

# **MCUY**

**INTERESANTE**

**EDICIÓN COLECCIONISTA**



# **FÍSICA CUÁNTICA**

**CÓMO EL MUNDO SUBATÓMICO  
MOLDEA NUESTRA VIDA**



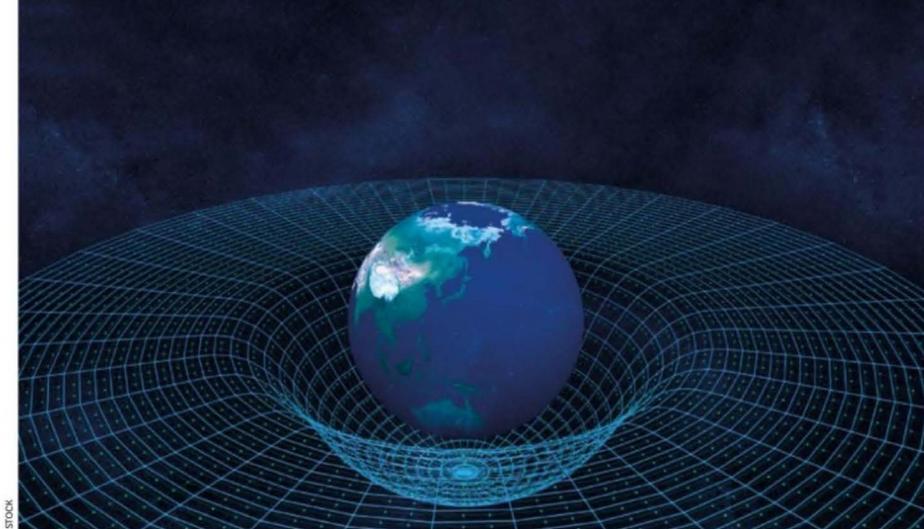


SHUTTERSTOCK

El físico teórico, astrofísico, cosmólogo y divulgador científico británico Stephen Hawking (1942-2018) dijo: «El universo no solo tiene una historia, sino cualquier historia posible. No se comporta de acuerdo con nuestras ideas preconcebidas. Nos sigue sorprendiendo».

«Cualquier persona que se haya visto seriamente comprometida en el trabajo científico de cualquier tipo, se ha dado cuenta de que en las puertas de entrada del templo de la ciencia están escritas las palabras: 'debes tener fe'. Esta es una virtud de la que los científicos no pueden prescindir»

*Max Planck (1858-1947).  
Padre fundador de la física cuántica y  
premio Nobel de física en 1918*



# De la teoría a la práctica

Tienes en tus manos un breve recorrido por la formulación original de la mecánica cuántica. Heisenberg, Bohr, Schrödinger... nos abren la puerta al caos cuántico, al origen del tiempo, al espín del electrón, al efecto fotoeléctrico, a la gravedad y al entrelazamiento cuántico, al efecto Compton, a los agujeros negros y blancos (¿el Big Bang fue uno?) o al teletransporte. Analizamos la física cuántica desde sus fundamentos teóricos hasta sus aplicaciones prácticas.

Y es que cuando la mecánica clásica ya no puede explicar, es necesario recurrir a leyes de la teoría cuántica que han tenido, tienen y tendrán un enorme impacto en la ciencia y la tecnología. En este sentido, se está investigando cómo los efectos cuánticos contribuyen a la eficiencia de la fotosíntesis, lo que podría inspirar nuevos enfoques para el desarrollo de tecnologías de energía solar eficientes y sostenibles. Posiblemente podríamos controlar procesos fisiológicos utilizando las propiedades cuánticas de la materia biológica y la mecánica cuántica podría ayudarnos a comprender cómo las neuronas procesan y transmiten información. Los investigadores están explorando cómo los efectos cuánticos logran influir en las mutaciones del ADN y, por lo tanto, en la misma evolución de las especies. De hecho, los hallazgos en el ámbito de la biología cuántica permiten abrir nuevas y fértiles sendas hacia el diagnóstico y tratamiento de afecciones médicas, personalizándolas y ganando en eficiencia.

Pero hay más. De la sanción y el misticismo cuánticos a la homeopatía, pasando por el *merchandising* relacionado con la jerga cuántica pseudo-científica, el mundo cuántico da para mucho fuera del ámbito científico.

Descúbrelo y ¡disfruta de la lectura!

CARMEN SABALETE  
DIRECTORA

# CONTENIDOS

CRONOLOGÍA .....	8
LA INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE: HISTORIA Y FILOSOFÍA .....	12
UN MUNDO NOBEL .....	20
EL ORIGEN DEL TIEMPO .....	30
EL EFECTO FOTOELÉCTRICO .....	40
ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO .....	50
EL EFECTO COMPTON .....	58
UNA QUÍMICA MUY CUÁNTICA .....	66
INTERFERENCIA CUÁNTICA: UNA ESPADA DE POSIBILIDADES .....	74
A LA CAZA DE LOS AGUJEROS BLANCOS .....	84
LA ESQUIVA GRAVEDAD CUÁNTICA .....	94
TELETRASPORTE CUÁNTICO .....	104
MIDIENDO LO INVISIBLE .....	112
LOS CIMIENTOS DE LA FÍSICA MODERNA .....	122
EL CAOS CUÁNTICO .....	132
EL ESPÍN .....	142
SIMETRÍA Y SUPERSIMETRÍA .....	152
RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR .....	160
CIENCIA Y VIDA .....	174
TONTERÍAS CUÁNTICAS .....	184
BIBLIOGRAFÍA .....	192





# Cronología

La física cuántica ha tenido un impacto significativo en nuestra comprensión del universo y la tecnología que utilizamos todos los días. Esta línea del tiempo demuestra la evolución de la física cuántica y cómo ha sido influenciada por la investigación y los descubrimientos en diferentes campos de la física.

## 1900

Max Planck. Este científico alemán inició la revolución cuántica; explicando que la energía está distribuida entre los átomos de cualquier objeto. Sugirió que la radiación está cuantificada en cantidades diminutas.

## 1905

Albert Einstein, uno de los pocos científicos que tomó en serio las ideas de Planck; propuso un cuanto de luz (el fotón) que se comporta como una partícula. Las otras teorías de Einstein explicaron la equivalencia entre la masa y la energía, la dualidad partícula-onda de los fotones, el principio de equivalencia y, especialmente, la relatividad.

## 1909

Hans Geiger y Ernest Marsden, bajo la supervisión de Ernest Rutherford, dispersaron partículas alfa mediante una hoja de oro y observaron grandes ángulos de dispersión; sugirieron que los átomos tienen un núcleo pequeño y denso, cargado positivamente.



## 1911

Ernest Rutherford infirió la existencia del núcleo como resultado de la dispersión de las partículas alfa en el experimento realizado por Hans Geiger y Ernest Marsden.

## 1912

Albert Einstein explicó la curvatura del espacio-tiempo.

## 1913

Niels Bohr tuvo éxito al construir una teoría de la estructura atómica, basándose en ideas cuánticas.

## 1919

Ernest Rutherford encontró la primera evidencia de un protón.

## 1920

El físico francés Louis de Broglie sugirió que los electrones debían ser observados como ondas y partículas a la vez.

## 1921

James Chadwick y E.S. Bieler concluyeron que alguna fuerza fuerte tiene que mantener unido el núcleo.

## 1923

A. Compton confirmó la existencia de los «fotones» por medio del descubrimiento de la naturaleza cuántica de los rayos X.

## 1924

Louis de Broglie propuso que la materia tiene propiedades ondulatorias.

■ **1924**

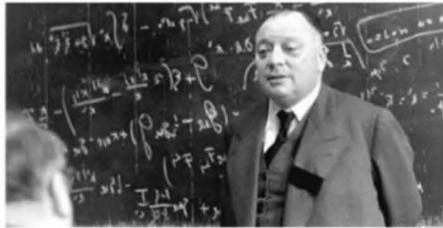
Erwin Schrödinger propuso la ecuación de onda de Schrödinger, que es la base matemática de la física cuántica. Esta ecuación describe cómo los objetos cuánticos se comportan como ondas y cómo cambian con el tiempo.

■ **1925**

El austriaco Wolfgang Pauli formuló el principio de exclusión para los electrones de un átomo.

■ **1925**

Walther Bothe y Hans Geiger demostraron que la energía y la masa se conservan en los procesos atómicos.



■ **1926**

Erwin Schrödinger desarrolló la mecánica ondulatoria, que describe el comportamiento de sistemas cuánticos constituidos por bosones. Max Born le dio una interpretación probabilística a la mecánica cuántica. G.N. Lewis propuso el nombre de «fotón» para el cuanto de luz.

■ **1927**

Se observó que ciertos materiales emiten electrones (decaimiento beta). Dado que ambos, el átomo y el núcleo, tienen niveles discretos de energía, es difícil entender por qué los electrones producidos en esta transición pueden tener un espectro continuo. La respuesta llegaría en 1930.

■ **1927**

El físico alemán Werner Heisenberg formuló el principio de incertidumbre

que dicta que cuanto más sabes sobre la energía de una partícula, menos sabes sobre el tiempo de la misma. Es decir, que no es posible medir exactamente la posición y la velocidad de una partícula a nivel cuántico. La misma incertidumbre se aplica al ímpetu y la coordenada.



■ **1928**

Paul Dirac combinó la mecánica cuántica y la relatividad especial para describir el electrón.

■ **1930**

La mecánica cuántica y la relatividad especial están bien establecidas. Hay tres partículas fundamentales: protones, electrones y fotones. Max Born, tras tener conocimiento de la ecuación de Dirac, dijo: «La física, como la conocemos, será obsoleta en seis meses».

■ **1930**

Wolfgang Pauli sugirió el neutrino para explicar el espectro continuo de los electrones en el decaimiento beta.

■ **1931**

Paul Dirac comprendió que las partículas cargadas positivamente requeridas por su ecuación eran nuevos objetos (él los llamó «positrones»). Son exactamente como electrones, pero cargados positivamente. Este es el primer ejemplo de antipartículas.

■ **1931**

James Chadwick descubrió el neutrón. Los mecanismos de las uniones nucleares y los decaimientos se convirtieron en problemas principales.

■ **1933**

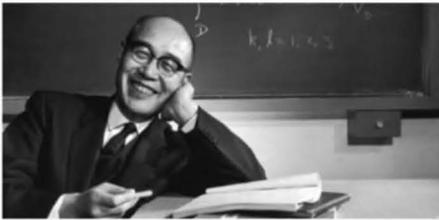
Ecuación de onda. El físico austriaco Erwin Schrödinger descubrió la ecuación de onda que caracteriza el comportamiento de los objetos cuánticos.

■ **1933-34**

Enrico Fermi desarrolló una teoría del decaimiento beta, que introdujo las interacciones débiles. Esta es la primera teoría que usa explícitamente los neutrinos y los cambios de sabor de las partículas.

■ **1933-34**

Hideki Yukawa combinó la relatividad y la teoría cuántica, para describir las interacciones nucleares sobre la base del intercambio, entre protones y neutrones, de nuevas partículas (mesones llamados «piones»). A partir del tamaño del núcleo, Yukawa concluyó que la masa de las supuestas partículas (mesones) es superior a la masa de 200 electrones. Este es el comienzo de la teoría mesónica de las fuerzas nucleares.



■ **1935**

Einstein, Podolsky y Rosen propusieron la paradoja EPR, que planteaba que la teoría cuántica no podía ser completa porque no explicaba la conexión instantánea entre dos partículas cuánticas que habían interactuado anteriormente. Esta paradoja llevó al desarrollo de la teoría de las variables ocultas

■ **1937**

Una partícula con una masa de 200 electrones es descubierta en los rayos cósmicos. Mientras que al principio, los físicos

pensaron que era el pion de Yukawa, se descubrió más tarde que era un muon.

■ **1938**

E.C.G. Stueckelberg observó que los protones y los neutrones no decaen hacia ninguna combinación de electrones, neutrinos, muones o sus antipartículas. La estabilidad del protón no puede ser explicada en términos de conservación de energía o de carga; propuso la conservación independiente del número de partículas pesadas.

■ **1941**

C. Moller y A. Pais introdujeron el término «nucleón» como un término genérico para los protones y los neutrones.

■ **1946-47**

Los físicos comprendieron que la partícula del rayo cósmico, que se pensaba que era el mesón de Yukawa, es en cambio un «muon», la primera partícula en ser encontrada, de las de la segunda generación de partículas materiales. Este descubrimiento fue completamente inesperado. El término «leptón» se introdujo para describir objetos que no interactúan demasiado fuerte (los electrones y los muones son leptones).

■ **1947**

En los rayos cósmicos es encontrado un mesón, que interactúa fuertemente, y se determina que es un pion.

■ **1947**

Los físicos desarrollan procedimientos para calcular las propiedades electromagnéticas de los electrones, positrones y fotones. Introducción de los diagramas de Feynman.

■ **1948**

El sincro-ciclotrón de Berkeley produce los primeros piones artificiales.

## 1949

Enrico Fermi y C.N. Yang sugieren que un pion es una estructura compuesta por un nucleón y un antinucleón. Esta idea de partículas compuestas es completamente revolucionaria. Un año después es descubierto el pion neutro.

## 1951

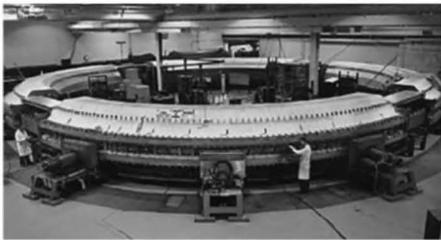
Mientras se observan unas trazas en forma de V, se descubren dos tipos de partículas en los rayos cósmicos: la  $\lambda^0$  y la  $K^0$ . Ocurre al reconstruir los objetos eléctricamente neutros, que tenían que haber decaído, para producir los dos objetos cargados, que dejaron las trazas.

## 1952

Donald Glaser inventó la cámara burbuja. Comienza a operar el Cosmotrón de Brookhaven, un acelerador de 1.3 GeV.

## 1957

George Gamow propuso el efecto túnel, que describe cómo las partículas cuánticas pueden atravesar barreras de energía que clásicamente serían impenetrables. Este efecto es importante para la comprensión de la fusión nuclear y la electrónica cuántica.



## 1957-59

Julian Schwinger, Sidney Bludman, y Sheldon Glashow, en trabajos separados, sugieren que todas las interacciones débiles son mediadas por bosones pesados cargados, más tarde llamados  $W^+$  y  $W^-$ . Realmente, Yukawa fue el primero que discutió el intercambio de bosones veinte

años antes, pero él había propuesto al pion como mediador de las fuerzas débiles.

## 1962

Los experimentos verificaron que existen dos tipos distintos de neutrinos (neutrinos electrón y neutrinos muon). Esto ya había sido inferido por consideraciones teóricas.

## 1964

El físico teórico italiano Gabriele Veneziano propuso la teoría de las cuerdas, que postula que las partículas subatómicas son en realidad pequeñas cuerdas vibrantes. Esta teoría es una de las principales candidatas para la unificación de la física cuántica y la relatividad general.

## 1964

La teoría del físico estadounidense Gell-Mann aportó orden al caos que surgió al descubrirse cerca de 100 partículas en el interior del núcleo atómico. Esas partículas, además de los protones y neutrones, estaban formadas por otras partículas elementales, llamadas quarks. Los quarks se mantienen unidos gracias al intercambio de gluones.

## 1982

Alain Aspect realizó un experimento que demostró el entrelazamiento cuántico. Este fenómeno describe cómo dos partículas cuánticas pueden estar instantáneamente conectadas, independientemente de la distancia que las separa. Este concepto es importante para la computación cuántica y la criptografía cuántica.

## 2012

El CERN anunció el descubrimiento del bosón de Higgs, una partícula subatómica que es crucial para explicar cómo otras partículas subatómicas obtienen su masa. Este descubrimiento fue un hito importante en la física de partículas y la física cuántica.

# La interpretación de Copenhague: Historia y Filosofía

POR MAURICIO SUÁREZ

Catedrático de Lógica y Filosofía de la Ciencia en la Universidad Complutense  
Life Member de Clare Hall, Cambridge





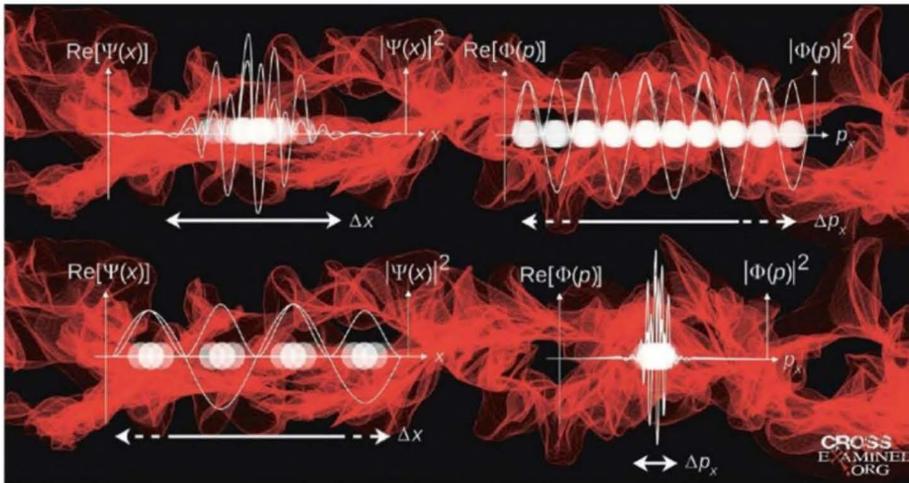
Niels Bohr y Werner Heisenberg (segundo y tercero por la izda., sentados) en la Conferencia de Copenhague en 1934. Siete años antes, en 1927, ambos con ayuda de Max Born y otros, formularían la llamada interpretación de Copenhague en la que se hace referencia a la interpretación de la mecánica cuántica considerada tradicional u ortodoxa.

**E**n 1998 Michael Frayn, el maravilloso dramaturgo británico, con sólida formación en historia y filosofía de la ciencia por la Universidad de Cambridge, publicó una breve obra dramática sugerentemente titulada *Copenhague*. En ella, Frayn recrea, de una forma ficticia y un tanto dramática, los eventos acaecidos durante una reunión que tuvo lugar en 1941, en las afueras de Copenhague, en la casa de Niels Bohr, el afamado físico danés, reconocido padre de la física atómica y creador del principio de complementariedad. Dinamarca estaba entonces bajo ocupación del régimen nazi y a esa casa acudió de incógnito el físico alemán Werner Heisenberg, quien fuera alumno aventajado de Bohr y, en 1941, ya flamante y principal cabeza visible del esfuerzo bélico alemán (y, por ende, responsable del posible desarrollo de una bomba nuclear). Lo que ocurrió durante esa reunión no se conoce con ninguna certeza, puesto que ni Bohr ni Heisenberg dejaron nunca descripción oral o escrita de la misma. Sobre el misterio de esas conversaciones que pudieran haber tenido lugar se levanta la escena dramática de Frayn.

*Copenhague* fue un grandísimo éxito dramático y es una obra que todavía hoy, a menudo, se recrea sobre los escenarios de medio mundo (en España, repetidas veces en los últimos años). Sin embargo, pocos de sus espectadores conocen que detrás del nombre de la ciudad danesa se esconde toda una visión del mundo, de los límites del conocimiento humano y de la física atómica, la denominada interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. Se trata de la manera más habitual de comprender los fenómenos cuánticos y los principios que estos sugieren entre los físicos, desde la creación de la mecánica cuántica, en sus dos modalidades originales, la llamada mecánica matricial que formulase Heisenberg en 1925, y la formulación algunos meses más tarde de lo que se conoce como mecánica de ondas por el austriaco Erwin Schrödinger. Desde entonces, la denominada ecuación de Schrödinger se considera la ley dinámica fundamental que describe la evolución de sistemas atómicos a nivel microscópico.

La ecuación de Schrödinger actúa sobre las llamadas funciones de onda de los sistemas cuánticos y describe una dinámica lineal y determinista. Podríamos decir que una función de onda de una partícula libre varía de manera predecible y determinista, y precisamente esta era una de las grandes atracciones de la formulación en términos de mecánica ondulatoria para aquellos físicos más comprometidos con una visión clásica de la naturaleza de los objetos cuánticos (el mismo Schrödinger, pero también, como es conocido, Albert Einstein quien siempre tuvo una visión crítica de la teoría cuántica). La gran genialidad de Bohr y Heisenberg fue comprender que la función de onda no es una propiedad observable del sistema que describe. Al contrario, sirve exclusivamente para calcular las probabilidades de los distintos valores que pueden tomar en distintos momentos las

## LA DENOMINADA ECUACIÓN DE SCHRÖDINGER SE CONSIDERA LA LEY DINÁMICA FUNDAMENTAL QUE DESCRIBE LA EVOLUCIÓN DE SISTEMAS ATÓMICOS A NIVEL MICROSCÓPICO



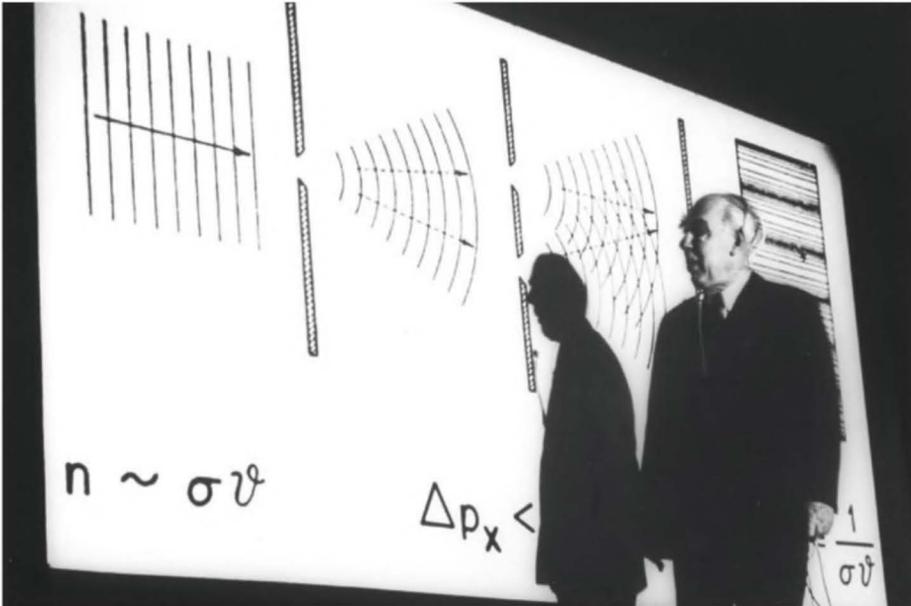
Según el modelo de Schrödinger (a la dcha., retratado en 1933), los electrones sí orbitan al átomo, pero lo hacen de forma cuántica, es aquí donde entran los orbitales compuestos por zonas en las que es más probable encontrar al átomo si lo «observáramos». Sin embargo, estas zonas van variando a cada momento, ya que el electrón se mueve junto a su indeterminación.



propiedades físicas del sistema (como, en el caso de una partícula cuántica, su posición, velocidad, momento, etc.). En lo que se conoce como la regla de Born, es el módulo al cuadrado de la amplitud de la función de onda el que se corresponde con las probabilidades de obtener ciertos valores físicos en mediciones de las distintas propiedades del sistema, desde la posición al espín de la partícula. (La regla de Born se denomina así por su creador, el físico alemán Max Born quien fue expulsado de Alemania por el régimen nazi, como tantos otros grandes científicos judíos en los años 30, y quien posteriormente se afincó como catedrático en Edimburgo, a partir de 1936).

## DIFERENTES INTERPRETACIONES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Este breve recorrido histórico por la formulación original de la mecánica cuántica deja ya patente algunos de los elementos que caracterizan a la denominada interpretación de Copenhague, que se asienta en torno al instituto que dirige Niels Bohr en los años posteriores a la fundación de la mecánica cuántica, en 1925-26, y se expande como la interpretación ortodoxa de toda la comunidad científica internacional a partir de ese momento, hasta alcanzar una situación de



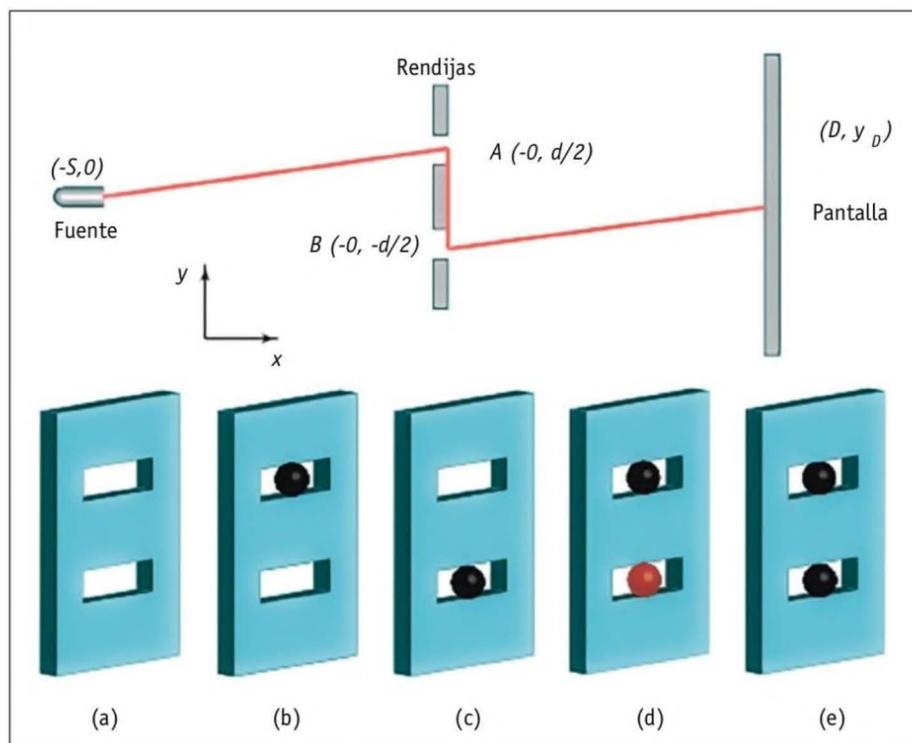
Niels Bohr, físico danés premio Nobel de Física en 1922, dando una conferencia en Iowa en los años 50. Fue precursor de la física atómica y creador del principio de complementariedad.

férrea dominación durante los años posteriores a la II Guerra Mundial. El reconocido historiador James T. Cushing, en su magnífico libro *Mecánica cuántica: contingencia histórica y la hegemonía de Copenhague*, relata hasta qué punto cualquier cuestionamiento de la ortodoxia durante esas décadas se trataba como una especie de herejía, que condenaba a sus promotores al ostracismo. El caso del físico norteamericano David Bohm, quien en 1951 propuso una interpretación diferente y enfrentada a la de Copenhague y tuvo como resultado una trayectoria académica peripatética, es quizás paradigmático. Hoy en día, por el contrario, existen multitud de interpretaciones de la mecánica cuántica, que incluyen, además de la de Copenhague y la denominada Bohmiana, también la de los «muchos mundos», la del «estado de difusión cuántica», la de las «historias decoherentes» y un largo etcétera. Todas y cada una de ellas son una manera de interpretar qué es exactamente lo que nos dice la mecánica cuántica y cuál es la mejor manera de entenderla.

## EL INDETERMINISMO

Los elementos principales de la interpretación de Copenhague incluyen fundamentalmente los siguientes tres compromisos: I) el indeterminismo, II) la dualidad onda-corpúsculo, y III) la indispensabilidad de los conceptos clásicos. Así como el primer compromiso con el indeterminismo es parte del «clima cultural» en el que se forman los científicos de habla alemana en los primeros años del siglo xx, los otros dos fueron expresamente postulados por el mismo Niels Bohr. Este los introdujo en 1928, en la forma del llamado principio de

complementariedad, que constituye el corazón de la interpretación de Copenhague, en una notable publicación en la revista *Nature* titulada «El postulado cuántico y el reciente desarrollo de la teoría atómica». Por tanto, el primero de los compromisos de la interpretación de Copenhague no es exactamente propio, sino que lo comparte con muchas otras disciplinas y visiones de la naturaleza de la revolucionaria y rompedora época de *fin-de-siècle*. La idea de que las leyes de la naturaleza no son deterministas conlleva rechazar la tesis de que todas las causas determinan completamente sus efectos. La expresión más potente de la concepción determinista de las leyes la dio Pierre Simon Laplace, el venerado matemático francés que (en su célebre obra de 1799 titulada *Tratado de mecánica celeste*) formuló de la forma más precisa los principios de la mecánica clásica. Según Laplace, un ser omnisciente que pudiera llegar a conocer la posición y velocidad precisa de cada partícula del universo podría utilizar las leyes deterministas newtonianas clásicas para predecir con precisión cualquier configuración futura del universo.



El experimento de las dos rendijas muestra la naturaleza fundamentalmente probabilística de los fenómenos de la mecánica cuántica. La línea roja traza una de las innumerables trayectorias no clásicas que entra por ambas rendijas: primero por la rendija A, gira abruptamente y entra por la B, antes de golpear la pantalla detectora. Abajo, experimentos mentales con bolas que sirven para ilustrar diferentes configuraciones de detectores de camino. Configuración 1 (a): sin detectores de camino, configuración 2 (b): un detector de tipo I de camino en la rendija A, configuración 3 (c): un detector de tipo I de camino en la rendija B, configuración 4 (d): detectores de tipo I de camino en las rendijas A y B, configuración 5 (e): un detector de tipo II de camino.

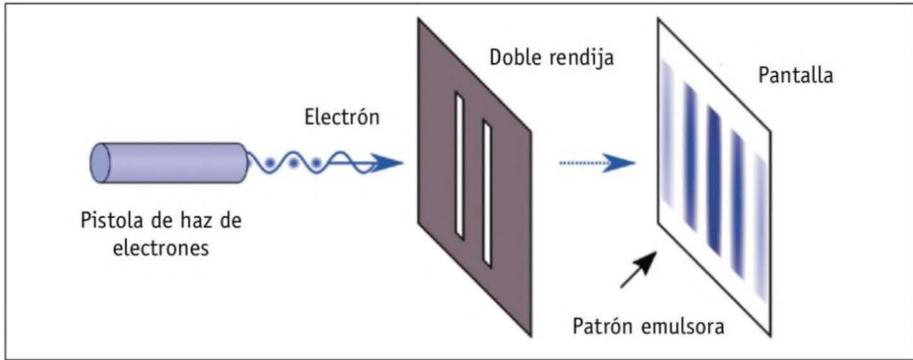


Por contra, una teoría científica indeterminista prescribe varios efectos diferentes para cada causa, en la que cada uno de esos efectos ocurre solo en una proporción de los casos en los que actúan sus causas, y esa proporción de cada efecto define de manera efectiva su probabilidad. En otras palabras, las causas indeterministas solo generan sus efectos con una cierta probabilidad, menor que 1, mientras que las causas deterministas determinan tales efectos con probabilidad 1, o sea, con certeza. También se puede decir que una teoría científica es indeterminista cuando prescribe distintas formas alternativas en las que puede evolucionar la historia del universo, a partir de cual-

quiera de sus estadios temporales. La ley determinista de Newton, según Laplace, solo prescribe una evolución completa del universo, a partir de cualquiera de sus estadios temporales. La gran crisis del determinismo a finales del siglo xx, que se produce en multitud de campos y disciplinas al mismo tiempo, abre paso a las concepciones indeterministas de ley, causa y teoría, más comunes durante el siglo xx, y que incluyen, de manera prominente, a la mecánica cuántica, siempre según la interpretación ortodoxa de Copenhague. La regla de Born que hemos visto que se utiliza para calcular la probabilidad de las propiedades de los sistemas cuánticos es una expresión perfecta de este indeterminismo.

## LA DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

El segundo principio que da cuerpo a la interpretación de Copenhague es la llamada dualidad onda-corpúsculo, según la cual un sistema cuántico exhibe contradictoriamente las propiedades clásicas de una onda clásica y de una partícula newtoniana clásica. La mejor ilustración de este dualismo «complementario» es el llamado «experimento de las dos rendijas». En este experimento una partícula cuántica sale de una fuente emisora, cruza una pantalla con dos rendijas microscópicas (que un operador de laboratorio puede cerrar o abrir a voluntad), y finalmente se estrella en una pantalla emulsora, que registra un destello puntual en el lugar preciso de su detección. Cuando solo una de las rendijas está abierta, la partícula se comporta en todo momento como una partícula con una trayectoria lineal desde la fuente hasta la pantalla emulsora donde se detecta como un punto

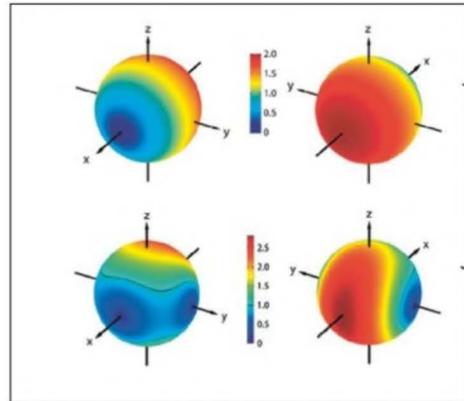


La mejor ilustración del dualismo «complementario» —de los conceptos de superposición y dualidad onda-partícula— es el «experimento de las dos rendijas», en el que se envían electrones a través de una barrera con dos aberturas hacia una pantalla.

luminoso compacto perfectamente localizado. Sin embargo, cuando ambas rendijas están abiertas, el sistema cuántico exhibe más bien el comportamiento de una onda, detectándose el habitual patrón de interferencia correspondiente a una onda energética que haya interferido consigo misma en las dos rendijas. A esta combinación de comportamientos contradictorios desde una perspectiva clásica, Bohr la denominó complementariedad.

## LA INDISPENSABILIDAD DE LOS CONCEPTOS CLÁSICOS

El tercer postulado de la interpretación de Copenhague establece la indispensabilidad del lenguaje clásico. No tenemos otro lenguaje con el que describir los fenómenos que el de la física clásica, argumentó Bohr, y, desde ese punto de vista, el sistema se comporta en ciertas ocasiones como una partícula y en otras como una onda. Con esa contradicción tenemos que resignarnos a convivir, pues la naturaleza en sí del sistema cuántico no es algo que nosotros podamos describir, supera nuestras posibilidades cognitivas. Acerca de esa realidad en sí misma, el espíritu positivista de Copenhague recomienda considerable escepticismo. Así, el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg es la perfecta descripción formal, según la interpretación de Copenhague, de nuestros inevitables límites cognitivos, nuestra inextricable condición humana. ■



El Principio de incertidumbre, propuesto por Heisenberg en la década de 1920, establece que hay un límite fundamental en nuestra capacidad para conocer ciertas propiedades de las partículas subatómicas, como la posición y el momento (o velocidad).



# Un mundo Nobel

POR EUGENIO MANUEL FERNÁNDEZ AGUILAR  
Físico y divulgador científico



Los premios Nobel se instituyeron en 1895 como última voluntad del industrial sueco Alfred Nobel y comenzaron a entregarse en 1901 en las categorías de Física, Química, Fisiología o Medicina, Literatura y Paz.

SHUTTERSTOCK

La física cuántica ha sido un campo clave en la ciencia, ha transformado como entendemos la realidad a niveles subatómicos y ha entrado en nuestra vida cotidiana a través de multitud de aplicaciones. Se trata de un contexto que debe reconocerse de forma oficial. Tal vez una de las mejores formas de hacerlo sea otorgando premios Nobel a resultados imprescindibles de la cuántica. Tanto en Física como en Química, la física cuántica ha sido laureada por la academia sueca pocos años después de que esta arrancara con sus prestigiosos galardones. Si bien en la primera mitad del siglo xx los premios se enfocaron en los fundamentos teóricos, en el siglo XXI lo ostentaría, por fin, las aplicaciones de la cuántica.

Este es un artículo recopilatorio, pues te damos una lista de cuáles han sido los premios Nobel de Física y de Química que se han entregado a científicos y científicas (solo una) durante más de cien años. El criterio de selección ha sido que tenga relación directa con la cuántica, aunque también se han incluido algunos logros que se puede relacionar rápidamente con la cuántica. Hemos eliminado los que tienen una relación menos obvia, porque el artículo sería muy largo. Como guía de lectura, es importante señalar que la frase que aparece entre comillas es la razón que alza la academia para otorgar el premio.

## Premios Nobel de Física relacionados con la física cuántica

- **1913-Heike Kamerlingh-Onnes:**

*«Por su investigación sobre las propiedades de la materia a bajas temperaturas, lo que le llevó, entre otras cosas, a producir helio líquido».* En realidad, la física cuántica todavía estaba arrancando y no se relacionó con la cuántica directamente. Pero el estado de helio líquido tiene que ver con la mecánica cuántica, como veremos más adelante.

- **1918-Max Planck:**

*«Por su trabajo sobre la teoría cuántica».* Es el primer premio que se da realmente a la cuántica de forma directa. De hecho Planck dio el pistoletazo de salida a la cuántica en 1900 con la resolución del problema del cuerpo negro, introduciendo la cuantización de la energía.



El físico holandés Heike Kamerlingh Onnes

- **1921-Albert Einstein:** «Por su explicación del efecto fotoeléctrico y por sus contribuciones a la teoría cuántica». Introdujo el concepto de fotón, aunque no el término en sí.

- **1922-Niels Bohr:** «Por su investigación sobre la estructura de los átomos y la radiación que emana de ellos». En concreto, fue la primera descripción cuántica del átomo que surgió.

- **1923-Robert Andrews Millikan:** «Por su trabajo sobre la carga elemental de la electricidad y sobre el efecto fotoeléctrico». Se relaciona de forma indirecta con la cuántica, pero fue clave para entender el efecto fotoeléctrico.

- **1925-James Franck y Gustav Hertz:** «Por su descubrimiento de las leyes que rigen el impacto de un electrón sobre un átomo». Elaboraron un experimento que corroboraron la existencia del efecto fotoeléctrico.

- **1927-Arthur Holly Compton:** «Por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre». Este fenómeno evidencia la naturaleza dual de la luz y la partícula: cuando un fotón incidente colisiona con un electrón libre, experimenta un cambio en su longitud de onda y dirección. Es un fenómeno puramente cuántico.

- **1928-Owen Willams Richardson:** «Por su trabajo en el fenómeno termiónico y especialmente por el descubrimiento de la ley que posteriormente llevaría su nombre». Describe la liberación de electrones por un material conductor cuando se calienta. Aunque inicialmente se explicó utilizando principios clásicos, la mecánica cuántica proporciona una comprensión más precisa de este fenómeno

- **1929-Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie:** «Por el descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones». La dualidad onda-corpúsculo estaría en un top 5 de resultados importantes de la cuántica.



ARCHIVOS VISUALES APF EMILIO SEGRE. COLECCIÓN FRITZ REICHE

Einstein recibe la medalla Planck en 1929, de manos de Max Planck (el primero en recibirla).

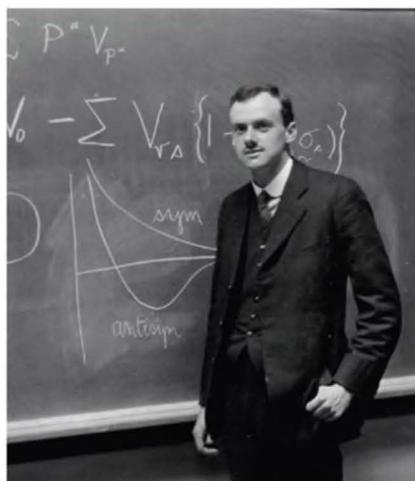


GETTY

El físico estadounidense Arthur Compton, en su laboratorio hacia 1930.

- **1930-Chandrasekhara Venkata Raman:** «Por su trabajo acerca de la dispersión de la luz y por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre». La mecánica cuántica se evidencia en la interpretación de los cambios en la energía de los fotones durante el proceso, pues estos están cuantizados.

- **1932-Werner Heisenberg:** «Por la creación de la mecánica cuántica». Su trabajo culminó en la formulación de la mecánica matricial, una de las dos formulaciones fundamentales de la mecánica cuántica.



El matemático británico Paul Dirac.

- **1933-Erwin Schrödinger y Paul Dirac:** «Por el descubrimiento de nuevas formas productivas de la teoría atómica». Describieron el átomo mediante el otro enfoque, más conocido y usado, el de la mecánica ondulatoria, basado en la ecuación de Schrödinger.

- **1937-Clinton Joseph Davisson y George Paget Thomson:** «Por sus descubrimientos experimentales de la difracción de los electrones causada por cristales». Esta difracción solo se explica mediante conceptos cuánticos.

- **1943-Otto Stern:** «Por su contribución al desarrollo del método de haces moleculares y por el descubrimiento del momento magnético del protón». El momento magnético de una partícula es una propiedad cuántica.

- **1944-Isidor Isaac Rabi:** «Por su método de resonancia para registrar las propiedades magnéticas de los núcleos atómicos». En el método de resonancia magnética nuclear, al aplicar un campo magnético y una frecuencia específica de radiación, los núcleos atómicos que cumplen con la condición de resonancia absorben energía y cambian su estado cuántico.

- **1945-Wolfgang Pauli:** «Por el descubrimiento del principio de exclusión, también llamado el principio de Pauli». Otro principio que estaría en la lista top 5 de resultados de la cuántica.



El físico alemán, nacionalizado estadounidense, Otto Stern.

- **1954-Max Born:** «*Por sus investigaciones fundamentales sobre la mecánica cuántica y, especialmente, por su interpretación estadística acerca de la función de ondas*». La interpretación estadística de Born establece que la función de ondas en la mecánica cuántica no describe la posición real de una partícula, sino que proporciona la probabilidad de encontrar la partícula en una ubicación particular.



Retrato del físico teórico alemán Max Born.

- **1955-Willis Eugene Lamb:** «*Por sus descubrimientos acerca de la estructura fina del espectro de hidrógeno*». Su trabajo se centró en la observación experimental de desplazamientos en el espectro de líneas del hidrógeno, que no eran más que pequeñas correcciones a las predicciones teóricas existentes en el espectro del hidrógeno, un descubrimiento que tuvo importantes implicaciones para la teoría cuántica.
- **1955-Polykarp Kusch:** «*Por determinar con precisión el momento magnético del electrón*». Como se ha dicho, se trata de una propiedad puramente cuántica.
- **1957-Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang:** «*Por su penetrante investigación de las llamadas leyes de paridad, la cual ha llevado a importantes descubrimientos sobre las partículas elementales*». Se trata un principio que establece que las leyes de la física son simétricas bajo la inversión de las coordenadas espaciales (o paridad), lo cual tuvo un impacto importante en la teoría cuántica de campos.
- **1962-Lev Landáú:** «*Por sus teorías pioneras sobre la materia condensada, en particular las relacionadas con el helio líquido*». Landáú propuso que la transición superfluida en el helio líquido podría entenderse como un cambio de fase cuántico.
- **1963-Eugene Paul Wigner:** «*Por sus contribuciones a las teorías del núcleo atómico y de las partículas elementales y, en particular, el descubrimiento y aplicación de estas mediante los principios fundamentales de simetría*». Básicamente, aplicó los principios de simetría en la teoría cuántica.
- **1963-Maria Goeppert-Mayer y Johannes Hans Daniel Jensen:** «*Por sus descubrimientos relacionados con la estructura nuclear de capas*». Postularon que los nucleones ocupan diferentes niveles de energía en capas dentro del núcleo, al igual que en mecánica cuántica se descubrió que los electrones en un átomo

mo están distribuidos en niveles de energía y subniveles. Maria Goepfert-Mayer es la única mujer que ha ganado el Nobel de Física por algo relacionado directamente con la cuántica.

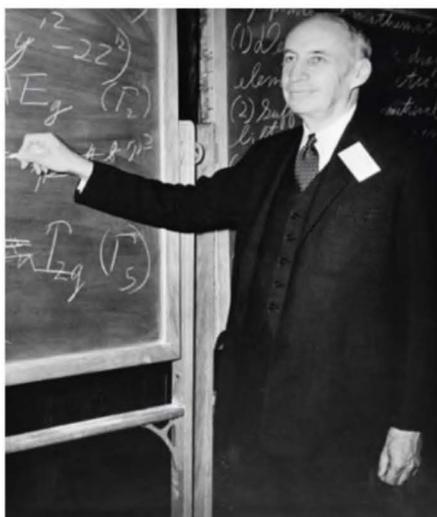
- **1964-Nikolái Gennadievich B́asov, Aleksandr Mijáilovich Prórorov y Charles Hard Townes:** «Por sus trabajos fundamentales sobre la electrónica cuántica, lo que ha permitido la construcción de osciladores y amplificadores basados en el principio máser-láser». El máser y el láser son dispositivos basados en la emisión estimulada de radiación, un fenómeno cuántico descrito por Einstein.



Prokhorov,  
Townes y Basov  
conversando.

- **1965-Richard Phillips Feynman, Julian Schwinger y Shin'ichirō Tomonaga:** «Por su trabajo fundamental en electrodinámica cuántica, generando consecuencias profundas para el desarrollo de la física de partículas elementales». La electrodinámica cuántica (QED) es la teoría cuántica que describe las interacciones electromagnéticas entre partículas cargadas, como electrones y fotones.
- **1972-John Bardeen, Leon Neil Cooper y John Robert Schrieffer:** «Por el desarrollo conjunto de la teoría de la superconductividad, llamada por lo general como teoría BCS». La teoría BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) fue propuesta en 1957 y en el contexto de la teoría cuántica de campos describe la superconductividad en términos de pares de Cooper, que son pares de electrones con momentos opuestos. Explica cómo estos pares pueden formarse en un material superconductor, atravesar el cristal sin dispersarse y contribuir a la conducción eléctrica sin resistencia.
- **1973-Leo Esaki y Ivar Giaever:** «Por sus descubrimientos experimentales en cuanto a los fenómenos de túnel en semiconductores y superconductores, respectivamente». Esaki describió el proceso de túnel a través de una barrera de potencial en semiconductores, que lleva su nombre como «diodo de túnel Esaki». Por otra parte, Giaever experimentó con túneles en una delgada capa de óxido aislante entre dos superconductores, lo que resultó en la observación del efecto Josephson. Ambos fenómenos de túnel en semiconductores y superconductores son ejemplos destacados de la mecánica cuántica en acción.
- **1975-Aage Bohr, Ben Roy Mottelson y Leo James Rainwater:** «Por el descubrimiento de la conexión entre el movimiento colectivo y el movimiento de partículas en el núcleo atómico y por el desarrollo de la teoría de la estructura del núcleo atómico basada en estas conexiones». Se utiliza conceptos cuánticos para describir cómo las partículas nucleares (protones y neutrones) ocupan niveles de energía discretos en el núcleo.

- **1977-Philip Warren Anderson, John Hasbrouck van Vleck y Nevill Francis Mott:** «Por sus investigaciones teóricas fundamentales acerca de la estructura electrónica de sistemas magnéticos desordenados». Las investigaciones de estos científicos asentaron la aplicación de la mecánica cuántica para comprender fenómenos complejos en la materia condensada, particularmente en sistemas magnéticos sometidos al desorden. La materia condensada se refiere a las fases de la materia que tienen propiedades mecánicas y térmicas distintas de las observadas en los sólidos, líquidos y gases tradicionales.



John van Vleck escribiendo en una pizarra en una conferencia en 1959.

- **1985-Klaus von Klitzing:** «Por el descubrimiento del efecto Hall cuántico». El efecto Hall cuántico es una respuesta cuántica al campo magnético aplicado de forma perpendicular al flujo de corriente en un conductor bidimensional.
- **1986-Gerd Binnig y Heinrich Rohrer:** «Por su diseño del microscopio de efecto túnel». El microscopio de efecto túnel permite visualizar superficies con una resolución sin precedentes, incluso a nivel de átomos. Utiliza el fenómeno cuántico conocido como efecto túnel, donde electrones fluyen entre una punta extremadamente afilada y la muestra sin contacto físico directo.

- **1987-Johannes Georg Bednorz y Karl Alexander Müller:** «Por su importante avance en el descubrimiento de la superconductividad en materiales cerámicos». La superconductividad es un fenómeno cuántico en el cual ciertos materiales, cuando se enfrían por debajo de su temperatura crítica, pierden toda resistencia eléctrica y exhiben otras propiedades únicas.



Norman Foster Ramsey con el primer aparato de haces moleculares en Harvard, hacia 1955.

- **1989-Norman Foster Ramsey y Hans Georg Dehmelt:** «Por la invención del método de campos oscilatorios separados y su uso en el máser de hidrógeno y otros relojes atómicos». Esta invención permitió la creación de relojes atómicos de mayor preci-

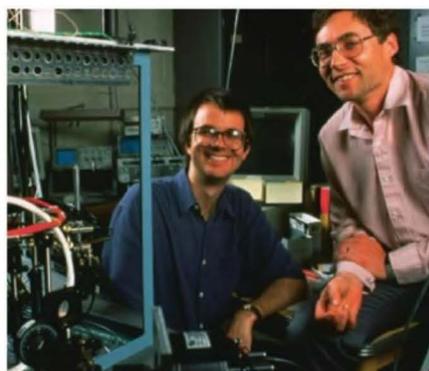
sión basados en transiciones atómicas, que son un fenómeno cuántico.

- **1994-Clifford Glenwood Shull:** «Por el desarrollo de la técnica de difracción de neutrones» y «por sus contribuciones pioneras al desarrollo de las técnicas de dispersión de neutrones para el estudio de la materia condensada». La difracción de cualquier partícula es un fenómeno cuántico, pues es necesario aceptar la faceta ondulatorio de la misma.



Clifford Glenwood Shull en 1994, año en el que recibió el Nobel de Física por el desarrollo de la técnica de dispersión de neutrones.

- **1996-David Morris Lee, Douglas D. Osheroff y Robert Coleman Richardson:** «Por su descubrimiento de la superfluidez del helio-3». Ya sabemos que la superfluidez del helio es un fenómeno cuántico.
- **1998-Horst Ludwig Störmer y Daniel Chee Tsui:** «Por su descubrimiento de una nueva forma de fluido cuántico con excitaciones cargadas fraccionalmente». Se trata de la versión cuántica del efecto Hall.
- **1999-Gerardus 't Hooft y Martinus J. G. Veltman:** «Por elucidar la estructura cuántica de la interacción electrodébil en física». Fue fundamental para la formulación teórica precisa de la teoría electrodébil, unificando las interacciones electromagnéticas y débiles en el marco de la mecánica cuántica.
- **2001-Eric Allin Cornell, Carl Edwin Wieman y Wolfgang Ketterle:** «Por conseguir la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos y por sus tempranos y fundamentales estudios de las propiedades de los condensados». El condensado de Bose-Einstein (estado de la materia que se da en ciertos materiales a temperaturas cercanas a 0 K) se explica solo mediante conceptos cuánticos.
- **2003-Alekséi Alekséyevich Abrikósov, Vitali Lázarevich Ginzburg y Anthony James Leggett:** «Por sus contribuciones pioneras a la teoría de los superconductores y superfluidos». Dos propiedades puramente cuánticas.

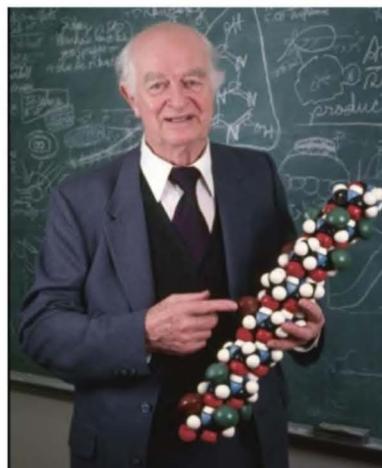


Eric Cornell y Carl Wieman en su laboratorio del JILA, en la Universidad de Colorado Boulder.

## Química, cuántica y Nobel

Si bien la cuántica ha estado menos presente en los premios Nobel de Química, no ha estado desaparecida del todo. Cuatro veces ha sido premiada en esta categoría:

- **1954-Linus Pauling:** «Por su investigación sobre la naturaleza de las fuerzas que sostienen las sustancias químicas y las reacciones químicas». Trabajo pionero en la teoría de la resonancia y la aplicación de la mecánica cuántica para explicar la estabilidad y reactividad de las sustancias químicas.
- **1966-Robert S. Mulliken:** «Por su fundamental trabajo en torno a los enlaces químicos y a la estructura electrónica de moléculas mediante la teoría de los orbitales moleculares». La teoría de los orbitales moleculares es una herramienta fundamental en la química cuántica que describe la distribución de electrones en moléculas en función de la combinación de los orbitales atómicos de los átomos que la componen
- **1998-John Pople y Walter Kohn:** «Por el desarrollo de métodos computacionales en química cuántica». No solo facilitaron cálculos teóricos más precisos y eficientes, sino que también permitieron a los científicos simular y comprender una amplia gama de fenómenos químicos a nivel molecular.
- **2023-Moungi Bawendi, Louis Eugene Brus y Alexei Ekimov:** «Por el descubrimiento y la síntesis de puntos cuánticos». Los puntos cuánticos son pequeñas partículas de material semiconductor que tienen propiedades cuánticas debido a su tamaño reducido, típicamente en la escala de nanómetros. Estos nanocristales muestran comportamientos cuánticos debido a las restricciones impuestas por su tamaño, lo que resulta en propiedades electrónicas, ópticas y magnéticas distintivas. Sus aplicaciones tecnológicas serán ilimitadas.



El estadounidense Linus Pauling, dos veces ganador del Nobel, posa con su modelo de hélice alfa en el Instituto Linus Pauling, Menlo Park, California.

- **2012-Serge Haroche y David Wineland:** «Por la medida y manipulación de sistemas cuánticos individuales». Realizaron avances fundamentales en la experimentación con sistemas cuánticos, utilizando trampas de iones y cavidades de resonancia para aislar y controlar partículas individuales, como átomos y fotones.
- **2022-Anton Zeilinger, Alain Aspect y John Clauser:** «Por los experimentos con fotones entrelazados, estableciendo la violación de las desigualdades de Bell y siendo pionero en la ciencia de la información cuántica». Llevaron a cabo experimentos notables con fotones entrelazados, una propiedad cuántica que permite que dos partículas estén correlacionadas de manera instantánea, incluso a distancias enormes. Un resultado fundamental para la computación cuántica. ■

# El origen del tiempo

POR MIGUEL ÁNGEL SABADELL  
Astrofísico

¿Por qué el universo que surgió inmediatamente después del Big Bang lo hizo en un estado de orden altamente improbable? ¿Y qué sucedió antes? Nunca lo sabremos.



**T**odos lo percibimos y experimentamos en nuestras carnes, pero es un concepto que les cuesta encajar a los físicos. ¿Cómo y por qué apareció el tiempo? ¿Es imprescindible para que exista el universo? Una nueva e intrigante hipótesis nos retrotrae al mismo momento en que empezó a discurrir.

Llena un vaso con agua caliente. Si dejas pasar el tiempo, el agua se irá enfriando hasta alcanzar la temperatura del ambiente que lo rodea. Lo mismo sucede cuando colocas un cubito de hielo en un vaso: poco a poco se funde hasta que el agua iguala su temperatura con el entorno. Esta termalización es un fenómeno natural e irreversible, pues cuando ponemos en contacto dos sistemas, ambos tienden a lo que los expertos conocen como equilibrio térmico.

Aparentemente anodino, dicho fenómeno introduce una asimetría fundamental en la física: define una flecha del tiempo. Desde nuestra experiencia cotidiana, fluye del pasado al futuro, y siempre es así. En palabras de Sean Carroll, físico estadounidense del Instituto de Tecnología de California: «Podemos confundir este con oeste, pero no ayer con mañana». Salvo en termodinámica, ese discurrir hacia delante es irrelevante, un compañero mudo. «Las leyes fundamentales de la física no distinguen entre pasado y futuro», apostilla Carroll. Para el italiano Carlo Rovelli, la física ignora el problema: «No se describe cómo evolucionan las cosas en el tiempo, sino cómo evolucionan en sus tiempos», ilustra Rovelli.

De la mecánica al electromagnetismo o la teoría cuántica, las ecuaciones son simétricas en ese sentido. Por eso, si nos pasan una película de dos bolas de billar chocando, seríamos incapaces de saber por simple observación si nos la están pasando bien o hacia atrás. Sin embargo, si vemos otro vídeo donde el agua de un vaso se va convirtiendo en un cubito de hielo, sabremos que nos están dando gato por liebre. Esta diferencia fundamental entre la realidad que nos rodea y las leyes de la física parece indicar que se nos escapa algo. Pero ¿qué?



Si aplicamos calor al hielo, observaremos cómo se desordenan sus moléculas hasta dispersarse en forma de vapor. Este proceso es una demostración de aumento de entropía.



El estado más probable es el desorden: si barajamos unos naipes, raramente aparecerán agrupados de forma espontánea por palos y números.

## EL EXTRAÑO CONCEPTO DE LA ENTROPÍA

La primera persona que se planteó el problema con seriedad fue Ludwig Boltzmann, un físico austriaco de finales del siglo XIX. Fue el padre de muchas ideas revolucionarias en su tiempo, como que los átomos realmente existían o que la temperatura era una consecuencia de los movimientos y choques entre ellos. Corto de vista, Boltzmann percibió mucho más lejos que sus colegas, pero fue desdeñado por ellos y se suicidó en 1906.

Sus ideas permanecieron, y la termodinámica, la ciencia que estudia el calor no se podría comprender hoy sin su perspicacia. Entre sus empeños se encontraba el de dar una explicación a la entropía, concepto extraño que había aparecido en 1865 de la mano de uno de los padres de la termodinámica, Rudolf Clausius (1822-1888). Este físico y matemático alemán lo introdujo para explicar por qué el calor fluye de un cuerpo caliente al frío. Basándose en ello, formuló un principio fundamental, hoy conocido como la segunda ley de la termodinámica: los procesos naturales son aquellos en los que se verifica un aumento en la entropía del universo y nunca al revés. Clausius definía así el sentido de la flecha del tiempo.

