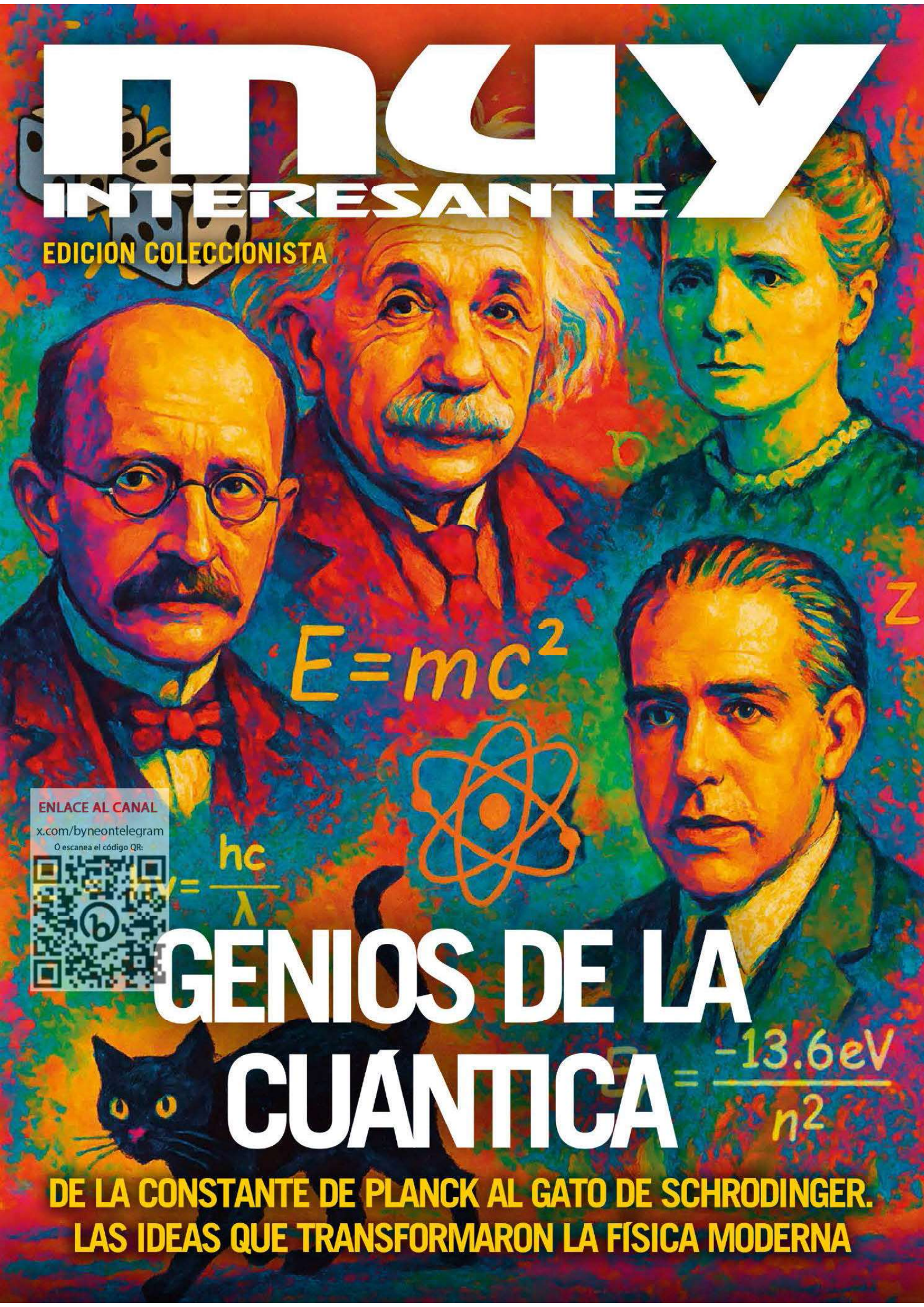


muY

INTERESANTE

EDICION COLECCIONISTA



$$E=mc^2$$



ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:

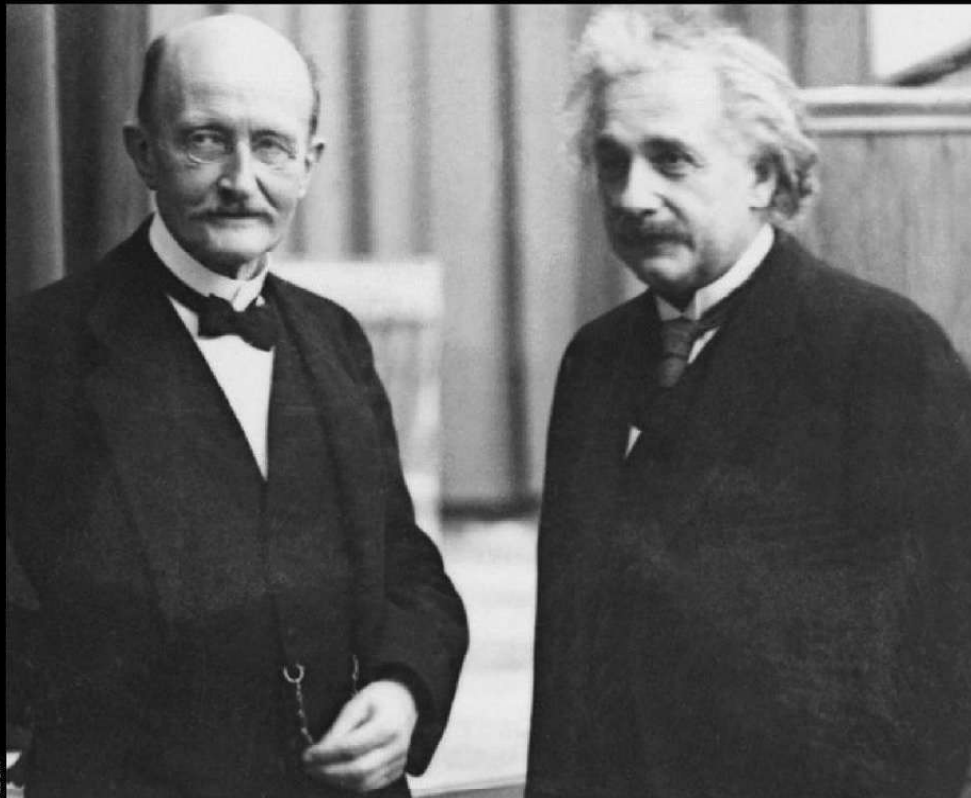


$$\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

GENIOS DE LA CUÁNTICA

$$E = \frac{-13.6\text{eV}}{n^2}$$

DE LA CONSTANTE DE PLANCK AL GATO DE SCHRODINGER.
LAS IDEAS QUE TRANSFORMARON LA FÍSICA MODERNA

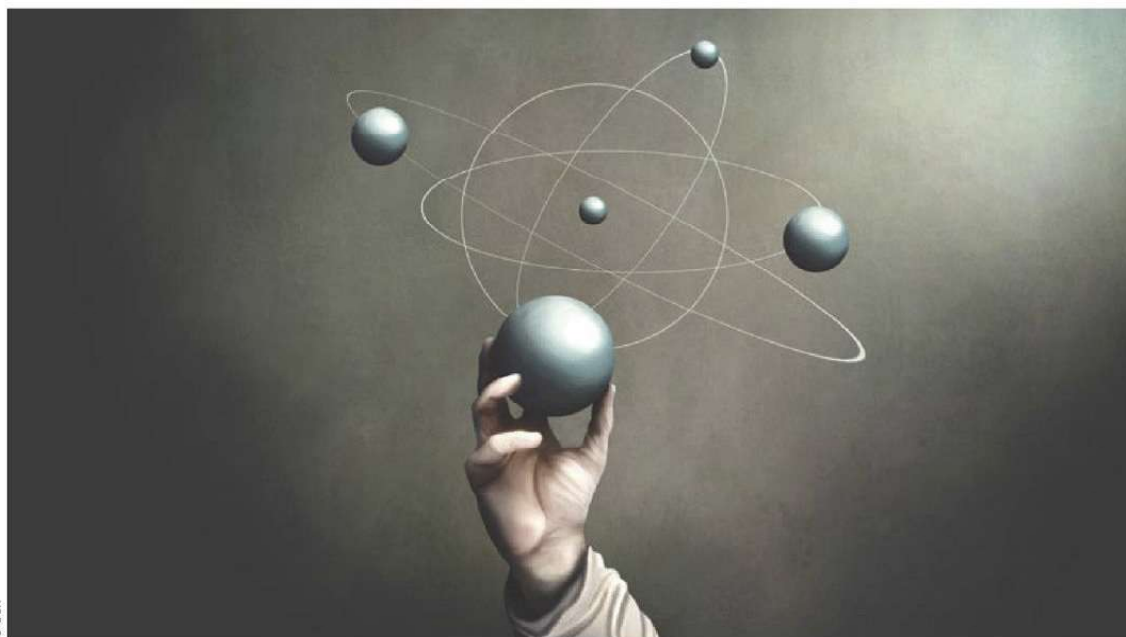


ALBUM

Max Planck y Albert Einstein, dos mentes que cambiaron para siempre la física. El primero encendió la chispa cuántica; el segundo, la convirtió en revolución. Gracias a ellos y a otras mentes que se atrevieron a mirar lo invisible y a imaginar lo imposible, nació una nueva forma de entender el universo.

**«El primer sorbo
de un vaso de las ciencias
naturales te convertirá
en ateo, pero en el fondo
del vaso Dios te espera»**

Werner Heisenberg (1901-1976),
físico teórico alemán y pionero de la
mecánica cuántica



Desafiando lo imposible

Desde los albores de la ciencia moderna, la física buscó ordenar lo que veían los ojos y lo que permitían los instrumentos. Pero fue precisamente cuando empezó a sondear lo infinitamente pequeño —lo que no vemos a simple vista— cuando estalló una auténtica revolución. Todo comenzó en 1900, cuando Max Planck propuso que la energía no fluye de manera continua, sino en diminutos paquetes llamados «cuantos». Aquella idea, casi una herejía, cambió para siempre la forma en que entendemos la realidad. Desde entonces, nada volvió a ser sólido, estable ni predecible.

Nuestro objetivo es rendir homenaje a los hombres y mujeres que se atrevieron a mirar lo invisible: Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Feynman, Dirac, Noether, Curie, Meitner, Wu... y muchos otros. Ellos abrieron una puerta a lo improbable, donde las partículas son ondas, los gatos están vivos y muertos a la vez, y el observador modifica lo observado. Detrás de cada ecuación hubo siempre un alma inquieta. Einstein dudó de su propia teoría; Schrödinger mezcló ciencia y filosofía; Heisenberg abrazó la incertidumbre como una ley; Feynman tocaba el bongó mientras reinventaba la física; y las mujeres de la cuántica luchaban por firmar sus propios descubrimientos. Sin duda, sus vidas fueron tan extraordinarias como sus ideas.

La física cuántica no solo cambió la ciencia: cambió nuestra forma de pensar. Nos obligó a aceptar que la realidad no es fija, que el azar gobierna lo diminuto y que el conocimiento siempre roza el misterio. Hoy, en plena era de los ordenadores cuánticos, su legado late en cada bit, en cada átomo y en cada pregunta que aún no tiene respuesta (pero la tendrá).

Esta revista es un homenaje a la mente humana cuando se atreve a pensar lo impensable. Porque comprender la cuántica no es entender el mundo, sino aprender a maravillarse ante él. Pues maravillémonos.

CRISTINA ENRÍQUEZ
SUBDIRECTORA

CONTENIDOS

MAX PLANCK EL PIONERO INADVERTIDO DE LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA.....	10
ALBERT EINSTEIN EL CUÁNTICO QUE NO CREÍA EN LA CUÁNTICA	20
MILEVA MARIC LA SOMBRA CUÁNTICA DE EINSTEIN	30
NIELS BOHR ÁTOMOS, PARADOJAS Y EL ESPÍRITU DE COPENHAGUE	38
EMMY NOETHER SIMETRÍA, BELLEZA Y LEYES ESCONDIDAS.....	48
WOLFGANG PAULI EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN Y SUS DEMONIOS.....	56
WERNER HEISENBERG JUVENTUD ENTRE IDEAS Y RUINAS.....	66
ERWIN SCHRÖDINGER EL GATO, LA ECUACIÓN Y EL ESCÁNDALO	74
PAUL DIRAC EL MONJE CUÁNTICO DE LA ELEGANCIA MATEMÁTICA.....	84
MARIE CURIE RADIOACTIVIDAD Y PUERTA DE ENTRADA AL ÁTOMO	92



ENLACE AL CANAL



LISE MEITNER CÁLCULO, EXILIO Y UNA FISIÓN CUÁNTICA SIN NOBEL	102
MARIA GOEPPERT-MAYER LA ARQUITECTA DEL NÚCLEO INVISIBLE	110
RICHARD FEYNMAN BONGO, PIZARRAS Y DIAGRAMAS	118
JULIAN SCHWINGER VIRTUOSISMO CALLADO DE LA ELECTRODINÁMICA	128
FREEMAN DYSON EL TEJEDOR DE MUNDOS Y ECUACIONES.....	136
CHIEN-SHIUNG WU LA MUJER QUE ROMPIÓ EL PRINCIPIO DE SIMETRÍA	144
DAVID BOHM EL CUÁNTICO EXILIADO DEL LIBRE ALBEDRÍO.....	152
HUGH EVERETT III EL MUNDO SE MULTIPLICA.....	162
JOHN BELL EL REALISMO LOCAL Y LA DESIGUALDAD MÁS FAMOSA	172
ANTON ZEILINGER EL MAGO DEL ENTRELAZAMIENTO	182
BIBLIOGRAFÍA	192

CRONOLOGÍA

1900 — Max Planck introduce los cuantos para explicar la radiación del cuerpo negro.

1903 — Premio Nobel de Física a Henri Becquerel, Marie Curie y Pierre Curie por las investigaciones sobre radiactividad.

1905 — Albert Einstein explica el efecto fotoeléctrico con cuantos de luz y publica los artículos del *annus mirabilis*.

1911 — Marie Curie recibe el Premio Nobel de Química por el polonio y el radio.

1913 — Niels Bohr publica su modelo atómico con niveles de energía cuantizados.

1916 — Albert Einstein introduce los coeficientes A y B de emisión y absorción (camino al láser).



Paul Dirac publicó en 1928 su ecuación relativista y predijo la antimateria.

ALBUM

1918 — Emmy Noether formula su teorema que vincula simetrías con leyes de conservación.

1918 — Max Planck recibe el Premio Nobel de Física por el nacimiento de la teoría cuántica.

1921 — Albert Einstein recibe el Premio Nobel de Física por el efecto fotoeléctrico.

1922 — Niels Bohr recibe el Premio Nobel de Física por sus investigaciones sobre la estructura atómica.



Max Planck recibió el premio Nobel de Física en 1918.

ASCWIKIPEDIA

1924 — Wolfgang Pauli enuncia el principio de exclusión para los electrones.

1925 — Albert Einstein extiende la estadística Bose-Einstein y predice el condensado.

1926 — Erwin Schrödinger publica la ecuación de onda y consolida la mecánica ondulatoria.

1927 — Werner Heisenberg enuncia el principio de indeterminación posición-momento.

1928 — Paul Dirac publica su ecuación relativista y predice la antimateria (positrón).

1932 — Werner Heisenberg recibe el Premio Nobel de Física por la creación de la mecánica cuántica.



Emmy Noether vinculó las simetrías con las leyes de conservación.

ALBUM



Erwin Schrödinger durante una conferencia en España.

ASC

1933 — Paul Dirac y Erwin Schrödinger reciben el Premio Nobel de Física por sus contribuciones a la teoría cuántica.

1935 — Einstein, Podolsky y Rosen formulan la paradoja EPR sobre la completitud de la teoría cuántica.

1935 — Erwin Schrödinger plantea la paradoja del gato para ilustrar los problemas de la medida.

1939 — Lise Meitner y Otto Frisch interpretan la fisión nuclear observada por Hahn y Strassmann.

1944 — Premio Nobel de Química a Otto Hahn, dejando fuera a Lise Meitner.

1945 — Wolfgang Pauli recibe el Premio Nobel de Física por el principio de exclusión.

1948 — Julian Schwinger establece la renormalización de la electrodinámica cuántica.

1948 — Richard Feynman introduce la formulación de integrales de camino y el uso sistemático de diagramas.



Richard Feynman en el CERN explicando su formulación.

ALBUM

1949 — Freeman Dyson demuestra la equivalencia de las formulaciones de Feynman y Schwinger y sistematiza el la matriz S.

1949 — Maria Goeppert-Mayer desarrolla el modelo de capas nuclear

1956 — Chien-Shiung Wu demuestra experimentalmente la violación de la paridad en la interacción débil.

1957 — Premio Nobel de Física a Yang y Lee por sus teorías sobre la violación de la paridad, dejan fuera a Wu.

1957 — Hugh Everett formula la interpretación de los muchos mundos.



Otto Frisch y Lise Meitner en su laboratorio.

ASC

1963 — Maria Goeppert-Mayer y J. H. D. Jensen reciben el Premio Nobel de Física por el modelo de capas nuclear.

1964 — John S. Bell establece su desigualdad para contrastar la no-localidad cuántica.

1965 — Shin'ichiro Tomonaga, Julian Schwinger y Richard Feynman reciben el Premio Nobel de Física por la electrodinámica cuántica.

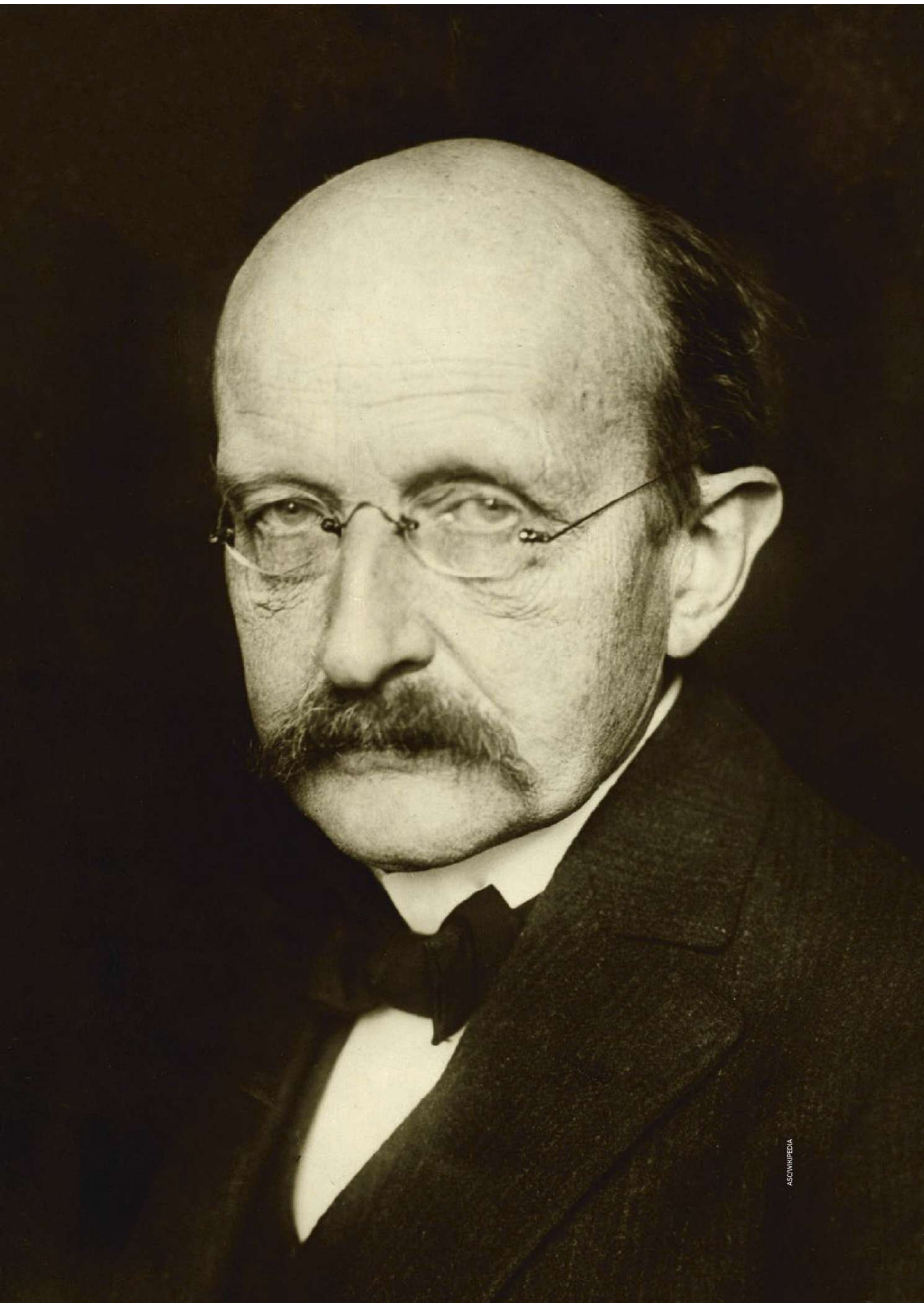
1997 — Primer experimento de teleportación cuántica de un estado de fotón (grupo de Anton Zeilinger).

2022 — John F. Clauser, Alain Aspect y Anton Zeilinger reciben el Premio Nobel de Física por experimentos con fotones entrelazados.

Max Planck

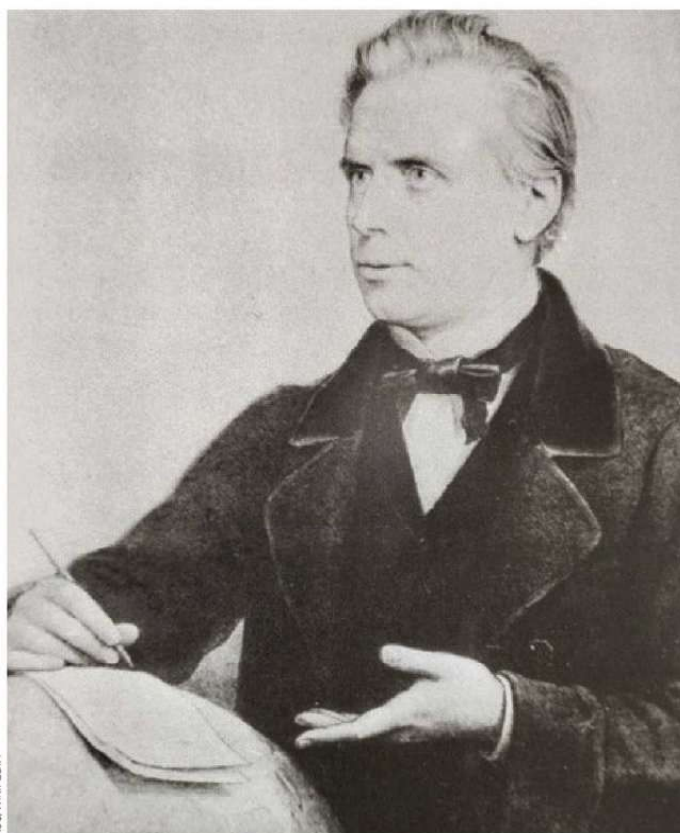
EL PIONERO INADVERTIDO
DE LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

Max Planck



Max Karl Ernst Ludwig Planck nació el 23 de abril de 1858 en Kiel, en el seno de una familia alemana de sólida tradición académica. Su padre era profesor de derecho y tanto su abuelo como bisabuelo habían sido teólogos, por lo que desde joven Max creció rodeado de libros y discusiones intelectuales. Destacó pronto por su talento versátil, pues tocaba el piano, componía música y dominaba lenguas clásicas. No obstante, fue la física la que terminó conquistándolo. Una anécdota famosa cuenta que, a los 16 años, Planck pidió consejo al profesor Philipp von Jolly sobre estudiar física, y este le respondió que en física lo esencial ya estaba descubierto y quedaban pocos huecos por rellenar. Lejos de desanimarse, el joven Max replicó que no buscaba descubrir nuevos mundos, sino comprender los fundamentos de la física. Con esa mentalidad humilde y curiosa, decidió dedicar su vida a esta ciencia, aun sin imaginar que él mismo acabaría abriendo un «nuevo mundo» en la física.

Planck estudió física en la Universidad de Múnich y luego en Berlín, donde asistió a clases de leyendas científicas como Hermann von Helmholtz y Gustav Kirchhoff. No le impresionaron mucho como docentes. De hecho, Helmholtz improvisaba y confundía cálculos en la pizarra, mientras Kirchhoff era metódico, aunque monótono. No obstante, de ambos absorbió conocimientos sólidos. Por su cuenta, se fascinó con la termodinámica, en particular con la obra de Rudolf Clausius sobre el segundo principio (la entropía). Con solo 21 años, Planck se doctoró en 1879 con una tesis sobre la segunda ley de la termodinámica, demostrando una comprensión profunda de ese concepto. La entropía le intrigaba enormemente y la consideraba, junto con la energía, la clave de todas las leyes físicas. Por entonces, la entropía no era un concepto popular ni respetado. Muchos físicos la veían como una abstracción sin sustancia, una rareza matemática sin conexión con la realidad, una forma artificial de hacer referencia al desorden. El propio Planck recordaría con ironía aquellos inicios solitarios: «En aquel tiempo yo era esencialmente el único físico teórico allá, las cosas no fueron fáciles para mí porque empecé a mencionar la entropía, pero esto no estaba mucho de moda, puesto que se consideraba como un fantasma matemático». Esa fe en principios absolutos marcó su carácter científico: Planck era, en el



Philipp von Jolly, el profesor que advirtió a un joven Max Planck que en física quedaba poco por descubrir. Dibujo de Wilhelm von Kaulbach, 1874.

CON SOLO 21 AÑOS, PLANCK SE DOCTORÓ EN 1879 CON UNA TESIS SOBRE LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

fondo, un espíritu clásico y riguroso, más interesado en afianzar las leyes conocidas que en proponer ideas extravagantes.

A finales del siglo XIX, la carrera de Planck prosperó dentro del ámbito académico alemán. Tras unos años enseñando en Múnich y Kiel, en 1889 obtuvo una cátedra en la Universidad de Berlín, ocupando la vacante de nada menos que Kirchhoff. Allí pasó 37 años como profesor de física teórica, labrándose fama de maestro exigente y claro. Sus alumnos lo apreciaban por la precisión con que impartía clase sin necesidad de notas. La física Lise Meitner lo describía como «seco, un poco impersonal, pero el mejor profesor que había escuchado nunca». Planck impulsó además la comunidad científica de su país: en 1898 ayudó a fusionar varias sociedades locales en la Sociedad Alemana de Física, de la que fue presidente entre 1905 y 1909. Con su liderazgo, la física alemana entró al siglo XX más unida y organizada.



Retrato de Hermann von Helmholtz, uno de los maestros de Planck en Berlín.

TRIUNFADOR EN LA FÍSICA, DESDICHADO EN LO PERSONAL

En lo personal, Max Planck fue un hombre de principios, pero también de profundas tragedias. Se casó en 1887 con Marie Merck, con quien tuvo cuatro hijos. Lamentablemente, todos ellos murieron antes que él. Su hijo mayor Karl falleció como soldado en la Primera Guerra Mundial en 1916, y sus hijas gemelas Grete y Emma murieron en 1917 y 1919, ambas en el parto de sus propios hijos. En 1909 perdió a su esposa Marie, quedando viudo justo cuando su mundo familiar se desmoronaba. Planck encontró consuelo parcial en la música —seguía tocando el piano con virtuosismo y llegó a interpretar duetos junto al joven Albert Einstein en Berlín años más tarde— y en su incansable dedicación a la ciencia. En 1911 contrajo segundas nupcias con Marga von Hößlin, y en ese mismo año tuvieron un hijo, Hermann. Pero la historia volvió a golpear. Durante la Segunda Guerra Mundial, su hijo Erwin (del primer matrimonio) se unió a la resistencia contra Hitler y fue ejecutado por los nazis en 1945. A pesar de tantos golpes —pérdidas de hijos, dos guerras mundiales, la ruina de su país— Planck mantuvo su integridad y amor por la ciencia. Durante el convulso periodo nazi llegó a interceder, en vano, ante las autoridades para evitar la expulsión de colegas judíos, y trató de mantener viva la investigación científica en Alemania. En 1945, con Berlín en escombros y habiendo enterrado a casi toda su familia, este «patriarca» de la ciencia alemana sobrevivía

LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES DE LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO MOSTRABAN UNA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA PECULIAR

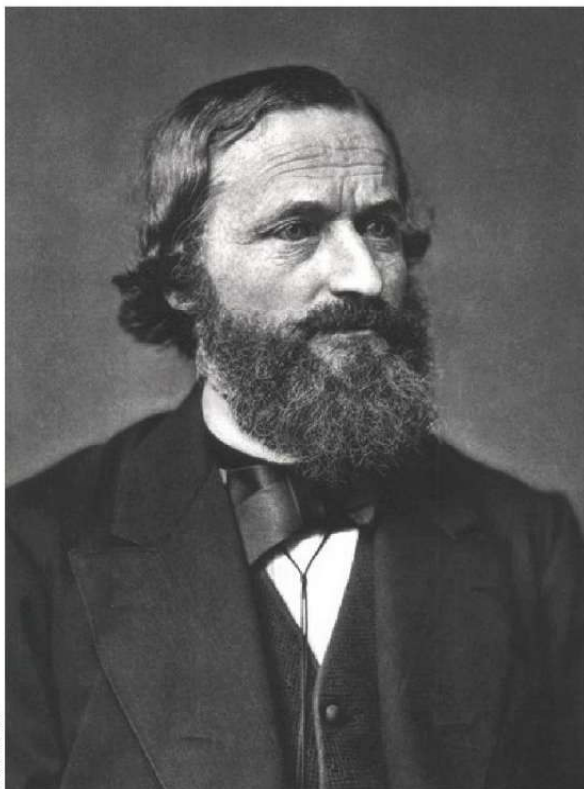
con casi 87 años, respetado mundialmente por su temple y contribuciones. Murió el 4 de octubre de 1947 en Göttingen, a los 89 años. Poco después, como tributo a su legado, la antigua Sociedad Kaiser Wilhelm de ciencias tomó su nombre, convirtiéndose en la Sociedad Max Planck en 1948. Había pasado de ser un joven que solo deseaba comprender la física a dar nombre a la más prestigiosa institución científica de su país.

EL DESCUBRIMIENTO QUE CAMBIÓ LA FÍSICA PARA SIEMPRE

A finales del siglo XIX la física clásica estaba en aparente auge, pero se enfrentaba a un enigma inquietante que cualquier estudiante universitario tiene que trabajar en clase: el problema de la radiación del cuerpo negro. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación que incide en él y, al calentarse, la re-emite con un espectro continuo de frecuencias. Las mediciones experimentales de esa radiación

mostraban una distribución de energía peculiar: había un pico a cierta frecuencia y luego caía en la zona ultravioleta. Sin embargo, las teorías vigentes de la época no podían explicarlo. Las leyes de la electrodinámica de Maxwell y la mecánica estadística predecían que, a altas frecuencias, la energía radiada debería crecer sin límite —una catástrofe conocida después como la «catástrofe ultravioleta»—, algo claramente desmentido por los datos. Ninguna herramienta clásica parecía servir para resolver esta contradicción fundamental entre teoría y experimento. La física estaba en un punto muerto.

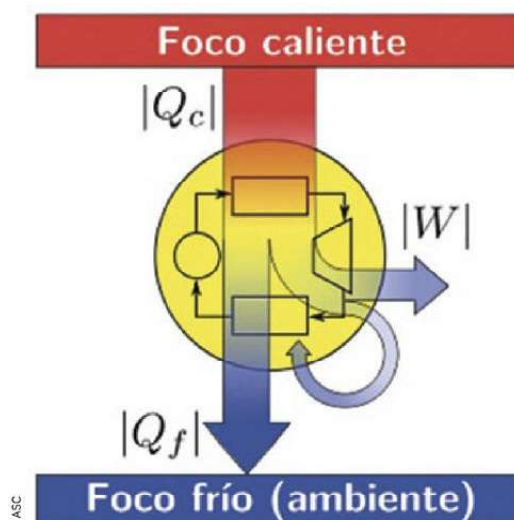
Max Planck, experto en termodinámica y profundamente versado en las leyes de la física del calor, se propuso abordar el problema del cuerpo negro a finales de 1900. Llegó a decir que resolver el problema era una cuestión ur-



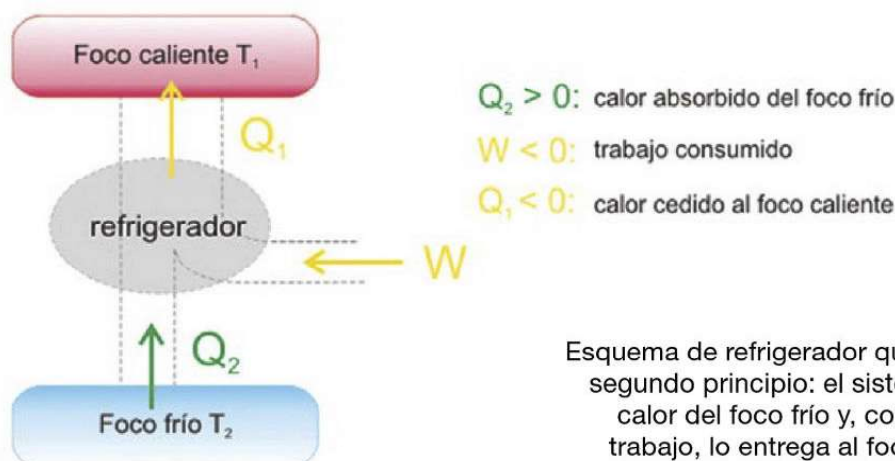
Gustav R. Kirchhoff, referente de la física del siglo XIX y profesor de Planck en Berlín, ocupó la cátedra que el propio Planck heredaría en 1889.

gente, incluso desesperada. Necesitaba una explicación coherente, sin importar el coste conceptual que implicara. Y el «precio» que terminó pagando fue nada menos que romper con una creencia central de la física tradicional. ¿De qué hablamos? Algo casi irreverente en el mundo de la física: la idea de que la energía es continua y divisible sin límites. Desesperado por ajustar la teoría a los resultados experimentales, Planck hizo una audaz suposición matemática: ¿Y si la energía no se intercambia de forma continua, sino en «paquetes» discretos? En un acto casi herético para la época, propuso que la energía emitida por los átomos osciladores del cuerpo negro solo podía tomar ciertos valores fijos, múltiplos de una cantidad mínima. Era 14 de diciembre de 1900 cuando presentó esta idea en la Sociedad de Física de Berlín, introduciendo una nueva constante universal, h , hoy conocida como la constante de Planck. Este número, muy pequeño ($\approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), representaba el «cuanto» indivisible de acción. Con esta hipótesis, Planck logró deducir una fórmula teórica para la radiación del cuerpo negro que encajaba perfectamente con las mediciones en todas las frecuencias. Había nacido la ley de Planck de la radiación térmica. Algo aún más importante que cambiaría el futuro de la humanidad. Había nacido la física cuántica.

El resultado fue tan sorprendente como revolucionario. Al introducir sus cuanta (cuantos en latín) de energía, Planck eliminó la divergencia en el ultravioleta. La energía de alta frecuencia ya no podía crecer infinitamente, porque solo existía en «porciones» discretas. La famosa catástrofe ultravioleta dejaba de ser un problema, resuelto de un plumazo por una hipótesis ingeniosa. Sin embargo, el propio Max Planck quedó perplejo ante las implicaciones de su hallazgo. A sus 42 años, formado en la tradición determinista, no le entusiasmaba la idea de que la



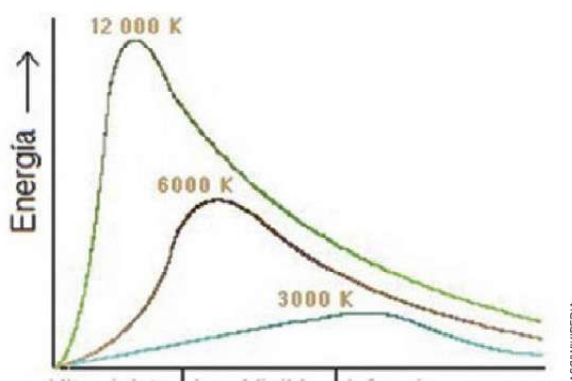
El segundo principio de la termodinámica establece la irreversibilidad de los fenómenos físicos.



Esquema de refrigerador que ilustra el segundo principio: el sistema extrae calor del foco frío y, consumiendo trabajo, lo entrega al foco caliente.

La clave matemática del nacimiento de la cuántica

El giro decisivo que llevó a Max Planck a formular su famosa ley de la radiación no fue solo físico, sino profundamente matemático. Hasta entonces, los físicos trataban los intercambios de energía mediante integrales, asumiendo que podía variar de forma continua. Pero Planck, en un intento desesperado por ajustar la teoría a los datos experimentales, dio un paso atrevido: reemplazó la integral por un sumatorio. Esto implicaba que la energía ya no fluía de manera continua, sino en paquetes discretos, como si viniera en porciones indivisibles. Para entenderlo, basta pensar en el dinero. En teoría, uno podría imaginar que es posible pagar cualquier cantidad con precisión infinita. Pero en la práctica, el céntimo es la unidad mínima: nadie puede pagar 3,4786 céntimos. El sistema monetario funciona por pasos, como una escalera. Eso fue lo que introdujo Planck en la física: una unidad mínima de acción, tan pequeña como imprescindible, que cambiaría para siempre nuestra manera de entender la naturaleza.



naturaleza fuese discontinua en su esencia. Él mismo confesó más tarde que introdujo los cuantos casi a regañadientes, en «un acto de desesperación» después de muchos intentos fallidos con métodos clásicos. Aunque no buscaba agitar las bases de la física, su hallazgo abrió una nueva era. Fue, en muchos sentidos, un revolucionario a su pesar. Al principio, consideraba los cuantos una herramienta matemática útil para salvar el problema del cuerpo negro, sin comprometerse con su realidad física. No parece haberles atribuido inicialmente un gran alcance conceptual, más allá de su valor funcional.

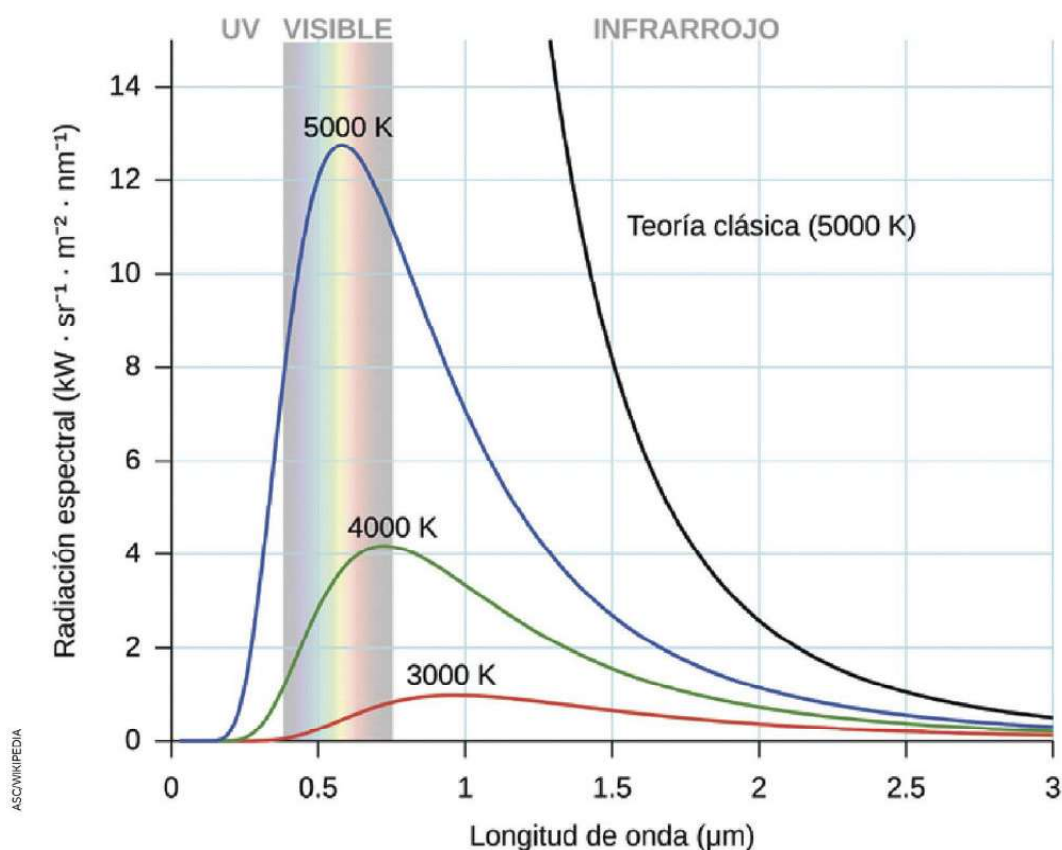
La tarea de entender el verdadero significado de los cuantos la tomaron otros. En 1905, un joven Albert Einstein —quien por entonces admiraba profundamente el trabajo de Planck— dio el siguiente paso valiente: propuso que la luz misma estaba compuesta de cuantos, partículas de luz que luego llamaríamos fotones. Einstein fue uno de los pocos en comprender inmediatamente la importancia revolucionaria de la idea cuántica, incluso más allá del problema del cuerpo negro. Planck, con el escepticismo del veterano, al principio no estaba convencido de la interpretación de Einstein sobre la luz cuántica. Durante años mantuvo reservas sobre aplicar la noción de cuantos a

**PLANCK CONFESÓ MÁS TARDE QUE
INTRODUJO LOS CUANTOS CASI A REGAÑADIENTES,
EN «UN ACTO DE DESESPERACIÓN»**



Lise Meitner (1878–1968) durante una conferencia en la Catholic University of America, Washington D. C., 1946.

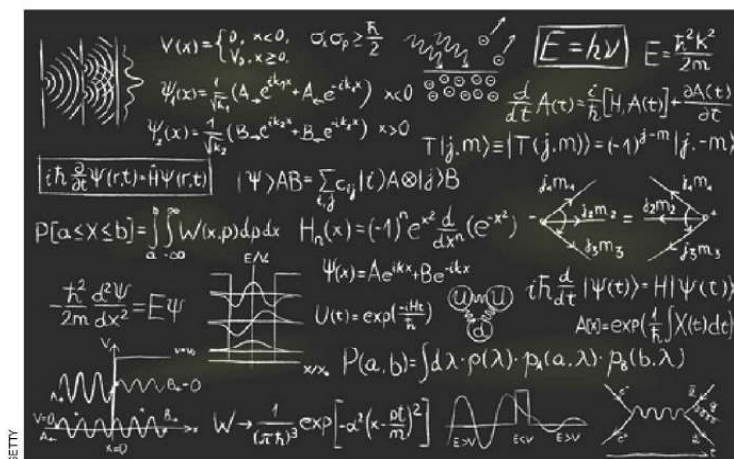
otros fenómenos. Era un conservador científico apoyando una idea radical sin abrazarla del todo. «Fue un revolucionario reticente», se ha dicho con razón. Einstein y Planck entablaron una estrecha amistad intelectual —Planck incluso ayudó a que Einstein obtuviera su puesto en la Universidad de Berlín en 1914 y siempre apoyó la teoría de la relatividad de Einstein con entusiasmo público—, pero en privado debatían cordialmente sobre la naturaleza de los cuantos. A Einstein le costó años convencer a Planck de que los cuantos de luz no eran solo una herramienta matemática. El físico alemán, fiel a la electrodinámica clásica, fue inicialmente escéptico. Pero poco a poco, y con el respaldo de nuevos experimentos, fue cediendo



A medida que la temperatura disminuye, el pico de la curva de radiación del cuerpo negro se mueve a intensidades más bajas y longitudes de onda más largas.

El significado de la palabra «cuanto»

La palabra «cuanto» (del latín *quantum*, «¿cuánto?» o «¿qué cantidad?») fue adoptada por Max Planck para referirse a la unidad mínima e indivisible de energía que aparecía en su nueva fórmula sobre la radiación del cuerpo negro. No inventó el término de la nada: en latín, *quantum* era un pronombre neutro que aludía a magnitudes, y ya tenía uso matemático y filosófico desde la Antigüedad. Pero al introducirlo en física con un valor preciso, Planck le dio una dimensión nueva. Ahora el cuanto no era una simple medida, sino una frontera, es decir, ya no se podía asumir que la energía era infinitamente divisible. Había un mínimo. Una medida irrompible. Como el átomo para la materia, el cuanto se convirtió en el ladrillo elemental de la acción física.



terreno. Para cuando se celebró la primera Conferencia Solvay en 1911, el diálogo entre ambos ya no era una disputa, sino un intercambio respetuoso entre dos formas distintas de ver la física. Con el tiempo, Planck terminó aceptando la existencia de los fotones, especialmente al ver la acumulación de evidencia experimental en la década de 1910. Recibió el Premio Nobel de Física en 1918 precisamente «por su papel jugado en el avance de la física con el descubrimiento de la teoría cuántica», un galardón que confirmaba la trascendencia de su idea inicial.

DEJANDO PASO A LA JUVENTUD

Aun así, fiel a su carácter, Max Planck nunca se convirtió en el abanderado estri-diente de la nueva mecánica cuántica. Dejaba a la generación más joven —Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger y otros— la tarea de desarrollar a fondo esa teoría que él había inaugurado casi sin querer. Él continuó aportando desde la docencia y la escritura. Publicó influyentes libros de texto que difundieron las ideas modernas. Sus *Lecciones de Termodinámica* (1897) fueron reeditadas en múltiples ocasiones, consolidando su influencia en la física de comienzos del siglo XX. Por otra parte, su obra *Teoría de la radiación del calor* (1906) fue la primera exposición exhaustiva de la teoría de la radiación, cimentando los fundamentos de la física cuántica naciente. En 1920, Planck ofreció en Nueva York una serie de conferencias (publicadas como *Ocho lecciones sobre Física teórica*) donde presentaba de forma accesible la revolución que ayudó a iniciar, aunque siempre con un tono moderado y reflexivo.

Max Planck se caracterizó por su integridad intelectual y humildad frente a los cambios científicos. Una de sus frases célebres resume su filosofía: «Una



ASC

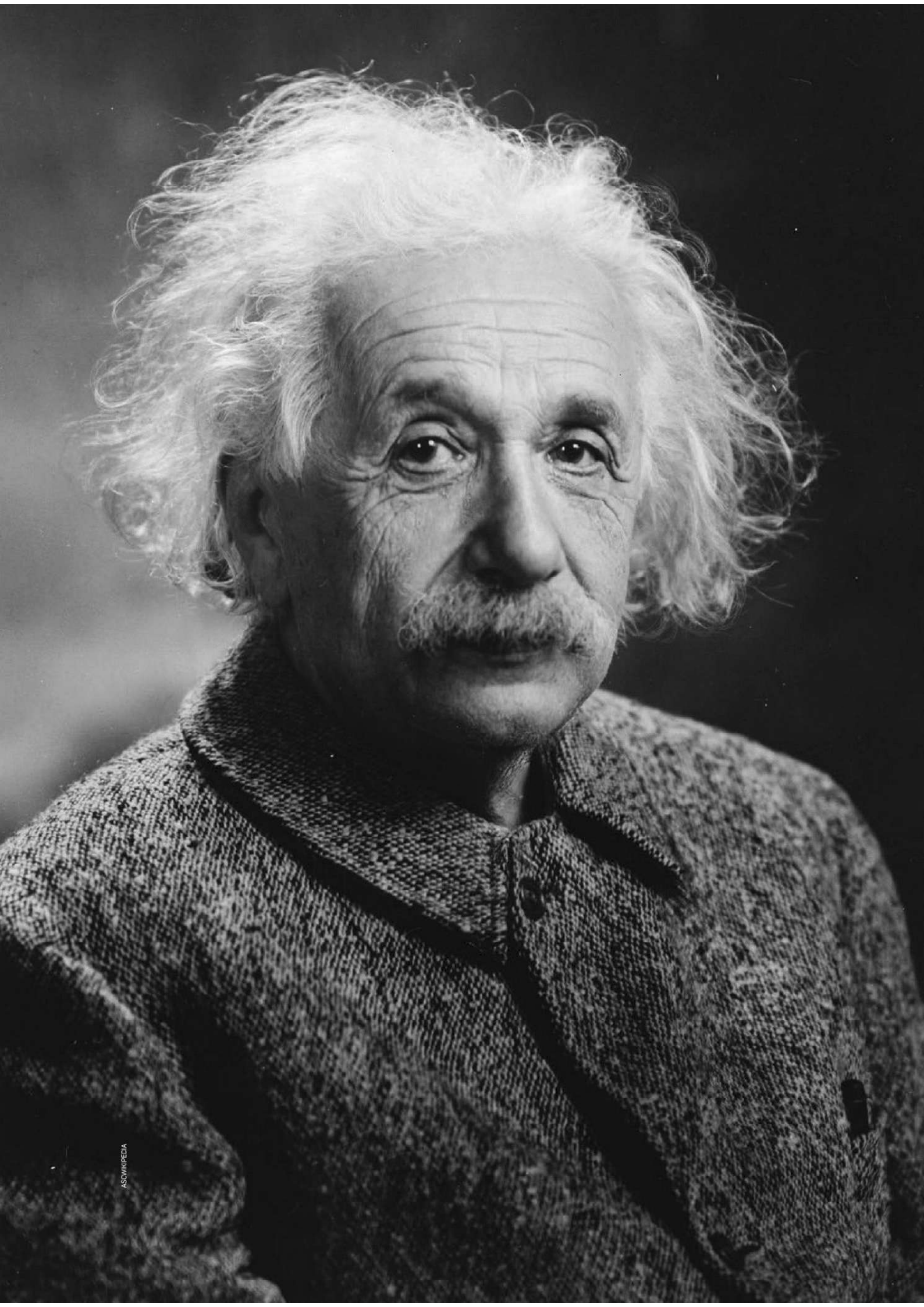


ASC

Sobre estas líneas, Planck junto a Einstein, Curie, Lorentz y Poincaré, entre otros, en la Primera Conferencia Solvay, 2 de noviembre de 1911 (Bruselas). A la izda., cena el 12 de noviembre de 1931 en Berlín en honor del premio Nobel estadounidense Robert Andrews Millikan por invitación de Max von Laue con los profesores y premios Nobel (de izda. a dcha.) Walther Nernst, Albert Einstein, Max Planck, Robert Andrews Millikan y Max von der Laue.

nueva verdad científica no triunfa convenciendo a sus oponentes, sino porque sus oponentes eventualmente mueren y surge una nueva generación familiarizada con ella». Quizá hablaba por experiencia propia. Él mismo vio cómo su idea cuántica tardó en ser aceptada, e incluso él necesitó tiempo para asimilarla. Al final de su vida, Planck pudo contemplar cómo aquella constante h que introdujo casi por necesidad se había convertido en el pilar de una nueva física que revolucionó nuestra comprensión del átomo y del universo. Sus valores de rigor, pasión por el conocimiento y perseverancia ante la adversidad quedaron como ejemplo para las generaciones posteriores.

