. Pero John Bell demostró ese mismo año que tal teoría no era posible, ya que sus predicciones serían diferentes de las de la mecánica cuántica en ciertos casos. Los atributos clásicos concretos requeridos por Bell eran inocentes en apariencia: que los observables físicos tuvieran valores bien definidos y que las influencias físicas no se propagasen a velocidades superiores a la de la luz.

Los progresos experimentales realizados a finales de los años setenta y principios de los ochenta permitieron reproducir en los laboratorios esos casos especiales en los que ambas teorías diferían (se trataba de dos partículas preparadas en un estado “enredado”, un estado que no se puede entender a partir de los estados de cada una de ellas). Los experimentos confirmaron que la mecánica cuántica era correcta, incluso en esa situación en la que sus predicciones eran realmente extrañas al sentido común (representado por esos dos atributos clásicos).

Tal confirmación de la mecánica cuántica, junto con los desarrollos experimentales que la habían hecho posible, alentaron las investigaciones dirigidas a confirmar en los laboratorios otras características suyas sorprendentes. Así se emprendió la realización experimental de “gatos de Schrödinger” (estados en los que ciertas propiedades están indefinidas hasta que se hace una observación) e incluso —muy recientemente— de experimentos en los que se estudia la “decoherencia” (cómo y cuándo las propiedades que permanecen indefinidas deciden tomar uno u otro valor). Desentrañar este mecanismo serviría para resolver el llamado “problema de la medida”, que afecta a la mayoría de las interpretaciones de la mecánica cuántica. La “solución” de este problema permitiría reconciliar el mundo cuántico con el mundo de la experiencia cotidiana en el que todas las propiedades parecen estar perfectamente definidas.

Otros experimentos en los que se revelan peculiaridades esencialmente cuánticas son los de elección

retardada y de borrado cuántico. En los primeros se pone de manifiesto que un fotón no es ni una partícula ni una onda, sino que su naturaleza depende de qué decidamos medir, incluso cuando esta decisión se retrase hasta el último momento. Los experimentos de borrado cuántico revelan, además, que un fotón ni siquiera es una partícula o una onda —es decir, que las nociones de partícula y de onda no son mutuamente excluyentes, como sugiere el principio de complementariedad de Bohr—, puesto que los efectos de interferencia, que desaparecen cuando se obtiene información sobre la trayectoria seguida por los fotones, pueden reaparecer manipulando los detectores. Sorprendente.

Y aún hay mucho más. La investigación de los fundamentos ha tomado un nuevo rumbo en los últimos años. El hecho de no “comprender” la mecánica cuántica no ha supuesto un obstáculo para que una nueva generación de físicos haya desarrollado una intuición sobre los fenómenos cuánticos que les permite usarlos para atacar algunos problemas que son irresolubles con herramientas no cuánticas. Ello ha servido para que muchos de los avances teóricos y experimentales concebidos originalmente con vista a la resolución de cuestiones de fundamentación (por ejemplo, la fabricación de los estados enredados de los que hablábamos antes) hayan encontrado aplicaciones prácticas (y recíprocamente; gracias a esta vertiente aplicada, es posible disfrutar hoy de técnicas para rehacer con mucha mayor precisión experimentos de carácter fundamental). La criptografía cuántica, la computación cuántica, las mediciones sin interacción, la codificación densa cuántica o el teletransporte de estados cuánticos son algunos ejemplos de esta nueva forma de pensar.

La primera de estas aplicaciones (y la única que por el momento ha traspasado las paredes de los laboratorios) es la criptografía cuántica, que aprovecha la especial sensibilidad de las correlaciones que hay entre las partes de un estado enredado (frente a, por ejemplo, las intromisiones de un observador no autorizado), para distribuir claves criptográficas de manera que se pueda garantizar (por principio) la confidencialidad de la clave así distribuida. Estos sistemas de distribución de claves ya se han probado con éxito en cables de fibra óptica de hasta 20 kilómetros, de modo que el Pentágono está pensando en aplicarlos.