Pero ¿qué es la entropía y por qué debe aumentar? Estas son las incógnitas que resolvió Boltzmann. Partiendo de la suposición de que el mundo no es otra cosa que «átomos y vacío» —como dijera Demócrito dos milenios atrás—, Boltzmann llegó a la conclusión de que el estado más probable de cualquier sistema es el desorden. Por ejemplo, si mezclamos unos naipes, lo normal es acabar con una

**BOLTZMANN LLEGÓ A LA CONCLUSIÓN DE  
QUE EL ESTADO MÁS PROBABLE DE  
CUALQUIER SISTEMA ES EL DESORDEN**



Los relojes de nueva generación que utilizan átomos de estroncio tienen al menos tres veces más precisión: apenas ganan o pierden un segundo a lo largo de 15 000 millones de años. Los relojes atómicos de precisión excepcional podrían ayudar en la búsqueda de materia oscura y ondas gravitacionales. En 2022, físicos de la Universidad de Wisconsin-Madison (EE. UU.) desarrollaron uno de los relojes atómicos de mayor precisión de la historia (en la imagen).

baraja desordenada en lugar de agrupada por palos y números. Igual ocurre con los gases: podríamos tener todas sus moléculas moviéndose en la misma dirección; o dos gases que, contenidos en el mismo recipiente, no estén mezclados, sino separados; o uno que se encuentre comprimido, sin influencia externa, en un rincón de la vasija que lo contiene, dejando el resto totalmente vacío... No hay ninguna ley que impida alguno de esos escenarios. Sin embargo, resulta altamente improbable, más incluso que tras mezclar una baraja salga organizada por números y palos.

No debemos olvidar este principio: hay un mayor número de combinaciones desordenadas que ordenadas. Ahora ya estamos en condiciones de entender lo que es la entropía: una medida del desbarajuste en la naturaleza. Y como es más probable que el orden, la entropía tiende a aumentar. Esta fue la gran contribución de Boltzmann y la que abrió la puerta al problema de la flecha del tiempo: el futuro es distinto del pasado simplemente porque la entropía del universo ha aumentado.

Si ahora ponemos en juego la evolución cosmológica y la teoría comúnmente aceptada de su inicio, el Big Bang, el universo debía encontrarse en un estado de muy baja entropía —o sea, muy ordenado— cuando nació. «El segundo principio de la termodinámica sugiere que cualquier sistema evoluciona naturalmente hacia un estado típico y más probable, pero al mismo tiempo estamos suponiendo que el universo comenzó en un estado extremadamente atípico e improbable», subraya Rovelli. «Si su configuración fuera escogida aleatoriamente entre todas las posibles, se encontraría en un estado de muy alta entropía», pregunta Carroll. ¿Cómo es posible? «Es algo para lo que no tenemos respuesta», indica Carroll en su libro

## EL UNIVERSO NO ES UN SISTEMA TERMODINÁ- MICO AL USO, PUES UNA FUERZA EXTERNA LO GOBIERNA: LA GRAVEDAD

*Desde la eternidad hasta hoy*, publicado en 2021. Y no suena demasiado convincente que de una gran explosión surja algo muy organizado...

Ahora bien, en toda esta discusión hay algo a lo que no hemos prestado atención. El universo no es un sistema termodinámico al uso, pues una fuerza externa lo gobierna: la gravedad. Aunque de alguna forma debe afectar a la entropía, no sabemos muy bien cómo, ya que para hacerlo necesitamos una teoría gravitatoria a escala subatómica, algo que todavía no tenemos.

## UN ESTADO DE ORDEN ALTAMENTE IMPROBABLE

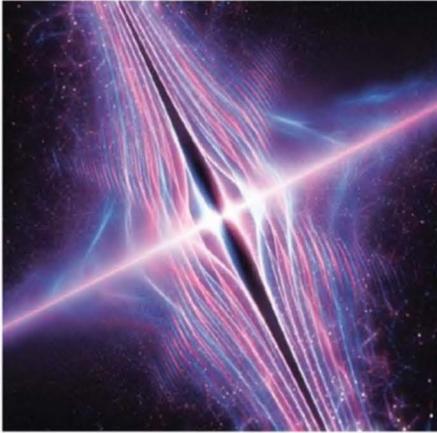
Todos estos escollos hay que solventar para comprender por qué el universo que surgió inmediatamente después del Big Bang lo hizo en un estado de orden altamente improbable. Y ni siquiera tenemos claro qué respuesta sería la satisfactoria. Al parecer, después de medio siglo entre nosotros, la hipótesis del gran estallido sigue poniendo en un brete a nuestras mejores teorías de la física: sin una manera de describir cómo surgió exactamente el universo, no podemos explicar por qué presentaba baja entropía y, por tanto, entender la flecha del tiempo. Y la pregunta del millón: ¿cómo es un estado de alta entropía cuando la gravedad resulta ser una pieza relevante del sistema?

Sobre este tema ha estado trabajando durante décadas Roger Penrose. Este eminente físico y matemático inglés argumenta que la formación de estructuras en el universo, como galaxias, estrellas y planetas, no significa una disminución de entropía, sino todo lo contrario: «Con la gravedad, las cosas tienden a ser de otra manera [...]. La alta entropía se consigue cuando se amontonan los cuerpos gravitantes». Al parecer, y según revelan diferentes cálculos, en presencia de las fuerzas gravitatorias, «los estados de mayor entropía son como el espacio vacío, con la mayoría de las partículas desperdigadas y diluyéndose progresivamente», dice Carroll. O sea, tal y como era el universo en sus comienzos.

A todo este panorama debemos introducir un increíble fenómeno que sucedió en los primerísimos instantes de vida del universo: la inflación. Formulada por el físico estadounidense Alan Guth a finales de 1979, nos dice que nunca vamos a saber qué sucedió justo antes del Big Bang, pues todo el universo —o, al menos, una región del mismo— experimentó un aumento exponencial de su volumen. Semejante expansión borró todas las irregularidades que pudieran haber existido al comienzo y propició que el cosmos sea plano —sin curvatura— y homogéneo.

## Una flecha disparada en los albores del universo

Cuando el cosmos tenía entre  $10^{-32}$  y  $10^{-6}$  segundos, solo existía una especie de engrudo de cuarks y gluones, las partículas que luego formarían los núcleos de los átomos. Es en ese punto cuando probablemente apareció la flecha del tiempo. La expresión fue acuñada en 1928 por el astrónomo británico Arthur Eddington, que escribió: «Dibujemos una flecha del tiempo arbitrariamente. Si al seguir su curso encontramos más y más elementos aleatorios en el estado del universo, en tal caso está apuntando al futuro; si, por el contrario, el elemento aleatorio disminuye, la flecha apuntará al pasado. He aquí la única distinción admitida por la física».



La teoría de cuerdas, una de las candidatas a explicar cómo funciona la realidad, tampoco distingue en sus ecuaciones entre el pasado y el futuro.



Según algunas hipótesis, el cosmos consistía al principio en energía cuántica intemporal, pero una minúscula perturbación quebró ese estado: aparecieron las partículas que luego formarían estrellas y galaxias.

Aunque este asombroso mecanismo explica muchas de las incógnitas que dejaba pendientes la teoría del gran estallido inicial, no da cuenta de por qué el universo nació con una entropía tan baja.

Es aquí donde muchos físicos teóricos levantan la mano y apuntan a la teoría de cuerdas como solución al problema, pero quizá no lo sea. A finales del siglo pasado, era el modelo estrella de la física y sus voceros, como Brian Greene y Michio Kaku, la elevaban a los cielos diciendo que nos hallábamos ante la teoría del todo. Pero poco a poco se ha ido desinflando. Algunos, como el físico de cuerdas indio Shiraz Minwalla, la consideran ya como una nueva forma de hacer ciencia: «Tiene más que ver con una teoría matemática inspirada en la física que con física al estilo clásico», asegura. A todo esto hay que añadir que, como casi cualquier otra teoría física fundamental, sus ecuaciones no establecen una distinción fuerte entre el pasado y el futuro, luego la flecha del tiempo no surge de modo natural; hay que introducirla *ad hoc*.

Algunos expertos se plantean que hay que mirar en otra dirección, hacia donde se encuentra la hipótesis competidora de las cuerdas: la gravedad cuántica de bucles. Entre los que intentan resolver el enigma está el físico canadiense Lee Smolin. Según él y su colaboradora, la portuguesa Marina Cortés, el universo está formado por una serie de eventos completamente únicos, que nunca se repiten. Cada conjunto de sucesos solo puede influir en los del siguiente, por lo que la flecha del tiempo aparece de forma natural. «Esperamos poder llegar al problema de las condiciones iniciales [del universo] y descubrir que no son tan especiales», dice Cortés.

## RESOLVER EL PROBLEMA DE LA ENTROPÍA INICIAL DEL COSMOS

Sin duda, intentar hallar una solución a este problema ha disparado la imaginación de los físicos teóricos: unos hablan de que, aunque las leyes físicas que noso-

## «PODEMOS CONFUNDIR ESTE CON OESTE, PERO NO AYER CON MAÑANA», DICE SEAN CARROLL

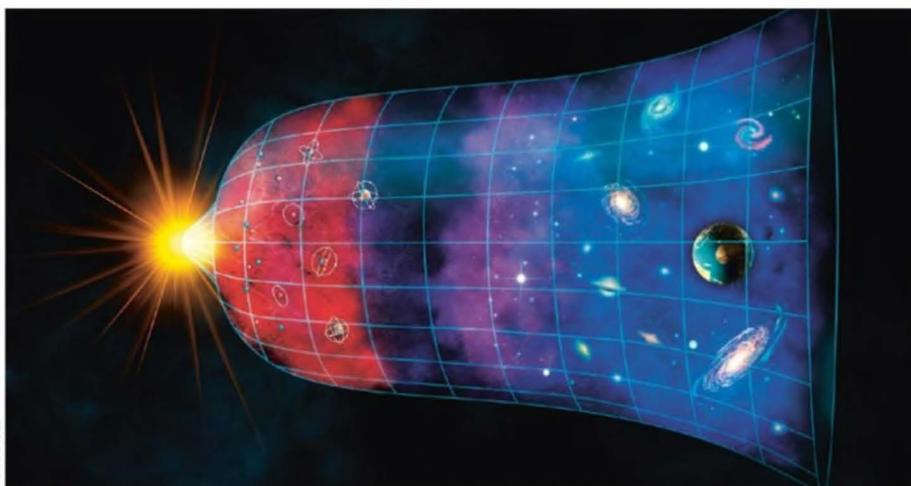
tros conocemos no contemplan la existencia de una flecha temporal, eso se explica porque no son las verdaderas, sino solo buenas aproximaciones. Cuando descubramos las fundamentales, veremos cómo aparece de forma natural. Por ejemplo, Penrose plantea lo que él denomina hipótesis de la curvatura de Weyl: existe una ley natural que distingue entre las singularidades espacio-temporales del pasado y las del futuro, y eso dota al universo de una flecha temporal.

En el fondo, todos estos son intentos por explicar esa ruptura que hay entre las leyes de la física y la realidad. Pero sea cual sea la hipótesis correcta —o si es una mezcla de ambas—, todas ellas dejan a un lado otra pregunta fundamental: ¿cuándo empezó a fluir el tiempo?

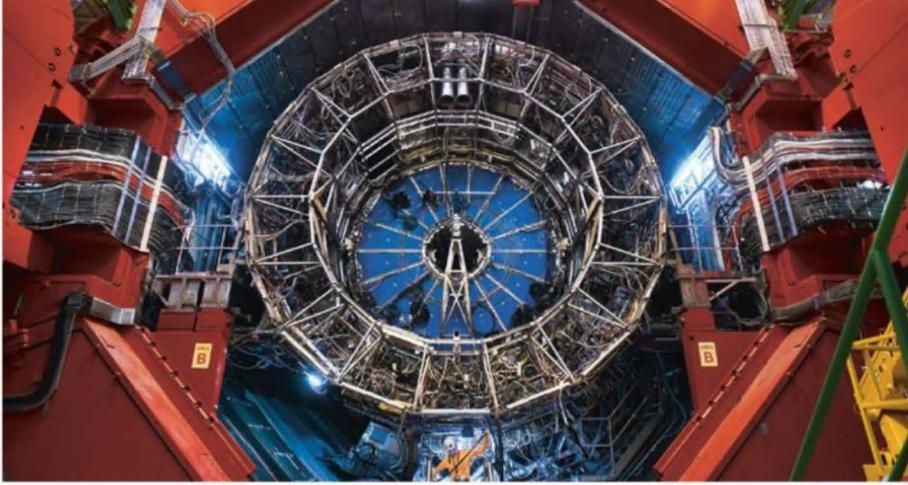
Es en este punto en el que entra la investigación publicada a finales de 2019 por Thomas Gasenzer y Jürgen Berges, físicos de la Universidad de Heidelberg (Alemania). «Si comienzas lejos del equilibrio, como sucedió al nacer el universo, ¿de qué manera apareció la flecha del tiempo?», se pregunta Berges.

Lo que estos investigadores han desarrollado es todo un constructo teórico para entender lo que sucedía a nivel subatómico antes de que empezara el proceso de termalización del cosmos, esto es, cuando empieza a subir la entropía. En ese momento las cosas no eran como las conocemos: el cosmos consistía en un vasto océano de energía cuántica que «estaba en un estado muy lejos del equilibrio», explica Gasenzer.

Según los cálculos de los físicos de Heidelberg, aquel campo energético presentaba unas propiedades fractales similares a lo que sucede cuando removemos una taza de café. Fueron descritas en 1941 por uno de los más grandes matemáticos



Algunos experimentos respaldarían la hipótesis de que, nada más producirse el Big Bang, el tiempo aún no existía en el cosmos... y que bien podría no haberlo hecho nunca.



ASCCERN

En el gran colisionador de hadrones (LHC) del CERN, el experimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment), en su fase 3, ha registrado haces de partículas generados tras el enfriamiento casi instantáneo de un plasma teóricamente similar a las condiciones iniciales del universo. El objetivo es comprobar si así es como surgió el espacio y el tiempo.

de mediados del siglo xx, el ruso Andréi Kolmogórov (1903-1987), cuando estudiaba los fluidos turbulentos. Al remover el café, generamos un vórtice —flujo en rotación espiral— que provoca la aparición de otros más pequeños, y así sucesivamente. Se alimentan de la energía que les transfiera el vórtice mayor, como en una cascada, y a un ritmo exponencial, lo que se conoce como ley de potencias. Pues bien, los científicos alemanes han encontrado que ese mismo fenómeno se produce en sistemas cuánticos muy alejados del equilibrio. La diferencia entre el café de Kolmogórov y los sistemas de Berges y Gasenzer es que en el primer caso esa cascada de energía se verifica en el espacio —en distintas zonas del café—, mientras que para los segundos, se produce también en el tiempo. Y este detalle es fundamental, porque quiere decir que, si pudiéramos observar aquel océano de energía primordial a lo largo del tiempo y, a la vez, a distintas escalas, veríamos que todo se mantendría exactamente igual, como congelado, en un estado de no cambio, de no tiempo.

Y se hubiera conservado así por la eternidad si no fuera porque se produjo un brusco cambio de fase similar al que sucede cuando tenemos agua sobreenfriada —líquida, pero por debajo de los cero grados— e introducimos una pequeña impureza, como una motita de polvo: entonces se congela abrupta e instantáneamente. Algo así le sucedió al universo, dicen los científicos de Heidelberg. Una levísima perturbación acabó con ese estado de no tiempo regido por una dinámica fractal y provocó la aparición de una sopa densa de cuarks —los ladrillos de protones y neutrones— y gluones —partículas que mantienen unidos a los cuarks—. Es a partir de ese momento que el universo queda sometido a la segunda ley, y la entropía empieza a aumentar en un proceso activo que continuará durante billones de años.

## CUANDO NO HABÍA TIEMPO

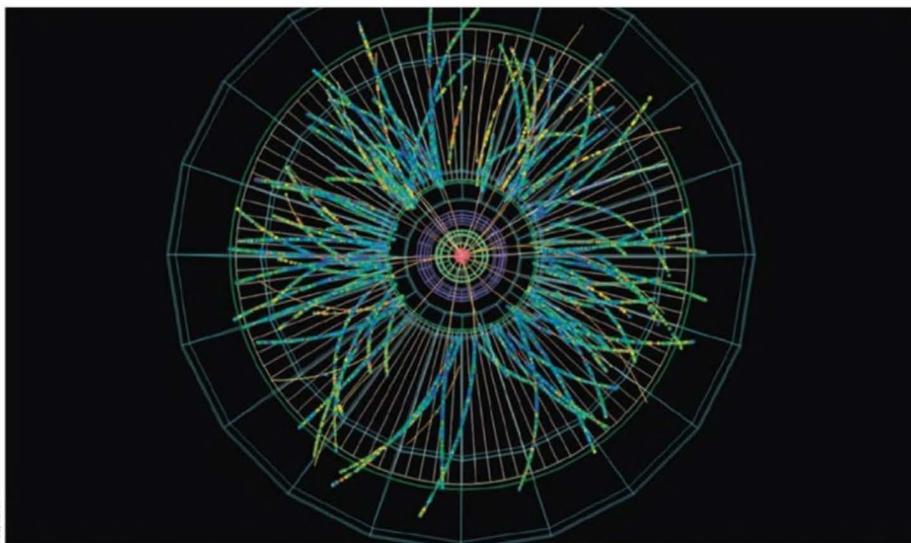
Lo importante a tener en cuenta es que antes de ese cambio de fase no había tiempo, no había historia. El universo surgió de una singularidad inicial, de una gran explosión, a lo que siguió una inflación que hizo que multiplicara su tamaño por 10<sup>26</sup> en una infinitesimal fracción de segundo. Aquella energía primige-

nia bien podría haber permanecido así indefinidamente, sin que nada cambiara, sin pasado, ni presente, ni futuro. Entonces, de repente, se produjo un cambio minúsculo que impulsó al bebé energético una dirección hacia donde fluir, una flecha del tiempo.

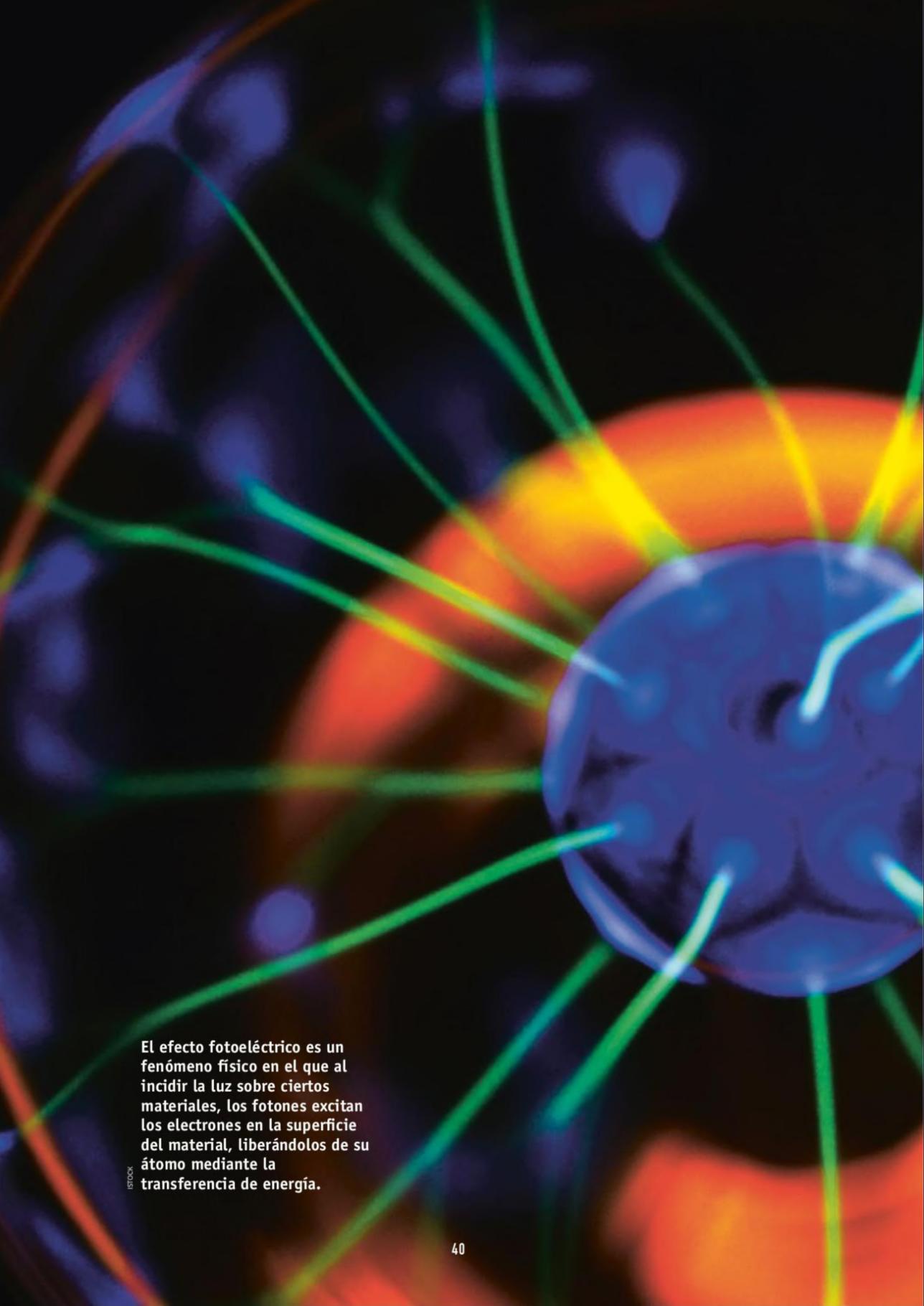
¿Se puede poner a prueba experimental esta teoría? Markus Oberthaler, también de la Universidad de Heidelberg, dio un primer paso en esa dirección utilizando 7000 átomos de rubidio. Con ellos, y después de dos años de trabajo, formó un condensado de Bose-Einstein, estado de agregación de la materia por debajo del sólido, a una temperatura muy próxima del cero absoluto. Curiosamente, las propiedades de la materia en esa situación son similares a cuando se encuentra a altísimas temperaturas, en forma de plasma cuark-gluon. En su artículo, publicado en septiembre de 2019, Oberthaler explicaba que durante los cuarenta segundos que el condensado se mantuvo estable le inyectaron una gran cantidad de energía y observaron su evolución. Se hallaba en un estado muy alejado del equilibrio y descubrieron que seguía la dinámica fractal de Gasenzer y Berges. «Parece que es la confirmación de la existencia de esta ley de escala universal», resumió Oberthaler.

Mientras, en el CERN se esmeraban por diseñar un experimento que arrojará luz sobre cuál es la naturaleza y las propiedades de ese plasma de gluones y quarks que se cree que existió en el universo primitivo y en ciertos objetos astronómicos compactos y extraños en la actualidad. Investigado por colisiones de iones pesados, como el plomo, principalmente en los módulos ALICE, pero también en CMS, ATLAS y LHCb del CERN, en septiembre de 2023 se registraron los primeros haces estables del recorrido de iones pesados del LHC 2023. El experimento de iones pesados permite a los científicos de la CMS estudiar estados de la materia similares a los del universo primitivo.

Esperanzador, pues cuando se logre crear un plasma primordial, entonces se verá si hemos descubierto, por fin, el origen del tiempo. ■

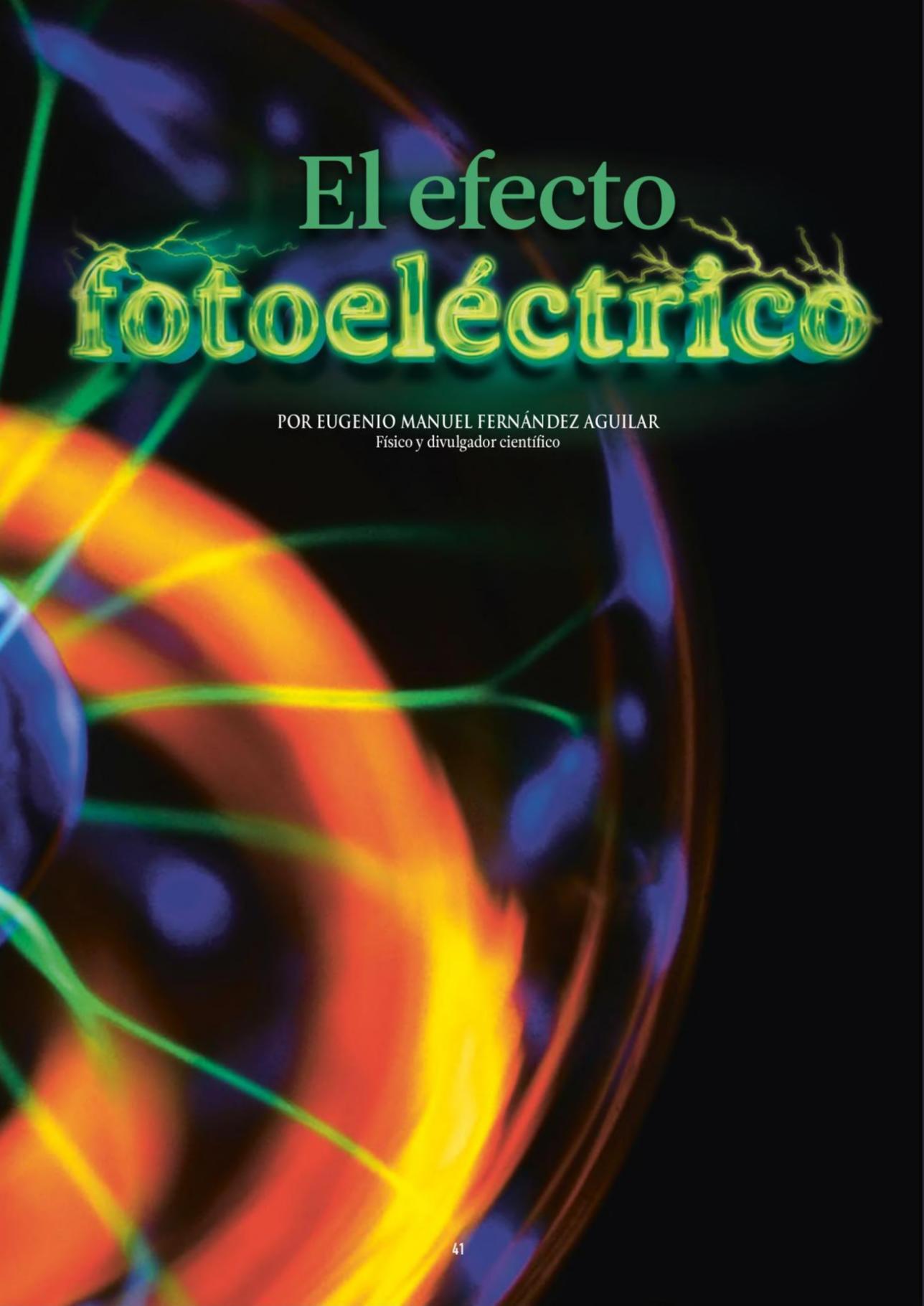


En el año 2010, ALICE registró las primeras colisiones entre protones y plomo en el LHC.



El efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico en el que al incidir la luz sobre ciertos materiales, los fotones excitan los electrones en la superficie del material, liberándolos de su átomo mediante la transferencia de energía.

ISTOCK

The background of the cover is a dark, abstract composition. It features several thin, glowing lines in shades of blue, green, and yellow that crisscross the frame. A prominent feature is a large, curved arc of light in the lower-left quadrant, transitioning through a spectrum of colors from red to orange to yellow, resembling a rainbow or a spectral line. The overall effect is one of dynamic energy and scientific inquiry.

# El efecto fotoeléctrico

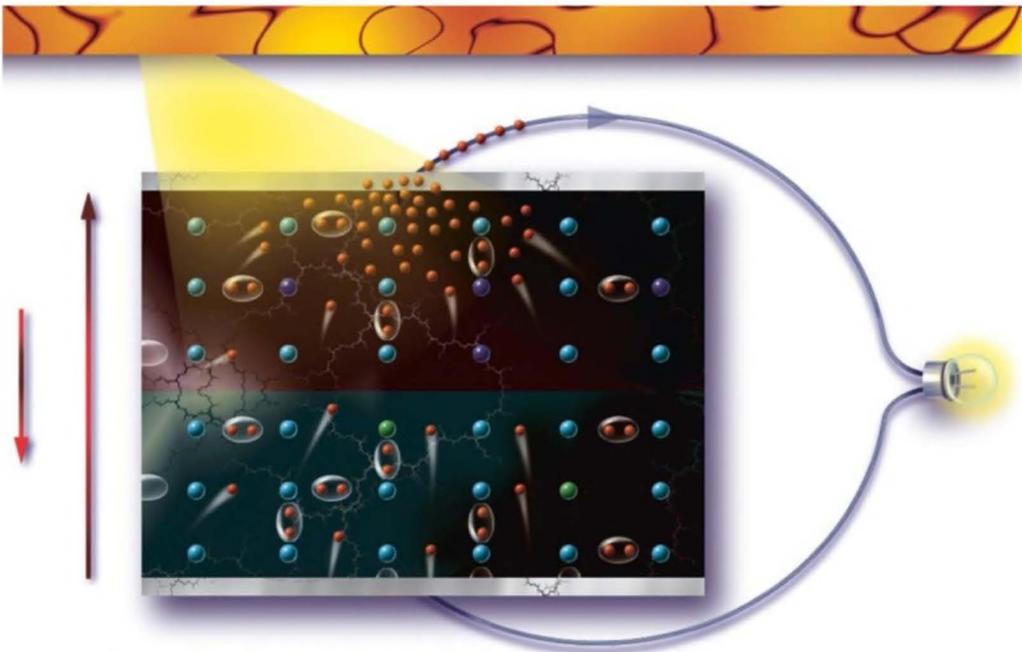
POR EUGENIO MANUEL FERNÁNDEZ AGUILAR  
Físico y divulgador científico

**E**l efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico crucial que ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la teoría cuántica y la comprensión de la dualidad onda-partícula de la luz. Este fenómeno, descubierto y estudiado a principios del siglo XX, revela la capacidad de la luz para liberar electrones de un material conductor cuando incide sobre él. Esta liberación de electrones tiene lugar de manera instantánea y solo ocurre si la luz incidente supera una cierta frecuencia umbral, independientemente de su intensidad.

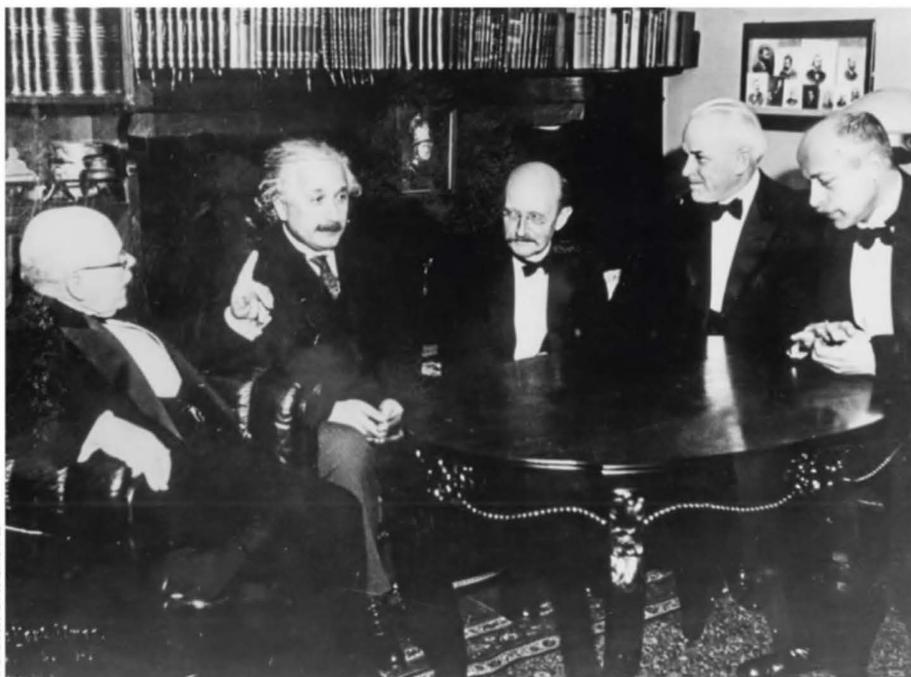
El objetivo de este artículo es proporcionar una exploración detallada y completa del efecto fotoeléctrico, desde sus fundamentos teóricos hasta sus aplicaciones prácticas. Se busca trazar el desarrollo histórico del estudio de este fenómeno, destacando las contribuciones clave de los científicos que lo investigaron. Además, el artículo tiene como objetivo abordar las implicaciones teóricas y tecnológicas del efecto fotoeléctrico en la física moderna y su impacto en diversas disciplinas científicas y aplicaciones prácticas.

### ¿QUÉ ES EL EFECTO FOTOELÉCTRICO?

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico que se manifiesta cuando la luz incide sobre una superficie metálica y provoca la emisión de electrones. La característica distintiva de este fenómeno es su respuesta instantánea y la dependencia de la frecuencia de la luz incidente. Cuando la frecuencia de la luz supera un umbral específico, los electrones son liberados, pero por debajo de este umbral,



Funcionamiento de una celda solar fotovoltaica. Los fotones de luz excitan los átomos, que emiten electrones, creando una corriente eléctrica que hace que la bombilla se encienda.



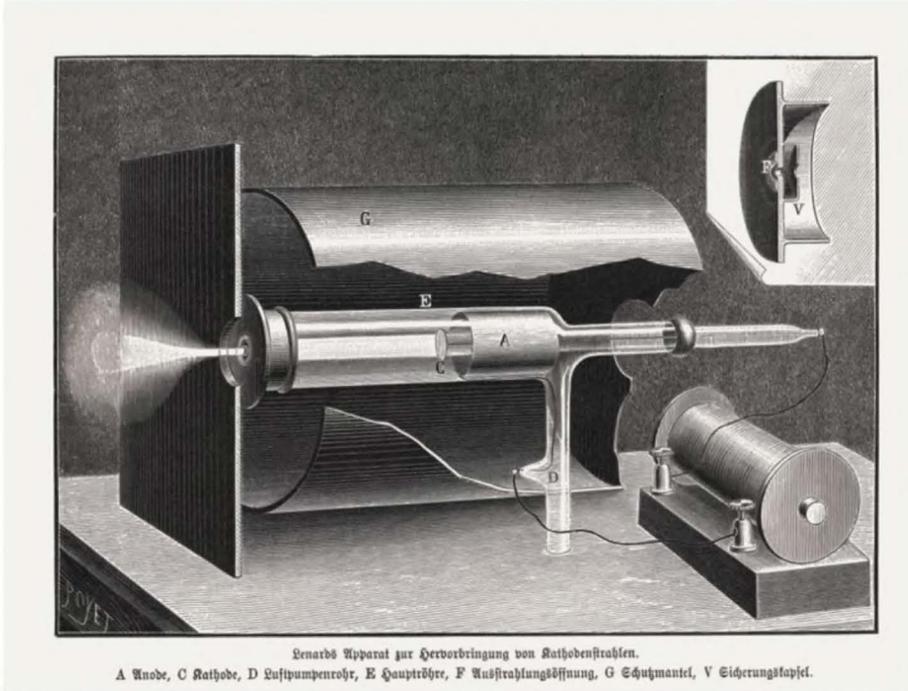
Sobre estas líneas, de izquierda a derecha: Walther Nernst, Albert Einstein, Max Planck, Robert Andrews Millikan y Max von Laue, el 12 de noviembre de 1931 en Berlín.

no importa cuán intensa sea la luz, no hay emisión fotoeléctrica observada. Este comportamiento contradice la predicción de las teorías clásicas de la luz, pero se explica de manera consistente mediante los principios cuánticos.

En el efecto fotoeléctrico, la luz actúa como partículas discretas de energía llamadas fotones. Cada fotón transporta una cantidad de energía proporcional a su frecuencia y cuando incide sobre la superficie metálica, puede transferir esta energía a un electrón, liberándolo de su órbita atómica. Los electrones, por otro lado, desempeñan el papel de partículas subatómicas que son liberadas y adquieren energía cinética bajo la influencia de la luz incidente. La descripción cuántica de este proceso destaca el comportamiento dual de la luz y los electrones, que exhiben propiedades tanto de partículas como de ondas.

Esta interacción entre partículas de luz y electrones proporciona una base fundamental para comprender cómo la luz puede afectar el comportamiento de la materia a nivel subatómico, sentando las bases para la revolución cuántica en la física del siglo xx.

## LA LIBERACIÓN DE ELECTRONES TIENE LUGAR DE MANERA INSTANTÁNEA Y OCURRE SI LA LUZ SUPERA CIERTA FRECUENCIA UMBRAL



En la imagen de arriba podemos ver un generador de rayos catódicos del físico húngaro-alemán Philipp Lenard. En 1905, Lenard fue galardonado con el premio Nobel de Física.

## UN POCO DE HISTORIA

El desarrollo histórico del efecto fotoeléctrico está estrechamente ligado a los trabajos pioneros de Albert Einstein y Max Planck a principios del siglo xx. En 1905, Einstein propuso una explicación cuántica del efecto fotoeléctrico al postular que la luz está compuesta por partículas cuantizadas llamadas fotones. Introdujo la idea de que la energía de un fotón es proporcional a su frecuencia, y para liberar un electrón, la energía del fotón debe ser igual o superior a la función trabajo del material. Este enfoque cuantitativo y revolucionario proporcionó una explicación precisa y consistente del efecto fotoeléctrico.

Max Planck, unos años antes, en 1900, había formulado la teoría cuántica al introducir la constante de Planck  $h$  en su explicación de la radiación del cuerpo negro. Esta teoría sentó las bases para la idea de cuantización de la energía, que fue esencial para la posterior comprensión del efecto fotoeléctrico. La relación entre

**LOS AVANCES TECNOLÓGICOS PERMITIERON  
REALIZAR EXPERIMENTOS MÁS PRECISOS CON  
LÁSERES Y TÉCNICAS DE DETECCIÓN AVANZADAS**

la energía de los fotones y su frecuencia, expresada por  $E = h \cdot f$ , fue crucial en la teoría de Einstein y estableció un marco teórico coherente.

El desarrollo del entendimiento del efecto fotoeléctrico fue complementado por una serie de experimentos clave y observaciones. El físico alemán Philipp Lenard realizó experimentos sistemáticos sobre la emisión de electrones bajo la irradiación de luz. Sus investigaciones confirmaron la dependencia de la emisión de electrones de la frecuencia de la luz y corroboraron las predicciones teóricas de Einstein. Otro experimento fundamental fue realizado por Robert Millikan en 1914, que midió con precisión la carga elemental del electrón y proporcionó evidencia experimental adicional para las ideas cuánticas de Einstein.

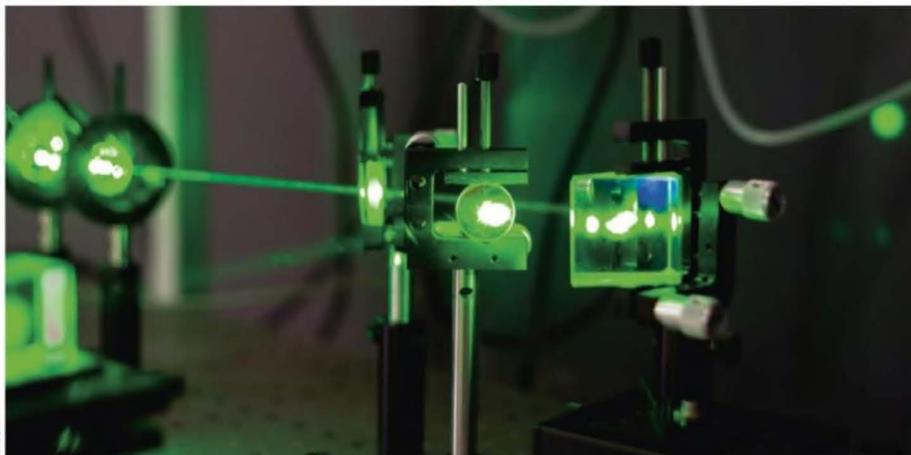
A lo largo del siglo xx, el estudio del efecto fotoeléctrico continuó evolucionando con numerosos avances teóricos y experimentales. La teoría cuántica desarrollada por Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger proporcionó una descripción más completa de la mecánica cuántica y contribuyó a una comprensión más profunda de los fenómenos subatómicos.

En paralelo, los avances tecnológicos permitieron realizar experimentos más precisos, utilizando láseres y técnicas de detección avanzadas. Estos experimentos confirmaron las predicciones de la teoría cuántica en situaciones cada vez más complejas y contribuyeron al desarrollo de tecnologías basadas en el efecto fotoeléctrico, como las células solares y los dispositivos optoelectrónicos.

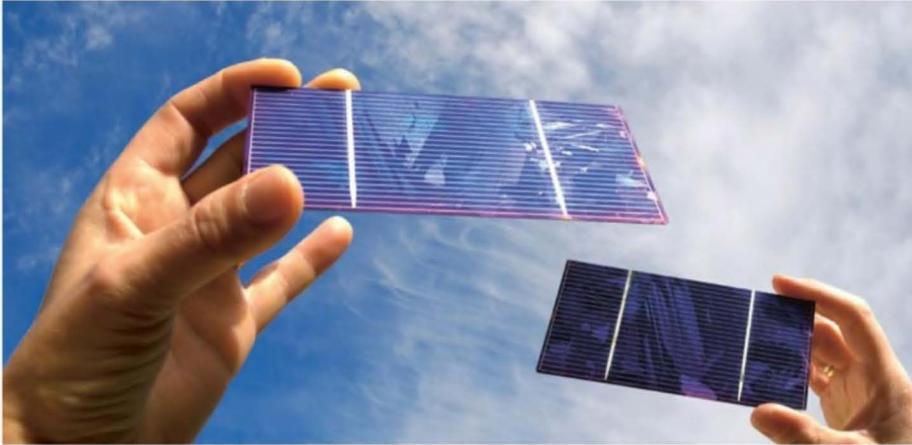
El efecto fotoeléctrico no solo fue crucial para el desarrollo de la teoría cuántica, sino que también desencadenó una revolución en la comprensión de la naturaleza dual de la luz y la materia, llevando a una nueva era en la física y la tecnología.

## UN HORIZONTE LLENO DE APLICACIONES

Una de las aplicaciones más destacadas del efecto fotoeléctrico es la generación de energía a través de celdas solares. Estas convierten la luz solar en electricidad aprovechando el efecto fotoeléctrico. La estructura básica de una celda solar es-

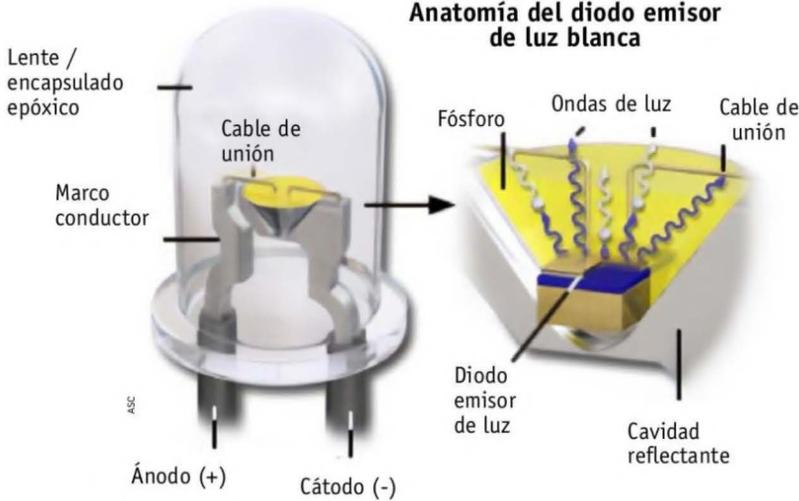


Un láser, como el de la imagen, es un dispositivo que emite luz coherente, monocromática y de alta intensidad mediante un proceso llamado emisión estimulada de radiación.



SHUTTERSTOCK

### Anatomía del diodo emisor de luz blanca



En la imagen de arriba, células solares fotovoltaicas; a la izquierda, infografía en la que vemos cómo el diodo emisor de luz utiliza el efecto fotoeléctrico inverso para emitir luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de él.

tá formada por capas de materiales semiconductores, como el silicio, que liberan electrones cuando son alcanzados por fotones de luz solar. Estos electrones liberados generan una corriente eléctrica que puede ser utilizada como fuente de energía. La relación directa con el efecto fotoeléctrico radica en la capacidad de los fotones incidentes en la celda solar para liberar electrones, creando así una corriente eléctrica. La eficiencia de las celdas solares ha mejorado significativamente gracias a la comprensión y aplicación de los principios del efecto fotoeléctrico, convirtiéndolas en una fuente de energía renovable clave.

## UNA DE LAS APLICACIONES DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO ES LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE CELDAS SOLARES

No terminan ahí las aplicaciones. El efecto fotoeléctrico también es fundamental para el funcionamiento de diversos dispositivos optoelectrónicos, que combinan la manipulación de la luz con la generación y detección de corriente eléctrica. Entre estos dispositivos se encuentran los diodos emisores de luz (LED), fotodiodos, y láseres:

- LED (diodo emisor de luz): utilizan el efecto fotoeléctrico inverso para emitir luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de ellos. La liberación de fotones ocurre cuando los electrones recombinan con huecos en la estructura del semiconductor.
- Fotodiodos: estos dispositivos aprovechan el efecto fotoeléctrico para convertir la luz incidente en corriente eléctrica. Cuando los fotones golpean el material semiconductor, liberan electrones que contribuyen a la corriente.

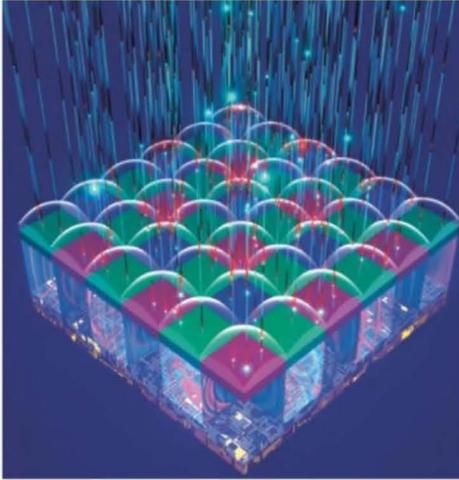
## Paneles solares

Las placas o paneles solares, son sistemas compuestos por múltiples células fotovoltaicas interconectadas que trabajan de manera conjunta para convertir la radiación solar en electricidad utilizable. Estas células fotovoltaicas, a menudo fabricadas con materiales semiconductores como el silicio, juegan un papel crucial al absorber los fotones de la luz solar y liberar electrones, generando así una corriente eléctrica. La evolución de las células fotovoltaicas ha impulsado el desarrollo de placas solares cada vez más eficientes y asequibles, transformando la energía solar en una fuente de energía renovable fundamental en la matriz energética global.

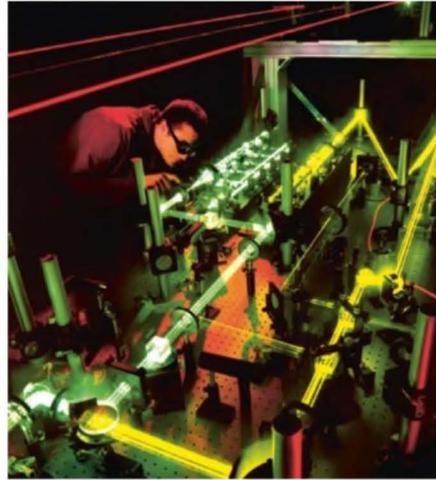
La cronología del desarrollo de las células fotovoltaicas refleja una evolución significativa en la captura de energía solar para su conversión en electricidad. A lo largo de las décadas, los hitos clave marcaron avances fundamentales en la eficiencia y la accesibilidad de las células solares. Desde la invención de la primera célula solar de selenio en 1883 por Charles Fritts hasta los descubrimientos modernos en materiales avanzados y tecnologías fotovoltaicas, la investigación y la innovación han llevado a mejoras continuas. Destacan logros como la introducción de células de silicio en la década de 1950, la creación de células de película delgada en las décadas de 1970 y 1980, y los desarrollos recientes en células solares de perovskita. Estos avances han posicionado las células fotovoltaicas como una fuente de energía sostenible y han allanado el camino para su integración generalizada en el panorama energético global.



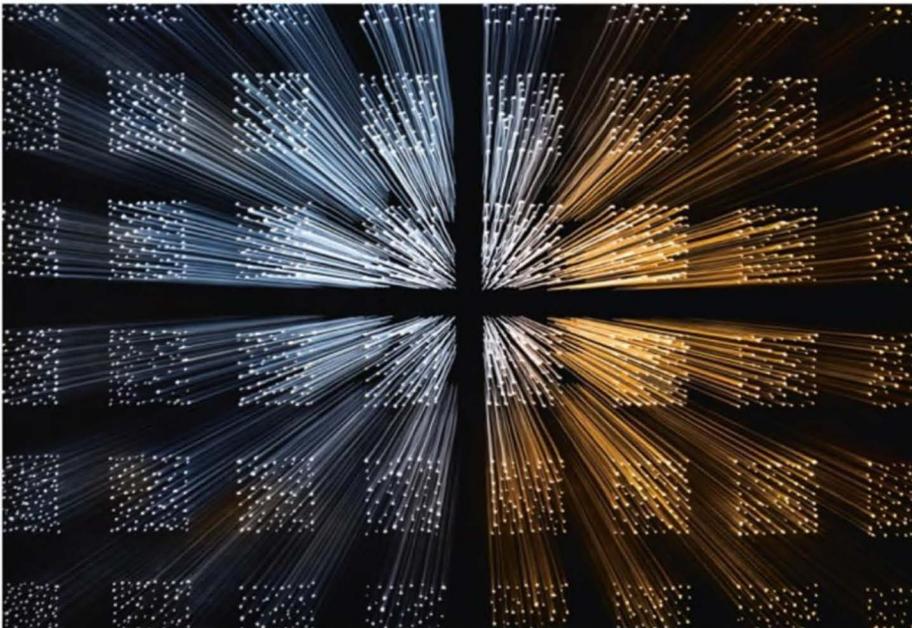
SHUTTERSTOCK



ISTOCK



ASC



SHUTTERSTOCK

Arriba a la izda., demostración del principio del sensor CMOS retroiluminado. A la dcha., ingeniero óptico evaluando la interacción de láseres. Sobre estas líneas, la transferencia de datos por fibras ópticas depende de la conductividad lumínica y la generación de señales fotoeléctricas por los materiales.

•Láseres: estos también se basan en el efecto fotoeléctrico inverso. La amplificación de la luz se logra cuando los electrones liberados en la recombinación estimulada generan fotones adicionales con la misma frecuencia y fase.

Pero es que aún hay mucho más. El efecto fotoeléctrico ha impulsado numerosas innovaciones tecnológicas que van más allá de la generación de energía y la manipulación de la luz. Algunas aplicaciones en tecnologías modernas son:

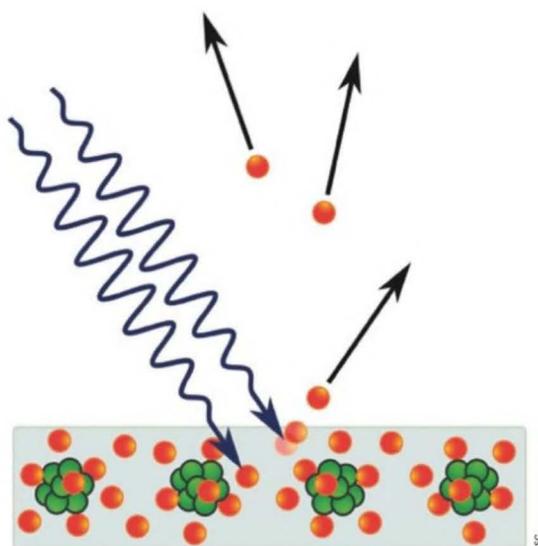
•Sensores fotoeléctricos: utilizados en automatización industrial y sistemas

## Precedentes del efecto fotoeléctrico

Las primeras incursiones en la comprensión del efecto fotoeléctrico se remontan a Heinrich Hertz en 1887. Durante sus experimentos sobre la producción y recepción de ondas electromagnéticas, Hertz observó un fenómeno intrigante al utilizar un receptor compuesto por una bobina. Al encerrar este receptor en una caja negra, notó una disminución en la longitud máxima de la chispa eléctrica producida. Sin embargo, aunque publicó sus resultados, Hertz no ofreció una explicación detallada del fenómeno observado.

Posteriormente, en 1897, Joseph John Thomson exploraba los rayos catódicos y formuló la hipótesis de que estos consistían en flujos de partículas cargadas negativamente, que hoy conocemos como electrones. Thomson llevó a cabo experimentos exponiendo una placa metálica a luz de diferentes longitudes de onda, con lo que observó que la intensidad de la corriente eléctrica variaba con la intensidad de la luz y que la radiación de mayor frecuencia producía electrones con mayor energía cinética.

En 1902, Philipp Lenard realizó observaciones adicionales que destacaron la variación de energía de los electrones con la frecuencia de la luz incidente en el efecto fotoeléctrico. Sus experimentos, aunque cualitativos debido a limitaciones instrumentales, pusieron de manifiesto la influencia de la radiación ultravioleta en la emisión de electrones. Estos precursores sentaron las bases para la comprensión posterior del fenómeno, que alcanzaría su pleno reconocimiento



Emisión de electrones (en rojo) de una placa metálica al recibir suficiente energía transferida desde los fotones incidentes (líneas onduladas).

de control, estos sensores detectan la presencia o ausencia de luz para activar o desactivar dispositivos.

- Detectores de imágenes: cámaras digitales y sistemas de imágenes médicas aprovechan el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en señales eléctricas que representan imágenes.

- Escáneres ópticos: presentes en dispositivos como lectores de códigos de barras, los escáneres ópticos utilizan el efecto fotoeléctrico para traducir información visual en datos electrónicos.

- Comunicaciones ópticas: la transmisión de datos a través de fibras ópticas se basa en la capacidad de los materiales para conducir la luz y generar señales fotoeléctricas. ■

The image features a central, bright blue-white light source surrounded by two large, glowing, orange and yellow ring-like structures that appear to be intertwined. These structures are set against a dark, starry background, suggesting a cosmic or quantum scale. The overall effect is one of dynamic energy and interconnectedness.

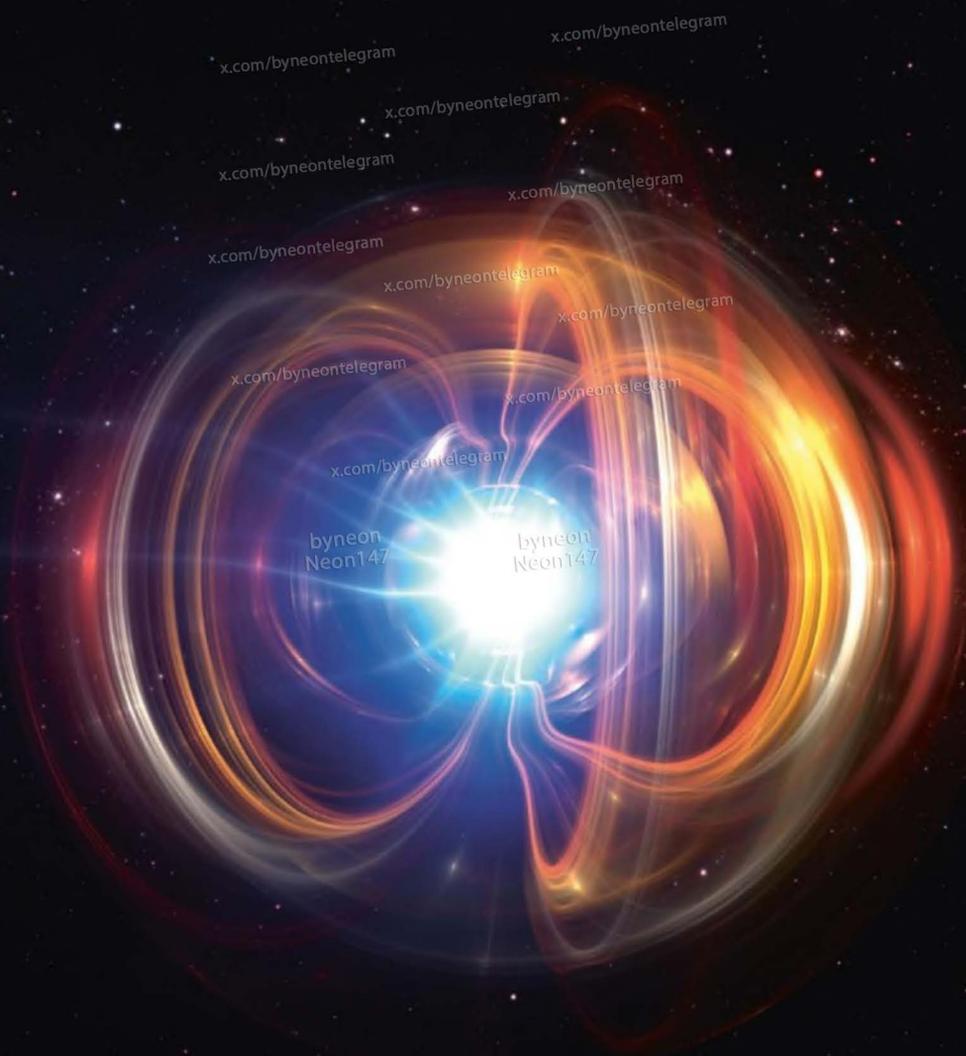
El entrelazamiento cuántico es un fenómeno que permite que dos o más partículas estén conectadas de manera tan íntima que cualquier cambio en una afecte a las demás, sin importar la distancia que las separe.

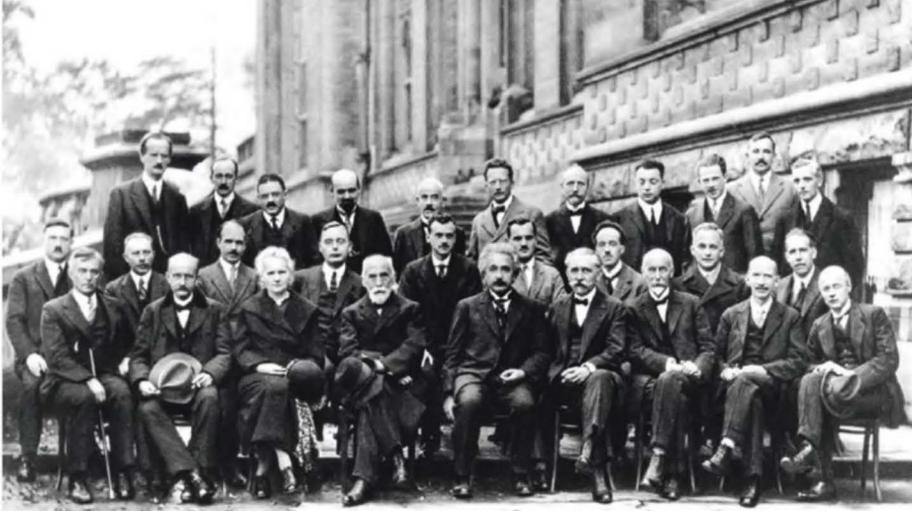
SHUTTERSTOCK

# Entrelazamiento cuántico

POR ANA MARTÍN FERNÁNDEZ

Doctora en Computación Cuántica e Investigadora en Sensórica Cuántica  
en la Universidad del País Vasco





ASC

Foto de grupo de la Conferencia de Solvay (1927). De arriba abajo y de izquierda a derecha: A. Piccard, É. Henriot, P. Ehrenfest, É. Herzen, T. de Donder, E. Schrödinger, J. É. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin, P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. A. Kramers, P. Dirac, A. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr, I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, C. E. Guye, C. T. Rees Wilson, O. W. Richardson.