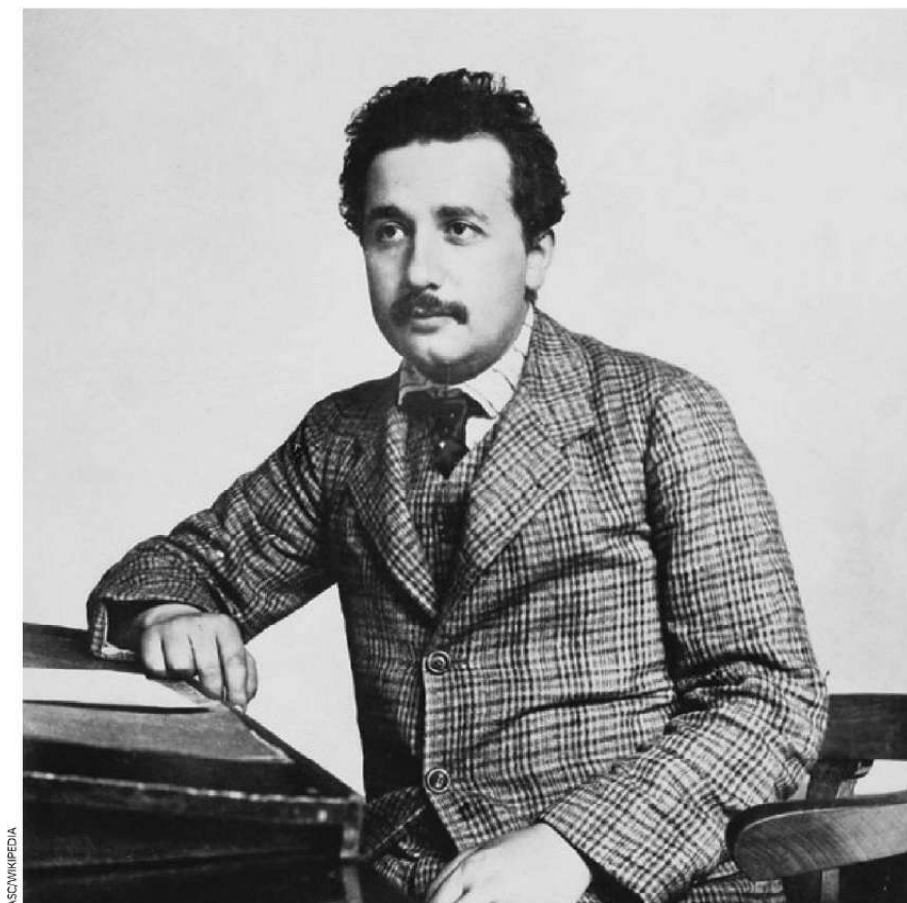
El hombre que no buscaba descubrir nada nuevo terminó desencadenando una de las mayores revoluciones científicas de la historia, una revolución cuántica gestada entre la tradición y la innovación, con Max Planck como pionero inadvertido pero fundamental. ■



Albert Einstein

EL CUÁNTICO QUE NO CREÍA
EN LA CUÁNTICA

Albert Einstein



Einstein en la Oficina Suiza de Patentes, donde comenzó a trabajar en 1902 gracias al padre de su amigo y compañero de clase Marcel Grossmann.

Cuando Albert Einstein publicó en 1905 su artículo sobre el efecto fotoeléctrico, no podía saber que aquel modesto estudio sobre la luz terminaría abriendo la puerta a una revolución que acabaría por disgustarle profundamente. Con solo 26 años, trabajando como empleado técnico en la Oficina de Patentes de Berna, propuso que la luz no era una onda continua, como dictaba la tradición de Maxwell, sino un flujo de cuantos de energía. Aquella idea emergente —que la radiación electromagnética estaba compuesta por partículas discretas— no solo desafiaba un siglo de teoría ondulatoria, sino que sentaba una base conceptual para lo que más tarde se llamaría mecánica cuántica. Fue, irónicamente, uno de los textos más disruptivos que se hayan escrito contra el determinismo clásico. Y sin embargo, a lo largo de su vida, Einstein se mantuvo fiel a una visión del mundo en la que el azar no tenía cabida. Esa paradoja personal —ser uno de los padres de la física cuántica y, al mismo tiempo, uno de sus más persistentes críticos— lo acompañaría hasta el final de sus días.

Einstein nunca fue un físico convencional. Desde sus inicios académicos, mostró una personalidad bastante inconformista. Nació en Ulm, el 14 de marzo de 1879, en una familia judía liberal que lo educó sin dogmas ni presiones religiosas. La suya no fue una infancia prodigiosa en el sentido clásico, pues sus profesores lo tachaban de

A LO LARGO DE SU VIDA, EINSTEIN SE MANTUVO FIEL A UNA VISIÓN DEL MUNDO EN LA QUE EL AZAR NO TENÍA CABIDA

disperso, incapaz de ajustarse al sistema escolar alemán. Pero encontró refugio en los libros, en las matemáticas y en la música. Su violín —como años después su pizarra— fue una prolongación de su pensamiento. Ya adulto, reconocería que las mejores ideas no le venían en laboratorios ni en bibliotecas, sino paseando, escuchando Mozart o visualizando situaciones imposibles, como cabalgar junto a un rayo de luz.

Esa forma intuitiva de razonar fue clave en su producción científica, pero también en su resistencia a las modas intelectuales. Nunca fue amigo de los axiomas impuestos ni de las interpretaciones que obligaban a renunciar al sentido común. Por eso, cuando en los años veinte la mecánica cuántica comenzó a consolidarse como una teoría estadística y probabilista, Einstein se mostró escéptico. Que algo fuera matemáticamente impecable no bastaba. Él quería entender la realidad, no solo predecirla.

Mientras la mayoría de los físicos jóvenes —Bohr, Heisenberg, Born, Pauli— aceptaban el carácter incierto y borroso del nuevo mundo cuántico, Einstein se



Einstein era un violinista consumado y a menudo tocaba para relajarse y pensar.

CREÍA EN LEYES PROFUNDAS, EN ARMONÍAS SUBYACENTES, EN CAUSAS OCULTAS QUE UN DÍA SE REVELARÍAN

mantuvo fiel a un ideal de claridad racional. No le convencía la idea de que una partícula no tuviera propiedades definidas hasta ser medida, ni que el acto de observación modificara el sistema. Una frase popular que se le atribuye con frecuencia resume su postura: «La Luna sigue ahí aunque nadie la mire», solía decir. Esa defensa intuitiva de un mundo con existencia objetiva, incluso en el dominio microscópico, lo alejó del consenso de su tiempo. Aunque respetado como leyenda viva, Einstein quedó cada vez más aislado en sus posiciones. Su negativa a aceptar el colapso de la función de onda y su empeño en buscar variables ocultas que restauraran el determinismo lo convirtieron en una figura incómoda, incluso para quienes le debían parte de su prestigio.

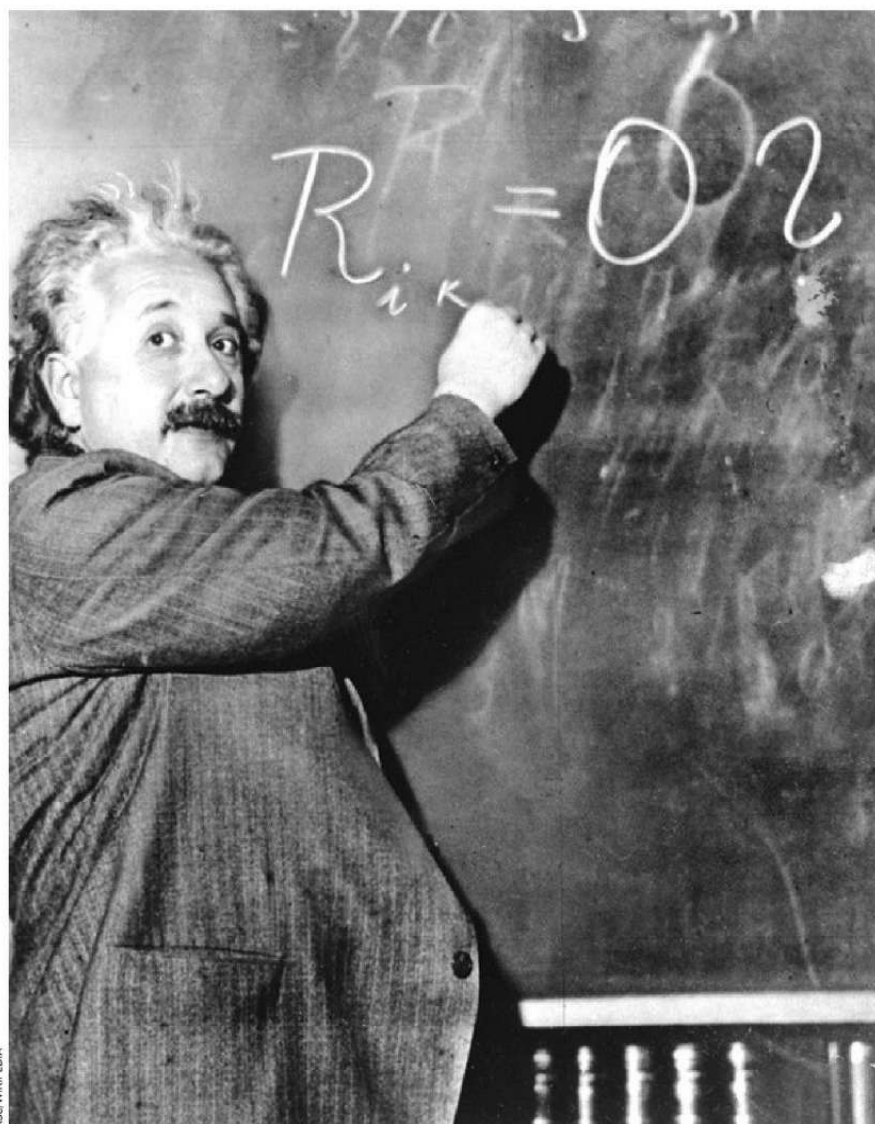
En su exilio estadounidense, instalado en Princeton desde los años treinta, Einstein continuó siendo un pensador libre. Sus últimos años, lejos de los focos experimentales, estuvieron dedicados a una búsqueda tenaz —y a la postre infructuosa— de una teoría del todo. Una teoría unificada de campos que, como las antiguas leyes de la física clásica, pudiera explicar lo grande y lo pequeño sin necesidad de probabilidades ni discontinuidades. Murió el 18 de abril de 1955 a causa de un aneurisma de aorta abdominal y sin haber logrado ese sueño, pero con la convicción intacta de que la física debía aspirar a comprender el universo como un todo lógico, y no como una colección de resultados estadísticos.

Einstein no creía en el azar, ni en el papel activo del observador, ni en una naturaleza que respondía de forma impredecible. Creía en leyes profundas, en armonías subyacentes, en causas ocultas que un día se revelarían. Por eso su frase más famosa —«Dios no juega a los dados»— no era una provocación religiosa, sino una declaración filosófica: la realidad, en su visión, debía ser comprensible, ordenada, necesaria. Aun si su comprensión requería nuevas herramientas, nuevas geometrías, nuevas energías.

Así, el hombre que introdujo el cuanto de luz y describió la emisión estimulada —pilares sin los cuales no existirían ni la mecánica cuántica ni las placas solares ni el láser— acabó siendo su disidente más célebre. Un revolucionario que no aceptó las consecuencias últimas de su propia revolución. Un genio que, hasta el final, prefirió el mapa al laberinto.

EINSTEIN Y EL CUANTO: EL IMPULSOR RETICENTE

Pese a su resistencia final al edificio de la mecánica cuántica, Albert Einstein fue esencial en su construcción. Sin él, la física cuántica no habría nacido tal como la conocemos. Su aportación no fue solo la chispa inicial, pues también propuso ideas clave que siguen siendo activas en la investigación cuántica contemporánea, desde los láseres hasta las paradojas sobre la información cuántica. Ningún otro científico contribuyó tanto a la cuántica sin identificarse con ella.

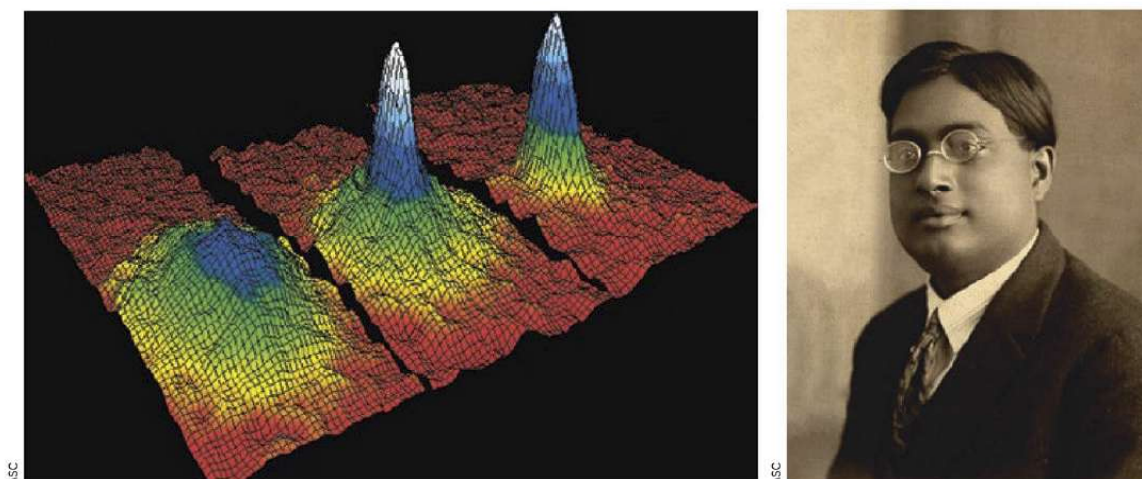


Albert Einstein en 1931 en el Instituto Carnegie del Observatorio Mt. Wilson en Pasadena, California.

La primera gran aportación cuántica de Einstein fue su explicación del efecto fotoeléctrico, en 1905. Este fenómeno —por el que ciertos metales emiten electrones cuando se iluminan con luz de una determinada frecuencia— no encajaba con la teoría electromagnética clásica. Según Maxwell, la energía de la luz debía depender de su intensidad, no de su frecuencia. Sin embargo, los experimentos mostraban que la emisión solo se producía si la luz superaba un umbral de frecuencia, sin importar cuán intensa fuera. Una analogía nos permite entenderlo: no se trata de tirar muchas canicas pequeñas seguidas y a la vez, sino de tirar una bola un poco más grande una sola vez. Einstein propuso que la luz no era una onda continua, sino un conjunto de cuantos discretos de energía, a los que llamó «cuantos de luz» (hoy los llamamos fotones). Cada fotón portaba una energía proporcional a su frecuencia, según la fórmula $E=h\nu$, donde h es la constante de Planck. La propuesta parecía una regresión al modelo corpuscular de Newton, pero funcionaba. Y lo que entonces era una herejía se convirtió en uno de los pilares de la física moderna. Por esta idea, no por la relatividad, recibió el Premio Nobel en 1921.

Las estadísticas que no siguen la norma

En 1924, un joven físico indio llamado Satyendra Nath Bose (abajo, una fotografía suya de 1925) envió a Einstein un artículo en el que proponía una nueva manera de contar partículas. Se trataba de fotones, partículas indistinguibles entre sí, que no obedecían las reglas estadísticas habituales. A Einstein le fascinó tanto que tradujo el artículo al alemán y lo publicó en una revista de prestigio. Luego generalizó la idea a partículas materiales y de ahí nació la estadística de Bose-Einstein. Frente a la clásica distribución de Maxwell-Boltzmann, válida para partículas discernibles como bolas de billar, la nueva estadística permitía describir cómo ciertas partículas, los bosones, tienden a agruparse en el mismo estado cuántico. Este comportamiento colectivo desafía el sentido común: no se repelen, se amontonan. Gracias a esta intuición, décadas después se descubriría el condensado de Bose-Einstein, un estado de la materia en el que millones de átomos actúan como una sola entidad cuántica.

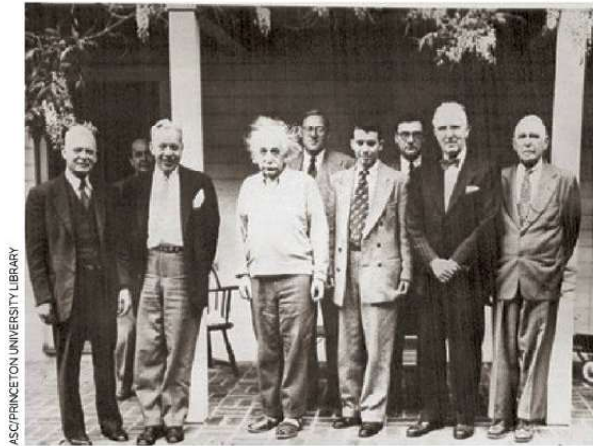


Un condensado de Bose-Einstein (BEC) es un estado de la materia que se forma al enfriar un gas de bosones a temperaturas extremadamente bajas, próximas al cero absoluto.

Einstein no se detuvo tras su artículo de 1905. En 1907, aplicó la idea de los cuantos de energía al estudio del calor en los sólidos, resolviendo un enigma que la física clásica no podía explicar: por qué la capacidad calorífica de los materiales disminuye cuando se enfrían. Años después, en 1916, dio otro paso decisivo al analizar cómo los átomos emiten y absorben luz. Propuso que estos procesos podían darse de tres maneras: una emisión espontánea (cuando un átomo libera luz por sí solo), una absorción (cuando un átomo capta un cuanto de luz) y una emisión estimulada (cuando un fotón que pasa cerca provoca que el átomo emita otro fotón

**EINSTEIN ESTABA CONVENCIDO DE QUE
DEBÍA EXISTIR UNA TEORÍA MÁS PROFUNDA,
CON VARIABLES OCULTAS**

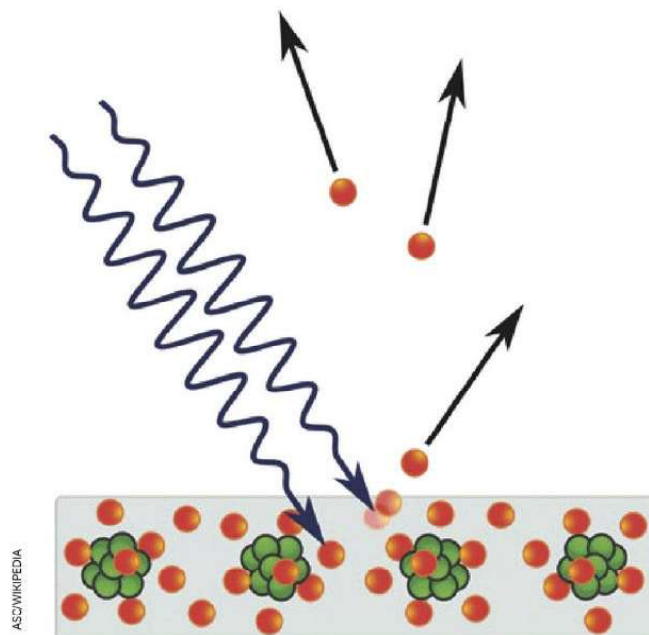
idéntico). Para describir estas tres posibilidades, introdujo unas constantes —hoy llamadas coeficientes A y B— que permitían calcular la probabilidad de cada proceso. Esta idea anticipaba, de forma sorprendente, el principio físico que haría posible el láser décadas más tarde. Pero, además, su propuesta reforzaba la visión de que la luz estaba compuesta por partículas. Curiosamente, el propio Planck, que había introducido el cuanto como herramienta matemática, nunca se sintió del todo cómodo con esa interpretación tan concreta. Einstein, en cambio, la defendía sin titubeos.



Einstein pasó los años 1933 a 1939 investigando y dando conferencias en Princeton.

A lo largo de los años veinte, sin embargo, Einstein se fue alejando de la cuántica dominante. Lo que le incomodaba no era la existencia de cuantos, sino la pérdida de determinismo. La interpretación de Copenhague, impulsada por Bohr y Heisenberg, afirmaba que la realidad cuántica no estaba definida hasta el momento de la medición, y que la función de onda solo ofrecía probabilidades. Esto era demasiado para Einstein. Él creía que esa incertidumbre era el reflejo de nuestro desconocimiento, no una propiedad fundamental del mundo. Estaba convencido de que debía existir una teoría más profunda, con variables ocultas que devolvieran a la física su carácter predictivo y completo.

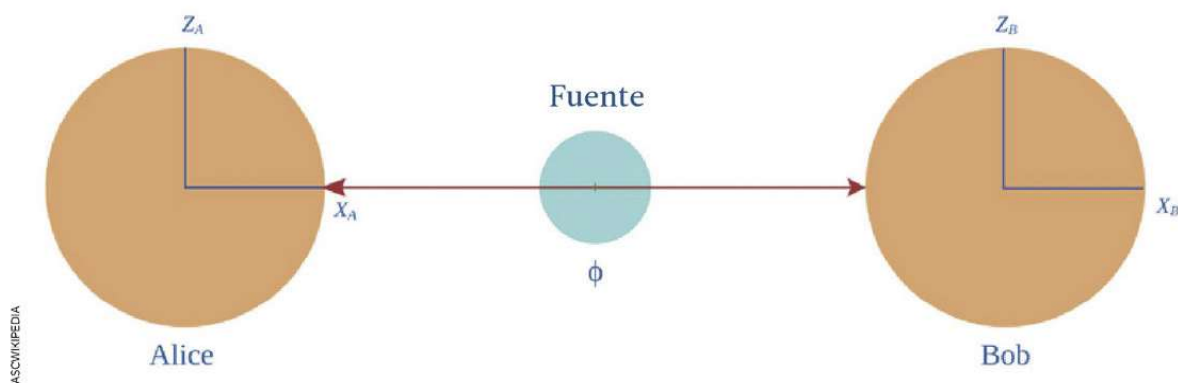
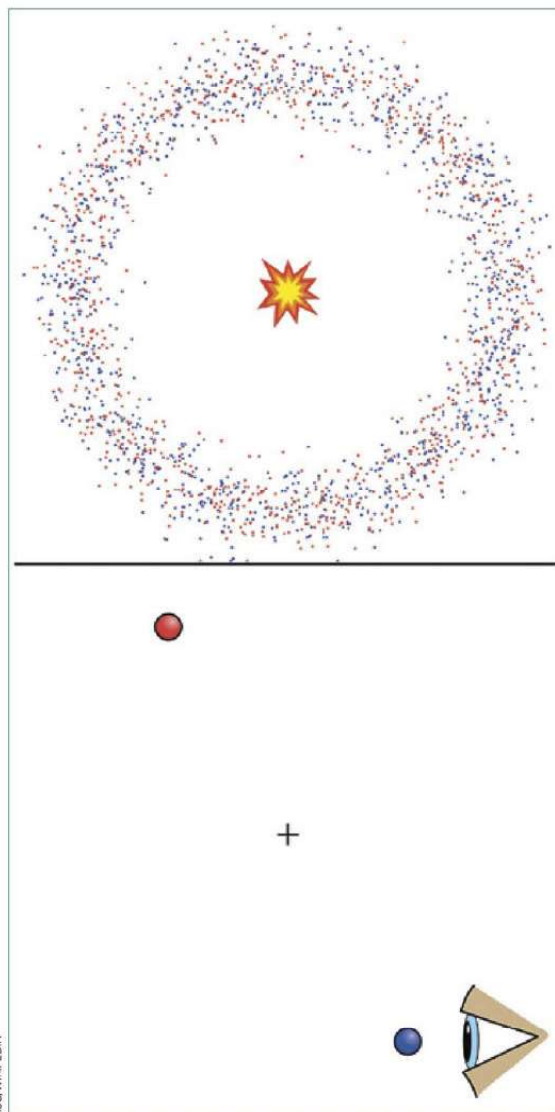
Esa convicción le llevó a formular, junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen, la famosa paradoja EPR en 1935. En ella, planteaban un experimento mental con dos



El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general).

La paradoja EPR explicada para humanos

Imagina que tienes un par de guantes, uno derecho y otro izquierdo, y los metes en dos cajas opacas. Envías una caja a Marte y te quedas con la otra. Si al abrir tu caja descubres que tienes el guante derecho, sabes instantáneamente que el otro es el izquierdo, aunque esté a millones de kilómetros. Eso no parece mágico: simplemente los guantes ya tenían una propiedad determinada desde el principio. Pero ahora cambia los guantes por dos partículas cuánticas entrelazadas. Según la física cuántica, esas partículas no tienen propiedades definidas hasta que las mides. Al medir una, la otra «elige» su estado al instante, como si recibiera un mensaje más rápido que la luz. En 1935, Einstein, Podolsky y Rosen argumentaron que eso no podía ser real. O la teoría cuántica estaba incompleta, o la naturaleza violaba la separación entre objetos distantes. Esa paradoja —llamada EPR por sus autores— planteaba una disyuntiva incómoda: aceptar un mundo misteriosamente conectado o buscar una teoría más profunda que devolviera el sentido común perdido. Décadas después, los experimentos dieron la razón a la cuántica, puesto que el entrelazamiento existe y la información parece viajar «sin viajar», desafiando nuestra intuición de espacio y causalidad.



Experimento mental EPR, realizado con pares electrón-positrón. Una fuente (centro) envía partículas hacia dos observadores: electrones a Alice (izquierda) y positrones a Bob (derecha), quienes pueden realizar mediciones de espín.



Albert Einstein recibió el Premio Nobel de Física en 1921 por su explicación del efecto fotoeléctrico, no por su Teoría de la Relatividad.

partículas entrelazadas. Al medir una, se podía conocer instantáneamente el estado de la otra, sin importar la distancia que las separase. Esta «acción fantasmagórica a distancia», como la llamó Einstein, violaba los principios de la relatividad y del sentido común. El objetivo del artículo era mostrar que la teoría cuántica no podía ser completa. O bien existía una señal más rápida que la luz (lo que él consideraba inadmisible), o bien la teoría necesitaba ser corregida.

La paradoja EPR fue durante años un debate puramente filosófico. Pero en la segunda mitad del siglo xx, John Bell formalizó la discusión con su famosa desigualdad. Y a partir de los años 80, experimentos como los de Alain Aspect demostraron que el mundo cuántico viola efectivamente esa desigualdad. En otras palabras: Einstein tenía razón en que la cuántica era rara, pero no en que fuera incorrecta. El mundo parece ser, en efecto, «no local» en el sentido que él rechazaba. Y la paradoja EPR, lejos de ser un argumento contra la teoría, se convirtió en una de sus pruebas más sólidas. ■

Mileva Marić

LA SOMBRA CUÁNTICA
DE EINSTEIN

Mileva Marić



Cuando Mileva Marić nació en Titel, una pequeña localidad del Imperio austrohúngaro, el 19 de diciembre de 1875, el mundo científico era un club casi exclusivamente masculino. El siglo XIX se extinguía con un puñado de excepciones femeninas en la ciencia, casi todas silenciadas, ninguneadas o confinadas a los márgenes de la historia oficial. En ese contexto, que una joven serbia se abriera paso hasta las aulas del Politécnico de Zúrich —uno de los centros de formación científica más exigentes de Europa— ya constituía una anomalía estadística. Pero Mileva no era una excepción cualquiera. Su inteligencia, su ambición y su afinidad por la física teórica la convertirían en una figura tan fascinante como incómoda para los guardianes de la posteridad.

Era hija de un funcionario progresista, que desde muy pronto percibió en ella un talento inusual. La envió a escuelas donde el alemán era la lengua de enseñanza, convencido de que esa era la puerta a una formación científica seria. Y no se equivocó. Mileva devoró matemáticas, física y filosofía con una pasión rara en una época en que las mujeres, en el mejor de los casos, podían aspirar a ser profesoras de instituto. En 1896 ingresó en el Politécnico de Zúrich, convirtiéndose en la única mujer de su promoción de física y matemáticas. Allí conocería a Albert Einstein, que acabaría siendo primero su compañero de estudios, luego su pareja sentimental, más tarde su esposo y, finalmente, su sombra eterna.

La relación entre Mileva y Albert ha sido objeto de debates, mitificaciones, polémicas y silencios. Lo que está claro es que compartieron mucho más que una historia de amor. Durante sus años de estudiantes, intercambiaban ideas, resolvían juntos problemas complejos, estudiaban codo con codo en la biblioteca y discutían con entusiasmo (según algunas fuentes) los textos más recientes de la física moderna. En sus cartas, Einstein se refiere a «nuestro trabajo sobre el movimiento relativo» o «nuestra teoría», expresiones que han alimentado una controversia aún vigente: ¿cuánto de la obra inicial de Einstein le debe a Marić? Es un tema controvertido de interpretación en eterno debate.

La respuesta no es sencilla. Por un lado, Mileva suspendió su examen final en 1901 —el temido Diploma de Estado que le habría permitido ejercer como profesora— y nunca defendió su tesis doctoral. Pero esto no dice toda la verdad. A lo largo de los años siguientes, participó activamente en las discusiones científicas que su marido mantenía sobre la teoría del éter, la relatividad del movimiento y la termodinámica.

Hay memorias tardías de los años 80 que mencionan la existencia de testigos contemporáneos que afirmaban haberla escuchado explicar, con rigor y claridad, ideas que luego aparecerían firmadas solo por él. Y sin embargo, Mileva no publicó ni un solo artículo por su cuenta. Todo lo que sabemos



Albert Einstein y su primera esposa, Mileva Marić, fotografiados en 1912.

MIENTRAS EINSTEIN SE CONSOLIDABA COMO GENIO EMERGENTE ELLA QUEDABA RELEGADA AL PAPEL DE MADRE Y GESTORA DEL HOGAR

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:



Mileva Marić con sus dos hijos, Hans Albert, nacido en 1904 y Eduard, nacido en 1910.

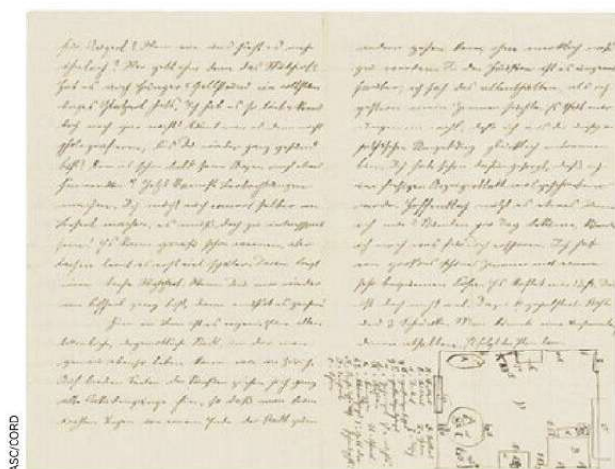
de su potencial científico se diluye en un mar de correspondencia íntima, testimonios indirectos y documentos extraviados.

El matrimonio entre Mileva y Albert fue, al principio, una complicidad apasionada. En 1902 nació su primera hija, Lieserl, de cuya existencia apenas hay rastro. Se cree que fue dada en adopción o que murió poco después. Luego llegaron Hans Albert (1904) y Eduard (1910), en una etapa marcada ya por el distanciamiento y el desequilibrio. Mientras Einstein se consolidaba como genio emergente —con sus famosos artículos de 1905 y su prestigio creciente en la comunidad científica—, Mileva quedaba relegada al papel de madre y gestora del hogar. La asimetría se hizo insostenible. En 1914, Einstein se trasladó a Berlín, invitado por la Academia Prusiana de Ciencias, y le envió a Mileva una lista de condiciones para continuar el matrimonio, que incluía cláusulas como «te encargarás de que mi ropa esté limpia» o «no me hablarás si yo no te dirijo la palabra». Ella, humillada y exhausta, regresó con sus hijos a Zúrich y pidió el divorcio.

Nunca se recuperó del todo. La ruptura, las presiones económicas, las dudas sobre su propio valor intelectual y, más adelante, la enfermedad mental de su hijo Eduard, fueron erosionando su salud física y emocional. Siguió viviendo en



Lápida conmemorativa en el cementerio de Nordheim de Zúrich.



Parte de la correspondencia entre Marić y Einstein.

Zúrich, trabajando como profesora particular de matemáticas para sostenerse, mientras observaba desde lejos cómo el nombre de Einstein se convertía en sinónimo de genialidad. En 1919 se formalizó el divorcio, con una cláusula llamativa: Albert se comprometía a entregarle el dinero del futuro Premio Nobel que, según él, «tarde o temprano ganaría». Y así fue: en 1921 recibió el Nobel de Física y cumplió su promesa.

Mileva Marić murió el 4 de agosto de 1948, sin haber vuelto a publicar ni a enseñar oficialmente en ninguna universidad. En su tumba no figura ninguna alusión a la ciencia. Durante décadas fue reducida a un apéndice biográfico de Einstein, una nota a pie de página en su ascenso estelar. Pero en los últimos años, su figura ha sido objeto de una relectura crítica. Historiadores, científicas y escritoras han rescatado su historia como símbolo de todas las mujeres que participaron en la ciencia de manera invisible, marginadas por estructuras que nunca estuvieron hechas para ellas. En ese sentido, Mileva Marić representa no solo un enigma biográfico, sino una pregunta abierta: ¿cuántas mentes brillantes han sido borradas sin dejar huella?

LA FÍSICA SIN FIRMA: EL LEGADO CIENTÍFICO DE MILEVA MARIĆ

Hablar de Mileva Marić como figura de la física cuántica exige recorrer un terreno minado por la duda, la omisión documental y los silencios biográficos. Tampoco dejó escritos técnicos ni cuadernos de laboratorio que permitan reconstruir con precisión su pensamiento físico. Y sin embargo, está presente en el germen de una revolución. Para entender su papel en la gestación de las ideas que llevarían a la física al umbral de lo cuántico, no basta con buscar su nombre en las revistas científicas. Hay que mirar entre líneas, en las zonas de penumbra donde a menudo habitan los verdaderos detonantes.

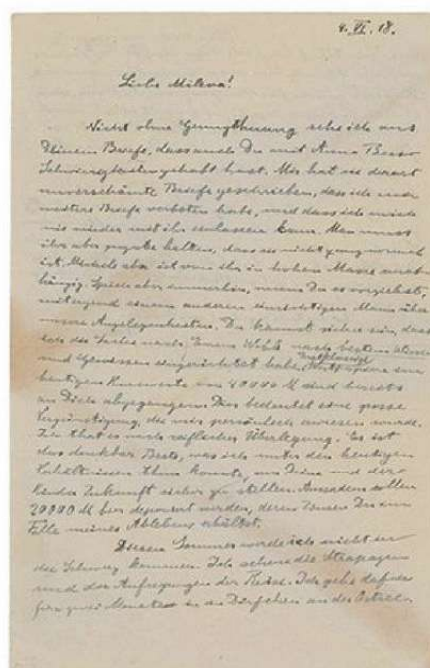
NO DEJÓ ESCRITOS TÉCNICOS NI CUADERNOS DE LABORATORIO QUE PERMITAN RECONSTRUIR CON PRECISIÓN SU PENSAMIENTO FÍSICO

Durante sus años de formación, Mileva Marić se empapó de los debates más fértiles de la física teórica de fin de siglo. Estudió con pasión la termodinámica de Clausius, los trabajos de Helmholtz y Boltzmann, las propiedades del éter y las oscilaciones electromagnéticas descritas por Hertz y Maxwell. Pero, sobre todo, mostró una sensibilidad particular para la mecánica estadística y para los fundamentos conceptuales del nuevo paradigma emergente. Sabía que la física del siglo XIX había agotado sus herramientas explicativas y que algo nuevo se estaba gestando, aunque no tuviera aún nombre.

En ese contexto, su colaboración con Albert Einstein durante la etapa 1899-1905 cobra un valor singular. No se trataba simplemente de corregirse los ejercicios o

Una cláusula en el divorcio: el Premio Nobel como compensación

Cuando Albert Einstein y Mileva Marić se separaron oficialmente en 1919, tras años de distanciamiento y una convivencia ya imposible, firmaron un acuerdo de divorcio en el que figuraba una cláusula inusual. Einstein se comprometía a entregarle a Mileva el importe íntegro de un futuro Premio Nobel, si algún día lo obtenía. La fórmula era extraña. No porque dudara de sus probabilidades —el nombre de Einstein empezaba ya a consolidarse internacionalmente—, sino porque el Nobel no había sido aún concedido y nadie podía garantizarlo. Y, sin embargo, la cláusula quedó fijada, como si ambos asumieran que ese día llegaría. Tres años después, en 1922, Albert Einstein recibió finalmente el Premio Nobel de Física correspondiente a 1921, y cumplió lo que había firmado. El dinero fue transferido a una cuenta en Suiza administrada por Mileva, que lo utilizó para adquirir dos viviendas en Zúrich y asegurar cierta estabilidad a sus hijos. Durante años, esa cláusula ha sido interpretada de diversas formas. Como gesto de justicia, como compensación silenciosa o como acuerdo puramente práctico. Lo cierto es que, a falta de autoría científica reconocida, Mileva Marić fue al menos beneficiaria de uno de los galardones más prestigiosos del siglo XX. Una línea en un contrato revelaba, quizás, todo lo que el discurso oficial no se atrevía a decir.



compartir apuntes de clase. Según las cartas que intercambiaron, discutían juntos las anomalías de la radiación del cuerpo negro, la teoría de los cuantos de Planck y los límites de la mecánica clásica. Algunas de las expresiones empleadas por Einstein en esas misivas apuntan a una interacción más densa que la simple compañía afectiva. En un borrador mecanografiado de 1901, según el físico ruso Abram Ioffe, se menciona como autor a «Einstein-Marity» (el apellido húngaro de Mileva), aunque esa versión no llegó nunca a publicarse y solo se conserva en referencia secundaria.

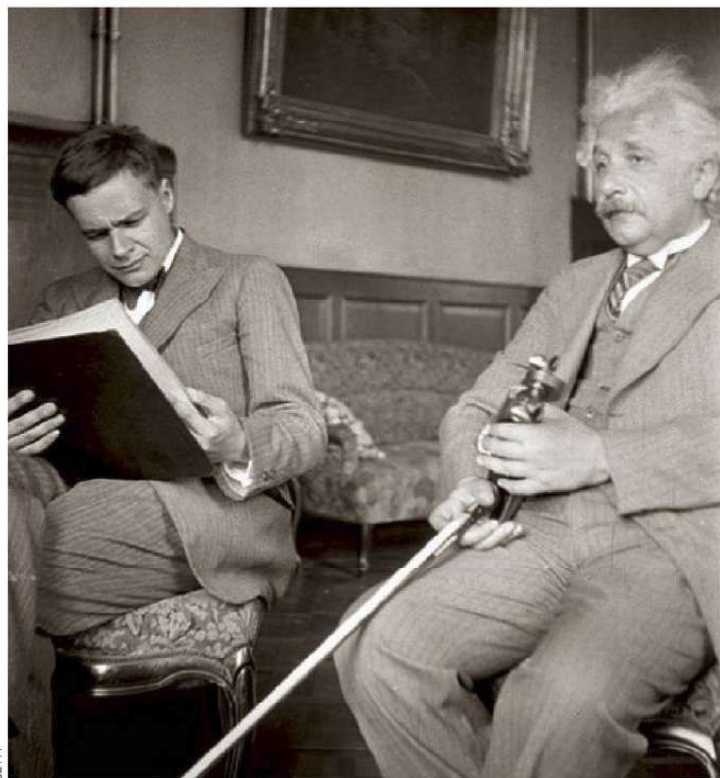
Eduard Einstein, el hijo olvidado

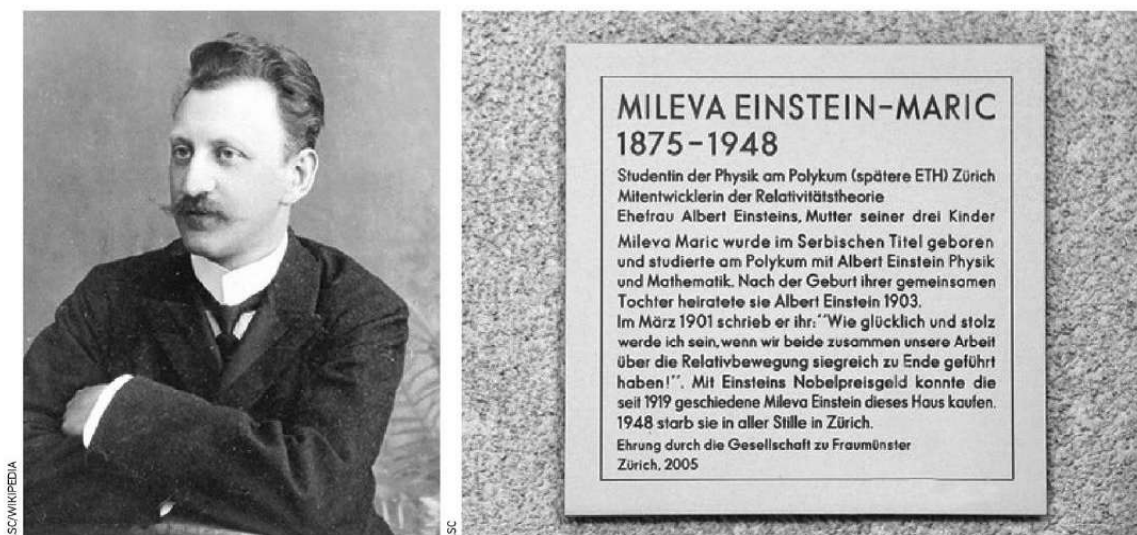
El hijo menor de Albert Einstein y Mileva Marić nació en Zúrich en 1910. Inteligente, sensible y aficionado a la música, Eduard mostró desde muy pequeño una personalidad intensa y una curiosidad desbordante. Mientras su hermano Hans Albert seguía una vocación técnica, Eduard se inclinaba por la literatura, la poesía y la psicología. Su admiración por Freud lo llevó a estudiar medicina con la intención de convertirse en psiquiatra.

Pero a los veinte años sufrió un primer brote psicótico. Fue ingresado en el hospital psiquiátrico Burghölzli con un diagnóstico que entonces empezaba a definirse clínicamente: esquizofrenia. A partir de ese momento, su vida quedó marcada por las crisis, las reclusiones periódicas y un progresivo deterioro mental.

Mileva Marić, ya separada de Einstein, asumió sola el cuidado de su hijo enfermo. Vendió propiedades, dio clases particulares y recurrió a amigos para sostener los tratamientos, que eran costosos y en gran medida ineficaces.

La correspondencia con Albert muestra súplicas de ayuda, respuestas evasivas y un creciente distanciamiento. Cuando el físico se instaló en Estados Unidos en 1933, rompió definitivamente el vínculo presencial con Eduard. No volvió a verlo. En cartas posteriores escribió que la locura de su hijo era una cruz demasiado pesada y que su sufrimiento era más del que podía soportar. Eduard murió en 1965, a los 55 años, en la misma clínica de Zúrich donde había pasado gran parte de su vida. Nunca salió del anonimato, nunca fue visitado por su padre, y su figura sigue siendo, hoy, una herida discreta en la biografía del genio más célebre del siglo xx.





A la izda., el físico ruso Abram Ioffe, cuyo testimonio sobre un manuscrito firmado «Einstein-Marity» alimentó la controversia en torno al papel de Mileva Marić. A la dcha., placa conmemorativa de la Sociedad Fraumünster en la casa de Mileva Einstein-Marić en Zúrich.

¿Participó activamente Mileva Marić en la formulación del artículo sobre el efecto fotoeléctrico de 1905, considerado uno de los pilares de la física cuántica? ¿Tuvo algo que ver con el enfoque probabilístico que Einstein aplicó al fenómeno, anticipando ideas que luego serían desarrolladas por Born y Heisenberg? No hay pruebas concluyentes, pero tampoco puede descartarse. Lo cierto es que en aquellos años ella tenía la formación matemática necesaria para comprender los desafíos que presentaban los cuantos de energía, y mantenía con Albert un intercambio intelectual que excedía el plano doméstico. Desgraciadamente, en la actualidad, se carece de fuentes primarias fidedignas que respalden con firmeza la coautoría de Mileva en el enfoque del efecto fotoeléctrico, y es por eso que muchas veces se puede caer en el terreno de la especulación.

En cualquier caso, es plausible pensar que Marić encarna una forma alternativa de estar en la ciencia. No desde el laboratorio institucional ni desde la firma reconocida, sino desde la contribución invisible, el pensamiento compartido y la influencia conceptual; la rebotica de la ciencia. Su historia anticipa el reconocimiento contemporáneo de las colaboradoras sin nombre, de las calculadoras anónimas, de las físicas sin laboratorio. Su paso por la historia de la cuántica puede parecer tenue, pero sugiere algo más profundo. Nos referimos a que las ideas científicas no siempre emergen de la soledad del genio, sino de redes, diálogos y entornos donde a menudo la autoría se disuelve.

¿Hubo una física cuántica posible que se perdió con el silencio de Mileva Marić? ¿Qué enfoque, qué formulación o qué preguntas no llegaron a escribirse porque su voz fue excluida? Quizá esas cuestiones no tengan respuesta, pero forman parte del legado que la historia de la ciencia tiene pendiente con muchas figuras como la suya. La física cuántica nació entre paradojas, discontinuidades y saltos conceptuales. Y en ese escenario convulso, la figura de Marić no solo interpela nuestras certezas sobre el pasado, sino también sobre cómo escribimos la historia del conocimiento. ■



Niels Bohr

ÁTOMOS, PARADOJAS
Y EL ESPÍRITU
DE COPENHAGUE

Niels Bohr.

Niels Henrik David Bohr nació el 7 de octubre de 1885 en Copenhague, Dinamarca, en el seno de una familia culta y abierta al pensamiento. Su padre, Christian Bohr, era profesor de fisiología y miembro de la Academia Real de Ciencias Danesa. Su madre, Ellen Adler, provenía de una influyente familia judía vinculada al mundo de la banca y la educación. Ese entorno le proporcionó desde niño una combinación peculiar de rigor científico y sensibilidad intelectual. Cuentan que en su casa se debatía tanto sobre biología como sobre Kierkegaard, y que el joven Niels escuchaba con atención las conversaciones de su padre con otros académicos. Aquellas discusiones forjarían su estilo: reflexivo, sereno y siempre dispuesto a sopesar distintas perspectivas antes de emitir una conclusión.

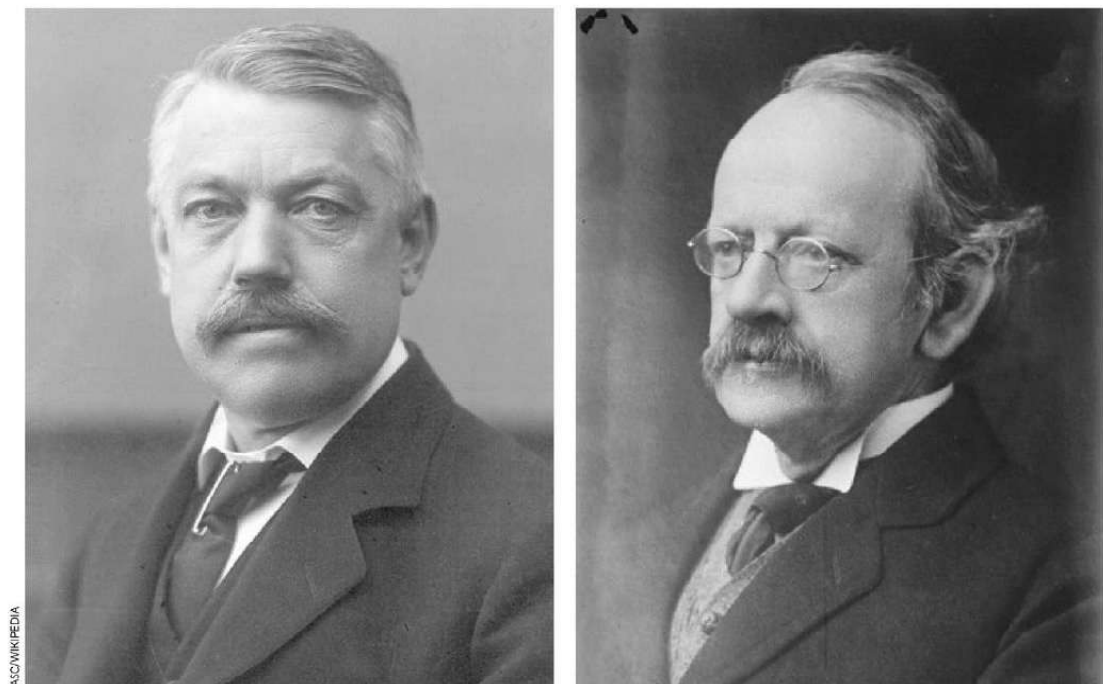
Estudió en la Universidad de Copenhague, donde se licenció en Física en 1909. Su tesis doctoral, escrita en 1911, se centraba en la teoría electrónica de los metales. Aunque el tema era denso y poco brillante en apariencia, Bohr supo dotarlo de un enfoque original que llamó la atención de sus profesores. Ese mismo año, con una beca, se trasladó a Cambridge para trabajar bajo la dirección de J. J. Thomson, descubridor del electrón. Sin embargo, la colaboración no prosperó. Thomson era ya un referente consagrado y apenas mostró interés por aquel joven danés de acento extraño. En cambio, el destino le llevó poco después a Mánchester, donde comenzó una relación mucho más fructífera con Ernest Rutherford, quien había formulado recientemente su modelo nuclear del átomo. Fue en ese entorno donde Bohr encontró el terreno fértil que necesitaba su pensamiento.

UNA VIDA MODESTA, A PESAR DE UNA TRILOGÍA QUE LO LANZÓ AL ESTRELLATO CIENTÍFICO

En 1913, Bohr publicó una serie de tres artículos en la revista *Philosophical Magazine* que cambiarían la historia de la física. En ellos proponía un modelo atómico radicalmente nuevo, que combinaba la visión de Rutherford con ciertas ideas extraídas de la naciente teoría cuántica de Planck. Aquellos textos, redactados en un inglés casi escolar pero de una claridad conceptual sorprendente, le valieron un inmediato reconocimiento internacional. Aunque no resolvían todos los enigmas del átomo, daban en el centro del problema: ofrecían un marco teórico capaz de explicar por qué los átomos emitían luz en determinadas frecuencias, y no en otras. Einstein elogió públicamente su propuesta y Rutherford quedó impresionado por la audacia del joven danés.

El prestigio ganado le permitió volver a Copenhague como profesor, y en 1920 fundó el Instituto de Física Teórica que llevaría su nombre. Aquel lugar pronto se convirtió en uno de los centros neurálgicos de la física cuántica europea. Durante las décadas de 1920 y 1930, Bohr acogió a decenas de jóvenes investigado-

SE TRASLADÓ A CAMBRIDGE PARA TRABAJAR BAJO LA DIRECCIÓN DE J. J. THOMSON, DESCUBRIDOR DEL ELECTRÓN



A la izda., Christian Bohr, fisiólogo y padre de Niels, conocido por el «efecto Bohr» en la hemoglobina. A la dcha., J. J. Thomson, descubridor del electrón y director del Cavendish.

res prometedores, entre ellos Heisenberg, Pauli, Gamow o Landau. La atmósfera del instituto era peculiar, pues se valoraba la conversación pausada, el análisis compartido y el respeto por la duda. Bohr no imponía teorías, sino que planteaba preguntas. Su método no consistía en transmitir verdades, sino en proponer



Instituto de Física Teórica de Copenhague (hoy Instituto Niels Bohr), fundado en 1920.



Conferencia de Copenhague, 11 de marzo de 1930: en primera fila, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, George Gamow, Lev Landau y H. A. Kramers.

interpretaciones posibles. Era famoso por reformular las preguntas que se le hacían, convirtiéndolas en otras más profundas o más abstractas, para desesperación de los más impacientes. Sus discusiones con Einstein durante los congresos Solvay son hoy legendarias. Ambos se respetaban profundamente, pero diferían en su concepción de la realidad. Einstein buscaba certezas; Bohr, coherencias internas.

La personalidad de Bohr no era carismática en el sentido convencional. Hablaba con dificultad, a veces con frases inacabadas, como si pensara en voz alta. Pero quienes trabajaban con él aprendían a apreciar su precisión, su calidez silenciosa y su pasión por las ideas. Le gustaba comparar la física cuántica con la poesía. En ambos casos, el significado no se entrega de golpe, sino que se sugiere, se insinúa, se rodea. También le fascinaban las paradojas lógicas y las tensiones internas del lenguaje, una afición que trasladó a su famoso principio de complementariedad, que más adelante adquiriría categoría filosófica.

Durante la Segunda Guerra Mundial, Bohr tuvo que huir de Dinamarca cuando los nazis ocuparon el país. Su madre era judía y su apellido aparecía en las listas de personas vigiladas. Fue rescatado en una operación secreta y llevado a Estados

EINSTEIN Y BOHR SE RESPETABAN PROFUNDAMENTE, PERO DIFERÍAN EN SU CONCEPCIÓN DE LA REALIDAD

Unidos, donde colaboró brevemente con el Proyecto Manhattan. Aunque comprendía la necesidad estratégica de desarrollar la bomba atómica, Bohr expresó pronto su preocupación por las implicaciones éticas del armamento nuclear. Tras la guerra, promovió activamente la cooperación internacional y defendió la idea de una ciencia sin fronteras. Participó en la creación del CERN y fue uno de los impulsores del control civil de la energía atómica.

En su madurez, Bohr recibió numerosos honores, entre ellos el Premio Nobel de Física en 1922. Pero nunca dejó que los galardones alteraran su estilo de vida. Vivía en una casa modesta cerca del instituto, compartía comidas con estudiantes y seguía participando en las discusiones cotidianas como uno más. Falleció en Copenhague el 18 de noviembre de 1962, a los 77 años. A su muerte, fue enterrado en el Cementerio de Assistens, no lejos de donde reposan los restos de Kierkegaard, otra de sus influencias invisibles. Su epitafio es discreto: «Niels Bohr, físico». Como si el misterio cuántico pudiera encerrarse en dos palabras.

