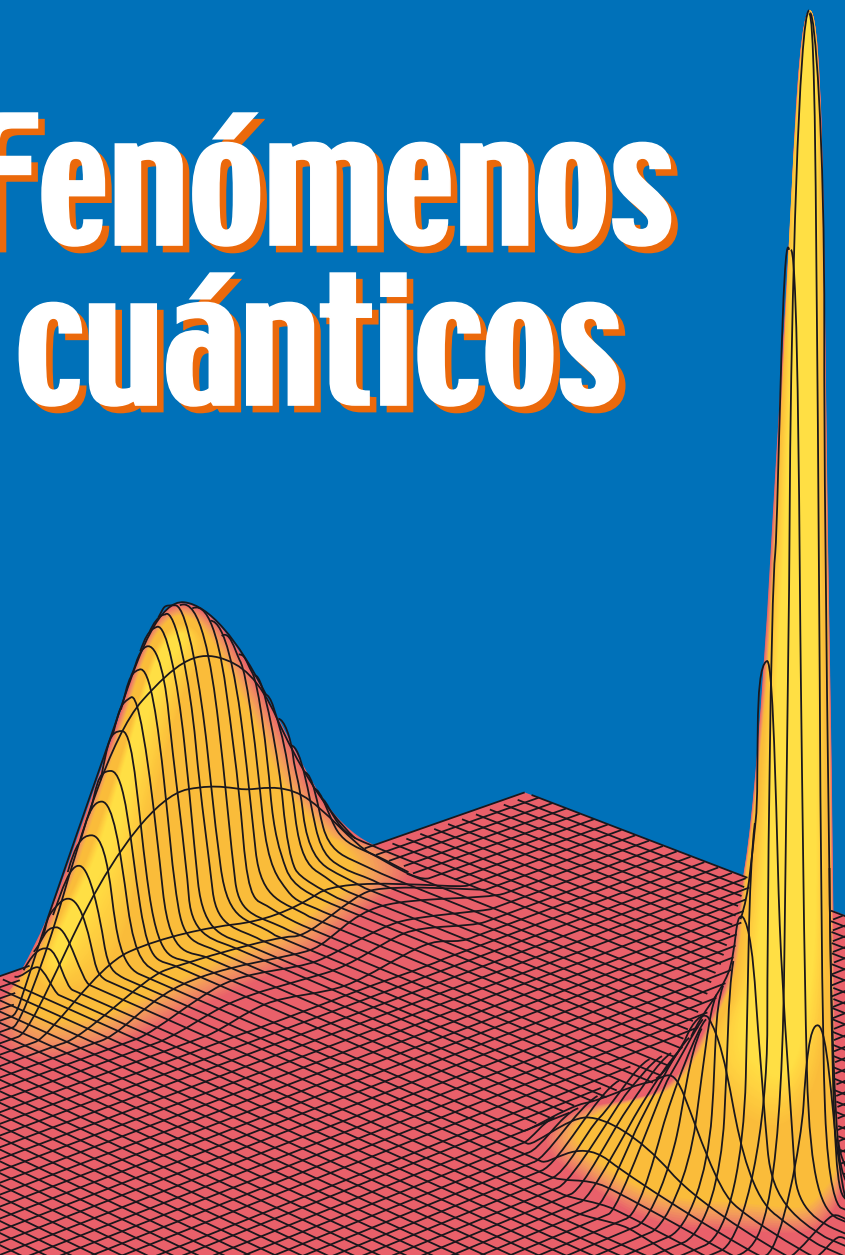


# TEMAS 31

INVESTIGACION  
**CIENCIA**  
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