**D**esde su desarrollo a lo largo del último siglo, la mecánica cuántica ha traído consigo nuevos conceptos que nos obligan a replantear nuestra concepción del mundo. Uno de esos extraños fenómenos que introdujo la mecánica cuántica es lo que conocemos como entrelazamiento. Si aún a día de hoy resulta complicado expresarlo en términos simples que puedan integrarse en nuestra concepción del mundo, no es difícil imaginar que hicieron falta numerosas discusiones y quebraderos de cabeza entre los físicos más influyentes del siglo XX para llegar a una descripción más completa de este fenómeno.

## LA CONFERENCIA SOLVAY DE 1927: UNA TEORÍA INCÓMODA

En 1911 comenzaron en Solvay, Bélgica, un ciclo de conferencias que reunían a los científicos más destacados de la época para tratar diferentes temas de interés. Una de las más conocidas fue la que tuvo lugar en 1927 y cuya materia central eran los electrones y fotones. Los físicos más notables del mundo se reunieron entonces y la ocasión los llevó a debatir la situación y el significado de la recién formulada teoría cuántica.

En el momento en que la conferencia tuvo lugar, ya existían pruebas experimentales claras y una formulación cuantitativa de las reglas de la mecánica cuántica, así que era el momento idóneo para juntarse y tratar de desentrañar qué significaba esta nueva visión del mundo. La nueva teoría establecía, entre otras cosas, que no podíamos predecir con exactitud el resultado que se obtendría de un experimento, sino que a lo máximo que se podía aspirar era a conocer con qué probabilidad podría darse uno u otro resultado.

La conferencia de 1927 dio lugar a una serie de debates entre Albert Einstein y Niels Bohr acerca de cómo podía ser que la teoría propusiera una forma de describir por completo un sistema físico, utilizando lo que se llama función de onda, y aun así, no fuera posible conocer por completo y de manera simultánea diferentes

propiedades de este. Einstein no concebía que, dada una partícula involucrada en un proceso físico, no fuera posible determinar simultáneamente su velocidad y su posición en un momento dado.

Tanto era así, que Einstein le proponía sistemáticamente a Bohr diversos experimentos mentales para tratar de hacerle entender lo inconcebible que resultaba una teoría como esa. La mecánica cuántica no era compatible con el hecho de que las propiedades de las partículas debían estar predeterminadas y existir independientemente de las medidas que se hicieran en ellas. Es decir, Einstein abogaba por un realismo local que debía ser inherente a la realidad física que experimentamos. La mecánica cuántica se trataba, por lo tanto, de una teoría incompleta. Bohr reflexionaba sobre cada uno de esos experimentos y siempre encontraba una solución que los refutaba. Estas respuestas no siempre satisfacían a Einstein, pero sí al resto de la comunidad científica.

## UN EXPERIMENTO MENTAL CON UNA VERDAD INESPERADA

En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen (EPR) publicaron un artículo que consideraban podría ser el experimento mental definitivo para demostrar la incompletitud de la nueva teoría cuántica. En su trabajo, demostraron que, según la teoría cuántica, podría existir una situación en la que al realizar mediciones diferentes en una partícula, otra partícula podría ser descrita por funciones de onda distintas, sin importar a qué distancia estuviera de la primera. Es decir, el estado de la segunda partícula dependería de la medida realizada sobre la primera. Sin embargo, dado que estas partículas no interactúan de ninguna manera, no debería haber ningún cambio en el segundo sistema como resultado de las mediciones realizadas en el primero.

Este planteamiento resultaba inquietante ya que contradecía el principio de localidad, que establece que una partícula solo puede ser influenciada por su entorno

MAY 15, 1935      PHYSICAL REVIEW      VOLUME 47

**Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?**

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*  
(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

I.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term complete, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by a *a priori* philosophical consideration, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable: If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

# EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

**Scientist and Two Colleagues  
Find It Is Not 'Complete'  
Even Though 'Correct.'**

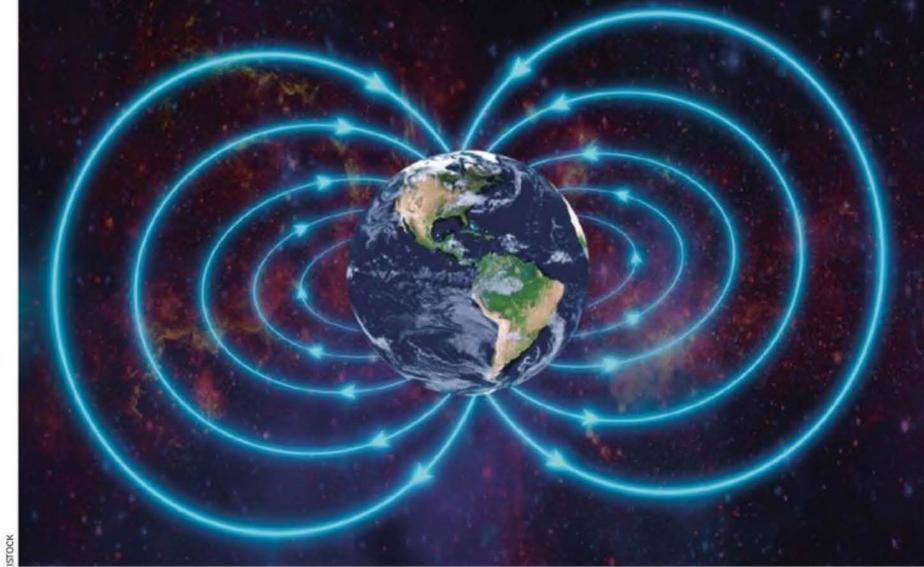
---

**SEE FULLER ONE POSSIBLE**

---

**Believe a Whole Description of  
'the Physical Reality' Can Be  
Provided Eventually.**

Sobre estas líneas, titular del *New York Times* sobre Einstein, Podolsky y Rosen y la teoría cuántica. A la izda., *paper* original publicado en la revista *Physical Review*. Ambos de 1935.



La magnetorrecepción es la capacidad de algunos organismos vivos, especialmente animales, para detectar y orientarse utilizando el campo magnético terrestre.

inmediato. EPR concluyen que, dado que «ninguna definición de realidad permitiría esto», la función de onda no puede describir completamente la realidad física y, por lo tanto, la mecánica cuántica tampoco lo hacía. No obstante, dejaron abierta la pregunta de si podría existir una teoría física que permitiera una descripción completa de la realidad física.

Lo verdaderamente fascinante de este resultado es que la extraña correlación entre dos partículas independientes, que más tarde se denominaría entrelazamiento, emergió de manera inesperada. Además, el desarrollo matemático que emplearon para demostrar la incredibilidad de este resultado acabó siendo una descripción matemática del propio estado entrelazado. Este encuentro fortuito con un concepto tan fundamental como el entrelazamiento marcó un hito significativo en el desarrollo de la mecánica cuántica.

## ENTONCES, ¿QUÉ ES EL ENTRELAZAMIENTO?

El término «entrelazamiento» en mecánica cuántica, fue popularizado por el físico Erwin Schrödinger tras leer el artículo de EPR publicado en 1935. Schrödinger utilizó la palabra alemana «Verschränkung», que puede traducirse al castellano como «plegado», «cruce» o «abrazo». En el contexto del lenguaje corporal, puede referirse a la acción de cruzar los brazos o las piernas. Tal y como anticiparon involuntariamente EPR, el entrelazamiento es un fenómeno que permite que dos o más partículas estén conectadas de manera tan íntima que cualquier cambio en una de ellas afecte instantáneamente a las demás, sin importar la distancia que las separe.

Una forma intuitiva de comprenderlos es considerar un sencillo experimento. Imaginemos que se entregan dos objetos a dos personas, Alicia y Roberto, quienes deben guardar cada objeto en su puño, sin abrirlo hasta llegar a sus respectivas casas. Una vez que Roberto está en su casa en Guadalajara y Alicia a en Shanghái, pueden abrir sus manos para descubrir qué objeto les tocó.

Si estos objetos fueran convencionales, como una canica verde y otra roja, al abrir el puño encontrarían el objeto que han estado portando todo este tiempo. Sin

## Los calcetines de Bertlmann y la naturaleza de la realidad (por John Bell, 1980)

A finales de los 70, un joven empleado en el CERN tenía la costumbre de usar calcetines de colores diferentes. Era Reinhold Bertlmann, un físico austriaco que colaboraba con John Bell y resultó ser un excelente ejemplo para explicar la paradoja EPR. En un artículo que publicó en 1981, Bell contaba que era impredecible saber de qué color sería cada calcetín en un día cualquiera, pero, cuando veías que el primero era rosa, podías estar seguro de que el segundo no tendría ese color. Al observar el primer calcetín, y sabiendo que se trataba de Bertlmann, se disponía de información inmediata sobre el segundo. Como Bell escribió: «no hay una explicación para los gustos, pero aparte de eso, no hay ningún misterio aquí. ¿Y no es el asunto EPR exactamente lo mismo?».

El trabajo de Bell inspiró profundamente a Bertlmann, quien hoy ejerce como profesor en la Universidad de Viena, centrandolo su investigación en el campo de la física de partículas. Su relación con Bell fue más que una colaboración profesional. En 2016 publicó un documento que destaca su estrecha colaboración y que fueron grandes amigos. En este documento, Bertlmann expone las valiosas contribuciones de Bell a la física de partículas y a la física de aceleradores, así como su colaboración con Mary Bell. También incluye la enorme influencia que estos resultados tuvieron en su propio trabajo.

embargo, si los objetos estuvieran entrelazados previamente y luego separados, hasta que uno de ellos no abriera su mano, no se determinaría qué objeto estaba custodiando cada uno. Sería como si ambos portaran los dos objetos a la vez. Lo que es más, si repitiéramos el experimento, nada impediría que la canica que mide Alicia fuera distinta cada vez.

El acto de abrir el puño equivale al proceso de medición mencionado por EPR en su artículo. Una vez que uno de los participantes abre su mano, no solo se define qué objeto tiene, sino que instantáneamente se determina también qué objeto tiene el otro participante. Por lo tanto, si Alicia abre primero su mano y encuentra una canica verde, la de Roberto automáticamente contendría una canica roja.

### **LAS DESIGUALDADES DE BELL Y LA PROPUESTA DE CHSH**

Por supuesto este experimento es una simplificación de lo que sucede en la realidad, pero es suficiente para ofrecer una idea de las implicaciones del entrelazamiento y comprender lo incómodo que la no-localidad podía resultar para los científicos de la época.

La paradoja de EPR llevó a muchos físicos a buscar teorías que fueran completamente deterministas y que respetaran el realismo local. John Bell estaba al tanto de los debates entre Einstein y Bohr, y también abogaba por una teoría física que siguiera esa línea. Por ello, en 1964, propuso una serie de desigualdades con las que buscaba brindar respaldo matemático a la paradoja EPR y permitir así una demostración experimental.

Tras los resultados de Bell, los físicos Clauser, Horne, Shimony y Holt (CHSH) propusieron una versión específica de estas desigualdades que podría ser reproducida

## LA PARADOJA EPR ES UNO DE LOS MAYORES PROBLEMAS DE LA FÍSICA CUÁNTICA

experimentalmente. Esto permitiría esclarecer la posible existencia de partículas entrelazadas. La desigualdad que plantearon era una restricción en las correlaciones que se pueden observar en ciertos experimentos si existiera una teoría de variables ocultas locales. Si las mediciones de la mecánica cuántica eran correctas, entonces ciertas mediciones en partículas entrelazadas violarían esta desigualdad.

La desigualdad CHSH nos ayuda a entender un poco más el concepto del entrelazamiento cuántico. Imaginemos que tenemos dos partículas entrelazadas. Esto significa que, sin importar lo lejos que podrían encontrarse estas partículas la una de la otra, si algo le sucede a una de ellas, es decir, si alteramos su estado, la otra partícula «sabrán» al instante lo sucedido y reaccionará a ello, modificando también su estado. Esto puede resultar un tanto extraño ya que va en contra de nuestra intuición basada en cómo funcionan las cosas en el mundo que podemos ver y tocar.

Esta desigualdad es una forma de poner a prueba ese extraño comportamiento. Es una especie de regla que nos dice que, si el universo funciona como pensamos ingenuamente que debería, entonces cuando hagamos ciertas mediciones en estas partículas entrelazadas, los números que obtenemos estarán restringidos a un valor máximo establecido por la desigualdad. La sorpresa es que, al realizar dichas mediciones, los números que se obtienen suman más de lo que la desigualdad CHSH dice que deberían. Esto es una prueba de que el entrelazamiento cuántico es real y de que el universo puede ser aún más extraño de lo que cabe imaginar.

La paradoja EPR planteó una profunda pregunta sobre la naturaleza de la realidad y el teorema de Bell junto con la desigualdad CHSH proporcionaron una forma de responder a ella. Las pruebas experimentales, que aún hoy se siguen haciendo, confirman que la mecánica cuántica parece describir correctamente nuestro universo, a pesar de sus predicciones contraintuitivas e incluso, a veces, incómodas.

### EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO EN LA NATURALEZA

A pesar de la sorprendente naturaleza del entrelazamiento cuántico, cada vez más evidencia sugiere que este fenómeno forma parte de nuestra vida cotidiana y podría tener un impacto significativo en campos como la biología. Por ejemplo, se ha planteado la posibilidad de que el entrelazamiento cuántico desempeñe un papel fundamental en fenómenos naturales, como el sentido de la orientación que poseen las aves migratorias.

La magnetorrecepción es la manera en la que los animales son capaces de percibir el campo magnético de la Tierra y usarlo como una brújula para poder orientarse espacialmente. Para las aves migratorias, cuya capacidad de navegación depende de este sentido, la naturaleza del tejido biológico responsable de la percepción de los campos magnéticos es aún hoy objeto de estudio y se considera un enigma. Sin embargo, recientes investigaciones sugieren que proteínas sensibles al magnetismo, conocidas como criptocromos y presentes en la retina de las aves migratorias, podrían estar involucradas en este proceso.



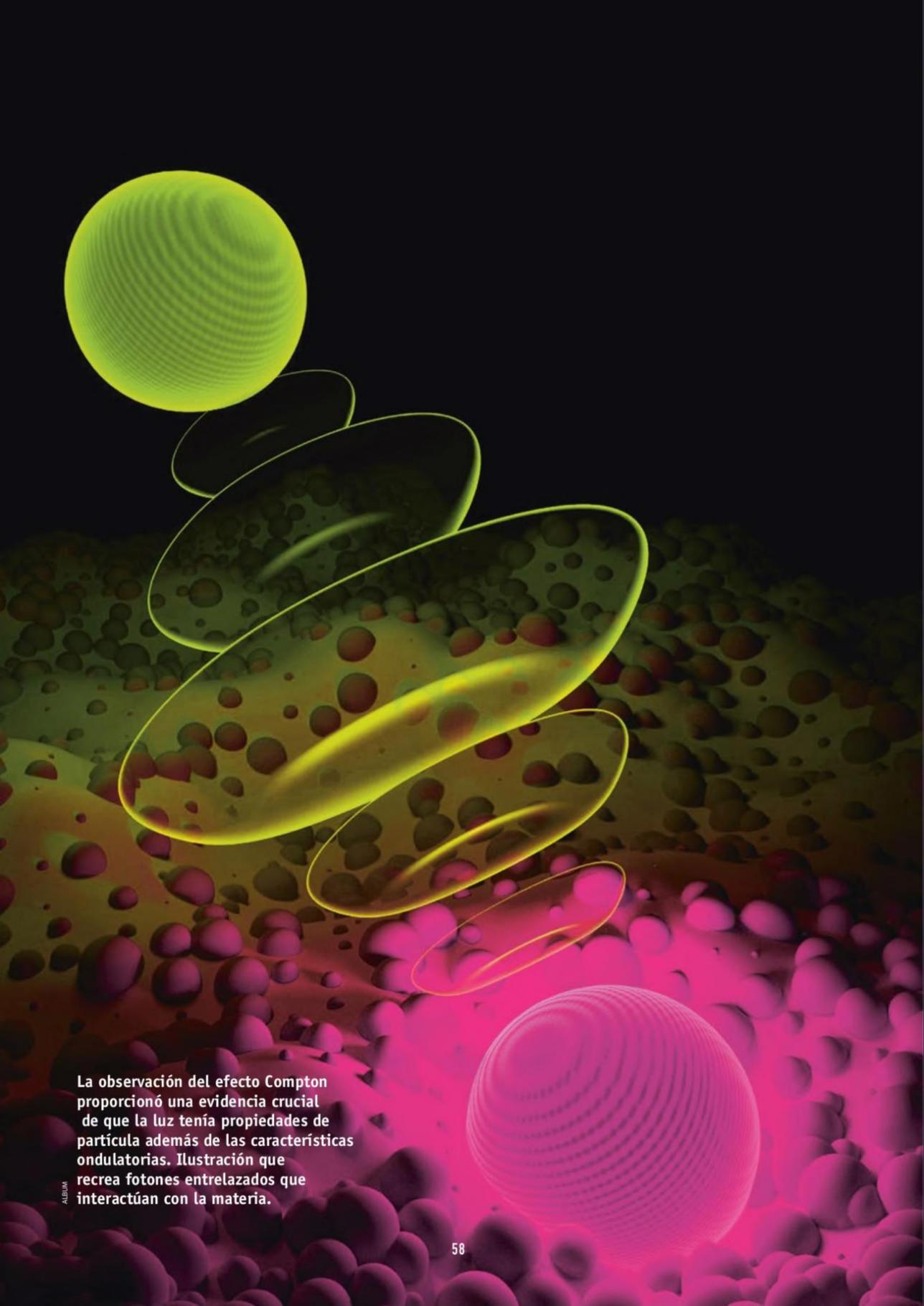
La mecánica cuántica no era compatible con el hecho de que las propiedades de las partículas debían estar predeterminadas y existir independientemente de las medidas que se hicieran en ellas.

Un estudio publicado en 2021 plantea la hipótesis de que los criptocromos, al absorber fotones de luz y excitarse, forman electrones que se comportan como intermediarios químicos sensibles al magnetismo. Se cree que las variaciones en la reacción de estos electrones pueden ser los responsables de indicar la dirección del ave con respecto al campo magnético de la Tierra, actuando como una especie de brújula interna. Sorprendentemente, el mecanismo de esta brújula podría deberse a que los electrones se encuentran entrelazados.

La posibilidad de que estos electrones estén entrelazados sugiere que la mecánica cuántica podría desempeñar un papel crucial en la magnetorrecepción de las aves. Esta idea plantea preguntas profundas sobre cómo las leyes fundamentales de la física pueden influir en los procesos biológicos más complejos.

Es importante recordar que estos fenómenos están en constante estudio y que las hipótesis propuestas aún deben confirmarse mediante investigaciones adicionales. La intersección entre la física cuántica y la biología continúa siendo un área emocionante y llena de misterio, que nos desafía a comprender mejor el mundo natural que nos rodea.

El entrelazamiento es uno de los fenómenos más distintivos y sorprendentes de la mecánica cuántica. En sus primeros encuentros, tanto en la historia general como en la experiencia personal, estos conceptos resultan antiintuitivos, extraños y hasta un poco molestos. Pero el mundo que nos rodea también es enigmático y está lleno de fenómenos que no resultan fáciles de interpretar. Tal vez la teoría cuántica tenga las respuestas a muchas de las preguntas que nos hacemos, o tal vez solo nos traiga aún más preguntas que formular. Y es precisamente por eso por lo que es crucial seguir desarrollando la teoría fundamental y empujando los avances tecnológicos. Es posible que no llegemos nunca a desentrañar la verdad que esconde el universo, pero eso no debe desalentarnos en nuestra búsqueda de comprensión e interpretación de la naturaleza. ■



La observación del efecto Compton proporcionó una evidencia crucial de que la luz tenía propiedades de partícula además de las características ondulatorias. Ilustración que recrea fotones entrelazados que interactúan con la materia.

ONDAS Y PARTÍCULAS

# El efecto Compton

POR ALEJANDRO NAVARRO  
Bioquímico y divulgador científico



AP/EMLIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

Arthur Compton con su medidor de rayos a bordo del *Aorang* con el propósito de verificar las variaciones de la acción de los rayos cósmicos en ambos hemisferios.

**E**n la historia de la ciencia ha habido tres tipos de descubrimientos importantes: los que no aportan mucho a nivel teórico, pero tienen buena utilidad en la práctica; los que no tienen mucho impacto en la práctica, pero ayudan a entender o desarrollar una teoría, y aquellos que no solo son de utilidad, sino que nos permiten esclarecer la forma en que funciona el universo. El hallazgo del efecto Compton es uno de los mejores ejemplos de esta última y trascendental categoría.

El efecto Compton debe su nombre al físico estadounidense Arthur Holly Compton (1892-1962), uno de esos personajes brillantes que protagonizaron las grandes revoluciones científicas de la primera mitad del siglo xx. Con tan solo 21 años y mientras estudiaba, ya había desarrollado el generador Compton, un aparato que permitía demostrar la rotación de la Tierra. Tras doctorarse y trabajar un par de años en la Westinghouse, pasó la Primera Guerra Mundial desarrollando instrumentos para aviones. En 1919, el físico nacido en Ohio ganó una beca para Cambridge, en Inglaterra, donde conoció a algunas de las mayores lumbreras de su época.

Estaba fascinado por la radiación electromagnética de alta energía, y más en concreto por los rayos X, la fantasmal radiación descubierta por Wilhelm Röntgen en 1895 que era capaz de atravesar cuerpos opacos e imprimir las películas fotográficas. En 1922, mientras experimentaba con estos rayos —los dirigía hacia un bloque de carbón y, tras chocar con él, se difundían en varias direcciones—, Compton se percató de que existía una relación entre el ángulo en el que los rayos se difundían y la longitud de onda que adoptaban, de modo que a mayor ángulo, mayor era la longitud de onda.

Para comprender por qué este resultado se convertiría en uno de los más importantes de toda la física moderna debemos referirnos a uno de los más profundos misterios de la teoría cuántica, que en ese momento no tenía más que un par

de décadas de antigüedad y cuyos fundamentos eran todavía objeto de arduas discusiones. En efecto, a medida que avanzaba en su desarrollo la sorprendente y hermosa teoría explicaba un sinfín de fenómenos, pero en base a una serie de fundamentos contraintuitivos, alguno de los cuales se daba de bruces con lo que uno podría considerar el sentido común.

## CUANTOS DE LUZ

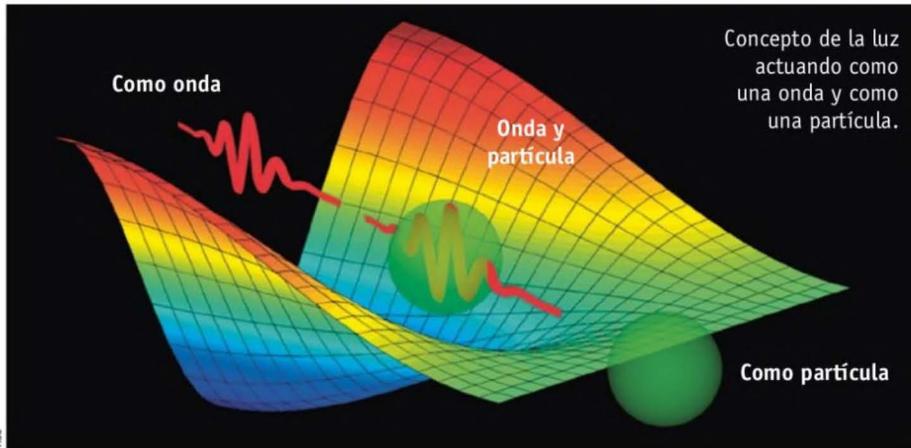
Uno de los extraños aspectos de la teoría, quizás entre los más chocantes, era el hecho de que en determinadas ocasiones los cuantos de luz (fotones) parecían comportarse como ondas y en otras, como partículas. En la vieja mecánica clásica, esto era una especie de anatema. El mundo que nos rodea, al menos de acuerdo con nuestra experiencia cotidiana, tiene las cosas muy bien definidas: un objeto es un objeto —y una partícula es, en principio, un objeto— y una perturbación —una onda— es otra muy diferente. Las propiedades de ambas entidades no tienen nada que ver. Las ondas, por ejemplo, se difractan al encontrar un obstáculo y los objetos no lo hacen. Desde los célebres «experimentos de doble rendija» de Thomas Young a principios del siglo XIX había quedado muy claro que la luz presentaba propiedades ondulatorias y ningún físico decimonónico se cuestionaba semejante cosa. Sin embargo, a partir de las graves dificultades teóricas que presentaba el problema del cuerpo negro —la famosa «catástrofe ultravioleta»—, Max Planck había presentado en 1900 la idea de que la radiación electromagnética es absorbida y emitida por la materia en forma de paquetes, o «cuantos» (del latín *quantum*, «cantidad»), y esos cuantos tenían un cierto aroma a partículas.

Al principio, la reacción de la comunidad científica ante las ideas de Planck fue bastante escéptica, pero la cosa cambió en 1905 cuando Albert Einstein esclarecía el efecto fotoeléctrico a base de considerar a los cuantos de luz, que él mismo bautizó como «fotones», sin duda alguna como partículas. De hecho, no había

## La radiografía

Una radiografía no es más que el registro de una imagen obtenida al exponer a un receptor a una fuente de radiación de alta energía, por ejemplo, rayos X. En función de las características de la radiación incidente y de los materiales que se interponen, parte de la radiación es absorbida y parte, dispersada de forma diferencial, de manera que los componentes aparecen en la imagen con diferentes tonos dentro de una escala de grises. Cuando se trata del cuerpo humano, los distintos tejidos que se muestran en la radiografía experimentan los mismos efectos, siendo posible obtener imágenes nítidas de los huesos, por ejemplo.





otra forma de explicar el efecto fotoeléctrico que asumir que los fotones eran partículas que chocaban con la materia transmitiéndole su energía cinética hasta el punto de sacar a los electrones de su posición. Sin embargo, la realidad es que los fotones presentaban todas las características de una onda en los experimentos de doble rendija, por no hablar de su comportamiento durante la refracción y en otros fenómenos. ¿Cómo podía entonces un fotón comportarse a ratos como una partícula y a veces, como una onda?

## DISCUSIONES ENTRE FÍSICOS

Este embarazoso dilema hizo pensar a muchos físicos que la cuantización de la energía tal vez no fuese un fenómeno real, sino más bien un artificio matemático que funcionaba estupendamente en la práctica para resolver problemas, pero que no respondía a la auténtica naturaleza de las cosas. El propio Einstein, que tanto había contribuido al desarrollo de la teoría cuántica, mostraría a menudo sus dudas, como en aquella célebre frase de 1926 en la que se expresaba así: «...Una voz interior me dice que aún no es la buena. La teoría dice mucho, pero no nos aproxima realmente al secreto del “viejo” ...». Las discusiones entre los físicos subían de tono y estaban a la orden del día, hasta el punto de que llegaron a formarse facciones entre los que afirmaban que la cuantización era real y los que apostaban porque solamente era una forma conveniente de hacer los cálculos.

Es en este punto en el que el efecto Compton terminó por dar el espaldarazo definitivo a la nueva teoría. En efecto, el aumento de la longitud de onda que se producía al incrementarse el ángulo de salida de los rayos X—que no son más que una forma de radiación electromagnética de mucha mayor frecuencia que la luz visible— tras rebotar en el bloque de carbón era interpretable como la pérdida de energía de los fotones como consecuencia de su choque con los electrones de los átomos de carbono del grafito, exactamente como sucedía en el efecto fotoeléctrico. ¡La pérdida de energía observada se ajustaba perfectamente a la ecuación de Planck, en la que la frecuencia, que es el inverso de la longitud de onda, se multiplica por la constante que lleva el nombre del físico, dando como resultado

## SEGÚN COMPTON, CUANDO EN 1923 PRESENTÓ SUS RESULTADOS, «SE INICIÓ LA CONTROVERSIA CIENTÍFICA MÁS DISPUTADA» QUE HABÍA VISTO

la cuantización! Unos meses después de su descubrimiento, Compton publicó en la prestigiosa revista *Physical Review* los resultados de sus experimentos junto con sus conclusiones, en las que asumía que cada fotón dispersado interactuaba únicamente con un solo electrón.

### DUALIDAD ONDA CORPÚSCULO

Compton acababa de confirmar, de una forma casi definitiva, que la cuantización era un fenómeno real, pero su experimento también ponía de manifiesto otra cosa trascendente. El tipo de dispersión observado solo podía explicarse si fuesen partículas las que chocaban con los electrones, no habiendo forma de justificarlo como consecuencia de un fenómeno ondulatorio. Sus resultados causaron sensación. Como más tarde recordaría, «cuando presenté mis resultados en una reunión de la Sociedad Americana de Física en 1923, se inició la controversia científica más disputada que jamás haya conocido». Un año después, y tomando como base las evidencias aportadas por el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, el físico francés Louis de Broglie, que además de científico era el séptimo duque de Broglie y par de Francia, introducía en su tesis doctoral evidencias de que no solo la radiación electromagnética, sino también los mismísimos electrones, se comportaban a veces como partículas y a veces como ondas.

Desde entonces, esta sorprendente dualidad onda corpúsculo ha quedado establecida como una de las características fundamentales de la realidad cuántica, a pesar



La tecnología de computación cuántica aprovecha los principios de la mecánica cuántica para procesar información de manera más eficiente y realizar cálculos complejos a mayor velocidad.

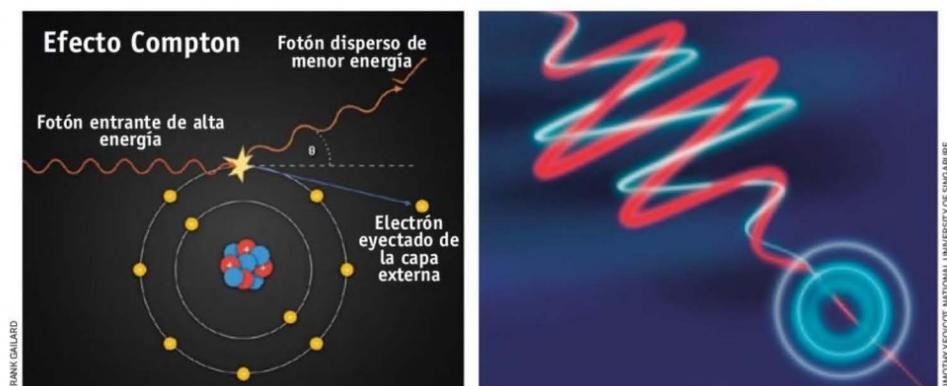
## Arthur Compton y el libre albedrío

Compton no solo era religioso, sino que estaba muy interesado por la filosofía. En su tiempo, fue uno de los primeros científicos que propuso un modelo del libre albedrío en dos etapas, una idea a la que se adherirían también filósofos como Karl Popper. En 1931, sugirió la idea de que la libertad de decisión humana está basada en la indeterminación cuántica. Cuando una persona elige ejecutar una acción, introduce, en sus propias palabras, «un factor no suministrado por las condiciones físicas» que determina lo que va a ocurrir. Los demás solo ven las leyes físicas actuando, pero el protagonista de la decisión siente que la ha tomado libremente.

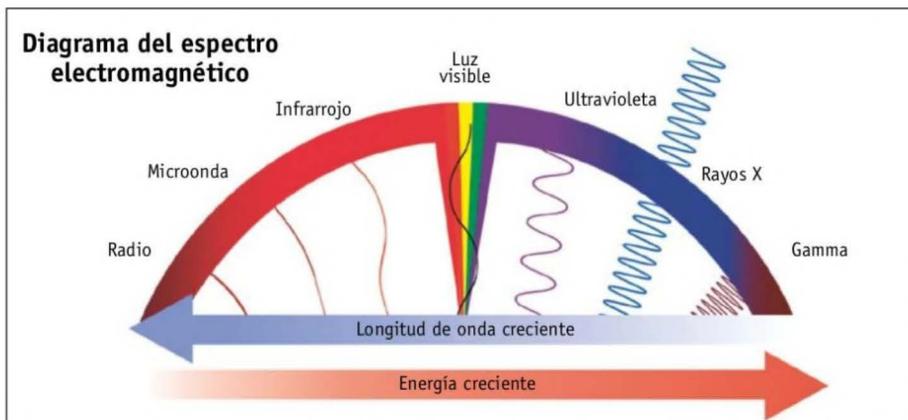
de lo extraña que pueda resultar. La luz es energía pura, por lo que intuitivamente parece que podemos aceptar que haga cosas raras, pero la idea de que un pedazo de materia, aunque sea muy pequeño, pueda comportarse como una onda según las circunstancias entra en conflicto con nuestra imagen de la realidad. Sin embargo, es exactamente lo que hacen todas las partículas materiales, tal y como ha sido comprobado en incontables ocasiones en experimentos como el de la doble rendija, en los que siempre se observa el típico patrón de interferencia característico de las ondas, incluso cuando las partículas se lanzan de una en una. De hecho, los cuerpos compuestos por un enorme número de ellas, como nosotros, también llevan asociada una onda, solo que de una magnitud tan insignificante en relación a su tamaño que los objetos macroscópicos se comportan simplemente como eso, objetos.

### LA PRIMERA REACCIÓN EN CADENA SOSTENIDA

Como es natural, los trabajos de Compton fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 1927, igual que los de Broglie lo fueron en 1929. Convertido en profesor de dicha disciplina en la Universidad de Chicago, Arthur Compton tuvo después una destacada actuación como miembro del Proyecto Manhattan —la investigación que desarrolló las primeras bombas atómicas— dirigiendo el laborato-



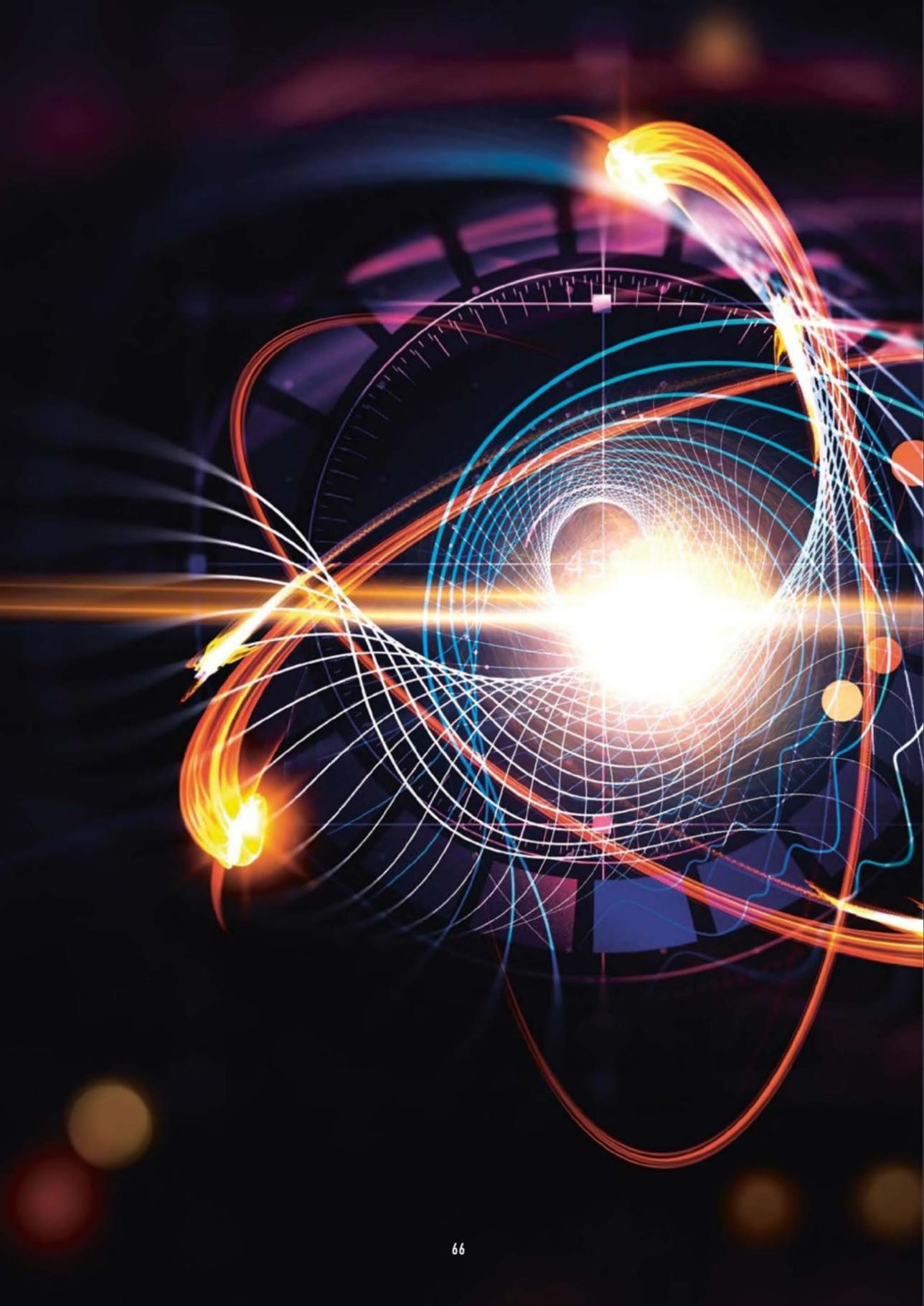
Sobre estas líneas, a la izquierda, infografía que recrea cómo un rayo X golpea un electrón que es eyectado del átomo; a la derecha, representación de la dualidad onda-partícula.



rio metalúrgico de la Universidad de Chicago, así como supervisando la construcción, por parte de Enrico Fermi, del célebre Chicago Pile-1, el reactor nuclear en el que tuvo lugar la primera reacción en cadena sostenida de la historia. Para un hombre de profundas convicciones religiosas como era, no debió resultarle fácil a Compton participar en el panel que recomendó la utilización de las bombas atómicas contra Japón. Entre 1945 y 1953, fue rector de la Universidad de Washington, terminando sus días como uno de los físicos más reconocidos del siglo xx, y ello a pesar de ciertas críticas tardías acerca de su postura frente al racismo.

Pero, volviendo al efecto Compton, ¿tuvo alguna utilidad práctica más allá de su extraordinario valor como evidencia de que tanto la cuantización como la dualidad onda corpúsculo son reales? Desde luego que sí. Cuando los fotones interactúan con la materia, el que se generen fenómenos como el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton, la producción de pares (formación de un electrón y un positrón) o la fotodesintegración depende de la energía de la radiación incidente. Así, la luz visible, de relativamente baja energía, provoca el efecto fotoeléctrico al ser absorbida del todo y expulsar un electrón, pero los rayos X y los rayos gamma de alta energía interactúan con los átomos de los seres vivos fundamentalmente a través de la dispersión Compton y, por tanto, son de importancia primordial en radiología y radioterapia. La tomografía por emisión de positrones (PET), por ejemplo, es una técnica en la que parte de la radiación gamma que se desprende de la aniquilación de los positrones con la materia interacciona con los tejidos orgánicos mediante la dispersión Compton. Determinadas formas de este fenómeno son también de gran utilidad en estudios sobre magnetismo, física nuclear y fenómenos cuánticos, además de en astrofísica, donde se emplea la astronomía de rayos X.

Sin embargo, ninguna de las aplicaciones que el efecto Compton nos ha traído para mejorar nuestra salud y para escudriñar el universo puede compararse con el impacto que ha tenido en la historia de la ciencia, y más en concreto en nuestra comprensión de la verdadera naturaleza de la realidad a nivel atómico y subatómico. No en vano se trata de uno de los fenómenos fundamentales que ponen en evidencia la existencia de la cuantización de la energía y de la dualidad onda corpúsculo, dos de los pilares de la teoría más extraña, más fascinante y de mayor éxito de toda la historia de la humanidad. ■



La aplicación de la mecánica cuántica a la química dio lugar a la química cuántica, la cual permite una interpretación cuantitativa del enlace químico.

SHUTTERSTOCK



# Una química muy cuántica

POR ÁNGEL MORALES GARCÍA, FRANCESC VIÑES, FRANCESC ILLAS  
Departament de Ciència de Materials i Química Física & Institut de Química Teòrica  
Computacional (IQTCUB), Universitat de Barcelona

Los átomos de los elementos químicos de la tabla periódica son las piezas fundamentales de la química. Estos se agrupan en moléculas tan simples como el oxígeno que respiramos, compuesto de solo dos átomos, o el ADN que nos define, compuesto de miles. Átomos y moléculas tienen un tamaño tan sumamente pequeño que las leyes de la mecánica clásica no pueden explicar su comportamiento en experimentos cuidadosamente planificados y es necesario recurrir a leyes de la teoría cuántica, leyes que han tenido y tienen un enorme impacto en la ciencia y la tecnología. Baste decir, por ejemplo, que sientan la base de toda electrónica. Para entender su impacto en la química describimos de manera cronológica sus hitos más relevantes, que nos conducirán a una perspectiva cuántica de la misma.

Este viaje temporal comienza con la figura de Ernest Rutherford (premio Nobel de Química, 1908) y sus experimentos que mostraron, por primera vez, la existencia de átomos compuestos de cargas eléctricas positivas y negativas moviéndose en un espacio prácticamente vacío. Para entender el resultado de sus experimentos, Rutherford sugirió un modelo atómico similar a nuestro sistema solar. El Sol sería el pesado núcleo atómico formado por protones (cargas positivas), mientras que los planetas serían los ligeros electrones (cargas negativas) que orbitaban alrededor del núcleo. Inicialmente, Rutherford no consideró la complicada estructura del núcleo atómico, materia de la que se ocupa la física nuclear. En el modelo de Rutherford, los electrones se mueven a gran velocidad alrededor del núcleo siguiendo órbitas circulares. Sin embargo, el mismo Rutherford fue consciente de la debilidad de su modelo, ya que las ecuaciones de Maxwell de la electrodinámica clásica predecían, sin duda alguna, que una carga acelerada pierde energía en forma de radiación electromagnética, por lo que los electrones deberían perder energía, indefectiblemente precipitándose al núcleo, un fenómeno que no sucede.

**Modelo atómico de Rutherford**

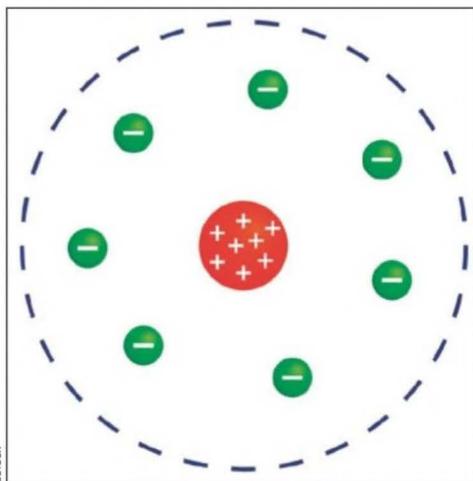
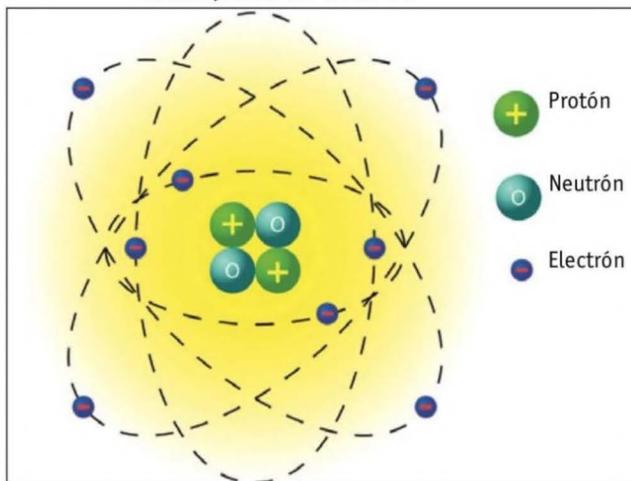
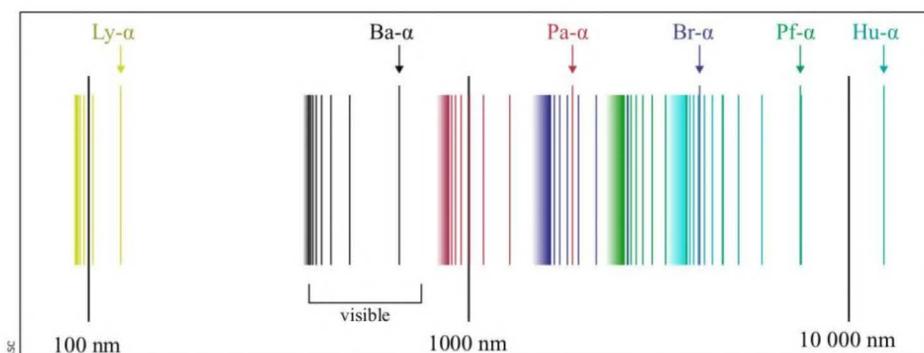


Diagrama básico del modelo de Rutherford: el núcleo (rojo) y el espacio restante del átomo, ocupado por electrones (verde).

**Modelo planetario del átomo**



Para entender el resultado de sus experimentos, Rutherford sugirió un modelo atómico similar a nuestro sistema solar.



Líneas espectrales de hidrógeno, divididas en series. Mostrado en escala logarítmica.

Basándose en la hipótesis de Max Planck (premio Nobel de Física 1918), que establecía que los cambios de energía en sistemas muy pequeños no son continuos, sino a saltos (los llamados cuantos, múltiplos de la constante de Planck), Niels Henrik David Bohr (premio Nobel de Física en 1922) sugirió que, puesto que los átomos son estables, los electrones orbitaban alrededor del núcleo, pero solo en ciertas órbitas permitidas, y que el cambio de una órbita a otra implicaba un cambio de energía en cuantos; como si los planetas del sistema solar pudieran intercambiar sus órbitas planetarias al absorber o emitir ciertas cantidades de energía. Bohr aplicó su modelo al átomo más simple, el de hidrógeno, compuesto de un solo protón y electrón, pudiendo explicar de manera cuantitativa el llamado espectro del hidrógeno, el conjunto de líneas que se obtienen al irradiar una muestra de hidrógeno atómico con luz y observar la luz emitida después.

La contribución de Bohr no finalizó con su modelo atómico. Junto a Werner Heisenberg (premio Nobel de Física en 1932), Erwin Schrödinger (premio Nobel de Física en 1933), y una larga lista de otros científicos premiados, contribuyó a la conocida interpretación de Copenhague que explica, rigurosa y cuantitativamente, el comportamiento de átomos y moléculas. En esta nueva teoría cuántica, plenamente vigente, existen ideas que chocan con el sentido común. Por ejemplo, afirma que es imposible conocer (medir) con exactitud algunas propiedades como son la posición y el momento de un electrón y también que un objeto cuántico puede no tener un estado definido hasta que se mide, lo cual implica que el acto de medir afecta al sistema, lo que a su vez abre cuestiones filosóficas como: ¿Qué es medir?, o ¿hace falta un ser inteligente para medir? Una paradoja famosa es la del gato de Schrödinger. Sin embargo, Born y Heisenberg sostenían que la mecánica cuántica solo describe la naturaleza tal y como se observa, no cómo funciona realmente.

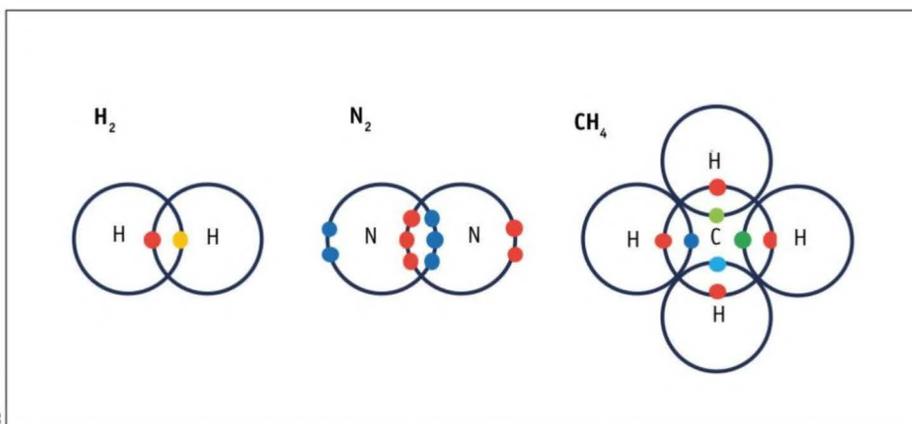
**BOHR EXPLICÓ DE MANERA CUANTITATIVA EL ESPECTRO DEL HIDRÓGENO: LAS LÍNEAS QUE SE OBTIENEN AL IRRADIAR HIDRÓGENO ATÓMICO CON LUZ Y OBSERVAR LA LUZ EMITIDA DESPUÉS**

## GATO DE SCHRÖDINGER

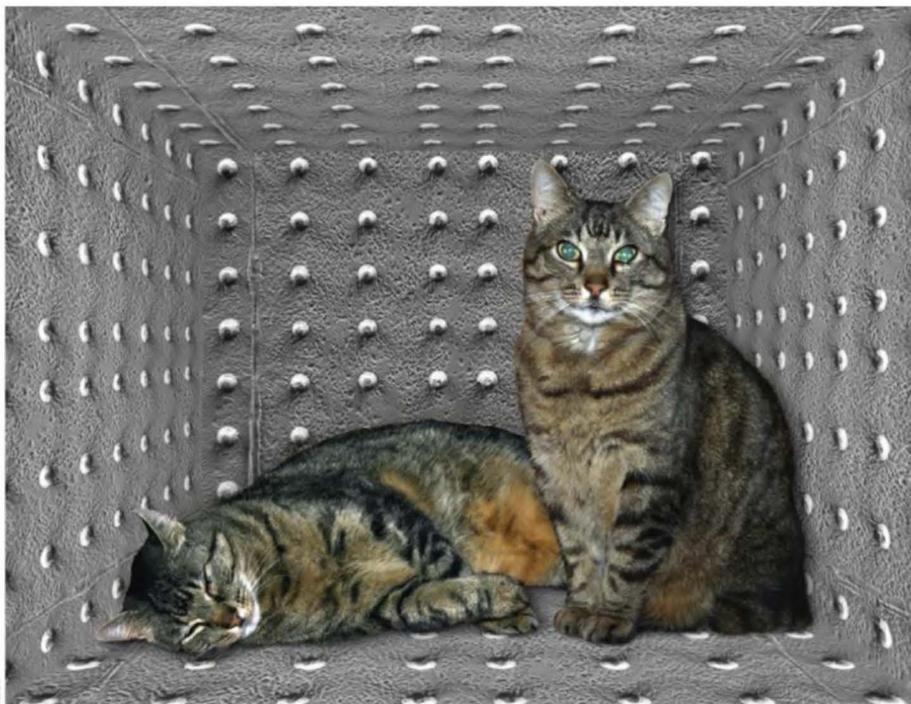
Uno de los experimentos mentales más famosos es el gato de Schrödinger, que ayuda a interiorizar la idea de la superposición de estados. Una versión adaptada podría ser la siguiente: imaginemos que hay un gato encerrado en una caja donde también hay un frasco con una sustancia radioactiva, con un 50 % de probabilidad de desintegrarse en media hora. Si lo hace, el frasco, que contiene una sustancia mortal, se rompe. Al estar la caja cerrada, al cabo de media hora no sabemos si la desintegración se ha producido y, por tanto, si el gato está vivo o muerto. No lo hemos comprobado, o medido. Es en el preciso momento de la apertura de la caja cuando observamos al gato y su posible estado colapsa a un estado definido (vivo o muerto). Pero hasta que esto ocurra, según la interpretación de Copenhague, el gato está en un estado de superposición de vivo y muerto a la vez. Pero que el lector no se escandalice ante dicha analogía, a todas luces escabrosa a día de hoy. Milton, el gato de Schrödinger en Oxford, no sufrió ningún percance ni su vida estuvo en peligro.

Aparte de muchos otros logros, la mecánica cuántica describe elegantemente la interacción entre varios átomos; en otras palabras, el enlace químico. ¿Por qué se forma un enlace químico entre átomos de un mismo elemento o entre átomos con electronegatividad –tendencia a atraer electrones– parecida? El primer modelo que explica el enlace químico es el de Lewis (1916), que propone que los átomos pueden compartir electrones de manera que puedan completar los que les corresponde para llegar a completar una capa atómica, dos en el caso del hidrógeno, pero ocho en átomos del primer periodo de la tabla periódica. Los electrones se distribuyen en pares, de enlace o libres. Sirva como ejemplo la ilustración de las moléculas de  $H_2$ ,  $N_2$  y  $CH_4$  mostrada en la figura de abajo.

El modelo cualitativo de Lewis permite entender el enlace químico a grandes rasgos, pero presenta excepciones y no hace predicciones cuantitativas acerca de su magnitud o de la geometría espacial de los átomos en las moléculas. Para llegar a una descripción cuantitativa es menester resolver la ecuación de Schrödinger,



Moléculas de  $H_2$ ,  $N_2$  y  $CH_4$  que ilustran los pares de enlace y pares libres. Los círculos indican que cada H tiene en promedio dos electrones, mientras que cada N o el C tiene ocho, completando en cada caso la capa de valencia y adquiriendo una configuración electrónica de gas noble.

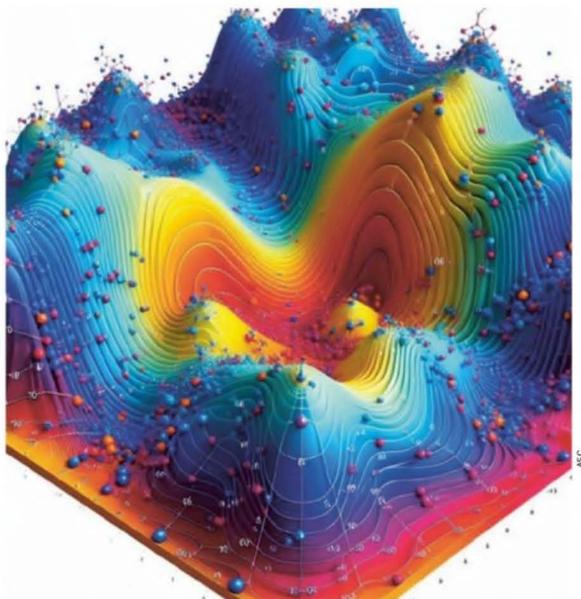


El famoso gato de Schrödinger es un experimento mental, descrito también como paradoja, que ayuda a interiorizar la idea de la superposición de estados.

propia de cada sistema y que tiene en cuenta la energía cinética de núcleos y electrones, así como las interacciones atractivas o repulsivas entre ellos debido a sus cargas. Las matemáticas de la mecánica cuántica demuestran que la ecuación de Schrödinger siempre tiene solución, la llamada función de onda, que contiene toda la información sobre las propiedades del sistema cuántico objeto de estudio.

## EL GRAN DESAFÍO: HALLAR SOLUCIONES APROXIMADAS

Si bien se puede afirmar de manera rigurosa que la ecuación de Schrödinger tiene solución, encontrarla supone un desafío enorme y solo es posible determinar soluciones suficientemente aproximadas como para explicar cuantitativamente la estructura, estabilidad y reactividad química de las moléculas. El objetivo de la química cuántica es precisamente desarrollar métodos que permitan encontrar estas soluciones aproximadas, ardua tarea en la que el desarrollo de los modernos ordenadores y superordenadores ha sido decisivo. De todas maneras, la ecuación de Schrödinger resulta demasiado complicada incluso para ordenadores con miles de procesadores trabajando en paralelo. En este punto cabe destacar la contribución de Born y Oppenheimer, quienes argumentaron que, debido a que los núcleos son al menos 1800 veces más pesados que los electrones, se puede resolver la ecuación de Schrödinger en dos etapas. En la primera, se considera que los núcleos están quietos, y se obtiene la energía (aproximada) de los electrones, y se demues-



Sobre estas líneas, analogía entre la orografía de un sistema montañoso y la superficie de energía potencial. Figuras generadas con el diseñador de inteligencia artificial de Microsoft.

tra que esta define el potencial en el que se mueven los núcleos, mientras que en la segunda se resuelve el movimiento de los núcleos. Este proceso a dos tiempos permite determinar la estructura de las moléculas en el espacio. Sin embargo, el potencial en el que se mueven los núcleos de una molécula de  $N$  átomos implica, en general,  $3N-6$  dimensiones, y no se puede visualizar. En ocasiones se puede representar secciones bidimensionales de esta superficie que indican puntos donde la energía es mínima, correspondientes a especies estables, y con caminos definidos de mínima energía que conectan dichos mínimos. Es como un mapa topográfico de montaña que indica el camino más fácil para pasar de un valle a otro, como en la imagen que se muestra arriba.

La aplicación de la mecánica cuántica a la química dio lugar a la disciplina que se conoce como química cuántica, la cual permite una interpretación cuantitativa del enlace químico. Las primeras aplicaciones permitían obtener tan solo resultados muy aproximados como los obtenidos por Walter Heitler y Fritz London, cuyo modelo es el embrión de la teoría del enlace de valencia desarrollada posteriormente por Linus Pauling (premio Nobel de Química 1954) y más tarde por Friedrich Hund, que desarrolló las primeras ideas de lo que se conoce como teoría de los orbitales moleculares, posteriormente sistematizados por Robert Mulliken (premio Nobel de Química 1966). En el límite ambas teorías coinciden, y, en el fondo, ambas consideran a la función de onda exacta de  $n$  electrones como una función expresable como una combinación de otras funciones que describen los electrones en orbitales atómicos, combinables para representar orbitales moleculares.

Para el estado de energía más bajo, o más estable, existe una forma particular de disponer los electrones en los orbitales moleculares que domina el sistema.