DEL ÁTOMO PLANETARIO A LA PARADOJA CUÁNTICA

Cuando Bohr propuso su modelo atómico en 1913, la física se encontraba en un punto de transición delicado. El modelo de Rutherford, basado en un núcleo positivo rodeado de electrones en órbita, era sugerente, pero fallaba al intentar explicar la estabilidad del átomo. Según las leyes clásicas del electromagnetismo, los electrones en movimiento deberían perder energía continuamente y caer en espiral hacia el núcleo. Bohr propuso una solución inesperada, que consiste en



De izda. a dcha., Niels Bohr, James Franck, Albert Einstein e Isidor Isaac Rabi en 1954.

EL LLAMADO «MODELO DE BOHR» TENÍA UNA BELLEZA CASI GEOMÉTRICA, PERO ERA EVIDENTE QUE SE TRATABA DE UNA IMAGEN INCOMPLETA

limitar las órbitas electrónicas a un conjunto discreto de estados permitidos, cada uno con una energía definida. En esos niveles, el electrón no radiaba energía. Solo cuando pasaba de un nivel a otro emitía (o absorbía) un fotón cuya energía correspondía exactamente a la diferencia entre ambos niveles.

La idea no era del todo nueva —Planck ya había introducido el concepto de cuantización en el estudio de la radiación del cuerpo negro—, pero Bohr la aplicó con audacia a la estructura del átomo. El resultado fue un modelo matemático simple y eficaz que explicaba con gran precisión las líneas espectrales del hidrógeno. Por primera vez, se unían observación y teoría en un marco coherente. Aquella propuesta tenía algo de provisional, casi de andamio conceptual, pero funcionaba. Y funcionaba mejor que cualquier otro intento anterior.

El llamado «modelo de Bohr» tenía una belleza casi geométrica: los electrones orbitaban en niveles numerados, y sus saltos entre niveles creaban la luz. Sin embargo, era evidente que se trataba de una imagen incompleta. Aplicado a átomos más complejos que el hidrógeno, el modelo fallaba. Tampoco explicaba por qué esos niveles eran estables ni qué impedía que el electrón se situara entre dos órbitas permitidas. Pero Bohr ya estaba pensando más allá. Su contribución no se limitó a una fórmula útil, sino que abrió la puerta a una nueva forma de pensar en la

Una herradura y el azar: anécdota cuántica

Se relata que en la puerta de la cabaña de verano de Niels Bohr en Tisvilde había colgada una herradura, símbolo tradicional de la buena suerte. Según la versión recogida por Werner Heisenberg en su libro *Física y más allá* (1969), un conocido preguntó si Bohr realmente creía en esa superstición. Bohr respondió a la pregunta con su habitual humor: «Claro que no, pero me han dicho que funciona incluso si no se cree en ella».

La fuente más temprana que parece documentar esta historia involucra al físico Samuel Goudsmit (en la imagen), quien comentó que la oyó de I. Bernard Cohen, historiador de ciencia de Harvard, quien a su vez la transmitió en una reunión con Bohr en 1954 laboralmente vinculada a Brookhaven. La anécdota no aparece en ninguna de las biografías académicas más rigurosas ni en los archivos oficiales de Bohr, por lo que debe tratarse como una historia atribuida, plausible en tono y estilo, pero sin confirmación documental directa.



ASOWIKIPEDIA



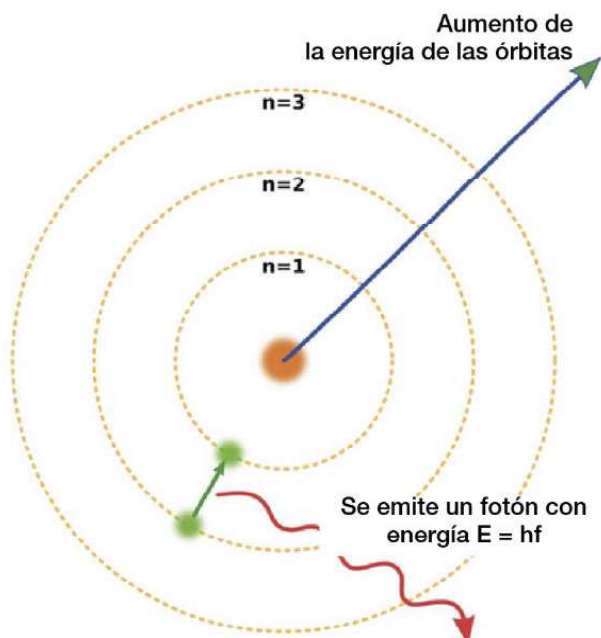
Albert Einstein y Niels Bohr en la Conferencia Solvay de 1930 en Bruselas.

materia: no como un conjunto de objetos con trayectorias definidas, sino como un sistema de posibilidades y restricciones impuestas por principios más abstractos.

En los años veinte, Bohr desempeñó un papel central en el desarrollo de la mecánica cuántica. Mientras Heisenberg, Schrödinger y Dirac articulaban los fundamentos matemáticos de la teoría, Bohr trataba de dotarla de sentido interpretativo. En 1927, propuso su célebre principio de complementariedad, según el cual las propiedades cuánticas como posición y momento, o partícula y onda, no pueden observarse simultáneamente pero sí deben considerarse como aspectos complementarios de una misma realidad. Esta idea se alejaba del determinismo clásico y aceptaba una realidad irreductiblemente dual, en la que la forma de observar influye en lo observado. No se trataba solo de una restricción experimental, sino de una limitación inherente a la naturaleza.

La complementariedad no era una fórmula matemática, sino una cuestión de filosofía de la física. Bohr insistía en que los experimentos debían describirse con lenguaje clásico, pues no disponíamos de otro marco para comunicar

Modelo de Bohr (hidrógeno): electrones en niveles discretos $n=1,2,3$; al caer a una órbita inferior emiten un fotón de energía $E=hf$ igual a la diferencia entre niveles.



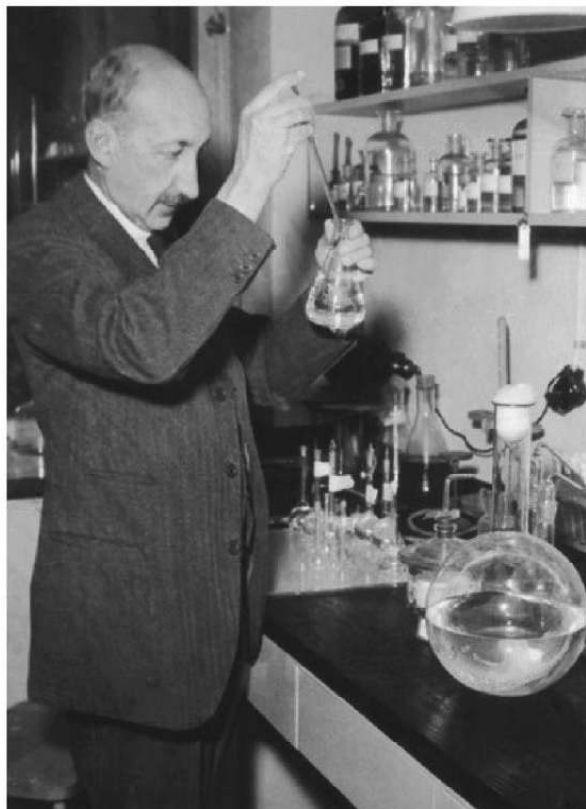
Un elemento predicho desde Copenhague

En los primeros años de la década de 1920, Niels Bohr aplicó los principios de su teoría cuántica del átomo para deducir que el elemento aún no descubierto con número atómico 72 no formaba parte de las tierras raras, como se creía entonces, sino que mostraba propiedades similares al circonio. Esta predicción se derivaba de la configuración electrónica que su modelo permitía para ese átomo.

Siguiendo esa hipótesis, Georg von Hevesy y Dirk Coster —ambos trabajando en el Instituto Bohr en Copenhague— investigaron minerales de circonio mediante espectroscopía de rayos X. En 1923 confirmaron la existencia del elemento y lo bautizaron como hafnio (del latín *Hafnia*, «Copenhague»), en reconocimiento al lugar de su teoría y hallazgo. Fue una de las primeras validaciones empíricas de la teoría cuántica aplicada a la estructura periódica.



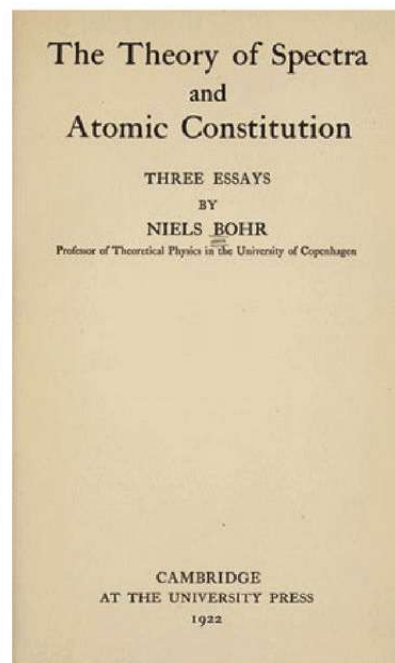
ASC/WIKIPEDIA



GETTY

A la izda., fragmentos de hafnio. A la dcha., el radioquímico húngaro George von Hevesy trabajando en su laboratorio de la Universidad de Estocolmo, en 1944.

BOHR ESTRUCTURÓ LA FORMA EN QUE LA COMUNIDAD CIENTÍFICA COMPRENDÍA EL NUEVO MUNDO CUÁNTICO



The Theory of Spectra and Atomic Constitution contiene tres ensayos de Bohr sobre la aplicación de la teoría cuántica a problemas de estructura atómica. A la izda., Heisenberg y Bohr.

resultados. Pero el mundo cuántico, decía, se regía por leyes propias, incompatibles con la lógica de nuestro día a día. Para Bohr, la mecánica cuántica no era una representación directa de la realidad, sino una herramienta para relacionar observaciones. Por eso defendía que la «descripción completa» de un sistema requería tener en cuenta tanto el objeto observado como el aparato de medida.

Además del principio de complementariedad, Bohr contribuyó a la formulación de la regla de correspondencia (que garantizaba la transición suave entre la física clásica y la cuántica), a la interpretación estadística de los resultados experimentales y a la concepción de los sistemas cuánticos como entidades indivisibles durante la medida. También fue pionero en advertir sobre el papel del observador, aunque sin caer en interpretaciones subjetivistas. Para él, el observador no crea la realidad, pero su forma de intervenir determina qué aspecto de ella se revela.

A diferencia de otros físicos, Bohr no dejó grandes ecuaciones ni teorías con su nombre, más allá del primer modelo atómico. Su legado fue conceptual, casi arquitectónico. Estructuró la forma en que la comunidad científica comprendía el nuevo mundo cuántico. Su Instituto de Copenhague no era solo un centro de cálculo, sino un espacio de pensamiento colectivo. De ahí surgió lo que se conoció como la «interpretación de Copenhague», una etiqueta algo ambigua que suele englobar las ideas de Bohr, Heisenberg y Born sobre la indeterminación, la probabilidad y el papel de la medida. ■

Emmy Noether

SIMETRÍA, BELLEZA Y LEYES
ESCONDIDAS

Emmy Noether,



Amalie Emmy Noether nació el 23 de marzo de 1882 en Erlangen, una ciudad universitaria del sur de Alemania. Era hija del matemático Max Noether, conocido por sus aportaciones a la geometría algebraica. En un entorno familiar marcado por las ecuaciones y la academia, la joven Emmy creció rodeada de ideas, aunque no siempre de oportunidades. Su infancia transcurrió en un hogar culto, pero también tradicional, donde nadie esperaba que una mujer se convirtiera en figura destacada de las matemáticas.

Desde pequeña mostró una brillantez especial para el pensamiento abstracto, aunque sus primeros estudios se enfocaron en las lenguas modernas, como era común para las mujeres de su época. Su verdadero interés, sin embargo, estaba en los patrones profundos que rigen el mundo, y esos no se expresaban en francés ni en inglés, sino en el lenguaje de la matemática pura. Contra las expectativas sociales y familiares, Emmy pidió permiso para asistir como oyente a clases de matemáticas en la Universidad de Erlangen, que por entonces no admitía alumnas oficialmente. No sería hasta 1904, ya con 22 años, cuando se abriera una vía legal para que las mujeres accedieran a estudios universitarios en Baviera. Fue una pionera en entrar por esa rendija, y en 1907 se doctoró bajo la tutela de Paul Gordan, un matemático célebre por su enfoque clásico en teoría de invariantes. Él mismo, según se cuenta, pronunció la frase resignada con la que cerraba una era: «esto ya no es matemática, es una alquimia». Se refería a los métodos abstractos que Emmy empezaba a explorar y que marcarían el rumbo del siglo XX.

A pesar de su brillantez, la carrera académica de Noether estuvo plagada de obstáculos. Durante casi una década trabajó sin sueldo y sin reconocimiento oficial en la Universidad de Erlangen, colaborando con su padre enfermo y asistiendo a los seminarios sin que su nombre figurase en los registros. En 1915, el propio David Hilbert —una de las figuras más influyentes de la matemática contemporánea— la invitó a Gotinga, donde comenzaría el periodo más fecundo y paradójico de su vida. Allí, en la cuna de la física teórica y la matemática moderna, Emmy contribuyó con ideas que cambiarían la ciencia para siempre, pero seguía sin tener permiso para enseñar con su nombre. Legalmente no podía ser profesora. La situación era tan absurda que Hilbert llegó a exclamar ante la resistencia del claustro: «No veo por qué el sexo de un candidato debería ser un obstáculo para que se le otorgue una habilitación. ¡Esto es una universidad, no un baño público!».



De izquierda a derecha, Max Noether, Paul Albert Gordan y David Hilbert.

EN GOTINGA SEGUÍA SIN TENER PERMISO PARA ENSEÑAR CON SU NOMBRE



El ascenso del nazismo obligó a grandes mentes como Noether a abandonar Alemania.

UNA ALEMANIA QUE LA SUBIÓ Y LA BAJÓ DEL ENCERADO

Finalmente, en 1919 —tras el fin de la Primera Guerra Mundial y la caída del Imperio alemán— Emmy logró por fin el derecho a enseñar oficialmente. Tenía ya 37 años y una trayectoria científica que, de haber sido hombre, habría merecido una cátedra desde hacía tiempo. Pero nunca buscó honores. Su vocación no era el reconocimiento, sino la claridad interna de las ideas. Enseñaba con una mezcla de rigor y entusiasmo que marcó a toda una generación de jóvenes matemáticos. Su estilo era desordenado, incluso caótico. A veces dictaba mientras paseaba, se olvidaba de los detalles técnicos o escribía mal los signos. Pero a quienes la seguían en profundidad, les abría un horizonte conceptual nuevo.

En los años veinte, Noether se convirtió en el eje de un grupo informal de estudiantes y colaboradores conocidos como «la escuela de Noether». Algunos la llamaban afectuosamente Der Noether, en masculino, no por burla, sino como señal de respeto. En su mundo, los grandes matemáticos eran todos hombres, y ella había llegado a su altura sin pedir permiso. Desarrolló herramientas abstractas que hoy se enseñan en cualquier curso de álgebra moderna, pero también —cosa menos conocida— tuvo una repercusión clave en la física teórica, gracias a un teorema que hilaba simetría y conservación con una elegancia que rozaba lo filosófico. Fue esta contri-



Algunos de los mentores, colegas y conocidos de Emmy Noether.

Allí reanudó sus clases con energía, tejió nuevos vínculos académicos y mantuvo la llama de su pensamiento, aunque nunca se adaptó del todo al nuevo mundo. Murió de forma inesperada el 14 de abril de 1935, tras una operación quirúrgica sencilla que se complicó. Su fallecimiento pasó casi desapercibido fuera del ámbito científico, pero su legado había quedado sembrado en las mentes más lúcidas de su tiempo. Albert Einstein, desde Princeton, escribió una carta a *The New York Times* para despedirla. Allí afirmaba, con su habitual lucidez: «Si se hubiera de juzgar la labor de los matemáticos vivos más competentes, la señorita Noether ha sido de lejos el genio matemático más significativo producido desde que comenzó la educación superior de las mujeres. En el reino del álgebra, en el cual los más dotados matemáticos han estado ocupados durante siglos, descubrió métodos que se han mostrado de enorme importancia para la actual generación de jóvenes matemáticos».

EL TEOREMA QUE UNIÓ DOS MUNDOS

Cuando Emmy Noether llegó a Gotinga en 1915, la física atravesaba uno de sus periodos más turbulentos. Einstein acababa de presentar su teoría general de la relatividad, un edificio lógico que redefinía la noción de espacio y tiempo. Pero aquel edificio aún necesitaba cimientos matemáticos sólidos, y ahí es donde apareció Noether. Fue el propio Hilbert quien le pidió ayuda para resolver un problema técnico que afectaba a la consistencia interna de la teoría de Einstein. Lo que surgió de esa colaboración fue mucho más que una solución puntual. Fue un teorema que redefinía el vínculo entre matemáticas y naturaleza.

El llamado «primer teorema de Noether» —publicado en 1918 bajo el modesto título *Invariante Variationsprobleme*— establece una conexión profunda entre simetrías y leyes de conservación. En esencia, demuestra que cada simetría continua de una acción física implica la existencia de una magnitud que se conserva. Si una ley de la física no cambia al desplazar el tiempo, entonces existe una cantidad conservada: la energía. Si no cambia al movernos en el espacio, se conserva el momento lineal. Si no cambia al rotar el sistema, aparece la conservación del momento angular. Lo que Noether hizo fue revelar el patrón común detrás de estas invariancias y convertirlo en un principio general, elegante y poderoso.

Hilbert y Noether: una alianza decisiva para la física

Cuando Emmy Noether llegó a Gotinga, lo hizo invitada por David Hilbert, uno de los matemáticos más influyentes del siglo xx. Fue él quien, enfrentado a problemas de consistencia en las ecuaciones de la relatividad general, acudió a Emmy en busca de claridad estructural. La colaboración entre ambos fue más allá de la mera resolución del problema puntual que le preocupaba a Hilbert, puesto que dio origen al famoso primer teorema de Noether, que une simetrías e invariancias con leyes de conservación. Sin la apertura intelectual de Hilbert —que insistió en mantenerla en Gotinga a pesar de la oposición del claustro por su género—, tal vez esa contribución se habría perdido. Paradójicamente, fue Hilbert, el defensor del formalismo matemático más puro, quien necesitó de Emmy Noether para que el edificio lógico de la física relativista pudiera sostenerse sobre bases verdaderamente firmes.

Hilbert quedó tan impresionado con el primer teorema de Noether que llegó a escribir: «¡La vieja guardia de Gotinga debería tomar algunas lecciones de la señorita Noether! Parece que sabe lo que hace».



Fotografía de la Sociedad de matemáticos de Göttingen, tomada en 1902.
Sentado en la primera fila, tercero desde la izquierda, se encuentra David Hilbert.

Hasta entonces, los físicos descubrían las leyes de conservación empíricamente. Es decir, observaban que la energía no se perdía o que el momento se conservaba en un choque. El teorema de Noether dio la vuelta a ese enfoque. En lugar de preguntarse qué se conserva, bastaba con preguntarse qué simetrías tiene una teoría.

NOETHER MANEJABA CONCEPTOS QUE CIRCULABAN ENTRE LA MATEMÁTICA PURA Y LA FÍSICA TEÓRICA

La matemática se convertía así en brújula conceptual. Por primera vez, los físicos podían anticipar qué debía conservarse en un sistema, simplemente analizando sus invariancias. Esto no solo aportó claridad formal a la relatividad general, sino que abrió una nueva vía en toda la física teórica del siglo xx.

El impacto del teorema se extendió mucho más allá de la gravitación. En mecánica clásica, ya era una herramienta poderosa. Pero en teoría cuántica de campos —la rama que describe las partículas fundamentales— se convirtió en piedra angular. A lo largo del siglo xx, las teorías más exitosas del universo microscópico se construyeron sobre principios de simetría. Hablamos del modelo estándar de partículas, la cromodinámica cuántica y la electrodinámica cuántica. En todos ellos, el teorema de Noether operaba como una brújula, es decir, si una teoría era invariante bajo cierto grupo de transformaciones, entonces se podían deducir sus leyes de conservación internas. Las cargas eléctricas, por ejemplo, están asociadas a simetrías de fase. Las corrientes conservadas de la física de partículas son, en gran

La escuela de Gotinga: el laboratorio donde nació la física del siglo XX

A comienzos del siglo xx, la ciudad alemana de Gotinga se presentaba como algo más que una universidad: era un crisol de ideas donde florecía una nueva manera de entender el mundo físico. Por sus aulas y seminarios pasaban mentes que cambiarían para siempre la historia de la ciencia: David Hilbert, Hermann Weyl, Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan... Allí nacieron los fundamentos matemáticos de

la relatividad general, pero también los primeros pasos de la mecánica cuántica. Emmy Noether no tardó en integrarse en ese ecosistema creativo, aportando un rigor abstracto que muchos de sus colegas aún no alcanzaban a comprender del todo. Su presencia —silenciosa en los documentos oficiales, decisiva en las discusiones profundas— dio forma al lenguaje que esas teorías necesitaban.

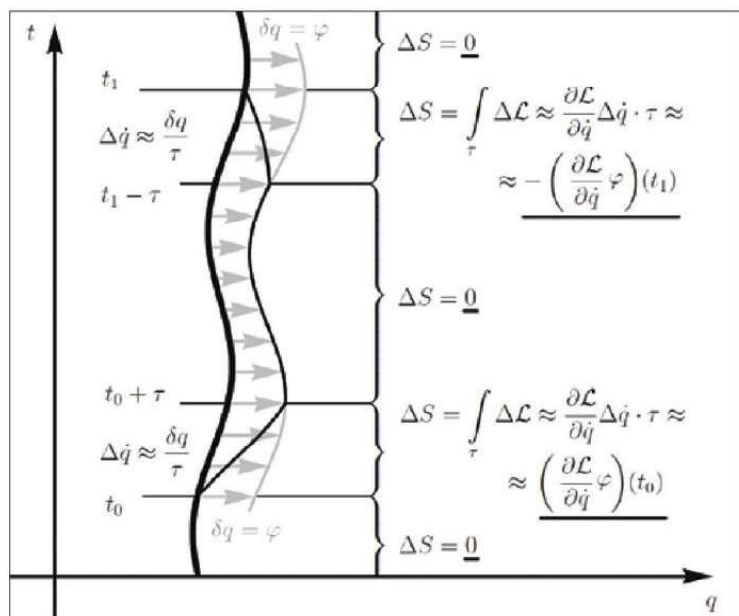
Mientras Born y Heisenberg discu-

tían el álgebra de las observables, Noether forjaba un álgebra más profunda, capaz de sostener las simetrías internas que vendrían después. Gotinga fue, en aquellos años, una especie de laboratorio conceptual sin igual, y Noether no fue una nota al margen, sino una fuerza estructurante de ese fenómeno irrepetible.



Departamento de matemáticas de la Universidad de Gotinga.

ASCWIKIPEDIA



A la izda., la carta que Einstein escribió en honor de Emmy Noether y que dirigió a *The New York Times* el 1 de mayo de 1935. A la dcha., representación gráfica del primer teorema de Noether.

medida, manifestaciones de las simetrías ocultas que Noether ayudó a formalizar. En un nivel más conceptual, su teorema cambió también la forma de pensar la naturaleza. Introdujo una idea que hoy parece obvia, pero que entonces era revolucionaria. ¿De qué estamos hablando? Pues de que las leyes del universo pueden entenderse no tanto como descripciones de lo que ocurre, sino como restricciones sobre lo que no puede cambiar. La permanencia no está en los objetos, sino en las simetrías que los relacionan. Esta perspectiva se ha convertido en una constante del pensamiento físico moderno, desde las teorías gauge hasta las formulaciones más abstractas de la física de cuerdas.

Pero es que Noether fue más allá, pues no se conformó con una relación entre simetrías y conservación. En 1918, en el mismo artículo, formuló un segundo teorema, menos conocido, pero igualmente profundo. Este relaciona las simetrías dependientes de funciones arbitrarias —como las presentes en la relatividad general— con identidades matemáticas entre las ecuaciones del sistema. Es decir, mostró que ciertas redundancias en la descripción de los campos físicos no son errores, sino parte esencial de su estructura. Aunque este segundo teorema tuvo un desarrollo más lento, hoy es clave en el estudio de teorías gauge y estructuras geométricas complejas.

Curiosamente, Noether nunca formuló sus teoremas como una herramienta «para físicos». Su lenguaje era el de la variación, la acción, los invariantes, es decir, conceptos que circulaban entre la matemática pura y la física teórica. Pero sus ideas fueron acogidas con entusiasmo por científicos de ambas disciplinas. En el terreno puramente matemático, Noether también dejó una huella inmensa, ya que revolucionó el álgebra conmutativa y la teoría de anillos, introdujo nociones como los módulos, las cadenas de ideales, las condiciones de finitud. Estos avances marcaron el paso de un álgebra basada en cálculos explícitos a una álgebra estructural, mucho más abstracta, pero también más potente. Por eso, se considera a Emmy Noether una de las fundadoras del álgebra moderna. ■



Wolfgang Pauli

EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN
Y SUS DEMONIOS

A stylized, handwritten signature of the name "Pauli" in a cursive script.

Wolfgang Pauli nació en Viena el 25 de abril de 1900, apenas unas semanas después de que Max Planck publicara su revolucionaria fórmula de la radiación del cuerpo negro. Aunque los dos hechos no tuvieran relación alguna, el cruce simbólico de fechas parecía

presagiar que el joven vienés estaría destinado a jugar un papel clave en la física cuántica. Su padre, Wolfgang Joseph Pauli, era profesor de química y un entusiasta del pensamiento positivista. De hecho, había sido discípulo de Ernst Mach, uno de los filósofos de la ciencia más influyentes de la época. Su madre, Bertha Camilla Schütz, era escritora y defensora de causas sociales, con simpatías por el pacifismo y el feminismo. Aquella combinación de rigor científico y compromiso humanista marcaría el carácter de Wolfgang hijo, aunque no sin conflicto.

Desde muy pronto, el joven Pauli demostró un talento descomunal para las matemáticas y la física. A los catorce años ya devoraba artículos de relatividad con una soltura que descolocaba a sus profesores. El propio Einstein se sorprendió cuando recibió una consulta detallada del muchacho

vienés acerca de su teoría. Para entonces, el apellido Pauli ya circulaba en los ambientes académicos, pero no por el padre —químico sin grandes logros—, sino por el hijo precoz que parecía hablar el lenguaje de la física con naturalidad nativa. Con solo diecinueve años, publicó su primer artículo sobre la teoría general de la relatividad, y al año siguiente completó una monografía sobre la misma que asombró incluso al propio Einstein. Arnold Sommerfeld, su mentor y protector, solía decir que nunca había tenido un alumno con semejante clarividencia matemática.



La precocidad intelectual del joven Pauli asombraba a sus profesores.

UNA LENGUA AFILADA Y UNA MENTE ATORMENTADA

Con la llegada de los años veinte, Pauli se instaló en la primera línea de la nueva física. Fue testigo directo de la eclosión de la mecánica cuántica, participando en debates y polémicas que marcarían una época. Su inteligencia era tan temida como respetada. En los pasillos de los institutos de física circulaban anécdotas sobre su lengua afilada: desmontaba teorías con una sola frase y ridiculizaba experimentos con una ceja levantada. Si un colega presentaba un trabajo mediocre, podía recibir el veredicto más temido: «Eso no solo no es correcto, ni siquiera está equivocado». La frase, atribuida a Pauli, se convirtió en su firma. Detrás de ese sarcasmo feroz, sin embargo, se escondía una vulnerabilidad profunda.

EL PROPIO EINSTEIN SE SORPRENDIÓ CUANDO RECIBIÓ UNA CONSULTA DETALLADA DEL MUCHACHO VIENÉS ACERCA DE SU TEORÍA



Clase escolar de Wolfgang Pauli, apodada «la clase de los genios» en 1918.
Pauli es el primero desde la izquierda, de pie en la segunda fila.

Pauli vivió siempre en lucha con sus propios demonios. La muerte de su madre por suicidio, en 1927, lo sumió en una crisis emocional de la que nunca se recuperó del todo. El mismo año se casó precipitadamente con una bailarina de cabaret, en un intento torpe de aferrarse a algo. El matrimonio duró apenas unos meses. Su vida personal fue una sucesión de rupturas, soledades y noches de alcohol. A pesar de ello, o quizás por ello, su trabajo científico mantuvo una intensidad incandescente. Quienes lo trataron de cerca describen a un hombre oscilante entre la brillantez y la autodestrucción. A veces desaparecía durante semanas, aislado en su apartamento de Zúrich, leyendo textos de alquimia o estudiando los sueños propios con un rigor que habría complacido a Freud.

CARL JUNG, LOS ARQUETIPOS Y EL INCONSCIENTE CUÁNTICO

A finales de los años treinta, Pauli buscó ayuda en un terreno inusual para un físico de su talla: la psicología profunda. Se convirtió en paciente de Carl Gustav Jung, el célebre psiquiatra suizo, con quien mantuvo una relación intensa y fructífera. Jung, fascinado por la mente de su paciente, llegó a publicar un estudio detallado de los sueños de Pauli, a los que consideraba «arquetipos vivos de una conciencia científica fragmentada». Pauli, por su parte, halló en la teoría

SE INTERESÓ POR LA NUMEROLOGÍA, LA CÁBALA Y EL SIMBOLISMO MEDIEVAL



Tumba de Bertha Schütz (1878–1927), madre de Wolfgang Pauli; su suicidio desencadenó la crisis personal que marcaría al físico y lo llevó, más tarde, al diálogo con Carl Jung (a la derecha).

junguiana del inconsciente colectivo un espejo para su propia obsesión por la simetría, el orden oculto y la dualidad.

Este encuentro entre física y psicología, insólito pero genuino, marcaría sus últimos años. Pauli llegó a interesarse por la numerología, la cábala, el simbolismo medieval. Lejos de apartarse de la ciencia, veía en estos intereses un complemento espiritual para el universo cuántico, donde las certezas clásicas se disolvían en probabilidades y paradojas. No en vano, él mismo había formulado el principio de exclusión, una regla rigurosa nacida en el corazón mismo de lo indeterminado.

EL EXILIO INTERIOR Y EL RECONOCIMIENTO TARDÍO

Durante la Segunda Guerra Mundial, Pauli se exilió en Estados Unidos. Allí fue profesor en Princeton y colaboró con los físicos del proyecto Manhattan, aunque sin implicarse en el desarrollo directo de la bomba atómica. Nunca simpatizó con la idea de aplicar su ciencia a la destrucción. En 1945 recibió el Premio Nobel de Física por su célebre principio de exclusión, que había formulado más de dos décadas antes. Como era de esperar, aceptó el galardón con una mezcla de ironía y resignación. «Me premian por una prohibición», dijo. Y no le faltaba razón: su contribución más celebrada era, en esencia, una imposibilidad. Nadie

podía ocupar el mismo estado cuántico que otro. Ni siquiera entre los electrones había espacio para la repetición.

Wolfgang Pauli murió el 15 de diciembre de 1958, en una clínica de Zúrich a consecuencia de un cáncer de páncreas. Y lo hacía relativamente joven, tenía 58 años.

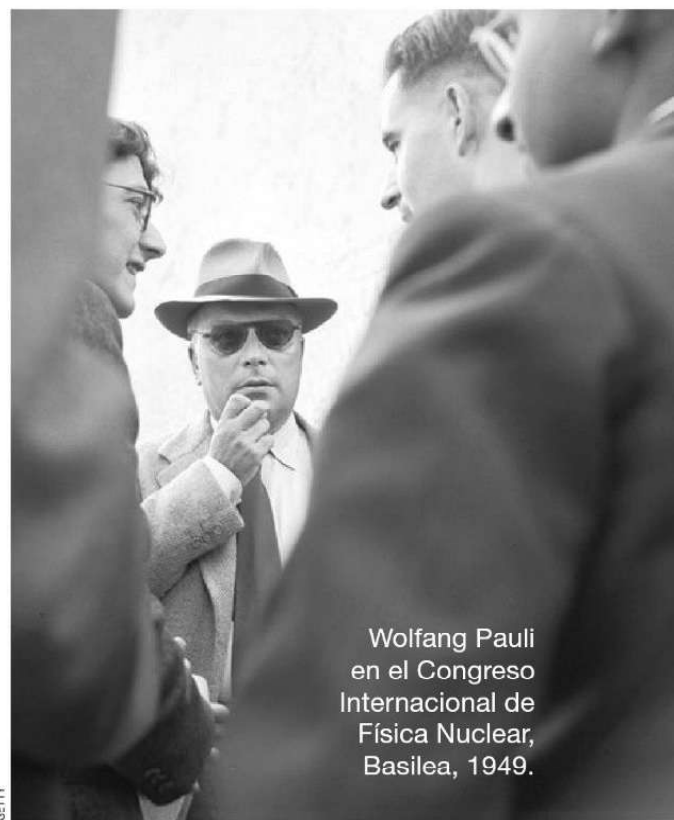
LA FÍSICA DEL NO: UNA PROHIBICIÓN FUNDADORA

En diciembre de 1924, con solo veinticuatro años, Wolfgang Pauli envió una carta a la revista *Zeitschrift für Physik*. Su contenido era breve, sin alardes ni fórmulas espectaculares. En esencia, proponía una restricción: ningún electrón en un átomo podía ocupar el mismo «estado cuántico» que otro. No explicaba por qué. No ofrecía una derivación. Era, más bien, una observación empírica formulada como ley. Lo que nacía allí no era una hipótesis pasajera, sino un principio fundacional. Se trataba del principio de exclusión. Años más tarde, sería descrito como «la piedra angular de la física moderna».

El enunciado de Pauli solucionaba un enigma persistente: por qué los electrones en los átomos no colapsan todos hacia los niveles de energía más bajos. Su regla implícita —«cada electrón, en su sitio, y ese sitio no se comparte»— imponía un

La maldición de Pauli

Entre los físicos de principios del siglo xx circulaba una superstición inusual: la presencia de Wolfgang Pauli en un laboratorio podía provocar fallos inverosímiles. Era como si los aparatos, ante su sola cercanía, decidieran sabotearse espontáneamente. El fenómeno se volvió tan comentado que recibió un nombre propio: el «efecto Pauli». Se contaban historias de instrumentos que explotaban, tubos que se rompían o registros que desaparecían justo en el momento en que Pauli cruzaba una puerta o incluso cuando estaba a kilómetros de distancia. En una ocasión, mientras viajaba en tren hacia Göttingen, se produjo un cortocircuito en el laboratorio de Franck y Hertz justo cuando el físico pasaba cerca de la ciudad. El incidente alimentó la leyenda. Pauli, con su humor corrosivo, disfrutaba del mito y se cuidaba de no desmentirlo del todo. Para algunos colegas, su mirada era tan aguda que hacía temblar hasta a las válvulas. Para otros, era simplemente una excusa elegante para evitar sus críticas demoledoras. En cualquier caso, el efecto Pauli no habla de magia, sino del aura simbólica que rodeaba a uno de los físicos más brillantes —y temidos— de su tiempo.



Wolfgang Pauli
en el Congreso
Internacional de
Física Nuclear,
Basilea, 1949.

GETTY

PAULI ACOGIÓ CON FRIALDAD INICIAL LA IDEA DEL ESPÍN, PERO PRONTO COMPRENDIÓ QUE CERRABA EL CÍRCULO



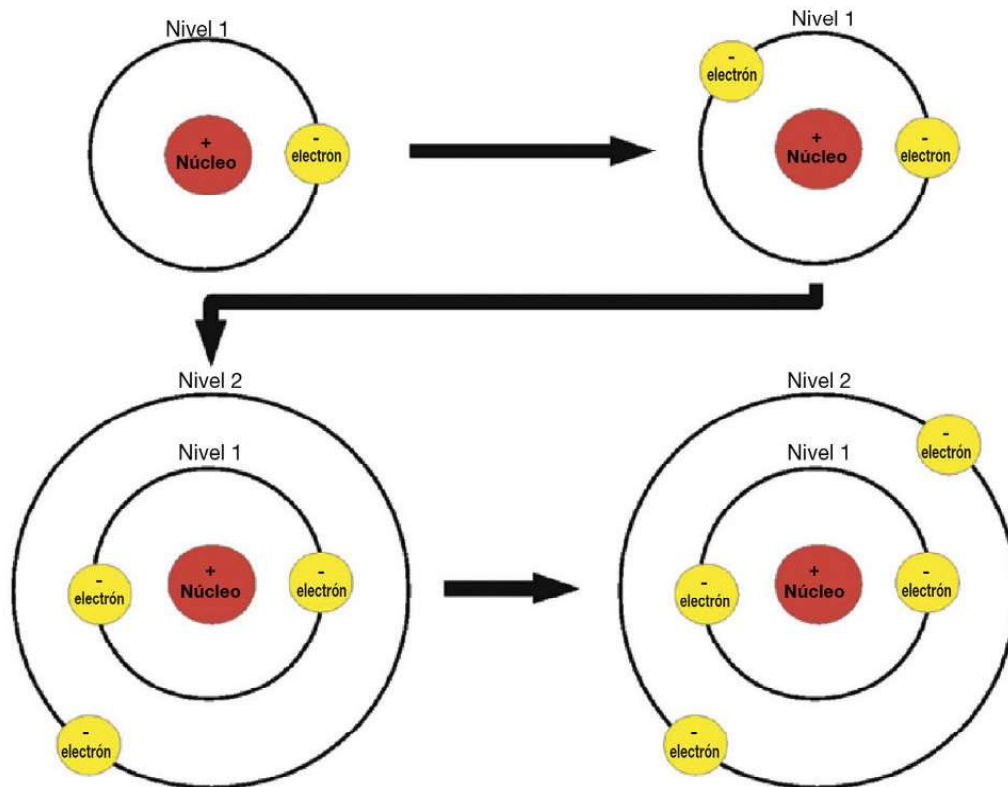
Wolfgang Pauli celebrando su Premio Nobel de Física, recibido en 1945 en reconocimiento al principio de exclusión, la «prohibición» que ordena la materia desde los átomos hasta las estrellas.

orden riguroso en el caos cuántico. A partir de ella, la estructura de la tabla periódica dejaba de ser una curiosidad empírica para convertirse en una consecuencia necesaria de la mecánica cuántica. El oxígeno, por ejemplo, tenía las propiedades que tenía, no por casualidad, sino porque sus electrones estaban atrapados en una coreografía invisible, impuesta por la exclusión.

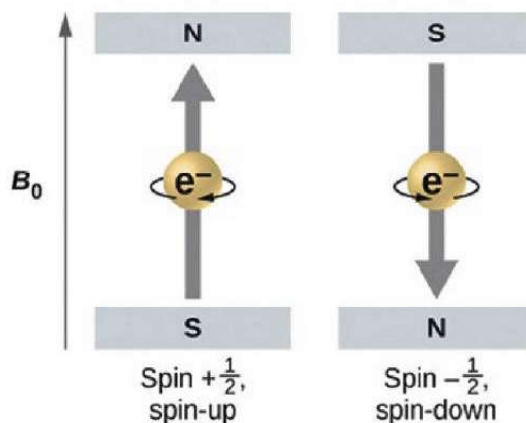
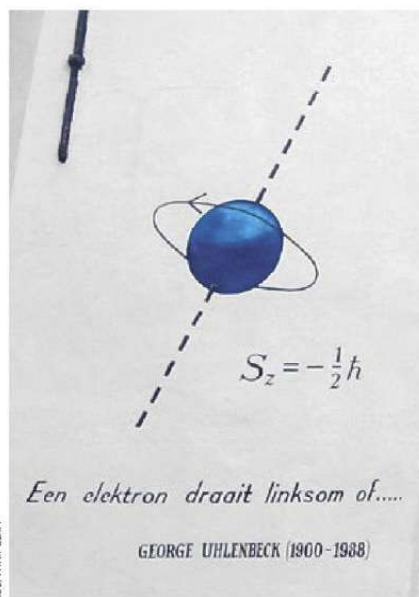
EL ESPÍN: EL CONCEPTO QUE LE FALTABA

Y, sin embargo, faltaba algo. Pauli sabía que su principio funcionaba, pero no lograba justificarlo desde una teoría más profunda. Durante dos años, se mantuvo como un enigma brillante, útil, pero incompleto. La clave llegó en 1925, cuando George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit propusieron una idea atrevida: los electrones, además de su carga y su masa, poseían una especie de rotación interna, que llamaron «espín». Era un giro sin giro, una propiedad sin analogía clásica, pero resolvía la paradoja. Con el espín, los electrones podían ser distinguidos incluso cuando compartían todos los demás números cuánticos.

Pauli acogió con frialdad inicial la idea del espín —le parecía una construcción tosca—, pero pronto comprendió que cerraba el círculo. Finalmente, reformuló su principio de exclusión incorporando esta nueva variable, y en 1927 presentó la llamada «teoría del doblete de espín», que explicaba por qué los electrones se agrupaban en parejas dentro de los orbitales. Cada pareja com-



Esquema de llenado electrónico por niveles: primero se completa el nivel 1 con dos electrones (exclusión de Pauli) y, una vez saturado, los siguientes pasan al nivel 2.



El espín del electrón, dos orientaciones posibles, «arriba» y «abajo», que, en un campo magnético, se separan, es la base del doblete que completa el principio de exclusión de Pauli.

partía todo... menos el espín: uno hacia arriba, otro hacia abajo. La prohibición se volvía así elegante, precisa, universal.

LA MATRIZ QUE NO FUE: PRECURSOR DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Antes del principio de exclusión, Pauli ya había dejado su huella en el nacimiento mismo de la mecánica cuántica. En 1921, Sommerfeld le pidió que resolviera el espectro del átomo de hidrógeno desde un punto de vista relativista. Pauli, con apenas veintiún años, lo hizo recurriendo a una técnica matemática

El número 137

Pauli sentía una fascinación casi mística por el número 137, el inverso aproximado de la constante de estructura fina (α), que aparece en la teoría electromagnética cuántica.

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

Esta constante, sin dimensiones, describe la intensidad con la que las partículas cargadas interactúan mediante el intercambio de fotones. Para Pauli, no era simplemente un número más: era una puerta a los secretos más hondos del universo. Decía que, si alguna vez entendíamos por qué su valor era precisamente ese y no otro, habríamos accedido a una teoría fundamental de la naturaleza. En sus últimos años, llegó a bromear —o no tanto— con que no moriría tranquilo sin haber comprendido el enigma del 137. Su obsesión fue tal que, cuando ingresó por última vez en el hospital (en la imagen), y le asignaron la habitación número 137, comentó con inquietud: «Ahora sí que esto se acaba». Pocas semanas después, murió. Para quienes compartían su fe en que las matemáticas revelan un orden oculto, el gesto final del universo hacia Pauli fue una ironía perfecta. El número que tanto interrogó, lo despidió en silencio.



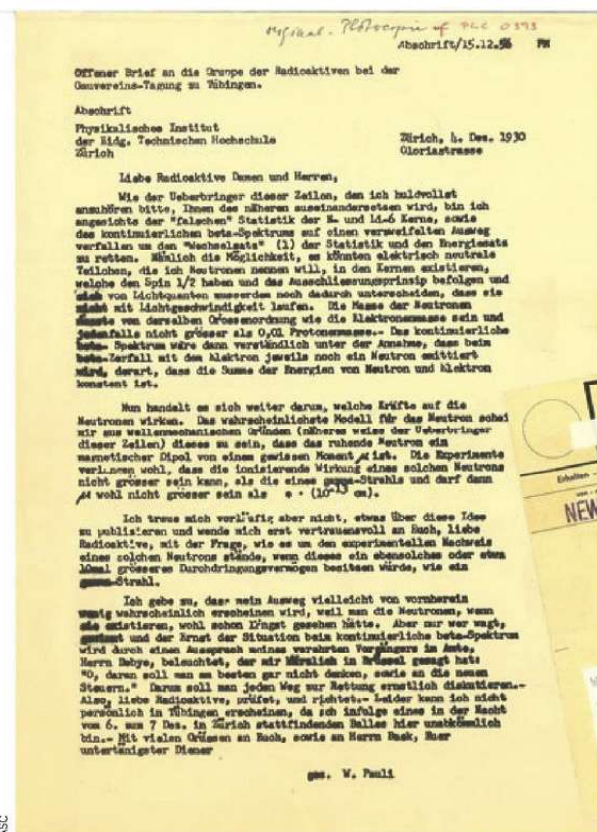
ca que anticipaba elementos de la futura mecánica matricial de Heisenberg. Aunque nunca llegó a publicar formalmente esa idea, muchos historiadores han visto en sus cálculos una proto-mecánica cuántica que influyó indirectamente en el desarrollo posterior.

Más allá de sus publicaciones, su rol como crítico y revisor fue legendario. Ninguna teoría pasaba a la adultez sin pasar por el filtro de Pauli. Corrigió a Dirac, impulsó a Heisenberg, cuestionó a Bohr. No construía grandes sistemas —como Einstein o Schrödinger—, pero era quien afinaba, limaba y depuraba lo ajeno. Se convirtió en la conciencia vigilante de la nueva física.

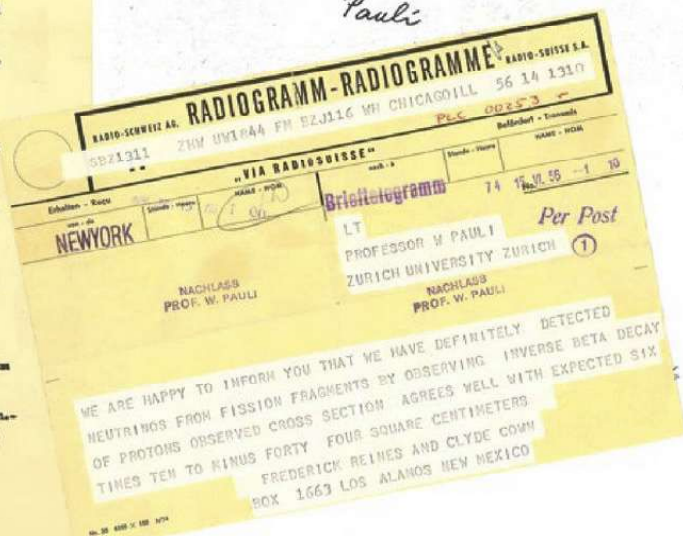
EL NEUTRINO: UNA INTUICIÓN DESESPERADA

En 1930, durante una conferencia en Tübingen, Pauli dejó una nota escrita a sus colegas: «Queridas damas y caballeros radioactivos...». Lo que seguía no era un saludo amistoso, sino una propuesta inquietante. Para explicar por qué, en la desintegración beta, la energía parecía no conservarse, Pauli conjeturaba la existencia

NO CONSTRUÍA GRANDES SISTEMAS, COMO EINSTEIN O SCHRÖDINGER, PERO ERA QUIEN AFINABA, LIMABA Y DEPURABA LO AJENO



Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico
Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.
Pauli



Telegrama de Frederick Reines y Clyde Cowan a Wolfgang Pauli anunciando la detección del neutrino en un reactor, lo que confirmaba la partícula que Pauli había conjeturado 26 años antes.

de una partícula nueva, invisible, neutra y de masa casi nula: el neutrino. «He cometido el peor pecado de un teórico —escribió en tono autocrítico—: he propuesto algo que no puede ser observado».

No obstante, el neutrino sí existía. Fue detectado experimentalmente en 1956, tres años antes de su muerte. El gesto de Pauli, tan característico, reunía todas sus marcas: intuición matemática, desesperación empírica y una honradez intelectual que no toleraba soluciones a medias.

DE LOS ELECTRONES A LAS ESTRELLAS

El principio de exclusión no solo explica la química. Sin él, la materia colapsaría. Las estrellas enanas blancas, por ejemplo, no se disuelven bajo su propio peso porque los electrones, al estar comprimidos al máximo, generan una presión de origen cuántico que impide el colapso. Es la llamada «presión degenerada», que es un efecto directo del principio de Pauli. En cierto sentido, la física del «no» sostiene el universo. ■

Werner Heisenberg

JUVENTUD
ENTRE IDEAS Y RUINAS

Werner Heisenberg



Werner Karl Heisenberg nació el 5 de diciembre de 1901 en la ciudad universitaria de Würzburgo, en el seno de una familia culta y nacionalista. Su padre, August Heisenberg, era profesor de filología griega en la Universidad de Múnich, por lo que el joven Werner creció rodeado de clásicos, lecturas serias y un espíritu de exigencia intelectual. No obstante, su infancia no fue solo académica, pues desde pequeño se mostró inclinado a la música —tocaba el piano con destreza—, una combinación de rigor y sensibilidad marcaría toda su vida.

La adolescencia de Heisenberg coincidió con el hundimiento de Alemania tras la Primera Guerra Mundial, marcado por el Tratado de Versalles y las turbulencias de la República de Weimar. En su etapa escolar en el Wilhelmsgymnasium de Múnich, mostró un talento precoz para las matemáticas, pero también una ambición casi temeraria. No era raro que corrigiera en clase a sus propios profesores o que desafiara problemas de álgebra sin ayuda. Cuando en 1920 ingresó en la Universidad de Múnich, lo hizo con una confianza tan marcada como su falta de paciencia por las formalidades académicas.

Allí encontró al físico teórico Arnold Sommerfeld, uno de los grandes formadores de talentos del siglo XX. Sommerfeld supo encauzar la mente matemática de Heisenberg hacia la física moderna. Pronto le encomendó cálculos complejos sobre la estructura del átomo, y aunque su discípulo no brillaba por la pulcritud formal, destacaba por su audacia. Durante un intercambio con Niels Bohr en Gotinga en 1922, Heisenberg se familiarizó con la física cuántica emergente. No tardó en convencer a todos de que estaba destinado a algo grande.

UN CAMINANTE PENSATIVO

Heisenberg obtuvo su doctorado en 1923, con apenas 21 años. Su meteórica carrera

no se debió solo a su inteligencia, sino también a su capacidad de concentración extrema. Sus colegas contaban que era capaz de pasar horas resolviendo problemas sin mirar el reloj, aislado del mundo, casi en trance. De hecho, muchas de sus ideas más revolucionarias no surgieron en laboratorios, sino en paseos por el campo o durante febriles noches de insomnio.

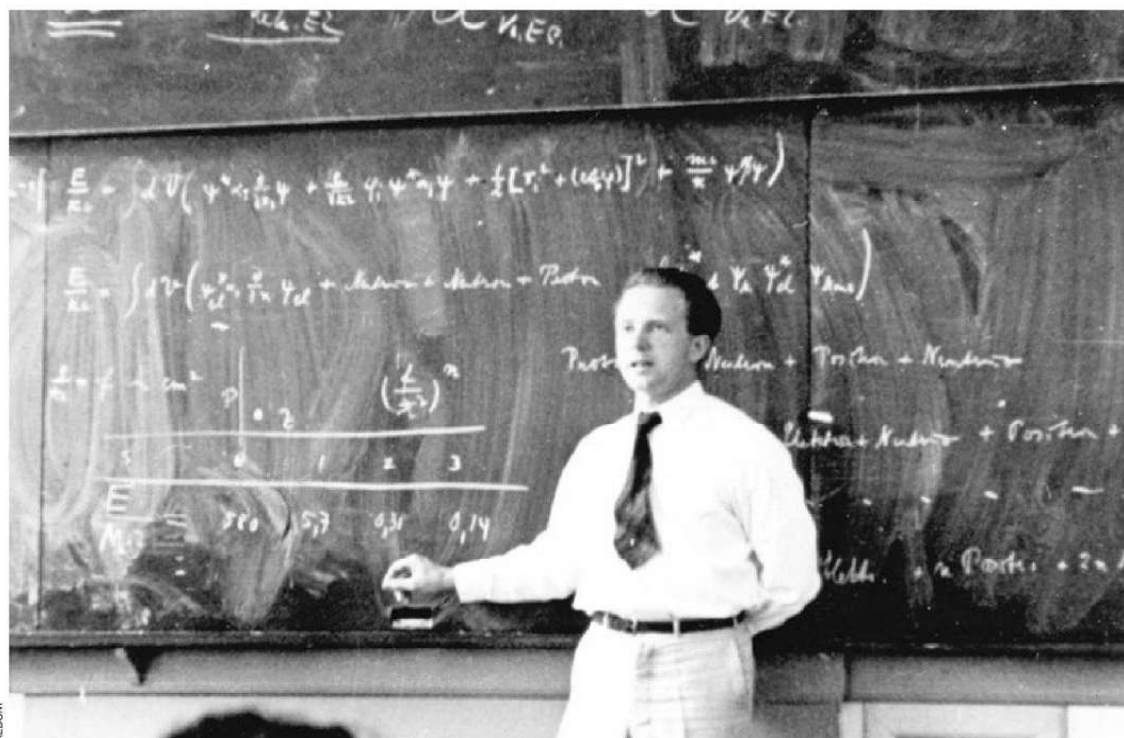
Uno de esos episodios ocurrió en la isla de Helgoland, en 1925. Aquejado de fiebre del heno, buscó refugio en ese remoto enclave del mar del Norte, lejos del polen y del bullicio. En soledad, sin pizarras ni libros, intentó reordenar la teoría cuántica desde principios observables. Fue allí donde imaginó una formulación basada en cantidades medibles, despreciando la idea de trayectorias precisas. Nació la mecánica matricial. Tenía solo 23 años.