Otra de estas aplicaciones es la com-

putación cuántica. Se ha demostrado que un ordenador basado (a nivel fundamental) en fenómenos cuánticos permitiría hacer cosas que ningún ordenador actual puede hacer: factorizar números enteros de manera que el tiempo requerido no crezca exponencialmente con el número de cifras del número a factorizar, explorar bases de datos de un modo más eficiente o simular sistemas cuánticos. Los experimentos realizados hasta ahora sólo permiten hacer cálculos extremadamente sencillos. El futuro práctico de la computación cuántica queda todavía lejano.

Otro ejemplo de este nuevo enfoque son las llamadas mediciones “sin interacción”. ¿Es posible detectar la presencia de un objeto sin hacer incidir fotones sobre él? Según la física clásica no, pero sí según la mecánica cuántica. Este efecto cuántico podría tener en el futuro importantes usos en dispositivos de detección y medida (por ejemplo, aparatos de rayos X no agresivos).

La codificación densa cuántica permite multiplicar la capacidad de un canal de distribución de información. Por ejemplo, según la mecánica cuántica es posible transmitir 2 bits de información (4 valores) mediante un único sistema cuántico de dos niveles (clásicamente, un sistema de dos niveles sólo permite transmitir un bit de información). En el laboratorio sólo se ha logrado transmitir un “trit” (3 valores); en cualquier caso, es más que lo permitido clásicamente.

El teletransporte de estados cuánticos es un procedimiento en el que (con la ayuda de los estados enredados y transmitiendo cierta información por un canal clásico) se hace desaparecer un estado cuántico cualquiera y se recrea en otro punto del espacio. Cuando escribo esto, están a punto de publicarse las primeras confirmaciones experimentales de este fenómeno.

Como vemos, las cosas han cambiado mucho en los siete últimos lustros. Partiendo de un enfoque fundamental, se han aprendido muchas cosas sobre la naturaleza: hemos aprendido cómo no es la naturaleza, que no es poco; también se ha aprendido a fabricar en los laboratorios estados con propiedades puramente cuánticas y, además, están empezándose a descubrir aplicaciones de muchas de las cosas encontradas en el camino. A este paso, quizás algún día se nos olvide lo que queríamos decir cuando hablábamos de comprender la mecánica cuántica.

La concepción física de la naturaleza

P. A. M. Dirac

*Relato del desarrollo de las teorías físicas del pasado
y de su posible evolución futura*

Quiero comentar en este artículo el desarrollo de la teoría física en general, es decir, su evolución pasada y lo que pueda esperarse de ella en el futuro. Este proceso de desarrollo continuo puede considerarse como un proceso evolutivo que ha ido aconteciendo durante varios siglos.

El primer paso importante lo dio Newton. Quienes le precedieron consideraban que el mundo era esencialmente bidimensional, constituido por las dos dimensiones por las que puede caminarse, mientras que la dimensión arriba-abajo parecía ser completamente distinta. Newton mostró que podía concebirse a esta última como simétrica de las otras dos. Para ello introdujo las fuerzas gravitatorias y les asignó su lugar en la teoría física. Puede decirse que Newton nos permitió pasar de una concepción que tenía simetría bidimensional a otra que la tenía tridimensional.

Einstein dio otro paso en la misma dirección, al poner de manifiesto cómo puede pasarse de esta concepción dotada de simetría tridimensional a otra que la tiene tetradimensional. Introdujo el tiempo y mostró que su papel presenta muchas simetrías con el de las otras tres dimensiones espaciales, sin llegar a la completa semejanza. La concepción einsteiniana nos lleva a considerar el mundo desde un punto de vista tetradimensional, aunque las cuatro dimensiones no sean completamente simétricas, pues hay algunas direcciones que difieren de las demás, las llamadas direcciones nulas, aquellas en las que puede moverse un rayo de luz. Aunque la imagen tetradimensional no sea por completo simétrica, sigue habiendo mucha simetría entre las cuatro dimensiones. Por lo que se refiere a las ecuaciones de la física, la única falta de simetría consiste en la aparición de un signo menos en las ecuaciones que se refieren a la dimensión temporal, como refleja la figura 6.