# LA QUÍMICA CUÁNTICA HA PERMITIDO DESARROLLAR ALGORITMOS PARA PREDECIR LAS PROPIEDADES ATÓMICAS Y MOLECULARES

Usando estas ideas, Hückel utilizó un método aproximado combinando de manera lineal orbitales atómicos que permitió entender la aromaticidad del benceno. El desarrollo de la tecnología computacional fue clave para que los diferentes métodos de cálculos comenzaran a asentarse como una nueva disciplina; la química computacional, no en vano en la conferencia de aceptación del premio Nobel de Química, Mulliken afirmó que veía el día en que cada vez más químicos usarían la computación en lugar de ir al laboratorio para obtener información relevante de la estructura y reactividad de las moléculas. En este camino, un punto crucial fue la publicación de los teoremas de Hohenberg y Kohn en 1964, en los que se demuestra que la energía exacta del estado más estable de un sistema químico depende solo de la densidad electrónica del estado fundamental, una función tan solo tres coordenadas espaciales, en vez de  $3n$  como la función de onda de un sistema de  $n$  electrones. La densidad electrónica se puede obtener de la función de onda, pero obviamente, esto no supone ninguna ventaja. El segundo de los teoremas indica que, de todas las densidades posibles, la que da la energía más baja (no se sabe exactamente cómo hacerlo) es también la densidad exacta y la energía es la exacta. Esto abrió las puertas a intentar obtener la energía a partir de una densidad aproximada y constituye lo que se denomina teoría del funcional de la densidad —density functional theory o DFT de sus siglas en inglés—.

## LA CONSOLIDACIÓN DE LA QUÍMICA CUÁNTICA Y COMPUTACIONAL

Todo este desarrollo de la química cuántica junto al desarrollo tecnológico de los ordenadores ha permitido a químicos, físicos y matemáticos desarrollar algoritmos y programas con el fin de predecir las propiedades atómicas, moleculares y encontrar caminos que llevan a las reacciones químicas. Estos avances fueron una vez más reconocidos con el premio Nobel de Química de 1998 a Walter Kohn y John Pople por el desarrollo del DFT y por el desarrollo de métodos computacionales en química cuántica, respectivamente. Hoy en día, los estudios computacionales ayudan a encontrar el punto de inicio de una síntesis de laboratorio o ayudar a racionalizar resultados experimentales. La consolidación de la química cuántica y computacional permite encontrar y diseñar nuevas entidades químicas, identificar correlaciones entre estructura química y propiedades generando entidades químicas de valor añadido y contribuye de manera importante al diseño moléculas con funcionalidades específicas en la industria farmacéutica.

Antes de finalizar y volviendo al principio de superposición, recuerde el lector el gato de Schrödinger, la mecánica cuántica abre las puertas a una computación diferente a la tradicional. La computación cuántica permitirá realizar multitud de operaciones simultáneamente a una velocidad que superará los límites actuales permitiendo el estudio de sistemas químicos más complejos. ■



La dualidad onda-corpúsculo es una característica de los sistemas cuánticos que se manifiesta cuando observamos el cosmos a escalas muy pequeñas. Debido a este fenómeno, las partículas fundamentales que forman nuestro universo pueden comportarse como ondas y exhibir propiedades ondulatorias como la interferencia cuántica. A su vez, objetos que percibimos como ondas en ciertos experimentos pueden comportarse como partículas en otros

# Interferencia cuántica

UNA ESPADA DE POSIBILIDADES

POR JARA JUANA BERMEJO VEGA  
Investigadora en Computación Cuántica española

A tardecer de verano. Estoy tumbada en el césped junto al Olympiasee, el lago del parque olímpico de Múnich. Vengo aquí a menudo desde que me mudé a esta ciudad a hacer mi doctorado en computación cuántica. Me resulta fácil evadirme en la solemnidad del parque donde juegan las familias y se celebran festivales, pero es también un cementerio de colinas construidas sobre escombros de la Segunda Guerra Mundial.

Escucho de fondo *Imaginations from the Other Side*, de Blind Guardian (un disco de *power speed metal*) mientras termino la lectura de una novela de ficción rara: *La Cicatriz*, de China Miéville. Ando absorta en la lectura de un pasaje que describe un objeto mágico: la Espada Posible. El misterioso artefacto, según el libro, funciona como una máquina de posibilidad. Al empuñarla, una maestra espadachina puede extraer posibilidades de ataque; cada ataque produce «múltiples desenlaces», «fantasmas de la misma espada». Algunos golpes muy probables son casi reales; otros, casi milagros. Todas las incontables cuasiespadas posibles existen al mismo tiempo y golpean a la vez.

Me fascina la descripción de la espada por la fuerza de su poesía. Además, su mecanismo, aunque suene esotérico, me evoca el tema de mi tesis. La computación cuántica estudia cómo realizar cálculos por ordenador más rápido usando fenómenos microscópicos. Para mí, la Espada Posible es eso: un gran interferómetro cuántico; un dispositivo que crea elegantes y mortíferos patrones de ataque usando la interferencia cuántica.



Al empuñar la Espada una maestra espadachina puede extraer posibilidades de ataque; cada ataque produce «múltiples desenlaces». Algunos golpes muy probables son casi reales, otros, casi milagros. Todas las incontables cuasiespadas posibles existen al mismo tiempo y golpean a la vez.



SHUTTERSTOCK

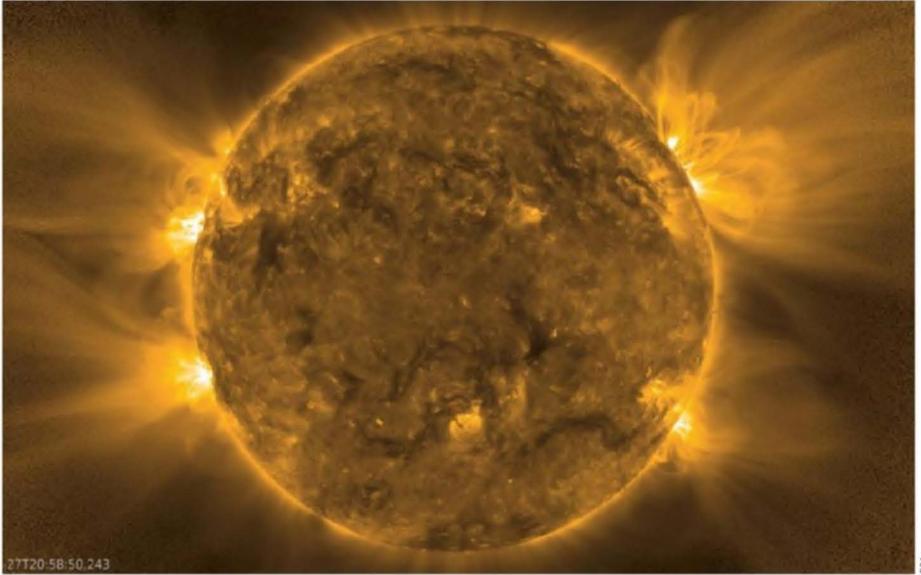
En un ordenador cuántico, los programas se ejecutan no solo como códigos, sino también como ondas (similares a las del agua) que pueden interferir creando patrones marcados por un programador.

Un ruido fuerte de explosión y chapoteo captura mi atención. Una niña ha lanzado dos guijarros al lago. Círculos concéntricos emergen en el agua donde las piedras han caído; chocan entre ellos creando bellos patrones de interferencia. «¡Eso es!», exclamo en voz alta. En mi cabeza salta la chispa de un pensamiento que crea una conexión. La Espada Posible es como las ondas del lago: la energía que le da su potencia es la interferencia cuántica, un fenómeno característico de los sistemas microscópicos. «La Espada Posible», pienso, «ejecuta movimientos como ondas que interfieren como las ondas de un lago, salvo que no son ondas de agua, sino de posibilidades: posibles caminos futuros, posibles maniobras de ataque y defensa».

## EL MISTERIO DE LOS NEUTRINOS

Como la Espada Posible, la interferencia cuántica es misteriosa. Durante cuarenta años confundió a científicos que trabajaban observando neutrinos procedentes del Sol. Los neutrinos son partículas elusivas, sin carga, difíciles de detectar. En los años 60 se diseñaron meticulosos experimentos para observarlos y poder estudiar la composición del núcleo solar. La sorpresa fue que, en todos los experimentos, faltaban entre la mitad y dos tercios de los neutrinos que esperaba encontrar y no se debía a errores de diseño o cálculo: los neutrinos se esfumaban como partículas fantasma.

La ausencia de estos neutrinos se explicó en el siglo XXI gracias a la interferencia cuántica. Debido a una propiedad fundamental de la física cuántica, la dualidad onda-corpúsculo, los neutrinos, a pesar de ser partículas, cuando viajan se propagan como ondas. Al observarlos, medimos su tipo corpuscular, llamado «sabor»:



Sobre estas líneas, imagen del Sol tomada por la nave espacial Solar Orbiter el 26 de marzo de 2022. La nave espacial voló más cerca del Sol que el planeta más cercano, Mercurio.

electrónico, muónico o tauónico. Cuando viaja por el vacío, los neutrinos se comportan como una superposición de «ondas de masa», cada una con una frecuencia diferente. Al propagarse estas ondas adquieren un desfase (un adelanto o retraso) según su frecuencia. Los desfases crean interferencias, que pueden modificar el sabor del neutrino. La implicación sorprendente es que un científico terrestre que espera detectar un neutrino electrónico puede no detectarlo si este último transita a un estado muónico o tauónico.

## POMPAS DE JABÓN

Las oscilaciones de neutrinos pueden parecer mágicas pero son parecidas a otro fenómeno tan cotidiano que podría parecer ordinario si no fuera por su increíble belleza: la aparición de abanicos de colores en la superficie de una pompa de jabón. Estos arcoíris fugaces intrigaron en su día al mismísimo Newton. Nos acompañan a diario también desde vidrios o, como diría alguna amiga andaluza, desde cualquier lámina fina de buen aceite de oliva.

Estos colorines que deleitan los sentidos aparecen por la interferencia de ondas de luz reflejadas en el interior y exterior de estas esféricas láminas de agua: la luz que llega a nuestros ojos después de ser reflejada en el interior de la pompa presenta un desfase respecto a la luz reflejada en el exterior. El desfase crea interferencias constructivas y destructivas, filtrando el color de la onda que nos llega desde cada ángulo. Las pompas de jabón son parecidas al famoso experimento de la doble rendija, que permite mostrar la dualidad onda-corpúsculo de la materia. En este experimento, un haz de partículas microscópicas (por ejemplo, fotones, electrones, en diferentes variaciones) se proyecta sobre una pared con dos rendi-

# LOS NEUTRINOS SE COMPORTAN COMO UNA SUPERPOSICIÓN DE «ONDAS DE MASA»

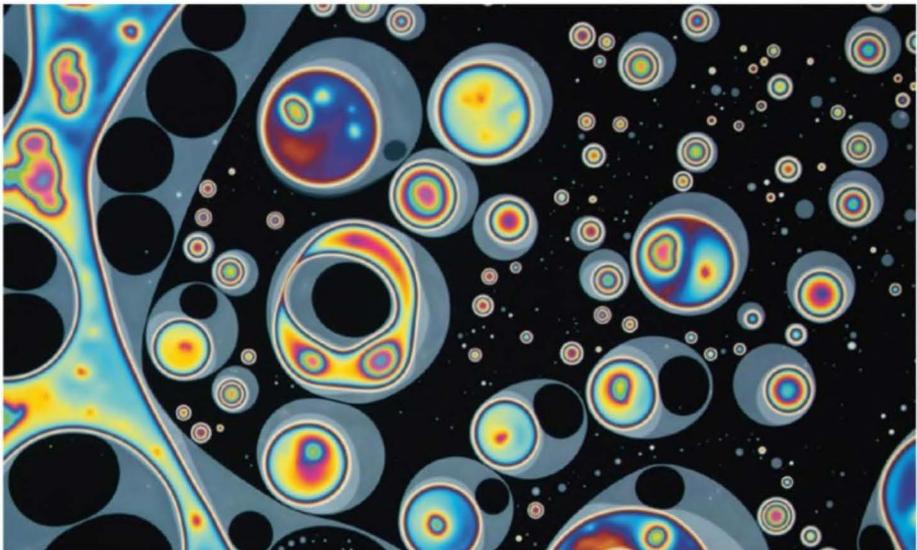
jas. Detrás de esta pared se coloca un detector para observar qué partículas la cruzan por alguna de las dos ranuras. Cuando ambas están abiertas, un extraño patrón se genera en la pared mostrando interferencias constructivas y destructivas entre los dos haces: la forma de este patrón solo puede explicarse si las partículas cuánticas se comportan como las ondas que aparecen en las aguas del Olymپیasee.

Los neutrinos son como pompas de jabón. Sus sabores son los colores que vemos en la superficie de la pompa. Sus oscilaciones son las interferencias que crean sus coloridos vórtices.

## ÁBACOS CUÁNTICOS

Me fascina la Espada Posible porque su mecanismo es similar a un ordenador cuántico. Ambos son artefactos de gran potencia que fabrican posibilidades si son esgrimidos por una espadachina de igual pericia. Un ordenador cuántico usa la interferencia cuántica para hacer cálculos más veloces. En esta aceleración intervienen tanto el *hardware* como el *software*.

A menudo se enseña de forma incorrecta que un ordenador cuántico puede ejecutar muchísimos programas en paralelo (una cantidad exponencial) para buscar soluciones a problemas más rápido. Esto es una doble misconcepción. Por un lado, los ordenadores cuánticos, hasta donde sabe la ciencia, no ofrecen ventajas desorbitadas para buscar soluciones a problemas sin estructuras. Por otro

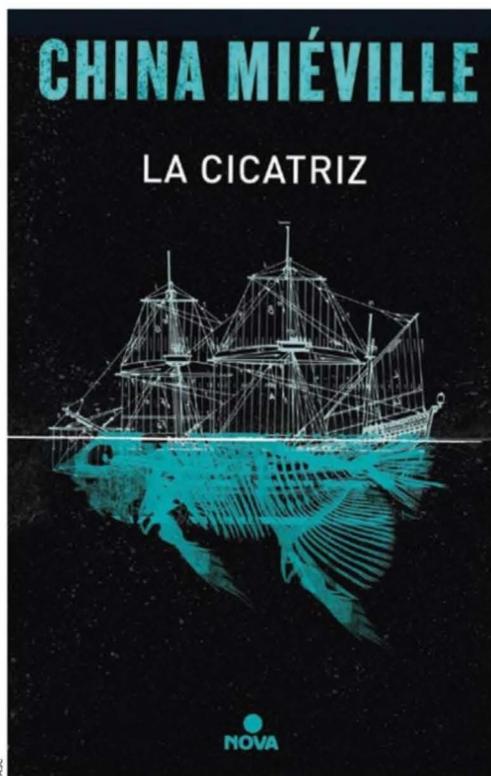


Primer plano de la superficie de una pompa de jabón. La imagen revela «islas de lípidos» de jabón flotando sobre una película muy fina de agua (*Lipid Islands on Soap Bubble*. Wikipedia).

## Una espada de golpes posibles. Una Posible Espada

A continuación reproducimos un fragmento de la novela *La cicatriz*, de China Miéville (traducción de Manuel Mata Álvarez-Santullano) de La Factoría de Ideas (2002), en el que se describe con detalle la Espada de las Posibilidades.

«Esta... —volvió a señalar su espada— es una espada de golpes posibles. Una



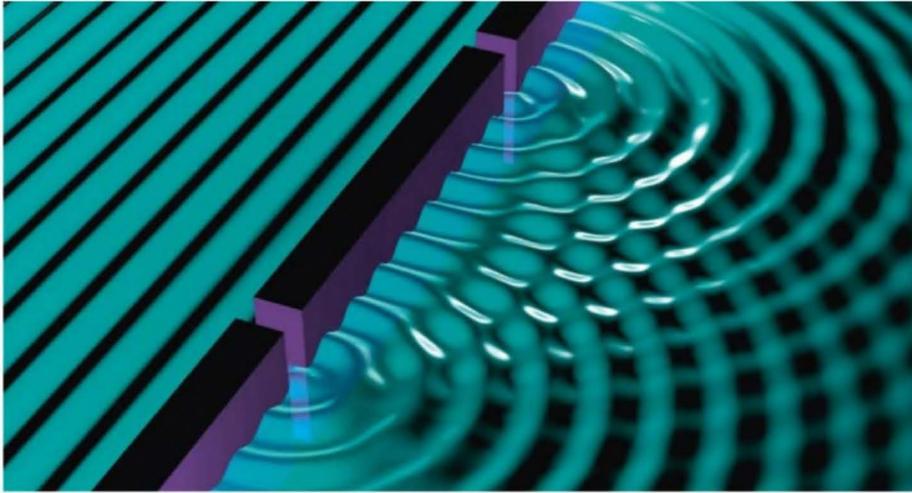
Portada libro *La cicatriz*. Segundo volumen de la trilogía Bas-Lag donde el autor, China Miéville, definió los límites de la fantasía contemporánea.

Posible Espada. Es un conductor para una forma muy rara de energía. Es un nodo en un circuito, una máquina de posibilidad. Esto... —le dio unas palmaditas al fino cinturón que llevaba alrededor de la cintura— es el dispositivo de potencia: un motor de relojería. Estos —los cables unidos a su armadura— conducen la potencia. Y la espada completa el circuito. Cuando la empuño, el motor está entero. Si el mecanismo de potencia está conectado, mi brazo y la espada empiezan a extraer las posibilidades. Por cada ataque que llevo a cabo existen miles de posibles desenlaces, fantasmas de la misma espada y todos ellos golpean al mismo tiempo.

—Doul envainó la espada y alzó la mirada hacia el negro dosel de las copas de los árboles—.

Algunos de los más probables son casi casi reales. Otros son poco más que milagros y su poder de cortar es... débil. Existen incontables casiespadas, de todas las posibilidades y todas ellas golpean a la vez. No existe forma de lucha que

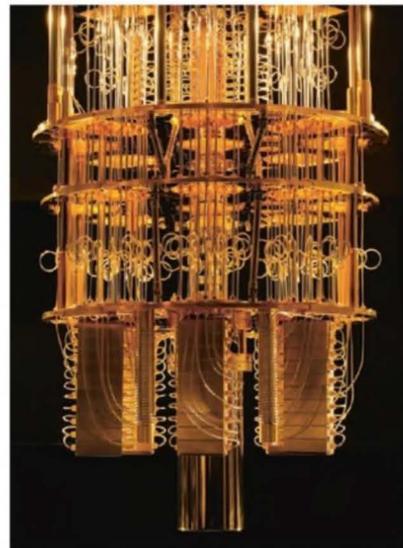
yo no haya estudiado. Sé manejar la mayoría de las armas que he visto en mi vida y puedo luchar también sin ellas. Pero lo que la mayoría de la gente no sabe es que con esta espada he aprendido a luchar dos veces. He dominado dos clases de técnicas. Este motor... no es muy sólido. Y además no se le puede volver a dar cuerda. La cosa no es tan sencilla. De modo que tengo que administrar con mucho cuidado los pocos segundos con que cuento. Cuando lucho, raramente recorro a la Posible Espada. En general, la utilizo como si fuera un arma normal, puramente factual: una hoja dura como el diamante y con los bordes más afilados que el metal mejor forjado. Y la utilizo con precisión. Cada golpe que realizo es exacto y golpea allí donde yo deseo que golpee. Para ello me he entrenado durante tantos años».



El famoso experimento de la doble rendija permite mostrar la dualidad onda-corpúsculo de la materia. Es la demostración de que la luz y la materia pueden mostrar características tanto de ondas como de partículas definidas clásicamente.

lado, la interferencia cuántica, que no se puede entender como un paralelismo, tiene un rol clave en la velocidad de sus cálculos. En un ordenador cuántico, los programas se ejecutan no solo como códigos, sino también como ondas. Como los neutrinos, las ondas que transportan estos programas pueden interferir creando patrones marcados por un programador. Una informática cuántica hábil teje esos patrones para generar interferencias constructivas que amplifiquen los procesos computacionales más útiles. Como una Espada Posible.

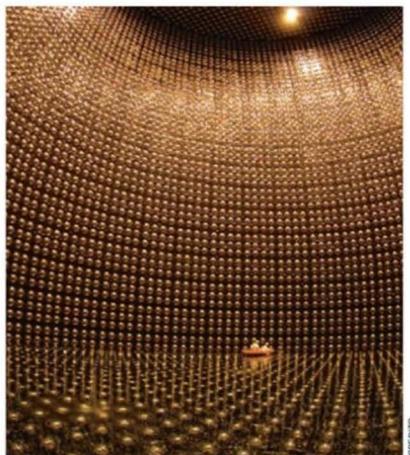
Los ordenadores cuánticos no tienen poder ilimitado: no pueden, por ejemplo, hacer búsquedas instantáneas en cualquier base de datos. Sin embargo, al igual que las pompas de jabón, forman patrones geométricos destacando ciertos colores, los ordenadores cuánticos pueden ofrecer ventajas computacionales para encontrar soluciones a problemas con cierta estructura. Una aplicación revolucionaria de los ordenadores cuánticos es usar de forma ingeniosa y sutil la interferencia constructiva para revelar ciertas simetrías, como periodos ocultos, en conjuntos de datos (secuencias que se repiten). Esta utilidad permite resolver puzles de álgebra que son esenciales en criptografía para garantizar



En la imagen, un criostato IBM Q utilizado para mantener a temperatura fría los ordenadores cuánticos de 50 qubits en los laboratorios de la compañía en Yorktown Heights.

## Neutrinos solares

Se conoce como el «problema de los neutrinos solares» a una discrepancia en el número de neutrinos solares provenientes del Sol y medidos en la Tierra. Observada por primera vez a mediados de 1960, no se resolvió hasta los años 2000. De los tres tipos (sabores) de neutrinos que existen, el Sol solo produce neutrinos electrónicos. En varios experimentos independientes faltaban entre la mitad y dos tercios de estos neutrinos. Esta discrepancia condujo a los científicos que trabajaban en este problema a descubrir que los neutrinos, a pesar de ser partículas muy ligeras, tienen masa. Además, viajan por el espacio como una superposición de ondas de diferente masa y energía. Estas ondas pueden interactuar mediante el fenómeno de la interferencia cuántica, mediante el cual un neutrino electrónico puro puede transformarse en un neutrino muónico o tauónico. Entre 2002 y 2015, varios experimentos confirmaron la naturaleza cambiante y fluida de los neutrinos. Su importancia fue reconocida por el premio Nobel de Física 2015 para Takaaki Kajita y Arthur B. McDonald.



Super-Kamiokande en Japón, observatorio de neutrinos.

la seguridad de nuestras telecomunicaciones en la vida cotidiana. Este potencial para resolver cálculos intensivos de manera eficiente hizo que la computación cuántica saltara a la fama en los años 90.

## CÁNONES ENIGMÁTICOS

Otra manera de entender la interferencia cuántica nos la ofrece la música mediante el estudio de los cánones: piezas musicales que contienen múltiples repeticiones o imitaciones de la misma voz separadas por un intervalo temporal (de nuevo, un desfase). Un misterioso tipo de cánon son los «cánones enigmáticos» contenidos en la *Ofrenda musical*, BWV 1079 de Johann Sebastian Bach. Estas piezas musicales se nos ofrecen como puzles: son cánones incompletos donde faltan voces y para interpretarlos debemos encontrar una solución formada por voces coherentes. Una Espada Posible o un ordenador cuántico son artefactos pa-



El compositor alemán Johann Sebastian Bach retratado hacia el año 1725.



«Como oscilaciones de neutrinos, mi género es plural. No soy una única mujer, sino un colectivo de señoras: activista, científica, madre, bailarina, pintora...».

ISTOCK

ra la resolución de problemas similares a un cánón enigmático: ejecutan múltiples ondas (golpes, programas) como voces de una música coral que se componen, en armonía y desorden, buscando soluciones coherentes mediante la interferencia constructiva y destructiva.

## UNA BELLEZA TRASCENDENTAL EN LA INTERFERENCIA CUÁNTICA

Percibo en la interferencia cuántica una belleza trascendental que incluso me ayuda a mí misma a reconocermé y encontrarme con mi género. Como un fenómeno cuántico, para muchas personas no soy alguien fácil de entender: soy una mujer trans no binaria, *genderqueer* y género fluida. Como oscilaciones de neutrinos, mi género es plural. No soy una única mujer, sino un colectivo de señoras: una activista, una científica, una madre, una bailarina, una pintora, una urbanita, una extremeña de pueblo, y muchas más. Soy una Espada Posible; soy una y múltiple: una mujer que habita y concilia multiversos que viajan juntos como paquetes de onda.

Cuando hablo de esto muchas personas no me siguen o parecen confusas. Creo que muchas de esas personas me entenderían mejor si pudieran vivir como neutrinos, aunque fuese por un día.

Como en la dualidad onda-corpúsculo, encuentro en la interferencia cuántica una doble ironía. La ironía, por un lado, de que algunos físicos negacionistas del siglo pasado se escandalizaran por las extrañas implicaciones de la teoría cuántica; obviando, al mismo tiempo, maravillas comparables que habitan la realidad humana. La ironía, por otro lado, de que aún haya gente escéptica que se escandalice por la fluidez del género; la gente no es consciente de que cada segundo son atravesadas por trillones de neutrinos, partículas cuya fluidez de género está establecida como una propiedad física fundamental. ■





# A la caza de agujeros blancos

POR MIGUEL ÁNGEL SABADELL

Astrofísico

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

[x.com/byneontelegram](https://x.com/byneontelegram)

byneon  
Neon147

byneon  
Neon147

La idea de que los agujeros blancos son las imágenes especulares de los agujeros negros sugiere una interesante simetría en el universo. Mientras que los agujeros negros absorben toda la materia y la luz que cae en ellos, los agujeros blancos podrían ser vistos como su opuesto, expulsando materia y energía en lugar de tragarla.

SHUTTERSTOCK

**Y** si hubiera singularidades cósmicas que, en vez de devorar materia, la escupieran? ¿No sería acaso el Big Bang la madre de todos los agujeros blancos? ¿Podrían estos, en versión nanoscópica, originar la misteriosa materia oscura que conforma el 27 % del universo? Aunque hace ya más de cien años que se postuló su existencia teórica, los científicos no han conseguido todavía dar con ellos. Te contamos cómo se han buscado y cuáles son los últimos candidatos.

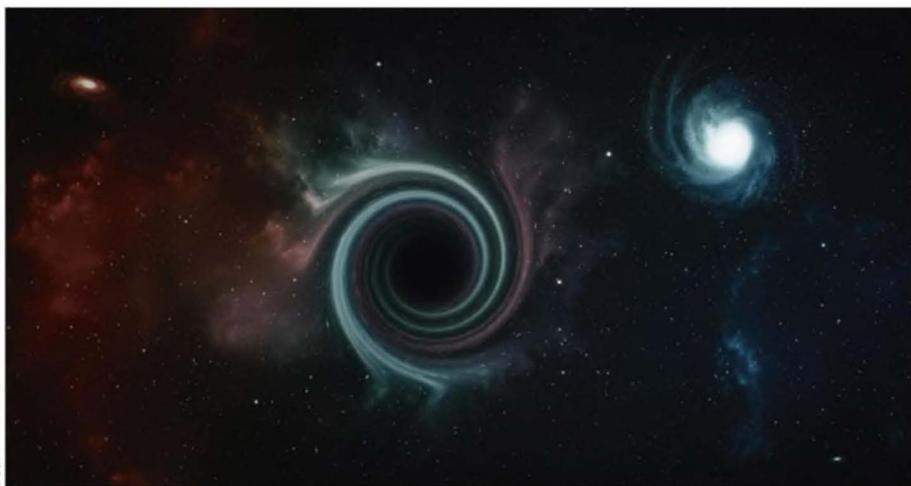
La idea de sacar algo de la nada es un efecto clásico de los ilusionistas. Estos muestran su sombrero vacío, meten la mano y extraen de allí un conejo, una paloma o un ramo de flores. Por muy habilidoso que sea el mago, por muy increíble que sea el efecto, todos sabemos que hay truco, pero no siempre es así. En el universo es posible que existan unas colosales chisteras mágicas de las que, muy de vez en cuando, parece como si surgiera materia y energía literalmente de la nada: estamos hablando de los agujeros blancos. «Si un agujero negro puede tragarse un Mercedes, el correspondiente blanco podría con toda certeza expulsar un coche idéntico», explica Paul Halpern, físico de la Universidad de las Ciencias en Filadelfia (EE. UU.) y autor del libro *The Cyclical Serpent. Prospects for an Ever-Repeating Universe* (1995). Aunque, por desgracia, lo que realmente devora el primero es luz y polvo interestelar, así que eso es lo que debemos esperar que regurgite su reverso luminoso.

El origen de este extraño fenómeno está en la teoría de formación de un agujero negro formulada por el científico alemán Karl Schwarzschild en 1916, mientras luchaba en el frente ruso durante la Primera Guerra Mundial. Porque por paradójico que pueda parecer, el primero en encontrar una solución a las ecuaciones de la



SHUTTERSTOCK

La inmensa mayoría del universo surgió a partir del Big Bang (momento recreado en la imagen de arriba), pero con el paso del tiempo han seguido apareciendo fragmentos de considerable tamaño provenientes de las regiones rezagadas del estallido primigenio.



ISTOCK

Si lanzamos un objeto al agujero negro jamás lo veremos atravesar el horizonte de sucesos, pues el tiempo se va ralentizando a medida que se acerca a él y tardaría una eternidad en alcanzarlo.

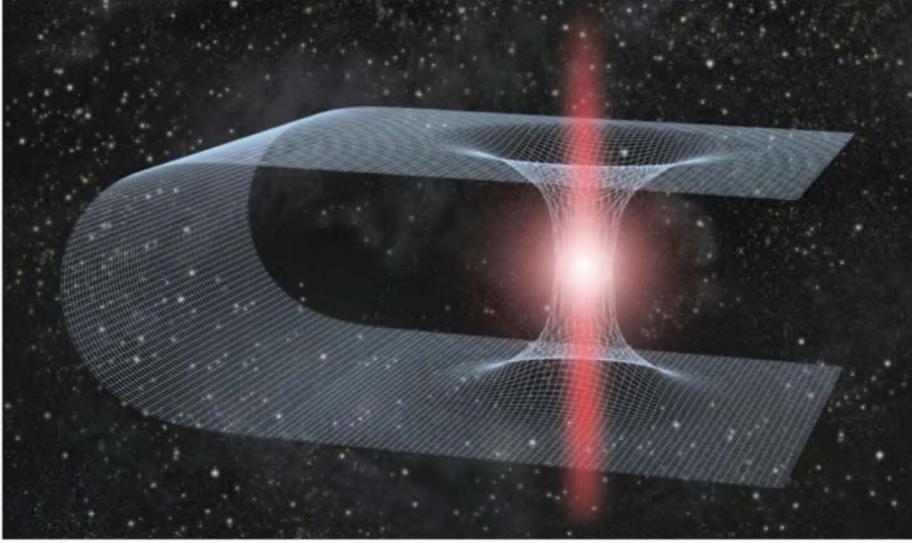
relatividad general —la teoría moderna que describe la gravedad— no fue su creador, Albert Einstein, sino este astrónomo seis años mayor, director del Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam, que murió de pénfigo ampolloso —una rara enfermedad de la piel— al poco de haber desarrollado el nuevo concepto. Su solución mostraba que una masa contenida en un punto no tiene exterior, pues provoca tal distorsión que el espacio se cierra en torno a ella y la aísla del resto del universo. Y esta escisión se produce a una distancia del punto central que solo depende de la masa concentrada allí, el llamado radio de Schwarzschild u horizonte de sucesos. Toda partícula que lo atraviesa jamás regresa.

## EL TIEMPO Y EL ESPACIO INTERCAMBIAN SUS PAPELES

Dicho así, queda bastante claro, pero a los físicos les costaba entender el significado físico de este límite: ¿se trata de una barrera tangible, real? Visto desde fuera, si lanzamos un objeto al agujero negro jamás lo veremos atravesar el horizonte de sucesos, pues el tiempo se va ralentizando a medida que se acerca a él y tardaría una eternidad en alcanzarlo. Sin embargo, desde el punto de vista del objeto no sucede nada extraordinario, ya que en cuestión de minutos atraviesa dicha frontera sin problemas; solo se dará cuenta de que lo ha hecho porque no puede salir.

Es más, al cruzar el horizonte, el tiempo y el espacio intercambian sus papeles: si en el exterior podemos movernos a cualquier lugar, pero siempre somos arrastra-

**HACE MÁS DE CIEN AÑOS QUE SE POSTULÓ SU  
EXISTENCIA TEÓRICA, PERO LOS CIENTÍFICOS  
NO HAN DADO CON LOS AGUJEROS BLANCOS**



Recreación de un agujero de gusano, estructura teórica de la física que conecta dos puntos distantes en el espacio-tiempo, permitiendo viajes rápidos entre ellos, como si fuera un atajo.

dos hacia adelante en el tiempo a una velocidad de sesenta segundos por minuto, en el interior nos desplazamos —dentro de ciertos límites— por el tiempo, aunque nos dirigiremos inexorablemente hacia la singularidad central.

Ahora bien, si se mira con cuidado la solución de Schwarzschild, descubrimos que... ¡no es una, sino dos! Las ecuaciones que describen el colapso definitivo de un cuerpo celeste en un agujero negro pueden leerse al revés, como una expansión hacia el exterior de un objeto a partir de una singularidad. O, lo que es lo mismo, un agujero blanco.

Tuvimos que esperar hasta mediados de la década de los cincuenta para que se desarrollara una forma de visualizar y comprender este galimatías. Fue Martin Kruskal, un especialista en física de plasma de la Universidad de Princeton (EE: UU.) —en aquella época muy interesado por la relatividad general—, quien dio con un sistema de coordenadas para describir la estructura de los agujeros negros mediante un solo modelo de ecuaciones, que unía el espacio-tiempo plano del exterior —y alejado del agujero— con el extremadamente curvo del interior. Lo más llamativo era que no había asomo de singularidad en el horizonte de Schwarzschild.

Kruskal tuvo la brillante idea de describir los fenómenos desde la perspectiva de un rayo de luz lanzado hacia un agujero negro, aunque nunca se tomó la molestia de publicarla. Solo John Archibald Wheeler, el físico teórico estadounidense que

## MARTIN KRUSKAL DIO CON UN SISTEMA DE COORDENADAS PARA DESCRIBIR LA ESTRUCTURA DE LOS AGUJEROS NEGROS

## Una idea rompedora

El concepto de agujero blanco nació prácticamente a la par que el de negro, cuando el científico alemán Karl Schwarzschild desarrolló en 1916 la teoría de la relatividad general y llegó a la conclusión de que ningún objeto podía escapar de una singularidad a partir de cierta distancia. Hipotéticamente, también sería posible el escenario opuesto: eventos que lanzan materia y energía como si surgieran de la nada.



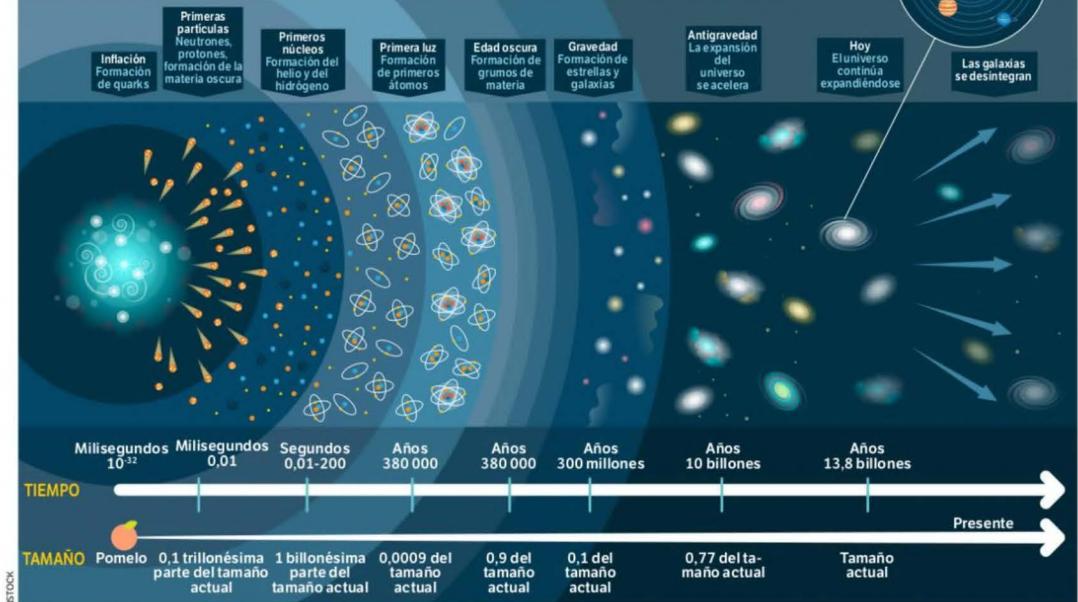
bautizó como tales a los agujeros negros, se dio cuenta de la importancia de este trabajo. Wheeler escribió un artículo con los cálculos, puso el nombre de Kruskal en él y lo publicó en 1960 en la revista *Physical Review*. Tiempo más tarde, el inglés Roger Penrose perfeccionó la representación de Kruskal y la convirtió en un diagrama. De este modo, todos están contentos: para los matemáticos, la clave de la comprensión de estos objetos es la métrica de Kruskal; y para los físicos, la idea esencial la proporciona la versión gráfica conocida como diagrama de Penrose.

¿Qué deducimos de todo ello? Que los agujeros blancos son las imágenes especulares de los agujeros negros. Si uno hace una cosa, el otro hace justo lo contrario e invertido en el tiempo. Así, mientras que el horizonte de sucesos de un agujero negro es un lugar del que no se puede salir, al antihorizonte de uno blanco no se puede entrar. Si el primero se traga todo, su hipotética contrapartida lo expulsa.



Los agujeros negros supermasivos tienen masas equivalentes a millones o incluso miles de millones de veces la masa del Sol.

# TEORÍA DEL BIG BANG



No hay que ser muy perspicaz para darse cuenta de que el Big Bang tiene mucha pinta de agujero blanco: toda la materia y energía que existe en la actualidad se creó en esa megaexplosión repentina. «Es extraordinario comprobar cuánto se parecería la película del gran estallido yendo hacia atrás al colapso gravitatorio instantáneo de una bola de fuego», dice Halpern. O a la inversa, si rebobináramos la película que muestra la destrucción de la energía cayendo en la singularidad central de un agujero negro, nos parecería estar asistiendo al momento en que nació el universo.

## LOS NÚCLEOS REZAGADOS DE NOVIKOV

En 1965, el soviético Igor Novikov y el israelí Yuval Ne'eman desarrollaron, de modo independiente, la primera teoría medianamente detallada sobre el origen de los agujeros blancos, bautizados por Novikov como núcleos rezagados. Según ambos físicos, la inmensa mayoría del universo surgió a partir del Big Bang, pero con el paso del tiempo han seguido apareciendo fragmentos de considerable tamaño provenientes de las regiones rezagadas del estallido primigenio.

Con esta idea entre las manos, Alon Retter y Shlomo Heller sugerían en 2012 en la revista *New Astronomy* que el cosmos nació en realidad de un agujero blanco, al que llamaron «small bang», y que se trata de un fenómeno espontáneo: toda la materia se expulsa de una sola vez. Por lo tanto, y a diferencia de los negros, solo pueden detectarse alrededor del evento en sí. ¿Estarían los estallidos de rayos gamma (GRB,

# EL BIG BANG PARECE UN AGUJERO BLANCO: TODA LA MATERIA Y ENERGÍA QUE EXISTE SE CREÓ EN ESA MEGAEXPLOSIÓN REPENTINA

por sus siglas en inglés) asociados con estallidos extremadamente energéticos en galaxias distantes, es decir, agujeros blancos? La idea no es descabellada, ya que los GRB figuran como los sucesos explosivos más luminosos del cosmos.

Lo cierto es que los llevan buscando desde hace ya bastantes años. Cuando en los setenta se obtuvo la primera prueba indirecta de la existencia de los agujeros negros, se redoblaron los esfuerzos por encontrar a sus antagonistas. Y en este contexto aparecieron los cuásares, unos objetos muy alejados —y, por tanto, situados en la época que el universo era joven— que emiten grandes cantidades de energía de forma continuada. Bastantes pensaron que por fin tenían la prueba concluyente, pero un jarro de agua fría apagó sus ilusiones.

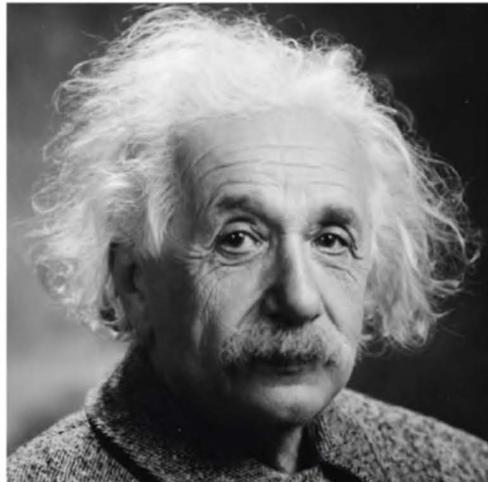
En efecto, Douglas Eardley, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), detectó en 1974 que las soluciones de Novikov y Ne'eman eran muy inestables y se desintegrarían casi de inmediato. La causa es muy sencilla: el agujero blanco moriría sepultado por las capas de materia y energía acumuladas a su alrededor.

Imaginemos un agujero blanco de Schwarzschild, con una singularidad central de donde brotan materia y energía, que a su vez está rodeada por un antihorizonte. Pero dicha emisión energética no escapa hacia el espacio, sino que se va acumulando en la franja exterior del antihorizonte. Así, capa tras capa, tendremos un agujero blanco envuelto por una densa pantalla protectora de energía, que Eardly denominó «sábana azul».

Siguiendo las reglas de la relatividad general, la pared ultraenergética hace que esa región del espacio se deforme bruscamente y surja el horizonte de sucesos de un

## Atajos Cósmicos

Podrían los agujeros negros y blancos estar conectados mediante otras entidades tan exóticas como ellos, los agujeros de gusano? La física no lo descarta: los también llamados puentes de Einstein-Rosen crearían esa unión de contrarios y explicaría qué pasa con la materia engullida por los agujeros negros. El problema es que tales intercambiadores serían, en el caso improbable de que existieran, extraordinariamente inestables y efímeros.

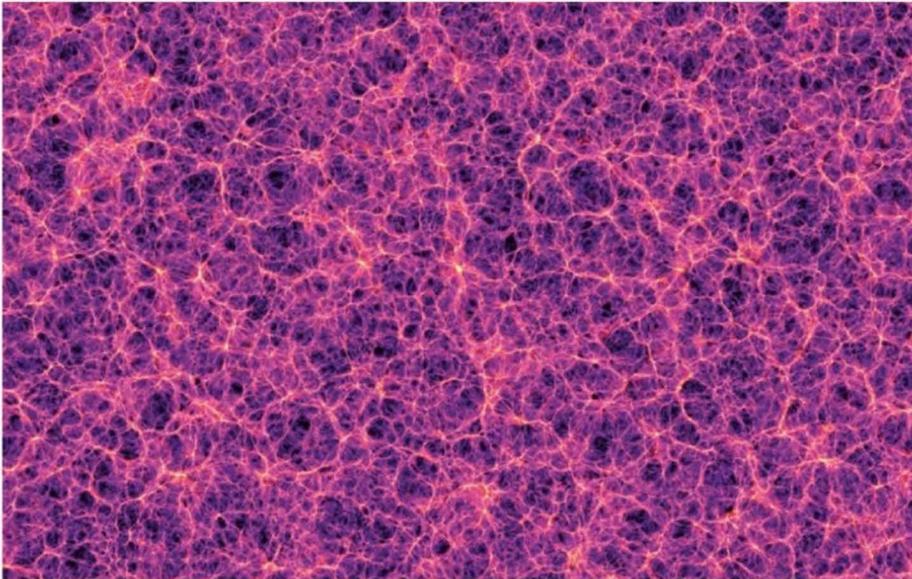


## ROVELLI SOSTIENE QUE LOS AGUJEROS NEGROS SE BLANQUEAN TRAS EXPERIMENTAR UNA TRANSICIÓN CUÁNTICA

verdadero agujero negro. Según Nick Herbert, de la Universidad Stanford (EE. UU.), «a los universos les gusta tener contenidas sus propias dosis letales de luz y de materia para formar sábanas azules, que asfixian en su cuna a los agujeros blancos recién nacidos». Según muestran los cálculos, este proceso de asfixia depende de la masa: para uno equivalente a diez soles, la conversión se verificaría en menos de una milésima de segundo; para otro con una masa de un millón de soles, en poco más de un minuto.

¿Así que no hay agujeros blancos en todo el universo? El físico teórico italiano Carlo Rovelli —uno de los fundadores de la gravedad cuántica de bucles, la idea rival a la teoría de cuerdas y actualmente profesor de la Universidad de Aix-Marsella (Francia)— cree que no está todo perdido. Aplicando las reglas de la mecánica cuántica al mundo de los agujeros blancos —como hizo Stephen Hawking con sus réplicas oscuras—, Rovelli sostiene que los agujeros negros se blanquean tras experimentar una transición cuántica. Y la materia, al caer sobre ellos, rebota.

Luego debe haber un momento en que el horizonte de sucesos cambia a antihorizonte. Y es aquí donde la teoría cuántica viene a echar una mano, gracias a un fenómeno bien conocido y no por ello menos misterioso: el efecto túnel. Sin él es



ASC / SOCIEDAD MAX PLANCK.

En la imagen, una recreación del cosmos a gran escala creada con supercomputadoras de la Sociedad Max Planck (Alemania). La materia oscura del universo solo ha sido detectada hasta la fecha por sus efectos gravitatorios indirectos.

## Todo agujereado

**E**l astrofísico italiano Carlo Rovelli, reconocido por sus contribuciones a la física teórica, ha propuesto una innovadora idea que agrega agujeros blancos a la compleja ecuación del universo. Postula la existencia de numerosos agujeros blancos, los cuales, debido a su diminuto tamaño, permanecen ocultos a nuestra detección. Esta característica los posiciona como candidatos para dilucidar el enigma de la materia oscura, añadiendo una fascinante dimensión a nuestra comprensión del cosmos.



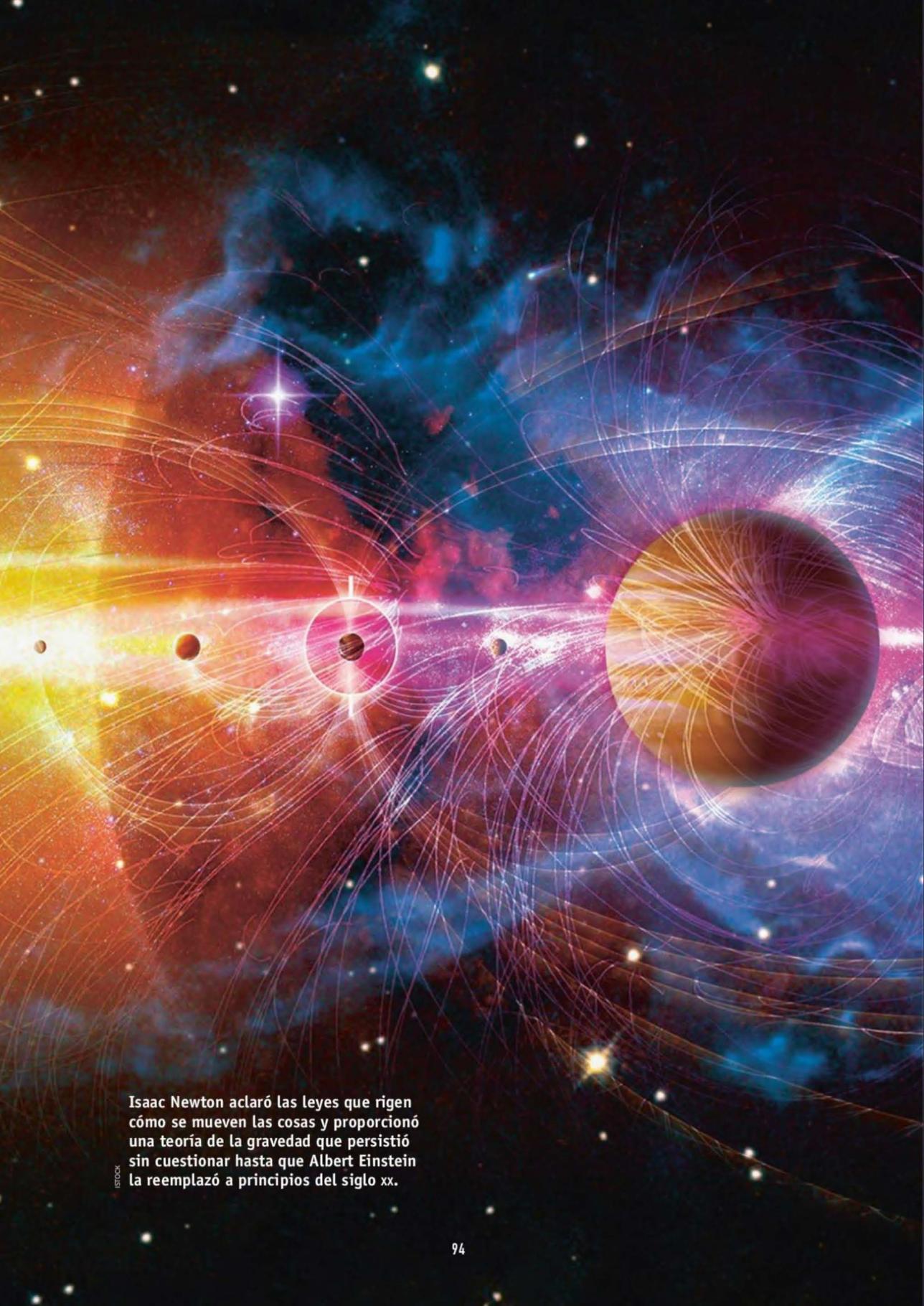
imposible entender la desintegración radiactiva, cuando una partícula atrapada en el núcleo de un átomo inestable consigue vencer la barrera que le impide salir al exterior. Las leyes de la física clásica lo prohíben, pues no tiene la energía suficiente para superar las ligaduras a las que está sometido.

En el caso de los agujeros negros, el hecho de que experimenten la llamada evaporación Hawking —según la cual, y debido a efectos cuánticos, se evaporan de forma lenta hasta desaparecer— es lo que permite que se produzca un peculiar efecto túnel. Para Rovelli, justo cuando el agujero negro ha menguado hasta un punto en el que el espacio-tiempo ya no puede contraerse más, se transforma en uno blanco.

### NANOAGUJEROS BLANCOS

Si es así, ¿dónde los encontraríamos? Pues podrían estar detrás de la misteriosa materia oscura del universo, solo detectada hasta la fecha por sus efectos gravitatorios indirectos. El físico italiano ha calculado que solamente se necesita un minúsculo agujero blanco por cada 10 000 kilómetros cúbicos, mucho más pequeño que un protón y con una masa de aproximadamente una millonésima de gramo —«equivalente a la masa de un pelo humano de doce centímetros»— para dar cuenta de toda la materia oscura que se encuentra en el entorno galáctico del Sol. Estos nanoagujeros blancos no emitirían radiación, y como son infinitamente pequeños, serían invisibles, como la materia oscura. Si un protón impactara con uno, simplemente rebotaría. «No pueden tragar nada», resume Rovelli.

Y si ya la idea de la existencia de estas entidades ultramicroscópicas no fuera suficientemente extravagante, Rovelli sugiere —agárrate a la silla— que algunos agujeros blancos podrían ser anteriores al Big Bang. No solo eso, sino que estos objetos llegados de un universo previo podrían ayudar a explicar por qué el tiempo fluye hacia adelante en el nuestro. ■



Isaac Newton aclaró las leyes que rigen cómo se mueven las cosas y proporcionó una teoría de la gravedad que persistió sin cuestionar hasta que Albert Einstein la reemplazó a principios del siglo xx.

ISTOCK

# La esquivada gravedad cuántica

POR FRANCISCO R. VILLATORO  
Físico y profesor de la Universidad de Málaga



La geometría del espacio-tiempo está descrita por la gravitación de Albert Einstein.

**E**l gran legado de la física del siglo xx es que todo en el universo, absolutamente todo, está hecho de espacio-tiempo clásico y de campos cuánticos. El espacio-tiempo es la entidad dinámica responsable de la gravitación, descrita por la relatividad general. Los campos son responsables de las partículas que constituyen toda la materia y la radiación, descritos por teorías cuánticas de campos en el marco del modelo estándar. Esta naturaleza dual del universo desagrada a la mayoría de los físicos, que sueñan con una descripción cuántica del espacio-tiempo y de la gravitación, la esquiada gravedad cuántica. La clave para el desarrollo de una *teoría de todo* capaz de unificar la gravitación con el resto de las interacciones fundamentales (el electromagnetismo, la interacción débil y la interacción fuerte).

Puede parecer una cuestión estética, pero sabemos que la gravitación de Einstein es una teoría incompleta. Penrose y Hawking probaron que pueden aparecer singularidades, en las que la noción de espacio-tiempo clásico deja de tener sentido y la teoría no es aplicable. Una futura gravedad cuántica nos permitirá eliminar estas singularidades tanto en el interior de los agujeros negros como al inicio de los modelos cosmológicos de tipo Big Bang. Además, desvelará la naturaleza cuántica del espacio y del tiempo en la escala de Planck (a distancias del orden de  $10^{-35}$  metros y en duraciones del orden de  $10^{-44}$  segundos). En esta escala se espera que el espacio-tiempo continuo sea reemplazado por una espuma cuántica, con fluctuaciones caóticas en las que las partículas y los agujeros negros virtuales se entremezclan en formas difíciles de describir con palabras. Esta espuma cuántica podría dar lugar a efectos observables en ciertos fenómenos físicos que ocurren en escalas cósmicas, como la propagación de rayos cósmicos durante miles de millones de años.

## LA PREHISTORIA DE LA GRAVEDAD CUÁNTICA

En noviembre de 1915 nació la teoría general de la relatividad que describe la gravitación. Siendo uno de los padres de la física cuántica, el propio Einstein afirmó en 1916 que la teoría cuántica tendría que modificar la física de las ondas gravitacionales, como lo hace con las ondas electromagnéticas. Lo volvió a repetir en 1918, pero en 1919 cambió de idea de forma radical: propuso el sueño que le acompañó el resto de su vida, la búsqueda de una teoría unificada del electromag-



AP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

Niels Bohr, Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli.



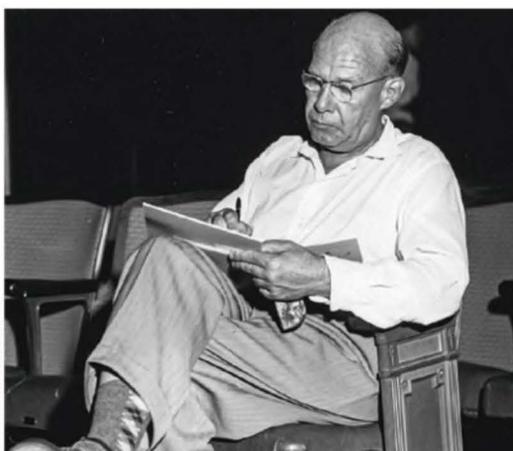
AP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

Oskar Klein, físico sueco.



AP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

Léon Rosenfeld, físico belga.



AP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

Dmitry Ivanovich Blokhintsev, físico soviético.

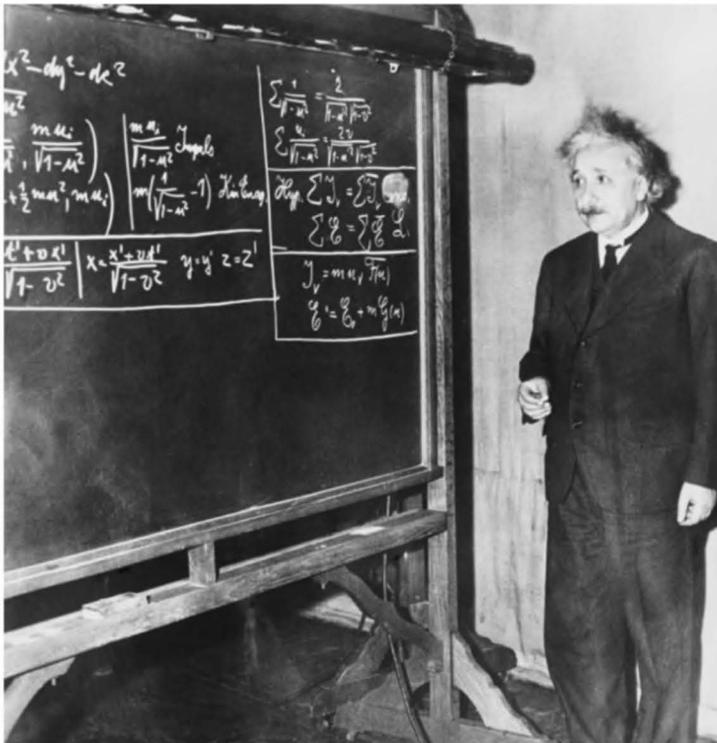
netismo y de la gravitación basada en una formulación geométrica clásica. Hoy sabemos que una descripción clásica subyacente a la física cuántica contradice los experimentos cuánticos galardonados con el premio Nobel de Física en 2022.

Tras el nacimiento de la formulación definitiva de la física cuántica, en 1927, Klein volvió a proponer la necesidad de una gravedad cuántica. Parecía tan fácil que, en 1929, en su artículo pionero sobre la cuantización del campo electromagnético, Heisenberg y Pauli afirmaron que su método era aplicable a la gravitación sin ninguna dificultad adicional. Recogieron el guante Rosenfeld en 1930, Blokhintsev y Gal'perin en 1934, y Bronstein en 1935. Así nació el gravitón, la partícula cuántica asociada a las ondas gravitacionales, análoga al fotón para las ondas electromagnéticas, cuya física está regida por la versión linealizada de la ecuación de Einstein. Por desgracia, estas teorías cuánticas estaban decoradas con infinitos que impedían realizar predicciones. De hecho, para el electromagnetismo, la versión cuántica libre de infinitos, llamada electrodinámica cuántica (QED), no se culminó hasta 1949.

## LA GRAVITACIÓN COMO TEORÍA GAUGE

La naturaleza de la luz está descrita por el electromagnetismo, que unifica los campos eléctrico y magnético. En cada punto del espacio tridimensional, las seis componentes de estos campos cumplen con las cuatro ecuaciones de Maxwell. Como resultado, el electromagnetismo solo tiene dos grados de libertad físicos (responsables de las dos polarizaciones de la luz que permiten el cine en 3D con gafas adecuadas). Pero no sabemos describir el electromagnetismo usando solo sus dos grados de libertad físicos. Esta redundancia en las ecuaciones es característica de las teorías gauge.