Pero el genio precoz era también un joven complejo. Tenía una confianza en sí mismo que rozaba la arrogancia, y a menudo desesperaba a sus cole-



Werner Heisenberg con su madre en 1933.

ERA CAPAZ DE PASAR HORAS RESOLVIENDO PROBLEMAS SIN MIRAR EL RELOJ, AISLADO DEL MUNDO, CASI EN TRANCE



Werner Heisenberg dando una conferencia en el Instituto Niels Bohr, Copenhague, en 1936.

gas con su hermetismo y su desdén por los formalismos matemáticos. Cuando Max Born y Pascual Jordan le ayudaron a traducir sus intuiciones en un lenguaje más riguroso, la comunidad científica entendió que estaba ante una revolución.

A los 25 años, Heisenberg fue nombrado profesor titular en Leipzig, convirtiéndose en el catedrático más joven de Alemania. En 1932 recibió el Premio Nobel de Física por la creación de la mecánica cuántica. Parecía destinado a un camino glorioso, pero el ascenso del nazismo cambiaría todo.

Durante el Tercer Reich, Heisenberg adoptó una postura ambigua. No se afilió al partido, pero tampoco lo combatió activamente. Se mantuvo en Alemania, intentó proteger la física teórica de las injerencias ideológicas y aceptó puestos de responsabilidad. Fue acusado por algunos colegas de colaboracionismo, y por los nazis de defender una «física judía», especialmente por su relación con la obra de Einstein. En un célebre incidente, un artículo de las SS lo llamó «el físico blanco que sirve a los judíos». Su madre intervino personalmente, escribiendo a la madre de Himmler, a quien conocía de sus años en Múnich. El ataque cesó, pero la sombra de ambigüedad lo acompañaría siempre.

Tras la guerra, Heisenberg fue interrogado por los Aliados en el marco del Proyecto Alsos y recluido junto a otros físicos alemanes en Farm Hall, Inglaterra. Allí, al enterarse de que EE. UU. había detonado la bomba atómica en Hi-

roshima, reaccionó primero con escepticismo, luego con una mezcla de alivio y confusión. Él había dirigido el proyecto nuclear alemán, pero nunca llegó a desarrollar una bomba. Años más tarde, diría que lo suyo no fue una renuncia moral, sino una imposibilidad técnica.

En la posguerra, Heisenberg trabajó por la reconstrucción de la ciencia alemana. Fundó el Instituto Max Planck de Física y lideró esfuerzos por una física pacífica. Pero su prestigio internacional había menguado. Mientras figuras como Bohr o Dirac eran veneradas, él suscitaba dudas. Su intento de formular una «teoría unificada» en los años cincuenta fue recibido con escepticismo. Aislado y cada vez más rígido, terminó sus días como una figura respetada pero solitaria.

Werner Heisenberg murió el 1 de febrero de 1976 en Múnich, a los 74 años. Fue enterrado en el cementerio Waldfriedhof de la ciudad, donde reposa junto a su esposa Elisabeth. Aunque no dejó un epitafio con fórmulas, su legado sigue asociado para siempre a una de las expresiones más célebres de la física moderna: el principio de incertidumbre, que transformó para siempre nuestra forma de entender el conocimiento y la realidad.

LA INCERTIDUMBRE NO ES IGNORANCIA

La física clásica creía en un mundo perfectamente determinista. Si uno conocía con precisión la posición y la velocidad de una partícula, podía predecir su futuro con exactitud. Este ideal de conocimiento total, heredado de Newton y Laplace, había regido la ciencia durante más de dos siglos. Pero en la década de 1920, ese edificio comenzó a tambalearse. El responsable último del temblor fue un joven

alemán que propuso algo inaudito: que hay límites a lo que podemos saber, no por falta de instrumentos, sino por la propia naturaleza de la realidad.

El principio de incertidumbre, formulado por Heisenberg en 1927, no fue una consecuencia técnica de su mecánica matricial, sino una intuición física profunda: si se quiere conocer con precisión la posición de una partícula, su cantidad de movimiento se vuelve borrosa, y viceversa. La idea no es que el electrón «oculte» su estado o que falten datos, sino que esos datos no pueden coexistir con precisión total. Hay un umbral infranqueable que separa lo que puede saberse de lo que no. Y ese umbral está regido por la constante de Planck. De hecho, en contextos filosóficos a menudo



Busto de Heisenberg en el Campus de la Sociedad Max Plank en Garching bei München.

EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE SE CONVIRTIÓ RÁPIDAMENTE EN UNO DE LOS PILARES DE LA NUEVA FÍSICA

se habla de «indeterminación» en vez de «incertidumbre», pues la indeterminación denotaría «que no se puede determinar» (independiente del sujeto) y la «incertidumbre» que «no se puede conocer» (subjetivo).

Este principio, que hoy se enseña en cualquier curso introductorio de física cuántica, era en su momento revolucionario y profundamente incómodo. En lugar de acercarnos más al control total sobre la materia, nos alejaba. Mostraba que el mundo atómico no es solo impredecible: es, en su esencia, indeterminado. La precisión total es una ilusión de los instrumentos clásicos. La cuántica obligaba a pensar en probabilidades, en espectros de posibilidad, no en certezas.

Lo más provocador era que esta limitación no afectaba solo a los aparatos de medida, sino a la propia noción de realidad. ¿Existe una trayectoria si no se puede medir? ¿Tiene sentido hablar de «posición» de un electrón si en el mismo instante no podemos hablar de su velocidad? Para Werner Heisenberg, la respuesta a esta cuestión era clara: la realidad cuántica no tiene sentido sin el acto de medición. En eso coincidía con Bohr y juntos desarrollaron la llamada interpretación de Copenhague. Según esta visión, las propiedades de las partículas no están definidas hasta que alguien las mide. No es que el electrón esté «escondido» hasta que se lo observa, sino que no tiene propiedades determinadas antes del acto de observación.

El principio de incertidumbre se convirtió rápidamente en uno de los pilares de la nueva física, al mismo nivel que la ecuación de Schrödinger o el principio de exclusión de Pauli. Pero también abrió una herida filosófica: si la naturaleza es incierta, ¿qué ocurre con el concepto de causalidad? ¿Dónde queda el libre albedrío, el tiempo, la realidad misma?

Helgoland: fiebre, polen y revolución cuántica

En junio de 1925, Werner Heisenberg se retiró a la isla de Helgoland, un peñón sin vegetación en medio del mar del Norte, buscando alivio para su alergia al polen. No fue un retiro de descanso, sino de concentración extrema. Lejos del polvo, de los libros y de las pizarras, intentó reformular la física cuántica desde cero. Abandonó la idea de órbitas electrónicas y se centró solo en magnitudes observables, como las frecuencias e intensidades de los espectros. En esa atmósfera espartana y salobre, casi en trance, nació una teoría radical sin trayectorias ni partículas localizadas.

A su regreso, compartió sus ecuaciones con Max Born, quien reconoció que Heisenberg, sin saberlo, había trabajado con matrices. Junto a Pascual Jordan, transformaron esas intuiciones en una nueva mecánica matemática. Así nació la mecánica matricial, la primera formulación coherente de la física cuántica moderna. La fiebre del heno, el aislamiento y la audacia intelectual convirtieron a Helgoland en uno de los escenarios más improbables y fecundos de la historia de la ciencia.

Einstein, gran admirador de Heisenberg, no ocultó su disidencia. La repetida frase «Dios no juega a los dados» la pronunció en el contexto de sus objeciones al carácter probabilista de la mecánica cuántica. Heisenberg respondió con cortesía, pero sin ceder: «No es cuestión de lo que Dios haga o no haga, sino de lo que la naturaleza nos permite conocer».

Desde el punto de vista técnico, el principio de incertidumbre se expresa mediante la desigualdad:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

donde Δx es la incertidumbre en la posición, Δp la incertidumbre en el momento, y $\hbar$ la constante de Planck. Esta fórmula establece que hay un producto mínimo de

Una pizarra vacía en Farm Hall

El 6 de agosto de 1945, Werner Heisenberg escuchó por la radio que Estados Unidos había lanzado una bomba atómica sobre Hiroshima. La noticia lo desconcertó. Reunido con otros nueve físicos alemanes en una mansión inglesa llamada Farm Hall, donde los británicos los mantenían bajo vigilancia secreta, reaccionó primero con incredulidad. Luego, con cierta agitación, se acercó a una pizarra e intentó explicar a sus compañeros cómo podría funcionar una bomba de uranio. Pero su razonamiento fue incorrecto: subestimó la masa crítica necesaria y omitió aspectos clave del diseño. La escena quedó registrada en las grabaciones ocultas. Era el mayor experto alemán en física teórica y, sin embargo, parecía estar descubriendo todo por primera vez.

Aquella pizarra improvisada se convirtió, con el tiempo, en símbolo de una incógnita más profunda. ¿Realmente Heisenberg no había comprendido cómo construir una bomba durante la guerra o había evitado deliberadamente hacerlo? ¿Ignorancia o inhibición? Las interpretaciones han oscilado entre el fracaso técnico y el dilema ético. Lo cierto es que, en ese momento crucial, la mente que había reformulado la física cuántica mostró un vacío inesperado. Una pizarra vacía que sigue suscitando preguntas.



Los diez científicos nucleares alemanes detenidos en Farm Hall: de izquierda a derecha y de arriba a abajo: W. Heisenberg, O. Hahn, M. Von Laue, C. F. von Weizsäcker, P. Hartek, W. Gerlach, K. Wirtz, K. Diebner, E. Bagge y H. Korsching.



Sentados en la primera fila, de izquierda a derecha: Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Otto Stern, Lise Meitner, Rudolf Ladenburg y Jacob Christian Georg Jacobsen, en una conferencia en 1937.

incertidumbre que no puede ser superado, sin importar la calidad del instrumento o la sofisticación del experimento. El principio también se aplica a otras parejas de magnitudes, como energía y tiempo, o número de partículas y fase. Sus implicaciones son tan extensas como sutiles.

Uno de los efectos más sorprendentes del principio es el llamado «efecto túnel», que permite a las partículas cruzar barreras que clásicamente serían infranqueables. Este fenómeno, consecuencia directa de las propiedades probabilísticas del mundo cuántico, es la base de tecnologías como el microscopio de efecto túnel o la electrónica de semiconductores. Así, lo que nació como una limitación teórica terminó abriendo la puerta a avances prácticos.

A lo largo de su vida, Heisenberg intentó extender su principio a otras áreas. Se interesó por los límites del conocimiento en biología, en cosmología, incluso en política. En los años 50 y 60, propuso una «teoría unificada» basada en su intuición de que las constantes fundamentales no son arbitrarias, sino consecuencia de simetrías profundas aún no comprendidas. Pero estas propuestas, aunque ambiciosas, no lograron el mismo impacto que su trabajo temprano.

En su libro *Física y filosofía*, publicado en 1958, Heisenberg reflexiona con claridad y profundidad sobre las consecuencias filosóficas de la mecánica cuántica. El texto no es una simple divulgación de sus hallazgos, sino una meditación madura sobre los límites del conocimiento, el papel del observador y la naturaleza misma de la realidad. En uno de sus pasajes más reveladores, escribe:

«De modo que no podemos objetivar completamente el resultado de una observación; no podemos describir lo que sucede entre esta observación y la siguiente. Esto suena como si hubiéramos introducido un elemento de subjetivismo en la teoría, como si dijéramos: lo que sucede depende del modo en que observemos, o del hecho mismo de que hagamos la observación». ■



Erwin Schrödinger

EL GATO,
LA ECUACIÓN
Y EL ESCÁNDALO

Erwin Schrödinger

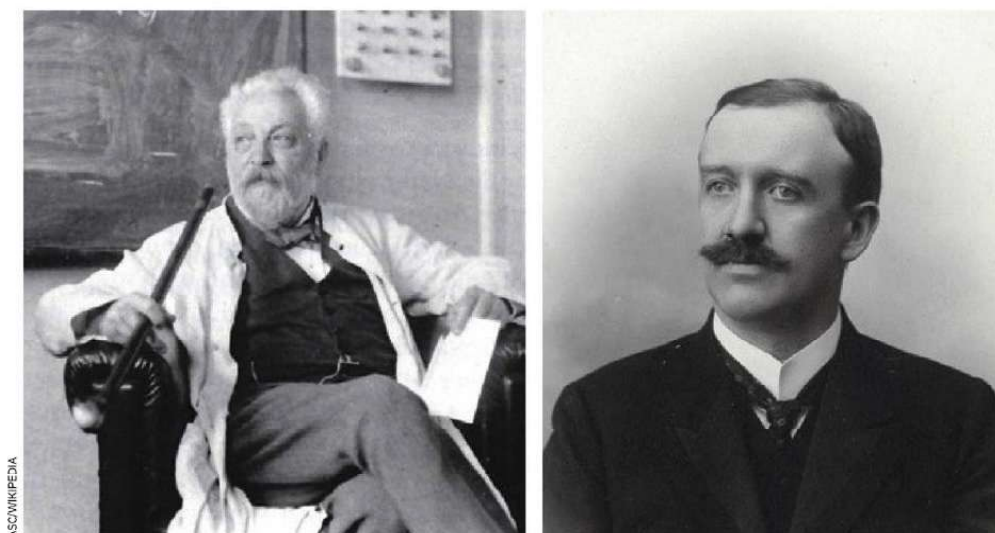
Erwin Schrödinger nació en Viena el 12 de agosto de 1887, en el seno de una familia culta y acomodada. Su padre, Rudolf Schrödinger, era botánico y dueño de una fábrica de linóleo, mientras que su madre, Georgine Emilia Brenda, de ascendencia mitad austriaca y mitad inglesa, le transmitió desde niño una educación bilingüe y cosmopolita. En su casa se respiraba un ambiente de ciencia y arte a partes iguales. Aprendió alemán e inglés al mismo tiempo, cultivó desde joven el amor por la poesía y la filosofía y sentía la misma fascinación por una fórmula matemática que por un verso de Goethe.

Cursó estudios en la Universidad de Viena, donde fue discípulo de Franz Exner y Friedrich Hasenöhl. Schrödinger creció en una Viena en transición, pues



Erwin Schrödinger de niño, con su tía Erwina y sus padres Rudolf Schrödinger y Georgine Emilia Brenda Bauer.

INTENTÓ MANTENERSE INDEPENDIENTE TANTO DE LOS INTERESES MILITARES COMO DE LAS LUCHAS DE PODER ACADÉMICAS



De izquierda a derecha, Franz Exner y Friedrich Hasenöhl, ambos profesores del joven Erwin Schrödinger en la Universidad de Viena.

la capital del imperio austrohúngaro vivía sus últimos años como centro neurálgico de la cultura europea. Aquella Viena crepuscular, vibrante e inestable, lo marcaría de por vida con una sensibilidad estética que lo alejaba del físico técnico y lo acercaba al pensador filosófico.

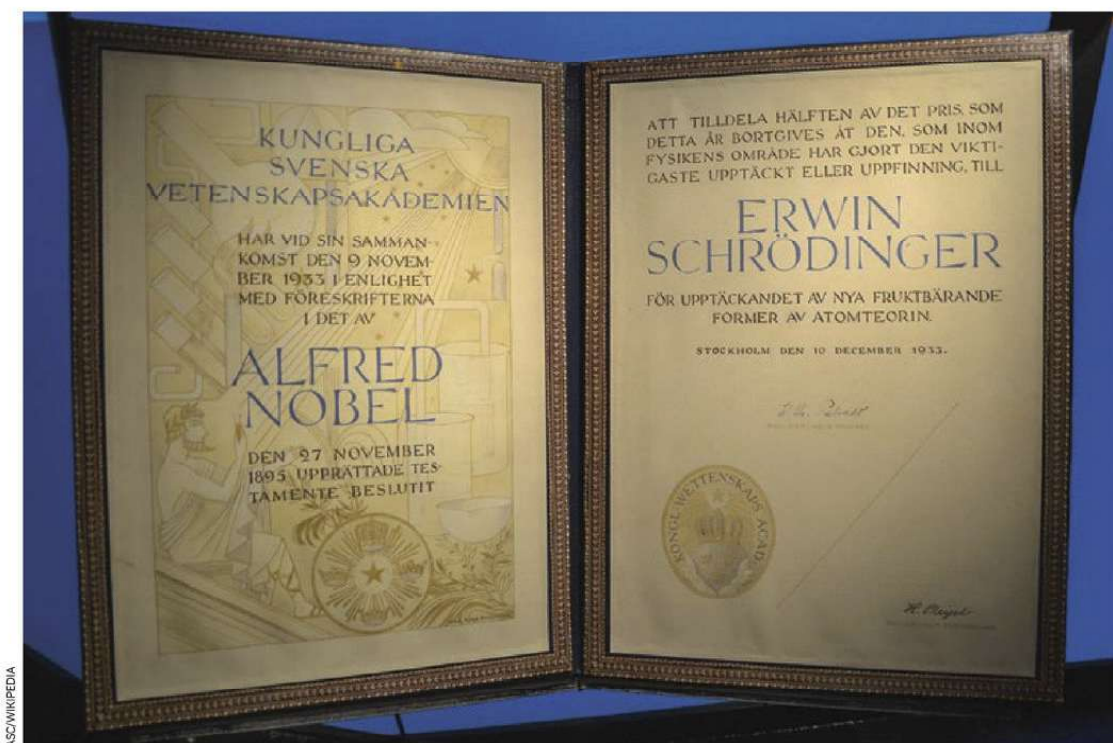
Durante la Primera Guerra Mundial sirvió como oficial de artillería, pero nunca fue un entusiasta del conflicto. Al acabar la contienda, retomó la vida académica y comenzó un periplo por diversas universidades: Jena, Stuttgart, Breslavia y finalmente Zúrich. Fue allí, en la década de 1920, donde su carrera científica alcanzó la cima. Tenía ya cerca de 40 años y, a diferencia de los jóvenes genios de su generación como Heisenberg o Dirac, su gran aportación no llegaría en una ráfaga de precocidad, sino tras años de maduración intelectual. En 1926, en una serie de artículos que estremecieron el mundo de la física, presentó su ecuación de onda: una nueva formulación de la mecánica cuántica, en competencia directa con la versión matricial de Heisenberg.

Pero más allá de sus contribuciones científicas, Schrödinger fue una figura difícil de encasillar. En 1933 recibió el premio Nobel de Física por su formulación ondulatoria, compartido con Dirac, aunque por entonces ya había abandonado Alemania tras la llegada de los nazis. Tenía un profundo desprecio por el nacionalismo, una mentalidad marcadamente liberal y un ideal cosmopolita. Fue uno de los pocos científicos que intentó mantenerse independiente tanto de los intereses militares como de las luchas de poder académicas. Su huida del régimen nazi lo llevó a Inglaterra, luego a Italia, Suiza y finalmente a Irlanda, donde fundaría el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, a imitación del de Princeton.

CUÁNTICA HASTA EN EL AMOR: SUPERPOSICIÓN DE ESTADOS EMOCIONALES

La vida privada de Schrödinger fue tan poco convencional como su física. Aunque estuvo casado durante décadas con Anny Bertel, mantuvo a lo largo de su vida varias relaciones paralelas, algunas duraderas, otras más fugaces y no siempre discretas. Durante su etapa en Oxford, su situación sentimental —viviendo con su esposa y una amante simultáneamente— llegó a incomodar a colegas y autoridades académicas. Schrödinger no ocultaba del todo estas convivencias; más bien las asumía como parte de una filosofía vital que rechazaba el matrimonio tradicional y buscaba un ideal de libertad afectiva y erótica. En sus cuadernos personales, anotaba con naturalidad tanto desarrollos físicos como impresiones íntimas, alternando cálculos con referencias a mujeres que lo inspiraban. Esta mezcla de sensualidad, pensamiento y ciencia no era una pose excéntrica, sino una forma integral de estar en el mundo.

También fue un lector apasionado de filosofía oriental, en particular del *Vedanta* hindú, que dejó una huella profunda en su visión unitaria de la naturaleza. Su ensayo *Mi concepción del mundo* (1961) intenta precisamente establecer una conexión entre la física cuántica y una espiritualidad no dogmática. Allí sostiene que la división entre sujeto y objeto es una ilusión y que toda conciencia forma parte de un mismo tejido cósmico. Aunque no utilizó jamás el término «conciencia cuántica», ni respaldó ideas esotéricas al respecto, anticipó algunas reflexiones que hoy, simplificadas y sacadas de contexto, circulan con ligereza en discursos pseudocientíficos. Schrödinger, en cambio, trató siempre de sostener esa intuición con el mismo rigor con que abordaba sus ecuaciones: sin negar el misterio, pero sin entregarse a la fantasía.



En 1933 Schrödinger recibió el premio Nobel de Física. Sobre estas líneas, su diploma.



Erwin Schrödinger y su esposa, Anny Bertel, en 1956.

En los años finales de su vida, tras regresar a Austria después de la Segunda Guerra Mundial, siguió trabajando y enseñando hasta su muerte, el 4 de enero de 1961. Vivió lo suficiente para ver cómo la física cuántica que él había ayudado a fundar se convertía en el nuevo paradigma dominante, aunque no siempre compartía sus interpretaciones más extremas. Murió en Viena, como si su vida hubiera trazado una curva cerrada entre la ciudad de su infancia y la ciudad de su despedida.

Erwin Schrödinger fue muchas cosas: un físico brillante, un pensador heterodoxo, un escéptico apasionado, un admirador de Spinoza, un amante de la belleza matemática y también de las mujeres. Como el propio gato que imaginó encerrado en una caja, el físico vivió en un estado de superposición constante: entre la ciencia y el arte, entre la ortodoxia y la herejía, entre la claridad de las ecuaciones y el misterio de la existencia.

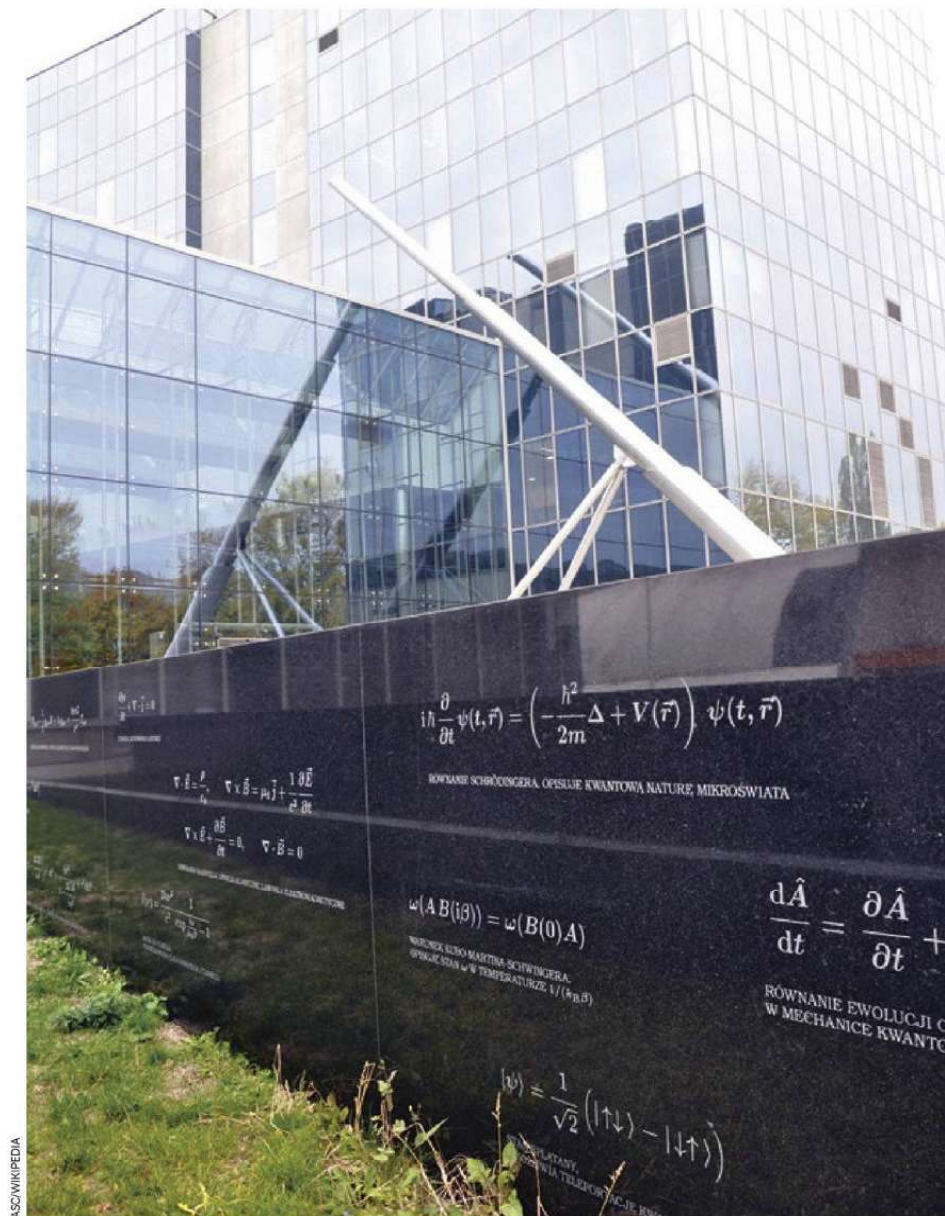
LA ECUACIÓN, EL GATO Y LA LUCHA POR EL SENTIDO DE LO CUÁNTICO

Corría el invierno de 1925 cuando Schrödinger se aisló en los Alpes suizos, para concentrarse en una alternativa ondulatoria a la física cuántica emergente. Aquel retiro resultó decisivo. En pocas semanas redactó los primeros borradores del artículo que publicaría en 1926, donde presentaba una ecuación que describía la evolución dinámica de los estados cuánticos: la hoy célebre ecuación de Schrödinger.

Esa ecuación, que lleva su nombre, es uno de los pilares fundamentales de la mecánica cuántica. Su forma más simple es:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

donde ψ es la función de onda, $\hbar$ la constante de Planck reducida y $\hat{H}$ el operador Hamiltoniano que representa la energía total del sistema. Más allá del formalismo, la revolución conceptual que introdujo esta ecuación fue inmensa. La materia, que hasta entonces se concebía como una colección de partículas bien localizadas, podía ahora describirse como una onda extendida, una probabilidad repartida en el espacio.



Ecuación de Schrödinger frente a la Universidad de Nuevas Tecnologías de Varsovia.

El retiro alpino que cambió la física

En el invierno de 1925, Erwin Schrödinger se retiró al hotel Belvédère de Arosa, en los Alpes suizos, con la intención de dedicar las vacaciones navideñas a

un problema que lo obsesionaba: encontrar una formulación ondulatoria de la mecánica cuántica. Se llevó sus cuadernos de cálculo, libros, papel, tinta... y también, discretamente, la compañía de una mujer que no era su esposa.

No fue un retiro ascético. Según relata su biógrafo Walter Moore, aquella relación sentimental, vivida con intensidad en el paisaje nevado de montaña, fue parte esencial del «estado mental especial» que propició la creación de su célebre ecuación. Durante ese aislamiento productivo, escribió los primeros borradores del famoso artículo publicado en 1926 que daría forma definitiva a la mecánica ondulatoria. Así, entre el amor, el silencio alpino y las matemáticas, Schrödinger trazó las líneas de una teoría que cambiaría para siempre la física.



El enfoque de Schrödinger, a diferencia de la formulación matricial propuesta un año antes por Werner Heisenberg, era continuo, visualizable y matemáticamente elegante. En vez de hablar de «saltos cuánticos» entre niveles discretos, la ecuación de Schrödinger permitía calcular cómo evolucionaba suavemente el estado de un electrón en el tiempo, como si se tratara de una onda que se desplaza por un medio. Su interpretación original era que los electrones se comportaban literalmente como ondas, distribuidas en el espacio como una especie de «nube ondulatoria» de materia.

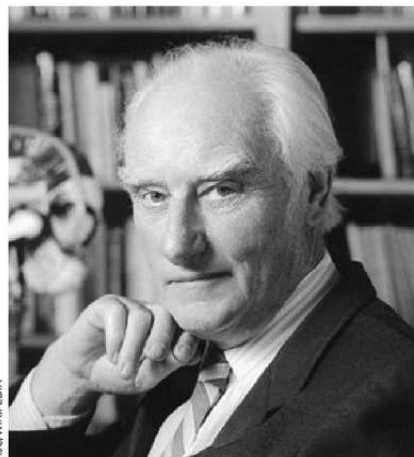
El éxito fue inmediato. Con su ecuación pudo derivar de forma natural los niveles de energía del átomo de hidrógeno, que Bohr y Sommerfeld solo habían postulado *ad hoc*. Su artículo de 1926, titulado *Quantisierung als Eigenwertproblem* («La cuantización como un problema de autovalores»), es una obra maestra que unifica la física clásica y la cuántica bajo un nuevo lenguaje matemático. Pronto quedó claro que ambas mecánicas —la matricial de Heisenberg y la ondulatoria de Schrödinger— eran formalmente equivalentes, como demostraría John von Neumann. Pero sus significados filosóficos eran radicalmente distintos.

**SCHRÖDINGER QUERÍA SUBRAYAR
EL SINSENTIDO DE APLICAR SIN MATICES LAS
REGLAS CUÁNTICAS AL MUNDO COTIDIANO**

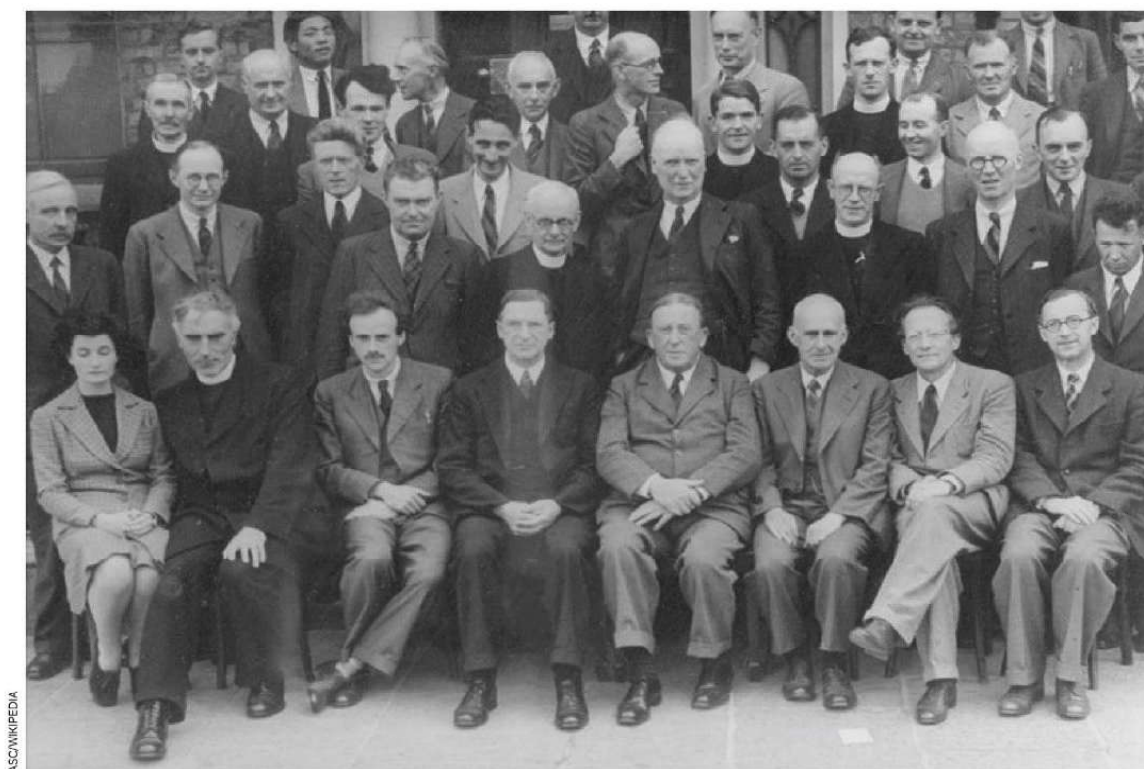
Del átomo al ADN: Schrödinger y el origen de la biología cuántica

En 1944, durante su etapa en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, Erwin Schrödinger publicó *¿Qué es la vida?*, un pequeño libro que marcaría un giro inesperado en la historia de la ciencia. En él proponía que los procesos biológicos debían estar regidos, en última instancia, por leyes físicas y cuánticas. Introdujo la idea de un «cristal aperiódico» como portador de la información genética: una estructura estable pero capaz de contener un código complejo. Esa intuición, que parecía puramente especulativa en su momento, anticipó con asombrosa precisión el concepto de ADN como portador de la herencia biológica.

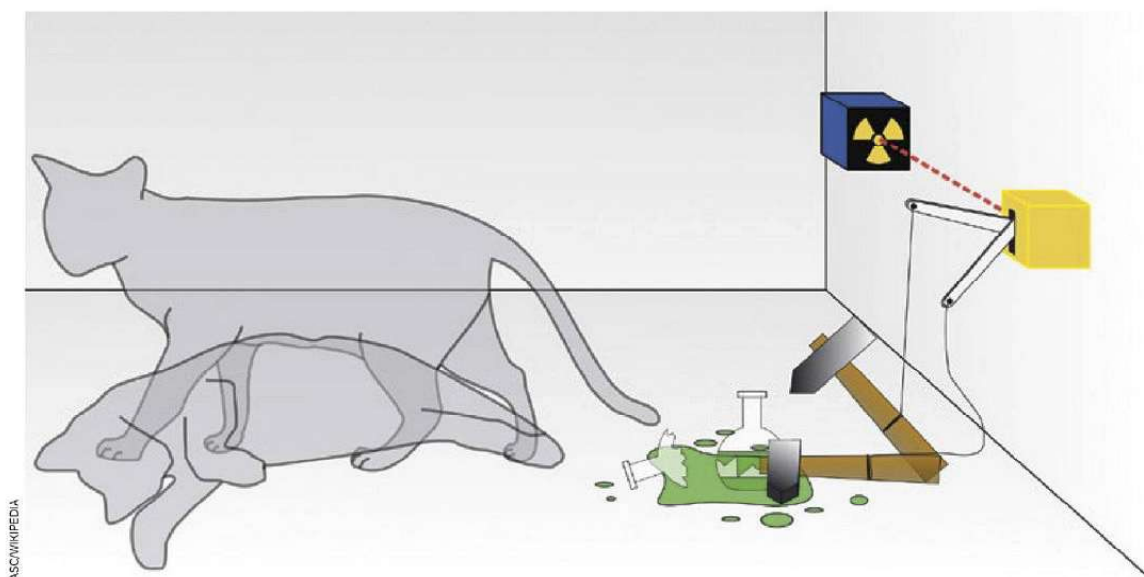
El impacto fue inmediato en jóvenes científicos de la época. Francis Crick, uno de los descubridores de la doble hélice del ADN, reconocería más tarde que fue la lectura de *¿Qué es la vida?* lo que lo impulsó a dejar la física y pasarse a la biología. Aunque Schrödinger no participó directamente en los avances moleculares que siguieron, su influencia conceptual fue decisiva para el nacimiento de la biología molecular. Así, el autor de la ecuación de onda terminó dejando huella también en el estudio de la vida, tendiendo un puente entre lo subatómico y lo genético que aún hoy sigue inspirando a físicos y biólogos por igual.



Francis Crick (1916-2004).



Schrödinger colaboró en la creación del que sería el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín (DIAS); en esta fotografía de 1942 aparece en la primera fila, el segundo desde la derecha.



Representación visual del famoso experimento mental ideado por Schrödinger en 1935.

Schrödinger, que detestaba la idea de que una partícula no tuviera propiedades definidas hasta ser observada, rechazaba de plano la interpretación de Copenhague defendida por Bohr y Heisenberg. Para él, la función de onda era algo real, físico, no una mera herramienta estadística. Esta oposición lo llevaría a librar una batalla intelectual en la que nunca se sintió del todo acompañado. Aunque Einstein compartía muchas de sus objeciones, se alejaban en sus estrategias. Einstein buscaba variables ocultas, Schrödinger apostaba por reinterpretar la materia misma como onda.

Su descontento con las consecuencias lógicas de la interpretación de Copenhague lo llevó, en 1935, a formular su famosa paradoja del gato. En una carta a Einstein, propuso un experimento mental: si un sistema cuántico puede estar en una superposición de estados —por ejemplo, una partícula que está a la vez decaída y no decaída—, ¿qué sucede cuando ese sistema afecta a un objeto macroscópico? Imaginemos una caja cerrada que contiene un gato, un átomo radiactivo, un contador Geiger y un frasco de veneno que se libera si el átomo decae. Según la lógica cuántica, mientras no se abra la caja, el átomo está en una superposición de estados... ¿y el gato también? ¿Está vivo y muerto a la vez?

Schrödinger no pretendía que alguien construyera tal dispositivo. Quería subrayar el sinsentido de aplicar sin matices las reglas cuánticas al mundo cotidiano. La paradoja no era una defensa del colapso de la función de onda, sino una crítica a una teoría que, en su opinión, no explicaba cuándo ni cómo se produce ese colapso. En cierto modo, el gato era un dardo contra la pasividad de sus colegas: ¿acaso nadie más encontraba absurdo que la teoría no definiera qué es un hecho?

Paradójicamente, y salvando la redundancia, la paradoja del gato ha sobrevivido mejor que la propia interpretación de Schrödinger. Aunque su visión de la onda como entidad física fue progresivamente desplazada por la ortodoxia de Copenhague, sus contribuciones técnicas permanecen como columna vertebral de toda la física cuántica. Hoy en día, la ecuación de Schrödinger es la herramienta principal para describir átomos, moléculas, semiconductores, superfluidez, láseres, superconductores, estados cuánticos en computación y hasta el comportamiento colectivo de sistemas complejos. ■

Paul Dirac

EL MONJE
CUÁNTICO
DE LA ELEGANCIA
MATEMÁTICA

Paul Dirac.





Dirac, en la imagen, compartió el Premio Nobel de Física de 1933 con Erwin Schrödinger.

Paul Adrien Maurice Dirac nació el 8 de agosto de 1902 en Bristol, Inglaterra. Su padre, Charles Dirac, era un inmigrante suizo que enseñaba francés con métodos severos. Por otra parte, su madre, Florence, trabajaba como bibliotecaria. De esa mezcla surgió una educación férrea y meticulosa. En casa se hablaba francés en las comidas, pero solo si Paul respondía con corrección gramatical, pues, de lo contrario, su padre simplemente no le dirigía la palabra. Dirac aprendió pronto que el silencio podía ser más cómodo que la conversación mal entendida. Años después, se cuenta que cuando alguien le preguntaba por qué hablaba tan poco, solía contestar: «Mi padre me enseñó a no decir nada si no podía decir algo mejor que el silencio». Aunque no hay registros escritos que lo confirmen.

A diferencia de muchos de sus contemporáneos, Dirac no destacó en su infancia por un interés precoz en la física, sino por su amor a las matemáticas puras. La precisión, el orden, la belleza de la lógica matemática eran, para él, una forma de verdad más profunda que cualquier discurso. En su juventud, solía resolver ecuaciones por placer, como quien desarma un reloj para contemplar la elegancia de su mecanismo.

EL INGENIERO FRUSTRADO QUE ENCONTRÓ SU LENGUAJE

Dirac estudió ingeniería eléctrica en la Universidad de Bristol, más por presión práctica que por vocación. Graduado en 1921, no logró encontrar empleo en ese campo, golpeado aún por la crisis posterior a la Primera Guerra Mundial. Este obstáculo le condujo, casi por accidente, a estudiar matemáticas en Cambridge. Aquel cambio marcaría el inicio de una carrera científica sin precedentes. En 1923 comenzó a asis

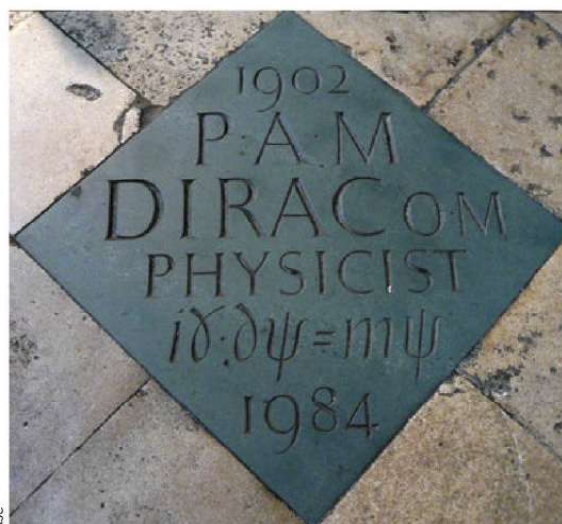
LE GUSTABA PASEAR SOLO DURANTE HORAS, ABSORTO EN ECUACIONES QUE RECITABA MENTALMENTE COMO SI FUERAN POEMAS

tir a seminarios sobre mecánica cuántica sin tener apenas conocimientos previos de física. Pero eso no le impidió destacar. Su mirada externa, su estilo de razonamiento formal, su desinterés por lo empírico convencional, hicieron que encontrara en la cuántica un terreno fértil para aplicar un tipo de pensamiento poco común.

En el Trinity College de Cambridge, donde entró como estudiante de investigación, se convirtió pronto en una figura peculiar: caminaba solo, comía en silencio, escribía poco y hablaba menos. Se cuenta que cuando un profesor quiso iniciar una conversación con él preguntando: «¿No es un día hermoso?»,

Dirac se limitó a responder: «¿A qué se refiere, exactamente, con ‘hermoso’?»

Pese a su aparente rigidez, Dirac no carecía de sensibilidad. Le gustaba pasear solo durante horas, absorto en ecuaciones que recitaba mentalmente como si fueran poemas. Su lógica no era la del científico empírico sino la del asceta geométrico. Tenía una particular devoción por la simetría, que consideraba un principio rector del universo. A menudo decía que las teorías físicas debían juzgarse más por su belleza matemática que por su ajuste con los datos experimentales. Incluso llegó a afirmar: «Es más importante que una ecuación sea bella a que sea correcta».



Placa conmemorativa con la ecuación de Dirac en la Abadía de Westminster.

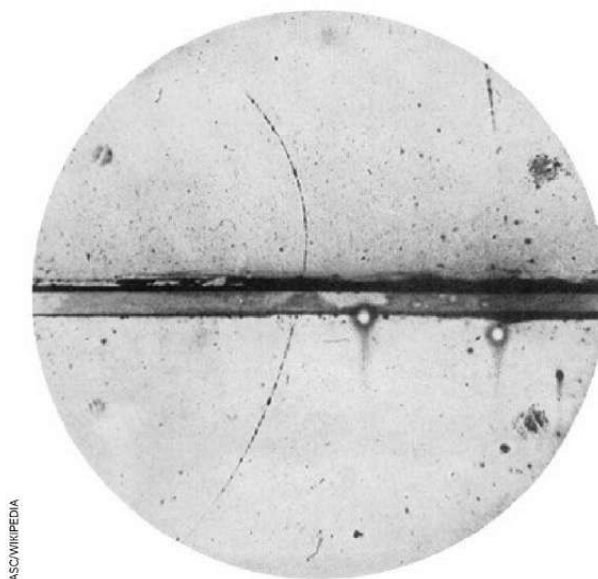
EINSTEIN, BOHR Y UN RESPETO SILENCIOSO

Aunque contemporáneo de Einstein y Bohr, Dirac nunca buscó la notoriedad. Su respeto por Einstein era absoluto, pero no sentía la necesidad de mantener una relación estrecha con él. De hecho, cuando coincidían en conferencias, se saludaban con un gesto sobrio y callado. Lo mismo ocurría con Bohr, cuya interpretación filosófica de la cuántica le resultaba innecesariamente ambigua.

Aun así, Dirac nunca polemizó. Su manera de disentir era simplemente guardar silencio. Tenía el raro don de expresar con ecuaciones lo que otros necesitaban ensayos para decir. Y esa economía del lenguaje, tanto verbal como formal, se convirtió en su marca de fábrica personal. Dirac no inventó la física moderna, pero la reformuló con un rigor que convirtió muchas intuiciones dispersas en una arquitectura coherente.

Tras recibir el Premio Nobel en 1933, compartido con Erwin Schrödinger, Dirac comenzó a recibir invitaciones de todo el mundo. Fue uno de los pocos científicos occidentales que visitó la Unión Soviética en plena época estalinista, invitado por el físico Kapitza. Allí se hizo amigo de la hermana de este, Margit Wigner, con quien terminó casándose. Su relación fue serena, casi matemática. Él encontraba en Margit una calma ajena al ruido del mundo; ella, en su silencio, una forma de paz.

En sus últimos años se trasladó a Estados Unidos, donde ejerció como profesor en la Universidad de Florida; allí mantuvo la misma rutina de trabajo austero, largos paseos y vida interior casi monacal. Falleció el 20 de octubre 1984 en Tallahassee. Tenía 82 años. En 1995 se instaló en la Abadía de Westminster una placa azul de pizarra verde con la ecuación de Dirac.



ASO/WIKIPEDIA

Fotografía en una cámara de niebla por el físico estadounidense Carl David Anderson del primer positrón identificado, en 1932.

ECUACIONES QUE REVELAN PARTÍCULAS

El año 1928 marca uno de los momentos culminantes de la historia de la física. Paul Dirac, entonces con apenas 26 años, publicó una ecuación destinada a transformar nuestra comprensión de la materia. Su objetivo era conciliar la recién formulada mecánica cuántica con la teoría de la relatividad especial de Einstein. El resultado fue la ecuación de Dirac, una fórmula compacta y útil para los físicos, pero ilegible para el gran público. Sin embargo, encerraba una revelación profunda: al describir el electrón relativista, la ecuación predecía automáticamente la existencia de otra partícula idéntica, pero con carga opuesta.

Era la primera vez en la historia que una ecuación predecía la existencia de una partícula no observada: el positrón. Dirac no lo entendió así de inmediato. Al principio interpretó esas «soluciones negativas» como electrones con energía negativa ocupando un «mar» invisible. Más tarde se dio cuenta de que lo que había descubierto era algo más radical. Hablamos de la antimateria.

En 1932, Carl Anderson confirmó experimentalmente la existencia del positrón en una cámara de niebla. La predicción matemática de Dirac había sido verificada. Desde entonces, toda partícula elemental tiene su antipartícula asociada, y este principio es hoy uno de los pilares del modelo estándar de la física.

EL PRINCIPIO DE BELLEZA

La motivación de Dirac no era tanto describir la realidad observable como encontrar una formulación lo más elegante posible de las leyes físicas. La belleza



En 1933, Paul Dirac y Erwin Schrödinger ganaron el Premio Nobel de Física. En la imagen, aparecen a izda. y dcha. de Werner Heisenberg, galardonado el año anterior.

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:



El Nobel que no quería

En 1933, cuando se anunció que Paul Dirac compartiría el Premio Nobel de Física con Erwin Schrödinger, llegó a plantearse no aceptarlo: la notoriedad pública le parecía una distracción que estorbaba la investigación. Ernest Rutherford le advirtió que una negativa le daría aún más publicidad y Dirac terminó viajando a Estocolmo. Allí pronunció un discurso sobrio y breve durante el banquete. Su incomodidad con el foco público era evidente: prefería volver cuanto antes a sus ecuaciones.

Además del Nobel, Dirac acumuló reconocimientos de primer nivel: la Royal Medal de la Royal Society (1939), la Copley Medal y la Max Planck Medal (ambas en 1952), y el J. Robert Oppenheimer Memorial Prize (1969). En 1973 ingresó en la Order of Merit, distinción que aceptó tras haber rechazado con anterioridad un nombramiento de caballero.

matemática no era para él una metáfora, sino una brújula. A diferencia de otros físicos más pragmáticos, Dirac estaba convencido de que las teorías verdaderas debían ser necesariamente bellas. «Si uno sigue la belleza en sus ecuaciones —escribió—, muy rara vez se equivoca».

Ese ideal platónico lo llevó a proponer varias ideas audaces que no siempre encontraron confirmación experimental inmediata. Una de ellas fue su hipótesis de que las constantes fundamentales (como la de gravitación) podrían variar con el tiempo. Otra, aún más famosa, fue su predicción de los monopolos magnéticos, partículas que actuarían como «imanes de un solo polo». Hasta ahora no se han observado, pero la teoría de campos moderna aún deja la puerta abierta a su existencia.

Dirac creía que las ecuaciones más profundas debían estar «más allá del empirismo», y por eso defendía incluso aquellas formulaciones teóricas que todavía no podían comprobarse. Su fe en la belleza matemática anticipó desarrollos futuros

Margit y el lenguaje perdido del amor

Margit Wigner, hermana del físico húngaro Eugene Wigner y conocida como Manci, era todo lo que Dirac no era: espontánea, risueña y conversadora. Se conocieron en un congreso científico en 1934 y, contra toda previsión, comenzaron una relación. Margit no solo aceptó la personalidad distante de Dirac, sino que supo traducir su silencio. Decía que él no hablaba mucho porque pensaba demasiado y que bastaba con acompañarlo en sus paseos para entender su afecto. Manci solía decir que con Paul no hacían falta grandes declaraciones; si algo cambiaba, él se lo haría saber. Margit fue su intérprete ante el mundo y, en cierto modo, su única conexión estable con la dimensión emocional de la vida. Juntos construyeron un tipo de amor hecho más de pausas que de frases. Su forma de comunicarse era tan emblemática que sus colegas de Cambridge llegaron a definir —de broma— la «unidad dirac», que era una palabra por hora.



Dirac, Manci y sus cuatro hijos en su casa de Cambridge, hacia 1946.

como la supersimetría o la teoría de cuerdas. En cierto modo, fue uno de los primeros físicos «más allá del estándar».

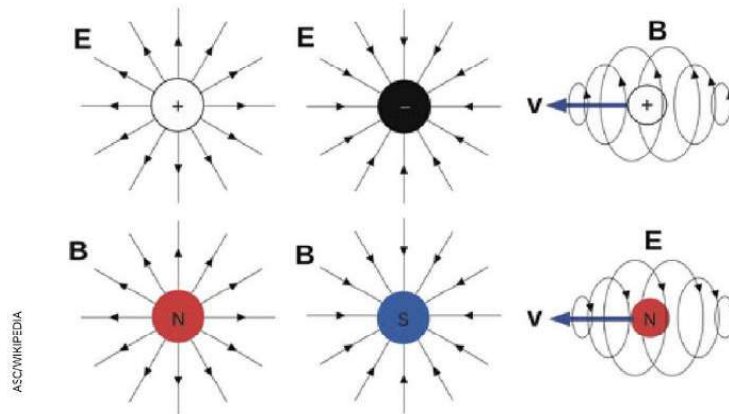
Otro de sus aportes cruciales fue el concepto del mar de Dirac, una imagen teórica para explicar la aparente estabilidad del electrón y sus niveles de energía. Según este modelo, todos los estados de energía negativa están ocupados, y solo cuando un electrón «salta» de ese mar se hace visible, como una partícula con energía positiva. Si se crea una «burbuja» de vacío —es decir, un hueco en ese mar—, se manifiesta como un positrón. Esta intuición sembró la idea de que el vacío cuántico no es un espacio vacío, sino un medio denso de posibilidades.

Efectivamente, hoy sabemos que el vacío es una entidad activa, en la que surgen y desaparecen pares de partículas virtuales constantemente. Pero en los años treinta esta idea era tan extraña como la propia mecánica cuántica. Dirac fue uno de los primeros en tomarse en serio que la nada podía estar llena.