## Fenómenos cuánticos



1er trimestre 2003



6,50 EURO



# Sumario

## **2 Introducción**

*Adán Cabello*

### **HISTORIA DE LA FISICA CUANTICA**

---

## **6 Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica**

*David C. Cassidy*

## **14 Dirac y la belleza de la física**

*R. Corby Hovis y Helge Kragh*

## **20 Cien años de misterios cuánticos**

*Max Tegmark y John Archibald Wheeler*

### **INFORMACION Y COMPUTACION CUANTICA**

---

## **30 Reglas para un mundo cuántico complejo**

*Michael A. Nielsen*

## **38 Computación cuántica con moléculas**

*Neil Gershenfeld e Isaac L. Chuang*

## **44 Juegos cuánticos**

*Juan M. R. Parrondo*

## **46 Teletransporte cuántico**

*Anton Zeilinger*

### **SISTEMAS FISICOS CUANTICOS**

---

## **56 Trampa de láser para partículas neutras**

*Steven Chu*

## **64 Puntos cuánticos**

*Mark A. Reed*

## **70 El límite clásico del átomo**

*Michael Nauenberg, Carlos Stroud y John Yeazell*

## **76 El láser monoatómico**

*Michael S. Feld y Kyungwon An*

## **82 El condensado de Bose-Einstein**

*Eric A. Cornell y Carl E. Wieman*

## **88 Electrodinámica cuántica en cavidades**

*Serge Haroche y Jean-Michel Raimond*

# Introducción

*La física cuántica vive un período plagado de nuevos descubrimientos, reinterpretaciones y aplicaciones prácticas. Sigue siendo también una gran desconocida*

Adán Cabello, Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla

---

Hay una frase de Murray Gell-Mann (premio Nobel de Física en 1969) que, además de sublevar audiencias, resume lo que algunos pensamos: “Hay una diferencia mayor”, dice Gell-Mann, “entre un ser humano que sabe mecánica cuántica y otro que no, que entre un ser humano que no sabe mecánica cuántica y los otros grandes simios”. La mecánica cuántica es un descubrimiento de enorme trascendencia para entender el Universo (el universo con mayúscula y también nuestro universo cotidiano), pero al público en general le es desconocida. Para el subconsciente popular, “cuántico” es sinónimo de complicado, incomprendible. En un artículo escrito con motivo del centenario, en el año 2000, de la explicación por Max Planck de la distribución de la energía en la radiación del cuerpo negro, el acontecimiento que marcó el comienzo de la mecánica cuántica, Rolf Tarrach (ex presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC) se preguntaba: “En este mundo ahogado en la información, ¿cómo es [posible] que casi nadie sepa casi nada de la revolución científica del siglo XX más profunda y más determinante de nuestro mundo actual? Quizá sea un problema de formación, o acaso de dificultad, pero es una pena que la sociedad no disfrute más con algo tan relevante para nuestra actualidad tecnológica y, a la vez, tan irreal, tan sorprendente y provocador como el mundo de los fenómenos cuánticos”. La relevancia tecnológica de los “fenómenos cuánticos” es evidente a la vista del siguiente dato: “Más del 25 % del producto mundial bruto depende de nuestra comprensión de la mecánica cuántica; donde haya un transistor, un láser, una resonancia magnética, ahí estará la presencia de la mecánica cuántica”. La mecánica cuántica tiene ya más de 100 años; ha cambiado radicalmente nuestra visión científica de la naturaleza, ha

cambiado las vidas de varias generaciones, amenaza con seguir haciéndolo y, pese a todo, sigue siendo una gran desconocida.

Corregir esta situación pasa por hacer llegar los logros pasados y potenciales de la física cuántica a un público lo más amplio posible; pasa también por que se despierte en muchas más mentes ese “sentido de la maravilla” que impregna la física cuántica; pasa por lograr convencer a muchas personas (investigadores, periodistas, gestores, políticos) de su importancia presente y futura. En ese sentido, la labor de difusión de *Investigación y Ciencia* ha sido ejemplar, al poner a disposición del público en lengua española artículos de algunos de los más reputados especialistas, escritos con la intención de llegar a un público no especializado y sin que ello signifique una merma en el rigor. El interés por estas cuestiones se ha despertado en muchos de nosotros precisamente leyendo estos artículos. A menudo se olvida que el futuro y, en cierta medida, el éxito o el fracaso de esta empresa depende de iniciativas así.