La geometría del espacio-tiempo está descrita por la gravitación de Einstein. Las diez componentes del tensor métrico en tres dimensiones espaciales cumplen con la ecuación de Einstein, que equivale a ocho ecuaciones no lineales acopladas. Como resultado, la gravitación solo tiene dos grados de libertad físicos (responsables de las dos polarizaciones de las ondas gravitacionales). La gran redundancia de las ecuaciones hace que haya infinitas configuraciones clásicas que representan cada estado físico del campo gravitacional; se dice que la teoría es invariante ante cambios de coordenadas generales (de ahí el nombre de relatividad general). Por desgracia, no sabemos describir la gravitación usando solo sus dos grados de libertad físicos. Estas redundancias en la ecuación de Einstein permiten interpretarla como una teoría gauge.



Einstein en 1935 dando una conferencia en la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia en Pittsburgh. La pizarra muestra fórmulas básicas de teoría especial de la relatividad.

## La teoría de cuerdas

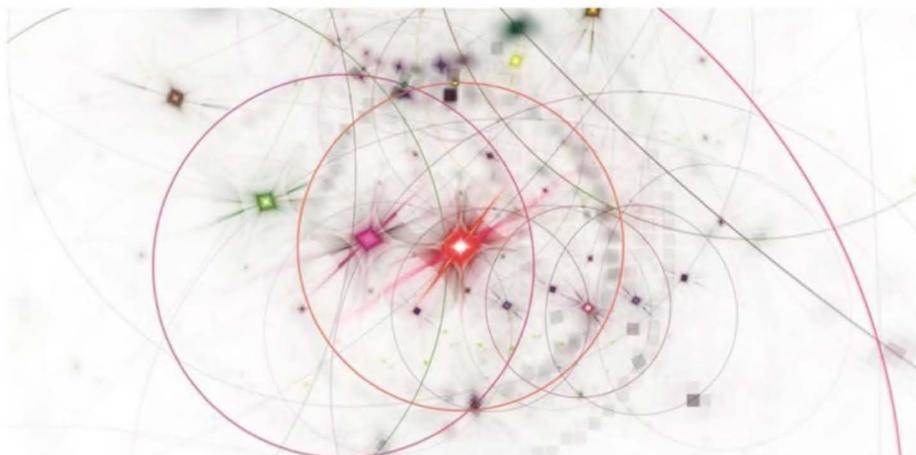
Esta teoría nació en 1967 como una teoría de la interacción fuerte entre mesones y bariones. Los mesones tienen espín entero (0, 1, 2, 3, etc.) y los bariones espín semientero (1/2, 3/2, 5/2, etc.). Estas partículas se describían mediante las vibraciones de supercuerdas (cuerdas con supersimetría) cuyo momento angular se interpreta como el espín de la partícula. Esta teoría fue abandonada en 1973 tras el éxito inicial de la cromodinámica cuántica (QCD) que describe los mesones como parejas de quarks y los bariones como tríos de quarks.

En 1974, Scherk y Schwarz propusieron usar la teoría de cuerdas como gravedad cuántica, interpretando las vibraciones de supercuerdas de espín 2 como el gravitón. Y como *teoría de todo* pues las vibraciones con espines 0, 1/2 y 1 permiten describir las partículas del modelo estándar. Pero la teoría presentaba anomalías (la versión cuántica incumple ciertas simetrías de la versión clásica). En 1984, Green y Schwarz lograron cancelar dichas anomalías en cinco versiones diferentes. Alrededor de 1994 se desveló que las cinco están relacionadas entre sí mediante dualidades y que parecen ser límites de una teoría común (llamada teoría M).

Como gravedad cuántica, la teoría de supercuerdas es invariante relativista a todas las energías y tiene la ventaja de que está libre de infinitos. La relatividad general se recupera en el límite clásico, a baja energía, gracias a la presencia del gravitón. Aunque aparece corregida con infinitos términos que son función de la curvatura, cada uno multiplicado por una potencia de la tensión de la cuerda (el único parámetro libre de la teoría).

El gran éxito de la teoría de supercuerdas fue el cálculo de la entropía de los agujeros negros extremales (que tienen la carga eléctrica máxima permitida para su masa). Se obtuvo la fórmula correcta de Bekenstein y Hawking, aunque el cálculo cuerdista no se sabe aplicar a todos los agujeros negros.

Por desgracia, la teoría de cuerdas como gravedad cuántica no permite eliminar las singularidades dentro de los agujeros negros o en los modelos cosmológicos tipo Big Bang. Tampoco desvela la naturaleza cuántica del espacio y del tiempo. Se intuye que el espacio-tiempo está formado por supercuerdas en interacción en la escala de Planck, pero no se entiende cómo emerge un espacio-tiempo continuo a partir de ellas a baja energía.



STOCK PHOTO



Fotograma de la batalla de Theed perteneciente a *Star Wars: Episodio I. La amenaza fantasma*.

La cuantización del electromagnetismo se puede realizar por varios métodos y todos ellos conducen a la misma teoría final, la QED. Esta teoría describe la interacción entre partículas con carga eléctrica como un intercambio de fotones virtuales. El fotón es un bosón de espín uno sin masa, luego corresponde a dos excitaciones de sendos campos cuánticos acoplados (que representan a nivel cuántico las dos polarizaciones de la luz). La QED es una teoría lineal, ya que el fotón no tiene carga eléctrica, por lo que no interacciona con otros fotones (luego los sables láser de *Star Wars* son imposibles). La linealidad facilita muchísimo todos los cálculos y permite que la QED sea la teoría más precisa de toda la física.

La relatividad general se puede cuantizar con los mismos métodos usados para el electromagnetismo y todos ellos conducen a la misma gravedad cuántica. La masa es la *carga* de la gravitación newtoniana, sin embargo, en la gravitación einsteiniana actúa como *carga* la densidad de energía y momento lineal. Por ello, la gravitación es una interacción universal, que afecta a todas las partículas (porque todas tienen energía, incluidas las que no tienen masa como el fotón). La gravedad cuántica describe la interacción entre dos partículas cualesquiera como un intercambio de gravitones virtuales. El gravitón es un bosón de espín dos sin masa, que corresponde a dos excitaciones de sendos campos cuánticos acoplados (que representan a nivel cuántico las dos polarizaciones de las ondas gravitacionales). Como el gravitón tiene energía, puede interactuar con otros gravitones, lo que conduce a una teoría no lineal en la que es muy difícil realizar cálculos. Pero los problemas de esta teoría van más allá.

## UNA GRAVEDAD CUÁNTICA INÚTIL

La versión cuántica de la gravitación de Einstein se puede obtener con los métodos de cuantización canónica, covariante y con integrales de camino, que fueron apli-

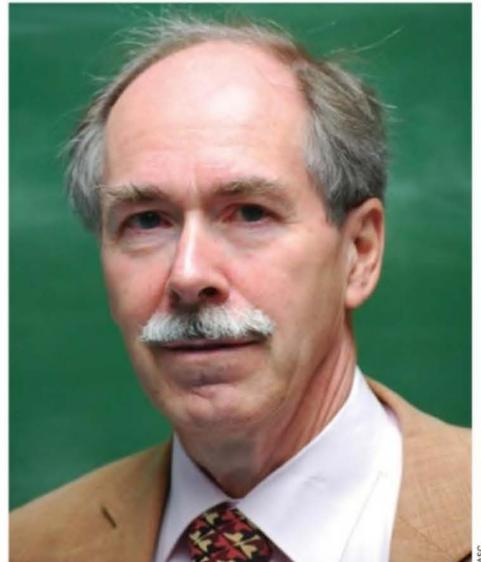
## TODA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS TIENE DOS TIPOS DE ESTADOS, VACÍO Y PARTÍCULAS

cados por Bergmann (1949), Dirac (1950), Gupta (1952), Misner (1957) y Feynman (1963), entre otros. El resultado es una teoría cuántica no renormalizable, inútil, pues carece de capacidad predictiva. La razón última ya fue apuntada por Heisenberg en 1938, la constante de acoplamiento de la gravitación tiene dimensiones, a diferencia de las del resto de las interacciones del modelo estándar, que son adimensionales. Este problema también lo tenía la teoría de Fermi de 1934 para la interacción débil, que tuvo que ser reemplazada por la teoría electrodébil en 1967.

La idea física que subyace a la renormalización es que las partículas que observamos en los experimentos están influidas por el vacío cuántico que las rodea. Toda teoría cuántica de campos tiene dos tipos de estados, vacío y partículas. El vacío tiene energía infinita, pues se describe como infinitas partículas virtuales, que son fluctuaciones cuánticas con cierta energía de punto cero. Las partículas son excitaciones del campo sobre un estado de vacío; por ello, su energía finita es relativa a la energía infinita del vacío y su energía parece infinita si no se renormalizan los cálculos.

La renormalización consiste en revestir las partículas con el vacío que las rodea, de tal forma que la contribución infinita del vacío a la energía de la partícula compense de forma exacta la energía infinita del propio vacío, resultando un valor finito para la energía de la partícula observable. En la práctica, en dicho proceso se modifican los parámetros de las partículas (masas y cargas) y de los campos (acoplamientos) para que sean funciones que cambian con la energía, en lugar de valores constantes. El cálculo de dicha modificación se realiza a nivel perturbativo, paso a paso, calculando la contribución de un lazo (dos partículas virtuales), de dos lazos (tres partículas virtuales), etc. Los físicos Gerardus 't Hooft y Martinus Veltman recibieron el premio Nobel de Física de 1999 por demostrar en 1973 que todas las interacciones del modelo estándar son renormalizables.

En 1974, 't Hooft y Veltman demostraron que en la gravedad cuántica la renormalización perturbativa no funciona. En la interacción entre gravitones, al calcular la contribución a un lazo (dos gravitones virtuales) aparecen infinitos que no se pueden suprimir modificando el acoplamiento de la teoría (la cons-



El físico neerlandés —premio Nobel de Física en 1999— Gerardus 't Hooft fotografiado en 2008.



El gran colisionador de hadrones (LHC) del CERN, en Suiza, es el mayor acelerador de partículas del mundo, pero para realizar experimentos con gravitones sería necesario crear un utópico colisionador de partículas del tamaño de toda una galaxia.

tante de gravitación universal en este caso). Para lograrlo hay que introducir dos nuevos términos en el campo gravitacional, con dos parámetros libres, cuyo valor solo puede ser determinado con experimentos usando gravitones en colisionadores. El problema se agrava al añadir lazos adicionales, que introducen nuevos parámetros libres.

## NECESITAMOS LA GUÍA DE LA NATURALEZA

El gran problema en gravitación cuántica es que nadie sabe cómo realizar experimentos con gravitones (a veces se afirma que se necesitaría un utópico colisionador de partículas del tamaño de toda una galaxia). De hecho, ni siquiera sabemos si el gravitón existe, pues aún no ha sido observado. Las ondas gravitacionales no son prueba de su existencia ya que una onda de 1 kHz (frecuencia típica en las que se observan en LIGO) contiene unos  $10^{14}$  gravitones por centímetro cúbico.

La interacción gravitacional es demasiado débil para permitir observar efectos cuánticos mediante experimentos. Sabemos calcular las correcciones cuánticas al potencial gravitacional de Newton y al potencial eléctrico de Coulomb; pero son demasiado pequeñas. Por ejemplo, el acoplamiento gravitacional entre dos protones es del orden de  $10^{-39}$ , unos 37 órdenes de magnitud más pequeño que el acoplamiento electromagnético (la constante de estructura fina). A pesar de ello, la gran esperanza está puesta en las observaciones cosmológicas de ultraprecisión de futuras generaciones de observatorios espaciales del fondo cósmico de microondas.

Se han propuesto muchos candidatos a teorías de gravedad cuántica, que se encuentran en diferentes fases de desarrollo. La teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de lazos son las propuestas más avanzadas y prometedoras. La gran diferencia entre ellas es que la primera es invariante relativista a todas las energías, mientras que la segunda no lo es en la escala de Planck. Pero hay muchos

## La gravedad cuántica de lazos

En 1986, Ashtekar descubrió que la geometría del espacio-tiempo en relatividad general se puede separar en términos análogos a los campos eléctricos y magnéticos. Sus nuevas variables se podían interpretar como las líneas de fuerza que Faraday imaginó para el electromagnetismo. Estas líneas se cruzan formando diagramas, los lazos de la gravedad cuántica de lazos, también llamados *redes de espín*.

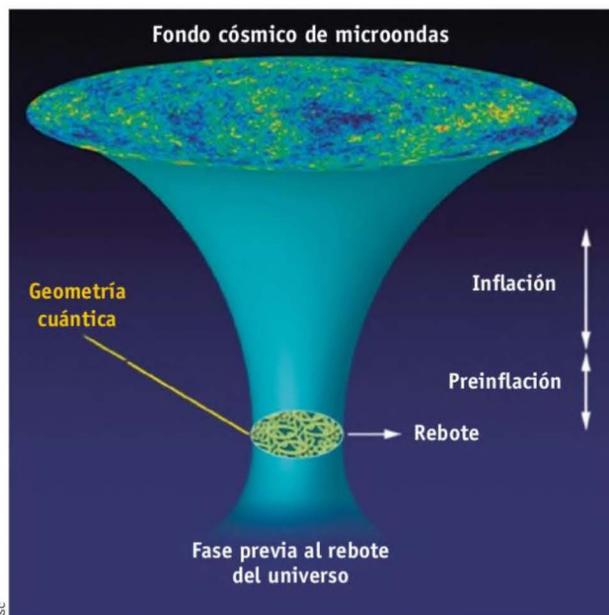
Rovelli y Smolin construyeron en 1988 la primera versión cuántica de esta teoría. En 1996, Thiemann demostró que sus ecuaciones matemáticas están bien formuladas y están libres de infinitos. En esta gravedad cuántica el área de una superficie está cuantizada por el número de lazos que la cruzan (unos  $10^{66}$  por  $\text{cm}^2$ ). El área mínima está cruzada por un solo lazo y corresponde a un área de Planck.

Los volúmenes también están cuantizados. Como resultado, la naturaleza cuántica del espacio-tiempo es discreta y en la escala de Planck la teoría no es invariante relativista. El primer gran éxito de la gravedad cuántica de lazos fue el cálculo de la entropía de los agujeros negros. Se obtuvo el resultado de Bekenstein y Hawking, que la entropía es proporcional al área del horizonte de sucesos en unidades del área de Planck. Sin embargo, la fórmula presenta un parámetro libre, el parámetro de Immirzi. Su valor no se deduce de la teoría y debe ser fijado mediante experimentos (o por razonamientos físicos).

Por desgracia, las ecuaciones de la teoría son tan complicadas de resolver que no aportan información relevante sobre las singularidades en el interior de los agujeros negros o en los modelos cosmológicos tipo Big Bang. En la llamada cosmología cuántica de lazos, que no se deduce de la teoría, sino que se inspira en ella, se reemplaza el Big Bang con un *gran rebote*. La teoría predice pequeñas modificaciones en el fondo cósmico de microondas, que serán buscadas con los instrumentos de la próxima generación. La naturaleza será quien decida si la gravedad cuántica de lazos está más próxima a la futura gravedad cuántica que la teoría de cuerdas.

otros candidatos, como la gravedad cuántica asintóticamente segura, la teoría de conjuntos causales, la teoría de triangulaciones causales, la gravedad de Hořava-Lifshitz y la gravedad basada en geometría no conmutativa, entre otras.

Hasta ahora, ninguna de estas teorías nos ha enseñado a eliminar las singularidades en el interior de los agujeros negros, a entender la naturaleza cuántica del espacio y del tiempo, y a construir una *teoría de todo* que cumpla con el sueño unificador de Albert Einstein. ■



El teletransporte cuántico es un proceso donde se transmite información cuántica de una posición a otra mediante un canal clásico. Lo que se transmite es qubit, análogo cuántico del bit.

ISTOCK



# Teletransporte cuántico

POR ANTONIO ACÍN  
Profesor ICREA en el ICFO - Instituto de Ciencias Fótónicas



Fotograma de la serie original *Star Trek* creada en el año 1966 por Gene Roddenberry.

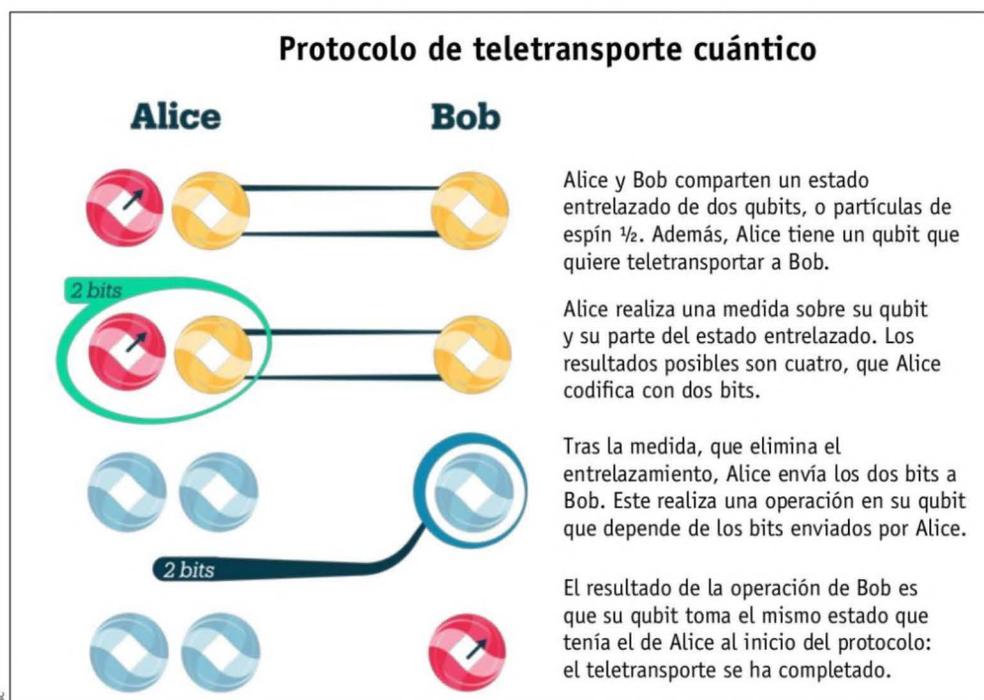
**T**eletransporte y cuántico! Dos términos que por sí mismos ya evocan muchísimo a la hora de divulgar ciencia y encima juntos. ¿Podemos pensar en una operación de marketing más astuta en el mundo de la física? En 1993, los investigadores Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Claude Crépeau, Richard Jozsa, Asher Peres y William K. Wootters publicaron en *Physical Review Letters* una de las revistas más prestigiosas de física, el artículo con título «Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels». En él introducían el protocolo de teletransporte cuántico, que permite enviar información almacenada en partículas cuánticas entre dos observadores, Alice y Bob, distantes. Más allá del acierto que tuvieron en escoger su nombre (y teniendo en cuenta que, en la ciencia de hoy en día, como en la vida misma, un poco de estrategia de venta siempre ayuda), se trata de un protocolo fundamental para la comprensión de la mecánica y la información cuántica y que al mismo tiempo tiene una gran potencialidad desde el punto de vista aplicado. Veremos a continuación por qué, pero antes recordemos lo que el teletransporte evoca en gran parte de la población.

Si nos encontramos con amigos nuestros y mencionamos el término teletransporte, muchos pensarán en seguida en películas de ciencia y ficción y, en particular, en *Star Trek*. En estas películas, los personajes, como el Dr. Spock, podían desplazarse de un lugar a otro, por ejemplo, de un planeta remoto a la nave *Enterprise*, sin usar medios de transporte físico y de manera instantánea. El hecho de que este proceso tuviera lugar de manera instantánea implica que está en plena contradicción con las leyes de la física actuales, como la teoría de la

relatividad especial de Einstein. Podemos ir más allá y afirmar que es un proceso que nunca será posible, ya que una abrumadora mayoría de los físicos piensa que nunca habrá transmisión de información instantánea. Es una lástima, pero no parece probable que tengamos algún día una máquina tan potente. La mecánica cuántica es a menudo antiintuitiva, pero está en armonía con la relatividad especial en el sentido de que no permite el envío de información de manera instantánea. Por lo tanto, el teletransporte cuántico no puede ser lo mismo que el que vemos en las películas de ciencia ficción. ¿De qué se trata entonces y por qué sus inventores acuñaron este término, sin que nadie se llevara las manos a la cabeza?

## TEORÍA DE LA INFORMACIÓN CUÁNTICA

Consideremos dos observadores distantes, que se suelen llamar Alice y Bob. Alice tiene una partícula cuántica, en un estado cuántico. Para simplificar la explicación y hacerla un poco más gráfica, pensemos en el sistema cuántico más sencillo, una partícula de espín  $1/2$ . Más allá de tecnicismos, podemos pensar en una partícula de espín  $1/2$  como una flecha apuntando en una dirección en nuestro espacio de tres dimensiones: hacia arriba o hacia abajo, o hacia la izquierda, o con un ángulo de 45 grados respecto a la vertical, todos son estados posibles de la partícula cuántica. Alice tiene por tanto una de estas partículas, es decir, una de estas flechas apuntando en una dirección arbitraria, que además ella desconoce. Aparte de esta partícula, Alice tiene una segunda que se encuentra entrelazada con una partícula en posesión de Bob (ver infografía de abajo).





Entre las técnicas desarrolladas en el experimento de teletransporte cuántico desde un observatorio en la Tierra a un satélite de órbita baja —a través de un canal de enlace ascendente, con una distancia de hasta 1400 km—, está una fuente compacta ultrabrillante de entrelazamiento de fotones múltiples.

Sin entrar en detalles, las partículas entrelazadas presentan unas correlaciones muy fuertes entre ellas que no tienen análogo clásico. Paremos un momento y, dado que el protocolo de teletransporte fue introducido en un contexto de teoría de la información cuántica, introduzcamos el lenguaje que se usa en esta teoría para luego seguir adelante con la explicación.

La teoría de la información cuántica se preocupa por entender cómo procesar y transmitir información codificada en sistemas cuánticos. Así como el bit es la unidad básica de información, el bit cuántico, o qubit por quantum bit en inglés, es la unidad básica de información cuántica. El bit cuántico puede tomar los valores binarios 0 y 1 como su análogo clásico, que se suelen denotar por  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  usando la notación estándar de la mecánica cuántica, pero, además, siendo de naturaleza cuántica, puede estar en cualquier superposición, cuántica, de los dos. Una partícula de espín  $1/2$  es un ejemplo de bit cuántico: cuando apunta hacia arriba representa el estado  $|0\rangle$ , hacia abajo el  $|1\rangle$ , y el resto de direcciones intermedias de la flecha representan las posibles superposiciones del bit cuántico. Lo que sabemos es que usando estos bits cuánticos podemos realizar tareas que son imposibles con bits clásicos, como construir ordenadores mucho más potentes o nuevos esquemas de encriptación de información. Tras este pequeño paréntesis, volvamos al escenario inicial del teletransporte, ya que nuestro objetivo no es explicar el campo de la información cuántica. En su lenguaje, Alice tiene un qubit arbitrario, cuyo estado, o dirección, desconoce. Además, comparte con Bob un estado entrelazado de dos qubits. El objetivo del protocolo es que el estado del qubit pase de Alice a Bob usando el entrelazamiento. Veamos cómo.

Alice toma el qubit a teletransportar junto a su qubit del estado entrelazado que comparte con Bob, y realiza una medida sobre los dos. Esta medida, al ser sobre dos qubits, da cuatro posibles resultados. Alice comunica el resultado de la medida a Bob, por ejemplo, por teléfono. Dos bits, que pueden ser clásicos, son suficientes

## EL TELETRANSPORTE TRANSMITE EL ESTADO DE LA PARTÍCULA, NO LA PARTÍCULA FÍSICA

para transmitir cuál ha sido el resultado de la medida de entre los cuatro posibles. Ahora Bob, tras recibir esta información, realiza una operación sobre su único qubit y el estado de este pasa a ser el que tenía el qubit de Alice. El qubit de Bob apunta en la misma dirección que lo hacía el de Alice. ¡El estado del qubit se ha teletransportado de Alice a Bob!

Para entender bien las implicaciones de lo que ha pasado, mencionaremos que:

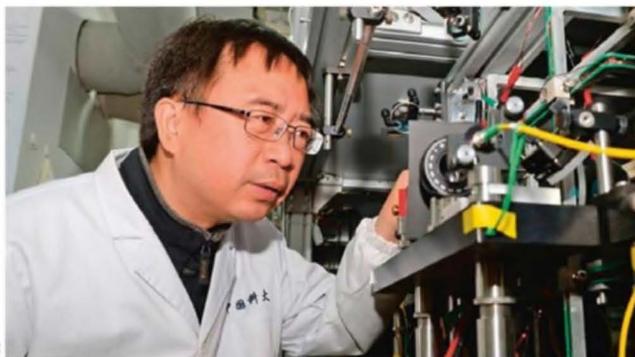
1-El teletransporte transmite el estado de la partícula, no la partícula física. Para representarlo con un análogo clásico, y teniendo en cuenta que este tipo de analogías, como también pasa con el famosísimo gato de Schrödinger, son siempre difíciles de asimilar, se tiene un maniquí de las mismas dimensiones del Dr. Spock en el *Enterprise* y tras el teletransporte, el estado de Spock pasa de su cuerpo en el planeta remoto al maniquí en la nave.

2-El protocolo no es instantáneo y en particular requiere que Alice envíe a Bob los dos bits con el resultado de esta medida. Sin estos dos bits, Bob no tiene ninguna información sobre el qubit de Alice. Por supuesto, estos bits al ser enviados no pueden ir a una velocidad mayor que la de la luz, por lo que el protocolo es totalmente compatible con la relatividad especial.

3-Se podría pensar que los dos bits llevan información sobre el qubit de Alice, pero eso no es así. Recordemos que Alice no necesita conocer el estado de su qubit para llevar a cabo de manera exitosa el protocolo. Además, los dos bits resultantes de su medida son independientes del estado del qubit a teletransportar.

Esta última propiedad explica el término de teletransporte cuántico: si lo único que Alice envía a Bob son los dos bits codificando el resultado de esta medida, pero estos dos bits no dependen del estado, ¿por dónde viaja entonces la información del qubit de Alice a Bob? Entendemos que es gracias a las correlaciones de las partículas entrelazadas, y de hecho es una de las demostraciones más potentes de sus propiedades sin análogo clásico, pero no podemos identificar cómo y dónde se produce este envío de información cuántica de un lugar a otro. Podemos afirmar que se ha teletransportado.

El artículo de teletransporte está muy bien escrito y entenderlo no requiere un



### Teletransporte cuántico, ¡y en el espacio!

En 2017, el grupo de científicos dirigido por el profesor Jian-Wein Pan, realizó en China un experimento de teletransporte desde un observatorio en la Tierra a un satélite de órbita baja, para una distancia de unos 1400 km. En la imagen, Pan en enero de 2019.

conocimiento exhaustivo del formalismo de la mecánica cuántica. Animo a cualquier lector familiarizado con ese formalismo a leerlo. Pero a pesar de su sencillez formal, identifica uno de los fenómenos más fascinantes que permiten las partículas entrelazadas. No es por tanto una sorpresa que sea un artículo con un gran impacto, reflejado, por ejemplo, en su elevado número de citas.

A partir del resultado teórico, se empezó una carrera entre los distintos grupos experimentales en el mundo por ser el primero en demostrarlo. En 1997, los grupos de Francesco de Martini, en Roma, y de Anton Zeilinger, en Viena, premio Nobel de física en 2022, llevaron a cabo experimentos independientes donde el estado de un fotón se teletransportaba usando otros dos fotones en un estado entrelazado. A partir de estos experimentos iniciales, las demostraciones del teletransporte han ido avanzando y mejorando: se ha demostrado el teletransporte entre partículas con masa, como iones o átomos, también se ha teletransportado de manera híbrida, de fotones a partículas con masa, y fuera del laboratorio, como en una red de fibra óptica, entre dos islas en las Canarias o a través de un satélite. Se puede afirmar que es un protocolo que ha alcanzado un considerable grado de madurez experimental.

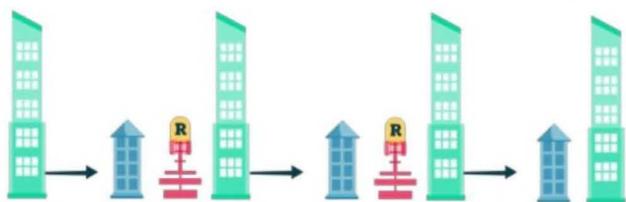
## ¿SIRVE O SERVIRÁ EL TELETRANSPORTE PARA ALGO?

La respuesta es afirmativa. Debemos recordar para lo que sigue que el teletransporte es una manera de enviar bits cuánticos entre dos usuarios: el qubit está inicialmente con Alice y acaba con Bob. Uno de los objetivos principales

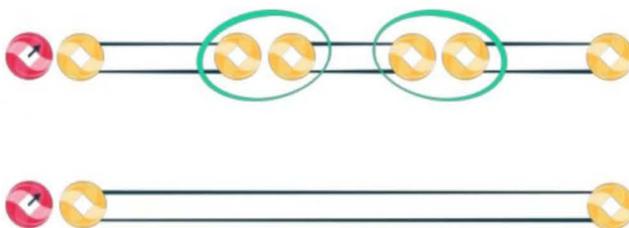
### Repetidores clásicos y cuánticos para comunicación a grandes distancias

Alice

Bob

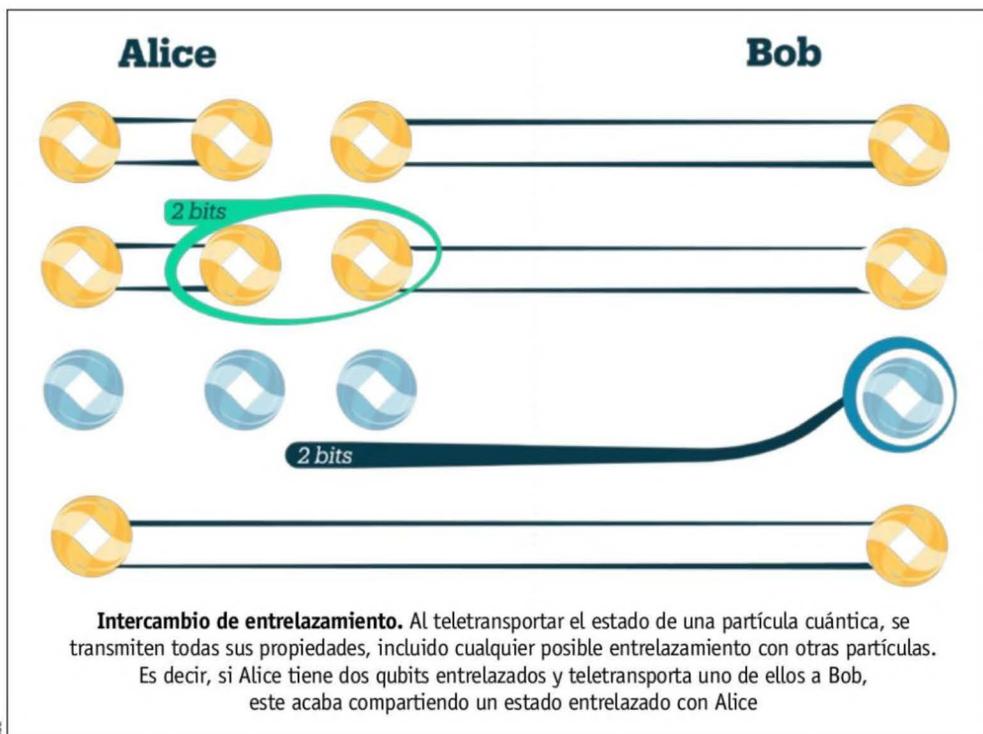


En la actualidad, las comunicaciones a grandes distancias se realizan a través de repetidores, en azul en la figura. Estos se colocan entre los dos usuarios, recogen la información, la restauran y la envían al siguiente repetidor, de manera que llegue a Bob de manera fiable.



En comunicación cuántica, primero se establecen pares de partículas entrelazadas entre los repetidores cuánticos y los dos usuarios distantes, Alice y Bob.

El entrelazamiento se puede intercambiar de manera que al final Alice y Bob compartan un estado entrelazado. Ahora Alice puede teletransportar su qubit a Bob, realizando comunicación cuántica a grandes distancias.



de las tecnologías de la información cuántica es conseguir la internet cuántica, donde distintos ordenadores cuánticos repartidos en el mundo sean capaces de intercambiar entre ellos bits cuánticos. Explicado de manera rápida, no es más que conseguir el análogo cuántico de lo que es hoy en día internet: una red de ordenadores interconectados. Uno de los problemas a la hora de conseguir la internet cuántica es que es muy complicado enviar bits cuánticos a grandes distancias. Si miramos la internet actual, no cuántica, el elemento clave que permite enviar información es que los bits clásicos se pueden copiar, o amplificar (ver la infografía de la página anterior).

Si dos usuarios se quieren enviar información y la distancia entre ellos es muy grande, se coloca una serie de repetidores en el trayecto que detectan la información, la recuperan y la envían al siguiente repetidor para que de esta manera llegue al usuario final. Esta idea no es trasladable al caso cuántico porque los bits cuánticos no se pueden copiar. Sin embargo, sí que se puede conseguir realizar repetidores de entrelazamiento, o repetidores cuánticos, que permiten establecer un estado entrelazado entre dos observadores lejanos a través del intercambio de entrelazamiento, o *entanglement swapping*. Una vez este entrelazamiento se ha establecido entre ellos, se consume para llevar a cabo la transmisión de bits cuánticos por medio de teletransporte, consiguiendo comunicación cuántica a grandes distancias.

Tras este recorrido, podemos entender por qué las expectativas que el término teletransporte cuántico evoca son más que justificadas: no es solo uno de los fenómenos más fascinantes de la mecánica cuántica, sino además un ingrediente crucial para el diseño de la futura internet cuántica. ■

La metrología cuántica se ocupa del estudio y desarrollo de técnicas que permitan realizar mediciones de alta resolución y altamente sensibles de magnitudes físicas.

ISTOCK

METROLOGÍA CUÁNTICA

# Midiendo lo invisible

POR MIGUEL A. MARTÍN-DELGADO  
Físico Teórico. Universidad Complutense



*Galileo Galilei presentando su telescopio en Venecia (1900), de Henry-Julien Detouche.*

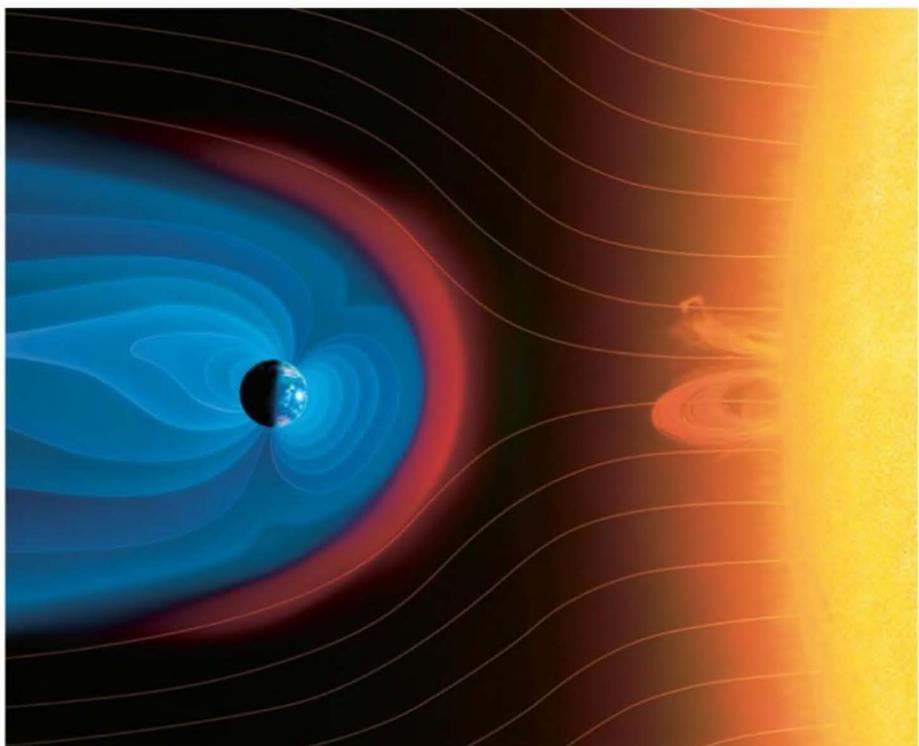
**L**a metrología se ocupa de definir, regular y mantener las unidades de medida: segundo, metro, kilogramo, etc. Pero su importancia va más allá y está presente, aunque parezca invisible, en muchos aspectos de la vida cotidiana, como en las actuales redes de servicios, proveedores y comunicaciones de las que nos hemos vuelto tan dependientes. La metrología vela para que su funcionamiento sea eficaz y fiable. En definitiva, las distintas formas de medición física y química influyen en la calidad del mundo en el que vivimos. Se atribuye a Galileo el dicho «mide lo que puedas medir, y lo que no puedas medir, hazlo medible». De ahí su papel esencial en las ciencias naturales.

La metrología cuántica se ocupa del estudio y desarrollo para realizar mediciones de alta resolución y altamente sensibles de magnitudes físicas, también llamadas parámetros, utilizando las propiedades de la mecánica cuántica, especialmente explotando el entrelazamiento cuántico. Las tecnologías cuánticas establecen una hoja de ruta para su desarrollo en la que la metrología cuántica ocupa el primer estadio junto con la sensorica cuántica, estrechamente relacionadas ambas. Después, se espera el desarrollo de la criptografía cuántica, dejando la simulación y computación cuánticas para el largo plazo.

¿Qué tiene que ver la física cuántica con la metrología? Mucho, podríamos decir que la física cuántica es la teoría más metrológica que hay por varias razones. Una de las características principales de la física cuántica es la naturaleza discreta de muchas magnitudes físicas, como la energía de una partícula, o sus momentos angulares orbital o de espín. El carácter discreto de estas magnitu-

des físicas se presta a una mejor medición experimental que si fuesen magnitudes continuas como sucede en la física clásica de Newton y Galileo, entre otros. Curiosamente, uno de los postulados de la mecánica cuántica se llama «de la medida» porque juega un papel esencial y distinto en la teoría cuántica que en las teorías clásicas.

Por otro lado, las magnitudes cuánticas son muy sensibles a los efectos perturbadores del medio que las rodea. Esta sensibilidad se vuelve de gran utilidad para hacer sensorica y medir con sensores cuánticos propiedades como campos gravitatorios, eléctricos, magnéticos, etc., y su posterior aplicación práctica. Los sensores cuánticos son un caso de serendipia. Así, un sistema cuántico (cúbit) es muy frágil pues interacciona muy fácilmente con el ambiente que lo rodea. Pero un sensor es justamente un dispositivo que se utiliza para sondear su entorno y obtener información física útil. De este modo, el problema de la fragilidad de los sistemas cuánticos se vuelve una virtud. Los sensores cuánticos se aprovechan del principio de superposición, y en general del entrelazamiento cuántico, para lograr una mayor sensibilidad y resolución. Esto se vuelve de gran utilidad para medir, por ejemplo, vacíos debajo del suelo, para la detección de depósitos minerales sin hacer excavaciones, y también se utilizarán para proporcionar el diagnóstico no invasivo en zonas dañadas o enfermas.



La enorme sensibilidad de las magnitudes cuánticas es muy útil para medir con sensores cuánticos propiedades como campos gravitatorios, eléctricos, magnéticos, etc. En la ilustración, interacción del viento solar (rojo) con el campo magnético de la Tierra (azul, no a escala).

## LAS DOS REVOLUCIÓN CUÁNTICAS: DISCRETIZACIÓN Y ENTRELAZAMIENTO

Actualmente se distinguen dos tipos de revoluciones cuánticas tecnológicas, tanto por sus orígenes fundamentales como por sus aplicaciones. Ambas revoluciones se aplican a la metrología cuántica.

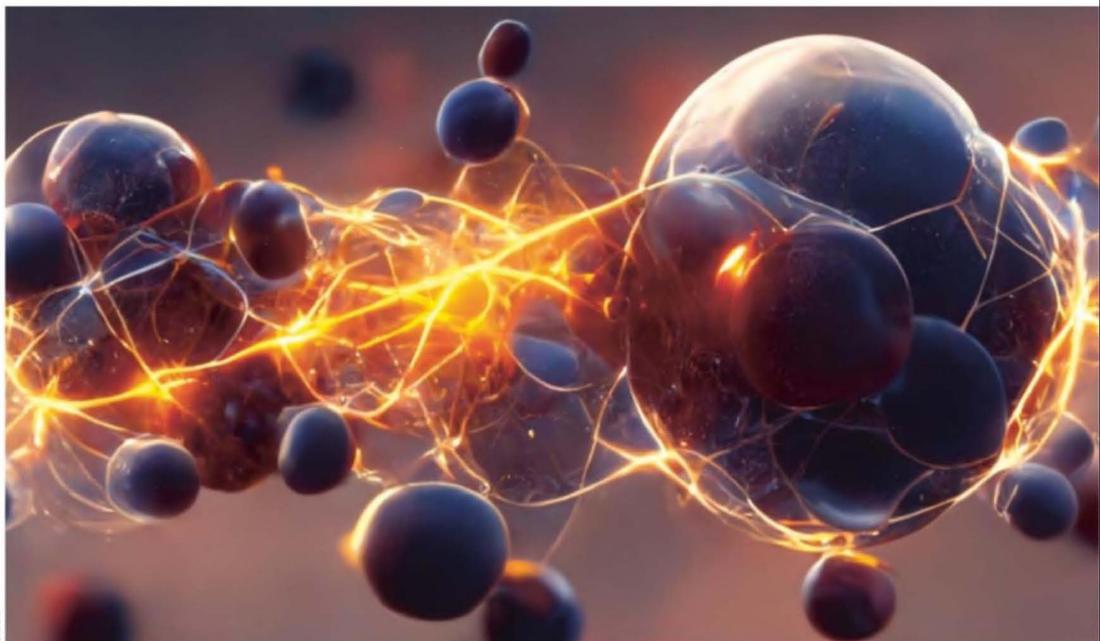
La primera revolución cuántica de las tecnologías se basa en la naturaleza discreta de las magnitudes físicas comentadas anteriormente, como los estados de energía de los átomos. La discretización de la física cuántica está estrechamente vinculada a la digitalización de las tecnologías que tanto ha cambiado nuestro mundo, y por ende a una mayor precisión que los mecanismos analógicos. La comprensión y aplicación de las leyes físicas del mundo atómico microscópico de la mecánica cuántica resultó a mediados del siglo xx en tecnologías innovadoras tales como el transistor y el láser. El impacto de esta primera revolución cuántica en nuestra sociedad difícilmente se puede subestimar. Ahora, nuestra creciente capacidad para manipular los efectos cuánticos en sistemas y dispositivos personalizados está allanando el camino para una segunda revolución cuántica.

La segunda revolución cuántica de las tecnologías se basa en el principio de superposición de la mecánica cuántica. El caso más emblemático se ejemplifica con el experimento de la doble rendija, en el que las propiedades de una única



GETTY

La comprensión y aplicación de las leyes físicas del mundo atómico microscópico de la mecánica cuántica resultó a mediados del siglo xx (primera revolución cuántica de las tecnologías) en tecnologías innovadoras tales como el transistor y el láser (en la imagen).



La segunda revolución cuántica de las tecnologías se basa en el principio de superposición de la mecánica cuántica. Cuando la superposición cuántica afecta a varias partículas, el fenómeno resultante es el entrelazamiento cuántico. En la imagen, una recreación del mismo con IA.

partícula entran en superposición. Cuando la superposición cuántica afecta a varias partículas, el fenómeno resultante es el entrelazamiento cuántico, que es el recurso fundamental en la información cuántica. Con ello se consiguen nuevos algoritmos cuánticos, simuladores cuánticos, etc. El principio de superposición es la manifestación del llamado paralelismo cuántico, por medio del cual se puede almacenar una cantidad ingente (exponencial) de información y aplicar múltiples operaciones a la vez (en paralelo).

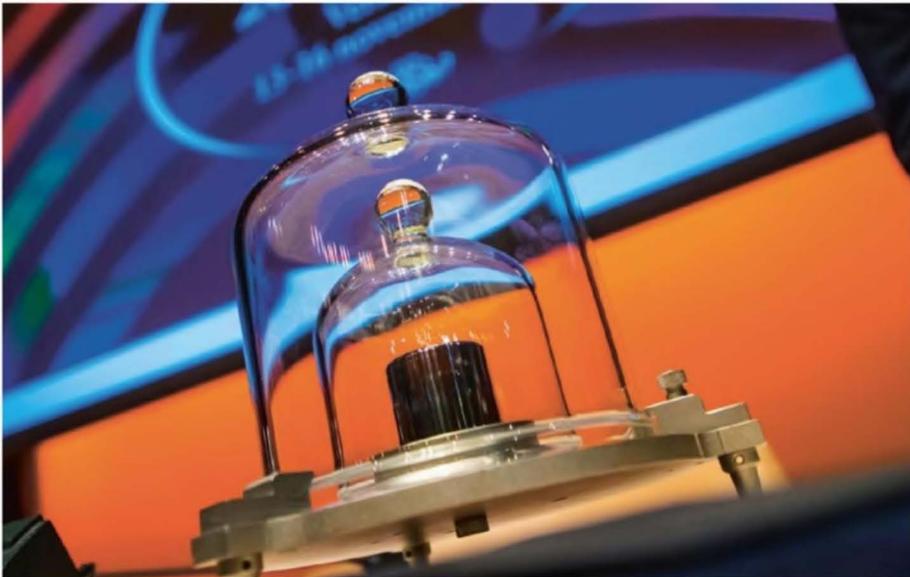
Se espera que en última instancia las tecnologías cuánticas puedan abrir nuevas oportunidades para abordar los grandes retos en campos como la energía, la salud, la seguridad y el medio ambiente. Algunos ya están empezando a ser explotados comercialmente. Otros aún podrían requerir años de investigación y desarrollo cuidadoso. Y, sin embargo, otros no podemos ni imaginarlos hoy en día, hasta que no los tengamos disponibles en nuestras manos como ya sucedió con el láser y el transistor.

**HOY EXISTEN DOS TIPOS DE REVOLUCIONES CUÁNTICAS TECNOLÓGICAS – CON DISTINTOS ORÍGENES Y APLICACIONES– Y AMBAS SE APLICAN A LA METROLOGÍA CUÁNTICA**

## EL NUEVO SISTEMA INTERNACIONAL (SI) DE UNIDADES DE MEDIDA

La piedra angular sobre la que se sustenta la metrología es el sistema SI de unidades de medida. Medir es un objetivo principal en la física, la química y otras ciencias naturales. Una magnitud física es una propiedad que se puede medir mediante algún aparato de medida. Así, el valor de la medida es algo objetivo. Para medir, se compara una magnitud física con una unidad que sirve de referencia y se materializa en un patrón de medida. De aquí que definir las unidades de medida apropiadamente sea crucial en metrología. En la antigüedad, medir y pesar se hacía mediante unidades basadas en artefactos como el codo del brazo del faraón, para medir longitudes, recipientes, para medir capacidades de líquidos, cereales, etc.

La renovación del Sistema Internacional de Unidades (SI), aprobada en la asamblea de la 26<sup>a</sup> Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) reunida en Versalles del 13 al 16 de noviembre de 2018, fue puesta en marcha en 2019. Constituye una gran revolución porque propone definir todas las unidades físicas básicas en función de 7 constantes definitorias cuyos valores se toman como fijos y sin incertidumbre, a partir de los cuales se van derivando las unidades de medida empezando por la unidad de tiempo, el segundo, luego, la unidad de longitud, el metro, y así sucesivamente pasando por el kilogramo (masa), el amperio (intensidad de corriente eléctrica), el kelvin (temperatura), el mol (cantidad de sustancia) y la candela (intensidad luminosa). De esta manera se consigue que las unidades del SI sean independientes del dispositivo, lo que trae consigo grandes ventajas como que la unidad de una cierta magnitud no se deteriore con el tiempo y que se pueda distribuir o realizar por todos los lugares del mundo, contribuyendo así a su universalidad y estabilidad.



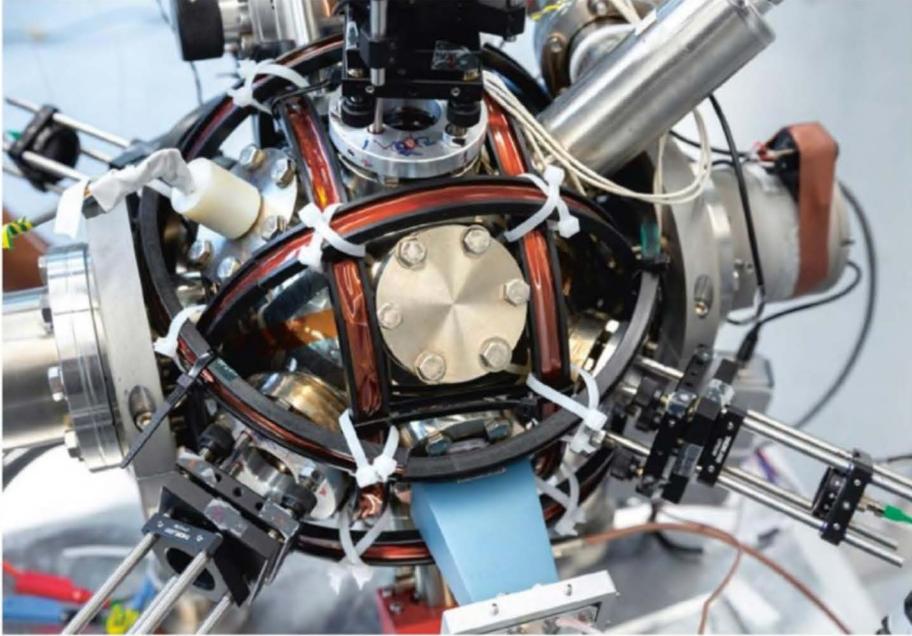
En 2019, la unidad básica de peso dejó de estar definida por este cilindro de platino e iridio atesorado durante 130 años en Sèvres (Francia). Fue vinculado a la constante de Planck de la física cuántica.



Al emplear definiciones de unidades basadas en constantes de la naturaleza no hay necesidad de redefinir la unidad de medida. Detrás de cada constante fundamental de la naturaleza hay una de las teorías fundamentales de la física: podemos decir que representan el ADN de nuestro universo.

Para conseguir estas ventajas, la revisión del SI se ha basado en los siguientes principios: 1) separar las definiciones de las unidades de sus realizaciones experimentales concretas, lo cual permite que las unidades puedan materializarse independientemente en cualquier lugar y en cualquier momento; 2) emplear definiciones de unidades basadas en constantes de la naturaleza cuyos valores se fijan como exactos, ya que son inmutables al estar asociados a leyes de la naturaleza bien conocidas y contrastadas experimentalmente; 3) crear una base segura para futuros desarrollos, ya que pueden añadirse nuevas realizaciones prácticas de las unidades a medida que se desarrollan nuevas tecnologías, sin necesidad de redefinir la unidad que sigue vinculada a una constante de la naturaleza. Detrás de cada constante fundamental hay una de las teorías fundamentales de la física: podemos decir que representan el ADN de nuestro universo. Si hubiera otros universos, cada uno tendría un conjunto de constantes fundamentales diferente.

**LA METROLOGÍA CUÁNTICA ESTÁ LLAMADA A  
SER EL PRIMER PROTAGONISTA DE LA SEGUNDA  
REVOLUCIÓN CUÁNTICA YA EN MARCHA**



ASC / IMPERIAL COLLEGE LONDON

Presentado por científicos del Imperial College London y M Squared en 2018, el acelerómetro cuántico funciona como un sistema autónomo de navegación que no se basa en ninguna señal externa. Es una brújula cuántica para la navegación precisa sin satélites.

## ÁREAS DE METROLOGÍA Y SENSORICA CUÁNTICA

Actualmente, se pueden distinguir varios grandes grupos de aplicaciones de la metrología cuántica, como los siguientes:

*Gravitación, rotación y aceleración.* Se utilizan técnicas de interferometría de átomos fríos, que permiten que interactúen con la materia durante un tiempo relativamente largo. Esto aumenta la sensibilidad y la precisión de las mediciones, lo que da lugar a una gravimetría, acelerómetros y giroscopios de alta precisión y sin deriva. Los dispositivos que utilizan estas técnicas pueden utilizarse en ingeniería civil, sistemas de navegación inercial y para la prospección y exploración de recursos naturales.

*Tiempo.* Esta es una de las áreas más desarrolladas de las tecnologías cuánticas. Los relojes atómicos ya utilizan estándares de microondas de fuente de cesio. Sin embargo, a medida que aumentan los requisitos de precisión, se necesitan nuevas tecnologías. Actualmente, los relojes atómicos ópticos son una realidad. Utilizan luz en el espectro visible y proporcionan una precisión horaria muy superior (hasta cien veces mayor). Pueden ser útiles en los sectores de las telecomunicaciones, sectores energéticos y para una sincronización óptima de las redes de comunicaciones (proveedores del tiempo universal terrestre).

*Campos Magnéticos.* Los magnetómetros que aprovechan vacantes de nitrógeno en el diamante son capaces de medir campos magnéticos muy pequeños. Aunque los dispositivos de interferencia cuántica con superconductores actuales (SQUID por sus siglas en inglés) pueden obtener una precisión de medición

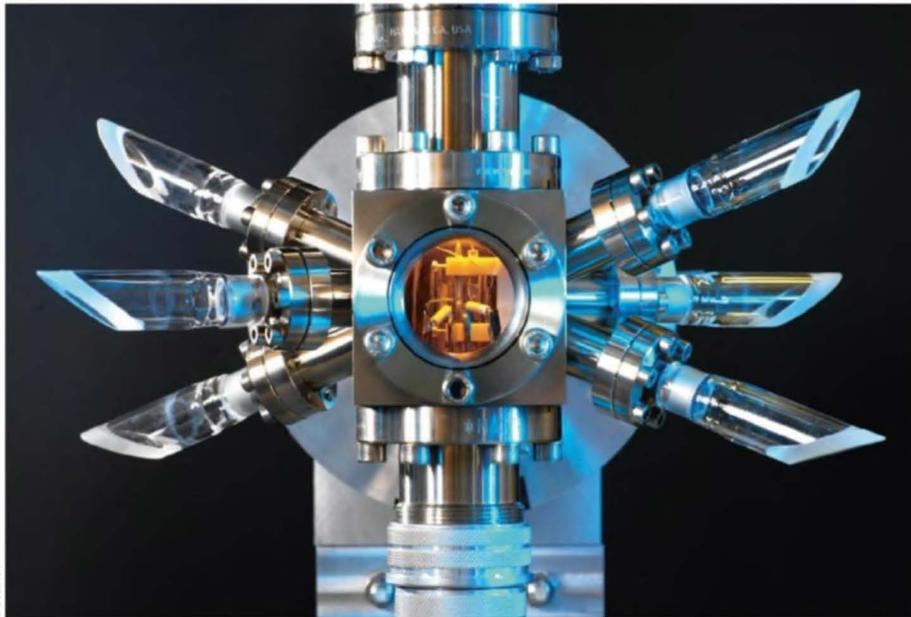
## LA METROLOGÍA CUÁNTICA SE UTILIZA PARA MEDIR EL TIEMPO CON EXTREMA PRECISIÓN

similar, requieren refrigeración criogénica; los magnetómetros de centros de vacantes de nitrógeno, en cambio, funcionan a temperatura ambiente. Pueden utilizarse para detectar y monitorizar la actividad del cerebro humano con grandes aplicaciones médicas.

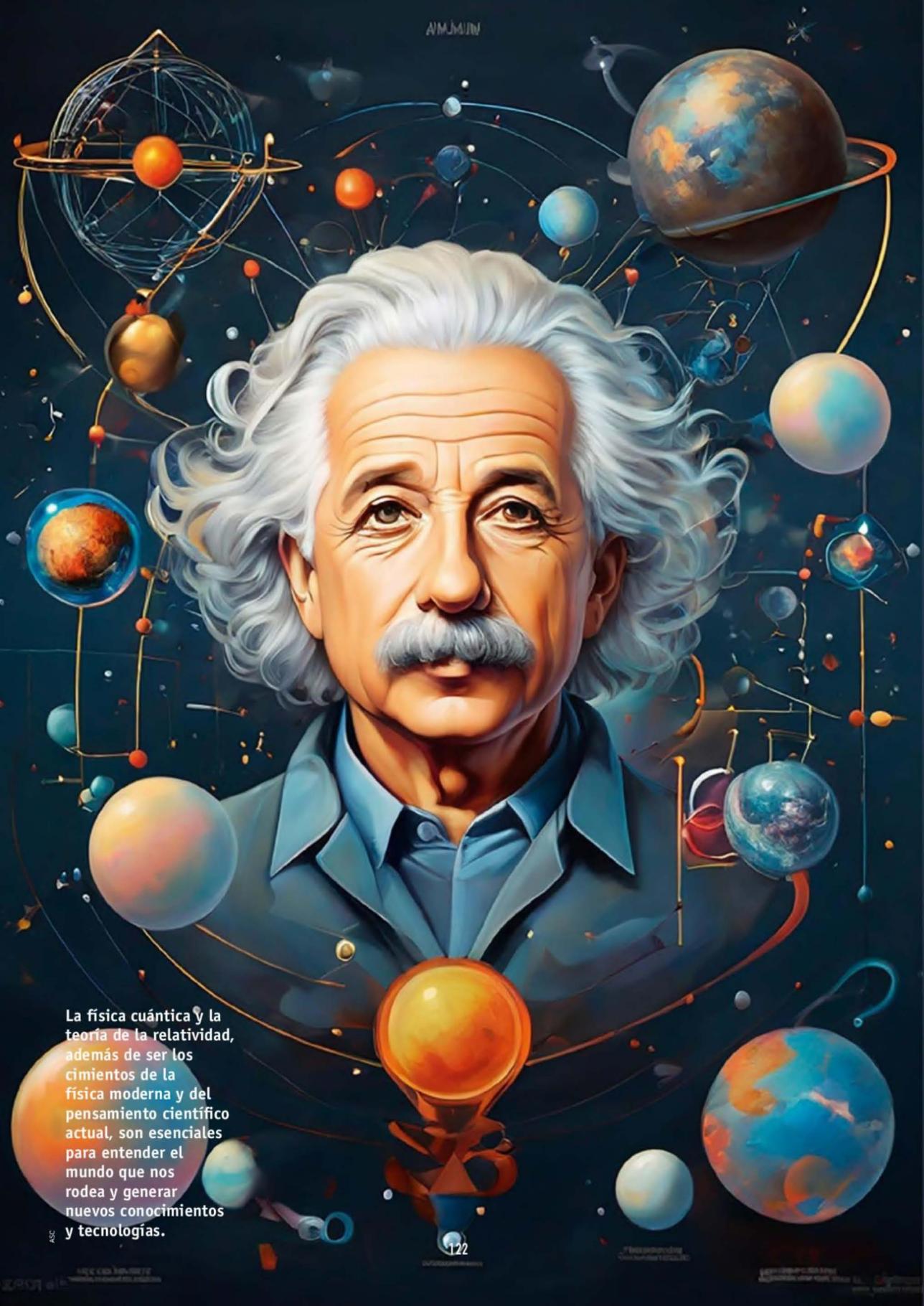
*Detección Química.* Son técnicas que explotan los efectos cuánticos, como los puntos cuánticos, en las estructuras semiconductoras a la nanoescala. Los dispositivos que utilizan estas técnicas son instrumentos potencialmente útiles para preservar la legalidad, por ejemplo, para detectar sustancias ilegales.