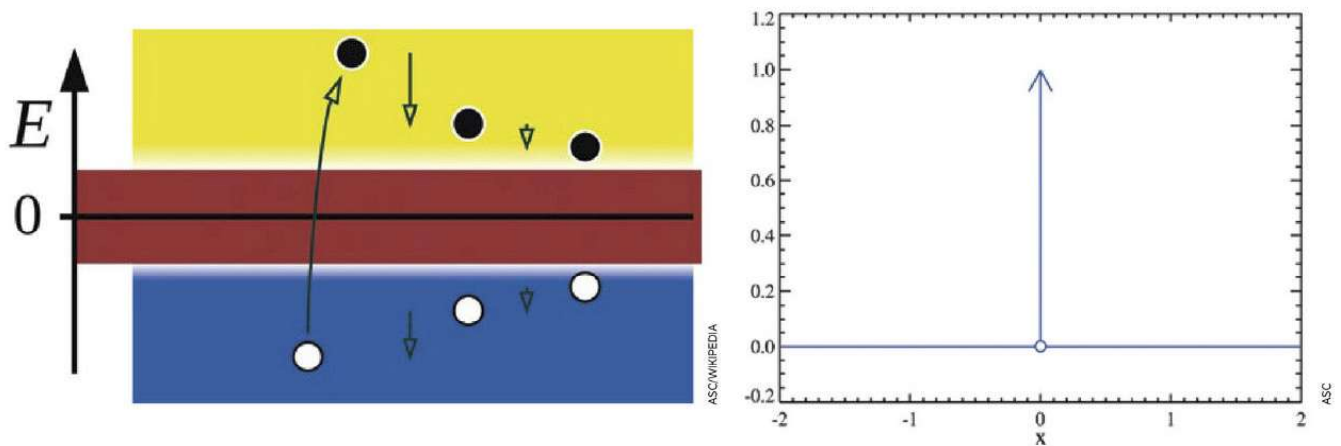
LA DELTA COMO SÍMBOLO

Una de sus contribuciones más utilizadas en física e ingeniería —y la más discreta— es la llamada delta de Dirac. Se trata de una función matemática idealizada que tiene un valor nulo en todos los puntos salvo en uno, donde se dispara infinitamente, de modo que su integral es exactamente uno. Aunque no es una función en sentido estricto, se convirtió en una herramienta esencial para la formulación de la física cuántica y la teoría de campos. Sirve, entre otras cosas, para describir partículas puntuales, estados localizados y condiciones iniciales.

CON EL CONCEPTO DEL MAR DE DIRAC EXPLICÓ LA APARENTE ESTABILIDAD DEL ELECTRÓN Y SUS NIVELES DE ENERGÍA



La existencia de monopolos magnéticos fue formulada por Paul Dirac en 1931.



A la izda., representación del mar de Dirac, una construcción teórica que consideraba al vacío como un «mar infinito» de partículas con energía negativa.
A la dcha., diagrama esquemático de la función delta de Dirac.

Dirac la introdujo con naturalidad en sus desarrollos, sin prever su posterior ubiquidad. Hoy aparece en casi cualquier rama de la física, desde la acústica a la óptica, desde la electrodinámica a la cosmología. En cierto modo, resume su estilo: precisión extrema, utilidad práctica y economía expresiva.

Más allá de resultados concretos, Dirac fue el arquitecto de un nuevo estilo de hacer física teórica. Mientras sus coetáneos seguían atados a la intuición experimental, él demostró que el pensamiento abstracto, ejecutado con rigor y belleza, puede llegar más lejos que el experimento mismo. Su ecuación marcó el camino hacia la teoría cuántica de campos, que más tarde formularían Feynman, Schwinger y Tomonaga.

No fue un constructor de máquinas ni un animador de conferencias. Pero sus ideas fundaron una nueva manera de explorar el mundo. No con metáforas, sino con fórmulas. No con experimentos espectaculares, sino con símbolos cuidadosamente encajados. ■



Marie Curie

RADIOACTIVIDAD
Y PUERTA DE ENTRADA
AL ÁTOMO

M. Skłodowska Curie

Marie Skłodowska nació el 7 de noviembre de 1867 en Varsovia, en el seno de una familia polaca con fuerte tradición académica. Su padre, profesor de física y matemáticas, le transmitió desde niña el interés por el conocimiento y la curiosidad científica. Su madre, fallecida cuando Marie tenía apenas diez años, había sido directora de escuela y había inculcado un respeto profundo por la educación. La infancia de Marie estuvo marcada por la intensidad del estudio en un entorno familiar riguroso y por la conciencia de la represión cultural y política que sufría Polonia bajo el dominio ruso.

Desde temprana edad, Marie destacó por su inteligencia y determinación. A pesar de las limitaciones impuestas a las mujeres en el acceso a la educación formal, asistió a la llamada «Universidad Volante», un centro clandestino que permitía a las jóvenes polacas estudiar física, química y matemáticas. Allí adquirió conocimientos sólidos que la prepararían para enfrentarse a los desafíos de la ciencia moderna. La disciplina y la perseverancia en sus estudios caracterizaron toda su vida académica y profesional.

El contexto político de Varsovia y la falta de oportunidades para mujeres hicieron que Marie considerara trasladarse al extranjero para continuar su formación. En 1891, a la edad de 24 años, se mudó a París. Su objetivo era estudiar en la Universidad de la Sorbona, donde podía acceder legalmente a una educación superior en física y matemáticas, algo que le estaba vetado en su país. La decisión fue difícil: dejar atrás a su familia, su idioma y su cultura para embarcarse en un proyecto de vida en un país extranjero.

Bajo estas líneas, Bronisława Boguska y Władysław Skłodowski, padres de Marie. A la dcha., Marie Curie y cuatro estudiantes, entre 1910 y 1915.



ASC/WIKIPEDIA



ASC / THE LIBRARY OF CONGRESS

ASISTIÓ A LA «UNIVERSIDAD VOLANTE», UN CENTRO CLANDESTINO QUE PERMITÍA A LAS JÓVENES POLACAS ESTUDIAR CIENCIAS

Al llegar a París, Marie se enfrentó a condiciones duras. Vivía en un pequeño ático sin calefacción y debía subsistir con recursos limitados mientras se dedicaba a sus estudios. Su adaptación requirió esfuerzo físico y mental, pero pronto se destacó por su disciplina y brillantez académica. En 1893 obtuvo la licenciatura en Física, seguida de la de Matemáticas al año siguiente, consolidando así su integración en la comunidad científica francesa y sentando las bases para su futura investigación en radiactividad.



En 1894, Marie conoció a Pierre Curie, que era instructor en la Escuela Superior de Física y de Química Industriales de París. Marie y Pierre contrajeron matrimonio el 26 de julio de 1895.

UN MATRIMONIO RADIANTE

En París, Marie conoció a Pierre Curie en 1894, un físico reconocido por sus estudios sobre magnetismo y cristalografía. Su encuentro surgió de la colaboración científica. Pierre había escuchado hablar de la joven polaca que investigaba fenómenos eléctricos y radiactivos con notable precisión y determinación. Desde el primer momento, ambos compartieron un respeto mutuo por la rigurosidad experimental y una pasión similar por la investigación, lo que rápidamente convirtió su relación profesional en una amistad profunda y complementaria.

La relación evolucionó hacia el matrimonio en 1895, y pronto se consolidó una colaboración científica única. En lugar de establecer límites estrictos entre la vida personal y el trabajo, ambos decidieron que su hogar y el laboratorio serían espacios compartidos.

Cuando Marie Curie comenzó a investigar las misteriosas emanaciones del uranio, la palabra «radiactividad» aún no existía. Fue ella quien acuñó el término, convencida de que aquel fenómeno invisible era algo más que una mera curiosidad. Henri Becquerel había observado que algunas sales de uranio velaban placas fotográficas incluso protegidas de la luz, pero no profundizó en la causa de ese efecto. Marie sí lo hizo. Aisló el efecto, lo midió con un electrómetro mejorado por su marido Pierre, y comprendió que aquella energía invisible no dependía de reacciones químicas ni de la organización molecular del material, sino que provenía del propio átomo.

Radiactividad sin protección: una historia escrita con cicatrices

La palabra «radiactividad» entró en la ciencia antes que sus riesgos. Durante años, Marie Curie y sus colaboradores manipularon sustancias altamente radiactivas sin guantes, sin mascarillas, sin blindajes. Las sales de radio brillaban en la oscuridad y eran conservadas en frascos abiertos. Ella misma llevaba tubos de ensayo en el bolsillo, como si fueran amuletos. Lo que en aquel momento era ignorancia, con el tiempo se convirtió en herida: quemaduras, anemia aplásica, muertes prematuras. Los efectos sobre su cuerpo fueron devastadores. A pesar de los síntomas evidentes de intoxicación por radiación, Marie nunca hizo público el daño que estaba sufriendo. Su salud se deterioró lentamente, pero de forma irreversible.

A lo largo de los años, Marie Curie experimentó una serie de problemas de salud, desde fuertes dolores en los huesos hasta hemorragias internas. Aunque los efectos destructivos de la radiactividad ya se conocían parcialmente hacia el final de su vida, Marie nunca permitió que su sufrimiento interferiera con su trabajo. Finalmente, en 1934, la causa de su muerte fue identificada como anemia aplásica, probablemente

originada por su exposición continua a las radiaciones. A pesar de los avances en la comprensión de los riesgos de la radiación, los daños que sufrió por su dedicación a la ciencia son un testamento del precio personal de su contribución al progreso del conocimiento humano.

Marie Curie trabajando en su laboratorio, hacia 1905.



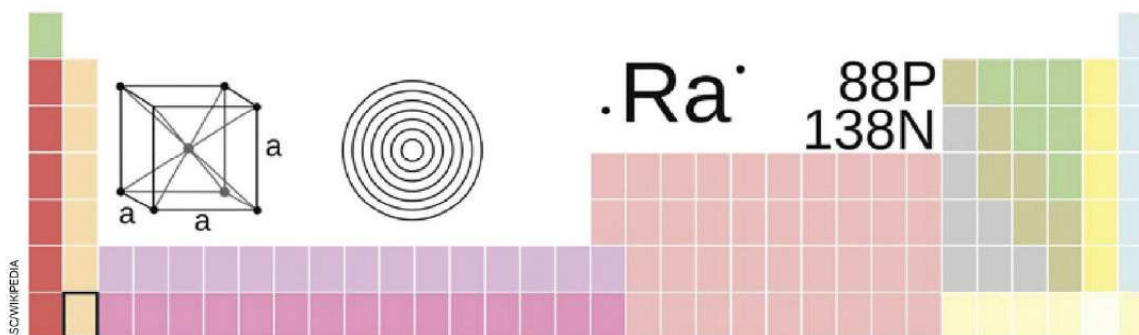
GETTY



Tumba de los Curie en el Panteón de París.

ASCIWIKIPEDIA

HASTA ENTONCES, EL ÁTOMO ERA CONSIDERADO INDIVISIBLE, UN LADRILLO FUNDAMENTAL DE LA MATERIA



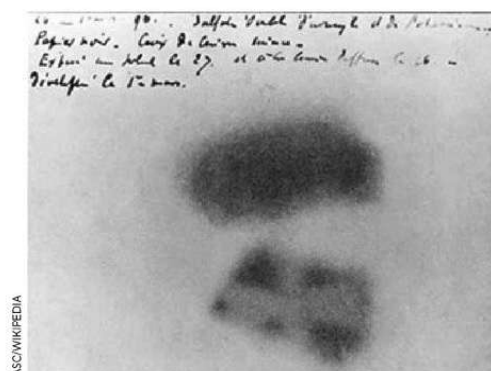
El radio, en forma de cloruro de radio, fue descubierto por Marie y Pierre Curie en 1898.

Esa intuición era una ruptura profunda con la física clásica. Hasta entonces, el átomo era considerado indivisible, un ladrillo fundamental de la materia. Si la radiación procedía del interior del átomo, significaba que ese «ladrillo» tenía estructura y, por tanto, que estaba ocurriendo algo dentro. La idea era tan radical que ni siquiera ella la formuló con palabras rotundas. Se limitó a observar, medir y concluir: «La actividad del uranio es una propiedad atómica del elemento».

EL LABORATORIO DE LA PECHBLENDA

El trabajo de Marie y Pierre Curie durante esos años fue brutal en todos los sentidos. Durante más de cuatro años manipularon toneladas de pechblenda, una mena de uranio procedente de Bohemia. Su objetivo era aislar los elementos responsables de la intensa radiactividad que habían detectado en los residuos. Y lo lograron. Primero descubrieron el polonio, en julio de 1898 y, meses después, el radio. Lo que más sorprendía era que ambos emitían radiación con una intensidad muy superior a la del uranio.

Aquella labor se llevó a cabo en un cobertizo sin calefacción, con instrumental rudimentario, en medio de humos tóxicos y polvo radiactivo. La purificación del radio, en particular, requería hervir calderas de material ácido durante días enteros. Nadie sabía entonces que estaban manipulando sustancias letales sin protección. En sus cuadernos, aún hoy conservados, se registran niveles de radiactividad peligrosos. Pero ellos no eran imprudentes, simplemente, el peligro era desconocido.

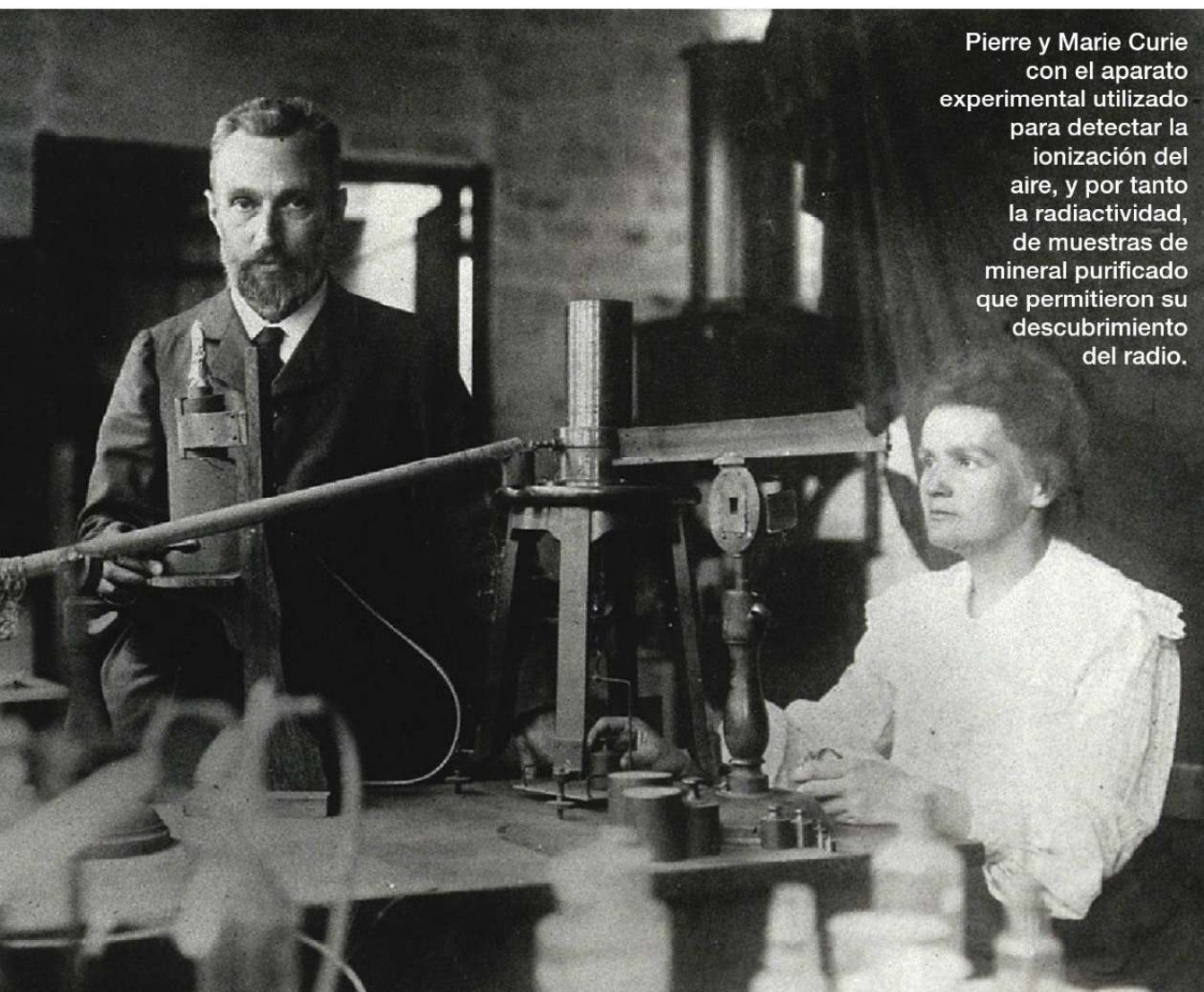


Placa fotográfica realizada por Becquerel que muestra los efectos de la exposición a la radiactividad.

ERA LA PRIMERA VEZ EN LA HISTORIA QUE SE OBSERVABA LA TRANSMUTACIÓN REAL DE UN ELEMENTO QUÍMICO EN OTRO

El impacto de sus hallazgos fue inmediato. La radiactividad se convirtió en un campo de estudio con identidad propia. El trabajo de los Curie no fue solo químico, pues proporcionó una nueva forma de explorar la materia. Medir la intensidad de la radiación se convirtió en una forma de descubrir elementos. La radiactividad pasó a ser una propiedad física mensurable, independiente del estado o combinación química.

Su Premio Nobel de Física en 1903, compartido con Pierre y Henri Becquerel, reconocía esta apertura de campo. Fue el primer Nobel otorgado a una mujer, pero no el último. En 1911 recibió el de Química por haber aislado el radio en estado puro y haber estudiado sus propiedades. Nadie más ha sido premiado en



Pierre y Marie Curie con el aparato experimental utilizado para detectar la ionización del aire, y por tanto la radiactividad, de muestras de mineral purificado que permitieron su descubrimiento del radio.

ASC/WIMPEDIA

dos disciplinas científicas distintas. Pero más allá de los galardones, su legado consistió en haber dotado a la ciencia de una nueva herramienta para mirar lo oculto: la radiación como pista para investigar lo que sucede dentro de la materia. ¿Y qué tiene que ver todo esto con la física cuántica? Algo que, posiblemente, ni te hayas planteado nunca.

LEGADO CUÁNTICO DE MARIE CURIE: EL ÁTOMO Y LA RUPTURA DE LO DETERMINISTA

Con el tiempo, quedó claro que los átomos radiactivos no eran estables. Se desintegraban. El radio, por ejemplo, emitía partículas alfa y se transformaba en otros elementos. Era la primera vez en la historia que se observaba la transmutación real de un elemento químico en otro. No por alquimia, sino por descomposición natural. Este descubrimiento abría una puerta directa al núcleo atómico, aunque entonces nadie hablaba aún de protones o neutrones.

La radiactividad no solo demostraba que el átomo tenía estructura interna, sino que esa estructura podía cambiar. En ese sentido, el trabajo de Marie Curie

Curie y la guerra: rayos X en el frente

Cuando estalló la Primera Guerra Mundial, Marie Curie comprendió que sus conocimientos podían salvar vidas. En lugar de encerrarse en el laboratorio, se volcó en llevar la ciencia al frente. Diseñó unidades móviles de rayos X, conocidas como «Petites Curies» e instaladas en automóviles que podían desplazarse hasta los hospitales de campaña. Gracias a ellas, los cirujanos podían localizar balas y fracturas sin necesidad de abrir el cuerpo a ciegas. En total, impulsó más de veinte vehículos y un centenar de salas radiológicas fijas durante el conflicto.

Pero su papel no fue solo logístico. Ella misma condujo uno de esos vehículos, reparó equipos, calibró tubos de Crookes y formó a más de un centenar de técnicos, muchos de ellos mujeres voluntarias. A falta de manuales, redactó uno propio. Aunque nunca se reconoció formalmente su labor en el frente, muchos médicos reconocieron que la mortalidad bajó gracias a esas máquinas. La ciencia, en manos de Curie, se convirtió en una herramienta de precisión contra el caos de la guerra.



Con la ayuda de la Cruz Roja y Antoine Bécclère, director del servicio radiológico del ejército, Marie Curie participó en el diseño de unidades móviles de radiología quirúrgica.

EL FENÓMENO DE LA DESINTEGRACIÓN RADIATIVA DEMOSTRÓ QUE LOS ÁTOMOS PODÍAN TRANSFORMARSE ESPONTÁNEAMENTE

se sitúa en la antesala de la física nuclear y, por extensión, de la física cuántica. Ernest Rutherford, por ejemplo, se basó en el uso del radio para bombardear átomos y descubrir el núcleo.

Aunque Marie Curie nunca desarrolló modelos cuánticos —ni pretendía hacerlo— su trabajo experimental sobre la radiactividad fue una prueba empírica clave que desafió las leyes de la física clásica y allanó el camino hacia la física cuántica. En 1899, cuando ella comenzó a estudiar las emisiones radiactivas, los modelos atómicos aún concebían el átomo como una entidad estática e indivisible. Sin embargo, el fenómeno de la desintegración radiactiva demostró que los átomos podían transformarse espontáneamente, en un proceso impredecible y, por primera



Marie Curie fue la primera y, hasta la fecha, única persona en recibir dos premios Nobel en distintas especialidades científicas: Física y Química.

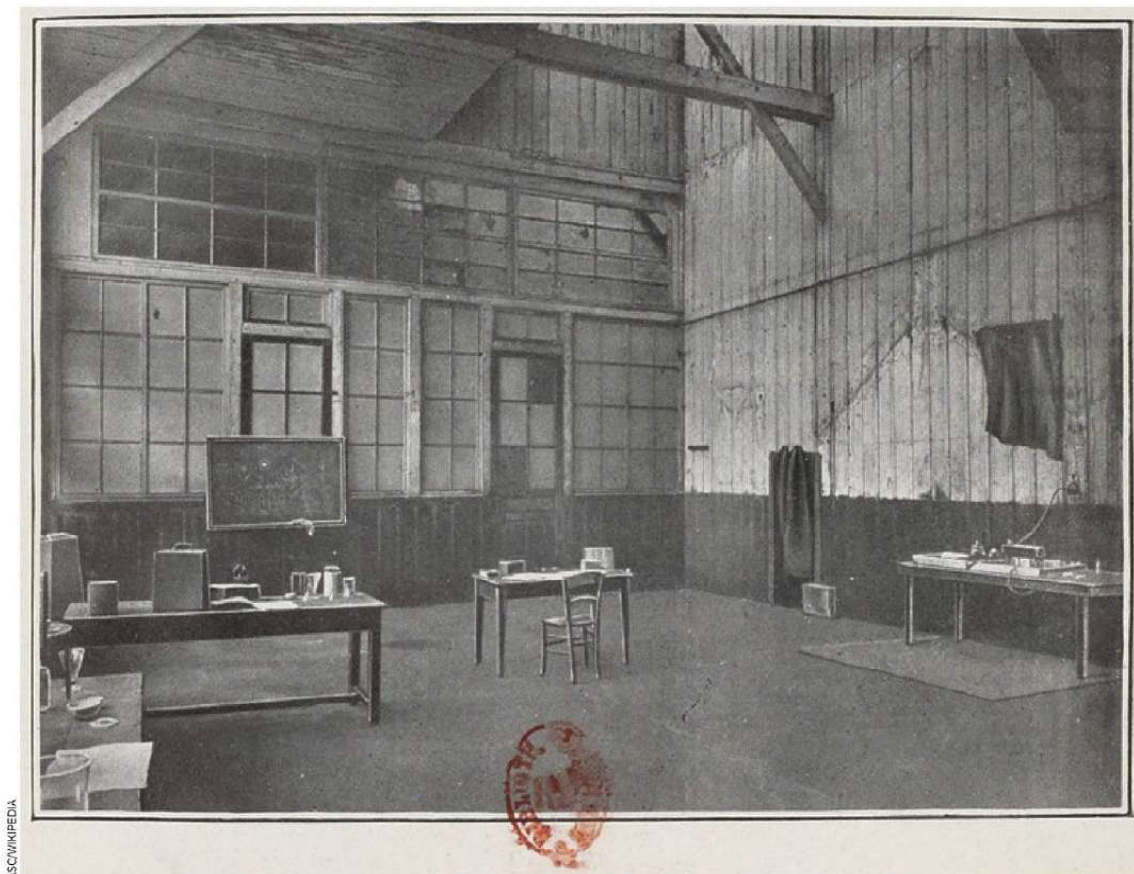
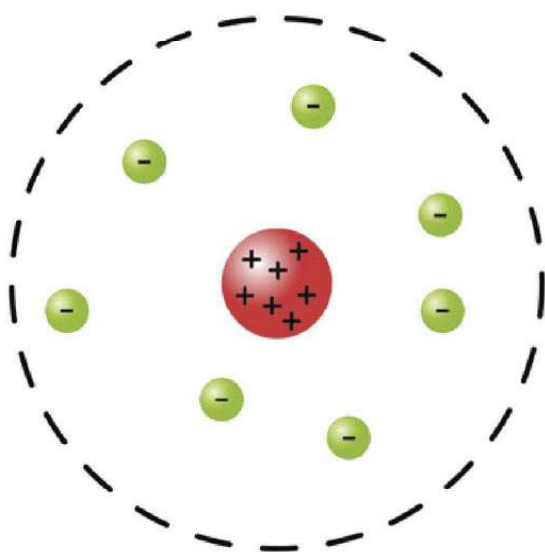


Ilustración del cobertizo de la Escuela de Física de la Sorbona de París donde Marie Curie aisló el elemento radio en estado puro y donde estudió sus propiedades.

vez, no determinista. Esto quebró *de facto* la concepción determinista del mundo físico que dominaba la ciencia.

La naturaleza discontinua y estadística de la radiactividad fue la antesala de lo que más tarde sería formalizado como los principios cuánticos.

Las desintegraciones, que ocurren de manera aleatoria en cada átomo, sin embargo, siguen leyes estadísticas cuando se analizan en grandes cantidades. Este fenómeno, que Curie observó y midió rigurosamente, anticipó la probabilidad cuántica: la idea de que los sistemas subatómicos no pueden ser descritos en términos absolutos y continuos, sino como discretos e inherentemente impredecibles. En definitiva, Marie Curie abrió una brecha experimental en la que la física cuántica encontró espacio para nacer. ■



El modelo atómico de Rutherford constituye la base de la imagen actual del átomo.

Lise Meitner

CÁLCULO, EXILIO
Y UNA FISIÓN CUÁNTICA
SIN NOBEL

Lise Meitner.



Lise Meitner nació en Viena el 7 de noviembre de 1878, en un momento histórico en el que las mujeres apenas podían aspirar a una formación científica formal. Hija de una familia judía liberal, fue la tercera de ocho hermanos. Su padre, abogado de profesión, creía firmemente en la educación y alentó a sus hijas a estudiar, aunque fuera por vías no oficiales. Como la ley no permitía entonces que las mujeres accedieran a la universidad en Austria, Lise estudió en casa y contrató tutores privados. Su tenacidad la llevó a superar, con más edad que el promedio, los exámenes necesarios para ingresar a la Universidad de Viena, donde se matriculó en física

en 1901. Allí quedó fascinada por las clases de Ludwig Boltzmann, quien la introdujo en el universo riguroso y apasionante de la física teórica. «Él me hizo ver que se podía amar la física con todo el corazón», recordaría años después.

Tras obtener su doctorado en 1906, se encontró, como tantas mujeres de su tiempo, con un panorama sin puertas abiertas. Fue la segunda mujer con título de doctora en la Universidad de Viena. Durante un tiempo trabajó sin paga, hasta que en 1907 se trasladó a Berlín, impulsada por el deseo de asistir a las conferencias de Max Planck, quien hasta poco antes se había negado a aceptar mujeres en su aula. Planck no tardó en ver la valía de Meitner y la acogió como su asistente, lo que representó un gesto poco habitual en aquel contexto. Berlín era por entonces un hervidero de talentos. Allí conoció a Otto Hahn, un químico joven y brillante con el que establecería una colaboración científica de más de treinta años.



Lise Meitner en 1906, año en que completó su investigación doctoral.

UN NUEVO ELEMENTO: EL PROTACTINIO

Durante los primeros años, su situación en Berlín fue precaria. Lise trabajaba en el sótano del Instituto de Química mientras Hahn operaba en la parte principal del edificio. Como mujer, no se le permitía entrar por la misma puerta que sus colegas varones, ni usar los baños del personal científico. A pesar de ello, ambos compartían una complicidad intelectual que superaba las restricciones impuestas por el

**PLANCK NO TARDÓ EN VER LA VALÍA DE
MEITNER Y LA ACOGIÓ COMO SU ASISTENTE, UN
GESTO POCO HABITUAL EN AQUEL CONTEXTO**

entorno. En 1912, cuando el Instituto Kaiser Wilhelm abrió sus puertas, Hahn y Meitner recibieron un laboratorio propio. Fue un reconocimiento tácito de que aquella dupla funcionaba como una unidad de pensamiento.

Durante la Primera Guerra Mundial, Meitner trabajó como enfermera radiológica en el frente austriaco, lo que reforzó su sentido ético y su aversión al uso militar de la ciencia. A su regreso, consolidó su posición como física nuclear, a pesar de que su nombre casi siempre aparecía después del de su colega. En 1918, descubrieron juntos el elemento 91, que bautizaron como protactinio, aunque anteriormente Meitner identificó un isótopo diferente, al que llamó brevium, por su corta vida. En cualquier caso, en la comunidad científica, la autoridad de Meitner crecía lentamente, pero con firmeza. De hecho, en 1926 logró un hito notable: fue nombrada profesora titular de física en la Universidad de Berlín, la primera mujer en ocupar ese puesto en Alemania.



Lise Meitner y Otto Hahn en su laboratorio, en 1912.

LA AMENAZA QUE SE ACERCABA

Los años veinte fueron para Lise Meitner una etapa de madurez científica y reconocimiento institucional. Su amistad con Einstein, Planck y otros miembros de la comunidad científica se volvió más fluida, aunque seguía siendo una figura aislada en muchos aspectos. La llegada al poder de Hitler en 1933 marcó el inicio de un periodo oscuro. Como judía, fue despojada de su cátedra y de su nacionalidad alemana, aunque el prestigio que había alcanzado le permitió, durante un tiempo, conservar su puesto en el Instituto Kaiser Wilhelm bajo protección discreta de Hahn y otros colegas.

La situación se volvió insostenible en 1938, cuando Austria fue anexionada por Alemania y Meitner, a sus 59 años, se convirtió en una ciudadana perseguida. Fue entonces cuando emprendió un peligroso viaje de huida. Sin papeles en regla, cruzó la frontera holandesa gracias a la intervención de amigos científicos y diplomáticos. El episodio recuerda, por su dramatismo, a una escena de novela. Meitner partió sin maletas, llevando apenas un abrigo y unas monedas cosidas en el dobladillo. Cuando al fin llegó a Suecia, encontró un país frío en más de un sentido. Allí, lejos de sus laboratorios y colegas, se sintió exiliada, aislada y, en ocasiones, ignorada por la comunidad científica local. Pero siguió trabajando.

Desde Estocolmo mantuvo el contacto epistolar con Otto Hahn. A pesar de las circunstancias, su colaboración no se interrumpió del todo. Cuando Hahn logró resultados desconcertantes en sus experimentos con uranio, fue Meitner quien, en conversación con su sobrino físico Otto Frisch, interpretó correctamente lo que estaba ocurriendo. El núcleo del átomo se partía en dos, liberando una enorme cantidad de energía. Fue ella quien calculó por primera vez la energía liberada en

Una carta en 1938: salvar a Lise

El 13 de julio de 1938, en un despacho del Instituto de Física de Copenhague, Niels Bohr garabateó unas líneas con cierta urgencia. No era una carta formal, sino más bien un mensaje cifrado entre colegas. Iba dirigida a Dirk Coster, físico holandés en Groningen, y su propósito era claro: encontrar una vía de escape para Lise Meitner. En Berlín, la situación se volvía insostenible. A sus casi sesenta años, Meitner era ya una física consagrada, pero su condición de judía —aunque bautizada y no practicante— la convertía en objetivo del aparato nazi. Había sido despojada de su cátedra, y el cerco legal se cerraba, ya que pronto, ni su nacionalidad austriaca la protegería.

Otto Hahn, su colaborador durante décadas, también se inquietaba, pero no actuaba con la premura que exigía la circunstancia. Fue la comunidad científica internacional —Bohr, Coster, la astrónoma Eva von Bahr y otros colegas suecos— la que se movió con decisión. Coster fue quien viajó en persona a Berlín para sacar a Lise por la frontera holandesa. El plan era arriesgado. Ella no tenía pasaporte válido y necesitaba un permiso de tránsito. Para evitar sospechas, vistió ropas sobrias, viajó ligera y llevó el dinero escondido en el dobladillo del abrigo, según puede leerse en fuentes secundarias. El 13 de julio cruzaron juntos la frontera en tren. Si la hubieran reconocido, probablemente habría sido arrestada.

En Holanda la esperaba la familia Lindh, que la acogió en su casa como a una pariente más. De allí partió días después hacia Estocolmo, donde comenzaría su nuevo exilio. Años más tarde, Meitner recordaría aquel momento como uno de los más tensos y significativos de su vida. Fue salvada por la ciencia, no por las instituciones.

la fisión nuclear utilizando la famosa ecuación de Einstein. Aquella intuición no solo era correcta, pues se trataba del primer paso hacia la era atómica.

El hecho de que Hahn recibiera en solitario el Nobel de Química en 1944 dejó una herida abierta en la historia de la ciencia. Meitner jamás expresó resentimiento en público, pero tampoco ocultó su decepción. Por otra parte, se dice que dijo lo siguiente cuando la invitaron a unirse al Proyecto Manhattan: «¡No tendré nada que ver con una bomba!». Su firmeza ética la mantuvo siempre del lado de la responsabilidad, aun cuando el mundo celebraba el poder destructivo de la fisión que ella había contribuido a explicar.

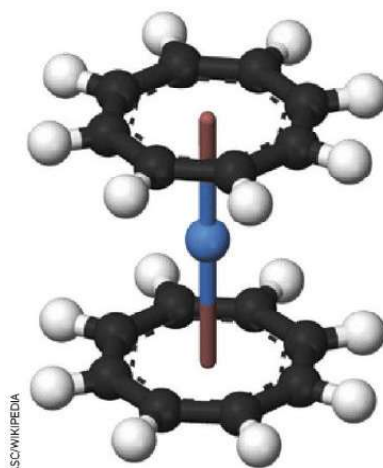
En 1947 se trasladó a Cambridge, donde vivió sus últimos años entre conferencias, homenajes y reflexiones. Murió el 27 de octubre de 1968, a los 89 años. Su tumba en Bramley, Inglaterra, lleva una inscripción dictada por su sobrino: «Lise Meitner: una física que nunca perdió su humanidad».

El elemento 109, meitnerio (Mt), lleva su nombre. También lo hacen un cráter lunar y varias instituciones.

EL ROMPECABEZAS DEL NÚCLEO ATÓMICO

A lo largo de las décadas de 1920 y 1930, Lise Meitner desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de la física nuclear, disciplina que apenas comenzaba a construirse como campo independiente. Trabajando junto a Otto Hahn, su enfoque era profundamente interdisciplinar. Ella desde la física, él desde la química.

Estructura propuesta de la molécula de protactinoceno ($\text{Pa}(\text{C}_8\text{H}_8)_2$). A la dcha., Otto Stern y Lise Meitner, probablemente en 1937, con motivo de un coloquio con ganadores del Premio Nobel.

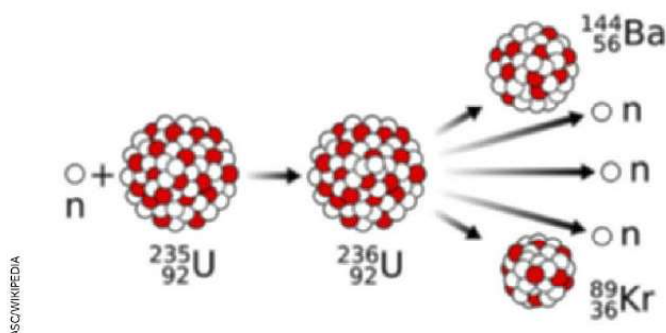


Ambos estudiaron sistemáticamente los productos resultantes del bombardeo de elementos pesados con neutrones, una técnica que había revolucionado el estudio del núcleo gracias a los trabajos previos de Enrico Fermi y otros grupos. Meitner dominaba la teoría, la instrumentación y el análisis cuantitativo, lo que la convertía en una figura clave en el laboratorio, aunque sus contribuciones no siempre quedaran reflejadas en los títulos de los artículos publicados.

En 1934, al conocerse que el físico italiano Fermi había producido elementos «transuránicos» bombardeando uranio, Meitner y Hahn se lanzaron a repetir y mejorar esos experimentos. Los resultados que obtenían eran desconcertantes: ciertos residuos no encajaban con las masas atómicas esperadas. Meitner sospechaba que la estructura del núcleo podía estar reaccionando de una forma completamente distinta a la conocida, pero los análisis químicos parecían sugerir elementos más ligeros, como el bario. Esta posibilidad, sin embargo, resultaba absurda en el marco de la física nuclear del momento. Nadie concebía que un átomo pesado pudiera dividirse en dos fragmentos medianos.

LA FISIÓN: UNA PALABRA QUE CAMBIÓ LA HISTORIA

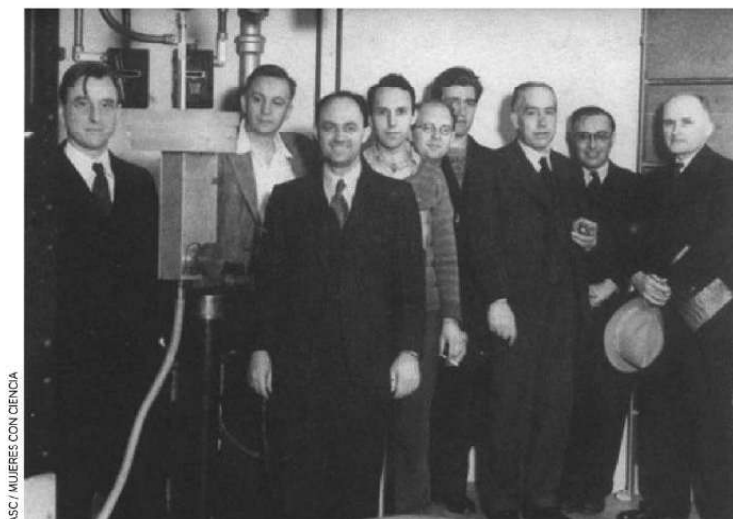
En diciembre de 1938, pocos meses después del exilio forzoso de Meitner, Otto Hahn y su colaborador Fritz Strassmann lograron aislar de forma inequívoca el



A Lise Meitner y a su sobrino Otto Frisch (en la imagen) se les atribuye la explicación teórica de la fisión nuclear a finales de 1938, después de que Hahn y Strassmann descubrieran que los núcleos de uranio se dividían cuando eran bombardeados con neutrones.

La mujer que corrigió a Bohr

En 1934, durante una visita a Copenhague, Lise Meitner escuchó a Niels Bohr plantear una idea aún vaga sobre los núcleos atómicos: que podrían reordenarse internamente al ser bombardeados con neutrones, sin necesidad de dividirse. Meitner, tras revisar los datos experimentales que ya manejaban ella y Otto Hahn, discrepó con firmeza. A su juicio, las masas observadas no dejaban lugar a dudas. Es decir, el núcleo del uranio no se reorganizaba, se partía en dos. Bohr aceptó la objeción con respeto, aunque aún no comprendía del todo sus implicaciones. Cinco años después, cuando Meitner y su sobrino Otto Frisch formularon la teoría completa de la fisión nuclear, Bohr reconoció públicamente su acierto. En su gira por Estados Unidos en 1939, fue él quien presentó la palabra «fisión» ante los físicos americanos... atribuyéndosela a Meitner. Aquel reconocimiento, aunque discreto, fue el gesto de un gigante que supo ser corregido.



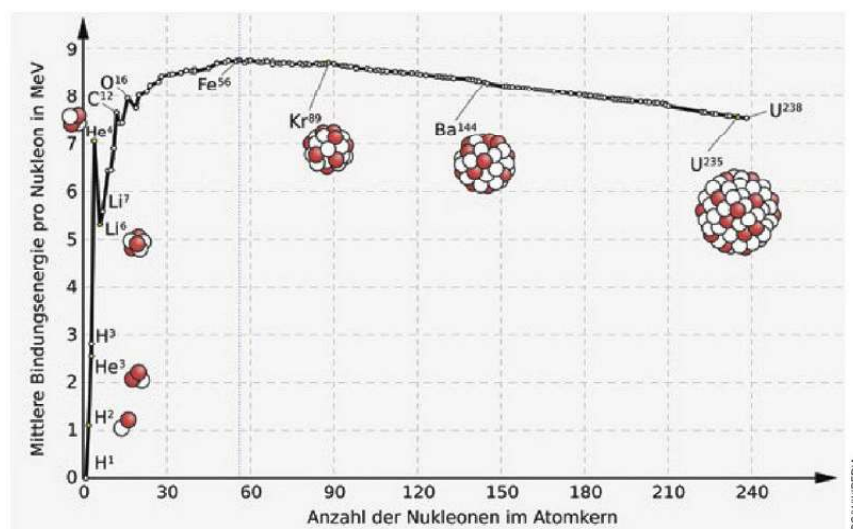
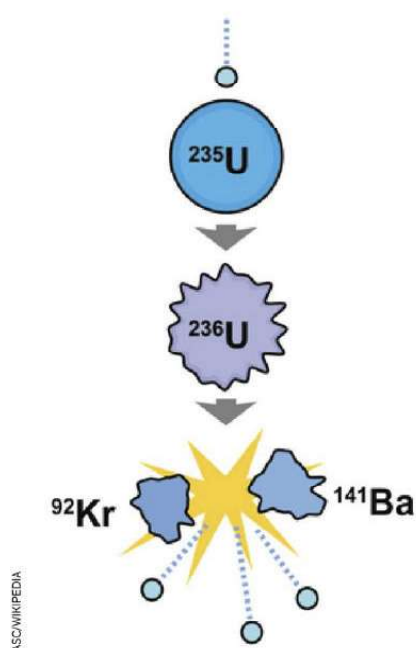
ASC / MUJERES CON CIENCIA

El 28 de enero de 1939, Fermi, Bohr y otros colegas presenciaron una recreación del experimento de fisión en la Institución Carnegie de Washington.

bario entre los productos de la desintegración del uranio bombardeado. Confundidos, escribieron a Meitner, que ya se encontraba en Suecia, para compartir sus resultados. Fue durante un paseo por el bosque invernal, junto a su sobrino Otto Frisch, cuando Lise Meitner propuso la explicación teórica que nadie había imaginado: el núcleo del uranio había sufrido una ruptura en dos partes aproximadamente iguales. Había nacido la fisión nuclear.

La elección del término «fisión» fue deliberada. Lo tomaron prestado de la biología, en analogía con la división celular. Para sostener esta hipótesis, Meitner recurrió a la fórmula más célebre de la física contemporánea, $E=mc^2$, y calculó la energía que debía liberarse si un núcleo de uranio se partía en dos. La cifra era extraordinaria: alrededor de 200 millones de electronvoltios por núcleo. Esa cantidad de energía por átomo era miles de veces superior a la que podía obtenerse en

**TOMARON PRESTADO EL TÉRMINO
«FISIÓN» DE LA BIOLOGÍA, EN ANALOGÍA
CON LA DIVISIÓN CELULAR**



Arriba, curva de energía de enlace para varios isótopos relativamente comunes. A la izda., diagrama simple de fisión nuclear de un átomo de U-235.

cualquier reacción química convencional. El hallazgo superaba el ámbito teórico, puesto que también era un peligroso umbral tecnológico y militar.

Frisch y Meitner publicaron sus resultados en la revista *Nature* en enero de 1939. Mientras tanto, el artículo de Hahn, centrado exclusivamente en los aspectos químicos, ya había aparecido unas semanas antes en *Naturwissenschaften*, sin mención alguna al término «fisión» ni a la explicación física. A partir de ese momento, la reacción en cadena se convirtió en uno de los principales focos de investigación en física nuclear. Varios equipos en Estados Unidos, Reino Unido y Alemania confirmaron rápidamente los resultados. En cuestión de meses, se comprobó que los neutrones liberados en una fisión podían inducir nuevas fisiones en otros núcleos, haciendo posible la temida reacción en cadena.

LA RELACIÓN DE LISE CON LA CUÁNTICA

Para entender qué hizo Lise Meitner hay que mirar al núcleo atómico con ojos cuánticos. En los años treinta, varios físicos pensaban el núcleo como una «gota líquida»: una especie de diminuta gota que puede deformarse, vibrar y, si se estira demasiado, romperse. Su estabilidad depende de un tira y afloja entre dos fuerzas. Es decir, la «tensión superficial» que lo mantiene cohesionado y, por tanto, la repulsión eléctrica de sus protones, que empuja a separarlo. Esa imagen —la gota— fue el puente que permitió leer, con lenguaje cuántico, lo que de verdad ocurría dentro del uranio pesado.

En términos cuánticos, el núcleo es un sistema con niveles de energía. Cuando captura un neutrón puede quedar excitado; si la excitación supera una barrera de potencial —equilibrio entre fuerza nuclear y repulsión eléctrica— el núcleo pesado se deforma y se parte. No es un gesto mecánico, es un proceso probabilístico: la cuántica dicta con qué frecuencia sucede.

La medida clave es el defecto de masa: al reordenarse los nucleones cambia la energía de enlace y «falta» masa en el balance. Ese faltante se libera como energía de fisión del orden de cientos de MeV por núcleo. ■



Maria Goeppert- Mayer

LA ARQUITECTA
DEL NÚCLEO INVISIBLE

Maria Goeppert Mayer

Maria Goeppert nació el 28 de junio de 1906 en Kattowitz, entonces una ciudad del Imperio alemán y hoy perteneciente a Polonia. Fue hija única de Friedrich Goeppert, un médico universitario que creía firmemente en la educación de las mujeres, y de Maria Wolff, de familia acomodada y espíritu independiente. Cuando tenía cuatro años, la familia se trasladó a Gotinga, ciudad que décadas más tarde se convertiría en uno de los epicentros de la física teórica mundial. No fue una mudanza trivial, pues Gotinga era el lugar donde se respiraba ciencia con cada paso. Maria absorbió esa atmósfera sin saber que un día llegaría a ser una figura esencial de aquella comunidad.

Desde niña, su entorno estuvo dominado por libros, conversaciones científicas en casa y el ir y venir de académicos. Su padre le enseñó a pensar con precisión, a no conformarse con lo evidente y a cultivar la curiosidad con rigor. Durante la Primera Guerra Mundial, mientras Europa se desangraba, la pequeña Maria descubría los logaritmos en casa y jugaba con los números como quien dibuja. La guerra dejó en ella una conciencia aguda de la fragilidad de la vida, pero también del valor de perseguir lo esencial.



Iglesia de María en Kattowitz, hacia 1906, año del nacimiento de Maria Goeppert.

UNA MUJER EN TIERRA DE GIGANTES

En 1924, cuando accedió a la Universidad de Gotinga, Maria Goeppert ya había elegido el camino de las matemáticas, pero pronto la física comenzó a seducirla. Se encontró en un mundo dominado por hombres brillantes —Max Born, James Franck, Werner Heisenberg— y también por códigos tácitos que colocaban a las mujeres siempre en los márgenes. Ella eligió otra estrategia: no llamar la atención más de lo necesario, pero tampoco retroceder ni un paso.

Max Born fue su mentor, quien rápidamente reconoció en ella un talento poco común para las abstracciones físicas. Su tesis doctoral, defendida en 1930, trató

**ENTRE LOS AÑOS 30 Y 40 PUBLICÓ
ESTUDIOS RELEVANTES SOBRE TERMODINÁMICA,
QUÍMICA CUÁNTICA Y FÍSICA NUCLEAR**

sobre la absorción de dos fotones por parte de un átomo, un fenómeno puramente teórico en ese entonces, que décadas más tarde se convertiría en una técnica clave de la óptica cuántica. Maria tenía solo 24 años cuando la defendió y su trabajo quedó sepultado por la indiferencia del momento. De hecho, ni la técnica ni los instrumentos podían aún confirmar aquella intuición matemática. Su nombre apareció apenas como nota a pie de página en los manuales durante años, pero la idea ya estaba sembrada.

En ese mismo año, Maria se casó con el químico estadounidense Joseph Edward Mayer y emigró con él a los Estados Unidos. Comenzó entonces una etapa marcada por el desarraigo institucional y el desprecio sistémico a su talento. A pesar de estar casada con un profesor universitario, Maria no podía aspirar al mismo reconocimiento. En muchas universidades ni siquiera le permitían cobrar un salario o figurar como docente. Así trabajó, sin sueldo y sin plaza oficial, en Johns Hopkins, en Columbia y, más tarde, en la Universidad de Chicago. Su apellido crecía en prestigio gracias a su marido, pero su nombre propio seguía siendo una sombra.

Pero no se detuvo. Entre los años 30 y 40 publicó estudios relevantes sobre termodinámica, química cuántica y física nuclear. Se convirtió en colaboradora esencial del Instituto de Estudios Nucleares de Chicago y su colaboración con Enrico Fermi sería determinante en su posterior salto científico. A pesar de la discriminación constante, los físicos sabían que podían contar con ella cuando necesitaban claridad, intuición y precisión.

Durante la Segunda Guerra Mundial, Maria Goeppert-Mayer colaboró con el proyecto Manhattan, aunque siempre se mantuvo alejada de los aspectos más militares del desarrollo de la bomba atómica. Trabajó en el Laboratorio Nacional de Los Álamos en el cálculo de secciones eficaces de reacciones nucleares, una tarea compleja y esencial, pero su nombre no figuró entre los principales. Fue su primer puesto remunerado.

Ya terminada la guerra, en los años cincuenta, llegó su gran momento. En colaboración con Hans Jensen, propuso el modelo de capas nucleares, una estructura análoga a las capas electrónicas en los átomos, que explicaba por qué ciertos núcleos son particularmente estables.

TARDÍO PERO JUSTO: EL RECONOCIMIENTO

En 1963, Maria Goeppert-Mayer recibió el Premio Nobel de Física por el modelo de capas nucleares. Fue la segunda mujer en la historia en ganarlo, tras Marie



ASC / ARCHIVOS VISUALES AIP ENILIO SEGRE

Victor Weisskopf, Maria Goeppert-Mayer y Max Born en 1930.

LA ESTABILIDAD NUCLEAR DE LOS ELEMENTOS SEGUÍA UN PATRÓN DESCONCERTANTE



ALBUM



ASC

A la izda., Joseph Mayer and Maria Goeppert-Mayer en 1930. A la dcha., Robert Atkinson, Enrico Fermi y Maria Goeppert-Mayer en Ann Arbor, Michigan.

Dos fotones y la anticipación a la óptica cuántica

Aún más allá del modelo nuclear, el legado científico de Goeppert-Mayer incluye otro hallazgo de visión anticipatoria: la absorción de dos fotones por parte de un solo átomo. Esta idea, desarrollada en su tesis doctoral en 1930, fue puramente teórica durante décadas. Pero en 1961 se pudo verificar experimentalmente con el desarrollo de los primeros láseres. Hoy, este proceso se utiliza en microscopía no lineal, en técnicas de imagen biomédica y en óptica cuántica avanzada. Su nombre da título a la unidad de medida de la sección eficaz de absorción de dos fotones: el «Goeppert Mayer» (GM).

Esta capacidad de adelantarse a su tiempo —con intuiciones sólidas y fundamentos rigurosos— define la esencia de su trayectoria científica. No necesitó liderar grandes equipos ni construir laboratorios propios. Le bastaron un lápiz, una ecuación y una mente capaz de ver orden donde otros solo veían números.



María Goeppert-Mayer trabajando en la absorción de dos fotones.

ASC / DISCOVERY WET

Curie, y la única durante el siglo xx en lograrlo por una contribución exclusivamente teórica. Para entonces ya estaba enferma y apenas podía hablar o caminar con soltura. Subió al estrado en Estocolmo con la serenidad de quien sabe que el tiempo le ha dado, al fin, la razón. Maria Goeppert-Mayer murió el 20 de febrero de 1972 en San Diego, California, a los 65 años y a causa de un ataque al corazón. La universidad donde dio las últimas clases de su vida decidió poner su nombre al centro de física teórica.

LA ESTRUCTURA SECRETA DEL NÚCLEO: EL MODELO DE CAPAS

A mediados del siglo xx, la física nuclear aún presentaba uno de sus mayores enigmas: ¿por qué ciertos núcleos atómicos eran mucho más estables que otros? La tabla de los elementos mostraba regularidades químicas claras, pero la estabilidad nuclear seguía un patrón desconcertante. Algunos núcleos, con determinados números de protones y neutrones, mostraban una resistencia inesperada a la desintegración. Estos números «mágicos» —2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126— aparecían una y otra vez, como si existiera una arquitectura oculta que protegía a ciertos átomos del caos cuántico. Nadie sabía explicar por qué.