En 1997, en el número 10 de la serie Temas, reunimos 10 artículos publicados en *Investigación y Ciencia* (encontrar alguno de ellos era por entonces imposible), traducimos por primera vez al español otros, procedentes de diversas fuentes, y pusimos todo ello bajo el título de “Misterios de la física cuántica”. Aparecían, juntos por primera vez, trabajos sobre los “fundamentos” (interpretaciones de la mecánica cuántica, alternativas mediante variables ocultas a la mecánica cuántica, experimentos para comprobar la violación de la desigualdad de Bell o el “borrado” cuántico) y trabajos sobre “aplicaciones” recientes de la mecánica cuántica (criptografía cuántica, mediciones “sin interacción”, computación cuántica). Nuestro propósito principal fue

el de intentar transmitir la idea de que la investigación en física cuántica había “tomado un nuevo rumbo” en muy poco tiempo. Que una nueva generación de físicos “había desarrollado una intuición sobre los fenómenos cuánticos que les permite usarlos para atacar algunos problemas que son irresolubles con herramientas no cuánticas”, y que “muchos de los avances teóricos y experimentales concebidos originalmente con vista a la resolución de cuestiones de fundamentación” habían “encontrado aplicaciones prácticas”. Algunas de ellas eran entonces tan recientes que todavía no habían llegado a las páginas de *Investigación y Ciencia*. Por ejemplo, hablando del teletransporte de estados cuánticos, decía entonces: “Cuando escribo esto, están a punto de publicarse las primeras confirmaciones experimentales de este fenómeno”. La primera de ellas, la del grupo de la Universidad de Innsbruck dirigido por Anton Zeilinger, apareció publicada en *Nature* justo la misma semana en que aquel número 10 de la serie Temas aparecía en los quioscos. La trascendencia mediática del experimento fue enorme (para lo que suele ser habitual cuando se trata de ciencia). Al año siguiente, la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia reconocía que estos experimentos habían sido como uno de los éxitos científicos más importantes del año. Dos años después, *Investigación y Ciencia* publicaba un incitador artículo de Zeilinger sobre teletransporte. Otro ejemplo: en 1995, Eric Cornell y Carl Wieman, en el Instituto Nacional de Medidas y Tecnología (NIST), de la Universidad de Colorado en Boulder, y Wolfgang Ketterle, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), en Cambridge, Massachusetts, obtuvieron experimentalmente la condensación de Bose-Einstein en gases atómicos diluidos. En 1998, *Investigación y Ciencia* publicaba un artículo de los dos

primeros sobre los condensados de Bose-Einstein. En 2001, los tres recibían el premio Nobel de Física. Desde 1997, además, han sucedido muchas otras cosas. Una muy importante: el interés por la física cuántica “fundamental” ha crecido de forma espectacular. No hay más que ver el volumen de artículos publicados en las revistas especializadas, e, incluso, la repercusión que algunas investigaciones han tenido en los medios de comunicación. Había pues, que dar continuidad a aquel proyecto, ponerse al día, tratar de vislumbrar por dónde van a ir los tiros en el futuro y qué herramientas van a ser necesarias para transitar por los nuevos caminos que se están abriendo.

En el año 2000 celebrábamos el centenario de la revolucionaria contribución de Planck. Nos ha parecido, pues, pertinente empezar este nuevo volumen de la serie Temas volviendo la vista atrás. En los últimos años,

muchos historiadores de la ciencia han dedicado sus esfuerzos a investigar la labor de los “padres fundadores” de la mecánica cuántica. Fruto de estas investigaciones, han visto recientemente la luz excelentes biografías científicas de algunos de ellos. Werner Heisenberg y Paul Dirac (véanse los artículos 1 y 2 de este volumen) son, sin duda, dos de esos padres fundadores de la mecánica cuántica. No han pasado ni siquiera 80 años desde que vieron la luz sus contribuciones, y en ese tiempo el mundo ha cambiado completamente. Por otro lado, el centenario del trabajo de Planck era un buen momento para repasar cuáles han sido las grandes

contribuciones de la física cuántica al siglo XX y cuál es el estado actual de la teoría (artículo 3). Ahora más que nunca necesitamos esa perspectiva histórica para evaluar el potencial de lo que ahora nos tenemos entre manos. Más adelante volveremos sobre esto.