*Imágenes.* Entre las técnicas de obtención de imágenes mejoradas por medios cuánticos se encuentran las que emplean fotones correlacionados que mejoran sustancialmente la calidad de la imagen reduciendo el ruido de fondo, la microscopía multifotónica cuántica o la interferometría cuántica. Los dispositivos que explotan estas técnicas pueden aumentar enormemente la resolución de las imágenes.

El mundo tecnológico actual y su desarrollo futuro dependerá en gran medida de la calidad y precisión de los sensores utilizados en cada vez un mayor número de aplicaciones. La metrología cuántica está llamada a ser el primer protagonista de la segunda revolución cuántica en marcha. ■



En la imagen, reloj atómico óptico. Los actuales modelos utilizan luz en el espectro visible y proporcionan una precisión horaria muy superior. Este preciso cronometraje de los relojes atómicos se utiliza hoy en día para medir el tiempo y la distancia.



La física cuántica y la teoría de la relatividad, además de ser los cimientos de la física moderna y del pensamiento científico actual, son esenciales para entender el mundo que nos rodea y generar nuevos conocimientos y tecnologías.

LA MECÁNICA CUÁNTICA RELATIVISTA

# Los cimientos de la física moderna

POR GUILLERMO D. MEGÍAS VÁZQUEZ  
Físico teórico



SHUTTERSTOCK

El GPS de los móviles determina nuestra posición comunicándose con satélites que orbitan a miles de kilómetros de la Tierra a través de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz.

**S**iendo dos conceptos que pueden parecer ajenos a nuestra realidad cotidiana, la física cuántica y la teoría de la relatividad no solo constituyen los cimientos de la física moderna y del pensamiento científico actual, también son esenciales para entender el mundo que nos rodea y generar nuevos conocimientos y tecnologías. Por una parte, la física cuántica introduce el marco en el que se estudia el mundo a escala atómica y subatómica, así como las interacciones entre átomos y partículas que forman la materia. Por otra parte, las leyes de la relatividad de Einstein, análogas a las leyes clásicas de Newton que rigen los movimientos de los cuerpos, introducen importantes revoluciones conceptuales, entre ellas correcciones en las medidas del tiempo y la posición de los objetos, las cuales se hacen apreciables conforme nos acercamos a velocidades comparables a la de la luz (unos 300 millones de metros por segundo). En estas situaciones, la longitud de los objetos se contraerá, su tiempo se dilatará y su masa se incrementará.

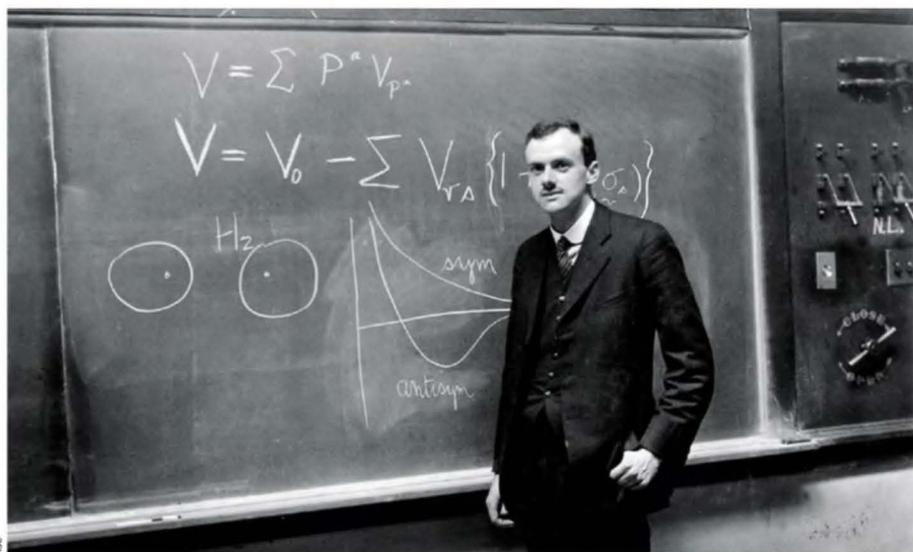
Un claro ejemplo de la relevancia de la cuántica y la relatividad en nuestro día a día puede encontrarse en el GPS de nuestros dispositivos móviles, los cuales determinan nuestra posición comunicándose con satélites que orbitan a miles de kilómetros de la Tierra a través de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz. Ello implica que cualquier mínima imprecisión (aun de microsegundos) en el envío y recepción de esas señales podría dar lugar a errores de cientos de me-

tros o varios kilómetros en nuestra posición. Para evitar esto, los satélites emplean relojes atómicos muy precisos que permiten incorporar esas correcciones relativistas y que funcionan a partir de los fundamentos de la física cuántica, pues su «segundero» se calibra a partir de la rápida transición entre los niveles de energía de un átomo. Esto permite una precisión de unos 9 mil millones de tic-tacs por segundo, dando lugar a lecturas sumamente acertadas para una medición exacta de la distancia y la posición en nuestros dispositivos.

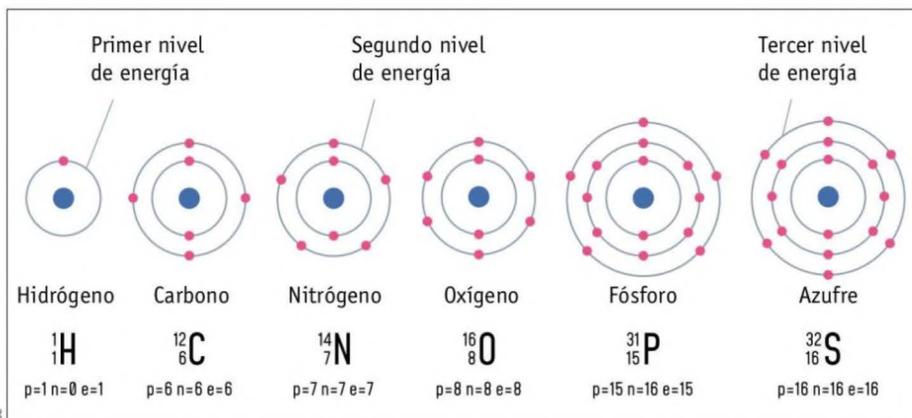
## LOS PROBLEMAS DE LA CUÁNTICA «ORDINARIA»

Pero para entender el origen de la mecánica cuántica relativista, este maridaje entre cuántica y relatividad que permite describir partículas que se mueven a velocidades próximas a la de la luz, debemos remontarnos a principios del siglo xx.

Cuando, en 1926, Schrödinger escribió su famosa ecuación para describir la evolución de partículas subatómicas como el electrón o los núcleos atómicos, se observaron importantes limitaciones pues no explicaba completamente los niveles de energía del átomo de hidrógeno o las propiedades magnéticas del electrón, como su espín y su momento magnético. La cuántica ordinaria fallaba al analizar observaciones experimentales cuando las velocidades de las partículas eran comparables a la de la luz, y tampoco describía los procesos de desintegraciones atómicas y nucleares en los que se generaban nuevas partículas. Esto último entraba en conflicto con un concepto clave de la teoría de la relatividad, la equivalencia masa-energía recogida en la famosa ecuación  $E=mc^2$  y que establece que la energía de un sistema de partículas debida a su masa y movimiento puede transformarse para dar lugar a nuevas partículas de distinta masa y velocidad, siempre que la energía total junto con otras propiedades, como la carga eléctrica del conjunto, se conserven.



Paul Dirac muestra un modelo mecánico cuántico de la molécula de hidrógeno.



Estructuras de los átomos del hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre. Todos contienen un núcleo y un número determinado de electrones orbitando.

## DIRAC Y LA UNIFICACIÓN DE RELATIVIDAD Y CUÁNTICA

Las bases para la correcta descripción y comprensión de estos hechos no se establecieron hasta un par de años después, en 1928, cuando el físico y matemático Paul A. Dirac propuso una ecuación para describir la evolución de los electrones que fuese compatible con la relatividad y la cuántica. Ello representó un enorme paso en la física de la época, pues predecía los resultados de experimentos a altas energías donde aparecían efectos relativistas. Permitía también describir completamente los niveles energéticos del átomo de hidrógeno, así como las propiedades magnéticas del electrón. En este contexto, el espín de la partícula aparecía de forma natural en la ecuación de Dirac, ... que incluso introducía una novedad no predicha ni por la cuántica ordinaria ni detectada por los experimentos de la época, la existencia de antimateria, lo que implicaba que para cada partícula, como el electrón ( $e^-$ ), existía una antipartícula, el positrón ( $e^+$ ) en este caso, de igual masa pero con ciertas propiedades cuánticas opuestas, como su carga eléctrica.

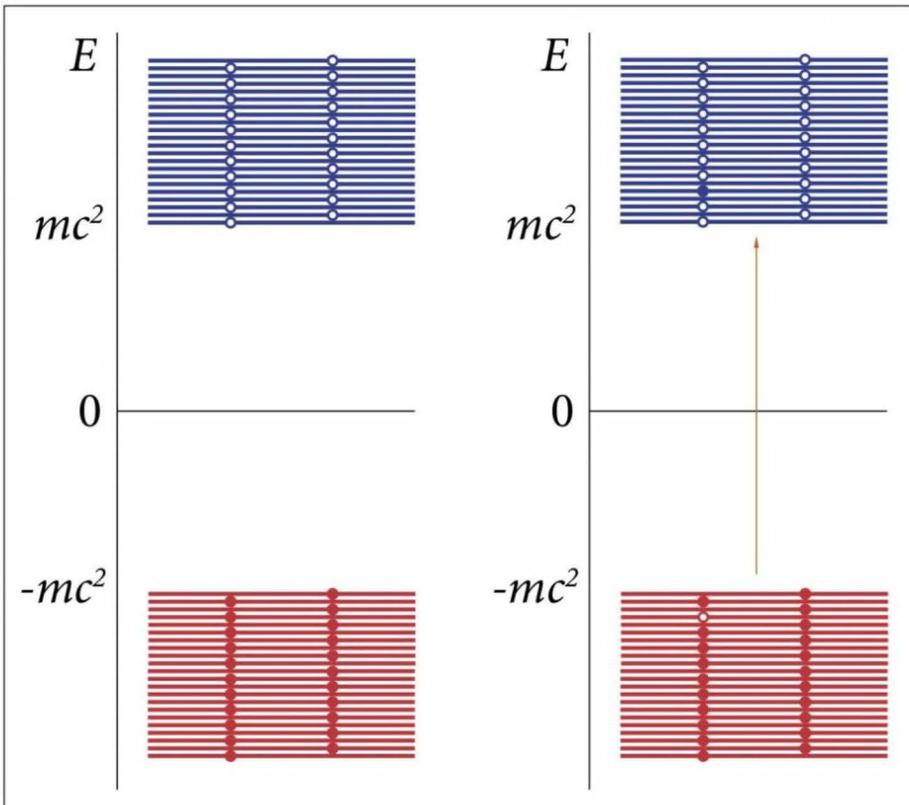
## Una ecuación para describirnos a todos:

$$(i\hbar \not{\partial} - m) \psi = 0$$

A pesar de su aparente sencillez, cada elemento de la ecuación de Dirac implica complejos cálculos para su resolución y, si bien se formuló originalmente para describir al electrón, actualmente se puede aplicar a partículas más complejas como los protones y neutrones que constituyen los núcleos atómicos, así como a sus componentes internos, los quarks. Dado que los seres humanos y todo lo que nos rodea estamos formados exclusivamente por átomos, y estos a su vez de neutrones, protones y electrones, la ecuación de Dirac permite describir nuestra naturaleza más íntima y, al mismo tiempo, la de la mayor parte del universo.

## EL MAR DE DIRAC Y LAS ANTIPARTÍCULAS

Dirac fue capaz de intuir el concepto de antimateria mucho antes de que ningún experimento sospechara siquiera de su existencia. Ello surgió al observar que su ecuación para el electrón admitía dos posibles soluciones, implicando aparentemente una de ellas la existencia de electrones de energía «negativa», lo que conducía a un sinsentido pues implicaría que esos electrones tendrían una masa negativa. En lugar de plantear este hecho como un fallo en su planteamiento, Dirac estaba tan convencido de la «belleza» de su teoría que propuso que tales estados existían, pero corresponderían a un mar infinito de electrones que ocuparían todos los niveles posibles de energía negativa. Así, redefinió el concepto de vacío, de la nada, como un pozo infinitamente profundo lleno de infinitos electrones con energía negativa. Con ello, cualquier electrón que fuese creado no tendría cabida en ese pozo y solo podría tener energía positiva como aquellos que únicamente eran observados. Por otra parte, en caso de que uno de



Esquema del vacío de Dirac, con electrones ocupando todos los niveles de energía negativa del pozo. La promoción de un electrón del pozo a los niveles superiores de energía positiva define la creación de un par electrón-positrón. Al mismo tiempo, un electrón fuera del pozo podría desaparecer al ser atraído hacia ese «hueco» del pozo (positrón) de carga positiva (aniquilación de pares).

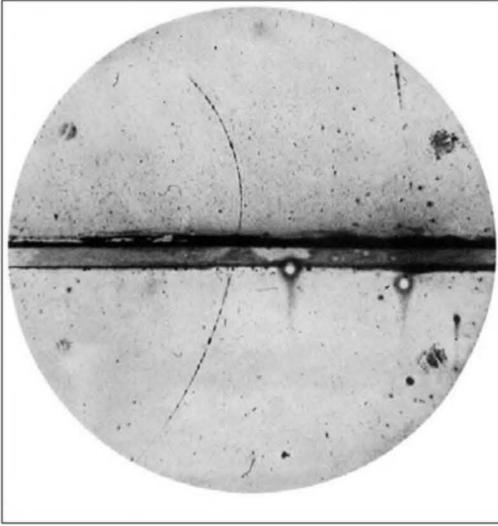


Imagen del primer positrón identificado por el físico Carl David Anderson en 1932.



El encuentro de una partícula con su antipartícula produce una aniquilación de las mismas.

esos electrones del pozo adquiriese la energía suficiente, saldría de ese sumidero como un electrón común de energía positiva pero, al mismo tiempo, dejaría un hueco en ese pozo que podría verse desde fuera como un electrón de igual masa pero carga positiva, su antipartícula.

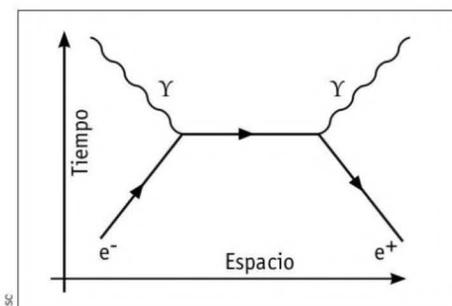
Esta predicción de Dirac se constató años después, en 1931, con la identificación del positrón en el estudio de los rayos cósmicos, formados por partículas de enorme energía procedentes de reacciones nucleares en estrellas como el Sol, explosiones de supernovas y otros fenómenos cósmicos, que alcanzan nuestra atmósfera, chocan a gran velocidad con las moléculas del aire y generan una cascada de partículas. En este zoo de partículas, además de algunas ya conocidas, como el electrón o el protón, se encontraron otras de masa idéntica pero carga opuesta, como el positrón y el antiprotón. Con ello, se determinó que para cada partícula existía su antipartícula y se descartó la «energía negativa» de los electrones, pues esa aparente energía negativa desaparecía al considerar la existencia de su antipartícula, el positrón. Así, Dirac no solo consiguió describir el comportamiento relativista del electrón, sino también el de su desconocida antipartícula.

## LA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS CONSTRUYE EL MODELO ESTÁNDAR ACTUAL DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS, EL MARCO QUE EXPLICA SU COMPORTAMIENTO Y SUS INTERACCIONES

## LA ENORME PRECISIÓN DE LA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

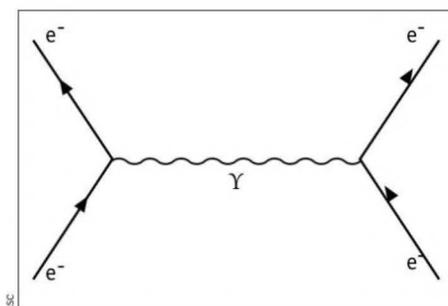
A pesar de todos sus éxitos, lo cierto es que la formulación de Dirac aún no estaba completa, pues suponía que el número de partículas en un sistema era constante, lo cual contradecía hechos experimentales como la creación o aniquilación de pares electrón-positrón que también se intuía en su modelo del vacío. Por otra parte, la idea del vacío como un mar invisible e infinito de partículas era inconsistente con el concepto de vacío como la nada, en la que no existiría ningún tipo de partícula.

Todos estos problemas fueron solventados por la teoría cuántica de campos, la cual se desarrolló entre las décadas de 1930 y 1950 por el propio Dirac, así como por otros científicos como Fock, Pauli, Tomonaga, Schwinger, Feynman o Dyson. Esta teoría construye el modelo estándar actual de la física de partículas, el marco que explica el comportamiento de las partículas elementales y sus interacciones, y establece una equivalencia entre partículas y campos (como el electromagnético) que se propagan por todo el espacio y que se manifiestan en forma de partículas. Así, el vacío ya no implica un mar infinito de partículas en un pozo del que pueden emerger, sino que estas surgen por la interacción entre sus campos. Esto permite explicar una de las características esenciales de la antimateria, observada experimentalmente, y es que el encuentro de una partícula con su antipartícula produce una aniquilación de las mismas junto con una extraordinaria liberación de energía, generalmente en forma de fotones, las partículas portadoras de la luz y a las que se asocia el campo electromagnético. De manera opuesta, la interacción entre fotones puede crear pares electrón-positrón, siempre que la energía de esos fotones sea al menos la suma de las masas del electrón y el positrón, en clara conexión con el principio de equivalencia masa-energía ( $E=mc^2$ ) de la relatividad, lo cual permite que, en una interacción entre partículas, el número o la naturaleza de estas pueda variar.



Sobre estas líneas, representación del diagrama de Feynman de la aniquilación electrón-positrón dando lugar a fotones.

El proceso inverso de interacción entre fotones (campos electromagnéticos) puede dar lugar a la creación de un par electrón-positrón.



El análisis de diagramas como el de la figura donde dos electrones interaccionan intercambiando un fotón ( $\gamma$ ), así como otros más complejos, son esenciales en la EDC para describir la interacción entre partículas, sus propiedades y la aparición de otras nuevas.



El vacío es como un pozo infinitamente profundo lleno de electrones con energía negativa.

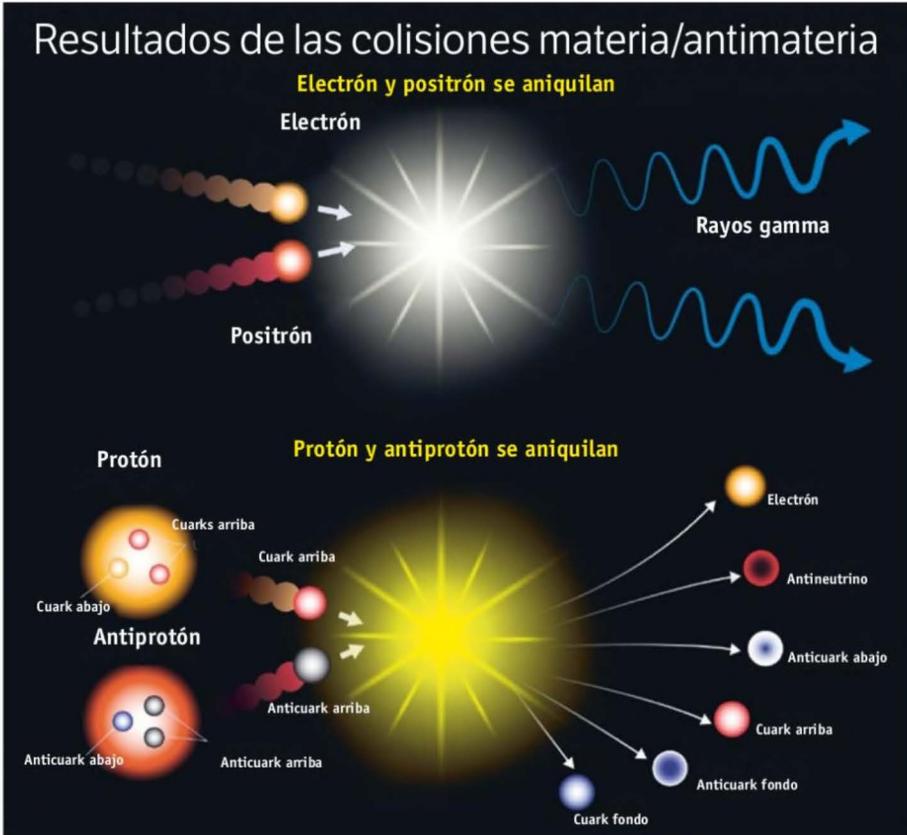
Todos estos conceptos quedan recogidos en la electrodinámica cuántica (EDC), la teoría cuántica de campos asociada a la interacción electromagnética entre fotones y partículas cargadas como electrones o positrones. La interacción entre partículas cargadas es así debida al intercambio de fotones (portadores del campo electromagnético) entre las mismas.

La EDC es la teoría más precisa desarrollada por el ser humano, capaz de hacer predicciones de hasta veinte cifras decimales de precisión, algo infrecuente en teorías anteriores. Ejemplo de ello es el cálculo teórico del momento magnético del electrón con una precisión del 0,000000001 % (1 parte por 10 billones) respecto a la medida experimental.

## Antipartículas: ¿partículas que viajan hacia atrás en el tiempo?

Una interpretación alternativa a esos «electrones» de energía negativa predichos por Dirac era que estos debían moverse hacia atrás en el tiempo. Ambas ideas se descartaron con el descubrimiento de que esas soluciones se referían a la antipartícula del electrón, el positrón, que implicaba una carga de signo opuesto pero ya no una energía o tiempo negativos.

Si bien matemáticamente un positrón sería el equivalente a un electrón de energía negativa o que viajase hacia atrás en el tiempo, esto es solo una entelequia matemática que no conecta con la realidad de estos positrones.



### ¿HACIA UNA TEORÍA DEL TODO?

Desde mediados del siglo xx, aparecieron teorías cuánticas relativistas para describir no solo la interacción electromagnética (EDC), sino también la fuerza nuclear débil (modelo electrodébil) y la fuerte (cromodinámica cuántica), permitiendo desarrollar un marco común para su estudio. Sin embargo, la descripción cuántica de la gravedad es un enigma que aún escapa a las mentes más brillantes, imposibilitando aunar las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza en un modelo cuántico-relativista única.

Aún a la espera de añadir esta pequeña pieza al puzle, la relación entre cuántica y relatividad ha posibilitado una amplia comprensión de la realidad en sus niveles más íntimos, desde predecir desconocidas partículas, como el bosón de Higgs, a explicar complejos procesos que ocurren en galaxias, estrellas y planetas. No obstante, aún hay muchos interrogantes que la cuántica relativista espera resolver en los próximos años, como la asimetría materia-antimateria del universo. Ello explicaría por qué desde la creación, por igual, de ingentes cantidades de materia y antimateria en el Big Bang, estas no se aniquilaron dando lugar a un cosmos de radiación y nada más, evolucionó a un universo formado exclusivamente por materia, es decir, por esas partículas descritas por Dirac que nos componen y que explican nuestra existencia tal y como la conocemos. ■



El caos cuántico aborda conjuntamente dos fenómenos que parecen incompatibles: la imprevisibilidad determinista del caos clásico y la aleatoriedad intrínseca del mundo cuántico.



# El Caos cuántico

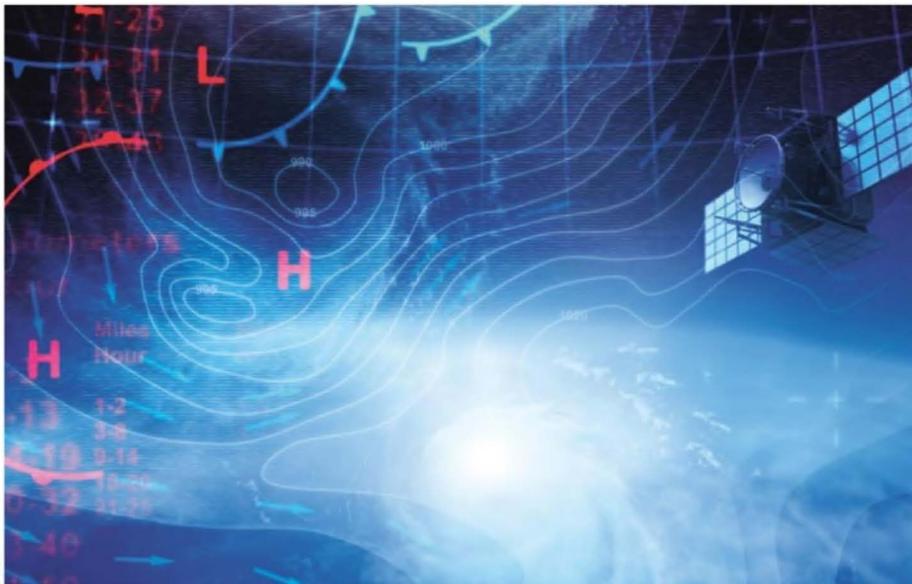
POR ARMANDO RELAÑO PÉREZ  
Departamento de Estructura de la Materia,  
Física Térmica y Electrónica  
Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos  
Universidad Complutense de Madrid

**T**odo el mundo ha mencionado alguna vez la palabra «caos». Se utiliza habitualmente como sinónimo de desorden o imprevisibilidad. Decimos que un fenómeno es «caótico» cuando no se aprecia en él ninguna estructura o cuando su evolución se presenta muy errática.

Seguramente, la característica más conocida del caos es la extrema sensibilidad a condiciones iniciales, más conocida como «efecto mariposa». Consiste en que una minúscula variación en cómo iniciamos un proceso basta para que sus resultados sean totalmente diferentes. Un ejemplo muy sencillo es una máquina de *pinball*: aunque pongamos muchísimo cuidado para repetir una buena tirada, resulta imposible lograr que la bola siga la misma trayectoria. Es más, si programamos un ordenador para que resuelva las ecuaciones que determinan su movimiento, bastará con cambiar la precisión con la que se almacenan los datos para obtener un resultado completamente diferente.

Esta misma propiedad está presente en las ecuaciones que gobiernan muchas de nuestras leyes físicas. Por eso, el caos aparece en fenómenos que no parecen tener ninguna relación entre sí: desde la previsión meteorológica, hasta la evolución de algunas reacciones químicas complejas. Sin embargo, ninguno de los ejemplos habituales se refiere al mundo cuántico. ¿Se trata de una omisión intencionada?

Como suele suceder cuando hablamos de física cuántica, la razón es sorprendente. La ecuación de Schrödinger no tiene las propiedades matemáticas necesarias para que aparezca el caos. Esto significa que dos átomos preparados en un estado muy parecido evolucionarán siempre de forma muy similar; no observaremos en ellos el menor rastro de efecto mariposa. Sin embargo, hay algo muy extraño en esta afirmación. Sabemos que la física cuántica es una teoría más correcta que lo



El caos aparece en fenómenos como la previsión meteorológica. En la imagen de arriba, montaje de un satélite junto a un mapa con la configuración de la presión en superficie usando isobaras (líneas de igual presión), áreas de alta y baja presión.

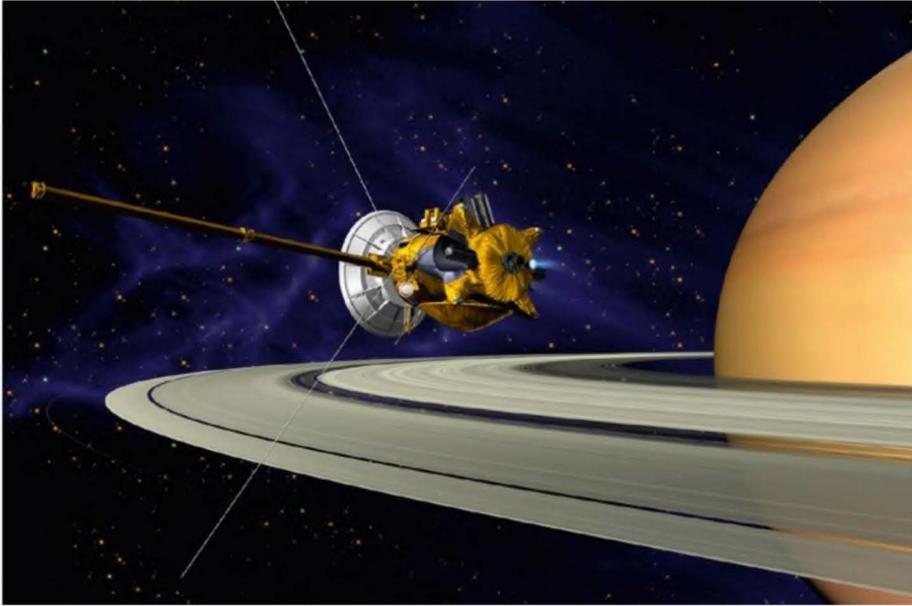


Albert Einstein en la casa del físico austriaco Paul Ehrenfest, en junio de 1920. En su regazo está Paul Ehrenfest Jr. que también llegaría a ser físico.

que llamamos «física clásica», que es el conjunto de leyes en las que los fenómenos cuánticos no representan ningún papel. Y sabemos también que las leyes cuánticas y las leyes clásicas proporcionan básicamente los mismos resultados si el objeto que estudian es grande. Entonces, ¿cómo es posible que la ecuación más importante de la física cuántica sea incompatible con el caos? ¿Es porque en el mundo cuántico no tiene sentido hablar de trayectorias, razón por la cual el significado del término «evolución» es mucho más difícil de interpretar?

## CAOS Y PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

Una primera aproximación al caos cuántico consiste en estudiar cómo emerge nuestra realidad clásica desde el mundo cuántico. El principio de correspondencia establece que las predicciones clásica y cuántica son casi indistinguibles hasta que transcurre un cierto tiempo, denominado tiempo de Ehrenfest. Este tiempo es muy pequeño en el mundo subatómico; por eso nuestra intuición clásica deja de funcionar en él. Sin embargo, según la formulación original de este principio, debería ser muy grande en objetos apreciables a simple vista. El problema es que esta idea se formuló cuando apenas había empezado a desarrollarse la teoría del caos. Ahora sabemos que no es correcta: el tiempo de Ehrenfest crece muy despacio cuando hay caos. Y esto significa que en tal caso deberían poder apreciarse a simple vista extraños fenómenos cuánticos, como que un mismo objeto se encuentre en dos sitios diferentes a la vez.



La nave espacial *Cassini-Huygens* de la NASA/ESA/ASI captada el 1 de julio de 2004 durante su maniobra de inserción en órbita alrededor de Saturno.

Un ejemplo muy llamativo es Hiperión, un satélite de Saturno de forma irregular y rotación caótica. Los cálculos nos indican que bastarían 20 años de evolución para que los efectos cuánticos empezaran a ser visibles en él. Y dado que el sistema Solar existe desde hace miles de millones de años, Hiperión debería encontrarse en un extravagante estado cuántico, en el que distintos ejes de rotación coexisten al mismo tiempo.

Es posible que la persona que está ahora mismo leyendo este artículo haya fruncido el ceño. La nave Cassini-Huygens tomó en 2010 imágenes muy cercanas de Hiperión, ¡y su aspecto era totalmente normal, sin rastro de extraños fenómenos cuánticos! Si vuelve a leer el párrafo anterior se dará cuenta de que hemos utilizado el condicional para escribirlo. La razón es que los físicos tenemos que simplificar la realidad para poder hacer cálculos. Y aunque esto suele funcionar muy bien, el cálculo para Hiperión resulta muy delicado, pues requiere suponer que este satélite no interacciona con absolutamente nada de lo que hay a su alrededor, lo cual sabemos que no es correcto.

En realidad, aún no entendemos muy bien cómo surge nuestro mundo clásico de la física cuántica; por eso, todavía queda pendiente una buena explicación pa-

## QUEDA PENDIENTE UNA EXPLICACIÓN PARA LA RELACIÓN ENTRE EL CAOS Y LA EMERGENCIA DE EXTRAÑAS PROPIEDADES CUÁNTICAS

ra la relación entre el caos y la emergencia de extrañas propiedades cuánticas. De momento, lo que sí sabemos es que si aislamos un objeto físico para que apenas interactúe con sus alrededores, tal y como necesitan los ordenadores cuánticos, las sorprendentes características del mundo cuántico aparecerán mucho antes cuando hay caos.

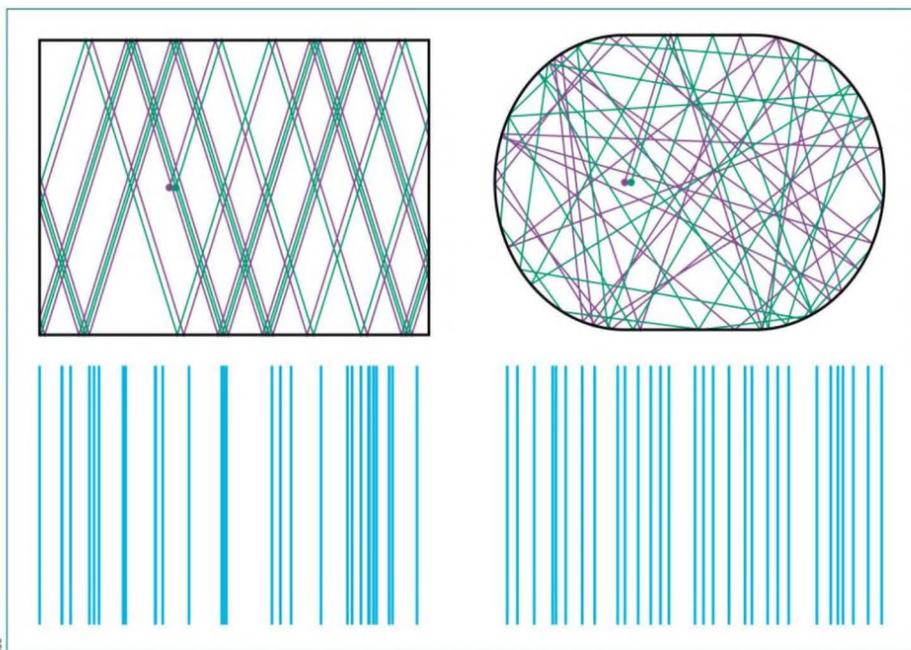
## ORDEN Y DESORDEN EN NIVELES DE ENERGÍA

Aunque el ejemplo que acabamos de poner es muy llamativo, lo cierto es que no se refiere directamente a las manifestaciones cuánticas del caos; solo nos indica que los fenómenos cuánticos aparecen mucho antes en objetos con trayectorias caóticas. Así pues, podemos preguntarnos: ¿existe algún indicador verdaderamente cuántico del caos?

Las primeras investigaciones sobre caos cuántico se concentraron en responder esta pregunta. Quienes se dedicaron a ello comenzaron por estudiar las propiedades cuánticas de algunos sistemas físicos que clásicamente generan caos. Uno de los ejemplos más sencillos son los llamados «billares cuánticos», en los que una partícula va rebotando de una pared a otra, tal y como hace la bola en un billar de verdad. Pero, en lugar de centrarse sus trayectorias, que no están bien definidas debido al principio de indeterminación, las investigaciones se concentraron en una propiedad cuántica: los valores permitidos de la energía. En un billar normal, podemos impulsar la bola con cualquier energía; en un billar cuántico, no. Si dispusiéramos de un taco cuántico y de una técnica perfecta, observaríamos que la energía de la bola cuántica no crece de forma continua al aumentar la fuerza propinada al taco, sino a saltos. Esto significa que acabamos de dar con una propiedad que solo existe en física cuántica: los valores permitidos para la energía de un objeto cuántico.



El «efecto mariposa» es un concepto que se origina en la teoría del caos y describe cómo pequeñas acciones pueden tener efectos significativos y a menudo impredecibles en el futuro.



Sobre estas líneas, representación de las trayectorias de las bolas de billar y cómo se disponen las energías permitidas en las versiones cuánticas.

## Billares cuánticos y caos

Llamamos «billar» a una bola encerrada en un recinto plano que rebota una y otra vez contra las paredes que lo delimitan. Aunque es difícil imaginar un sistema físico más sencillo, lo cierto es que su dinámica puede llegar a ser muy complicada. Si la forma del recinto es rectangular, entonces no sucede nada especialmente interesante: dos bolas que se lanzan en paralelo siguen todo el rato trayectorias muy parecidas. Sin embargo, si el recinto tiene forma de estadio de atletismo, las trayectorias se vuelven caóticas: los rebotes se suceden de forma desordenada y, tras unos pocos, dos bolas que se lanzaron inicialmente en paralelo siguen caminos totalmente diferentes.

En la figura de arriba hemos representado las trayectorias de dos bolas en cada uno de estos casos (una en color verde y otra en color magenta). Junto a ellas, hemos representado también cómo se disponen las energías permitidas en las versiones cuánticas de ambos billares, de forma que la distancia entre cada dos líneas representa la cantidad de energía que hay que añadir para pasar de un valor a otro. Podemos observar que los comportamientos clásico y cuántico parecen opuestos. Las energías cuánticas parecen más desordenadas (las distancias entre ellas son más variables) cuando las trayectorias clásicas son más regulares. Esta conclusión, que parece provenir de una simple inspección visual, está sustentada por resultados estadísticos significativos.

## EL ORDEN ESTÁ MÁS O MENOS VINCULADO A LA APARICIÓN DEL CAOS

La primera manifestación cuántica del caos se observa aquí de una forma muy peculiar. En general, los posibles valores de la energía de un objeto cuántico forman una secuencia de apariencia desordenada. Lo curioso es que el grado de desorden es claramente mayor si no hay caos. En este caso, la distancia entre dos energías consecutivas se comporta de forma totalmente aleatoria: podemos encontrarnos con que son casi idénticas o con que hay mucha distancia entre ellas. Por el contrario, el caos cuántico se manifiesta en una cierta tendencia al orden. En un objeto que manifiesta caos, como un billar con forma de estadio de atletismo (véase el recuadro «Billares cuántico y caos»), no es posible encontrar distancias ni muy grandes ni muy pequeñas. Más aún, estas distancias tienden a compensarse muy rápidamente: si, por casualidad, aparecen dos energías más cerca de lo normal, lo más probable es que la siguiente esté más lejos. Si bien esta curiosa circunstancia se formuló como conjetura en los años ochenta del siglo pasado, ahora no solo estamos seguros de que es correcta, sino que constituye la herramienta más utilizada para diagnosticar si un objeto cuántico manifiesta caos. Así pues, no solo parece desterrado el efecto mariposa del mundo cuántico, sino que el orden está más o menos vinculado a la aparición del caos.

## CAOS CUÁNTICO Y BORRADO DE INFORMACIÓN

Podemos pensar que esto es tan solo una extravagancia más de la física cuántica. Si un núcleo atómico puede estar entero y desintegrado al mismo tiempo, ¿que hay de raro en que el caos cuántico ordene en lugar de desordenar? La cuestión es que el desorden vinculado al caos conlleva consecuencias muy importantes. Un



Cuando vertemos un poco de tinta en un vaso de agua, cada gotita es golpeada una y otra vez por las moléculas de agua y la tinta «olvida» cómo estaba distribuida al principio.

ejemplo es lo que sucede cuando vertemos un poco de tinta en un vaso de agua. Cada gotita es golpeada una y otra vez por las moléculas de agua que hay en el vaso, lo que da lugar a una trayectoria caótica e imprevisible, a consecuencia de la cual la tinta «olvida» cómo estaba distribuida al principio. Lo curioso es que esto facilita predecir cómo será el estado final del vaso de agua. Si repetimos el experimento con la misma cantidad de tinta, el resultado será siempre el mismo, sin que importe si echamos las gotas una a una y en distintos lugares del vaso o si las echamos todas juntas. Debido al caos, no necesitamos conocer estos detalles para saber lo que va a ocurrir: el agua quedará homogéneamente coloreada. Y esto resulta ser un principio básico de las leyes de la termodinámica, que representan un papel fundamental en todos los ámbitos de la ciencia.

Podemos preguntarnos, pues: ¿sucede lo mismo si inyectamos unas gotas de tinta cuántica en un vaso cuántico de agua? Sabemos que el caos cuántico tiende a ordenar los valores permitidos de la energía. Pero ¿tiene esto algo que ver con la evolución de este sistema físico? ¿Significa que las leyes cuánticas de la termodinámica son muy diferentes en el mundo cuántico?

Nos encontramos aquí con otra sorpresa más. A pesar de todo lo anterior, los objetos cuánticos caóticos también «se olvidan» de su estado inicial, y también alcanzan un estado final que no depende de ese detalle. Lo curioso es que la razón es totalmente diferente. La ecuación de Schrödinger no funciona igual que las ecuaciones que gobiernan la dinámica clásica. En ella, el papel protagonista no lo representan las trayectorias, sino los estados vinculados a cada posible valor de la energía. Cuando no hay caos cuántico, estos estados son sencillos y diferentes entre sí: cada uno da lugar a unas determinadas propiedades físicas. La consecuencia es que la evolución del objeto cuántico depende en gran medida de



Aunque pongamos muchísimo cuidado para repetir una buena tirada en una máquina de *pinball*, resulta imposible lograr que la bola siga la misma trayectoria.

## ¿Cómo evoluciona un objeto cuántico?

Las ecuaciones que gobiernan la física clásica nos permiten calcular la posición y la velocidad de cada partícula que compone un objeto. A partir de esta información podemos inferir cualquier otra propiedad física, desde la presión hasta la corriente eléctrica.

La realidad cuántica es muy diferente. El principio de indeterminación nos dice que la posición y la velocidad no están bien definidas al mismo tiempo. La consecuencia es que los objetos cuánticos evolucionan de forma muy distinta a la de los objetos clásicos. Cada uno de los posibles valores de su energía está asociado a un estado cuántico en el que las propiedades físicas no están bien definidas; si medimos cualquiera de ellas, el resultado será aleatorio, de acuerdo con una cierta probabilidad. Para complicar aún más la situación, nuestro objeto cuántico tampoco tiene por qué tener bien definida la energía: podemos prepararlo para que esté en lo que se llama una «superposición», con varias energías distintas al mismo tiempo. Lo importante, en cualquier caso, es que la ley de conservación de la energía también funciona en el mundo cuántico: implica que siempre tendremos la misma probabilidad de obtener cada uno de sus posibles valores en una medición. A consecuencia de ello, la evolución de las propiedades físicas de un objeto cuántico depende de cómo son estas propiedades en cada uno de los estados que se corresponden con cada uno de los valores posibles de la energía. Tras un periodo transitorio inicial, basta conocer estos detalles para saber cuál será el resultado de una observación.



cuáles de ellos son importantes en el estado inicial. En este caso, nuestro objeto «se acuerda» de cómo era al principio.

Esta situación se altera por completo cuando hay caos. Entonces, los estados vinculados a los posibles valores de la energía son tan complicados que no hay forma de distinguir unos de otros. La consecuencia es que da igual cuáles de ellos sean relevantes en el instante inicial. No importa cómo hayamos preparado al principio nuestras gotitas cuánticas de agua; al cabo de poco tiempo, cada una podrá encontrarse en cualquier lugar del vaso, razón por la cual este se verá también de un color homogéneo. Por este motivo, las leyes de la termodinámica no tienen nada de extravagante en el mundo cuántico. A este respecto, parece que hemos vuelto a la normalidad.

A día de hoy, aún quedan muchas preguntas por resolver en el campo del caos cuántico. Una de ellas se refiere, precisamente, al mecanismo mediante el que se pierde la información sobre el estado inicial. ¿Se esconde aquí el efecto mariposa cuántico? Todavía no tenemos una respuesta. Lo que sí sabemos es que, debido al caos cuántico, tampoco sería fácil repetir una buena tirada en un *pinball* cuántico. En poco tiempo, la bola estaría en todas partes a la vez y emergería en un lugar diferente, de forma aleatoria, en cada observación. ■

# El espín

POR FRANCISCO R. VILLATORO  
Físico y profesor de la Universidad de Málaga

El espín es solo un número que nos permite  
contar el número de componentes de un  
campo cuántico relativista.

GETTY



La palabra «espín» significa giro (*spin*) en inglés. Por ello, mucha gente imagina que el electrón es una pequeña esfera que gira sobre sí misma cuando piensa en su espín. Esta imagen es incorrecta por muchas razones. Una de ellas es que al aplicar una rotación completa de 360 grados a un electrón no se recupera su estado original; se necesita una doble rotación completa de 720 grados para lograrlo. Para entenderlo, Dirac propuso imaginar el electrón como dos esferas concéntricas conectadas por un cinturón. El electrón sería la esfera interior y la esfera exterior representa el infinito. Al rotar la esfera interior 360 grados, el cinturón se torsiona y se necesita una segunda rotación de 360 grados para deshacer dicha torsión, cuando al mismo tiempo el cinturón de Dirac da una vuelta alrededor de la esfera interior durante el proceso.

El comportamiento del electrón bajo rotaciones es contraintuitivo. Algunos físicos han propuesto imaginar el electrón como líneas de flujo de un campo con la forma de una cinta de Moebius, una superficie que tiene una sola cara. El estado del electrón sería un punto en la superficie de la cinta. Al girar 360 grados se recorre la mitad de la superficie de la cinta y se acaba en un punto en la otra «cara» de la cinta; para retornar al punto inicial hay que seguir recorriendo la superficie hasta dar otra vuelta completa y alcanzar los 720 grados. Esta analogía no agrada a muchos físicos, pues la realidad es mucho más sencilla de entender.

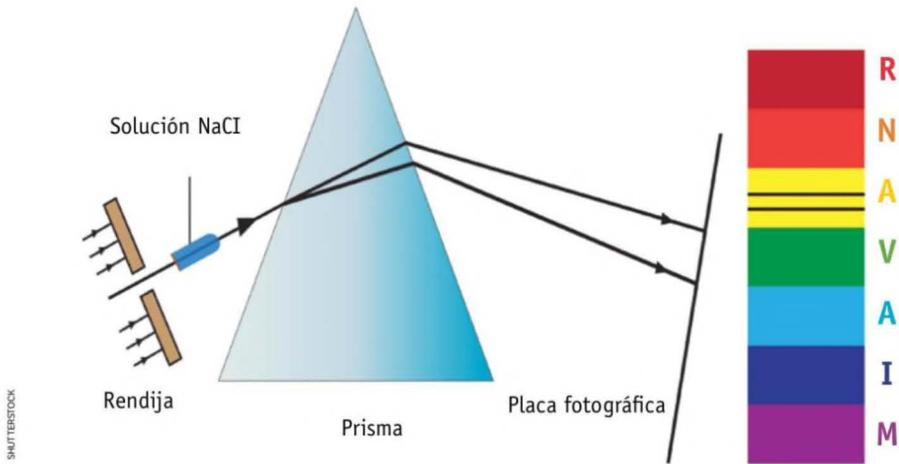
El *espín* es una propiedad física de los campos cuánticos, que heredan sus partículas. El campo del electrón tiene dos componentes (llamadas izquierda y derecha); el electrón es una excitación cuántica en cada una de estas dos componentes. Aplicar una rotación espacial de 360 al electrón requiere aplicarla a las dos componentes de su campo; en dicho proceso se intercambian entre sí las excitaciones en las componentes izquierda y derecha. Por ello, para recuperar el estado inicial del campo del electrón hay que aplicar una segunda rotación de 360 grados, acompañada de un nuevo intercambio entre las componentes.

## LA HISTORIA DEL ESPÍN DEL ELECTRÓN

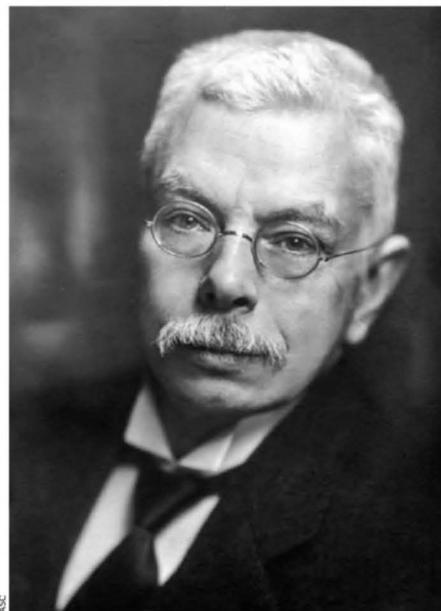
La física atómica nació al intentar entender los espectros de los átomos. Los gases emiten luz cuando se calientan y dicha luz es una mezcla de unos pocos colores bien definidos, llamados líneas espectrales. En 1896, Zeeman observó que un campo magnético externo desdoblaba las líneas espectrales en el sodio; para explicarlo, Lorentz propuso que los átomos contenían partículas cargadas (más tarde llamadas electrones) que se movían en órbitas cerradas y se comportaban como pequeños imanes con un momento magnético; ambos acabaron recibiendo el Premio Nobel de Física en 1902.

El efecto Zeeman no tenía explicación en los primeros modelos atómicos de Bohr y Sommerfeld. En ellos, los electrones están ligados al núcleo en estados llamados orbitales que tienen una energía discretizada (cuantizada). Los espectros atómicos son debidos a transiciones (saltos) de los electrones entre orbitales. En 1922, Stern

# LA FÍSICA ATÓMICA NACIÓ AL INTENTAR ENTENDER LOS ESPECTROS DE LOS ÁTOMOS



Hendrik Antoon Lorentz, físico neerlandés galardonado con el Nobel de Física (1902).



El físico neerlandés Pieter Zeeman premiado con el Nobel de Física (1902).

y Gerlach lograron medir el momento magnético del electrón, que resultó ser la mitad del magnetón de Bohr (su valor para un átomo según su modelo atómico). Sommerfeld, Landé y Pauli intentaron explicar el efecto Zeeman como una rotación de los orbitales de los electrones más externos respecto a los más internos. Pero esta idea no casaba con la medida de Stern y Gerlach. Todo apuntaba a una nueva propiedad intrínseca del electrón.

En 1925, Uhlenbeck y Goudsmit, y Kronig explicaron el efecto Zeeman suponiendo que el electrón era una carga puntual que giraba sobre sí misma, con lo que

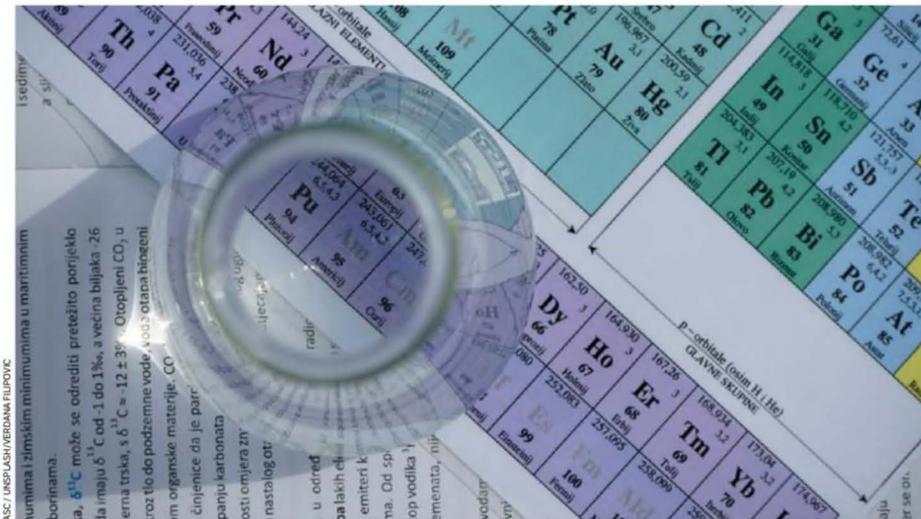


GETTY

Pauli y Sommerfeld en Ginebra en 1934.

tendría un momento angular intrínseco; además, al ser una carga eléctrica en rotación se comportaría como un pequeño imán. Así nació el espín del electrón, que inspiró el principio de exclusión de Pauli con el que se logró entender la tabla periódica de los elementos. Físicos como Lorentz tenían serias dudas, porque la velocidad de giro del electrón superaría la velocidad de la luz en el vacío. Para evitarlo, en 1926, Pauli matematizó el espín recurriendo a un giro en un espacio abstracto interno, descrito mediante matrices de dos componentes. Thomas observó que el espín tenía unidades de momento angular induciendo un efecto de precesión relativista en el electrón.

La naturaleza del espín fue aclarada por Dirac, que introdujo en 1928 su ecuación cuántica relativista para el electrón, que generalizaba las matrices de Pauli a matrices de cuatro componentes, dos de ellas para el electrón y otras dos para una hipotética partícula idéntica al electrón pero con carga positiva. En 1932, Anderson la descubrió en los rayos cósmicos y la bautizó como positrón, la primera partícula de antimateria. El espín se había logrado explicar como un efecto cuántico relativista que desaparecía en el límite clásico, pero su origen último aún era una incógnita.



ASC / UNSPLASH/VERONIKA FILOVIC

El «espín» es relevante en relación con la estructura de los átomos y la configuración electrónica de los elementos de la tabla periódica (imagen de arriba).

## El origen de la masa

Gracias al mecanismo de Higgs del modelo estándar, el espín y la masa del electrón están relacionados de forma fascinante. La masa de todos los leptones cargados, el electrón y los quarks, es debida a que sus dos quiralidades (izquierda y derecha), que existen porque su espín es un medio, están acopladas entre sí mediante el vacío a baja energía del campo de Higgs,



que intercambia la excitación de ambas componentes. Sin el campo de Higgs ambas se moverían a la velocidad de la luz en el vacío, como si fueran dos electrones diferentes sin masa. La interacción con el vacío del Higgs supone un retraso en la propagación del electrón, que explica el origen de su masa. A veces se imagina este proceso como un movimiento oscilatorio en zigzag (llamado *zitterbewegung*); pero dicha oscilación no es observable porque su amplitud es menor que la mitad de la longitud de onda de De Broglie del electrón, luego es inferior a su tamaño.

El campo de Higgs tiene un segundo vacío a alta energía, que cambió al actual durante la transición de fase electrodébil, cuando el universo tenía del orden de un picosegundo de existencia. Antes de dicha transición de fase, ninguna partícula tenía masa y todas se propagaban a la velocidad de la luz en el vacío. En colisionadores electrón-protón se ha observado como la masa del bosón vectorial Z disminuye conforme crece la energía en el centro de masas de la colisión. A partir de la energía que corresponde a esta transición de fase, el bosón Z se comporta como un fotón, como si no tuviera masa. A un electrón le pasa lo mismo, pero no hemos podido observarlo en colisionadores, porque los electrones tienen una masa tan pequeña comparada con la energía de las colisiones que se comportan como si no tuvieran masa.

El mecanismo de Higgs explica la masa de los leptones cargados porque son fermiones de Dirac. No sabemos si los neutrinos (leptones neutros), que tienen espín un medio, son fermiones de Dirac o de Majorana. En el primer caso, el mecanismo del Higgs también explicaría su masa, aunque modificado con un mecanismo de tipo balancín (*seesaw*), para que las componentes quirales derechas de los neutrinos, aún no observadas, puedan adquirir gran masa y escapar a su detección. En el segundo caso se requiere un mecanismo diferente para explicar la masa de los fermiones de Majorana.

**EL ESPÍN Y LA MASA DEL ELECTRÓN ESTÁN RELACIONADOS DE FORMA FASCINANTE GRACIAS AL MECANISMO DE HIGGS DEL MODELO ESTÁNDAR**



Peter Higgs visita el experimento CMS (Solenoide Compacto de Muones) del LHC (Gran Colisionador de Hadrones) que se encuentra bajo tierra en la frontera de Francia y Suiza.

## EL CAMPO CUÁNTICO DEL ELECTRÓN

La función de onda solución de la ecuación no relativista de Schrödinger se interpreta como la probabilidad de localizar la posición de un electrón en un átomo. Pero dicha idea no se puede aplicar a la ecuación relativista de Dirac; la función de onda con cuatro componentes no es una distribución de probabilidad, pues conduce a probabilidades negativas. En 1932, Dirac propuso interpretarla como un campo cuántico; las soluciones de su ecuación serían operadores cuánticos de creación y aniquilación de electrones y positrones. Fock, en 1933, y Furry y Oppenheimer, en 1934, desarrollaron esta idea en analogía con la cuantización del campo electromagnético. La interpretación probabilística se asignaba a un operador cuántico que cuenta el número de partículas, la diferencia entre el número de electrones y el número de positrones (de ahí que pueda ser un número negativo, aunque su probabilidad esté bien definida).

Durante décadas, el campo cuántico del electrón fue considerado un objeto matemático que ayudaba a realizar cálculos; se pensaba que solo las partículas tenían realidad física. Pero tras el nacimiento de la electrodinámica cuántica (QED), en 1949, que describía las interacciones entre electrones, positrones y fotones mediante sendos campos cuánticos, nació la idea de que el objeto físico fundamental no eran las partículas, sino los campos. Esta idea no fue aceptada hasta que nació el modelo estándar de la física de partículas en 1973, que describe todas las interacciones fundamentales, salvo la gravitación, con teorías cuánticas de campos con espines diferentes: espín cero (Higgs), espín un medio (electrones, neutrinos y quarks) y espín unidad (fotones, bosones débiles y gluones).

## EL IRREDUCTIBLE ESPÍN

El origen último del espín es la relación entre los campos cuánticos y el espaciotiempo. La formulación matemática de esta idea fue desarrollada por Wigner en 1939 en el marco de la teoría de representaciones de grupos. Un conjunto de transformaciones geométricas forma un grupo de simetría cuando se pueden

## DURANTE DÉCADAS SE PENSABA QUE SOLO LAS PARTÍCULAS TENÍAN REALIDAD FÍSICA

aplicar dos consecutivas para obtener una nueva y todas se pueden invertir para deshacerlas. En la teoría especial de la relatividad, las transformaciones del espacio-tiempo son rotaciones y reflexiones especulares en el espacio, y cambios en la velocidad relativa llamados *boosts* (que son análogos a «rotaciones» en el tiempo), que constituyen el grupo de Lorentz; cuando se añaden las traslaciones en el espacio se obtiene el grupo de Poincaré. Wigner demostró que el origen del espín son las representaciones irreducibles del grupo de Poincaré (donde irreducible significa que la representación no se puede descomponer en otras más sencillas).