Los modelos disponibles hasta entonces, como el de la gota líquida propuesto por Niels Bohr, eran útiles para describir tendencias generales, pero eran incapaces de justificar esos casos concretos de estabilidad extrema. La idea de que el núcleo tuviera estructura interna —como la que se atribuía a los electrones en el átomo— era sugerente, pero no había forma clara de desarrollarla. Se necesitaba algo más que intuición: se requería una teoría con capacidad predictiva y sólida base matemática.

Fue en este contexto que Maria Goeppert-Mayer propuso, en 1949, una teoría que cambiaría por completo nuestra visión del núcleo atómico: el modelo de capas nucleares. Inspirándose en la estructura electrónica del átomo, Goeppert-Mayer planteó que también los nucleones —protones y neutrones— se distribuían en niveles de energía dentro del núcleo, ocupando capas definidas según reglas cuánticas estrictas. Al igual que los electrones llenan orbitales en la periferia del átomo, los nucleones se apilarían en niveles profundos, delimitados por una especie de «pozo potencial nuclear».



Maria Goeppert-Mayer (segunda por la derecha) con varios colegas en el comedor del Sarah Lawrence College de Yonkers, Nueva York, en 1943.

SU COLABORACIÓN CON HANS JENSEN FUE SERENA, ACADÉMICA, SIN CONFLICTOS DE AUTORÍA NI RIVALIDADES PERSONALES

La propuesta no era solo una analogía elegante, si es lo que puede parecer. Requirió resolver ecuaciones complejas que describieran el movimiento de un nucleón en el campo medio generado por todos los demás, con la incorporación de un término adicional. Hablamos del acoplamiento espín-órbita. Esta interacción entre el momento angular intrínseco de los nucleones y su movimiento dentro del núcleo explicaba por qué ciertas capas ofrecían una estabilidad excepcional al completarse.

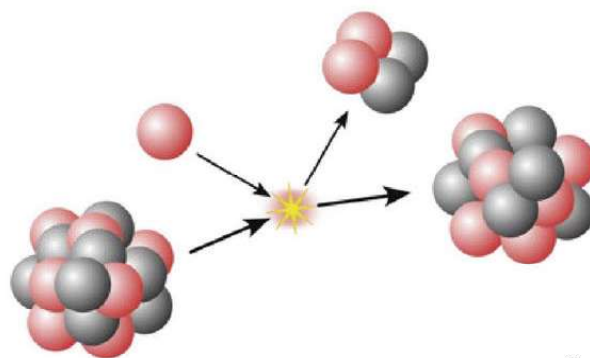
El modelo lograba lo que hasta entonces se consideraba inalcanzable, es decir, reproducía con precisión los números mágicos observados en la naturaleza. Y no solo eso, también permitía predecir las propiedades de núcleos desco-

nocidos, anticipar niveles de energía, isótopos más estables o desintegraciones improbables. La física nuclear dejaba de ser un catálogo de datos empíricos para convertirse en una teoría con capacidad estructuradora.

Pocos meses antes, de forma independiente, el físico alemán Hans Jensen había desarrollado una idea análoga en Heidelberg. Ambos fueron conscientes de la coincidencia y decidieron unir fuerzas. Publicaron juntos un libro en 1955 titulado *Teoría elemental del modelo nuclear de capas*, que consolidó el modelo y su aceptación internacional. Fue una colaboración serena, académica, sin conflictos de autoría ni rivalida-



ASC/WIKIPEDIA



ASC

Maria Goeppert-Mayer entrando en la ceremonia del Nobel con el rey Gustavo VI Adolfo de Suecia en 1963. A la dcha., representación gráfica de una reacción nuclear.



Del piano a los protones: física con oído estructural

Maria Goeppert-Mayer creció en un hogar donde la música era parte del día a día. Tocaba el piano desde niña y mantuvo ese hábito durante toda su vida. Aunque nunca fue una intérprete profesional, su sensibilidad musical dejó huella en su manera de pensar. La música le ofrecía algo más que consuelo: era un entrenamiento intuitivo para detectar estructuras, armonías internas y rupturas de simetría, las mismas cualidades que más tarde buscaría en los núcleos atómicos. Tocar el piano era para ella una forma de respirar.

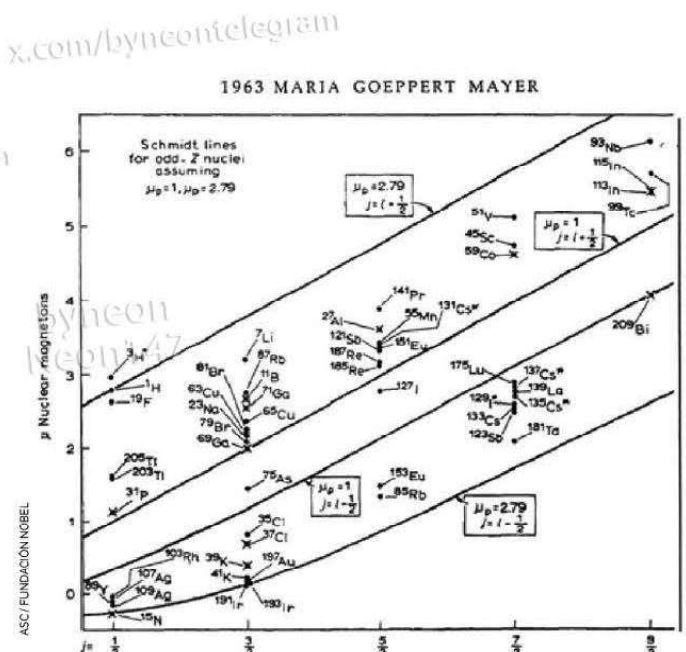
Muchos físicos teóricos —como Einstein, Planck o Heisenberg— compartieron esa familiaridad con la música, y no por casualidad. En ambos mundos, la clave está en identificar patrones ocultos y mantener una arquitectura interna sin verla directamente. Cuando Maria propuso su modelo de capas nucleares, estaba, en cierto modo, componiendo una partitura invisible, es decir, una secuencia de niveles energéticos, saltos, armonías y rupturas que explicaban la estabilidad del núcleo. Donde otros veían ruido estadístico, ella intuyó un orden subyacente. Como en una buena fuga de Bach.



Su familiaridad con la música le sirvió de entrenamiento para detectar estructuras y patrones internos.

des personales. Jensen, con honradez científica, reconocía que el mérito principal en la incorporación del espín orbital era de Maria. Y así lo admitió también el comité Nobel al conceder el premio a ambos en el año 1963.

La propuesta tuvo una acogida inicial cautelosa, pero pronto se convirtió en uno de los pilares de la física nuclear. Con el tiempo, permitió avanzar en campos como la astrofísica —por ejemplo, en la explicación de la nucleosíntesis estelar— y la física de partículas. Hoy, el modelo de capas nucleares sigue siendo parte central de los cursos de física, aunque complementado con modelos colectivos para explicar deformaciones y rotaciones del núcleo. ■



Goeppert-Mayer fue galardonada con el Premio Nobel de Física en 1963 por proponer el modelo de capas nucleares.

Richard Feynman

BONGO, PIZARRAS
Y DIAGRAMAS

Richard P. Feynman



Richard Phillips Feynman nació el 11 de mayo de 1918 en Far Rockaway, un vecindario de clase media en Queens, Nueva York. Hijo de Melville Feynman, un vendedor con alma de divulgador, y Lucille Phillips, una mujer culta y con gran sentido del humor, Feynman creció en un entorno que favorecía la curiosidad y el pensamiento crítico. Su padre le leía libros de ciencia antes de dormir y le enseñó desde muy pequeño a no dejarse impresionar por las apariencias. Le inculcó una idea que repetiría toda su vida: «Puedes saber el nombre de ese pájaro en todos los idiomas del mundo y, aun así, no sabrás nada sobre el pájaro. Aprendí muy pronto la diferencia entre conocer el nombre de algo y conocer ese algo».

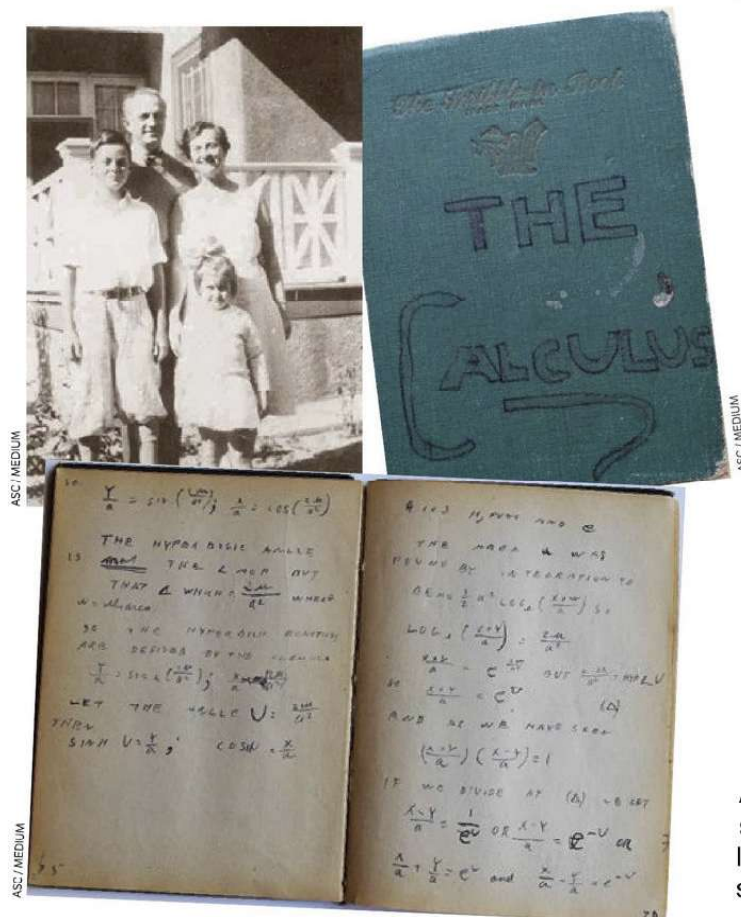
Esa actitud inquisitiva definió al joven Richard, que desde niño se entretenía desmontando radios, construyendo alarmas eléctricas y organizando pequeños laboratorios caseros. No era un niño prodigio al uso, sino más bien un entusiasta precoz de la lógica y los problemas bien planteados. En la escuela secundaria ya dominaba el cálculo diferencial y obtenía ingresos como reparador autodidacta de aparatos electrónicos.

LA FÍSICA COMO FORMA DE VIDA

Tras ingresar en el MIT en 1935, donde cursó cuatro años hasta 1939, Feynman comenzó a perfilar su estilo directo y antirreduccionista. Se formó como físico teórico y pronto destacó por su manera poco convencional de abordar los proble-

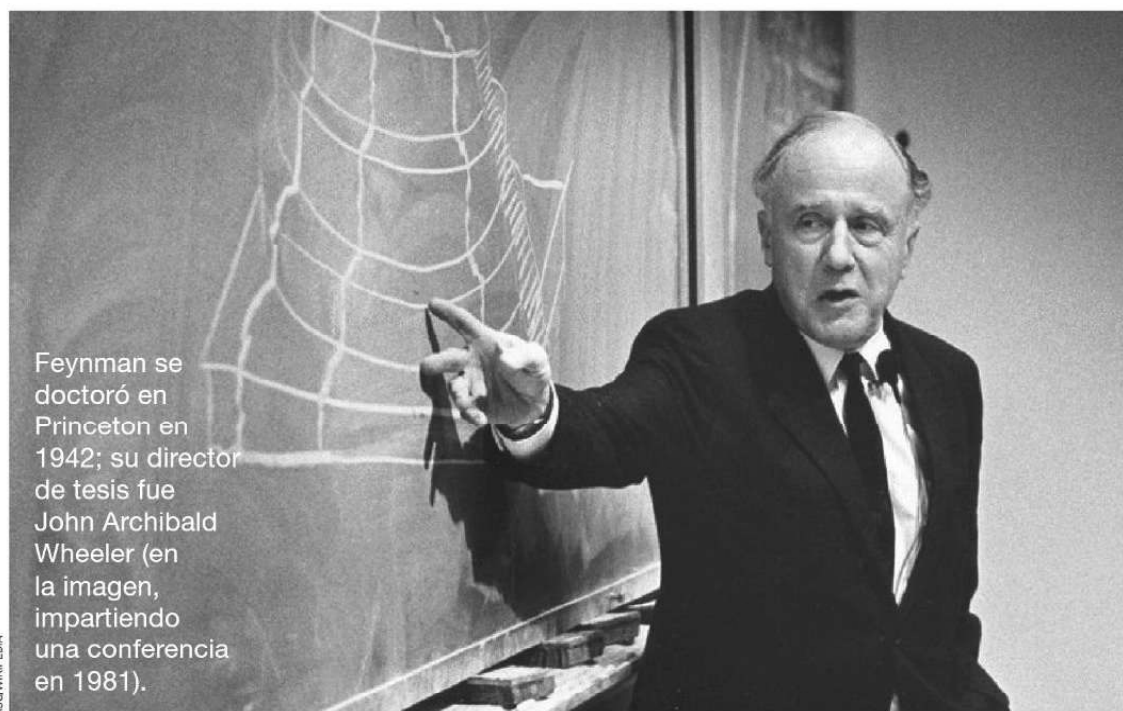
mas. Mientras otros compañeros se limitaban a repetir fórmulas, él se preguntaba si realmente entendían lo que hacían. Esa exigencia conceptual lo acompañaría siempre. Durante su etapa en Princeton, bajo la tutela de John Archibald Wheeler, empezó a trabajar en los primeros modelos cuánticos de la electrodinámica, buscando una formulación libre de las infinitudes que aquejaban a la teoría.

En 1942, cuando Estados Unidos entró en la Segunda Guerra Mundial, Feynman fue reclutado para trabajar en el Proyecto Manhattan, donde compartió laboratorio con



Arriba, a la izquierda, Feynman con su familia. A la derecha y abajo, su libro de cálculo de la escuela de secundaria, alrededor de 1930.

CUANDO EE. UU. ENTRÓ EN LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, FEYNMAN FUE RECLUTADO PARA TRABAJAR EN EL PROYECTO MANHATTAN



Hans Bethe y Enrico Fermi. Tenía solo 24 años, pero ya era reconocido por su agilidad mental y su desparpajo. En Los Álamos, además de contribuir a los cálculos sobre la implosión del núcleo, se ganó una fama casi legendaria por su costumbre de abrir cajas fuertes y retar las normas de seguridad del complejo. No lo hacía por imprudencia, sino como un juego intelectual. Desconfiaba de los procedimientos automáticos, incluso en plena guerra.

Después del conflicto, Feynman rechazó puestos en universidades prestigiosas para quedarse en Cornell, donde encontró un entorno más informal. Allí comenzó a gestarse su etapa más productiva. No le gustaba escribir artículos, prefería pensar con lápiz y papel o con la voz en alto, explicando en pizarras a quien quisiera escuchar. No era un orador solemne, de hecho sus clases estaban llenas de metáforas inesperadas, dibujos, preguntas originales y algún chiste bien colocado.

En los años cincuenta se trasladó al Caltech, donde permanecería hasta el final de su vida. Allí consolidó su estilo como profesor icónico. Su curso de introducción a la física —conocido como Conferencias Feynman sobre Física— se convirtió en un clásico inmediato. No se trataba solo de enseñar fórmulas, pues su objetivo era contagiar el placer de pensar. En sus propias palabras: «Si no puedo construirlo, no lo entiendo», como dicen que dejó escrito en su pizarra antes de fallecer.

Aunque se negaba a dar clases para no científicos, acabó siendo una figura mediática. Apareció en televisión, grabó entrevistas inolvidables y hasta colaboró con artistas. Tocaba los bongos, aprendía idiomas por afición, dibujaba mujeres desnudas

EN LOS AÑOS OCHENTA PARTICIPÓ EN LA COMISIÓN QUE INVESTIGÓ EL DESASTRE DEL TRANSBORDADOR CHALLENGER

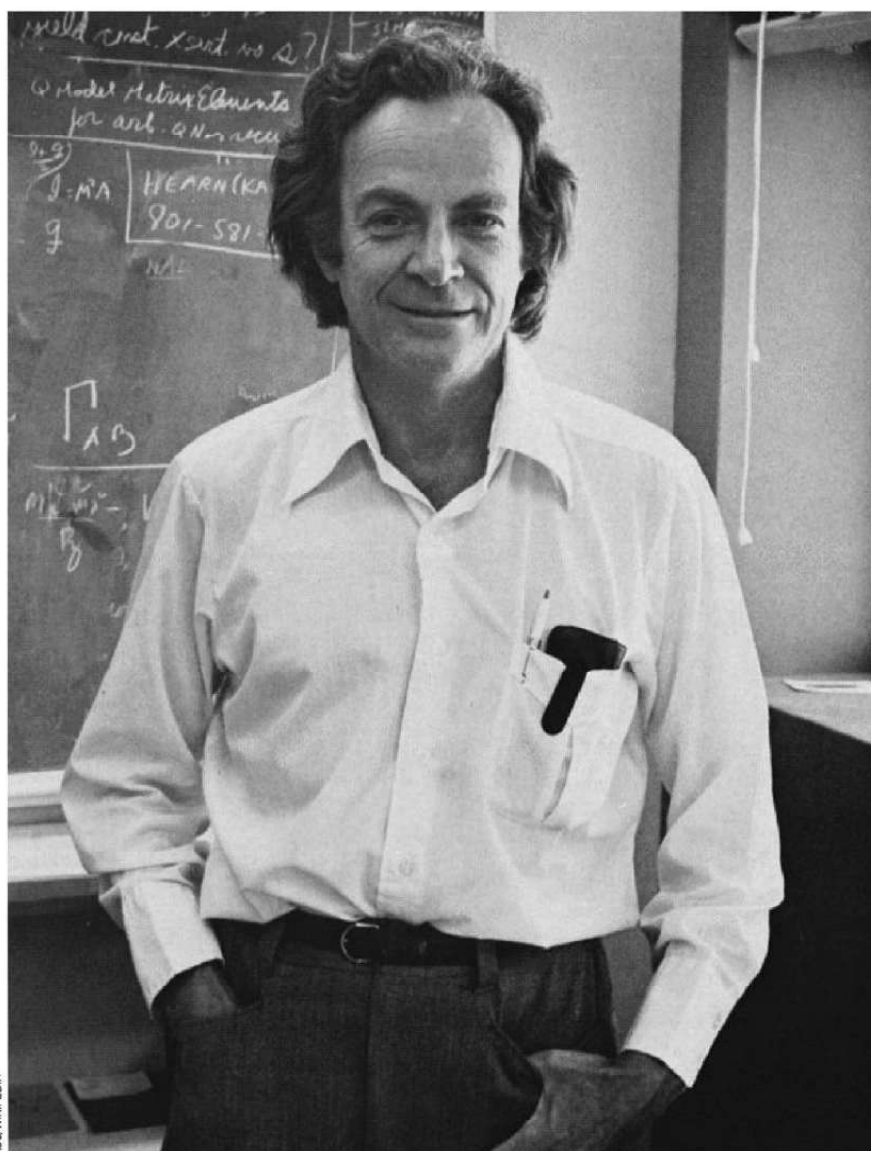
y se sentía tan cómodo en un bar como en un simposio de física. Esa versatilidad desconcertaba a algunos colegas, que lo veían demasiado informal para ser tomado en serio. Pero nadie cuestionaba su talento.

UNA VIDA HECHA DE PÉRDIDAS Y ENTUSIASMO

Su primera esposa, Arline Greenbaum, falleció de tuberculosis poco después de casarse, mientras él trabajaba en Los Álamos. Feynman la visitaba a diario y le escribía cartas incluso después de su muerte. Esa pérdida temprana marcó su carácter con una mezcla extraña de ligereza y profundidad. Nunca dejó de bromear ni de buscar belleza en lo cotidiano, pero sus escritos más personales revelan una melancolía apenas disimulada.



Feynman (segunda fila, en el centro) en una reunión del Proyecto Manhattan en Los Alamos, 1945.



Richard Feynman en la Universidad Cornell, en 1988.

Tras el divorcio de su segunda mujer, tuvo dos hijos con Gweneth Howarth, su tercera esposa, Carl Richard y Michelle Catherine (adoptada en 1968). Disfrutaron de una vida familiar sencilla en Pasadena y llegó a adquirir una casa en la playa con parte de los 55 000 dólares del premio Nobel. Aceptó el Nobel de 1965 sin solemnidad —era notoria su aversión a los honores— y siguió reivindicando la alegría de «descubrir cómo funcionan las cosas».

En los años ochenta participó en la comisión que investigó el desastre del transbordador Challenger. Fue el primero en señalar que el fallo técnico había sido ocultado por la burocracia de la NASA. Lo hizo con una demostración simple, sumergiendo una junta tórica en un vaso de agua helada. «Para una tecnología exitosa —escribió en el informe— la realidad debe tener prioridad sobre las relaciones públicas.»

Richard Feynman murió de cáncer el 15 de febrero de 1988, a los 69 años. Sus últimas palabras fueron: «No me gustaría morir dos veces. Es tan aburrido». Con él se fue uno de los espíritus más libres, irreverentes y brillantes que haya conocido nunca antes la física.



Los tambores del átomo

Cuando Richard Feynman tocaba los bongos en alguna playa de California o en su propia casa de Pasadena, no estaba descansando de la física: estaba practicándola por otros medios. Aprendió percusión afrocubana durante sus viajes a Brasil, donde pasó un verano dando clases y disfrutando de la vida bohemia. Para él, el ritmo no era un pasatiempo exótico, sino una forma de pensamiento. Golpear el cuero tenso con las manos era tan natural como resolver una ecuación o bosquejar un diagrama. Feynman veía patrones por todas partes —en el sonido, en el movimiento, en las vibraciones de un sistema—,

y creía que cualquier manifestación de la naturaleza podía ser entendida como una danza de elementos simples. Los bongos eran su forma de recordar que la ciencia, como la música, se construye sobre repeticiones, variaciones y silencios significativos. Así comenzaban sus Conferencias: «Es curioso, pero en las pocas ocasiones en que me han pedido tocar los bongos en un acto formal, el presentador nunca considera necesario mencionar que también hago física teórica».

UN NUEVO LENGUAJE PARA LA TEORÍA CUÁNTICA

Richard Feynman transformó radicalmente la física con una herramienta tan simple como poderosa: los llamados «diagramas de Feynman». No se trataba de una mera forma de dibujar átomos, sino de una nueva forma de pensar y calcular los procesos que suceden a nivel subatómico. Su aportación no fue solo técnica, fue conceptual, pues convirtió los fenómenos complejos de la electrodinámica cuántica en algo visualmente comprensible y matemáticamente manejable.

La electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés) describe cómo interactúan la luz y la materia a través de los fotones y las partículas cargadas. A mediados del siglo xx, esta teoría estaba empantanada en paradoja, los cálculos daban resultados infinitos, absurdos. Feynman propuso un método completamente distinto para abordarla. En vez de trabajar con ecuaciones diferenciales formales, imaginó que una partícula podía tomar todos los caminos posibles entre dos puntos, y que cada uno de esos caminos contribuía con cierta probabilidad al resultado final.

Este enfoque, conocido como «integral de caminos», no solo rescató la QED del caos matemático, sino que abrió un nuevo horizonte para la física teórica. Su base era sencilla en apariencia: para cualquier fenómeno, se suman las contribuciones de todos los posibles caminos, cada uno con su propia «fase cuántica». Esa idea, derivada de los principios de Dirac y del viejo principio de mínima acción de la mecánica clásica, se convirtió desde entonces en una de las piedras angulares de la física moderna.



GETTY

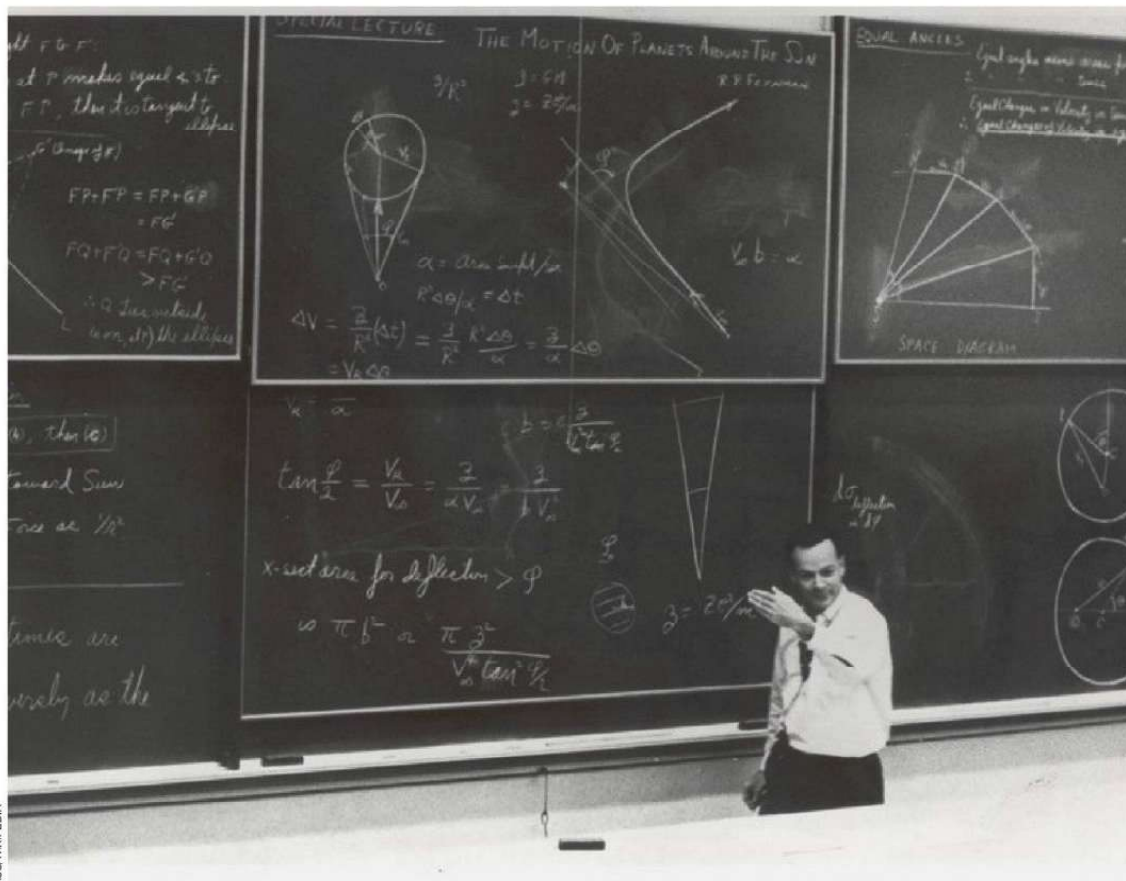


ASC/WIKIPEDIA



ASC/WIKIPEDIA

Arriba, Richard Feynman con su esposa Gweneth en el Baile Nobel, el 10 de diciembre de 1965, tras recibir el premio Nobel de Física; sobre estas líneas, la tumba de ambos en Altadena, California. A la izda., el desastre del Challenger en 1986, cuya causa Feynman ayudó a esclarecer.



Richard Feynman durante la conferencia especial «El movimiento de los planetas alrededor del Sol», el 13 de marzo de 1964 en Caltech.

El ingenio de Feynman fue traducir su método a un lenguaje gráfico. En un diagrama de Feynman, una línea representa una partícula, un vértice representa una interacción y el tiempo fluye hacia la derecha o hacia arriba, según la convención. Con ese sistema, era posible representar procesos complejos —como la emisión de un fotón, la aniquilación de un electrón y un positrón, o la dispersión entre dos partículas cargadas— mediante dibujos comprensibles que a la vez se traducían directamente en reglas matemáticas.

Lo más revolucionario fue que estos esquemas permitían calcular sin errores procesos que antes llevaban páginas enteras de operaciones. Los físicos podían «ver» lo que ocurría. El propio Feynman decía que el diagrama no solo era una herramienta útil, sino una forma de entender. Era tan intuitivo que pronto se generalizó a otras áreas: desde la física de partículas hasta la teoría de campos en sólidos, pasando por la cromodinámica cuántica y la física del estado sólido. Incluso hoy, en plena era digital, los diagramas de Feynman siguen siendo una herramienta esencial en cualquier curso de física avanzada.

MÁS ALLÁ DEL ELECTRÓN: POSITRONES, GLUONES Y CUERDAS

Feynman no se conformó con aplicar su método a un solo campo. Estaba más interesado en explorar sus límites que en repetir éxitos. En los años cincuenta, trabajó con átomos de helio superfluido, con núcleos pesados y con partículas elementales

El físico que abría cajas fuertes

En el laboratorio secreto de Los Álamos, donde se diseñaba la bomba atómica entre fórmulas y tensiones de guerra, Richard Feynman desarrolló una habilidad, cuanto menos, curiosa: abrir cajas fuertes. No lo hacía por malicia ni por vanidad, sino para demostrar que la seguridad de los documentos clasificados estaba plagada de errores humanos. Observador implacable, Feynman notó que muchos científicos usaban combinaciones triviales —como fechas de cumpleaños— o las dejaban escritas en cajones cercanos. Aprendió a escuchar los clics de las cerraduras, a detectar el desgaste en los diales y a deducir patrones por pura lógica. Una vez, logró abrir la caja fuerte de su superior, el general Leslie Groves, y dejó dentro una nota firmada con su nombre. En otra ocasión, vació una carpeta secreta solo para demostrar que nadie notaba su ausencia. No robó nada, no difundió información, pues solo quería que entendieran que una combinación mecánica no es defensa suficiente contra una mente que pregunta.

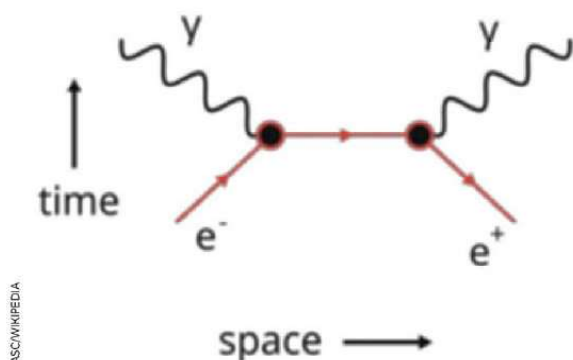


Diagrama de Feynman para la aniquilación de un electrón y un positrón.

recién descubiertas. Participó en el desarrollo temprano de lo que más tarde sería la teoría de quarks y gluones, y exploró caminos alternativos como la gravitación cuántica o la teoría de la matriz S.

En sus últimos años, observó con escepticismo la creciente formalización de la física teórica, especialmente en torno a la teoría de cuerdas. Aunque llegó a dar algunas conferencias sobre el tema, le parecía demasiado alejada de la realidad

experimental. Algunas fuentes le atribuyen una frase que resumía su forma de entender la ciencia: «Puedo vivir con la duda, la incertidumbre y el no saber... Es mucho más interesante vivir sin saber que tener respuestas que quizá sean falsas». Esa fidelidad al dato empírico y al pensamiento claro lo mantuvo alejado de modas, aunque no de ideas audaces. En esta línea, su filosofía científica podría resumirse en una frase que repetía a menudo: «No tienes que engañarte a ti mismo, y tú eres la persona más fácil de engañar.» En ese espíritu, su obra no fue un sistema cerrado, sino una actitud: mirar el mundo sin adornos, con rigor y asombro.

Además de sus logros técnicos, Feynman transformó la manera de enseñar física. En sus Conferencias abordó todos los temas clásicos —mecánica, electromagnetismo, termodinámica, física cuántica— con un enfoque renovador. No le interesaba que los estudiantes memorizaran, sino que comprendieran. Para ello, no dudaba en sacrificar el formalismo en favor de la intuición.

Sus textos son todavía hoy una referencia por su claridad y originalidad. Explicaba cualquier principio complejo con analogías y materiales cercanos al estudiante. Algunos colegas lo criticaron por trivializar conceptos profundos. Pero Feynman creía que lo realmente profundo no necesitaba solemnidad. ■



Julian Schwinger

VIRTUOSISMO CALLADO
DE LA ELECTRODINÁMICA

A handwritten signature of Julian Schwinger in black ink, featuring a stylized, cursive script with a long horizontal flourish at the end.



ASC/WIKIPEDIA

Arriba, Isidor Rabi, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1944. A la dcha., Julian Schwinger en Harvard, donde impartió clases entre 1945 y 1974.



ASC / ARCHIVOS ENILIO SEGRE

Julian Schwinger nació el 12 de febrero de 1918 en Nueva York, en el seno de una familia de inmigrantes judíos procedentes de Polonia. Desde muy joven demostró, con una discreción casi metódica, un talento extraordinario para las matemáticas y la física. A los dieciséis años publicó su primer artículo de física y, poco después, hacia los diecinueve, ya tenía varios trabajos completos publicados en *Physical Review*, junto a cartas a la revista a los diecisiete. No fue un niño prodigio mediático, sino un estudiante silencioso y perseverante, que encontraba en los libros más consuelo que en la conversación con sus coetáneos.

Su formación académica fue tan acelerada como irregular. Comenzó los estudios de pregrado en el City College of New York en 1934, pero su dedicación exclusiva a la física y las matemáticas le llevó a descuidar otras asignaturas. Gracias a la intervención de Isidor Rabi, fue transferido a Columbia al año siguiente, lo que marcó el despegue definitivo de su carrera. Rabi, que ya había recibido el Nobel, intuyó enseguida el talento de aquel joven escueto y reservado, capaz de resolver problemas con una precisión matemática inusual. Fue también quien se ocupó de que Schwinger terminara sus estudios, ya que el joven tenía por costumbre ausentarse de clases y no prestar atención a la burocracia académica. Solo los resultados le importaban, y eran espectaculares.

LOS AÑOS DE LA GUERRA Y EL ASCENSO SILENCIOSO

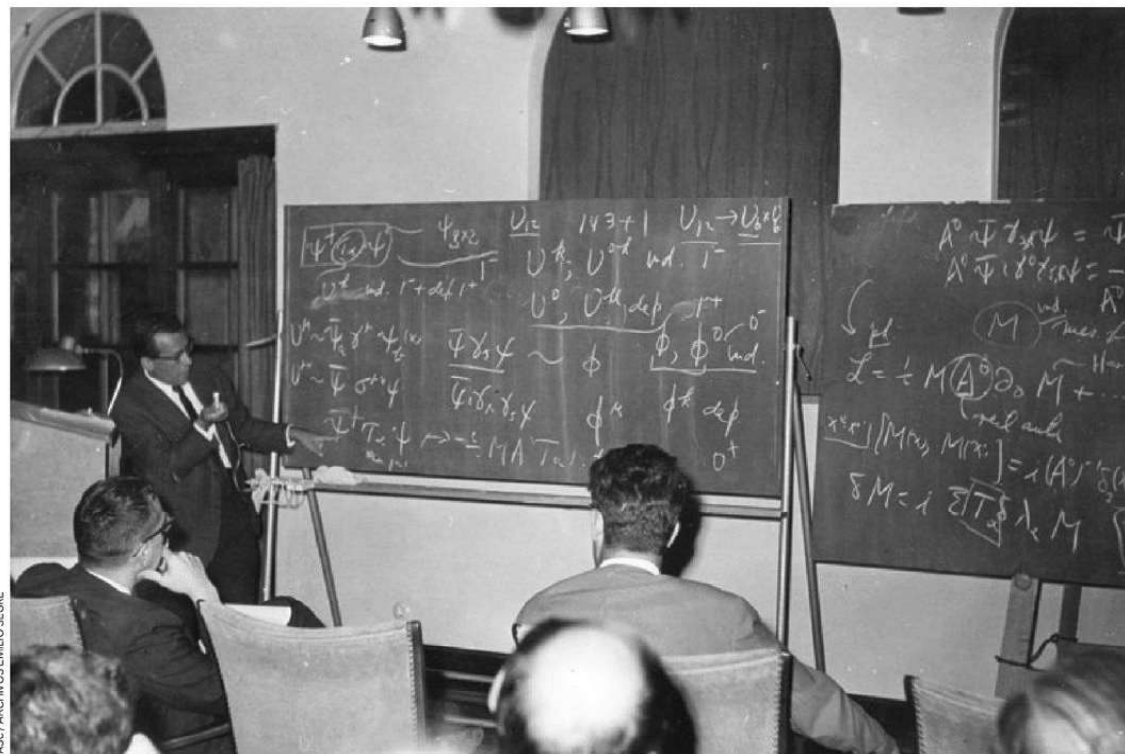
Durante la Segunda Guerra Mundial, Schwinger trabajó en el Laboratorio de Radiación del MIT, desarrollando sistemas de radar para el ejército. En ese entorno técnico y orientado a la solución de problemas prácticos, desplegó una intuición

DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, SCHWINGER DESARROLLÓ SISTEMAS DE RADAR PARA EL EJÉRCITO

física brillante, que más adelante aplicaría a la formulación rigurosa de la electrodinámica cuántica. La guerra no interrumpió su carrera científica. Todo lo contrario, la aceleró. En 1945, con apenas 27 años, ya era profesor en Harvard y comenzaba a atraer a estudiantes de talento como Sheldon Glashow, Walter Gilbert o Benjamin Roy Mottelson, todos ellos futuros premios Nobel.

Pese a estar rodeado de discípulos brillantes, Schwinger seguía siendo una figura esquiwa. Rehuía el contacto social más allá del aula y se sentía incómodo en congresos y eventos científicos. Prefería trabajar de noche, cuando el campus estaba vacío. Durante décadas, su despacho fue un faro silencioso de productividad teórica: entraba al atardecer con una tiza en la mano y salía de madrugada tras haber llenado varias pizarras. Muchos de sus alumnos recuerdan cómo escribía ecuaciones sin necesidad de corregir, como si las soluciones se le aparecieran completas desde el principio.

En 1965, Schwinger compartió el Premio Nobel de Física con Richard Feynman y Sin-Itiro Tomonaga, por sus contribuciones independientes pero complementarias a la electrodinámica cuántica. Aunque el trío representaba el pináculo de una generación, sus estilos eran radicalmente distintos. Tomonaga, japonés y meticuloso, había desarrollado su teoría en condiciones de aislamiento extremo durante la guerra. Feynman, expansivo y carismático, se convirtió en un icono de la divulgación



Julian Schwinger fue profesor de física en varias universidades.



ASC / ARCHIVOS EMILIO SEGRE

Schwinger recibiendo el Premio Nobel de Física en 1965.

científica. Schwinger, por su parte, rehuyó los focos y asistió a la ceremonia del Nobel con la misma contención con la que se sentaba cada día frente a una pizarra. Para él, el reconocimiento era un trámite, no un triunfo.

Con el tiempo, su estilo metódico y su adhesión a técnicas de cálculo formales comenzaron a parecer anticuados frente al enfoque más intuitivo y gráfico de Feynman. Sin embargo, su rigor permanecía intacto. Nunca le preocupó ser popular ni deseaba imponer su visión, simplemente seguía su camino. Abandonó Harvard en 1971 y se incorporó a Universidad de Cali-

fornia en Los Ángeles (UCLA) poco después (nombrado University Professor en 1972), donde continuó una línea de trabajo más solitaria y heterodoxa.

UN LEGADO QUE NO BUSCÓ POSTERIDAD

En sus últimos años, Schwinger centró su atención en temas poco convencionales: la teoría de campos sin necesidad de partículas, nuevas formulaciones de la electrodinámica e incluso ciertos aspectos marginales de la energía de punto cero. A menudo fue criticado por adentrarse en caminos especulativos, pero nunca dejó de trabajar con la misma intensidad que en su juventud. Murió el 16 de julio de 1994, a los 76 años, a causa de un cáncer de páncreas.



ASC / ARCHIVOS EMILIO SEGRE

Schwinger (primera fila, tercero por la izda.) con muchos de sus estudiantes de doctorado.

El primer físico teórico frente a las cámaras

A mediados de los años 50, Julian Schwinger participó en un experimento educativo singular: impartir clases de física teórica avanzada ante las cámaras de la televisión pública WGBH-TV, en Boston. Aquellas grabaciones, dirigidas a estudiantes universitarios de Harvard y el MIT, formaban parte de una iniciativa pionera de enseñanza científica a distancia financiada por la Fundación Ford. No era divulgación para el gran público, sino docencia rigurosa, con ecuaciones en pizarra y lenguaje técnico.

Schwinger abordaba temas como mecánica cuántica, electrodinámica o relatividad con la misma sobriedad con la que los trataba en el aula. Vestido con chaqueta oscura, sin concesiones al espectáculo, hablaba sin apuntes durante casi una hora, desplegando su característico hilo lógico ininterrumpido. Fue uno de los primeros físicos teóricos de prestigio internacional que aceptó este formato, en un momento en que la televisión aún no era considerada una herramienta seria para la ciencia. Aquel experimento abrió un camino que más tarde seguirían otros gigantes como Richard Feynman o Carl Sagan, ya con un tono más divulgativo.



Pocos físicos han alcanzado el nivel de formalismo técnico que Schwinger desplegaba con naturalidad. Su estilo no era brillante en el sentido teatral del término, pero poseía una profundidad y una coherencia que lo hicieron imprescindible. En cierto modo, fue el último gran físico de pizarra, un artista del cálculo riguroso y del detalle matemático. Nunca buscó formar escuela, y sin embargo dejó tras de sí una generación de discípulos deslumbrantes. Tal vez ese sea uno de sus mayores legados.

UNA ELECTRODINÁMICA SIN FISURAS

En la historia de la física, pocas teorías han exigido tanta precisión matemática

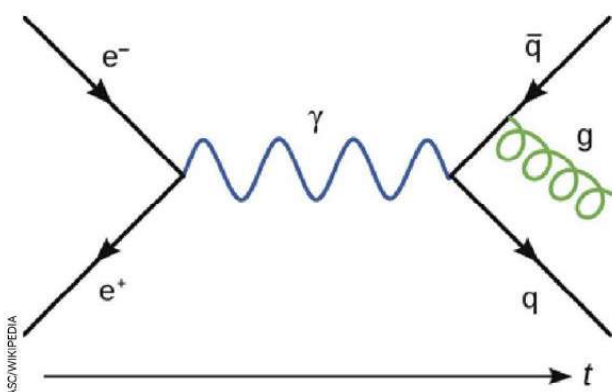


Diagrama de Feynman de la radiación de un gluon.

como la electrodinámica cuántica (QED). Y pocos físicos han sido tan precisos como Julian Schwinger. Mientras que otros buscaban intuiciones gráficas o caminos alternativos, él construyó una formulación rigurosa, basada en operadores y relaciones de conmutación, que ofrecía resultados impecables. Su aportación más decisiva fue lograr una versión completa y renormalizada de la QED, capaz de explicar

con exactitud cómo interactúan las partículas cargadas con los campos electromagnéticos en el marco de la mecánica cuántica relativista. Renormalizar, en esencia, consiste en absorber los infinitos que aparecen en los cálculos mediante una redefinición de unas pocas constantes físicas (como la masa y la carga), de modo que las predicciones resulten finitas y comparables con el experimento.

Antes de Schwinger, la electrodinámica cuántica era un territorio plagado de infinitos mal definidos. Los cálculos conducían a absurdos matemáticos cuando se intentaban incorporar efectos como la autointeracción de los electrones o las correcciones del vacío. El reto no era «unir» relatividad y mecánica cuántica —esa unión ya existía—, sino conseguir una teoría de campos relativista y gauge con predicciones finitas, es decir, un esquema de renormalización coherente que domara los infinitos sin perder la consistencia física.

EL MOMENTO MAGNÉTICO DEL ELECTRÓN: UNA HAZAÑA TÉCNICA

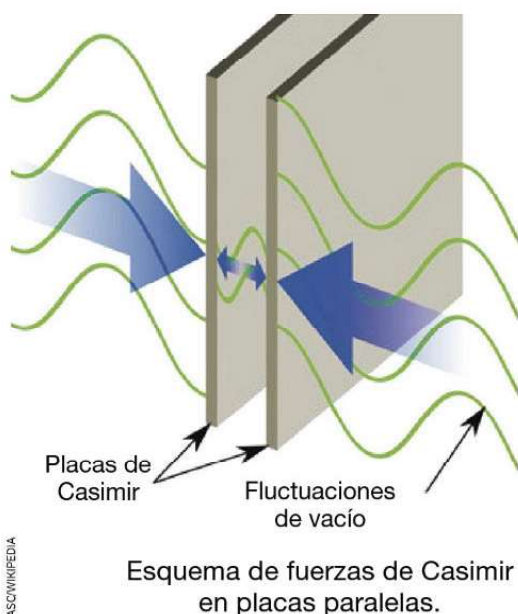
Uno de los mayores logros de Schwinger fue su cálculo del momento magnético anómalo del electrón, una cantidad que describe la pequeña desviación del valor esperado del espín debido a los efectos cuánticos del vacío. El resultado fue: $a = \alpha/2\pi$, donde α es la constante de estructura fina. Este valor, publicado en 1948, coincidía de forma extraordinaria con las mediciones experimentales disponibles y sigue siendo, a día de hoy, una de las predicciones más precisas de toda la física. Su lápida, en el cementerio de Mount Auburn, muestra esta fórmula a modo de recordatorio.

El «factor Schwinger» pasó a ser una firma de exactitud, y marcó un hito en la capacidad predictiva de la teoría cuántica de campos. Lo notable no era solo el resultado, sino el camino. Schwinger lo obtuvo sin recurrir a los diagramas de Feynman, sino mediante integrales complicadas, propagadores y álgebras de operadores que desarrolló casi en solitario.

La electrodinámica cuántica fue solo el principio. Schwinger amplió su enfoque a una teoría general de campos cuánticos, buscando un lenguaje que no depen-

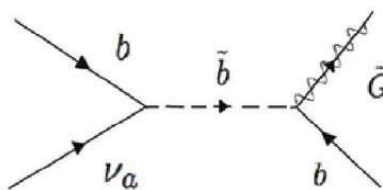
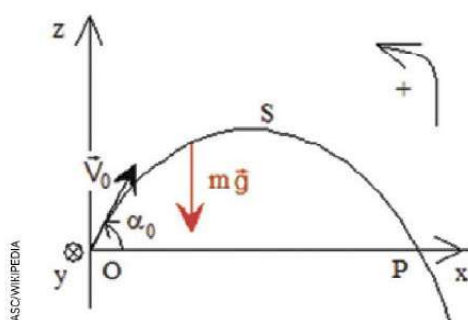
diera de imágenes intuitivas, sino de estructuras algebraicas robustas. Su formalismo —a menudo calificado de «pesado» pero fértil— sirvió para sentar las bases de otros desarrollos posteriores en física de partículas y teoría de campos. Introdujo el concepto de fuentes externas para generar funciones de correlación, lo que más tarde se conocería como el método funcional de Schwinger o el enfoque del «accion funcional generador», hoy omnipresente en el cálculo de funciones de Green.

Otra de sus innovaciones fue la formulación del «formalismo *in-out*» (también llamado formalismo de Schwinger–DeWitt), fundamental para el tratamiento de procesos de dispersión y decaimiento en mecánica cuántica. También abordó la teoría de campos en espacios curvos,



¿Qué es la ecuación de Rarita–Schwinger?

La ecuación de Rarita–Schwinger describe, en lenguaje relativista, cómo debería comportarse un fermión de espín 3/2, una categoría más «alta» que la del electrón (espín 1/2). La propusieron William Rarita y Julian Schwinger en 1941 y hoy se usa como marco teórico para dos casos típicos: los bariones Δ (que son compuestos) y el gravitino, la partícula hipotética de las teorías de supergravedad. En su versión sin masa exhibe una simetría de tipo «gauge» que coincide con la supersimetría local, justo la que convierte al gravitino en el candidato natural para esta ecuación. El gran reto histórico es que, al acoplarla de forma mínima a un campo electromagnético, pueden aparecer soluciones «acausales» (ondas que irían más rápido que la luz), un problema señalado por Velo y Zwanziger y que en supergravedades extendidas puede resolverse gracias a la propia supersimetría. A día de hoy no se ha observado ninguna partícula elemental de espín 3/2, pero la ecuación es clave como puente entre campos cuánticos, espines altos y supergravedad.



De izda. a dcha., ejemplo de ecuación de movimiento y diagrama de Feynman del proceso de difusión de gravitinos.

el efecto Casimir y el análisis de propagadores en condiciones no triviales. Su trabajo anticipó, en cierto modo, ideas que se volverían centrales en las décadas siguientes, aunque sin la popularidad mediática de sus contemporáneos.

DISIDENTE EN SU PROPIA REVOLUCIÓN

A medida que la física teórica se fue desplazando hacia caminos más especulativos —la simetría gauge, las teorías de gran unificación, la cromodinámica cuántica, las cuerdas—, Schwinger adoptó una postura escéptica. Aunque respetaba la elegancia formal de las nuevas propuestas, prefería aferrarse a una física basada en observables y estructuras sólidas. En sus últimos años propuso una reformulación fenomenológica, la teoría de fuentes (*source theory*), que evitaba el uso central de partículas virtuales y ponía el acento en amplitudes construidas a partir de procesos observables. Pese a su coherencia interna, tuvo una recepción fría y quedó como una línea minoritaria. De hecho, fueron las críticas a esta teoría las que lo empujaron a abandonar Harvard.

Su desencuentro con la comunidad fue también epistemológico. Desconfiaba de las simplificaciones didácticas —como los diagramas de Feynman— porque creía que podían ocultar las verdaderas raíces matemáticas de los fenómenos. Para él, la belleza de la física residía en la exactitud, no en la metáfora. Su obra no buscaba seducir, sino convencer. ■

Freeman Dyson

EL TEJEDOR DE MUNDOS
Y ECUACIONES

Freeman Dyson



Freeman John Dyson nació el 15 de diciembre de 1923 en Crowthorne, un pequeño pueblo del sur de Inglaterra. Su padre, George Dyson, era un compositor reconocido, y su madre, Mildred Atkey, una abogada formada en Cambridge que renunció a ejercer para dedicarse a la familia. La casa de los Dyson estaba impregnada de cultura, música y libros. Desde muy pequeño, Freeman mostró una fascinación precoz por las matemáticas —a los cuatro años intentó calcular cuántos átomos tenía el Sol— y ya en primaria destacaba por su cálculo. Con doce años ganó la beca a Winchester, donde un maestro de geometría, Daniel Pedoe, le dio lecturas y problemas avanzados que lo llevaron más allá del temario. No jugaba al fútbol ni perseguía aventuras, su pasatiempo favorito era multiplicar fracciones con lápiz y papel mientras escuchaba a su padre tocar el piano.

ASC/THE MARGNALIAN



Freeman Dyson a los 10 años de edad. Su infancia estuvo rodeada de libros y música.

Estudió en Winchester College, un internado de alta exigencia académica en el que los alumnos compiten por becas de mérito y una formación muy orientada a las ciencias y las humanidades. Dyson no tardó en destacar en matemáticas, de hecho, sus profesores comenzaron a encargarle problemas adicionales y lecturas de geometría que iban más allá del temario común. Él respondía con soltura y una curiosidad inagotable. En ese ambiente de trabajo riguroso, la disciplina de demostrar —no solo calcular— y el gusto por las estructuras elegantes consolidaron su vocación. La sensación de orden que encontraba en los números y en las figuras, junto al hábito de enfrentarse a problemas cada vez más difíciles, lo encaminó sin ambages hacia los estudios superiores en Cambridge.

ENTRE BOMBARDEROS Y ECUACIONES

Cuando estalló la Segunda Guerra Mundial, Dyson tenía apenas 16 años. Su ingreso en la Universidad de Cambridge fue pospuesto, pero eso no detuvo su ascenso intelectual. Mientras otros combatían en el frente, él fue destinado al Royal Air Force Bomber Command, donde trabajó como estadístico. Desde una oficina en el norte de Inglaterra, calculaba trayectorias, optimizaba rutas y mejoraba la eficacia de los bombardeos aliados. No empuñó un arma, pero sí lidió con el horror desde las cifras. Sus análisis mostraron que muchas misiones eran suicidas, que los aviones eran enviados al matadero por un sistema logístico ciego. Dyson propuso soluciones prácticas, más seguras y eficientes, pero casi nadie lo escuchó. Años después, esa experiencia marcaría su escepticismo hacia las instituciones rígidas y su des-

EL INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS DE PRINCETON, DONDE EINSTEIN TENÍA SU OFICINA, LO ACOGIÓ COMO INVESTIGADOR PERMANENTE

confianza frente al poder militar. La guerra le enseñó que la lógica puede ser inútil si choca con la inercia de los sistemas.