Lo que ahora nos traemos entre manos puede llegar a convertirse en una revolución científica. Está en marcha desde 1984 (desde el primer protocolo cuántico para distribuir claves secretas de manera segura, obra de Charles Bennett y Gilles Brassard), pero tiene nombre y goza de predicamento desde no hace mucho: la

Los descubridores, en 1993, del teletransporte de estados cuánticos (de izquierda a derecha y de arriba abajo: Richard Jozsa, Bill Wootters, Charles Bennett, Gilles Brassard —que lleva una camiseta con los cuatro “estados de Bell”—, Claude Crépeau y Asher Peres), contemplan, en 1999, el “teletransporte” de un gato. En la foto de la izquierda faltaba todavía el último paso... Bennett y Brassard fueron los inventores, en 1984, del primer protocolo cuántico para distribuir claves criptográficas.



CORTESÍA DE CHARLES BENNETT

información (y computación) cuántica. Construida sobre el principio de que la información y la física están interconectadas a un nivel fundamental, promete un tipo de criptografía cuya seguridad descansa sobre principios fundamentales de la física y ofrece una esperanza razonable de construir ordenadores cuánticos. Estos ejecutarían algoritmos que resolverían ciertos problemas matemáticos (algunos de enorme importancia comercial) mucho más deprisa (en muchos menos pasos) que cualquier algoritmo conocido ejecutado en un ordenador actual (o futuro pero basado en los principios de los ordenadores que conocemos). A un nivel más fundamental, ha permitido ampliar la teoría clásica de la información al incorporar los estados cuánticos como posible recurso para procesar información. En el peor de los casos, la información cuántica es ya un nuevo campo de la física que en poco tiempo ha concitado los esfuerzos coordinados de físicos de diversas ramas (física atómica y molecular, óptica cuántica, física de la materia condensada, y altas energías) y especialistas de otros campos (informáticos, expertos en comunicaciones y teoría de la comunicación).

Los primeros experimentos sobre teletransporte (o “teleportación”) de estados cuánticos (*artículo 6*) tuvieron la nada desdeñable virtud de atraer hacia este campo la atención de los medios, gracias probablemente más a lo evocador del nombre que a la belleza de los experimentos. Sin embargo, la chispa que despertó el interés en este campo fue el descubrimiento en 1994 por parte de Peter Shor de una forma teórica de aplicar los recursos de la mecánica cuántica a la resolución de un problema matemático, esencial para la seguridad del comercio electrónico y los métodos de transmisión “segura” de información que usamos hoy en día. El descubrimiento de que un ordenador cuántico pondría en jaque la seguridad de todas las comunicaciones actuales, apuntado por el descubrimiento en 1995 de los códigos cuánticos de corrección de errores (que sorteaban el único obstáculo fundamental aparente —la decoherencia— para la consecución de un ordenador cuántico), junto con el reconocimiento de que la única manera de recobrar esa seguridad era, precisamente, la utilización de la criptografía cuántica, atrajo personas, recursos y financiación a este campo. Poco después ya leíamos noticias como ésta: “El ejército de los Estados Uni-

dos planea gastar 15 millones de dólares para alimentar el recién nacido campo de la teleportación cuántica, que pretende aprovechar el extraño comportamiento de las partículas atómicas para procesar información a velocidades que quitan el aliento. (...) Tres grupos académicos —en el Instituto de Tecnología de California (Caltech), en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y en la Universidad de California en Los Angeles— recibirán alrededor de un millón de dólares al año durante los próximos 5 años de un consorcio de financiadores de proyectos de defensa a fin de que trabajen en distintos aspectos de la comunicación cuántica”. Asimismo, los medios de comunicación encontraron en el ordenador cuántico otro filón. Sin embargo, acostumbrados a que los ordenadores dupliquen sus prestaciones cada dieciocho meses, el que no sepamos cuándo estará disponible un ordenador cuántico y la prudente estimación de que no será antes de 20 años parecen haber arrojado un jarro de agua fría sobre un campo en efervescencia. Es probable que falte algo de perspectiva.