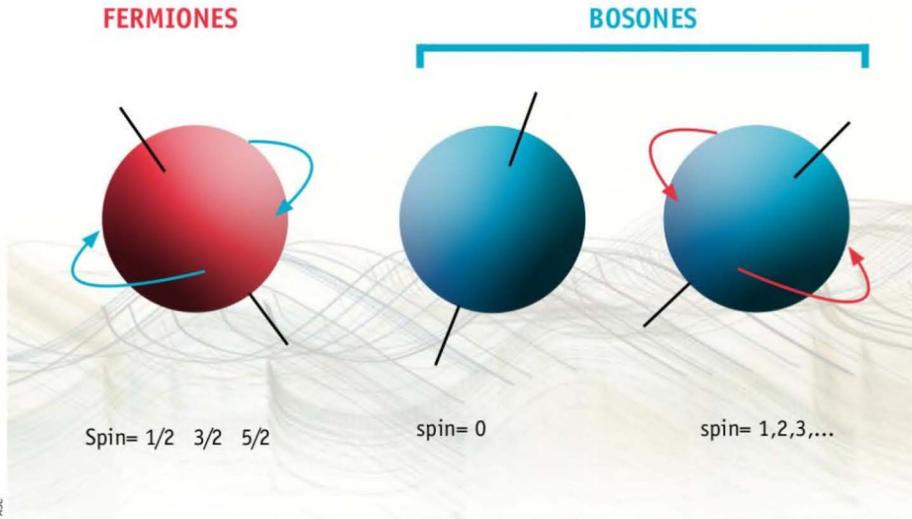
Las partículas no son objetos puntuales, sino excitaciones de un campo cuántico localizadas en cierto volumen del espacio (con un tamaño dado por su longitud de onda de De Broglie). Por ello, al rotar el espacio dichas excitaciones rotan con él. Además, el campo cuántico de una partícula puede tener varios componentes: el campo de Higgs tiene una, pero el campo del electrón y de un quark tiene dos, y el campo de los bosones débiles W y Z, tres. Cuando se aplica una rotación en el espacio al campo cuántico de una partícula rotarán todos sus componentes de forma simultánea como una entidad única.

La propiedad más característica de la física cuántica es la linealidad; los estados de un sistema cuántico se pueden combinar mediante sumas ponderadas para dar lugar a nuevos estados físicos, las superposiciones cuánticas. Para los campos cuánticos hay que usar representaciones lineales en forma de vectores y para las transformaciones geométricas matrices que multiplican («transforman») dichos vectores. En las representaciones del grupo de Lorentz, el número de componentes de estos vectores viene determinado por el espín  $s$  del campo mediante la sencilla fórmula  $2s + 1$ . Un campo con una sola componente tiene espín cero ( $s = 0$ );



UNSPLASH/FREDERICK MARSCHALL

Los estados de un sistema cuántico se pueden combinar mediante sumas ponderadas para dar lugar a nuevos estados físicos, las superposiciones cuánticas.



Los fermiones difieren de los bosones en la naturaleza de su espín, siendo semientero o racional para los fermiones y entero para los bosones.

uno con dos componentes, espín un medio ( $s = 1/2$ ); uno con tres componentes, espín unidad ( $s = 1$ ), y así de forma sucesiva.

Las representaciones irreducibles del grupo de Lorentz se caracterizan por dos parámetros de Casimir. Uno discreto, el espín del campo, y otro continuo, la masa del campo. Este último parámetro se interpreta como la energía mínima necesaria para excitar el estado de tipo partícula del campo (si la energía usada es mayor, el resto de la energía será cinética). Este parámetro es importante porque los campos cuánticos sin masa solo pueden tener dos componentes, sin importar su espín, en un espacio con tres dimensiones; dichas dos componentes son transversales al movimiento de la partícula a la velocidad de luz en el vacío. Así el fotón y los gluones, con espín uno, tienen dos componentes, igual que el hipotético gravitón, que tiene espín dos, o un teórico neutrino sin masa que tiene espín un medio.

Las partículas de los campos con espín entero se llaman bosones y las de los campos con espín semientero, fermiones. Las componentes de los campos de bosones se llaman polarizaciones; este nombre está inspirado en la polarización de la luz, que es debida a nivel cuántico a que el fotón tiene dos componentes. En los campos de fermiones se prefiere el término *quiralidades*. El electrón y los quarks de espín  $s = 1/2$  tienen dos quiralidades, levógira y dextrógira (o izquierda y derecha, o  $-1/2$  y  $+1/2$ ). El hipotético gravitino con espín  $s = 3/2$  tiene cuatro quiralidades, que se suelen denominar como  $-3/2$ ,  $-1/2$ ,  $+1/2$  y  $+3/2$ . El modelo estándar es quiral porque la interacción débil solo afecta a las componentes izquierdas de los fermiones y a las derechas de los antifermiones.

Por tanto, en esencia, el espín es solo un número que nos permite contar el número de componentes de un campo cuántico relativista. Un número que tiene una asociada una magnitud física con unidades de momento angular y que permite asociar un momento magnético al electrón.

## El magnetismo en la materia

Hasta que Heisenberg explicó el ferromagnetismo gracias al espín del electrón y el principio de exclusión de Pauli en una serie de artículos entre 1925 y 1927, el origen del magnetismo de los imanes fue un misterio. Los electrones se comportan como pequeños imanes gracias a que su espín les dota de un momento magnético. Cuando un material se magnetiza, los espines de los electrones más externos de los átomos se alinean. En el modelo de Heisenberg hay una fuerza entre los espines de electrones de átomos vecinos, llamada «interacción de intercambio», que permite que los espines se alineen al aplicar un campo magnético externo. Cuando todos los espines están alineados sus momentos magnéticos se suman hasta alcanzar un valor macroscópico, la magnetización del imán.

En la teoría de Dirac, el origen del momento magnético del electrón es que el espín tiene las mismas unidades que el momento angular, pues ambos son la magnitud conservada asociada a una simetría rotacional (en el espacio en el caso del momento angular y en un «espacio interno» en el caso del espín). Pero la explicación moderna de este fenómeno requiere usar la electrodinámica cuántica, el llamado factor de forma electromagnético, que depende de la polarización del vacío.

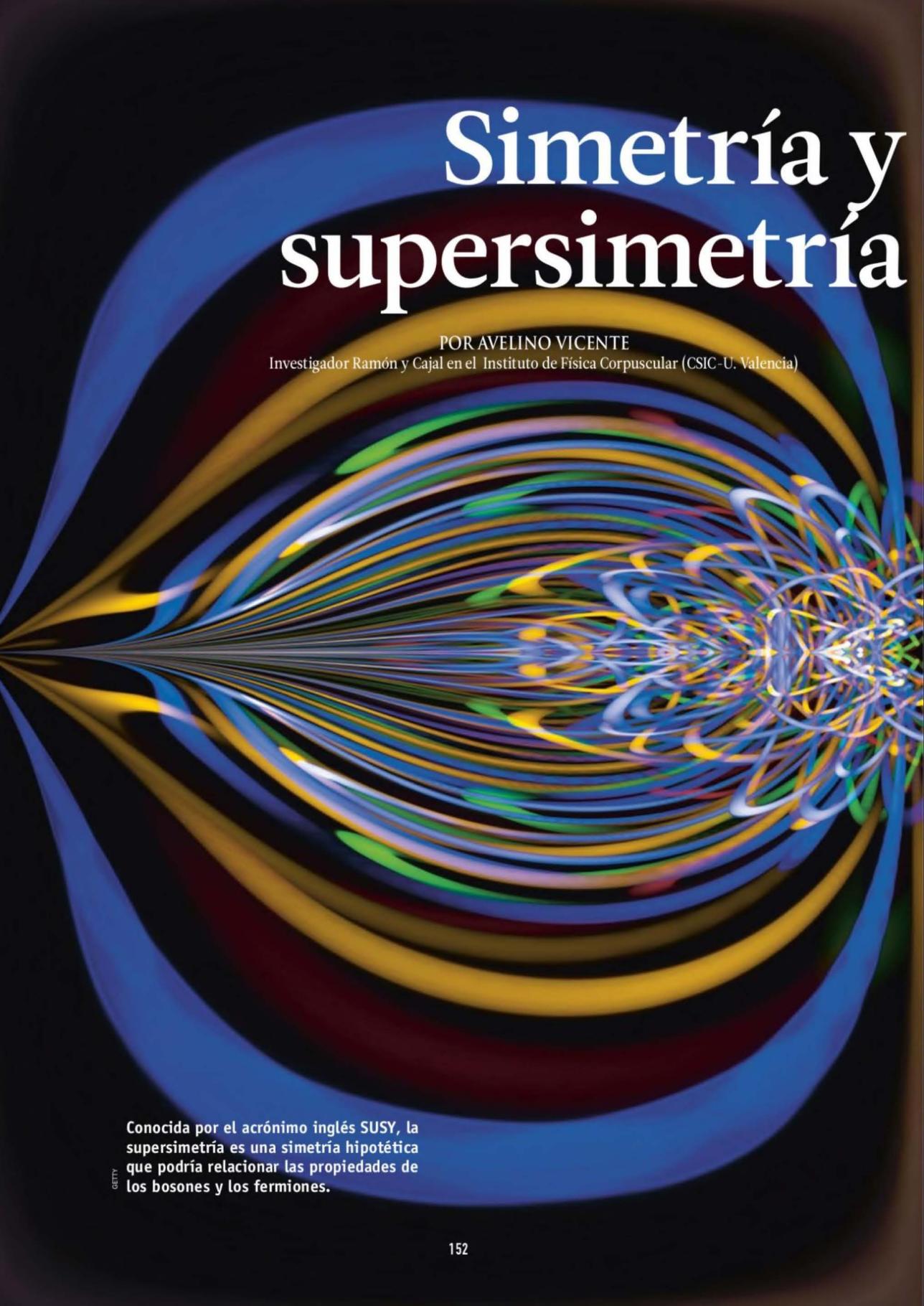
La idea básica es que las fluctuaciones cuánticas del vacío del campo electromagnético se pueden interpretar como fotones virtuales que se acoplan a los dos componentes del campo del electrón. Estos fotones virtuales inducen un movimiento de la carga entre ambas componentes, similar a una rotación en forma de hélice, que induce la aparición de un momento magnético proporcional al espín. Así, el electrón se comporta como una carga eléctrica y como un pequeño imán debido a que dicha carga rota porque su espín es un medio. El cálculo del efecto de la polarización vacío sobre el electrón requiere incluir más de un fotón virtual, así como pares electrón-positrón virtuales, lo que conduce a la llamada anomalía del momento magnético del electrón. Esta anomalía es el parámetro más preciso que se ha calculado en toda la física, con doce dígitos significativos. Más aún, dicho valor teórico está en perfecto acuerdo con el valor medido en los experimentos.

### LAS TECNOLOGÍAS BASADAS EN EL ESPÍN

El espín es responsable del magnetismo de la materia, por lo que está en la base de muchas aplicaciones tecnológicas. Como las modernas unidades de disco duro de alta capacidad de almacenamiento. Fueron posibles gracias a nuevos sensores magnéticos basados en la magnetorresistencia gigante descubierta en 1988 por Grünberg y Fert (premio Nobel de Física en 2007). Este efecto cuántico se observa en películas delgadas que alternan capas ferromagnéticas y no magnéticas. La resistencia eléctrica es baja cuando los espines apuntan en la misma dirección y alta cuando apuntan en direcciones opuestas.

Una tecnología emergente es la espintrónica, que usa el espín del electrón para desarrollar nuevos dispositivos electrónicos. Esta tecnología promete más eficiencia energética y más densidad de almacenamiento de información. Además, tiene aplicaciones en los futuros ordenadores cuánticos. Todavía no ha llegado al mercado masivo, pero se espera que en las próximas décadas todos los teléfonos móviles incluyan dispositivos espintrónicos. ■

# Simetría y supersimetría



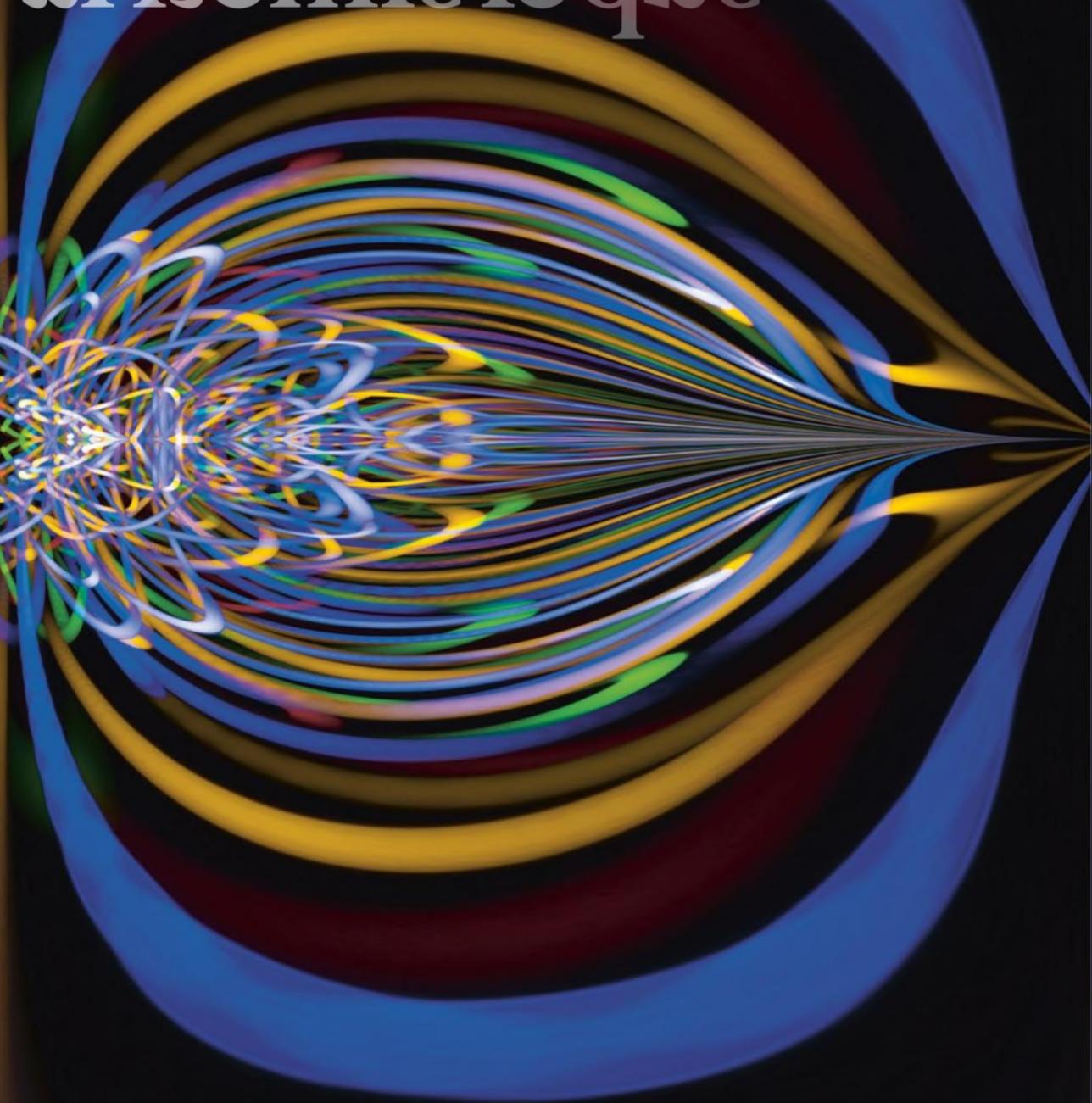
POR AVELINO VICENTE

Investigador Ramón y Cajal en el Instituto de Física Corpuscular (CSIC-U. Valencia)

Conocida por el acrónimo inglés SUSY, la supersimetría es una simetría hipotética que podría relacionar las propiedades de los bosones y los fermiones.

GETTY

γ sirtēmiš  
sirtēmirəqur





La simetría de paridad dice que las leyes de la física permanecerían inalteradas bajo inversiones especulares, es decir, el universo se comportaría igual que su imagen en un espejo.

**L**as personas que nos dedicamos a la física tenemos amigos de todo tipo y, como es natural, la mayoría son ajenos a nuestra disciplina. Sin embargo, esto no nos impide conversar en ocasiones sobre cuestiones relacionadas con la física o que se nos escape a los especialistas, apasionados como somos por las maravillas de nuestro trabajo, algún tecnicismo. Y si algo suelen decirme a menudo es que los físicos nos pasamos el día hablando de simetrías. Simetrías por aquí y simetrías por allá. Parece que todo tiene que ver con ellas, desde la física más elemental hasta la más avanzada. Y, efectivamente, así es. Nuestra obsesión está plenamente justificada: la física moderna no podría entenderse sin el concepto de simetría. Es más, incluso hemos sido capaces de ver la física clásica con nuevos ojos una vez hemos apreciado plenamente el poder de las simetrías para dar forma al mundo que nos rodea.

## EL CONCEPTO DE SIMETRÍA

Empecemos aclarando qué queremos decir en el mundillo de la física cuando usamos la palabra «simetría». Para ello, conviene recurrir a un par de situaciones familiares. La primera de ellas tiene que ver con el cuerpo humano. Si nos olvidamos de posibles detalles y nos fijamos solamente en la apariencia exterior, el

lado izquierdo del cuerpo de una persona es igual al lado derecho. Por esta razón, cuando nos ponemos frente al espejo observamos una imagen idéntica (de nuevo, salvando posibles detalles) a nosotros mismos. De hecho, si se coloca una cámara fotográfica con cuidado y evitamos que se vea el borde del espejo, sería imposible distinguir una foto hecha apuntando al espejo de una foto hecha directamente a nosotros. Consideremos ahora un segundo ejemplo. Coge una copa, de las que utilizarías para degustar un buen vino. Si la apoyas sobre la mesa y la haces girar sobre su eje, la copa tiene el mismo aspecto independientemente del ángulo de rotación que elijas. Es más, si la copa fuera perfecta y sin imperfecciones y tuvieras que salir de la habitación por un instante, alguien podría hacerla girar un cierto ángulo y tú serías incapaz de notar dicha rotación a tu regreso.



La copa siempre parecerá igual sin importar cómo se gire sobre su eje de rotación.

De forma general, decimos que una simetría es una operación que, al ser aplicada sobre un determinado sistema, lo deja exactamente igual que antes de aplicarla. En el primero de los ejemplos antes comentados, la simetría se llama «paridad» y consiste en intercambiar izquierda con derecha. Esta es justamente la operación que realiza un espejo. Vemos que dicha operación no tiene ningún efecto sobre ciertos sistemas, como el aspecto exterior del cuerpo humano. En cuanto al segundo ejemplo, la simetría involucrada se conoce como «simetría cilíndrica». Es propia de sistemas que, como los cilindros, se quedan exactamente igual si los hacemos girar alrededor de un cierto eje. Es lo que le sucede a nuestra copa de vino, pero también a otros objetos de uso cotidiano, como un rollo de papel higiénico. En resumen, y tal y como hemos visto en estos ejemplos, detectar las simetrías de un cierto sistema es equivalente a determinar qué operaciones podemos realizar sobre él que no lo alteren en lo más mínimo.

Hay muchos tipos de simetría, algunos más visuales, como los antes mencionados, y otros más abstractos. Por ejemplo, podríamos hablar de la simetría de una expresión matemática si tras realizar una determinada operación sobre ella

**UNA SIMETRÍA ES UNA OPERACIÓN QUE, AL SER  
APLICADA SOBRE UN DETERMINADO SISTEMA,  
LO DEJA IGUAL QUE ANTES DE APLICARLA**

la expresión obtenida coincide con la que teníamos inicialmente. De hecho, existen numerosas ramas de las matemáticas en las que el concepto de simetría resulta tremendamente útil para entender ciertos resultados de una manera más sencilla. Además, las simetrías que son de interés en física están muy bien descritas por las matemáticas modernas.

## **LAS SIMETRÍAS EN LA FÍSICA MODERNA**

A estas alturas, el lector ya está familiarizado con la idea de simetría, ese término con el que parecemos casi obsesionados. Sin embargo, es probable que se pregunte por qué este concepto resulta tan apreciado por la física moderna. Por lo dicho hasta ahora, las simetrías pueden parecer más bien una curiosidad. Algo que podemos apreciar en una imagen, un objeto o un cierto sistema complejo, pero que no nos aporta nada especial. ¿Por qué le damos tanta importancia a las simetrías en física? ¿Por qué nos obsesionan tanto? Debido a sus dos grandes utilidades: sirven de guía para construir nuevas teorías y nos desvelan algunos de sus misterios más ocultos.

Imaginemos que queremos describir las leyes de la física en un mundo que fuera una esfera perfecta. Resulta evidente que este sistema presenta una simetría, puesto que cualquier rotación aplicada a una esfera da como resultado otra esfera idéntica a la original. Las leyes de la física deben reflejar este hecho. En particular, no pueden depender del punto de la esfera en el que nos encontremos. En caso contrario, si alguna predicción de dichas leyes variara al pasar de un punto a otro, podríamos distinguir entre ellos y ya no habría tal simetría, lo cual nos parecería inaceptable. En cierto modo, las simetrías nos dicen que «no todo vale». Esta forma de ver las simetrías como guías que delimitan la forma de nuestras teorías impregna toda la física moderna. Por ejemplo, la física de partículas actual está construida sobre simetrías que relacionan unas partículas con otras y que determinan de qué forma pueden interactuar entre sí. Del mismo modo, nuestra teoría gravitatoria más sofisticada, la relatividad general de Einstein, también descansa sobre sólidos principios de simetría.

Ya hemos visto que una de las grandes utilidades de las simetrías es guiar la construcción de nuevas teorías. Esto, por sí solo, ya es tremendamente potente. Pero hay más. Las simetrías nos cuentan algunos de sus secretos. Esto lo descubrió la matemática alemana Emmy Noether en la segunda década del siglo xx. El famoso teorema de Noether, uno de los resultados de la física matemática más profundos de la historia, establece una relación entre simetrías y cantidades conservadas. Las cantidades conservadas de un sistema son las que no varían con el tiempo. El ejemplo más famoso es la energía («que se transforma pero no se destruye»), pero también contamos con muchos otros, como la cantidad de movimiento, el momento angular o la carga eléctrica. Noether descubrió que el origen profundo de todas estas cantidades conservadas es una simetría. De forma más general, los sistemas con simetrías de un determinado tipo inevitablemente cuentan con ciertas cantidades conservadas. Este fantástico resultado permite descubrir cosas de una teoría simplemente buscando sus simetrías, lo cual suele ser más sencillo, y se aplica a toda la física, tanto clásica como cuántica. Por su generalidad y tremendo alcance, no hay estudiante que se encuentre con el teorema de Noether y no quede fascinado, sintiendo que está tocando una «verdad de nuestro universo».

## Emmy Noether

**A**malie «Emmy» Noether nació el 23 de marzo de 1882 en el seno de una familia judía en la ciudad bávara de Erlangen, en Alemania. Pese a que no se interesó especialmente por las matemáticas durante su infancia, decidió adentrarse en esta disciplina justo en el momento en el que se comenzaba a admitir mujeres en las universidades bávaras. En 1907, bajo la supervisión de Paul Gordan, Noether defendió su tesis, convirtiéndose de este modo en la segunda mujer en Alemania en doctorarse en matemáticas, tras la también ilustre Sofia Kovalévskaya. Su área de trabajo fue el álgebra abstracta y pronto se convirtió en una de las mayores expertas en la teoría de invariantes. Por esta razón, fue invitada a Gotinga en 1915 por David Hilbert y Felix Klein, quienes solicitaron su ayuda para comprender algunos aspectos matemáticos de la incipiente teoría de la relatividad general. Así fue como Noether comenzó a trabajar en física teórica, siendo su famoso teorema la más destacada de sus contribuciones. La profunda conexión entre simetrías y cantidades conservadas que descubrió Noether se encuentra, sin lugar a dudas, entre los hallazgos más maravillosos de toda la historia de la física matemática.



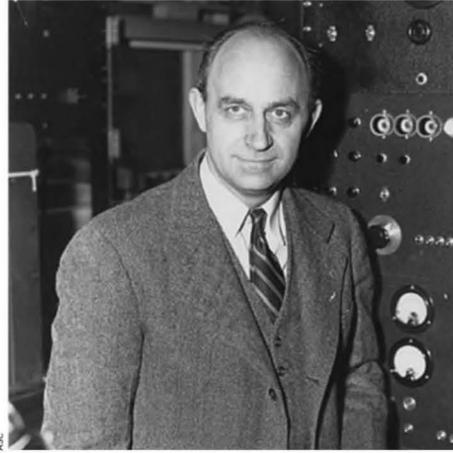
## BOSONES Y FERMIONES

Tras unas cuantas líneas hablando de simetrías espero haberos convencido de su relevancia para entender mejor el mundo que nos rodea. Ahora, sin embargo, debo cambiar de tercio y hablaros de bosones y fermiones.

Cuando usamos la mecánica cuántica para estudiar sistemas compuestos por varias partículas nos encontramos con dos tipos de partículas muy diferentes. Por un lado tenemos los fermiones, así llamados en honor del gran físico italiano Enrico Fermi. Estas partículas se caracterizan por tener espín semientero ( $1/2, 3/2, 5/2...$ ) y por obedecer el principio de exclusión de Pauli. Hablar del espín requeriría un artículo entero, así que concentrémonos en la segunda cuestión, el famoso principio de Pauli. En esencia, este importante ingrediente de la mecánica cuántica nos dice que dos fermiones no pueden tener el mismo estado cuántico. En otras palabras, no pueden encontrarse en el mismo lugar y tener todas sus propiedades idénticas, lo que en la práctica implica que los fermiones presentan cierta resistencia a juntarse. Ejemplos de fermiones son el electrón, el protón o el neutrón. Por su parte, los bosones deben su nombre al gran físico indio Satyendra Nath Bose y se caracterizan por tener espín entero ( $0, 1, 2...$ ). Al contrario que los fermio-



El físico indio especializado en física matemática Satyendra Nathan Bose.



Enrico Fermi, físico italiano-estadounidense que desarrolló el primer reactor nuclear.

nes, los bosones no tienen problema alguno en juntarse y adoptar el mismo estado cuántico. De hecho, se conocen algunos sistemas compuestos por bosones en los que todos los componentes se encuentran en el mismo estado, como el láser o los condensados de Bose-Einstein. Ejemplos de bosones son el fotón (la partícula que forma la luz), los piones o el bosón de Higgs.

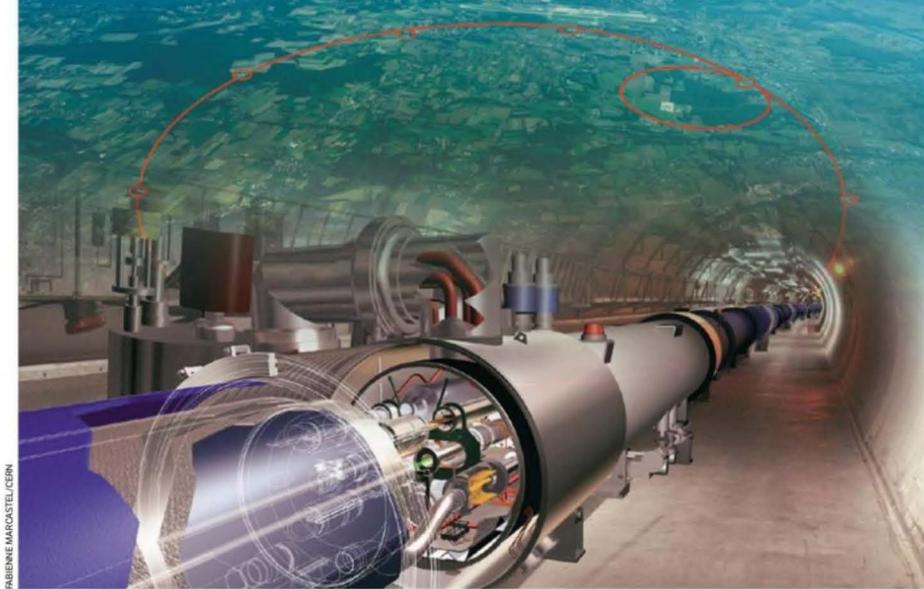
Como vemos, fermiones y bosones son partículas muy diferentes. La forma en que se comportan cuando tenemos sistemas compuestos con varios de ellos es muy diferente en un caso u otro. Por lo tanto, no cabría esperar una relación evidente entre ellos. Pero ¿y si fueran dos caras de la misma moneda?

## DE SIMETRÍA... A SUPERSIMETRÍA

Tras este breve paseo por el mundo de los fermiones y los bosones, volvamos al tema que nos ocupa, las simetrías.

La física de los años 70 del siglo pasado se planteó un problema interesante a la vez que muy ambicioso. Dada la potencia que las simetrías habían demostrado tener ya por aquel entonces, era natural investigar la posible existencia de nuevos tipos de simetría, las cuales a su vez podrían dar lugar a nuevas teorías todavía por imaginar. Tras algunos pasos en falso, diversos investigadores descubrieron un nuevo tipo de simetría, finalmente bautizada con el nombre de supersimetría. En las teorías supersimétricas existe una simetría entre bosones y fermiones, de modo que a cada bosón le corresponde un fermión y viceversa. Se dice que estas partículas son compañeros supersimétricos. Por ejemplo, al electrón le acompañaría el selectrón, una partícula idéntica en todos los aspectos excepto por ser un bosón en lugar de fermión. De manera similar, el gluón, el bosón que hace de pegamento y mantiene los núcleos atómicos unidos, estaría acompañado de un

## EN LAS TEORÍAS SUPERSIMÉTRICAS EXISTE UNA SIMETRÍA ENTRE BOSONES Y FERMIONES



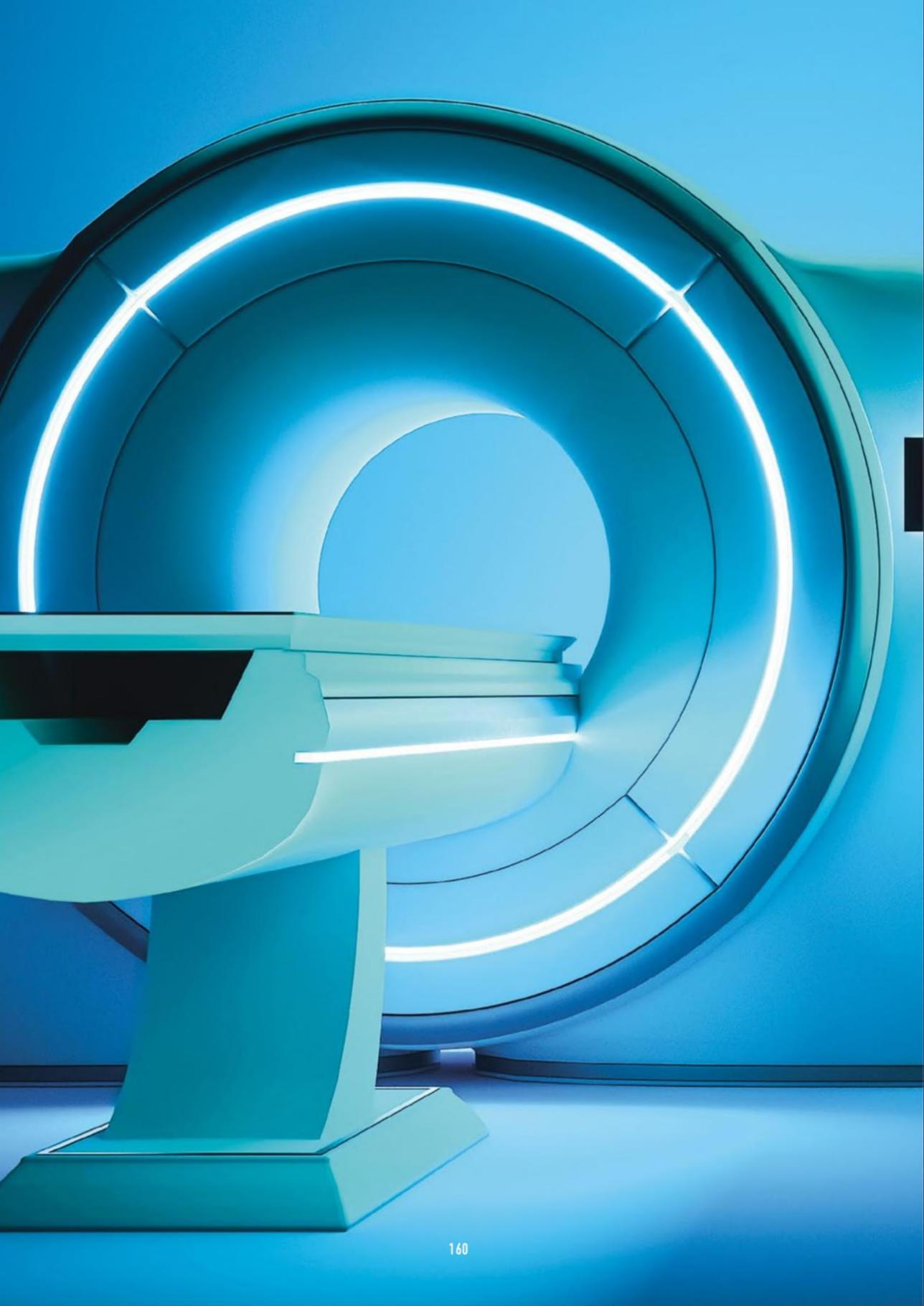
## La búsqueda de la supersimetría en el LHC

El gran colisionador de hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) es la máquina más grande jamás construida por el ser humano. Situado en Ginebra, el LHC fue diseñado con el objetivo principal de descubrir el bosón de Higgs, algo que consiguió en 2012. Otro de sus grandes objetivos era vislumbrar la existencia de partículas supersimétricas. De hecho, la supersimetría ha sido uno de los mayores motores de la investigación en física de partículas de las últimas décadas, en las que se ha realizado un tremendo esfuerzo teórico y experimental para buscar una evidencia empírica que la apoye. Sin embargo, a día de hoy esta evidencia no ha aparecido. Esto ha provocado que algunos de los escenarios más populares hayan sido descartados, lo cual a su vez ha generado cierto sentimiento de decepción en la comunidad científica. No obstante, el LHC sigue teniendo entre sus prioridades la búsqueda de la supersimetría. Los próximos años se dedicará a escudriñar los muchos rincones en los que podría esconderse.

fermión llamado gluino, y lo mismo sucedería con todas las partículas conocidas.

Al principio, la supersimetría apareció como la respuesta a un reto matemático, la búsqueda de nuevos tipos de simetría. Sin embargo, muy pronto se apreció que las teorías supersimétricas tienen algunas propiedades muy interesantes. La supersimetría explica por qué la interacción débil es mucho más intensa que la gravedad, algo sorprendente y difícil de entender en los marcos teóricos que no la incorporan. Esta cuestión sigue abierta en la actualidad y se conoce como problema de la jerarquía. Las teorías supersimétricas también suelen contar con nuevas partículas candidatas a ser la materia oscura del universo, por lo que resolverían uno de los mayores problemas de la física actual, además de facilitar la unificación de las interacciones fundamentales. Finalmente, la supersimetría es crucial en las teorías de cuerdas (o de supercuerdas, para ser más precisos) que aspiran a describir la gravedad de acuerdo a las leyes de la física cuántica.

La supersimetría es una idea fascinante, sustentada sobre un marco matemático muy elegante y capaz de dar respuesta a multitud de problemas abiertos en la física actual. El tiempo dirá si esta simetría es «solamente» una elegante idea matemática o si es un ingrediente fundamental del mundo en el que vivimos. ■





# Resonancia magnética nuclear

POR MANUEL JOSÉ FREIRE ROSALES  
Doctor en Física, Catedrático de la Universidad de Sevilla

la resonancia magnética nuclear ha evolucionado significativamente con el desarrollo de nuevas técnicas de secuenciación, mejoras en la resolución espacial y temporal, así como la expansión de aplicaciones en diversos campos científicos y médicos.

SHUTTERSTOCK

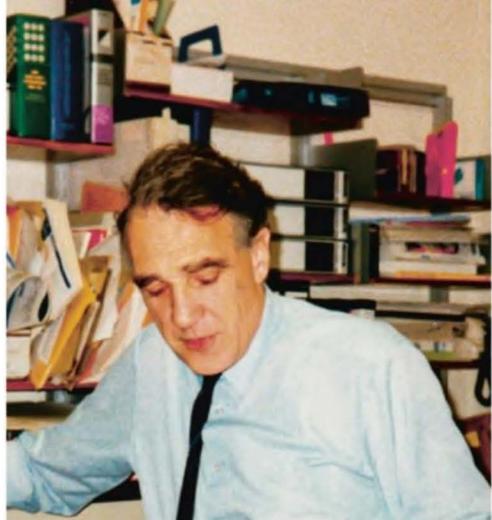
Osnabrück es una hermosa ciudad alemana de Baja Sajonia, famosa por acoger la firma de la Paz de Westfalia que puso fin a la guerra de los 30 años. Visité la ciudad por primera vez en diciembre de 2005, coincidiendo con el tradicional mercado navideño de la ciudad, invitado a participar en un seminario organizado en la Universidad de Osnabrück. La universidad me alojó en el conocido hotel Walhalla, que se enorgullecía de aparecer reflejado en una de las obras del famoso escritor Erich Maria Remarque, natural de Osnabrück y autor de la gran novela pacifista *Sin novedad en el frente*. Al llegar al hotel coincidí con otro de los participantes en el seminario, el profesor Ian R. Young, un físico británico de gesto muy adusto, profesor de radiología en el Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres. Entonces no lo sabía, pero el profesor Young era todo un pionero de la ciencia, había sido el artífice de la obtención por primera vez en la historia de la imagen por resonancia magnética de un cerebro humano en 1978. Más de cuarenta años después de ese gran logro, la técnica de imagen médica por resonancia magnética se ha convertido en una de las más valiosas herramientas de diagnóstico médico de que disponemos hoy en día, y al igual que sucede con otros muchos avances tecnológicos de los que disfrutamos, sus fundamentos físicos se basan en un fenómeno de naturaleza cuántica.

La imagen médica por resonancia magnética es una técnica enriquecida por múltiples disciplinas. Su desarrollo ha sido impulsado a lo largo del tiempo por distintos avances científicos que han ido siendo reconocidos con la concesión de hasta tres premios Nobel. El primero de ellos fue el premio Nobel de Física otorgado a Felix Bloch y Edward M. Purcell en 1952 por sus investigaciones en torno al fenómeno de la resonancia magnética nuclear (RMN), el fenómeno cuántico cuya comprensión dio origen posteriormente a importantes aplicaciones como son la espectroscopía y



Sobre estas líneas, fachada principal del hotel Walhalla, en la ciudad alemana de Osnabrück.

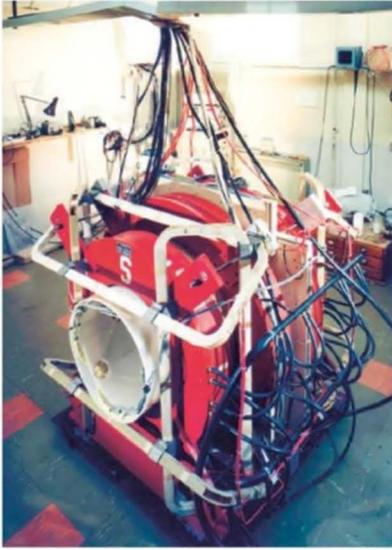
la imagen médica por RMN. La espectroscopía por RMN es una valiosa técnica de análisis empleada hoy en día para determinar la estructura molecular y la composición de una muestra química, o para observar de manera no invasiva cambios bioquímicos en el tejido cerebral. Su desarrollo le valió el premio Nobel de Química a Richard R. Ernst en 1991. El último de los tres Nobel mencionados fue el de Medicina o Fisiología concedido en 2003 a Paul C. Lauterbur y Peter Mansfield, por sus contribuciones a la actual técnica de imagen médica por RMN basada en el uso de gradientes de campo magnético para codificar la información espacial en la imagen y por los tratamientos matemáticos para acelerar y hacer factible el proceso de obtención de la imagen. Este último premio Nobel no estuvo exento de polémica, al no haber sido otorgado también a Raymond Damadian, un pionero considerado el inventor del primer escáner médico de RMN.



El físico británico Ian R. Young, profesor de radiología en el Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres.

## MOMENTO MAGNÉTICO Y MOMENTO ANGULAR

La RMN es un fenómeno de naturaleza cuántica vinculado a los protones y los neutrones que conforman los núcleos atómicos, aunque cabe señalar que para los electrones existe también el denominado fenómeno de resonancia magnética electrónica. La RMN está relacionada con una magnitud física denominada «momento magnético». Un átomo o una partícula elemental que posee un momento magnético se comporta como un pequeñísimo imán, con su momento magnético representado por una flecha o vector que apunta en el sentido en el que señala el polo norte de ese imán. El momento magnético está estrechamente ligado a otra magnitud física denominada «momento angular». Así, los valores del momento magnético y del momento angular de una partícula son proporcionales entre sí a través de una constante que se denomina razón giromagnética. El momento angular es una magnitud física que cuantifica la cantidad de movimiento de rotación de un objeto que gira alrededor de un punto. En Física, un objeto que se desplaza con una cierta velocidad se dice que posee un momento lineal, el cual cuantifica esa cantidad de movimiento de traslación. El momento angular es la magnitud equivalente para un objeto que en lugar de trasladarse gira. Las partículas elementales poseen un momento angular intrínseco que se denomina espín. Para tratar de comprender su significado se suele establecer una analogía con las propiedades de un objeto macroscópico que gira y que nos resulta muy familiar: una peonza. Podemos decir que el espín de una partícula cuantifica la cantidad de movimiento de rotación que tendría la partícula si girase alrededor de sí misma como una peonza. Cuando arrojamamos una peonza al suelo, esta empieza a girar alrededor de su eje, pero suele ocurrir que este eje de giro no es vertical y la peonza cabecea de tal manera que su eje de giro describe una especie de cono en el aire, en un movimiento que se denomina de precesión. El ángulo que forma el eje de la peonza



Sobre estas líneas, podemos ver un sistema de resonancia magnética EMI CRL basado en un imán resistivo (a la izquierda) y una resonancia magnética de cráneo (a la derecha).

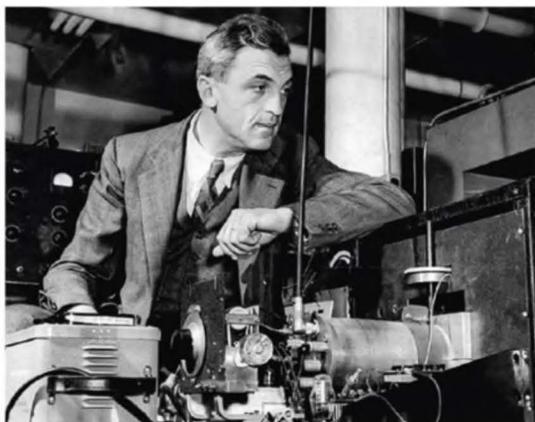
con la vertical, esto es, con la dirección de la fuerza de la gravedad, se denomina ángulo de precesión, y el ritmo con el que la peonza precesiona alrededor de la vertical se denomina frecuencia angular de precesión. Supongamos ahora que nuestra peonza estuviera imantada, de tal manera que se comportara como un imán cuyos polos norte y sur estuvieran alineados a lo largo del eje de la peonza. Diremos que posee un momento magnético dirigido a lo largo de su eje. Imaginemos ahora que nuestra peonza imantada girase en ausencia de gravedad, y que imponemos un campo magnético a lo largo de la dirección vertical, esto es, en la misma dirección que la fuerza de la gravedad ahora ausente. En ausencia de gravedad, la frecuencia angular de precesión se torna proporcional al valor del campo magnético a través de la ya mencionada razón giromagnética. En estas condiciones, la frecuencia de precesión se denomina frecuencia de Larmor. Casi todo el mundo ha experimentado la fuerza de atracción, o de repulsión, que se establece cuando enfrentamos un imán frente a otro, bien porque enfrentamos polos distintos o porque enfrentamos polos iguales, respectivamente. La existencia de esas fuerzas se debe a la diferente energía de carácter magnético que posee un imán por estar en una posición y orientación dadas en presencia del campo magnético que produce el otro imán. Análogamente, nuestra peonza imantada adquirirá una energía magnética por el hecho de poseer un momento magnético y estar en presencia del campo magnético impuesto. Esta energía magnética dependerá del ángulo que formen el momento magnético de la peonza con la dirección del campo magnético impuesto, esto es, dependerá del ángulo de precesión.

La RMN es un fenómeno de naturaleza cuántica, como ya se ha mencionado. En general, la mecánica cuántica establece que a la escala de las partículas elementales, ciertas magnitudes físicas no pueden tener un valor dado por cualquier número imaginable, sino que solo les está permitido tomar el valor de algunos números, y los números intermedios entre estos están prohibidos. Estos valores numéricos

permitidos forman un conjunto que se denomina discreto, frente al conjunto continuo formado por los infinitos valores imaginables. Así, una magnitud física que solo puede tomar ciertos valores discretos se dice que está cuantizada. Volviendo a nuestra peonza clásica, la mayoría hemos experimentado que al jugar con ella y lanzarla repetidas veces al suelo, esta puede precesionar con un ángulo de precesión diferente cada vez, esto es, con su eje más o menos inclinado. Sin embargo, en el caso de una partícula elemental, dotada de un momento angular de espín y de un momento magnético y a la que podemos tratar de ver como una peonza microscópica imantada, el ángulo de precesión que tendría en presencia de un campo magnético impuesto no puede tomar cualquier valor, sino solo algunos valores discretos. Esta es una característica esencialmente cuántica.

En el caso de los protones, neutrones y electrones, estos precesionan con la frecuencia de Larmor con su momento magnético formando un único ángulo con la dirección del campo magnético, aunque bien apuntando en el mismo sentido que el campo magnético o bien en sentido contrario. Al igual que la peonza imantada en presencia de un campo magnético impuesto, estas partículas con momento magnético adquieren una cierta energía. Así, si el momento magnético señala en el mismo sentido que el campo magnético impuesto, la partícula posee una energía menor, y si señala en sentido contrario una energía mayor. Estas dos posibles situaciones se denominan estados, y el estado de menor energía se denomina estado fundamental, mientras que el de mayor energía se denomina estado excitado.

En presencia de un campo magnético impuesto, la mayoría de las partículas tiende a alinear su momento magnético en el mismo sentido que este campo magnético porque de esa manera se encuentran en un estado de más baja energía. Esta tendencia natural hacia el estado de más baja energía se da en todo sistema físico. Las partículas que se encuentran en este estado fundamental pueden pasar a un estado excitado absorbiendo ondas electromagnéticas que transporten una cantidad de energía exactamente igual a la diferencia de energía que hay entre los dos estados, o viceversa, pueden pasar del estado excitado al estado fundamental emitiendo esa misma cantidad de energía también en forma de ondas electromagnéticas. Esta di-



A la izda., Felix Bloch (izquierda) y Edward Mills Purcell (derecha) compartieron el premio Nobel de Física (1952) por sus investigaciones sobre la medición de campos magnéticos en el núcleo atómico.



Cuando arrojamos una peonza, comienza a girar sobre su eje, pero no es vertical y cabecea de tal manera que describe una especie de cono en el aire, en un movimiento que se denomina de precesión.

ferencia de energía entre los dos estados es proporcional al valor del campo magnético impuesto. Dado que la frecuencia de Larmor también es proporcional al campo magnético, esta diferencia de energía se acaba expresando en función de la frecuencia de Larmor. La energía que transporta una onda electromagnética es proporcional a la frecuencia de oscilación de sus campos eléctricos y magnéticos, que se mide en hercios. Así por ejemplo, las ondas electromagnéticas que denominamos de radiofrecuencia y que seleccionamos o sintonizamos en un aparato de radio para oír una emisora u otra, tienen valores de frecuencia comprendidos entre 88 y 108 megahercios para las emisoras que denominamos de frecuencia modulada o FM. En las técnicas de espectroscopía o de imagen médica por RMN, los núcleos atómicos se hallan inmersos en un campo magnético impuesto que suele ser del orden del Tesla. En el caso de los núcleos de hidrógeno, esto es, protones individuales, en presencia de un campo magnético de 1,5 Teslas la frecuencia de Larmor es de 64 megahercios (este valor de 1,5 Teslas es el valor del campo magnético existente en muchos escáneres clínicos de imagen médica por RMN y es 30 000 veces mayor que el campo magnético terrestre, cuyo valor promedio es de 50 microtelas). Al iluminar estos núcleos con ondas de radiofrecuencia de 64 megahercios, coincidente con el valor de la frecuencia de Larmor correspondiente al valor del campo magnético impuesto, los núcleos en el estado fundamental absorberán la energía de estas ondas para pasar al estado excitado. Al cesar la excitación con ondas de radiofrecuencia, los núcleos excitados volverán de forma espontánea al estado fundamental emitiendo ondas electromagnéticas también con la frecuencia

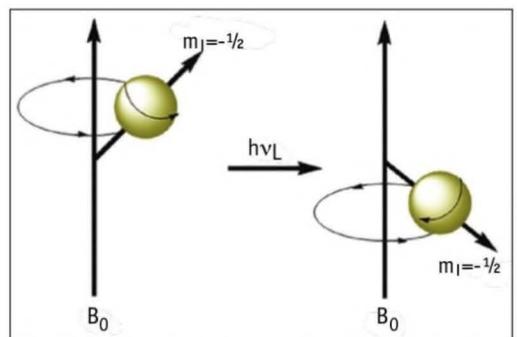
# HOY, LA RMN ES UNA DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE IMAGEN MÉDICA

de Larmor. La detección de estas ondas de radiofrecuencia devueltas por los núcleos atómicos y el procesado de las señales eléctricas a que dan lugar constituye el fundamento técnico de la espectroscopía y de la imagen médica por RMN.

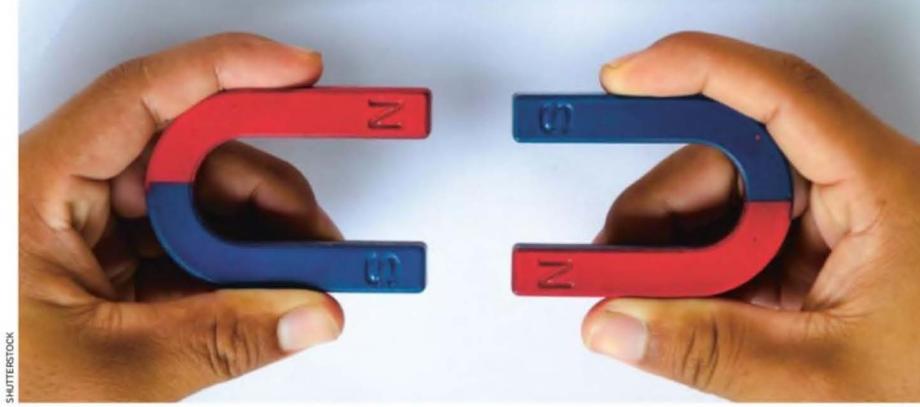
## TECNOLOGÍA DE UN ESCÁNER DE IMAGEN MÉDICA POR RMN

La RMN es una de las principales técnicas de obtención de imagen médica junto con la ecografía por ultrasonidos, la tomografía axial computarizada, o TAC, y la tomografía por emisión de positrones, o PET, por sus siglas en inglés (Positron Emission Tomography). De entre todas estas técnicas, la RMN y la TAC son las que ofrecen mejor resolución de imagen (hasta un milímetro), aunque en la imagen de TAC se realzan los tejidos duros, como el hueso, mientras que en la RMN el contraste se produce para los tejidos blandos. La principal diferencia entre ambas técnicas es que en la TAC se hace uso de radiaciones ionizantes (rayos X) y, en cambio, en la RMN se emplea radiofrecuencia, que es una radiación no ionizante, lo que hace que la RMN carezca de los riesgos asociados a exposiciones prolongadas que sí presenta la TAC. No obstante, la RMN presenta ciertos inconvenientes frente a la TAC. Los principales son el intenso ruido que genera el sistema, que puede resultar incómodo para el paciente, y un intervalo de tiempo mayor para la exploración y la adquisición de las imágenes, de decenas de minutos o incluso una hora en el caso de la RMN frente a solo algunos minutos en el caso de la TAC. Además de esto, la exploración por RMN puede producir claustrofobia en algunos pacientes debido a que el cilindro hueco en el que deben introducirse suele ser de mayor longitud que el del escáner de TAC. Algunos escáneres de RMN tratan de resolver este último inconveniente mediante el uso de una estructura abierta en forma de U que reemplaza al tubo, pero la calidad de la imagen en este tipo de escáneres es inferior.

La imagen médica por RMN se basa en el fenómeno de la RMN para el núcleo más abundante en el organismo humano, el núcleo de hidrógeno, ya que casi el 70 % de la masa de un cuerpo humano es agua y hay dos núcleos de hidrógeno en cada molécula de agua. La imagen médica por RMN es una técnica altamente sofisticada que combina el uso de sistemas de emisión de ondas de radiofrecuencia de gran potencia (del orden del kW) y de detección de señales de radiofrecuencia extremadamente débiles (las producidas por los núcleos de hidrógeno de los tejidos del paciente), con el uso de campos magnéticos es-



Infografía con la frecuencia de Larmor en la que los núcleos precesan en un campo magnético externo.

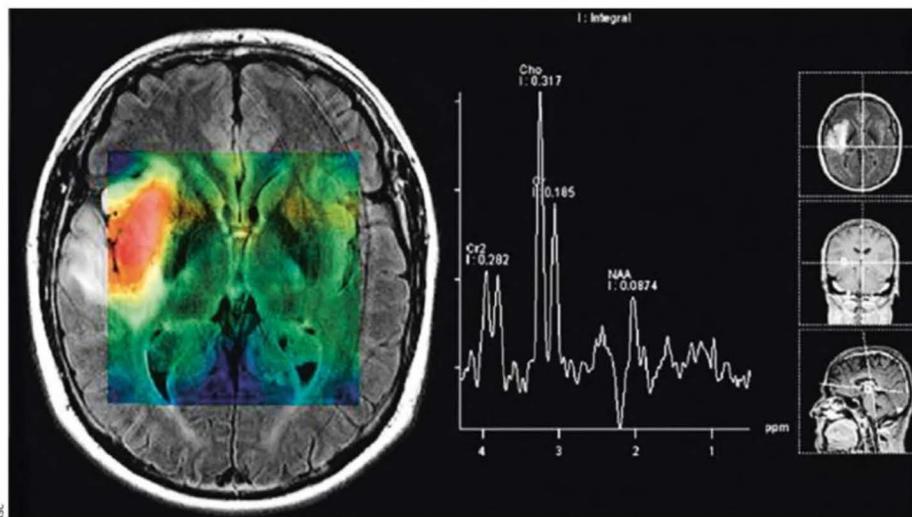


Al enfrentar dos imanes, polos distintos o iguales, experimentamos la fuerza de atracción o de repulsión.

táticos muy intensos, desde 0,2 hasta 7 Teslas en aplicaciones clínicas, e incluso 9,4 Teslas en investigación en humanos y hasta 17,6 Teslas en el caso de animales. En el caso de aplicaciones clínicas en humanos los sistemas de 1,5 y 3 Teslas son los más extendidos (un campo magnético de 3 Teslas es en comparación 60 000 veces más intenso que el campo magnético terrestre promedio). Estos campos magnéticos tan intensos son necesarios para vencer la agitación térmica existente a temperatura ambiente en los átomos y moléculas que constituyen los tejidos del paciente y de esta manera forzar a una gran cantidad de momentos magnéticos de núcleos de hidrógeno a alinearse en el sentido del campo magnético. De esta manera, serán muchos los núcleos de hidrógeno en el estado fundamental que podrán ser excitados mediante ondas de radiofrecuencia para desexcitarse luego volviendo al estado fundamental, emitiendo así en conjunto señales de radiofrecuencia de intensidad apreciable. Para producir campos magnéticos superiores a 1 Tesla se hace uso de bobinas o solenoides fabricado con hilo superconductor de niobio-titanio (la superconductividad es otra propiedad puramente cuántica), que requieren ser mantenidos a una temperatura de 4 Kelvin en una cámara criogénica interna que contiene helio líquido, la cual a su vez se halla en el interior de otra cámara criogénica externa que contiene nitrógeno líquido a una temperatura de 77 Kelvin. En los sistemas actuales, el helio líquido solo necesita ser repuesto cada dos o tres años. La elevada intensidad de estos campos magnéticos puede ocasionar accidentes si de forma descuidada objetos ferromagnéticos son introducidos en la sala en la que opera el escáner debido a que al ser atraídos por el imán pueden salir disparados hacia él (<https://www.youtube.com/watch?v=kLjxhuybFWo>). En los escáneres de RMN en los que el tubo se sustituye por una forma abierta en U para evitar la claustrofobia, el campo magnético se obtiene mediante imanes permanentes de tierras raras y es más débil que el producido por el solenoide superconductor. Por esto último, en estos escáneres abiertos la razón señal-ruido de la imagen, y por tanto su calidad, es menor. A estos campos magnéticos estáticos del orden del Tesla y extremadamente homogéneos (con una

## **LAS VIBRACIONES OCASIONADAS POR LAS FUERZAS MAGNÉTICAS QUE ACTÚAN SOBRE LAS CORRIENTES EN LAS BOBINAS DE GRADIENTE PROVOCAN UN ELEVADO E INCOMODO RUIDO**

variación espacial de unas pocas decenas de partes por millón) se le superponen en el escáner campos magnéticos estáticos más débiles de decenas de militeslas, apuntando en la misma dirección y sentido. Estos campos magnéticos más débiles varían linealmente con la distancia y se generan con unas bobinas convencionales, no superconductoras, que se denominan bobinas de gradiente. Las bobinas de gradiente son las responsables del ruido elevado que puede incomodar al paciente durante la exploración y se debe a las vibraciones ocasionadas por las fuerzas magnéticas que actúan sobre las corrientes en dichas bobinas. La superposición del campo magnético intenso y homogéneo del solenoide superconductor con los campos magnéticos más débiles producidos por las bobinas de gradiente y que varían linealmente, da lugar a un campo magnético estático total muy intenso que varía ligeramente de forma lineal con la distancia en las tres direcciones del espacio, X, Y, Z, aunque sigue apuntando en una única dirección, esto es, a lo largo del eje de la camilla del escáner o eje longitudinal Z, dirigido de los pies a la cabeza del paciente. Dado que la frecuencia de Larmor con que precesionan los momentos magnéticos es proporcional al valor del campo magnético, el resultado es que los momentos magnéticos de los núcleos de hidrógeno en los tejidos pueden precesionar con una frecuencia distinta dependiendo de la posición espacial que ocupan. En la práctica se emplea el gradiente que impone una variación lineal de campo magnético a lo largo de la dirección Z para imponer en todos los puntos de un corte anatómico de interés, perpendicular al eje Z, una misma frecuencia de Larmor, coincidente además con la frecuencia de las ondas de radiofrecuencia que excitarán los momentos magnéticos. De esta manera, solo los momentos magnéticos de este corte seleccionado absorberán la energía de radiofrecuencia de excitación y pasarán del estado fundamental al estado excitado. Un segundo gradiente que impone una variación espacial en la frecuencia de Larmor en la dirección X se hace actuar durante un corto intervalo de tiempo y luego se desconecta. Al hacer precesionar los momentos magnéticos a diferente rit-



La técnica de imagen médica por resonancia magnética se ha convertido en una de las más valiosas herramientas de diagnóstico médico de que disponemos hoy en día.