Tras el conflicto, finalmente pudo ingresar en el Trinity College de Cambridge. Allí fue alumno de Paul Dirac y Harold Davenport, aunque Dyson prefería investigar por su cuenta. Terminó sus estudios en dos años y obtuvo una beca para Princeton, en Estados Unidos. El joven inglés cruzaba el Atlántico para desembarcar, sin saberlo, en el centro neurálgico de la revolución cuántica.

Allí coincidió con Einstein y Gödel en el Instituto de Estudios Avanzados —al primero lo admiró desde la distancia y del segundo dejó testimonios—; su relación científica más estrecha fue con Richard Feynman en 1948-49, y años después colaboró con Edward Teller en proyectos como el reactor TRIGA y el programa Orion.

Sorprendentemente, nunca realizó un doctorado. No lo necesitó. El Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde Einstein tenía su oficina, lo acogió como investigador permanente. Era la consagración precoz de un talento inclasificable. Dyson podía conversar con físicos de partículas por la mañana, resolver ecuaciones con matemáticos por la tarde y discutir teología con un historiador al caer la noche. Su mente era, como le gustaba decir, un cruce de caminos.

A partir de los años 50, Dyson expandió sus intereses más allá de la física teórica. Fue consultor del proyecto Orion, que proponía naves espaciales propulsadas por explosiones nucleares. También colaboró con la RAND Corporation, escribió sobre armas, energía, colonias interestelares y biología sintética. No era un científico de laboratorio, sino un pensador que saltaba de campo en campo con asombrosa agilidad. En los años 70, defendió el uso civil de la energía nuclear, pero también criticó el secretismo y el militarismo que rodeaban su desarrollo.

Sus ideas no siempre fueron bien recibidas. Cuando propuso la posibilidad de árboles diseñados genéticamente para crecer en Marte, lo tomaron por un excéntrico. Cuando escribió que deberíamos contemplar la colonización biológica del espacio, muchos lo vieron como un soñador desfasado. Pero Dyson nunca buscó aplausos. Para él, la ciencia era una forma de ética, una invitación a pensar lo que aún no es, pero podría ser.

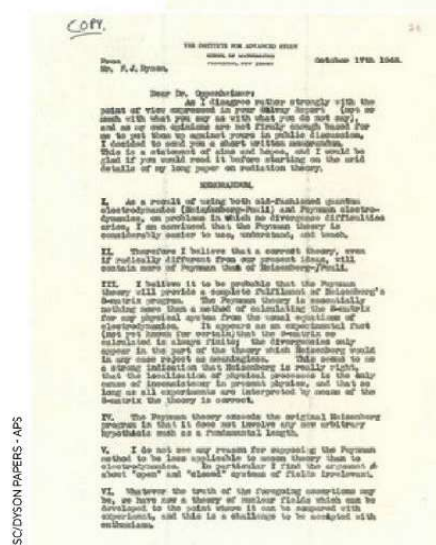
UN ICONOCLASTA AMABLE

A pesar de su prestigio internacional, Dyson mantuvo siempre una actitud modesta y humorística. Su estilo recordaba más al de un viejo sabio renacentista que al de un físico moderno. No usaba ordenador, leía con pasión a los clásicos y escribía a mano. Fue profesor en Princeton durante más de medio siglo, inspirando a generaciones sin imponer dogmas. En el debate sobre el cambio climático, adoptó una postura escéptica hacia los modelos predictivos, lo que le granjeó críticas incluso dentro de la comunidad científica. Pero lo hizo con respeto, y con el mismo espíritu de discrepancia creativa que había aplicado toda su vida.

La carta que convenció a Oppenheimer

En 1948, recién incorporado como miembro al Instituto de Estudios Avanzados, Dyson envió a Oppenheimer un breve memorándum defendiendo la utilidad del enfoque de Feynman —en diálogo con los métodos de Schwinger y Tomonaga— para ordenar la electrodinámica cuántica. Oppenheimer reaccionó con escepticismo al principio; después de varios seminarios y discusiones, dejó en el buzón de Dyson un papel con dos palabras manuscritas: «*Nolo contendere*. R.O.» («no deseo discutirlo»), una forma lacónica de dar por zanjada su oposición.

Aun así, lo invitó a Princeton para hablar en persona. Dyson viajó en tren desde Cornell y, durante una tarde entera, defendió sus argumentos con serenidad y detalle. Oppenheimer, que podía ser feroz con los mediocres, quedó impresionado por la solidez del joven británico. Pocos días después, Dyson fue aceptado como miembro permanente del instituto, sin haber pasado por ningún doctorado y sin haber publicado una tesis.



Carta de Dyson a Oppenheimer, y la parca respuesta de este.

Murió en el hospital el 28 de febrero de 2020, a los 96 años, tras una caída en el Instituto de Estudios Avanzados. Hasta el último momento conservó su lucidez, su humor y su vocación por el pensamiento independiente. Nunca recibió el Premio Nobel, algo que muchos consideran una de las grandes omisiones de la historia de la física. Pero para quienes lo conocieron o leyeron sus escritos, Freeman Dyson seguirá siendo el tejedor de mundos posibles, el hombre que cruzaba los límites entre disciplinas como quien camina de una habitación a otra con una taza de té.

UNIFICAR SIN INVENTAR: LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

El nombre de Freeman Dyson quedó vinculado para siempre a uno de los momentos decisivos de la física del siglo XX: la consolidación formal de la electrodinámica cuántica (QED). A finales de los años cuarenta, esta teoría estaba siendo desarrollada de forma paralela por Julian Schwinger, Richard Feynman y Sin-Itiro Tomonaga. Cada uno de ellos aportaba un enfoque distinto. Schwinger partía de una formulación rigurosa y algebraica, mientras que Feynman utilizaba sus célebres diagramas como atajos visuales para los cálculos de interacción. Dyson fue quien logró tender el puente entre ambos mundos. En un artículo que se publicó en 1949 con el título *Las teorías de radiación Tomonaga, Schwinger y Feynman*, Dyson demostró la equivalencia entre las distintas versiones de la QED y propuso una estructura común basada en operadores y espacios de Hilbert.



ASC/CENTRO DE ARCHIVOS SHELBY WHITE Y LEON LEVY, IAS



ASC/JACQUIE ASTL, CORTESÍA DE GEORGE DYSON

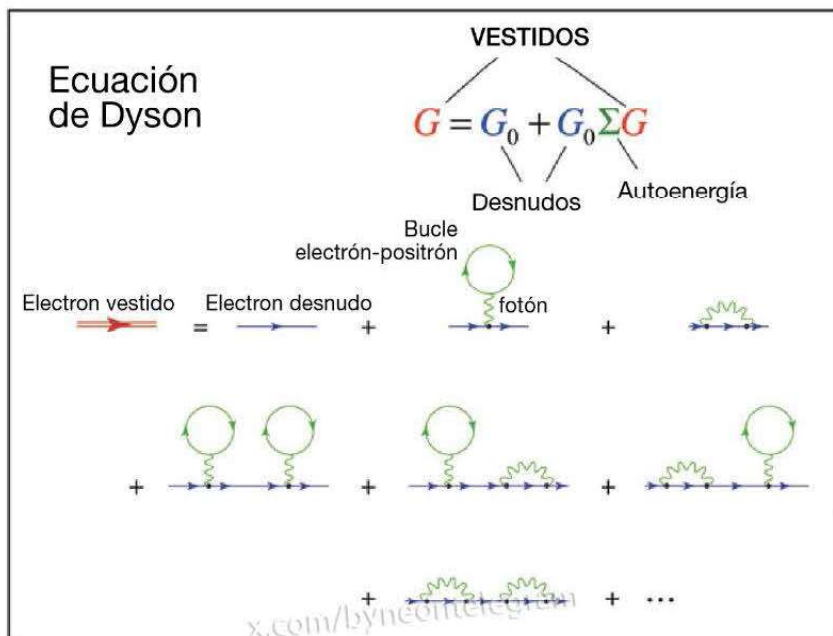
A la izda., Dyson en el Instituto de Estudios Avanzados. A la dcha., Dyson (en el extremo derecho) durante su participación en el Proyecto Orión, en el verano de 1959.

Ese trabajo, más que inventar una teoría nueva, hizo lo que Dyson mejor sabía hacer, es decir, encontrar orden en el caos, armonía entre estilos aparentemente irreconciliables. Con la arrogancia de la juventud, decidió que podía «hacer de Jonson frente al Shakespeare que era Feynman»: su papel sería ordenar y divulgar la visión de Feynman. Ben Jonson, recordemos, fue un dramaturgo y crítico contemporáneo y amigo-rival de Shakespeare. No exageraba del todo, ya que Dyson no desarrolló nuevos postulados fundamentales, pero sí dio solidez a un edificio que empezaba a tambalearse bajo su propio peso. Su análisis mostró que la QED, a pesar de sus aparentes inconsistencias, podía reformularse de forma coherente y calculable.

Gracias a Dyson, los llamados «diagramas de Feynman» pasaron de ser una extravagancia gráfica a convertirse en una herramienta estandarizada de cálculo. Fue él quien formalizó sus reglas, sistematizó su aplicación y convenció a la comunidad científica de su utilidad. Los físicos, acostumbrados a densas integrales y complejos desarrollos perturbativos, encontraron en los diagramas una manera de visualizar procesos como el intercambio de fotones o la aniquilación electrón-positrón. No se trataba de simples ilustraciones, pues cada línea, cada vértice, correspondía a un término preciso de la expansión matemática.

El mérito de Dyson no fue solo didáctico. Su formalismo permitió demostrar la renormalizabilidad de la QED, es decir, que sus infinitos podían ser manejados mediante técnicas matemáticas sin que la teoría se autodestruyera. Este avance incluso abrió el camino al desarrollo posterior del modelo estándar de partículas. Aunque nunca compartió el Nobel con Schwinger, Tomonaga y Feynman, su papel fue tan importante como el de ellos en la consolidación de la física cuántica de campos.

NUNCA RECIBIÓ EL PREMIO NOBEL, ALGO QUE MUCHOS CONSIDERAN UNA DE LAS GRANDES OMISIONES DE LA HISTORIA DE LA FÍSICA



El operador de autoenergía Σ está relacionado con los propagadores desnudos y vestidos a través de la ecuación de Dyson.

total posee un límite inferior proporcional al número de partículas, garantía de que la materia a granel no colapsa. Este hito abrió una línea que después refinaron Lieb y Thirring. También dejó resultados clave en materia condensada, como su teoría

MÁS ALLÁ DEL ELECTRÓN: FERMIONES, NEUTRINOS Y ESTRUCTURAS MATEMÁTICAS

Dyson no se quedó atrapado en el éxito de la QED. En los años cincuenta y sesenta exploró caminos menos transitados en la física de muchos cuerpos y en matemáticas. En 1967-1968, junto con Andrew Lenard, estableció rigurosamente la estabilidad de la materia: en sistemas coulombianos la energía

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

o escanea el código QR:

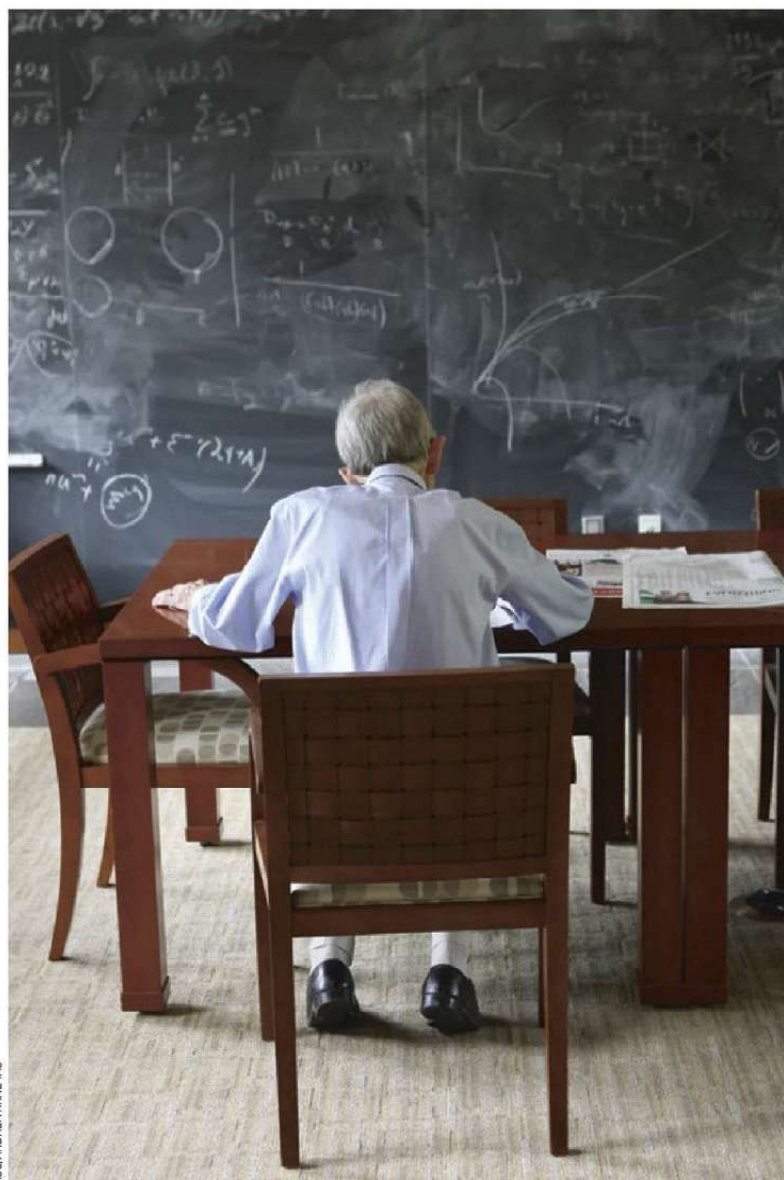


La esfera de Dyson

Imaginemos una civilización tan avanzada que decide ampliar sus «placas solares» a lo grande: no en un tejado, sino alrededor de su estrella. La idea de Freeman Dyson, propuesta en 1960, no era construir una cáscara sólida —eso sería inviable—, sino un enjambre de millones de satélites y hábitats que orbiten como una bandada, capturando parte de la luz para alimentar ciudades, fábricas o computadoras. Vista desde lejos, esa estrella seguiría brillando, pero parte de su energía ya no saldría en forma de luz visible, puesto que el enjambre la usaría y, como todo sistema real, devolvería calor.

Esa es la clave observacional: el «calor sobrante» se emite en infrarrojo. Por eso, si existiera un enjambre así, la estrella podría verse algo más tenue en visible y, en cambio, sospechosamente brillante en infrarrojo. Hoy, los astrónomos buscan esa huella en grandes catálogos del cielo: candidatos con «exceso» infrarrojo que no encaja con explicaciones naturales (polvo, discos o envolturas). No hay detecciones confirmadas, pero el concepto ha pasado de la ciencia ficción a una estrategia concreta para buscar tecnofirmas, es decir, rastros indirectos de tecnología a escala estelar.





ASCANDREA KANE/IAS

Dyson permaneció en el Instituto de Estudios Avanzados más de sesenta años, de 1953 a 1994 como profesor de Física y desde 1994 como profesor emérito de Física.

de las interacciones de ondas de espín en ferromagnetos y las cotas para la energía fundamental de un gas Bose de esferas duras, ejemplos paradigmáticos de comportamiento colectivo. En paralelo, introdujo el modelo de movimiento browniano de autovalores que cimentó parte de la teoría de matrices aleatorias moderna.

A diferencia de muchos de sus contemporáneos, Dyson rehuía las grandes interpretaciones de la mecánica cuántica. Amigo de John Bell y admirador de su trabajo sobre el realismo local, prefería moverse en el terreno de las predicciones y los cálculos contrastables, de hecho, no veía necesario invocar múltiples mundos ni otorgar un papel privilegiado al observador. Para él, la cuántica era ante todo un conjunto de herramientas eficaces para estimar probabilidades y confrontarlas con el experimento. Esa actitud no lo alejaba del misterio, sino que le subía el listón, pues reclamaba explicaciones con reglas simples y elegantes, desconfiaba tanto del determinismo rígido como del misticismo esotérico y sostenía que los grandes avances suelen venir de nuevas herramientas más que de nuevas doctrinas. ■



Chien- Shiung Wu

LA MUJER QUE
ROMPIÓ EL PRINCIPIO
DE SIMETRÍA

Chien Shiung Wu

Chien-Shiung Wu nació el 31 de mayo de 1912 en el pequeño pueblo de Liuhe, cerca de Shanghai, en una China sacudida por el ocaso de la dinastía Qing y la agitación política del nuevo siglo. Su familia no era rica, pero sí extraordinaria. Su padre, Wu Zhongyi, había estudiado ingeniería mecánica en Nanjing y fundado una de las primeras escuelas mixtas del país. Su madre, Fan Fu-Hua, era maestra y cultivaba un ambiente de estudio y debate en casa. La educación no era un privilegio masculino en la familia Wu, sino un deber compartido.

A los once años, Wu se trasladó a Suzhou para continuar su formación. El internado femenino donde estudió fue uno de los pocos centros progresistas del país, en el que aprendió matemáticas, literatura china y ciencia básica. En el instituto de Suzhou, la lectura de una biografía de Marie Curie reforzó su vocación por la física, en un entorno familiar que ya valoraba la educación científica. Más adelante, ingresó en la prestigiosa Universidad Nacional del Sureste en Nanjing, donde se licenció en Física en 1934 con una tesis sobre espectroscopía. Su talento fue tan evidente que fue recomendada para estudios de posgrado en Estados Unidos, pero la situación política y la amenaza inminente de guerra con Japón aplazaron sus planes.

EL SALTO A AMÉRICA Y LA LUCHA CONTRA LOS PREJUICIOS

En 1936, con solo 24 años, Chien-Shiung Wu consiguió finalmente emigrar a Estados Unidos para cursar un doctorado en la Universidad de Michigan. Sin embargo, al llegar a la estación de tren y descubrir que la residencia femenina no permitía la entrada de mujeres por la puerta principal, decidió rechazar la oferta. Tomó

un tren a la Universidad de California en Berkeley, donde fue aceptada por Ernest Lawrence, futuro Nobel y creador del ciclotrón.

Wu encontró en Berkeley una comunidad científica vibrante, pero también un ambiente dominado por hombres blancos. A pesar de su timidez, se ganó el respeto de sus colegas gracias a su precisión experimental y a su dedicación casi monástica. Su tesis doctoral, concluida en 1940, trató sobre la desintegración beta, un tipo de decaimiento radioactivo que entonces estaba en el centro del debate entre la mecánica cuántica y la física nuclear. La calidad de su trabajo fue tan notable que Lawrence la recomendó para un puesto en Smith College. Ella lo rechazó por considerarlo un destino marginal y prefirió seguir un rol de investigadora fuera de la academia tradicional.

Durante la Segunda Guerra Mundial, Wu fue contratada como investigadora en el Laboratorio de Radiación de Columbia. Allí colaboró con Harold Urey y John Dunning en un aspecto clave del Proyecto Manhattan. Hablamos de la



El químico nuclear estadounidense Ernest Lawrence.

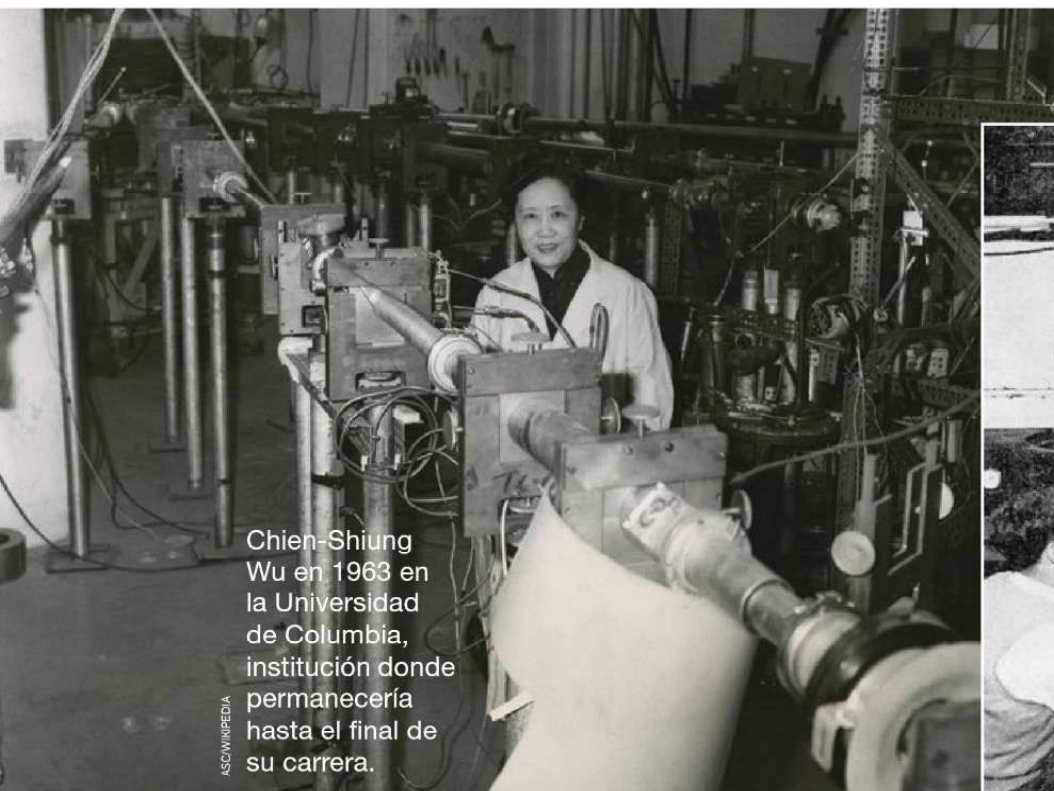
LA RESISTENCIA INSTITUCIONAL A RECONOCER SUS LOGROS SIEMPRE ESTUVO PRESENTE

separación de isótopos de uranio para la bomba atómica. Aunque su contribución fue decisiva, su nombre no aparece en los registros oficiales del proyecto, como ocurrió con tantas mujeres y personas pertenecientes a minorías étnicas de la época. Wu no se consideraba una activista política, pero entendía perfectamente la injusticia del sistema científico. Durante esos años firmó como «C. S. Wu», siguiendo la convención habitual de las revistas de física. No obstante, algunas fuentes divulgativas han interpretado esta elección como una forma de neutralizar sesgos de género, aunque no hay evidencia directa de que fuera su intención.

Tras la guerra, Wu se convirtió en profesora asociada en Columbia, pero no fue ascendida a catedrática hasta 1958, más de una década después de sus aportaciones al Manhattan y de su ingreso como miembro de pleno derecho en la American Physical Society. Fue, sin embargo, la primera mujer elegida presidenta de la

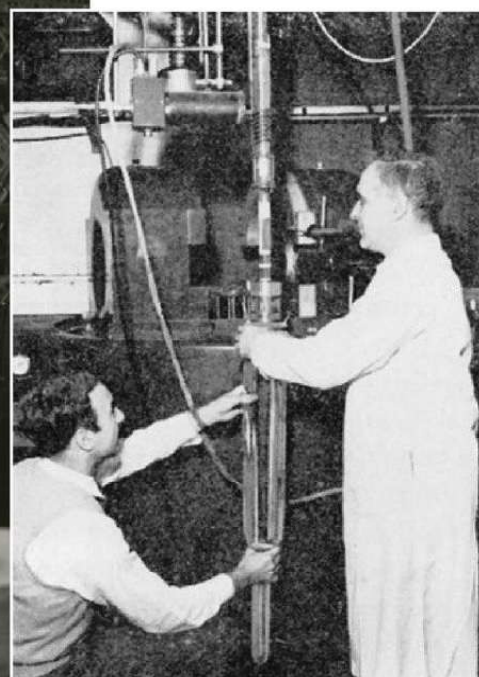


Wu (derecha) con Margaret Lewis en Berkeley, California.



Chien-Shiung Wu en 1963 en la Universidad de Columbia, institución donde permanecería hasta el final de su carrera.

Experimento con partículas elementales realizado por Wu en 1956.





Chien-Shiung Wu y Luke Yuan (izda.) en la casa del Sr. y la Sra. Robert Millikan (dcha.) el día de su boda.

Sociedad Americana de Física (1975) y la primera en recibir la Medalla Nacional de Ciencia de Estados Unidos en su campo. Sus logros fueron innegables, pero la resistencia institucional a reconocerlos siempre estuvo presente.

VIDA PRIVADA Y LEGADO HUMANO

En 1942 se casó con el físico Luke Chia-Liu Yuan, nieto del polémico Yuan Shikai, quien había intentado restaurar el Imperio chino. La ceremonia se produjo nada menos que en la casa de Robert Andrews Millikan, Premio Nobel de Física en 1953. El matrimonio fue discreto y feliz, marcado por el respeto mutuo y la colaboración científica ocasional. Tuvieron un hijo, Vincent Yuan, que se convirtió en físico bioquímico. Aunque Wu se nacionalizó estadounidense, mantuvo durante toda su vida un vínculo

profundo con la cultura china. De hecho, traducía poesía clásica, preparaba comida cantonesa y donaba fondos para becas científicas en su país natal.

En sus últimos años, Chien-Shiung Wu sufrió de parkinsonismo, pero siguió participando en congresos y guiando a jóvenes investigadoras. Falleció el 16 de

El decaimiento beta, puesto en su sitio

Después de la guerra, varios experimentos parecían chocar con la explicación de Enrico Fermi sobre el decaimiento beta, ese proceso en el que un núcleo cambia de identidad y emite un electrón mientras parte de la energía «desaparece» en un neutrino. Si la teoría era correcta, los electrones debían salir con un abanico continuo de energías. Sin embargo, algunas mediciones mostraban demasiados electrones «lentos», lo que hizo pensar que tal vez la explicación fallaba.

Chien-Shiung Wu volvió a empezar desde cero y miró donde pocos miraban: en los detalles del montaje. Detectó que se usaban capas radiactivas demasiado gruesas, que frenaban a los electrones antes de medirlos, y magnetos con núcleos de hierro que distorsionaban el campo. Preparó fuentes finísimas y uniformes de cobre-64, afinó el espectrómetro con un imán sin hierro y tuvo en cuenta el «tirón» eléctrico del propio núcleo. Cuando lo hizo, el espectro encajó con la teoría de Fermi. El problema estaba en los experimentos, no en la física. Aquellos trabajos de 1949 consolidaron a Wu como autoridad en desintegración beta y dejaron el terreno listo para sus logros posteriores.

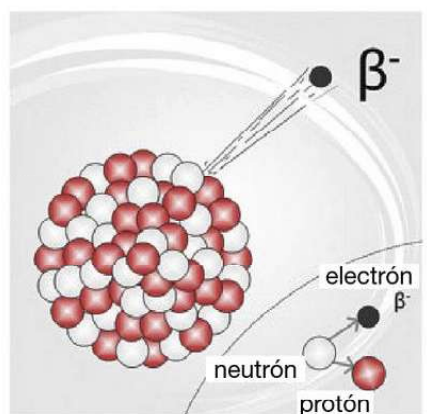


Ilustración del decaimiento beta de un núcleo.

febrero de 1997 en Nueva York, a la edad de 84 años. Sus cenizas fueron enterradas en la escuela fundada por su padre en Liuhe, en un gesto simbólico que cerraba el círculo de una vida consagrada a la ciencia y a la dignidad.

Su historia fue durante décadas ignorada o reducida a una nota al pie, pero hoy es reconocida como una de las grandes figuras de la física del siglo XX. No solo por el experimento que llevó a cabo en 1956 —que revolucionó la concepción de la simetría en la naturaleza—, sino por su tenacidad y su independencia en un mundo que no estaba preparado para verla brillar.

EL EXPERIMENTO DE WU Y LA ROTURA DE LA SIMETRÍA

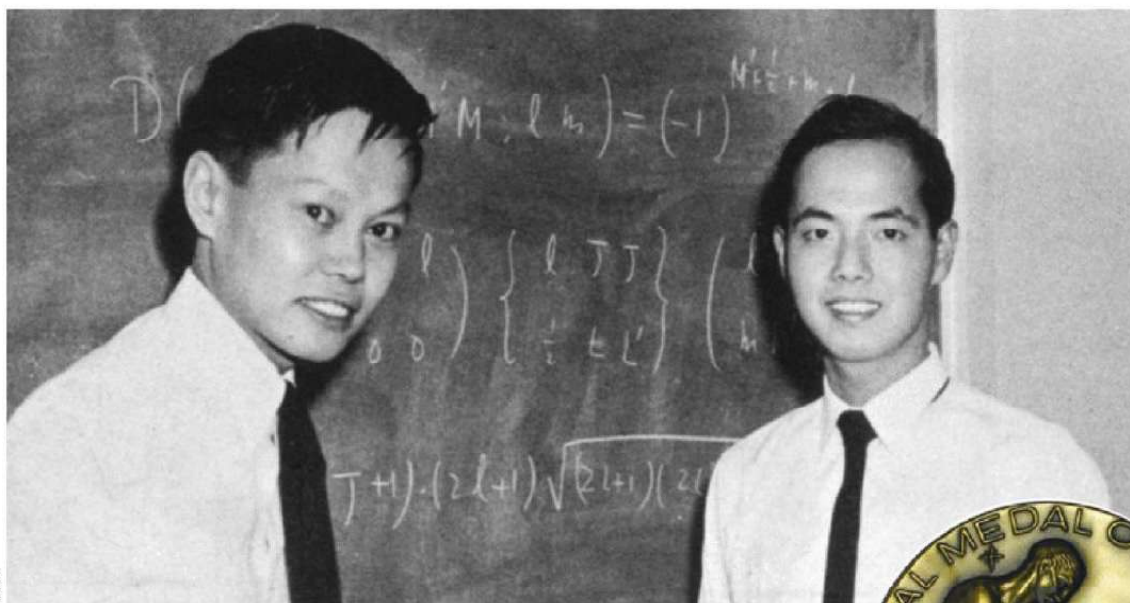
Durante buena parte del siglo XX, la física de partículas descansaba sobre un principio considerado incuestionable: la simetría de paridad. Esta afirmaba que las leyes físicas son indistinguibles si se invierte la derecha y la izquierda, como si el universo se reflejara en un espejo. Era una idea poderosa, elegante, heredera del principio de simetría tan apreciado desde Newton hasta Einstein. Se asumía que esta simetría se cumplía en todas las interacciones fundamentales, es decir, electromagnética, gravitatoria, fuerte y débil. Hasta que apareció Wu.

A mediados de los años 50, los físicos teóricos Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang pusieron en duda la validez de este principio en las llamadas interacciones débiles, responsables de ciertos tipos de desintegración nuclear, como la beta. Aunque su propuesta era revolucionaria, necesitaban una prueba experimental. Y recurrieron



El experimento de Wu sobre la conservación de la paridad, llevado a cabo en Columbia en 1956, demostró que en la desintegración beta, la paridad no se conserva.

ASC/SWITSONIAN INSTITUTION



Yang y Lee recibieron el Premio Nobel de Física en 1957 mientras Chien-Shiung Wu quedó excluida y solo fue reconocida posteriormente con honores como la Medalla Nacional de Ciencia.



a la única persona capaz de llevarla a cabo con la precisión extrema que requería: Chien-Shiung Wu.

El experimento propuesto por Wu era sutil y elegante. Utilizó núcleos de cobalto-60, un isótopo radiactivo que emite electrones al desintegrarse. Si la simetría de paridad se cumplía, los electrones deberían emitirse con igual probabilidad en todas las direcciones. Pero si no se cumplía, podría observarse una preferencia direccional en un sistema orientado. Para probarlo, Wu diseñó un entorno controlado donde los núcleos se alineaban gracias a campos magnéticos a temperaturas próximas al cero absoluto.

El montaje se realizó en colaboración con el National Bureau of Standards (NBS) en Washington, donde se disponía del instrumental criogénico necesario. En 1956, tras meses de preparación, Wu observó un resultado que dejó boquiabierto a la comunidad científica. Los electrones salían preferentemente en dirección opuesta al giro del núcleo. Es decir, el universo tenía «preferencias» direccionales en la interacción débil. El espejo no devolvía la misma física.

Este hallazgo —la violación de la paridad— fue una conmoción para la física. No se trataba de un pequeño ajuste, sino de una ruptura conceptual. Hasta entonces, la idea de que las leyes de la física eran invariantes bajo reflexión especular parecía tan evidente como la conservación de la energía o la simetría del tiempo. Wu demostró que el universo distingue entre izquierda y derecha cuando se trata de la fuerza débil.

La confirmación experimental llegó en enero de 1957, cuando se publicaron los resultados. Lee y Yang recibieron el Premio Nobel ese mismo año, en una decisión apresurada y polémica, pues Wu, pieza central del descubrimiento, quedó excluida. Aunque fue reconocida con múltiples honores posteriores —como la Medalla Wolf, el premio Comstock de la Academia Nacional de Ciencias y el Premio de la Ciencia de Estados Unidos—, nunca recibió el Nobel. Su reacción fue estoica,

Un físico le pidió disculpas en vida

Años después de su célebre experimento, Chien-Shiung Wu asistía a una conferencia cuando un colega se le acercó al finalizar su intervención. Sin cámaras ni micrófonos, pero con público presente, le dijo: «El Nobel debió ser tuyo también. La historia te debe una disculpa». Ella asintió con una sonrisa contenida, sin escándalo ni amargura. El comentario no era solo una cortesía tardía: era una admisión generacional, un ajuste simbólico que llegaba desde dentro del propio estamento científico.

Ese momento quedó grabado en la memoria de varios testigos y circuló en relatos posteriores como un gesto que marcaba el cambio de clima en la comunidad académica. Wu no pidió nunca reparación pública, pero episodios como este mostraban que su figura comenzaba a ser vista con los ojos que merecía. No necesitaba venganza; su rigor hablaba por ella. Pero cuando un colega alzaba la voz para decir lo obvio, ayudaba a que no se volviera a callar lo esencial.



Chien-Shiung Wu conversa con el físico alemán Herwig Schopper, probablemente durante una conferencia en Ginebra, en 1958.

aunque sus palabras eran certeras. En 1964, Wu ironizó en un simposio: «Me pregunto si los diminutos átomos y núcleos, o los símbolos matemáticos, o las moléculas de ADN, tienen alguna preferencia por un trato masculino o femenino», subrayando que el problema no era la capacidad, sino los prejuicios del entorno.

LA FÍSICA MÁS ALLÁ DEL ESPEJO

El experimento de Wu confirmó la teoría de Lee y Yang, pero también abrió una caja de Pandora. Si el universo podía romper la simetría de paridad, ¿qué otras simetrías podían ser cuestionadas? A partir de entonces, los físicos empezaron a estudiar otras violaciones: la de carga-conjugación (C), la combinada CP y, más adelante, la simetría temporal T. Hoy sabemos que la interacción débil viola la simetría CP también, lo que está relacionado con uno de los grandes misterios de la cosmología: por qué existe más materia que antimateria en el universo.

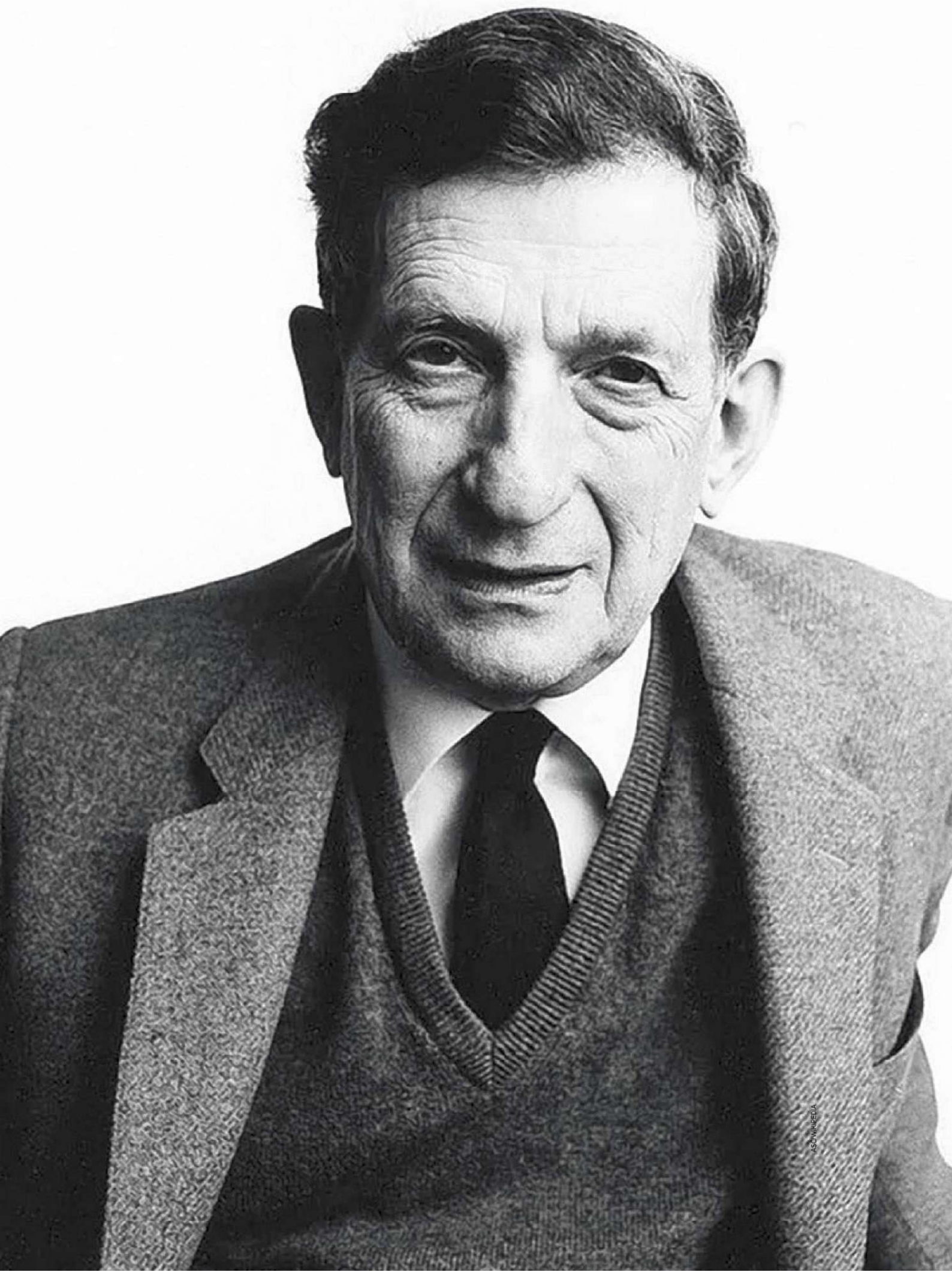
Además de su descubrimiento sobre la paridad, Wu hizo contribuciones clave en espectroscopía nuclear, la estructura del núcleo y los procesos de captura electrónica. Su libro de 1965, *Decaimiento beta*, sigue siendo una referencia en la disciplina, a medio camino entre tratado técnico y legado personal. Fue también una divulgadora científica excepcional. Sus conferencias sobre la historia de la física nuclear, impartidas en universidades de todo el mundo, combinaban erudición con una claridad didáctica pocas veces igualada.

En sus últimos años, reflexionó a menudo sobre el papel de la mujer en la ciencia, animando a las jóvenes a estudiar física no desde el deber, sino desde la curiosidad. «La ciencia no conoce patria ni género. Solo pregunta si algo es verdadero o falso». ■

David Bohm

EL CUÁNTICO EXILIADO
DEL LIBRE ALBEDRÍO

David Bohm



David Joseph Bohm nació el 20 de diciembre de 1917 en Wilkes-Barre, una ciudad minera del noreste de Pensilvania. Hijo de inmigrantes judíos llegados desde Europa del Este, creció en un ambiente modesto y profundamente marcado por la tensión entre tradición religiosa y modernidad industrial. Su padre, dueño de una tienda de muebles, esperaba que David continuara con el negocio familiar. Pero desde pequeño mostró una inquietud constante por entender cómo funcionaba el mundo, y no tardó en dejar claro que su destino no sería vender sillas sino desarmar los fundamentos de la realidad física.

Estudió primero en la Universidad Estatal de Pensilvania y más tarde en el Instituto Tecnológico de California, aunque su etapa más decisiva se dio en la Universidad de California en Berkeley, donde entró en contacto con el legendario Robert Oppenheimer. Aquel joven de habla pausada y mirada crítica impresionó a sus profesores por su capacidad de combinar una mente lógica con una imaginación fértil. En plena efervescencia de la física cuántica, Bohm supo distinguirse no por seguir la corriente, sino por cuestionarla.

EL ESTIGMA DE LA SOSPECHA

En 1943 participó en investigaciones vinculadas al Proyecto Manhattan, aunque se mantuvo al margen del laboratorio de Los Álamos por falta de autorización de



Como postgraduado en la universidad de Berkeley, California (arriba), Bohm desarrolló la teoría de plasmas que hoy se conoce como fenómeno de difusión de Bohm.

EXPULSADO DEL SISTEMA ACADÉMICO ESTADOUNIDENSE, BOHM TUVO QUE REHACER SU VIDA LEJOS DE SU PAÍS NATAL



Bohm fue el primero en resolver el problema de la medición en mecánica cuántica.

seguridad. Aquello fue el primer indicio de una relación difícil con las autoridades estadounidenses. Su interés por la filosofía, la justicia social y el marxismo —muy común entre los científicos de su generación— no tardó en volverse un lastre. En 1949, cuando ya trabajaba como profesor en la Universidad de Princeton, fue llamado a declarar ante el Comité de Actividades Antiestadounidenses del senador McCarthy. Bohm, firme en sus convicciones, se negó a colaborar. Aunque nunca se le demostró afiliación comunista, el daño estaba hecho. Fue arrestado (aunque luego absuelto) y despedido de Princeton, donde su plaza dependía de la influencia directa de Einstein.

Einstein, de hecho, fue uno de sus pocos defensores. Ambos compartían no solo una desconfianza hacia la interpretación dominante de la física cuántica, sino también una ética intelectual basada en el derecho a disentir. El propio Einstein llegó a decir que Bohm era uno de los pocos físicos que comprendía a fondo los problemas filosóficos de la teoría cuántica. Pero ni siquiera ese aval fue suficiente. Expulsado del sistema académico estadounidense, Bohm tuvo que rehacer su vida lejos de su país natal.

El exilio de Bohm no fue solo geográfico. Tras perder su puesto en Princeton se instaló primero en Brasil (Universidad de São Paulo, 1951-1955), pasó después



En 1950, Bohm fue arrestado por negarse a responder las preguntas del Comité de Actividades Antiamericanas de la Cámara de Representantes, asociado con el macartismo (a la izda., el senador Joseph McCarthy). A la dcha., Jiddu Krishnamurti.

a Israel (Technion de Haifa, 1955-1957) y, finalmente, a Reino Unido, donde se incorporó como investigador en la Universidad de Bristol y, desde 1961, fue profesor de Física Teórica en Birkbeck College (Universidad de Londres). En todos estos lugares desarrolló una labor científica constante, aunque con escasa visibilidad mediática. Su estilo no encajaba en el canon anglosajón: pensador lento, abstracto, introspectivo, más dado a reformular los fundamentos que a competir por el próximo artículo brillante.

Pese a las dificultades, su vida fue rica en conexiones. Mantuvo diálogos con intelectuales de disciplinas muy diversas, desde filósofos de la ciencia hasta místicos de Oriente. Uno de sus interlocutores más frecuentes fue el pensador indio Jiddu Krishnamurti, con quien compartió largas conversaciones sobre la percepción, la conciencia y los límites del pensamiento racional. Aunque estas incursiones filosóficas incomodaban a muchos colegas, para Bohm eran parte de un mismo impulso: entender el orden profundo de la realidad.

UN FINAL SERENO, SIN REDENCIÓN OFICIAL

A lo largo de su vida, Bohm nunca fue rehabilitado del todo por la física oficial, ni en Estados Unidos ni en Europa. Aunque sus ideas influyeron en generaciones posteriores y alimentaron el debate sobre los fundamentos de la teoría cuántica, su nombre rara vez aparecía en los libros de texto. En 1987 fue elegido miembro de la Royal Society, uno de los pocos gestos institucionales que recibió. Falleció el 27 de octubre de 1992, en Londres, tras años de problemas de salud que afrontó con la misma calma y determinación que había mostrado ante los tribunales y los comités académicos.

DIALOGÓ CON INTELECTUALES DE DISCIPLINAS DIVERSAS, DESDE FILÓSOFOS DE LA CIENCIA HASTA MÍSTICOS DE ORIENTE

Bohm murió como vivió: convencido de que la física debía recuperar el derecho a pensar en términos de totalidad, de proceso y de libertad. Para él, el universo no era una colección de partículas obedientes sino una danza continua de potencialidades. Su vida, marcada por el exilio, la sospecha y la búsqueda filosófica, fue también una prolongación de esa intuición.

Nunca ganó un Nobel, pero en 1958 fue propuesto para el de Física. Einstein dijo sobre Bohm: «Él es el único que puede ir más allá de la mecánica cuántica».

UNA TEORÍA QUE SE ATREVIÓ A MIRAR ATRÁS

En 1952, exiliado ya en Brasil, David Bohm publicó dos artículos que removieron los cimientos filosóficos de la física cuántica. Allí rescataba una idea que había sido



En el año 1987 David Bohm fue elegido miembro de la Royal Society de Londres.

Diálogos con Krishnamurti: física y conciencia

Cuando David Bohm conoció a Jiddu Krishnamurti en los años sesenta, no lo hizo como discípulo ni como físico curioso en busca de misticismo. Lo hizo como pensador inquieto, interesado en los límites de la racionalidad y en la posibilidad de una percepción más directa de la realidad. Krishnamurti, por su parte, no buscaba legitimación científica para sus ideas, pero reconocía en Bohm una mente capaz de escuchar sin prejuicios. Aquella improbable alianza entre un físico teórico y un filósofo sin doctrina cristalizó en más de dos décadas de conversaciones. No fueron diálogos fáciles ni cómodos. Discutieron sobre la fragmentación del pensamiento, la ilusión del yo, el papel del lenguaje en la creación del conflicto y la posibilidad de un cambio radical en la conciencia humana. Para Bohm, estos intercambios no eran un escape de la ciencia, sino una forma de prolongarla más allá de las fórmulas. De hecho, muchos de sus escritos posteriores recogen ecos directos de esas conversaciones. Lejos de

caer en el espiritualismo vago, Bohm intentó construir un puente entre los órdenes del pensamiento, la percepción y la materia. Nunca abandonó su vocación científica, pero tampoco renunció a la posibilidad de que el universo —y la mente que lo observa— compartieran una lógica más profunda, aún por descubrir.



ASC/PROYECTO BOHM-KRISHNAMURTI

Los Diálogos Krishnamurti-Bohm se desarrollaron a lo largo de casi 25 años. Aunque ya se habían conocido y conversado antes, el primero que se registró fue en agosto de 1965.

formulada por Louis de Broglie décadas antes pero descartada por la comunidad: que las partículas podían tener una trayectoria definida, gobernada por una «onda guía» que marcaba su comportamiento. La propuesta de Bohm era radical en su sencillez. Frente a la interpretación de Copenhague, que asumía que el estado de un sistema cuántico solo existe al ser medido, Bohm proponía que las partículas existen con propiedades bien definidas en todo momento. La incertidumbre, decía, no es ontológica, sino epistemológica. Es decir, lo que no sabemos no equivale a lo que no existe.

Para formalizar esta idea, introdujo el concepto de «potencial cuántico», una función matemática que actúa sobre las partículas de forma no local, es decir, que puede transmitir influencia instantánea entre puntos distantes del espacio. Esta no-localidad, que escandalizaba a muchos, permitía a Bohm explicar los mismos resultados que la teoría estándar sin renunciar a la causalidad ni al realismo. En su modelo, el mundo cuántico no era una nebulosa de probabilidades sino un universo profundamente determinado, donde las leyes se aplicaban

con rigor, aunque su complejidad escapara a nuestra capacidad de cálculo.

LA INTERPRETACIÓN CAUSAL: ENTRE HEREJÍA Y LUCIDEZ

El modelo de Bohm se conoce hoy como «interpretación causal» o «interpretación de Broglie-Bohm». En ella, cada partícula tiene una posición definida y evoluciona según una ecuación clásica, pero esa evolución está guiada por una onda que satisface la ecuación de Schrödinger. Es decir, las partículas son corpusculares, pero la onda cuántica existe también como entidad real y activa, no como simple herramienta estadística. Esta dualidad —onda y partícula, ambas reales— es lo que permite que, por ejemplo, un electrón pase por una sola rendija en un experimento de doble rendija, pero su trayectoria esté influida por la presencia (o no) de la otra rendija.

Durante décadas, la interpretación causal fue ignorada o ridiculizada. El propio Bohr la desestimó sin apenas discusión, y la mayoría de físicos la consideraban innecesaria: si el formalismo cuántico funcionaba, ¿para qué buscar una explicación alternativa? Sin embargo, Bohm no buscaba refutar la teoría cuántica, sino dotarla de una base conceptual más sólida. Lo que le preocupaba no era la utilidad práctica de las ecuaciones, sino su significado. ¿Qué dice realmente la física cuántica sobre la realidad? ¿Podemos renunciar a la idea de un mundo que existe independientemente del observador?

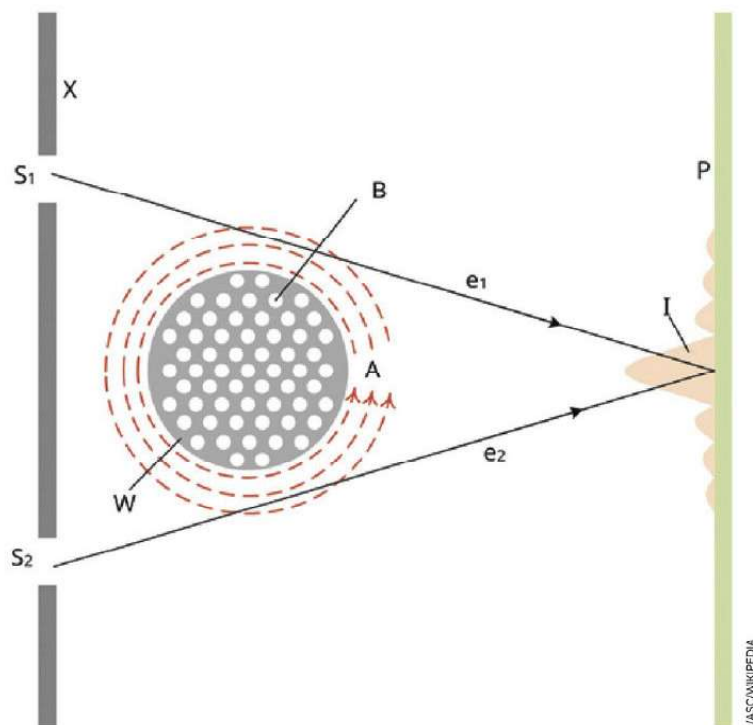
Uno de los aspectos más interesantes del pensamiento de Bohm fue su interpretación del entrelazamiento cuántico. Para él, el hecho de que dos partículas puedan influirse de forma instantánea a cualquier distancia no es un problema, sino una manifestación de que el universo está interconectado de forma profunda. En lugar de considerar los objetos como entidades separadas que interactúan, proponía pensar en un todo indivisible. Esta idea desembocó en uno de sus conceptos más característicos: el «orden implicado». Una «teoría» especulativa con peligros de transcender al plano pseudocientífico.

Según Bohm, el universo tiene una estructura doble. Lo que percibimos como objetos individuales, fenómenos localizados o eventos definidos es solo una manifestación superficial, un «orden explicado». Pero subyacente a él hay un «orden implicado», una realidad más profunda en la que todo está conectado con todo. Esta



El físico teórico francés Louis de Broglie en 1929.

BOHM NO BUSCABA REFUTAR LA TEORÍA CUÁNTICA, SINO DOTARLA DE UNA BASE CONCEPTUAL MÁS SÓLIDA



El efecto Aharonov-Bohm es un fenómeno cuántico en el que la presencia de un campo magnético altera la propagación de una carga eléctrica, incluso cuando esta se propaga en zonas donde dicho campo no está presente.