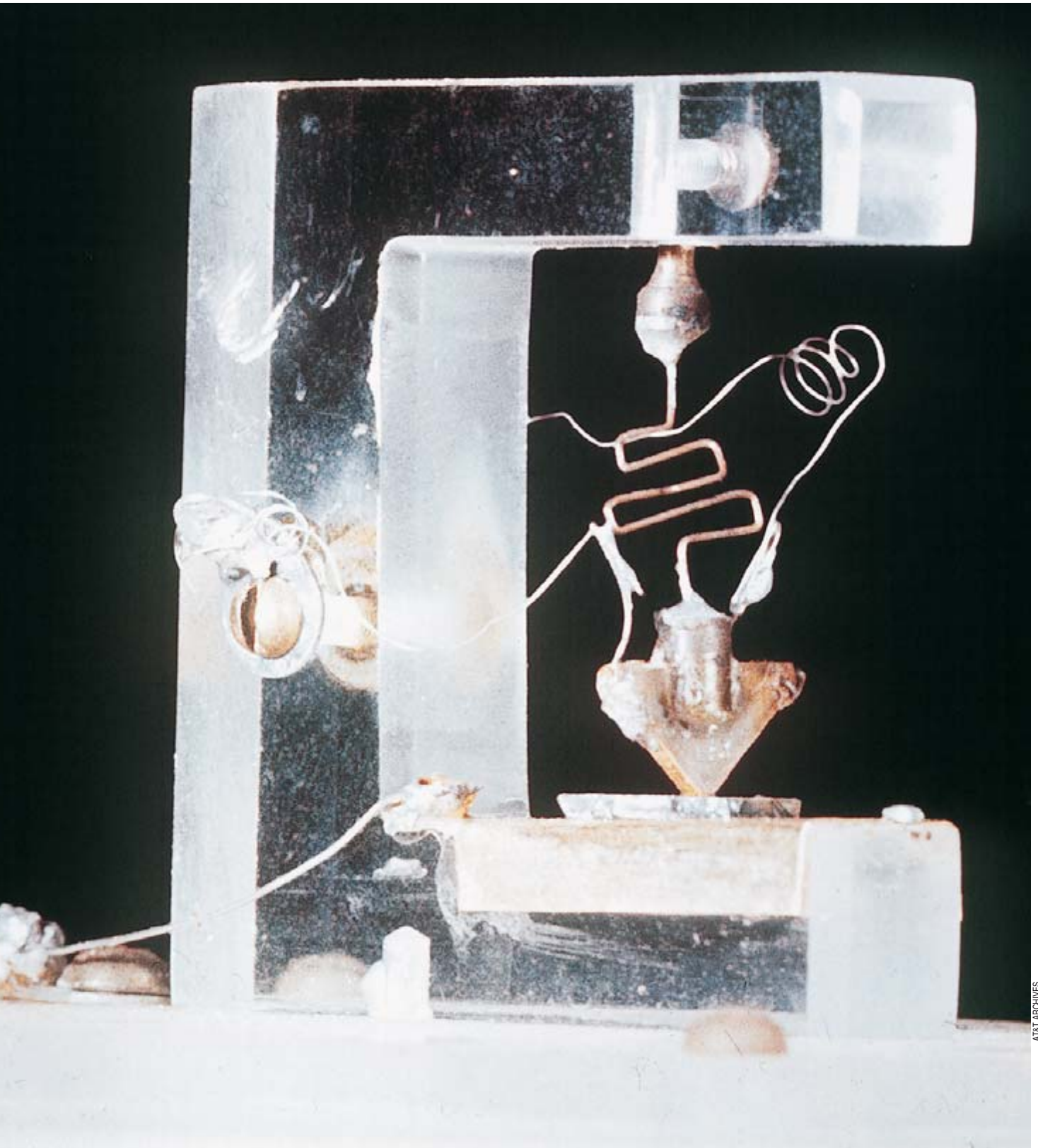
En 1958 ya se sabía cómo construir, en principio, un láser (otro fenómeno cuántico). En los años sesenta, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos prestó un amplísimo apoyo a la investigación relacionada con las fuentes de luz coherente. La idea era utilizar el láser como instrumento de detección, guía, localización, e, incluso, como arma. Sin embargo, sus aplicaciones “comerciales” son mucho más recientes. Hoy el láser se usa en comunicaciones vía satélite, radioastronomía (por ejemplo, la distancia de la Tierra a la Luna fue medida con gran precisión mandando un pulso láser y midiendo el tiempo que se tardaba en recibir el pulso reflejado), metalurgia (para grabar, perforar y cortar metales) o medicina (en cirugía para corregir la miopía, hipermetropía y los desprendimientos de retina, en microcirugía del oído interno, de las fosas nasales, de las cuerdas vocales), para leer información digital codificada (por ejemplo los códigos de barras en los supermercados, el sonido de los CD o la imagen y el sonido de los DVD) y para grabar los microcircuitos en las obleas de silicio. Como recuerda Umberto Eco: “Los medios de comunicación confunden la imagen de la ciencia con la de la tecnología y transmiten esta confusión a sus usuarios [entre los que se encuentran los políticos], que consideran científico todo lo que