Puede que al lector no le impresione mucho este cambio de dimensiones de la concepción del mundo, pues él lo sigue percibiendo como tridimensional. ¿Cómo puede reconciliarse esta apariencia con la imagen tetradimensional que Einstein exige a los físicos?

Lo que nuestra consciencia capta es en realidad una sección tridimensional de una imagen de cuatro dimensiones. Para obtener lo que percibimos en un momento dado, tenemos que realizar un corte tridimensional, corte que será distinto en un instante posterior. Buena parte de la tarea de los físicos consiste en relacionar los sucesos de una sección dada con los de otra posterior, lo que nos lleva a concluir que la concepción basada en la simetría tetradimensional tampoco refleja completamente la situación. Esto adquiere singular relevancia cuando se consideran las novedades aportadas por la teoría cuántica. La teoría cuántica nos ha enseñado que tenemos que considerar también el proceso de observación, pero resulta que las observaciones suelen requerir secciones tridimensionales de la imagen tetradimensional del universo.

La teoría de la relatividad especial de Einstein nos exige que demos a las leyes físicas una forma que manifieste la simetría tetradimensional, pero, cuando las usamos para sacar consecuencias de las observaciones, tenemos que aportar un elemento adicional, a saber, las secciones tridimensionales que describen nuestra percepción del universo en un momento dado.

Einstein realizó otra contribución decisiva para el desarrollo de nuestra concepción física del mundo: la teoría de la relatividad general, que nos obliga a aceptar que el espacio físico es curvo. Los físicos que le precedieron habían trabajado siempre con un espacio plano, el espacio plano tridimensional newtoniano, que la teoría de la relatividad especial amplió a cuatro dimensiones. Al forzar la adop-

ción del espacio curvo, la relatividad general supuso una gran innovación. Los fundamentos de esta teoría implican la formulación de las leyes físicas en el espacio curvo tetradimensional, reflejando la simetría de las cuatro dimensiones. Pero no perdamos de vista que cuando nos las habemos con observaciones, como resulta necesario si consideramos las cosas desde el punto de vista de la teoría cuántica, tenemos que referirnos a secciones de este espacio tetradimensional. Si el espacio es curvo, cualquier sección suya también lo será, pues en términos generales no podemos asignar una significación precisa a una sección plana de un espacio curvo.

La consecuencia de todo esto es que tenemos que realizar cortes tridimensionales del espacio curvo tetradimensional y analizar las observaciones en estos cortes.

Hace algunos años que se intenta aplicar las ideas cuánticas a la gravitación, como fenómeno físico que es, con el sorprendente resultado de que, si se considera la teoría gravitatoria desde el punto de vista de los cortes, se eliminan algunas posibilidades o grados de libertad. El campo gravitatorio es un campo tensorial que tiene diez componentes. Resulta que bastan seis de ellos para describir adecuadamente todos los fenómenos físicos importantes, pudiendo eliminarse los restantes factores de las ecuaciones, si bien no hay manera de hacerlo sin destruir la simetría tetradimensional. La consecuencia es que, si se insiste en que se conserve la simetría tetradimensional de las ecuaciones, no puede adaptarse la teoría de la gravitación al tipo de análisis de las mediciones exigido por la teoría cuántica más que adoptando una descripción más complicada que la requerida por la pura situación física. Esto me obliga a plantearme si el requisito de la tetradimensionalidad física es verdadera-

mente fundamental. Los tiempos en que no se dudaba de la necesidad de que la totalidad de la física se expresase en forma tetradimensional no están muy lejanos, aunque ahora parezca que la importancia de la simetría tetradimensional no sea tan decisiva, puesto que a veces puede describirse la naturaleza con más sencillez si se prescinde de ella.