Raymond Damadian (de pie) y Laurence Minkoff presentado a la prensa su escáner médico de RMN.

mo durante un tiempo para luego volver a hacerlos precesionar al mismo ritmo se logra que dentro del corte anatómico seleccionado los momentos no precesionen finalmente al unísono sino que unos hayan adelantado en el giro a otros. Se dice entonces que los momentos magnéticos se han desfasado entre sí, con un desfase que varía linealmente a lo largo de la dirección X en el corte seleccionado. Se denomina gradiente de fase a este segundo gradiente. Finalmente un tercer gradiente, denominado de frecuencia, impone una ligera variación espacial en la frecuencia de Larmor en la dirección Y. Una vez cesa la excitación de radiofrecuencia, los momentos magnéticos de los núcleos de hidrógeno en el corte seleccionado vuelven de ma-

nera espontánea del estado excitado al estado

fundamental emitiendo señales de radiofrecuencia que transportan a través de su frecuencia y de su fase información sobre la posición espacial de los núcleos, esto es, la posición espacial de los núcleos en el corte definida por una pareja de valores X e Y queda codificada por una pareja de valores de fase y frecuencia. Estas señales son detectadas y procesadas finalmente para construir una imagen clínica del corte en escala de grises en la que la resolución espacial es del orden del milímetro, a pesar de que la longitud de onda de la radiación de radiofrecuencia empleada es típicamente de varios metros (por ejemplo, 4,7 m en un escáner de 1,5 T que opera a 64 MHz). Este método basado en gradientes constituyó la idea genial que le valió el premio Nobel de Fisiología a Paul C. Lauterbur en 2003, al idear un método de obtención de imágenes que al no hacer uso de procedimientos ópticos no está limitado por el criterio de Rayleigh de la Óptica clásica que establece que la resolución mínima de una imagen no puede ser inferior a la longitud de onda de la radiación empleada para obtenerla.

## ANTENAS DE RADIOFRECUENCIA

Junto con el imán superconductor y el sistema de bobinas de gradientes, el otro sistema esencial en un escáner de RMN es el formado por las denominadas bobinas o antenas de radiofrecuencia, que se emplean para producir la excitación por radiofrecuencia y para la detección de la radiofrecuencia reemitida por los núcleos de hidrógeno. Las bobinas o antenas de RMN consisten básicamente en espiras conductoras de cobre. En el ámbito de la RMN se hace uso indistinto en castellano de los términos bobina y antena para referirse al mismo elemento mientras que en inglés el término empleado es *coil*, cuya traducción literal es precisamente «espira». Cabe aclarar que aunque bobina y antena son los términos comúnmente usados en RMN por facultativos e ingenieros, desde el punto de vista formal de la Física tales elementos no puede ser considerados como bobinas, ya que no se corresponden con espiras conductoras de muchas vueltas, sino de una sola vuelta, y tampoco se comportan de manera

eficiente como antenas, ya que sus dimensiones son muy inferiores a la longitud de onda a la que operan, por lo que es más riguroso definirlos como sensores magnéticos de radiofrecuencia de campo próximo que como antenas. Aclarado esto, seguiremos no obstante empleando la terminología al uso. Así, casi todos los escáneres de RMN disponen de una bobina de radiofrecuencia de grandes dimensiones en la que cabe el paciente en su interior y que se denomina *body coil* o *birdcage*, por su forma de jaula de pájaro. Se puede emplear tanto para transmitir las ondas de radiofrecuencia con las que excitar los momentos magnéticos de los núcleos de hidrógeno como para recibir la radiofrecuencia reemitida por los mismos. Esta bobina se halla localizada en el interior del tubo que contiene también el solenoide superconductor y las bobinas de gradiente. Los escáneres de RMN cuentan además con varias bobinas más pequeñas que se denominan bobinas de superficie porque se disponen muy próximas sobre el paciente en la región anatómica de interés y se emplean solo para recibir, operando en combinación con la *body coil* que se emplea entonces solo para transmitir. Estas bobinas permiten obtener imágenes con mucha mayor calidad (mejor razón señal-ruido) y resolución que haciendo uso de la *body coil* tanto para transmitir como para recibir, aunque en una región mucho más localizada. En las bobinas operando en recepción, los campos magnéticos de radiofrecuencia producidos por los momentos magnéticos de los núcleos de hidrógeno inducen pequeñísimos voltajes en ellas en virtud de la Ley de Faraday, y estos voltajes son convenientemente amplificados y procesados para construir la imagen. Durante el proceso de excitación, la *body coil* transmite una gran cantidad de energía de radiofrecuencia que podría inducir corrientes muy elevadas en las bobinas de recepción y calentarlas por efecto Joule, hasta el punto de poder ocasionar quemaduras al paciente al estar dispuestas muy cerca del mismo. Este calentamiento por efecto Joule es también la razón por la que no se pueden efectuar exploraciones en pacientes con implantes metálicos. Junto a esto, las corrientes inducidas en las bobinas de recepción pueden generar campos magnéticos de radiofrecuencia que perturben al de excitación. Para evitar tanto esto como el calentamiento por efecto Joule, las bobinas



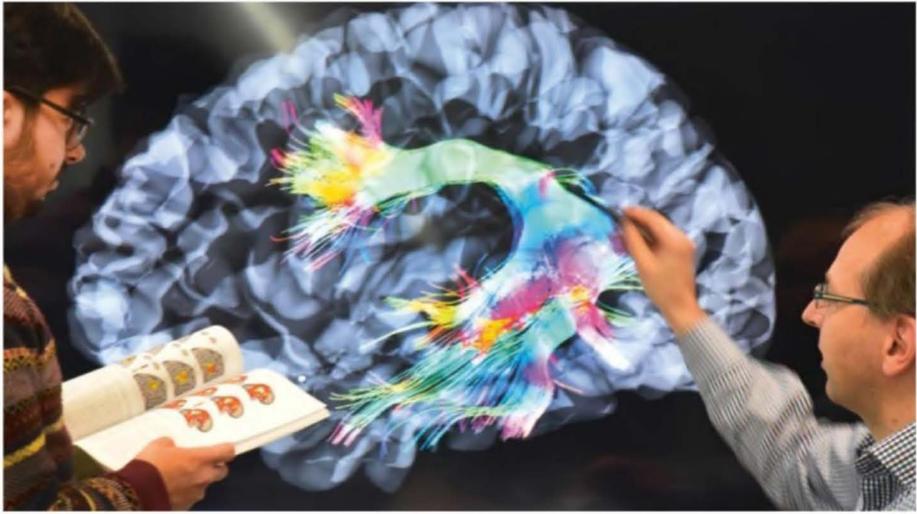
La imagen por resonancia magnética es una técnica enriquecida por múltiples disciplinas.

de recepción han de encontrarse en circuito abierto durante el proceso de excitación, lo cual se consigue mediante circuitos de protección basados en diodos dispuestos en las bobinas de recepción que actúan como interruptores que abren el circuito. Existen finalmente bobinas de pequeño volumen empleadas tanto para transmitir como para recibir, que también son de tipo *birdcage*, y que se emplean envolviendo la región de interés para obtener por ejemplo imágenes de cráneo o de rodilla.

## EL ORIGEN DEL CONTRASTE EN LA IMAGEN DE RMN

En la imagen de TAC el contraste se debe a la mayor o menor absorción de los rayos X por parte de los distintos tejidos. En la imagen de RMN el contraste tiene su origen en la diferente evolución en el tiempo de los momentos magnéticos en cada tejido desde el estado excitado al estado fundamental. En RMN el corte anatómico seleccionado mediante las bobinas que producen el gradiente de corte tiene un espesor típico de 1 a 3 mm, y los gradientes de fase y de frecuencia se encargan de subdividirlo en un conjunto matricial de pequeños elementos de volumen con esas mismas dimensiones que se denominan vóxels. Así, cada corte se asemeja a uno de esos rompecabezas o puzzles infantiles contruidos a base de cubos apilados. A cada uno de estos cubos o vóxels se le hace corresponder un píxel en la imagen en escala de grises asociada al corte. Cada uno de estos vóxels queda caracterizado por una imanación que es la suma de los momentos magnéticos de todos los núcleos de hidrógeno que contiene. El número de núcleos dentro de un vóxel es tan elevado que la imanación resultante asociada al colectivo se puede analizar estadísticamente desde la Física clásica sin tener que recurrir a la Mecánica Cuántica. Así, la imanación resultante de la suma de momentos magnéticos se puede describir mediante el modelo de una peonza que precesiona alrededor del campo magnético del imán superconductor a la manera clásica, esto es, pudiendo formar el eje de la peonza cualquier ángulo con el campo magnético y no solo algunos valores discretos. En el equilibrio, la imanación se encuentra alineada con el campo magnético y la aplicación de ondas de radiofrecuencia con el *body coil* la sacan del equilibrio. Al salir del equilibrio la imanación puede precesionar alrededor del campo magnético estático creado por el solenoide superconductor, o  $B_0$  en la terminología de la RMN, pero también precesiona al mismo tiempo alrededor del campo magnético de radiofrecuencia de excitación producido por el *body coil*, o  $B_1$ , que es perpendicular a  $B_0$ . El resultado de ambas precesiones combinadas es que la imanación se comporta como una peonza cuyo eje de giro precesiona alrededor de  $B_0$  y al mismo tiempo cae girando alrededor de  $B_1$ . Habitualmente el pulso de radiofrecuencia de excitación se aplica durante un intervalo de tiempo tal que hace que la imanación acabe formando un ángulo de  $90^\circ$  con  $B_0$ . Podemos visualizar este movimiento como el de una peonza girando en el centro de un globo terráqueo, con el eje de la peonza precesionando y cayendo mientras el extremo superior de su eje

## LOS ESCÁNERES DE RMN DISPONEN DE UNA BOBINA DE GRANDES DIMENSIONES EN LA QUE CABE EL PACIENTE EN SU INTERIOR



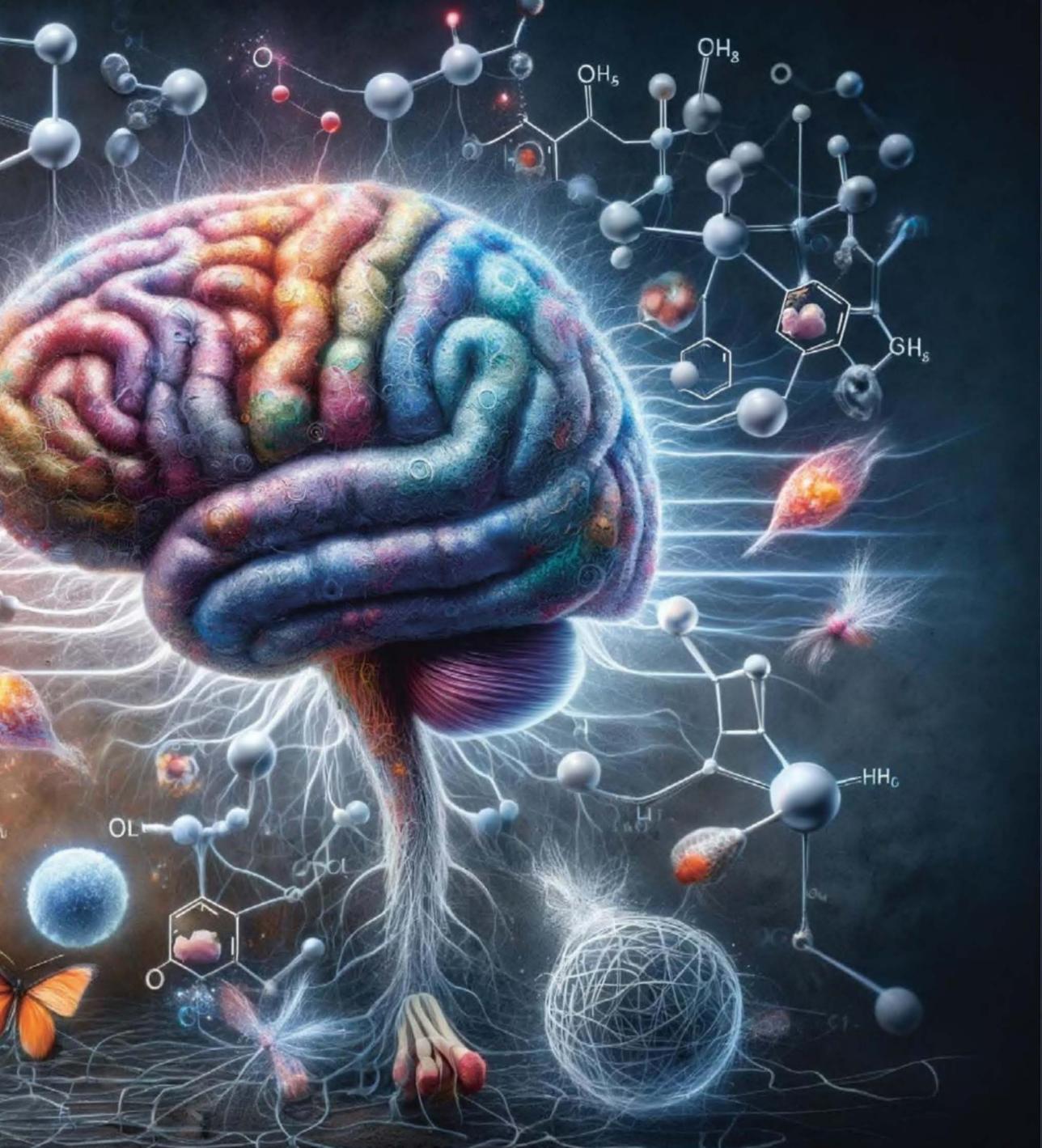
Sobre estas líneas podemos ver a los doctores Goucha y Anwender evaluando los escáneres de resonancia magnética funcional de una persona que aprende alemán.

describe sobre la superficie del globo una trayectoria helicoidal que parte del polo norte hasta alcanzar el ecuador. Una vez cesa la excitación, la imanación puede volver al equilibrio en un proceso que se denomina relajación y al hacerlo describe una trayectoria de nuevo helicoidal hasta volver a alinearse con  $B_0$ . La proyección de la imanación a lo largo de la dirección de  $B_0$  o componente longitudinal va creciendo a lo largo del tiempo de manera exponencial con un constante de tiempo característica que se denomina  $T_1$ . Al mismo tiempo, durante la relajación, las componentes de la imanación perpendiculares o transversales a  $B_0$  van disminuyendo exponencialmente con una tasa de decaimiento temporal que se denomina  $T_2$ . El distinto valor de las constantes  $T_1$  y  $T_2$  para cada tejido es el origen del contraste en la imagen.  $T_1$  mide el tiempo que tardan los momentos magnéticos en reemitir la energía de radiofrecuencia absorbida. Parte de esta energía es captada con mayor o menor velocidad por el entorno molecular, que se calienta aunque inapreciablemente. El diferente valor de  $T_2$  se debe a que cada núcleo de hidrógeno ve por así decirlo un campo magnético estático  $B_0$  ligeramente distinto, lo que hace que los momentos magnéticos de un vóxel no precesionen al unísono, sino desfasados. Esto se debe por un lado a las inhomogeneidades intrínsecas del campo  $B_0$  que son de origen técnico (es imposible producir un campo absolutamente uniforme), y por otro lado a un entorno químico distinto para cada núcleo en donde los campos magnéticos locales producidos por los momentos magnéticos de otros núcleos perturban también ligeramente el valor local del campo  $B_0$ . Podemos entender mejor como actúa este desfase si tratamos de ver el conjunto de momentos magnéticos en un vóxel como una gran cantidad de barritas imantadas, dispuestas todas una sobre otra, y girando todas alineadas alrededor de un eje que pasa por su centro. El campo magnético que producen en la dirección en que están alineadas puede ser intenso. Pero si en lugar de girar todas al unísono con la misma frecuencia angular giran unas más despacio y otras más deprisa, el conjunto de barritas magnéticas se acaba abriendo como un abanico, produciendo un campo magnético más débil que si estuvieran todas alineadas. ■



# Ciencia





# y vida

SERGIO PARRA  
Periodista científico

**S**e acepta generalmente que los efectos cuánticos solo se manifiestan a escalas de longitud y masa muy pequeñas, o cuando las temperaturas se acercan al cero absoluto. Esto es así porque los constituyentes cuánticos, tales como átomos y moléculas, tienden a perder sus características distintivas de «cuantización» al interactuar de manera descontrolada tanto entre sí como con su entorno inmediato.

De esta manera, en un contexto biológico, que por naturaleza es complejo y caótico, se sostiene que la mayoría de los fenómenos cuánticos se disipan con rapidez, subsumidos en lo que el eminente físico Erwin Schrödinger denominó «el ambiente cálido y húmedo de la célula».

Esta percepción ha llevado a la mayoría de los físicos a concluir que el mundo vivo, operando bajo temperaturas relativamente altas y en entornos multifacéticos, puede ser descrito mediante los principios de la física clásica. Sin embargo, algunas investigaciones en torno a reacciones químicas fundamentales a temperatura ambiente han revelado, de manera inequívoca, que los procesos inherentes a biomoléculas son en efecto manifestaciones de efectos cuánticos.

## LA COMPLEJIDAD DEL OLFATO

Tradicionalmente, se ha sostenido que el sentido del olfato se basa en la interacción física entre las moléculas de olor y los receptores específicos en la nariz. Según esta visión clásica, los receptores actúan como cerraduras y las moléculas olorosas como llaves; cuando una molécula se acopla físicamente con un receptor que encaja, se produce una señal que el cerebro interpreta como un olor particular.

Sin embargo, la teoría del efecto túnel cuántico ofrece una explicación alternativa. En física cuántica, el efecto túnel se refiere a la capacidad de una partícula,



En el contexto del olfato, la teoría del efecto túnel nos dice que los electrones en las moléculas de olor pueden «tunelizar» a través de barreras energéticas para interactuar con los receptores olfativos, provocando la sensación de olor.

como un electrón, de atravesar una barrera energética que, según las leyes clásicas de la física, debería ser infranqueable. En el contexto del olfato, esta teoría sugiere que los electrones en las moléculas de olor pueden «tunelizar» a través de barreras energéticas para interactuar con los receptores olfativos, provocando la sensación de olor.

Esta teoría fue impulsada principalmente por el biólogo físico Luca Turin, quien propuso que el olfato es un proceso más sofisticado que simplemente el reconocimiento de formas. Según Turin, los receptores olfativos no solo detectan la forma de las moléculas, sino también su vibración molecular. Los electrones podrían, a través del efecto túnel, ser sensibles a estas vibraciones y de este modo permitir que el receptor identifique diferentes olores.

Si esta teoría es correcta, explicaría por qué las moléculas con estructuras muy similares pueden tener olores muy distintos: las diferencias en sus vibraciones moleculares, detectadas a través del efecto túnel cuántico, serían las responsables de la variación en el olfato.

## EVOLUCIÓN CUÁNTICA

Si las tesis que se sostienen desde esta incipiente disciplina son ciertas, ello implicaría que nuestra comprensión de la biología es radicalmente incompleta. También sugiere que posiblemente podríamos controlar procesos fisiológicos utilizando las propiedades cuánticas de la materia biológica.

Por el momento, los investigadores están explorando cómo los efectos cuánticos también podrían estar influyendo en las mutaciones del ADN y, por lo tanto, en la misma evolución de las especies.



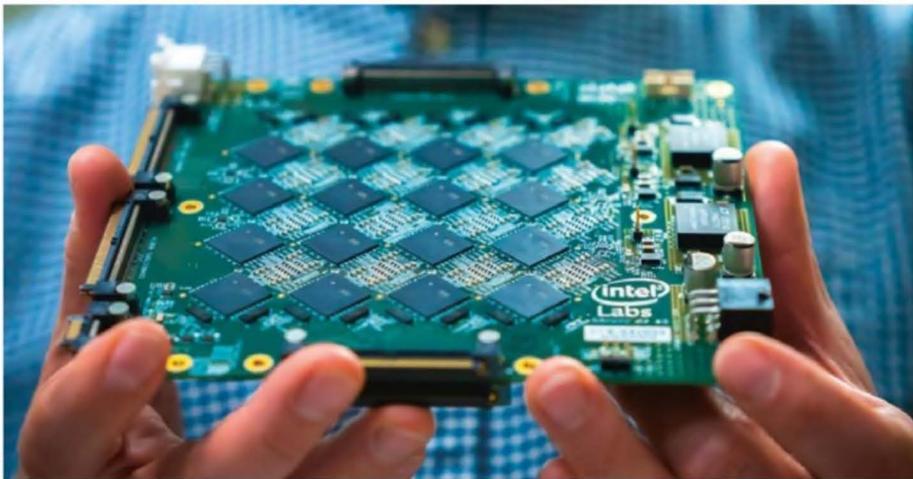
El entrelazamiento cuántico podría ayudar a las enzimas a identificar y responder rápidamente a los daños en el ADN. En la imagen, recreación de una mutación genética.

# LAS NEURONAS PODRÍAN UTILIZAR PRINCIPIOS CUÁNTICOS PARA PROCESAR INFORMACIÓN

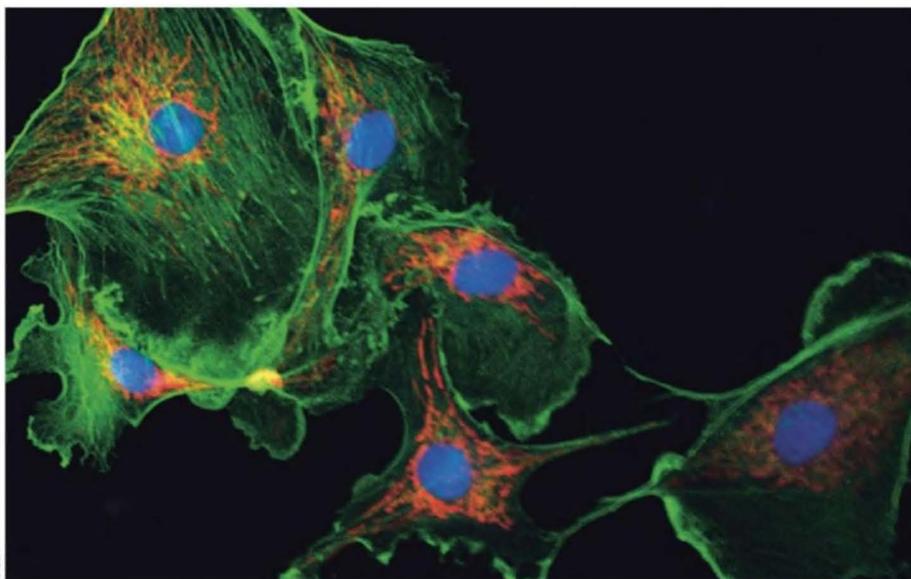
Por un lado, las vibraciones moleculares, posiblemente influenciadas por efectos cuánticos, podrían afectar la estabilidad del ADN y las tasas de mutación porque alterarían la forma en que el ADN interactúa con otras moléculas, incluyendo aquellas involucradas en procesos de replicación y reparación. Estas mutaciones son cambios en la secuencia del ADN que pueden ser heredados y, por lo tanto, ejercer una presión evolutiva. Paralelamente, las enzimas responsables de la reparación del ADN podrían utilizar efectos cuánticos para localizar y corregir daños en el ADN de manera más eficiente. Por ejemplo, se ha propuesto que el entrelazamiento cuántico, un fenómeno en el que las partículas mantienen una conexión instantánea sin importar la distancia, podría ayudar a las enzimas a identificar y responder rápidamente a los daños en el ADN.

## LA BIOLOGÍA NO OPERA COMO UN ORDENADOR DIGITAL

Hasta ahora, se veía a los seres vivos como máquinas ejecutando un código genético. Mientras los biólogos moleculares y bioquímicos mantienen una postura a veces escéptica, científicos de campos como la nanotecnología, ingeniería, física y matemáticas están empezando a explorar y descifrar los procesos genéticos, químicos y físicos que fundamentan la vida y la salud. Así, están intentando predecir o describir matemáticamente las bases biológicas de enfermedades y lesiones, utilizando una mezcla de métodos tradicionales y modernos, como la intuición humana, simulaciones matemáticas e inteligencia artificial, incluyendo redes neuronales artificiales.



La investigación neuromórfica de Intel Labs va más allá de los algoritmos de aprendizaje profundo al codiseñar *hardware* optimizado con *software* de inteligencia artificial de próxima generación.



Sobre estas líneas, recreación de un citoesqueleto celular, una estructura compleja dentro de las células crucial para mantener la forma, la división y la motilidad celular.

Existe una gran posibilidad de que entender la biología sea tan complicado que los modelos matemáticos que intenten describirla no funcionen en ordenadores digitales convencionales. En el futuro, se podrían usar combinaciones de cálculos digitales y analógicos, como los que se realizan en ordenadores neuromórficos, e incluso en ordenadores cuánticos. La biología, con su complejidad, obligará a cambiar la forma en que usamos la física y sus herramientas, incluyendo las matemáticas, porque la biología no opera como un ordenador digital.

## UNA NUEVA VISIÓN DE LA CONCIENCIA

Tradicionalmente, el estudio de las neuronas se ha enfocado en su comportamiento bioquímico y eléctrico. Sin embargo, la mecánica cuántica podría proporcionar una nueva dimensión de comprensión, especialmente en lo que respecta a cómo las neuronas procesan y transmiten información. Por ejemplo, un estudio de 2017 realizado por Abir Igamberdiev y Nikita E Shklovskiy-Kordii ha explorado las bases cuánticas de la percepción espacio-temporal y la conciencia. El foco de este estudio es el papel fundamental que juegan las macromoléculas biológicas, en particular el citoesqueleto, en la formación de patrones de percepción y en el proceso interno de medición.

El citoesqueleto, una estructura compleja dentro de las células, es crucial para mantener la forma celular, la división celular y la motilidad. Sin embargo, este estudio propone que el citoesqueleto también desempeña un rol clave en la percepción y la conciencia a un nivel más fundamental. Se sugiere así que las propiedades cuánticas del citoesqueleto podrían influir en cómo las células, especialmente las neuronas, procesan la información.

Aunque este tema es altamente especulativo y requiere mucha más investigación empírica, eventualmente permitiría también entender mejor algunos de los misterios más profundos de la biología y la neurociencia, y potencialmente abrir caminos hacia terapias avanzadas en medicina y avances en inteligencia artificial y otras tecnologías.

## CEREBRO CUÁNTICO

El citoesqueleto tiene un papel crucial en mantener la forma de la célula, el transporte intracelular y la transmisión de señales, y está compuesto principalmente por microtúbulos, filamentos de actina y filamentos intermedios. En este contexto, se sugiere que las neuronas podrían utilizar principios cuánticos para procesar información de manera más eficiente que el procesamiento clásico. Esto incluiría superposición (capacidad de estar en múltiples estados a la vez) y entrelazamiento (conexión instantánea entre partículas independientemente de la distancia).

La hipótesis más destacada relacionada con la mecánica cuántica en el cerebro se centra en los microtúbulos. Roger Penrose y Stuart Hameroff propusieron la teoría de «reducción objetiva orquestada» (Orch-OR), sugiriendo que los microtúbulos podrían ser capaces de mantener estados cuánticos, conocidos como coherencia cuántica, y que estos podrían jugar un papel en la conciencia.

## LA EFICIENCIA DE LA FOTOSÍNTESIS

La fotosíntesis, el proceso por el cual las plantas convierten la luz solar en energía química, es otro ejemplo donde los principios de la biología cuántica podrían tener un papel fundamental.



UNSPLASH/DAN CARLSON

La superposición cuántica, principio que permite que una partícula exista en múltiples estados o posiciones a la vez, podría permitir que los excitones tomen múltiples caminos al mismo tiempo a través del complejo de pigmentos fotosintéticos.

## AÚN SE ESTÁN INVESTIGANDO LOS DETALLES DE CÓMO LOS EFECTOS CUÁNTICOS CONTRIBUYEN A LA EFICIENCIA DE LA FOTOSÍNTESIS

En la fotosíntesis, cuando la luz incide sobre los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, se generan excitones. Un excitón es un par compuesto por un electrón y un «hueco» creado por la absorción de luz. Tradicionalmente, se creía que estos excitones se movían a través de las moléculas de pigmento de una manera similar a una partícula clásica, saltando de una molécula a otra hasta llegar al centro de reacción, donde su energía se utiliza para impulsar la síntesis de moléculas energéticas como el ATP. Sin embargo, investigaciones recientes han sugerido que los excitones pueden comportarse de manera cuántica. La superposición cuántica, un principio que permite que una partícula exista en múltiples estados o posiciones simultáneamente, podría permitir que los excitones tomen múltiples caminos al mismo tiempo a través del complejo de pigmentos fotosintéticos. Esta capacidad de explorar simultáneamente varios caminos aumentaría la eficiencia en la transferencia de energía, ya que el excitón puede encontrar el camino más eficiente hacia el centro de reacción con una rapidez asombrosa.

Además, la coherencia cuántica, otro fenómeno que permite que las partículas permanezcan en un estado de superposición interconectado durante un periodo de tiempo, podría ayudar a mantener la eficiencia de este proceso en condiciones ambientales variables.

Si bien aún se están investigando los detalles de cómo exactamente los efectos cuánticos contribuyen a la eficiencia de la fotosíntesis, estos hallazgos podrían inspirar nuevos enfoques para el desarrollo de tecnologías de energía solar más eficientes y sostenibles.

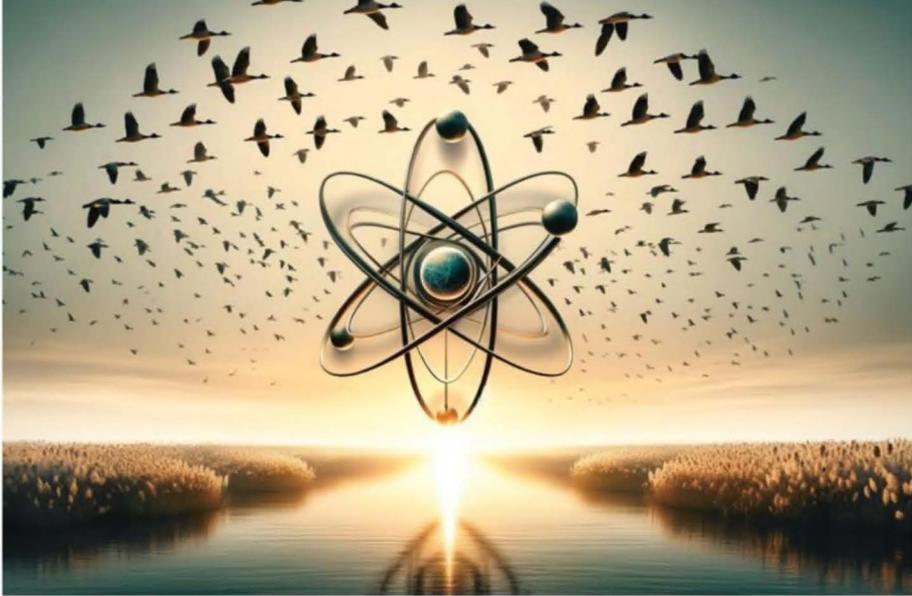
### LA BRÚJULA CUÁNTICA

También se ha investigado el papel de los efectos cuánticos en la capacidad de las aves migratorias para navegar utilizando el campo magnético de la Tierra.

Algunos estudios sugieren que ciertas reacciones químicas en los ojos de las aves podrían ser sensibles a los campos magnéticos a través de procesos cuánticos, ayudándolas en su orientación geográfica. Esta hipótesis se centra en un fenómeno conocido como «entrelazamiento cuántico» y el efecto de los radicales libres.

En los ojos de las aves, se producen reacciones químicas que crean pares de radicales libres. Los radicales libres son moléculas o átomos que tienen un número impar de electrones, lo que los hace altamente reactivos. Estos radicales libres podrían ser sensibles a los campos magnéticos. La mecánica cuántica permite que las partículas, como los electrones en los radicales libres, se entrelacen, lo que significa que el estado de una partícula está directamente relacionado con el estado de otra, independientemente de la distancia entre ellas.

Cuando la luz incide en el ojo de un ave, podría iniciar una reacción química que produce pares de radicales libres en un estado entrelazado cuántico. El campo



ASC

Se ha investigado el papel de los efectos cuánticos en la capacidad de las aves migratorias para guiarse utilizando su sensibilidad y reacciones al campo magnético de la Tierra.

magnético de la Tierra entonces influiría en este estado, alterando de alguna manera la reacción química o la señal enviada al cerebro del ave. Así, la sensibilidad de estas reacciones al campo magnético de la Tierra podría proporcionar a las aves una especie de «brújula cuántica» que les ayuda a orientarse durante la migración.

Esta nueva interpretación es relevante también para estudiar la biología humana porque una gran variedad de procesos fisiológicos se ven afectados por la presencia de campos magnéticos de baja intensidad. Entre estos procesos se encuentran el crecimiento y madurez de células madre, las velocidades de multiplicación celular, la reparación del ADN, entre otros.

Las reacciones del organismo a estos campos magnéticos se alinean con reacciones químicas que dependen del giro (spin) de ciertos electrones en las moléculas. De esta manera, la manipulación de los giros de los electrones mediante un campo magnético suave puede regular de manera efectiva los resultados de una reacción química, lo que tiene implicaciones significativas en la fisiología.

En el futuro, el avance en el entendimiento y aprovechamiento de las propiedades cuánticas de la naturaleza podría habilitar a los científicos para crear dispositivos terapéuticos no intrusivos, manejables a distancia y operables a través de un teléfono móvil. Los tratamientos basados en electromagnetismo podrían tener un potencial uso en la prevención y cura de afecciones, incluyendo tumores cerebrales, y también en aplicaciones de bioingeniería, como el incremento en la producción de carne de laboratorio. Y eso solo es el principio.

## EL ENTENDIMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LAS PROPIEDADES CUÁNTICAS DE LA NATURALEZA PODRÍA PERMITIR CREAR DISPOSITIVOS TERAPÉUTICOS NO INTRUSIVOS

## LA REVOLUCIÓN DE LA MEDICINA

Todos estos hallazgos en el ámbito de la biología cuántica permiten abrir nuevas y fértiles sendas hacia el diagnóstico y tratamiento de diversas afecciones médicas. Por ejemplo, al entender cómo los efectos cuánticos varían entre individuos, los tratamientos podrían personalizarse según las necesidades cuánticas específicas de cada paciente, mejorando así la eficacia del tratamiento.

También, si se comprende mejor cómo los efectos cuánticos influyen en las estructuras moleculares del cuerpo, podrían desarrollarse nuevas técnicas de imagenología que aprovechen estos efectos para detectar enfermedades a nivel molecular con mayor precisión y en etapas más tempranas.

Asimismo, los principios cuánticos podrían emplearse para mejorar las terapias existentes. Por ejemplo, en la radioterapia utilizada para tratar el cáncer, una mejor comprensión de los efectos cuánticos podría llevar a tratamientos más dirigidos y menos dañinos para los tejidos sanos circundantes.

Por su parte, la farmacología cuántica también es un área emergente que busca aplicar principios cuánticos en el diseño y desarrollo de fármacos. Una comprensión más profunda de cómo las moléculas interactúan a nivel cuántico podría llevar al diseño de medicamentos que se unan más efectivamente a sus objetivos biológicos, mejorando la eficacia y reduciendo los efectos secundarios.

En definitiva, la biología cuántica es uno de los campos más interdisciplinarios que jamás haya surgido, y también más revolucionarios. No en vano, las investigaciones futuras conducirán a nuevos conocimientos sobre la antigua cuestión de qué es la vida, cómo se puede controlar y cómo aprender con la naturaleza para construir tecnologías con un potencial inimaginable. ■



La revolución de la medicina cuántica podría mejorar terapias existentes como la radioterapia para tratar el cáncer o llevar a tratamientos más dirigidos y menos dañinos para los tejidos sanos.

# TONTERÍAS CUÁNTICAS

POR DANIEL TORREGROSA  
Químico

Podemos utilizar el término «tonterías cuánticas» para describir el uso erróneo y la interpretación indebida de los principios cuánticos.

SHUTTERSTOCK



**H**ay una leyenda que dice que el rey Ptolomeo I de Egipto, agobiado por la complejidad de las matemáticas de su tiempo, le preguntó a Euclides, el famoso matemático, si existía una manera más fácil de aprender geometría que no fuera mediante el lento estudio de los elementos, la colosal obra en trece tomos que resumía las matemáticas conocidas en aquel momento. Y el gran Euclides, mirando al rey con cierta simpatía, le contestó: «Majestad, no hay atajos para la geometría». Aunque esta historia posiblemente sea apócrifa, nos sirve como ejemplo para mostrarnos una realidad cotidiana: la de que nos gustaría encontrar maneras fáciles para hacer las cosas o conseguir un objetivo sin esfuerzo.

Esta búsqueda de atajos la podemos percibir en muchas facetas de nuestra vida diaria. Queremos adelgazar sin cambiar nuestra alimentación o sin hacer deporte de forma habitual, aprender idiomas en un abrir y cerrar de ojos, perder arrugas con una crema, dejar de fumar de la noche a la mañana o hacernos ricos jugando a los juegos de azar. Es natural que nos atraiga la idea de conseguir resultados sin mucho esfuerzo. Sin embargo, esta inclinación también puede llevar a que algunos se aprovechen de nuestra vulnerabilidad. Por ejemplo, están quienes ofrecen curas milagrosas para enfermedades, prometiendo soluciones fáciles y rápidas en vez de los tratamientos médicos convencionales, que pueden ser largos e incluso dolorosos, pero basados en la evidencia científica.

En este contexto de falsas promesas y remedios sin fundamento, los defensores de las pseudociencias emplean el lenguaje de manera estratégica para otorgar a sus afirmaciones una apariencia de credibilidad y solidez científica superior a la que verdaderamente poseen. A través de una mezcla cuidadosa de terminología científica y técnicas retóricas, logran crear una fachada de legitimidad que puede engañar a

quienes no están familiarizados con el método científico o los detalles específicos de cada disciplina en cuestión. Imaginen un mundo donde entidades diminutas coexisten simultáneamente en múltiples ubicaciones, en el cual los gatos oscilan entre la vida y la muerte dentro de una caja hasta ser observados y objetos distantes se entrelazan de formas que desafían nuestra comprensión cotidiana. En este dominio de incertidumbres, las nociones habituales retroceden para dar paso a un escenario cuyas normas parecen ser el capricho de un universo jugueteón en un arrebato de creatividad. Bienvenidos al mundo cuántico.

Y este es el lugar perfecto para el fenómeno de las «tonterías cuánticas», término con el que describimos el uso erróneo y la interpretación indebida de los principios cuánticos, que potencialmente puede alcanzar su más peligrosa expresión en el mundo de la salud y el bienestar espiritual. Veamos algún ejemplo.



ASC  
Busto de Ptolomeo I Sóter, rey de Egipto y fundador de la dinastía ptolemaica.

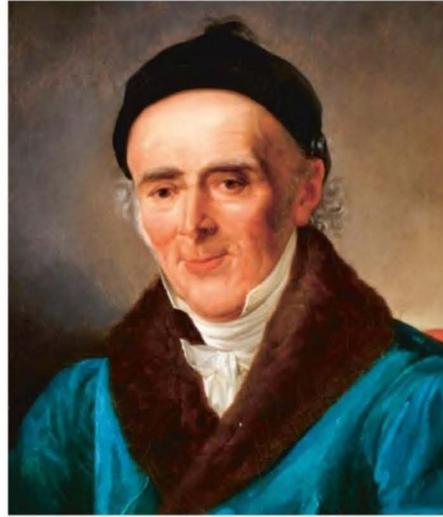
## HOMEOPATÍA

Fundada a finales del siglo XVIII por el médico alemán Samuel Hahnemann, la homeopatía se basa en el concepto de que «lo similar cura lo similar» (*similia similibus curentur*). Según este principio, sustancias que causan síntomas en individuos sanos pueden, cuando se administran en dosis muy diluidas, tratar síntomas similares en personas enfermas. Este enfoque contrasta marcadamente con los principios de la medicina convencional, donde se usan sustancias para contrarrestar los síntomas de la enfermedad.

La práctica homeopática comienza con la dilución sucesiva de una sustancia madre (que puede ser de origen vegetal, animal o mineral) en agua o alcohol. Estas diluciones se realizan a menudo a tal extremo que, estadísticamente, es improbable que quede incluso una molécula de la sustancia original en la solución final. Después de cada dilución, la solución se somete a un proceso conocido como «dinamización» o «sucusión», que implica agitar vigorosamente la solución. Los homeópatas creen que este proceso transfiere la «esencia» o «energía» de la sustancia original al solvente, y que esto es lo que confiere la capacidad curativa al remedio.

La escala de dilución más comúnmente utilizada en la homeopatía es la «escala C», donde cada dilución implica una proporción de 1:100. Por ejemplo, una dilución de 30C significa que la sustancia original se ha diluido 30 veces, a razón de 1 parte de sustancia por 99 partes de solvente cada vez. Esto resulta en una dilución tan extrema que, con la física y la química más básica en la mano, nos lleva a la conclusión de no queda nada de la sustancia original. Ante este argumento aplastante, dado que muchas diluciones homeopáticas superan el orden del número de Avogadro y es improbable que contengan siquiera una sola molécula de la sustancia original, la pregunta consecuente es sobre cómo es posible que puedan tener un efecto terapéutico y causar un efecto demostrable.

Para contrarrestar las críticas hacia sus cuestionables e irracionales prácticas, algunos homeópatas han recurrido a la física cuántica, y más específicamente, a la controvertida teoría de la «memoria del agua». Este concepto fue propuesto por



Samuel Hahnemann, inventor de la homeopatía la cual se basa en su doctrina de «lo similar cura lo similar».

**LA HOMEOPATÍA SE BASA EN LA DILUCIÓN  
SUCESIVA DE UNA SUSTANCIA MADRE (VEGETAL,  
ANIMAL O MINERAL) EN AGUA O ALCOHOL**



ASC

El concepto de la teoría de la «memoria del agua» se basa en la capacidad de esta de conservar una impresión de las sustancias con las que entra en contacto, aun después de ser diluidas repetidamente.

el investigador francés Jacques Benveniste en los años 80, basado en experimentos que, según él, evidenciaban la capacidad del agua de conservar una impresión de las sustancias con las que había entrado en contacto, aun después de ser diluidas repetidamente. Benveniste sugirió que esta memoria del agua podía explicar cómo funcionaban los remedios homeopáticos diluidos. Sin embargo, su investigación fue ampliamente criticada por la comunidad científica debido a graves errores metodológicos y los resultados nunca se pudieron replicar de manera confiable.

Desde la perspectiva de la física y la química convencionales, la hipótesis de la memoria del agua contradice el entendimiento actual de cómo funcionan las moléculas en solución. Además, la mecánica cuántica, que gobierna el comportamiento de las partículas a nivel subatómico, no ofrece una base científica sólida para la homeopatía. Los principios de la mecánica cuántica, como la superposición y el entrelazamiento, ocurren a escalas muy pequeñas y no se aplican de manera que expliquen una supuesta «memoria del agua» o la eficacia de las diluciones homeopáticas. Los estudios rigurosos y las revisiones sistemáticas han demostrado de forma consistente que los tratamientos homeopáticos no funcionan mejor que un placebo para ninguna condición de salud.

## LA CONTROVERTIDA TEORÍA DE LA MEMORIA DEL AGUA PODÍA EXPLICAR CÓMO FUNCIONABAN LOS REMEDIOS HOMEOPÁTICOS



## SANACIÓN CUÁNTICA

En una etapa más elaborada de charlatanería terminológica sobre los conceptos de la física cuántica y unidas a otras disciplinas como la psicología o la neurociencia, que tampoco escapan a su malinterpretación, aparece lo que se conoce como «sanación cuántica». Un concepto popularizado por el hindú Deepak Chopra en su libro homónimo de 1989. Sus delirios, mezclando la física cuántica con la pseudomedicina ayurvédica, le han llevado a realizar afirmaciones tales como que el virus del SIDA emite un sonido que lleva al ADN a su destrucción y que puede ser tratado, según él, contrarrestándolo con una «vibración sonora cuántica ayurvédica».

Sus libros, que rozan el centenar, están repletos de sinsentidos y frases envueltas en retórica y exotismo. Basta este otro ejemplo como una muestra de lo ridículo de sus afirmaciones: «Cada uno de nosotros somos un campo localizado de energía e información con bucles de retroalimentación cibernética interactuando dentro de un campo no local». Sin comentarios.

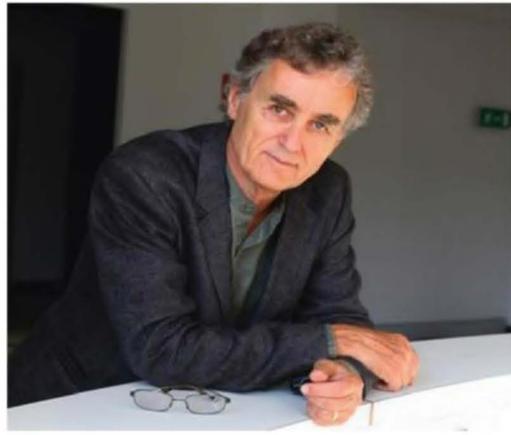


El escritor indio Deepak Chopra, promotor de terapias pseudocientíficas.

## MISTICISMO CUÁNTICO

Este movimiento aborda la hipótesis de que las leyes que rigen la física cuántica poseen paralelismos con principios espirituales o trascendentales, como la creencia en una divinidad, la esencia del alma, o estados superiores de consciencia. Dentro de este contexto, Fritjof Capra, un físico teórico y autor del libro *El Tao de la Física*, argumenta que existe una armonía entre los fenómenos cuánticos y las filosofías espirituales de tradiciones orientales, sugiriendo que ambos campos exploran realidades interconectadas desde perspectivas diferentes. Por otro lado, Amit Goswami, un físico y escritor conocido por su libro *El universo autoconsciente*, sostiene que la física cuántica puede validar la primacía de la consciencia sobre la materia, proponiendo un marco en el cual la consciencia es la fuerza fundamental del universo.

Ambos pensadores se han enfrentado con duras críticas por parte de la comunidad científica y filosófica. Las críticas se centran en que sus interpretaciones pueden desviarse significativamente de los principios científicos establecidos, aplicando los conceptos de la física cuántica a contextos espirituales o metafísicos sin una base empírica sólida. Sus enfoques pueden confundir la distinción entre exploraciones científicas objetivas y especulaciones filosóficas o espirituales, potencialmente llevando a malentendidos sobre la naturaleza y el alcance de la ciencia cuántica. Y aunque suelen ser relativamente prudentes con sus afirmaciones, juegan con la ambigüedad y dejan la puerta abierta a especulaciones sin evidencia.

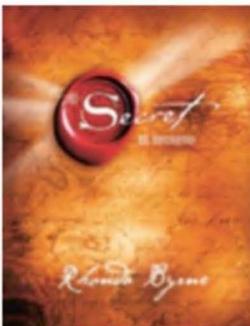


Izda., Amit Goswami físico teórico centrado en la conexión entre la física cuántica y la conciencia y autor de *El médico cuántico*; dcha., el físico Fritjof Capra, autor de *El Tao de la Física*.

## La panacea de la mecánica cuántica

En los últimos años, la popularización de la mecánica cuántica ha trascendido los límites de la academia para infiltrarse en una nueva ola alternativa, dando lugar a una serie de obras que prometen revelar los secretos del universo, la mente y la realidad misma. Documentales como *¿Y tú qué sabes!?: Dentro de la madriguera* (2006) y libros como *El Secreto* (2006), de Rhonda Byrne, han capturado la imaginación del público, prometiendo una comprensión más profunda de la vida a través de la mecánica cuántica. En esos dos casos, una mirada más cercana revela una alarmante falta de rigor científico, una distorsión de los principios de la física cuántica y un aprovechamiento del desconocimiento general de esta ciencia para promover ideologías y prácticas pseudocientíficas. Parece que en 2006 se produjo algún tipo de conjura en el universo para producir tonterías cuánticas (nótese la ironía).

El documental *¿Y tú qué sabes!?* combina entrevistas a expertos de dudosa credibilidad con una narrativa ficcional que sugiere que emociones y pensamientos pueden alterar la realidad física, una afirmación que va mucho más allá de cualquier interpretación científicamente aceptada de la mecánica cuántica. Mientras tanto, *El Secreto* promueve la idea de que el universo responde a nuestros deseos y pensamientos a través de la «Ley de la Atracción», un concepto que no tiene ninguna evidencia empírica que lo respalde y que simplifica peligrosamente los desafíos y realidades de la vida.



Portada del libro *El secreto* de Rhonda Byrne y fotograma del documental *¿Y tú qué sabes!?*

# NO HAY ATAJOS PARA LA FÍSICA CUÁNTICA. SE NECESITAN MUCHOS AÑOS DE ESTUDIO Y MATEMÁTICAS AVANZADAS PARA ACERCARSE A UNA COMPRENSIÓN SERIA DE ESTA DISCIPLINA

## MISCELÁNEA DE TONTERÍAS CUÁNTICAS

Internet y los mercadillos populares están repletos de productos como colgantes, brazaletes o minerales que se venden bajo el rótulo de «cuánticos», «con el poder de la cuántica», «vibraciones cuánticas» y otras lindezas de ese estilo, promocionados como si fueran remedios milagrosos para la salud o para mejorar nuestra vida. Pero la realidad es que son un fraude. Tampoco ayuda la forma en que la mecánica cuántica se presenta en películas, cómics y libros. A menudo, los creadores de contenido recurren a la física cuántica como una herramienta narrativa para justificar fenómenos inexplicables o para añadir un velo de misterio y sofisticación a sus historias.

La jerga cuántica pseudocientífica no solo adolece de falta de rigor científico y es engañosa, sino que también constituye un riesgo tangible y potencialmente dañino. Posee la capacidad de minar el respeto y comprensión del público hacia la ciencia verdadera y sus procesos, promoviendo un enfoque hacia creencias sin base racional y supersticiones. Además, su utilización puede explotar el desconocimiento y la susceptibilidad de personas en busca de soluciones simples a problemas complejos, poniéndolas en riesgo de fraudes, engaños o perjuicios, que pueden ser trágicos cuando se trata de la salud. Resulta esencial ejercer un análisis crítico sobre la pseudociencia cuántica y enfrentarla con una educación científica robusta y un escepticismo constructivo, haciendo una distinción clara respecto a la ciencia auténtica.

Como conclusión podríamos decir rotundamente que no hay atajos para la física cuántica. Se necesitan muchos años de estudio y matemáticas avanzadas para acercarse a una comprensión seria de esta disciplina. Si es que alguien la entiende... Ya lo dijo Murray Gell-Mann, premio Nobel de Física en 1969, que describió a la mecánica cuántica como «esa disciplina misteriosa y confusa que nadie de nosotros entiende de verdad pero que sabemos cómo usar». Y recuerden, como dijo otro premio Nobel de Física, el gran Richard Feynman: «Hay que tener la mente abierta. Pero no tanto como para que se te caiga el cerebro». ■



El rey Gustavo VI Adolfo de Suecia entrega a Murray Gell-Mann el Premio Nobel de Física en 1969.

# BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- ❑ *Einstein en tiempo y espacio. Una vida en 99 partículas.* Samuel Graydon. Rosamerón, 2024.
- ❑ *Principios fundamentales de la astrofísica: Un recorrido cósmico desde el Big Bang hasta los agujeros negros.* Miguel Ángel Sabadell. Pinolia, 2024.
- ❑ *Sobre el origen del tiempo: La última teoría de Stephen Hawking.* Thomas Hertog. Debate, 2024.
- ❑ *Genios de la física cuántica.* Jesus Martínez Asencio. RBA, 2024.
- ❑ *Los sueños de los que está hecha la materia: Los textos fundamentales de la física cuántica y cómo revolucionaron la ciencia.* Stephen Hawking. Crítica, 2024.
- ❑ *Física Cuántica Para Genios. Todo Sobre Teleportación, Entrelazamiento, Multiverso, Partículas Virtuales, Consciencia, Superposición, Teoría de cuerdas, mucho más...* Lemur Gosh. Independently published, 2024.
- ❑ *Seis piezas fáciles. La física explicada por un genio.* Richard P. Feynman. Booket, 2024.
- ❑ *Rutas en el cielo. EL enigma de la migración de la aves y el insólito grupo de científicos pioneros y entusiastas que lo resolvió.* Rebeca Heisman. Editorial Carbrame, 2024.
- ❑ *Dios. La ciencia. Las pruebas. El albor de una revolución.* Michel-Yves Bolloré y Olivier Bonnassies. Editorial Funambulista, 2023.
- ❑ *Autobiografía de un cuántico.* Mark Quark. Nova casa editorial, 2023.
- ❑ *La realidad no es lo que parece.* Carlo Rovelli. Booket, 2023.
- ❑ *Física cuántica para principiante: Desde la teoría ondulatoria hasta la computación cuántica La comprensión de cómo funciona todo mediante una explicación simplificada de los principios de la física.* Carl J. Pratt. Independently published, 2022.
- ❑ *Física cuántica y relativista. Más allá de nuestros sentidos.* Carlos Sabin. CSIC. Los libros de la catarata, 2022.
- ❑ *La revolución cuántica. Un recorrido por los mecanismos ocultos de la realidad.* Alberto Casas. Ediciones B, 2022.
- ❑ *Mundo cuántico.* Miguel Ángel Sabadell. Pinolia, 2022.
- ❑ *La Luz revelada. Del telescopio de Galileo a la extrañeza cuántica.* Serge Haroche. Debate, 2022.
- ❑ *El enigma cuántico. Descubriendo la clave oculta.* Wolfgang Smith. Editorial Almuzara, 2022.
- ❑ *Verdades y mentiras de la física cuántica.* Carlos Sabin. Catarata, 2020.
- ❑ *El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final.* Brian Greene. Crítica, 2018.

❑ *Astrofísica para gente con prisas*. Neil deGrasse Tyson. Paidós, 2017.

❑ *Inteligencia física: Aprende a ver el mundo con la mente de un físico*. Javier Santaolalla. Plataforma Editorial, 2017.

❑ *Cómo explicar física cuántica con un gato zombi*. Big Van científicos sobre ruedas. Alfaguara, 2016.

❑ *El Bosón De Higgs: La física como nunca te la han contado*. Javier Santaolalla Camino. La esfera de los libros, 2016.

❑ *El Universo cuántico y por qué todo lo que puede suceder, sucede*. Brian Cox y Je-

ff Forshaw. Debate, 2014.

❑ *Del mundo cuántico al universo en expansión*. Shahan Hacyan. Fondo de Cultura Económica, 2013.

❑ *Los gatos sueñan con física cuántica y los perros con universos paralelos*. Jorge Blaschke. Ediciones Robinbook, 2012.

❑ *Historia del tiempo: Del big bang a los agujeros negros*. Stephen W. Hawking. Alianza Editorial, 2011.

❑ *Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein*. Kip S. Thorne. Crítica, 2010.



## REDACCIÓN

Directora: **Carmen Sabalet** (csabalet@zinetmedia.es).

Redactora jefa: **Cristina Enríquez** (cenriquez@zinetmedia.es).

Coordinador de Diseño: **Óscar Álvarez**

(oalvarez@zinetmedia.es)

Edición gráfica: **Manuela Arias** (marias@zinetmedia.es)

Colaboradores: **Eugenio Manuel Fernández Aguilar** (coordinador), **Mauricio Suárez**, **Miguel Ángel Sabadell**,

**Ana Martín Fernández**, **Alejandro Navarro**, **Ángel Morales García**, **Francesc Viñes**, **Francesc Illas**, **Jara Juana Bermejo Vega**, **Francisco Villatoro**, **Antonio Acín**, **Miguel A. Martín Delgado**, **Guillermo D. Megías Vázquez**, **Armando Relaño Pérez**, **Avelino Vicente Montesinos**, **Manuel José Freire Rosales**, **Sergio Parra**, **Daniel Torregrosa**.

**Javier Alvaredo** (edición y corrección).

**Andrés Pérez Muñoz** (apoyo maquetación).

Director de Contenidos Digitales:

**Guillermo Orts Gil** (gorts@zinetmedia.es)

## DIRECCIÓN Y TELÉFONO

C/ Alcalá 79 1ªA - 28009 Madrid; tel. 810583412

Tel. Suscripciones: 910604482

Correo electrónico: suscripciones@zinetmedia.es



Consejera Delegada: **Marta Ariño**

Director General Financiero: **Carlos Franco**

Director Comercial: **Alfonso Juliá**

Director de Desarrollo de Negocio:

**Óscar Pérez-Solero** (operez@zinetmedia.es)

Editada por Zinet Media Global, S.L.

Distribuye: Logista Publicaciones

PRINTED IN SPAIN. EDICIÓN: 07/2024

Esta publicación es miembro de la Asociación de Revistas de Información (ARI).



Depósito Legal: M-4343-2020 © Copyright Zinet Media Global, S.L.  
Prohibida su reproducción total o parcial sin autorización expresa de la empresa editora. MUY INTERESANTE no se hace responsable del extravío, deterioro o devolución de originales no solicitados, sobre los que tampoco garantiza correspondencia.

«Einstein, deje de decirle a Dios qué  
hacer con sus dados»

*Niels Bohr (1885-1962).*

*Físico danés implicado en la comprensión  
del átomo y la mecánica cuántica;  
premio Nobel de Física en 1922.*





**may**  
INTERESANTE