es tecnológico”. Como sugiere Eco, una receta para distinguirlas es que “la tecnología es la que te da todo enseguida, mientras que la ciencia avanza despacio”. Queda todavía mucha ciencia por desarrollar antes de que se pueda construir un ordenador cuántico práctico. Es muy probable, además, que sean otras aplicaciones de la mecánica cuántica las que cambien el futuro más inmediato (nanolitografía, relojes atómicos más estables, comunicaciones seguras a decenas de kilómetros).

En cualquier caso, la información cuántica es la gran noticia en este campo en los últimos años. Por ello debíamos prestarle una atención especial (*artículo 4*). Hemos incluido, además, una introducción al uso de la resonancia magnética nuclear (otro efecto cuántico de aplicación en el campo de la medicina) en ciertos tipos sencillos de computación cuántica (*artículo 5*), así como una breve introducción a los juegos cuánticos (*artículo 6*).

Gran parte del poder de la mecánica cuántica reside en que es un marco teórico que sirve para predecir resultados en un abanico muy amplio de sistemas físicos. En general, la característica común de muchos de ellos es que son microscópicos (las propiedades típicamente cuánticas casi siempre se pierden en los sistemas macroscópicos; véase el *artículo 2*), pero ya hay sistemas cuánticos bastante grandes (los condensados de Bose-Einstein, por ejemplo). El camino que hay que seguir antes de lograr un ordenador cuántico u otras aplicaciones tecnológicas susceptibles de revolucionar nuestras vidas, como han hecho el transistor, el láser o los circuitos integrados, pasa por estudiar qué sistemas físicos nos ofrecen la posibilidad de aprovechar las ventajas de la mecánica cuántica. La lista es larga y por ello les hemos dedicado una parte importante de este volumen (*artículos 7 a 13*). Hoy pensamos que el control del comportamiento cuántico de la materia y la radiación a escala microscópica va a abrir un inmenso abanico de posibilidades. La mayoría de ellas han empezado siendo “sólo” excitantes experimentos científicos: trampas de iones (*artículo 7*), puntos cuánticos (*artículo 8*), superconductores (*artículo 9*), átomos de Rydberg (*artículo 10*), láseres de átomos (*artículo 11*), condensados de Bose-Einstein (*artículo 12*), átomos en cavidades electromagnéticas (*artículo 13*). Es probable que muchos de estos desarrollos se conviertan en aplicaciones tecnológicas. Pero hay que ser pacientes y seguir investigando.

# HISTORIA DE LA FISICA CUANTICA



# Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica

*A sus 32 años, Werner Heisenberg fue uno de los científicos más jóvenes entre los galardonados con el Nobel. Tras uno de los principios fundamentales de la física, se halla una historia de ambición y feroz competencia*

David C. Cassidy

Entre los muchos logros científicos del siglo XX, quizás el fundamental sea la mecánica cuántica. Ideada por un puñado de físicos europeos de mente preclara, la ciencia del átomo exige transformaciones profundas y controvertidas en nuestra comprensión de la naturaleza. La materia puede consistir en ondas o en partículas, según como la observemos; la causa y el efecto ya no están íntimamente conectados. Esta interpretación de la mecánica cuántica —las prescripciones sobre el cómo y el cuándo de su uso y sobre qué nos dice del mundo físico— fue elaborada en Copenhague en 1927. Debido a la difusión que le dieron sus creadores y al éxito sorprendente que obtuvieron sus partidarios, la interpretación de Copenhague adquirió ya en los años treinta el prestigio de que goza hoy. Pero una “interpretación” no es más que eso. Su origen, defensa y aceptación pudieron haber sido, en aspectos importantes, fruto de circunstancias históricas y preferencias personales, tanto como de su validez científica.