Voy a tratar ahora de los resultados aportados por la teoría cuántica. La teoría cuántica analiza las cosas muy pequeñas, constituyendo el tema central de la física en el presente siglo, periodo en el que los físicos han reunido un montón de datos experimentales y han desarrollado teorías para dar cuenta de ellos. Esta combinación de teoría y experimentación ha producido cambios importantes en la concepción física del mundo.

La primera aparición del cuanto se produjo cuando Planck descubrió que era necesario suponer que la energía de las ondas electromagnéticas no podía existir más que como múltiplos de una determinada unidad, depen-

diente de la frecuencia de las ondas, si se quería explicar la ley de la radiación del cuerpo negro. Einstein descubrió luego que la misma unidad de energía aparecía en el efecto fotoeléctrico. Estos primeros trabajos de teoría cuántica obligaban simplemente a aceptar tal unidad de energía, pero no podían incorporarla a la concepción física.

El primer paso en esta dirección fue la idea atómica de Bohr, según la cual los electrones se desplazaban por ciertas órbitas precisas, aunque a veces saltasen de una a otra. No se sabía cómo se producía tal salto; había que aceptarlo sin más como una especie de discontinuidad. El modelo era incompleto y primitivo, pues sólo se aplicaba a casos especiales, sobre todo a aquellos en los que el comportamiento de un único electrón fuese lo importante para la resolución del problema considerado.

El gran avance de la teoría cuántica se produjo en 1925 con el descubrimiento de la mecánica cuántica, rea-

lizado por Heisenberg, primero, y por Schrödinger, poco después, de forma independiente y desde diferentes puntos de vista. El trabajo de Heisenberg se atenía a los datos experimentales de naturaleza espectral que se estaban acumulando por entonces. Descubrió la forma de ajustarlos a un esquema que se conoce con el nombre de mecánica matricial. Todos los datos de los experimentos espectroscópicos encajaban perfectamente en el esquema de la mecánica matricial, lo que condujo a una concepción bastante distinta del mundo atómico. El enfoque de Schrödinger era más matemático y trataba de encontrar una teoría elegante que describiera los acontecimientos atómicos, para lo que le sirvieron de ayuda las ideas de De Broglie sobre ondas asociadas a partículas, conceptos que logró generalizar, obteniendo una ecuación muy hermosa que describe los procesos atómicos y a la que se denomina la ecuación de onda de Schrödinger. Schrödinger llegó a ella por puro razonamiento, sin seguir de cerca los avances experimentales, sino tratando de alcanzar una bella generalización de las ideas de De Broglie.

Me gustaría contarles una historia que le oí al mismo Schrödinger. En cuanto se le ocurrió la idea de su ecuación, la aplicó inmediatamente al comportamiento del electrón del átomo de hidrógeno, pero los resultados que obtuvo no cuadraban con los experimentales. La discrepancia se debía a que por entonces se ignoraba que el electrón girase sobre sí mismo. Naturalmente esto decepcionó mucho a Schrödinger e hizo que abandonase el trabajo durante algunos meses. Pero luego se dio cuenta de que, si aplicaba la teoría de un modo aproximado, sin tener en cuenta los refinamientos exigidos por la relatividad, sus resultados concordaban con las observaciones. De esta forma es como se dio a conocer al mundo la ecuación de onda de Schrödinger, publicando un trabajo sobre la aproximación. Cuando posteriormente se descubrió cómo tratar correctamente el espín del electrón, quedó completamente aclarada la discrepancia entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación relativista de Schrödinger.