El papel desempeñado en la ciencia por el talante del hombre queda ejemplificado, quizá como en ningún otro caso, en uno de los principales inventores y más activos defensores de la interpretación de Copenhague, Werner Karl Heisenberg. Ocurrió en febrero de 1927, y tenía 25 años, cuando este asistente posdoctoral de Niels Bohr formuló lo que constituye su contribución más famosa en el dominio de la física y es elemento clave para la interpretación de Copenhague: el principio de imprecisión o indeterminación. Como la interpretación de Copenhague, este principio puede considerarse el resultado de la búsqueda de un método coherente de

conectar el mundo cotidiano del laboratorio con ese mundo, nuevo y extraño, propio del minúsculo átomo.

Dicho brevemente, el principio de imprecisión afirma que la medida simultánea de dos variables llamadas conjugadas, como la posición y el momento lineal de una partícula en movimiento, impone necesariamente una limitación en la precisión. Cuanto más precisa sea la medida de la posición, tanto más imprecisa será la medida del momento, y viceversa. En el caso extremo, la precisión absoluta de una de las variables implicaría imprecisión absoluta respecto a la otra. (N. del T.: Se traduce sistemáticamente por imprecisión el término inglés *uncertainty*, con el que vino a expresarse el adjetivo original alemán *unscharf*. Se pretende con ello eliminar toda acepción psicológica, de estado de la mente, que conlleva el término castellano incertidumbre. Tal acepción es totalmente ausente tanto en Heisenberg como en Cassidy.)

Esta indeterminación no debe achacarse al experimentador, sino que se trata de una consecuencia fundamental de las ecuaciones cuánticas y es característica de todo experimento cuántico. Más aún, Heisenberg declaró absolutamente inevitable el principio de imprecisión, en la medida en que fuera válida la mecánica cuántica. Era la primera vez, desde la revolución científica, que un físico de primera línea proclamaba una limitación al conocimiento científico.

Junto con las ideas de Bohr y Max Born (otras lumbreras), el principio de imprecisión de Heisenberg constituía el sistema lógicamente cerrado de la interpretación de Copenhague, que Heisenberg y Born proclamaron completa e irrevocable ante una reu-

nión de los principales físicos cuánticos en octubre de 1927, con motivo del quinto congreso Solvay sobre física fundamental celebrado en Bruselas. A las pocas semanas de ese acontecimiento, Heisenberg fue nominado para la cátedra de física teórica de la Universidad de Leipzig. Con sólo 25 años, era el catedrático más joven de Alemania.

La extrema juventud de Heisenberg en el momento de su obra más significativa señala un rasgo característico que habría de definir a toda su investigación de primera hora: el ansia casi insaciable de éxito académico y la necesidad de destacar como el mejor en todo lo que hacía. De ese estado de ánimo podemos rastrear su explicación hasta el entorno familiar.

Los Heisenberg eran una familia muy culta y ambiciosa, que fue escalando peldaños hasta instalarse en la clase media alta de la sociedad germana. La unificación de Alemania bajo Otto von Bismarck hacia finales del siglo XIX, con el vigoroso crecimiento consiguiente de la economía, había creado una apremiante necesidad de burócratas, diplomáticos, jueces, abogados y empresarios. En consecuencia, las nuevas universidades y escuelas conocieron un espectacular despegue. Y se prestigió el reconocimiento y la remuneración económica de los docentes y de sus alumnos más brillantes.

Tanto el padre de Werner, August, como su abuelo materno, Nikolaus Wecklein, se habían remontando desde sus orígenes humildes hasta la cumbre de la alta burguesía alemana mediante logros académicos. Wecklein era director de un renombrado instituto (Gymnasium) de Munich, y August en 1910 fue nombrado profe-