Creo que la moraleja de este cuento es que la belleza de las ecuaciones en que se trabaja resulta más importante que su correspondencia con los datos experimentales. Si Schrödinger hubiera tenido más confianza en sí mismo, podría haber publicado su trabajo algunos meses antes, además de



1. ISAAC NEWTON (1642-1727). Su ley de la gravitación cambió la concepción física de la naturaleza, que pasó de tener simetría bidimensional a tenerla tridimensional. Este dibujo lo hizo James Mercadel en 1760, basándose en un cuadro de Enoch Seeman.



2. ALBERT EINSTEIN (1879-1955). Su teoría de la relatividad especial llevó la concepción física de la naturaleza de la tridimensionalidad a la tetradimensionalidad. Esta fotografía de 1929 le muestra junto a su esposa y a su hija.

publicar una ecuación más precisa. Esta ecuación es conocida ahora como la ecuación de Klein-Gordon, aunque su verdadero descubridor fue Schrödinger, quien de hecho la descubrió antes que el tratamiento no relativista del átomo de hidrógeno. Parece que si uno se esfuerza por conseguir que las ecuaciones sean bellas, y si se tiene una buena intuición, se anda por camino seguro. Si los resultados de nuestro esfuerzo no concuerdan por completo con los experimentales, no

hay que desanimarse, pues es muy posible que la discrepancia se deba a pequeños detalles que no se han tenido en cuenta adecuadamente y que el propio avance futuro de la teoría esclarecerá.

Así es como nació la mecánica cuántica, originando un cambio decisivo en la concepción física del mundo, puede que el mayor que haya acontecido nunca. El cambio consiste en que tenemos que abandonar la concepción determinista que siempre se dio por

supuesta. Nos encontramos con una teoría que no predice con certeza lo que va a ocurrir en el futuro, no informándonos más que de la probabilidad de que ocurran diversos acontecimientos. Este abandono del determinismo ha sido un tema muy polémico, habiendo a quienes no les gusta nada. A Einstein esto no le gustó nunca y, aunque fue uno de los grandes artífices del desarrollo de la mecánica cuántica, mantuvo siempre una abierta hostilidad hacia la forma que tomó la mecánica cuántica en su tiempo, forma que no ha cambiado posteriormente.

Esta hostilidad puede simbolizarse en un trabajo de Einstein, Podolsky y Rosen del que se ha hablado mucho. Trata de las dificultades que surgen al tratar de elaborar una concepción consistente cuyos resultados concuerden con las reglas de la mecánica cuántica, reglas que son bastante precisas. Se sabe cómo hacer los cálculos y cómo comparar los resultados obtenidos con los datos experimentales. No hay disputas sobre el formalismo, pues funciona tan bien que nadie puede permitirse el lujo de discrepar. Pero sí se discute la concepción que tenemos que montar tras este formalismo.

Propongo que no nos preocupemos demasiado por estas discusiones. Creo sinceramente que la fase actual de la física no es la fase definitiva, sino una más de la evolución de nuestra concepción de la naturaleza, por lo que es lógico confiar en que el proceso continúe en el futuro, como sucede con la evolución biológica. La fase actual de la teoría física no es más que un peluazo que conduce a las mejores fases futuras. Y para estar seguro de que serán mejores basta con considerar las dificultades con que tropieza la física del presente, tema al que voy a dedicar alguna atención.

Quienes no sean especialistas en el asunto podrían sacar la conclusión de que la teoría física no se encuentra en muy buena forma, con tantas dificultades, no yéndole mucho mejor a la teoría cuántica. Para evitar esta impresión quiero empezar diciendo que la teoría cuántica es una teoría extraordinariamente buena, que concuerda maravillosamente con una enorme cantidad de fenómenos observados. Es indudable que es una buena teoría y la única razón de que los físicos hablen tanto de los problemas que presenta es que son precisamente los problemas los que son interesantes. Los éxitos se dan por supuestos, puesto que no se gana nada con repetirlos una y otra vez, mientras que si