El efecto Aharonov-Bohm: cuando el «vacío» deja huella

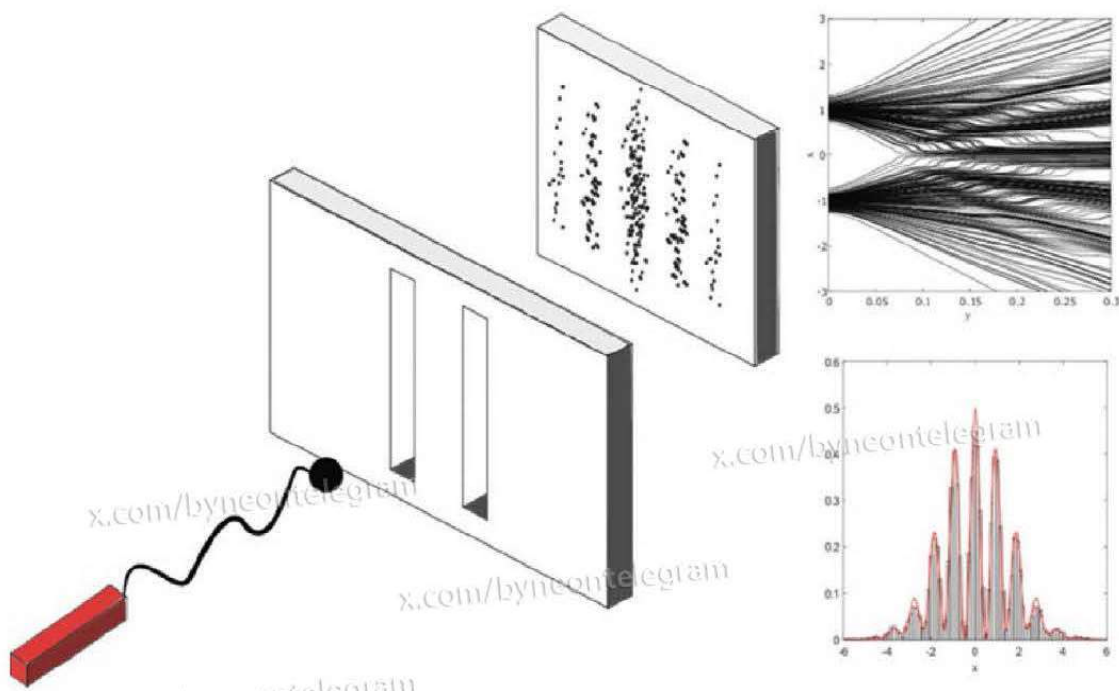
En los años cincuenta, David Bohm y Yakir Aharonov mostraron algo desconcertante: incluso si un haz de electrones viaja por regiones donde no hay fuerzas eléctricas ni magnéticas medibles, su patrón de interferencia puede desplazarse al rodear una zona que contiene flujo magnético «encerrado». Es decir, los electrones «notan» la presencia de la región interna sin tocarla, pero no por el campo, sino por el potencial. Ese corrimiento del patrón —predicho en 1959 y emparentado con una intuición previa de Ehrenberg y Siday— implicaba que los potenciales electromagnéticos tienen consecuencias físicas directas en mecánica cuántica, algo impensable en la descripción clásica basada solo en campos y fuerzas.

Más que una curiosidad, el efecto Aharonov-Bohm puso sobre la mesa la naturaleza no local y, en cierto modo, topológica de ciertos fenómenos cuánticos. Lo que cuenta no es el «empujón» local de una fuerza, sino cómo el sistema completo rodea una región con flujo. Esa predicción se confirmó de forma icónica con los experimentos de holografía electrónica de Tonomura y colaboradores en los años ochenta, y desde

entonces ha inspirado variaciones y análogos (ópticos y de estado sólido) que siguen explorando su alcance conceptual y tecnológico.



Yakir Aharonov ha sido profesor de Física Teórica y titular de la Cátedra James J. Farley de Filosofía Natural en la Universidad Chapman de California desde 2008.



La teoría de Bohm es una interpretación de la teoría cuántica postulada por el físico en 1952 como una extensión de la onda guía de Louis de Broglie de 1927.

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:

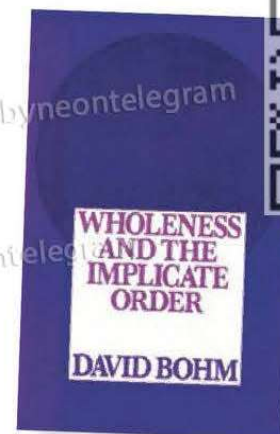


concepción influye no solo en su física, sino también en su pensamiento filosófico y su interés por la conciencia, el lenguaje y los procesos creativos.

Bohm no se conformó con reformular la cuántica. También reflexionó sobre la naturaleza del pensamiento científico. En su libro *La totalidad y el orden implicado* (1980), argumentaba que la fragmentación del conocimiento moderno es un obstáculo para comprender la realidad. La especialización excesiva, la reducción de todo a cifras o el apego al método predictivo pueden oscurecer más que revelar. Para él, la física debía aspirar a integrar lo interno y lo externo, lo racional y lo intuitivo, lo visible y lo invisible.

Algunos lo acusaron de caer en el misticismo. Otros lo consideraron un excéntrico con talento. Pero su influencia ha resurgido en campos tan diversos como la óptica cuántica, la teoría de la información y el estudio de sistemas complejos. Incluso físicos que no comparten su visión admiten que planteó preguntas valientes, incómodas y necesarias.

Hoy, la interpretación de Bohm no es mayoritaria, pero ya no es ignorada. Se enseña en algunos cursos avanzados de fundamentos cuánticos y ha dado pie a desarrollos modernos como las trayectorias de Bohm en simulaciones computacionales. Más allá de su aceptación académica, su valor reside en haber defendido una postura que desafiaba tanto a la ortodoxia como al pragmatismo. Su física no fue una religión, pero tampoco un cálculo sin alma. ■



En su obra Bohm propone un nuevo modelo de realidad.

ASCIWIKIPEDIA



Hugh Everett III

EL MUNDO SE MULTIPLICA

Hugh Everett, III

Hugh Everett III nació en Washington D. C. el 11 de noviembre de 1930, en el seno de una familia de clase media. Su padre trabajaba en el Departamento de Agricultura y su madre era profesora. La separación de sus padres cuando Hugh tenía ocho años marcó una infancia de traslados frecuentes y una vida doméstica dividida entre ambos hogares. Desde muy joven mostró una inclinación notable por las matemáticas, la lógica y los sistemas formales, cualidades que lo distinguieron en la escuela y que más tarde orientarían su vocación profesional.

Tras graduarse en el instituto con calificaciones brillantes, ingresó en la Universidad Católica de América, para iniciar sus estudios de ingeniería. Poco después se trasladó a la Universidad de Princeton, donde completó la licenciatura en ingeniería y matemáticas con mención especial. Allí comenzó de inmediato los estudios de posgrado en física y desarrolló un creciente interés por los problemas fundamentales de la mecánica cuántica, en particular por el papel del observador y el colapso de la función de onda. Desde el inicio, consideró que la interpretación de Copenhague no era una respuesta satisfactoria, sino una concesión filosófica, y se propuso encontrar una explicación más coherente con las leyes físicas.

CENICIENTA EN EL MUNDO ACADÉMICO

En 1957, a los 26 años, Everett presentó y defendió en Princeton una tesis doctoral, aunque el borrador ya estaba circulando desde 1956. Con el tiempo, se convertiría



Everett inició sus estudios de ingeniería química en la Universidad Católica de América, en Washington, D.C.

ABANDONÓ EL MUNDO ACADÉMICO Y SE DEDICÓ AL ANÁLISIS MILITAR Y LA ESTRATEGIA NUCLEAR EN PLENA GUERRA FRÍA



Everett (a la edad de 24 años) fotografiado junto al Premio Nobel Niels Bohr, que había asistido a un seminario en Princeton en 1955.

en una de las propuestas más provocadoras de la física del siglo xx. Su supervisor, el eminente John Archibald Wheeler, la aceptó con cautela y la llevó en persona a Niels Bohr en Copenhague, con la esperanza de que recibiera el reconocimiento que merecía. Pero Bohr y su círculo la rechazaron de plano. El propio Wheeler volvió de Europa desanimado y recomendó a Everett que «suavizara» sus afirmaciones. Everett, que no era hombre de medias tintas, optó por marcharse. Abandonó el mundo académico con un suspiro de frustración y se adentró en una carrera que poco tenía que ver con la física, la del análisis militar y la estrategia nuclear en plena Guerra Fría.

Durante las décadas de 1960 y 1970, Hugh Everett trabajó como consultor para el Pentágono y para instituciones privadas como el Weapons Systems Evaluation Group. Allí aplicó sus conocimientos de teoría de juegos, probabilidad y simulación matemática a problemas logísticos y de armamento. Fue uno de los primeros en aplicar modelos probabilísticos para predecir el impacto de un ataque nuclear sobre las ciudades soviéticas, una labor que ejerció sin demasiado entusiasmo moral, pero con eficiencia técnica. En el fondo, Everett parecía haber aceptado su destino, el de vivir en un mundo donde sus ideas más audaces no encontraban su lugar.

A pesar de su alejamiento del mundo académico, Everett nunca abandonó por completo su visión cuántica. Con el paso de los años, empezó a sentir cierta amargura por el escaso impacto de su tesis y por el desinterés que sus colegas mostraban hacia ella. Solo un puñado de físicos, como Bryce DeWitt, retomaron su trabajo en los años 70 y lo bautizaron como la «interpretación de los muchos mundos»



Everett hizo contribuciones clave a la seguridad nacional como consultor del Pentágono.

(IMM). Everett, sin embargo, no se implicó demasiado en su defensa pública. Consciente de que ya no era parte del mundo universitario, se mantuvo en segundo plano, aunque con cierta perplejidad al ver cómo sus ideas comenzaban a generar debates filosóficos y físicos sin que nadie lo llamara a participar en ellos.

Su vida personal fue tan discreta como su carrera científica. Se casó con Nancy Gore, con quien tuvo dos hijos, uno de los cuales —Mark Everett— se convertiría más tarde en cantante y líder de la banda Eels. La relación entre padre e hijo fue distante, marcada por silencios y ausencias. En el documental *Parallel Worlds, Parallel Lives*, Mark reconstruiría con asombro la figura de su padre, tratando de comprender cómo un hombre que había formulado una idea tan revolucionaria podía ser, al mismo tiempo, tan ausente, tan impermeable al mundo emocional.

Hugh Everett murió el 19 de julio de 1982, con apenas 51 años, víctima de un infarto fulminante. Su cuerpo fue incinerado sin ceremonia religiosa, como había solicitado. Nunca buscó reconocimiento ni aplausos, pero tampoco los obtuvo en vida. Solo años después, cuando su teoría de los muchos mundos empezó a ocupar páginas en los libros de divulgación, artículos científicos y novelas de ciencia ficción, su nombre regresó con fuerza. Y entonces ocurrió lo paradójico: el hombre que había imaginado infinitas copias del universo murió creyendo que el suyo era el único en el que su visión no había triunfado.

UNA INTERPRETACIÓN SIN COLAPSO

El núcleo de la propuesta de Hugh Everett es tan radical como sencillo. Se reduce a lo siguiente: la función de onda cuántica no colapsa. En contra de la interpreta-

SEGÚN LA TEORÍA DE EVERETT, LA EVOLUCIÓN CUÁNTICA DEL SISTEMA ES SIEMPRE UNITARIA, DETERMINISTA Y COHERENTE

ción de Copenhague, que sostiene que la observación «hace colapsar» la función de onda y selecciona un único resultado entre varios posibles, Everett planteó que todos los resultados posibles se realizan efectivamente... pero en diferentes ramas del universo. El título de su tesis fue *Sobre los fundamentos de la mecánica cuántica*. En ella proponía que el universo se divide cada vez que ocurre una medición cuántica, y que cada una de esas divisiones representa una realización coherente y completa de los posibles resultados.

Según su teoría, no es el mundo el que elige un resultado cuando se mide, por ejemplo, el espín de un electrón. Lo que ocurre es que el universo entero se desdobra en dos copias. En una, el electrón tiene espín hacia arriba; en la otra, hacia abajo. Cada versión del observador queda «atrapada» en una de esas realidades, sin posibilidad de percibir la otra. Así, la evolución cuántica del sistema es siempre unitaria, determinista y coherente, sin necesidad de colapso ni intervención externa. El observador no colapsa nada, simplemente queda



Cecile DeWitt-Morette y Bryce DeWitt, quien popularizaría la expresión «interpretación de los muchos mundos» en la década de 1970.

Un vaso de *whisky* y un paquete de galletas

Tras abandonar el mundo académico, Hugh Everett encontró refugio en una rutina que oscilaba entre lo anodino y lo extravagante. Cada tarde, después de su jornada como analista militar, se encerraba en su estudio privado. Allí, rodeado de montones de papeles, fórmulas garabateadas y carpetas clasificadas, repetía el mismo ritual: un vaso de *whisky* en una mano, un paquete de galletas en la mesa y una nube de humo de cigarrillo flotando sobre su cabeza. Mientras tanto, el resto de la casa quedaba en silencio.

Su hijo, Mark Everett, recuerda esa imagen con una mezcla de extrañeza e incompreensión. «Pienso en lo enfadado que estaba porque mi padre no se cuidaba mejor», es-

cribió. Apenas cruzaban palabras y, cuando lo hacían, no era para hablar de universos paralelos, sino de banalidades prácticas o silencios incómodos. El hombre que había imaginado la ramificación infinita de la realidad vivía encerrado en una sola: la suya, íntima, rígida, marcada por el desencanto y la distancia emocional. Nunca fue cruel, solo ausente.



El hábito de consumo de alcohol de Everett probablemente contribuyó a su muerte prematura.

correlacionado con un resultado entre muchos. Es lo que Everett llamó «formulación del estado relativo».

El concepto de «muchos mundos» no apareció en su artículo original. De hecho, Everett no era especialmente dado a metáforas poéticas ni a nombres llamativos. Fue Bryce DeWitt, en la década de 1970, quien popularizó la expresión «interpretación de los muchos mundos» (*many-worlds interpretation*, MWI) para referirse a la visión de Everett. Esta expresión capturaba de forma eficaz la intuición detrás del modelo, es decir, la existencia de un universo que se ramifica constantemente, generando copias coherentes de sí mismo cada vez que se realiza una interacción cuántica.

Lo interesante de esta propuesta es que no modifica en absoluto la mecánica cuántica tal como la formuló Schrödinger. No se trata de una teoría alternativa, sino de una interpretación de las ecuaciones ya existentes. En la visión de Everett,

**SU PROPUESTA RECIBIÓ DURAS
CRÍTICAS, Y MUCHOS LA CONSIDERARON
ONTOLÓGICAMENTE EXCESIVA**



La interpretación de Everett postula la existencia de universos paralelos que se ramifican.

el universo cuántico es una gigantesca función de onda universal que evoluciona conforme a la ecuación de Schrödinger, sin necesidad de reglas especiales para el momento de la observación. De este modo, se evita la ruptura entre «micromundo cuántico» y «macromundo clásico», una distinción que la interpretación de Copenhague mantenía de forma artificial.

VENTAJAS CONCEPTUALES Y CRÍTICAS FEROCES

Una de las ventajas más evidentes de la interpretación de Everett es que elimina la necesidad de postular un mecanismo especial para el colapso de la función de onda, algo que nunca ha sido explicado de forma satisfactoria. También proporciona una base más coherente para el tratamiento de sistemas complejos, como el universo en su conjunto, donde no hay un observador externo que lo colapse. En cosmología cuántica, por ejemplo, el enfoque de Everett permite describir la evolución del cosmos desde el *Big bang* sin invocar una dualidad entre sistemas y observadores.

Sin embargo, su propuesta también ha recibido críticas duras. En primer lugar, muchos la consideraron ontológicamente excesiva: postular un número astronómico (e incluso infinito) de mundos paralelos para explicar una simple medición parecía, para algunos, una locura filosófica. Bell consideró la interpretación de muchos mundos una opción «extravagante» y prefería teorías de colapso que eludieran la proliferación de ramas del estado cuántico.

Mark Oliver Everett: canciones desde el otro universo

Mark Oliver Everett tenía apenas diecinueve años cuando encontró el cuerpo sin vida de su padre. Hugh Everett III murió en 1982, repentinamente, y sin haberse reconciliado con nadie, ni con el mundo ni con su propia familia. En ese momento,

Mark apenas sabía que su padre había sido físico. No se hablaba de eso en casa. Solo muchos años después, ya convertido en líder de la banda Eels y conocido por sus letras melancólicas y su voz rasposa, Mark descubrió que aquel hombre distante había formulado una de las teorías más fascinantes de la física moderna: la interpretación de los muchos mundos. El hallazgo no fue inmediato, ni sencillo. Llegó como parte de una búsqueda emocional tras la muerte de su madre y su hermana, una cadena de pérdidas que lo dejó solo, pero también dispuesto a entender qué había detrás del silencio de su padre.

En 2007, Mark protagonizó el documental *Parallel Worlds, Parallel Lives*, donde recorre Estados Unidos entrevistando a físicos que admiraban a Hugh Everett y que le explican —con ternura y admiración— la importancia de su trabajo. Mark escucha, pregunta, intenta entender. Y en ese gesto, de hijo que repara los hilos rotos del pasado, empieza también a conectar su obra musical con la historia de



Mark Oliver Everett en San Francisco, en 2014.

su padre. Muchas de sus canciones, cargadas de angustia existencial, de soledad, de dobles identidades y de deseo de pertenecer, resuenan ahora con otro eco. Temas como *Things the Grandchildren Should Know* o *Novocaine for the Soul* pueden leerse como postales desde una realidad paralela en la que Hugh y Mark sí conversaron, sí se entendieron. En cierto modo, la interpretación de Everett ha acabado por cumplirse en su hijo. Mark no vive en un solo mundo, sino en varios paralelos, donde la física, el duelo, la música y la biografía se entrelazan como ramas que nunca llegaron a tocarse, pero que vibran juntas.

EN CAMPOS COMO LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA, LA IDEA DE RAMIFICACIÓN MÚLTIPLE RESULTA SUGERENTE



La interpretación del multiverso en *Doctor Strange en el multiverso de la locura* se basa en la existencia de múltiples universos paralelos, cada uno con diferentes versiones de los personajes.

UN GIORDANO BRUNO DEL SIGLO XXI

Aunque ignorada en su tiempo, la visión de Everett ha ido ganando influencia con los años. En el desarrollo de la decoherencia cuántica —proceso por el cual las interferencias entre distintas ramas se anulan a gran escala—, la interpretación de muchos mundos encuentra respaldo físico para explicar por qué los mundos resultantes no se interfieren entre sí. Además, en campos como la computación cuántica, la idea de ramificación múltiple resulta sugerente, pues cada cálculo cuántico puede verse como una exploración paralela de caminos posibles, y algunos divulgadores no han dudado en hablar de «multiverso computacional». Sin embargo, es una metáfora interpretativa, puesto que la teoría estándar explica la aceleración mediante superposición e interferencia, sin exigir universos paralelos.

Más allá de la física, la interpretación de Everett ha calado en la cultura popular. En España son referentes muy reconocibles *Rick y Morty*, *Doctor Strange en el multiverso de la locura* y *Spider-Man: Un nuevo universo*, junto con series como *Dark* y *Fringe*, que han convertido los mundos paralelos en un recurso narrativo habitual y cercano al gran público. Así, sin buscarlo, Everett ha terminado transformándose en una figura mitológica moderna: el físico que pensó en realidades paralelas cuando nadie quería hablar de ellas, y que murió sin saber que su mundo se había multiplicado también en la cultura. A la manera de un Giordano Bruno del siglo XXI. ■

John Bell

REALISMO LOCAL Y
LA DESIGUALDAD MÁS FAMOSA

John Bell



John Stewart Bell nació en Belfast, Irlanda del Norte, el 28 de julio de 1928, en el seno de una familia protestante de clase trabajadora. Fue el segundo de cuatro hermanos y creció en un ambiente modesto, en un barrio obrero donde la precariedad no impedía el rigor educativo ni la curiosidad intelectual. Su padre Jackie vendía caballos y su madre, Annie, era sastre. Entre ambos alentaron desde temprano la inclinación de John hacia el estudio. A los once años ya había decidido que quería ser físico. Lo decía con la seguridad de quien no lo consideraba un sueño, sino una decisión irreversible. Ese entusiasmo precoz no lo abandonaría nunca.

Durante sus años escolares, Bell fue un alumno brillante, especialmente en matemáticas y ciencias. Pero también fue, desde muy joven, un inconformista. Discutía con sus profesores, señalaba errores en los libros de texto y se resistía a aceptar sin más las explicaciones de autoridad. Le interesaban los fundamentos, no los atajos. Ese carácter crítico marcaría toda su carrera posterior. A los 16 años comenzó como auxiliar de laboratorio en el Departamento de Física de Queen's University Belfast y asistió a clases de primer curso; al año siguiente se matriculó y obtuvo un grado en Física Experimental (1948) y otro en Física Matemática (1949). Posteriormente completó su doctorado en la Universidad de Birmingham en 1956,



Bell obtuvo sus grados en Física Experimental y Física Matemática en Queen's University Belfast.

DESDE MUY JOVEN DISCUTÍA CON SUS PROFESORES Y SE RESISTÍA A ACEPTAR SIN MÁS LAS EXPLICACIONES DE AUTORIDAD

bajo la dirección de Rudolf Peierls, en física nuclear y teoría cuántica de campos.

CIENTÍFICO, INGENIERO Y PENSADOR LATERAL

El perfil de Bell desafía los compartimentos académicos: fue físico teórico y experimental, con sólida formación en física matemática y desempeñó trabajo técnico de alto nivel en aceleradores y física de partículas. Su primer empleo fue en el Atomic Energy Research Establishment en Harwell, donde trabajó como físico nuclear en proyectos de energía atómica. Más tarde, en 1960, se trasladó al CERN, donde desarrolló una larga y estable carrera como investigador, centrada principalmente en física de partículas y aceleradores. No obstante, su papel en el CERN fue doble. De día, contribuyó al diseño de haces y detectores. De noche, se transformaba en un pensador abstracto obsesionado por las paradojas de la mecánica cuántica.

Bell nunca ocupó una cátedra universitaria. Nunca dirigió un grupo de investigación. Ni siquiera impartió cursos reglados. Sin embargo, su influencia fue profunda y transversal. Trabajaba en solitario, sin prisas ni presiones, y cultivaba una escritura sobria, afilada, con la lógica impecable de un matemático que desconfía tanto de las interpretaciones vagas como de las modas científicas. Para muchos, fue un *outsider* dentro del sistema, alguien que supo ganar prestigio institucional sin necesidad de pertenecer al círculo académico dominante.

UN HOMBRE DE CONVICCIONES FIRMES

En 1954, John Bell se casó con Mary Ross, también física y colega suya en Harwell. Fue una relación igualitaria, intelectual y profundamente afectiva. Mary fue su primera lectora y crítica constante. No tuvieron hijos, pero compartieron una vida de colaboración, discusiones científicas y caminatas largas por el campo, donde Bell encontraba la serenidad necesaria para reflexionar. Sus vacaciones solían incluir libros técnicos y libretas llenas de anotaciones. La física no era para él un

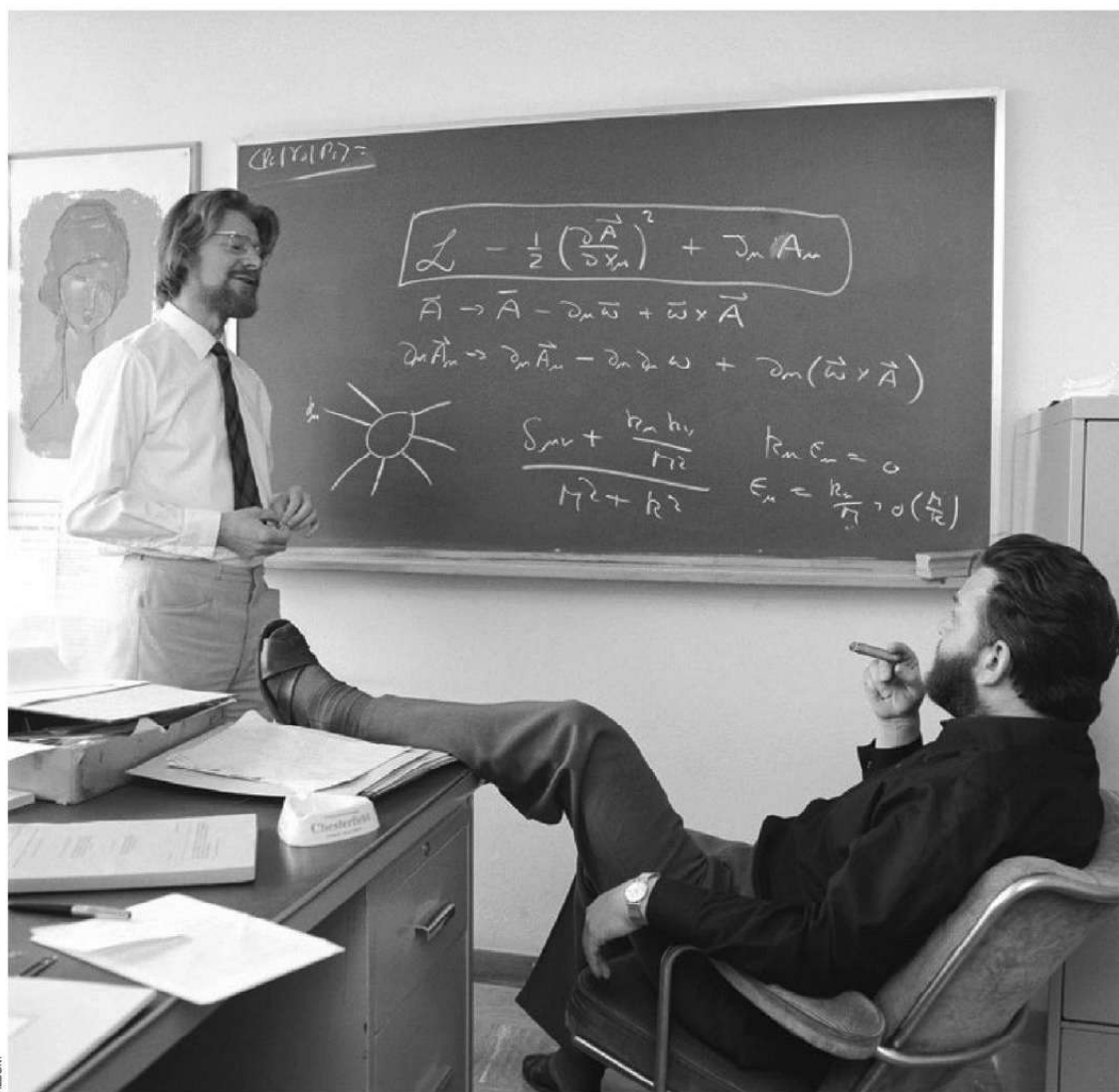


Bell completó su doctorado en la Universidad de Birmingham en 1956.

SU CANDIDATURA AL PREMIO NOBEL DE FÍSICA HABÍA SIDO PROPUESTA EN 1990, EL MISMO AÑO EN QUE MURIÓ

trabajo, era una forma de estar en el mundo. Bell fue un defensor acérrimo de la claridad conceptual en ciencia. Tenía opiniones firmes sobre la educación, la ética científica y la necesidad de honestidad intelectual. Admiraba a Albert Einstein y a Erwin Schrödinger, pero también a David Bohm, cuyo enfoque determinista —tan marginado por la ortodoxia cuántica— despertaba en él un respeto silencioso. Aunque su educación fue religiosa, su pensamiento maduro fue inequívocamente secular. No le interesaban las verdades reveladas, sino las que podían ser sometidas a lógica, contraste y refutación.

En los años ochenta, cuando la desigualdad de Bell empezó a tener impacto en los experimentos reales, el nombre de John Bell empezó a sonar más allá



John Stuart Bell (a la izquierda) y Martinus Veltman en el CERN, en 1973.

Mary Ross: colaboradora silenciosa

Cuando se repasa la biografía de John Bell, rara vez se menciona con detalle a Mary Ross Bell, su esposa y cómplice intelectual durante casi cuatro décadas. Mary también era física. Se formó en la Universidad de Glasgow y coincidió con John en el laboratorio de energía atómica de Harwell, donde ambos trabajaban en problemas de ingeniería nuclear. Se casaron en 1954, compartiendo desde entonces no solo la vida doméstica, sino una inquietud científica profunda por los fundamentos de la física. A diferencia de muchas parejas de científicos de su tiempo, los Bell se relacionaban como interlocutores intelectuales en plano de igualdad. John la consideraba su primera lectora y consultora de confianza. Aunque Mary no firmó artículos junto a él, revisaba sus manuscritos, discutía con él los modelos alternativos a la mecánica cuántica dominante y compartía su frustración con la interpretación de Copenhague. En entrevistas personales, John Bell reconoció que muchas de sus ideas sobre realismo y causalidad fueron contrastadas primero con ella.



ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:



del círculo de filósofos y teóricos de la cuántica. Conferencias, entrevistas y homenajes comenzaron a multiplicarse. Sin embargo, el reconocimiento generalizado llegó demasiado tarde. El 1 de octubre de 1990, John Bell murió inesperadamente de una hemorragia cerebral en Ginebra, con apenas 62 años. Su candidatura al Premio Nobel de Física había sido propuesta ese mismo año. Muchos consideran que su muerte prematura truncó un merecido galardón.

LA FAMOSA DESIGUALDAD DE BELL

Hoy, el nombre de John Bell está inseparablemente unido a una pregunta tan antigua como la cuántica misma: ¿puede el mundo ser descrito por teorías locales y realistas? A mediados del siglo XX, la interpretación de Copenhague dominaba sin fi-

SI LOS EXPERIMENTOS CONFIRMABAN LAS PREDICCIONES CUÁNTICAS, EL MUNDO TENÍA QUE SER NO LOCAL O NO REALISTA

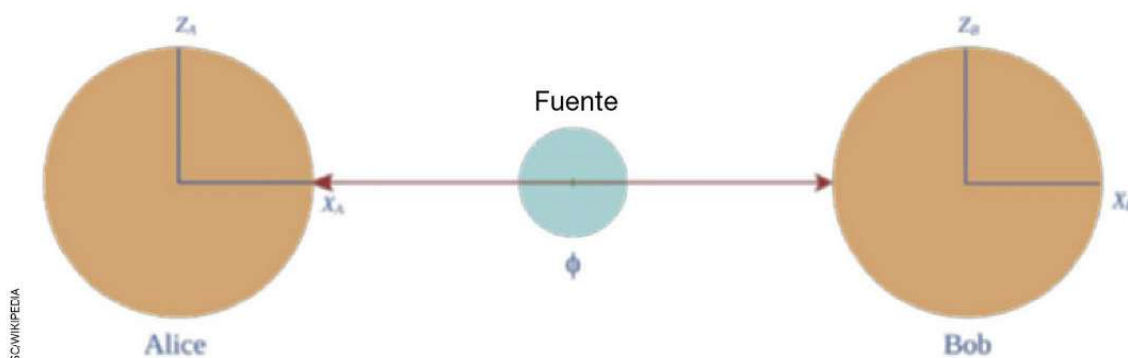


David Bohm.

suras la enseñanza y práctica de la mecánica cuántica. El mensaje era claro: la función de onda no describe una realidad física, sino nuestras probabilidades de observación. Cualquier intento de ir más allá —de explicar qué es un electrón cuando no lo estamos midiendo— era tildado de metafísico, o sencillamente irrelevante. Para muchos físicos, el debate entre Einstein y Bohr había terminado en los años treinta. Sin embargo, John Bell no lo veía así.

Desde joven, John Bell quedó profundamente impresionado por los escritos de Albert Einstein sobre la incompletitud de la teoría cuántica, y más aún por la alternativa propuesta en 1952 por David Bohm. Una teoría determinista y no local que recuperaba una descripción objetiva del mundo. Bell, con su talento natural para detectar fallas lógicas, quedó desconcertado por el rechazo casi unánime que sus colegas mostraban hacia esta posibilidad. Si la teoría de Bohm funcionaba matemáticamente y reproducía los resultados de la mecánica cuántica, ¿por qué entonces se descartaba como si fuera una herejía?

La gran contribución de John Bell llegó en 1964, con la publicación de un artículo breve, técnico y silenciosamente revolucionario titulado *Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen*. El teorema de Bell muestra que ningún modelo que combine variables ocultas y localidad puede reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica. Dicho sencillamente: si asumimos (1) que los resultados ya estaban fijados por «causas» no descritas por la teoría —realismo— y (2) que lo que hacemos en un laboratorio no cambia de forma inmediata lo que ocurre en otro laboratorio distante —localidad—, entonces ciertas correlaciones entre las



Experimento de la paradoja EPR con pares positrón-electrón. Una fuente en el centro envía electrones a Alice (izda.) y positrones a Bob (dcha.), que puede realizar mediciones.

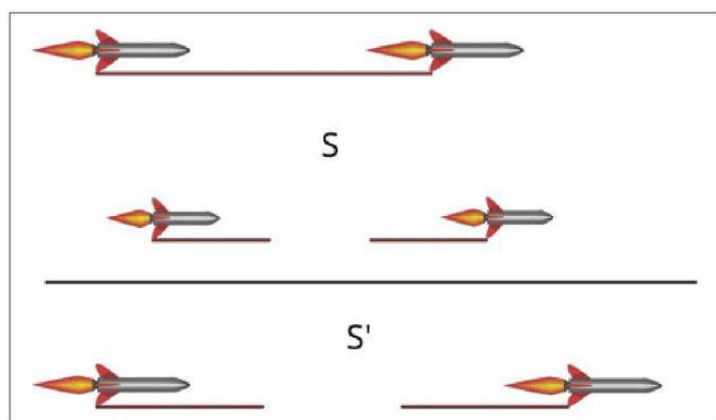
medidas deben respetar un límite matemático. La cuántica predice y observa correlaciones que sobrepasan ese límite, así que al menos una de esas dos ideas (realismo o localidad) no puede mantenerse.

La desigualdad de Bell no era un mero artificio lógico. Era una herramienta concreta para someter a prueba empírica la vieja intuición de Einstein: que la física cuántica debía de ser incompleta y que debía existir una teoría subyacente que restaurara la causalidad local. Lo extraordinario es que la mecánica cuántica violaba dicha desigualdad. En otras palabras: si los experimentos confirmaban las predicciones cuánticas, el mundo tenía que ser no local o no realista. Lo que Bell había hecho era transformar un dilema filosófico en una pregunta experimental. Había convertido el debate entre Einstein y Bohr en ciencia falsable.

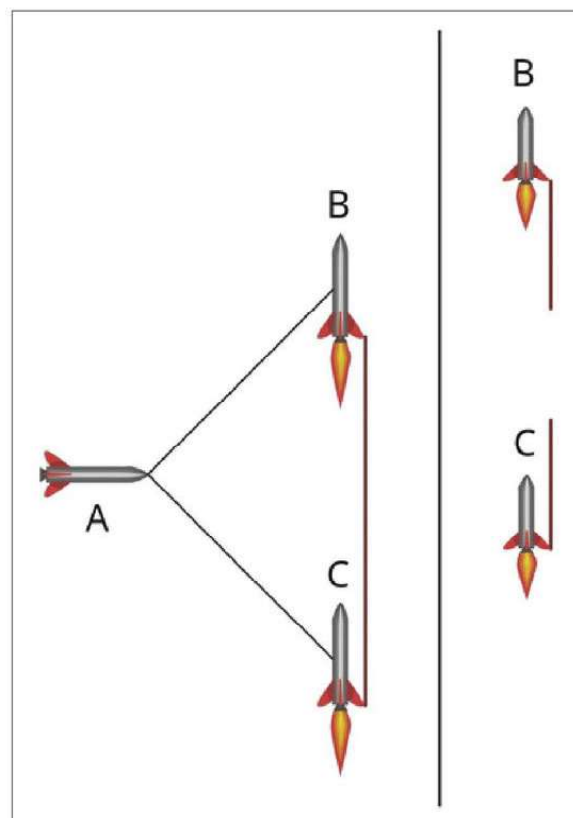
La paradoja de las naves de Bell

Imaginemos dos naves inmóviles una detrás de la otra, unidas por un hilo, y que comienzan a acelerar «a la par» según un observador externo. A primera vista parecería que nada debería pasarle al hilo. Sin embargo, cuando se analiza con cuidado, la separación «propia» entre las naves (la que medirían en sus marcos de reposo instantáneos) aumenta durante la aceleración, mientras que el hilo intenta conservar su longitud propia, en consecuencia aparece tensión y el hilo se rompe. La lección es que la contracción y las distancias en relatividad especial no son solo «cuestión de perspectiva», sino que tienen consecuencias físicas medibles.

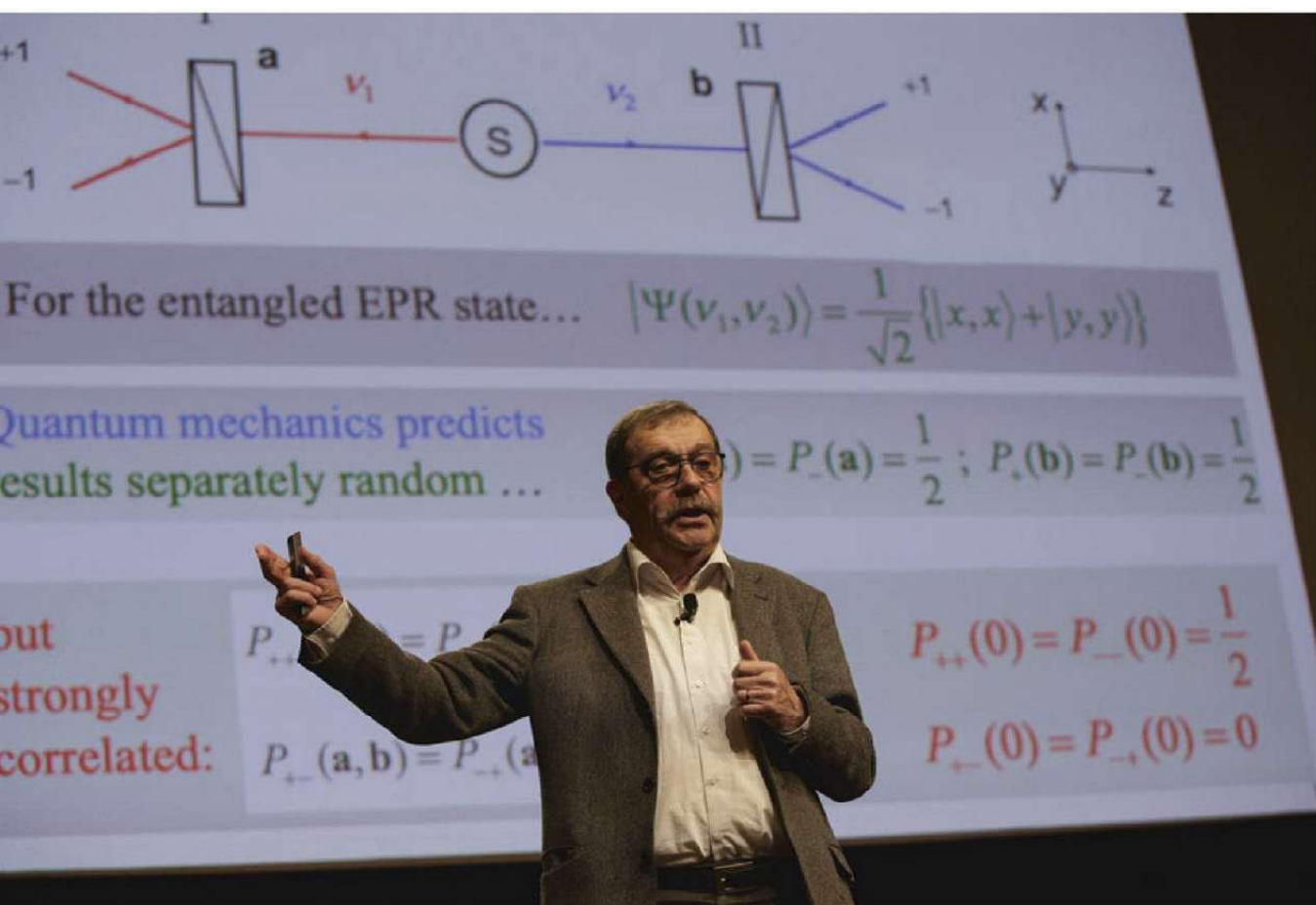
Bell usó este ejemplo para enseñar relatividad especial y subrayar, sin fórmulas, dónde nos engaña la intuición newtoniana. Si dos objetos aceleran «igual» vistos desde fuera, no por ello mantienen su distancia propia; para que no se rompa el hilo, las aceleraciones tendrían que estar «coreografiadas» de forma distinta (régimen de rigidez de Born).



La paradoja de Bell es un problema clásico de relatividad especial, que fue planteado originalmente en el bar del CERN.



BELL VALORABA LA CLARIDAD DE LA FORMULACIÓN DE BOHM Y LA DEFENDÍA COMO ALTERNATIVA REALISTA DIGNA DE ESTUDIO



El físico francés Alain Aspect explicando su experimento sobre la desigualdad de Bell.

Durante años, la desigualdad de Bell fue discutida casi exclusivamente en círculos filosóficos. Pero a partir de los años setenta, comenzaron a diseñarse experimentos capaces de ponerla a prueba. El pionero fue el francés Alain Aspect, quien en 1982 logró realizar un test convincente usando correlaciones entre fotones polarizados, aunque una década antes ya había antecedentes de mano de John Clauser y Stuart Freedman. El resultado de Aspect fue claro, la naturaleza viola la desigualdad de Bell. O bien no hay propiedades físicas independientes del acto de medición, o bien hay una forma de conexión instantánea entre partículas alejadas.

La revolución conceptual fue inmensa, aunque durante un tiempo permaneció semioculto bajo el radar de la física más aplicada. Bell, en todo caso, no militaba en ninguna trinchera. No defendía que el mundo fuera no local o que las partículas tuvieran trayectorias ocultas. Lo que defendía era más incómodo, que debíamos estar dispuestos a examinar nuestras premisas si queríamos entender qué nos decía la cuántica sobre la realidad. Lo cierto es que Bell valoraba la claridad de la for-

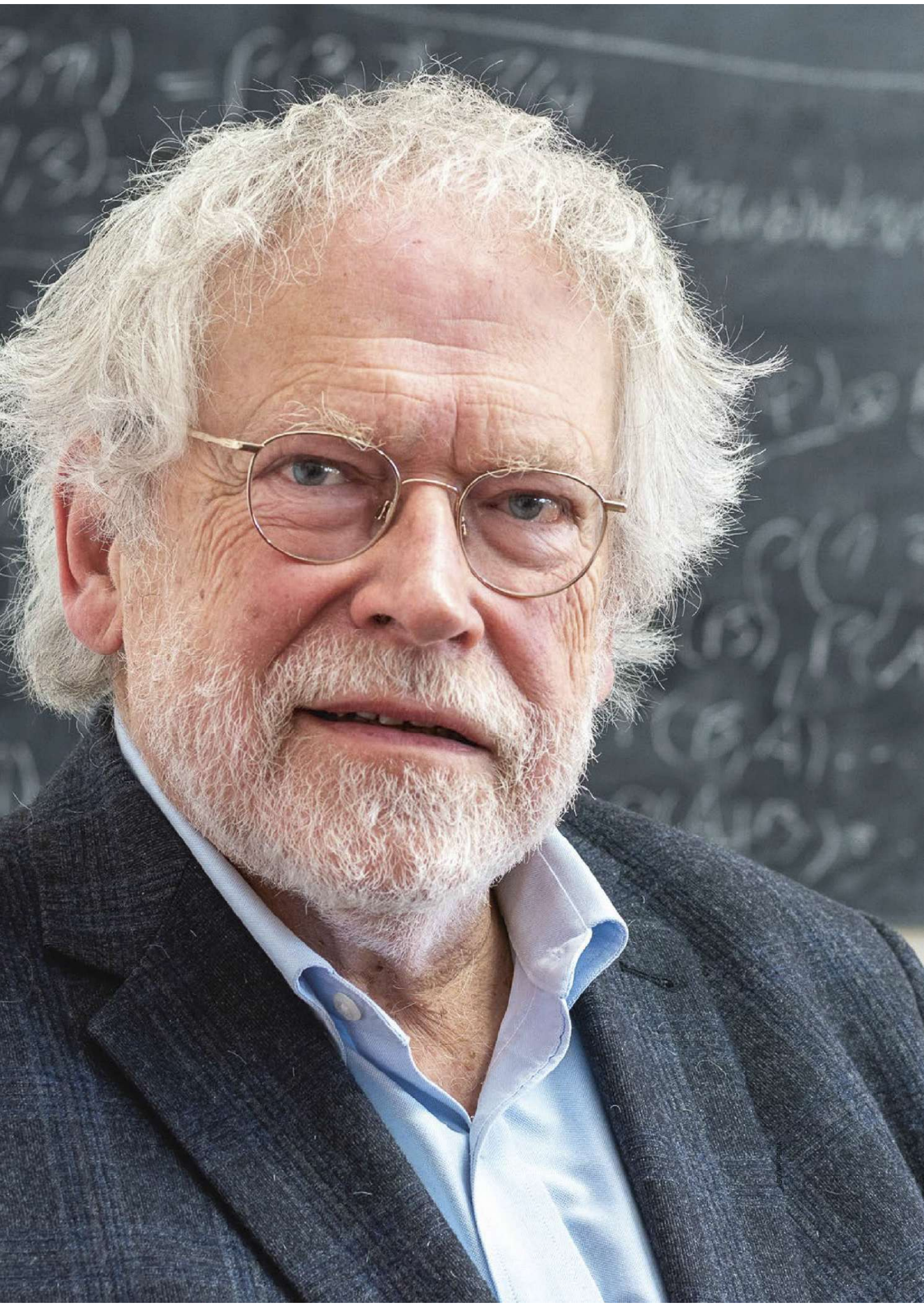


Bell exponiendo su teoría en el CERN (Org. Europea para la Investigación Nuclear) en 1982.

mulación de Bohm y la defendía como alternativa realista digna de estudio, pero no se consideraba «bohmiano».

El trabajo de Bell no se limitó a una fórmula. En varios artículos posteriores, fue refinando sus ideas y explorando implicaciones más sutiles. Propuso versiones generalizadas de su desigualdad, analizó el papel de las «variables ocultas» y criticó duramente el carácter vago de la interpretación de Copenhague. También contribuyó al desarrollo de los llamados «teoremas sin desigualdad», como los de Kochen-Specker, que profundizan en la incompatibilidad entre realismo y teoría cuántica.

En paralelo, siguió contribuyendo al CERN con desarrollos técnicos y cálculos brillantes en teoría cuántica de campos, una faceta menos conocida pero igualmente admirable. Su capacidad para conectar las cuestiones más abstractas con las más prácticas era única. No pertenecía ni a la física filosófica ni a la técnica, se movía en los márgenes, trazando puentes. ■



Anton Zeilinger

EL MAGO
DEL ENTRELAZAMIENTO

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Zeilinger' in a stylized, cursive script.

Anton Zeilinger nació el 20 de mayo de 1945, en la ciudad austriaca de Ried im Innkreis, poco después del final de la Segunda Guerra Mundial. Su infancia transcurrió en Wolfpassing y Steinakirchen am Forst, y en 1955 su familia se trasladó a Viena, donde continuó sus estudios. Hijo de un ingeniero y de una pianista aficionada, Zeilinger desarrolló desde niño un equilibrio curioso entre la disciplina técnica y la imaginación artística. Desde niño mostró una curiosidad obstinada por entender cómo funcionan las cosas; ya de adulto ha cultivado un vínculo intenso con la música, participando en diálogos y ciclos dedicados a Bach y otros compositores.

«Vivíamos en el campo, en un pequeño castillo...», recuerda en una entrevista en la página oficial de los Premios Nobel. De aquellos años subraya algo que, dice, le acompañó desde siempre: «Incluso de niño, quería saber cómo funcionan las cosas». Añade una imagen muy vívida: «Me sentaba en el segundo piso del castillo y miraba hacia fuera todo el tiempo».

En otra conversación aporta más contexto de posguerra: «Crecí después de la Segunda Guerra Mundial en Austria... Vivíamos en la zona soviética... Nos alojaron en el tercer piso de un castillo en un pequeño pueblo». Sus padres tomaron una medida peculiar para un niño tan curioso: «Pusieron barrotes en la ventana y me ataban a ellos con un arnés. Me quedaba colgando de la ventana durante horas, observando vacas y a la gente de abajo».



Anton Zeilinger estudió Física y Matemáticas en la Universidad de Viena de 1963 a 1971, doctorándose bajo la supervisión de Helmut Rauch.



De izda. a dcha., Helmut Rauch, supervisor de la tesis de Zeilinger; John Clauser y Alain Aspect, a quienes conoció durante su paso por Estados Unidos.

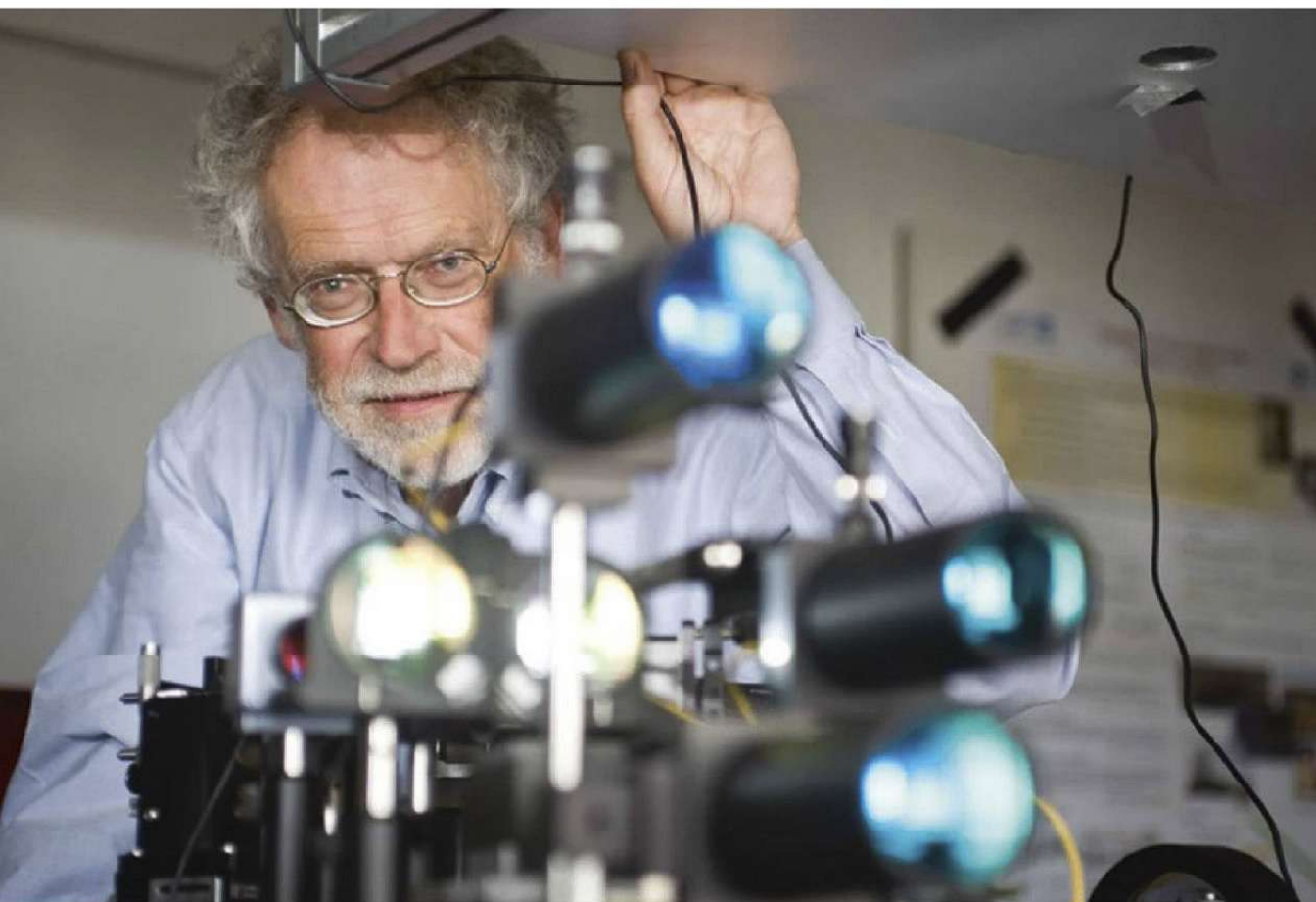
Esa curiosidad no se quedó en mirar: «Solía desmontar todo lo que podía. Como las muñecas de mi hermana... quería saber cómo funcionaban, y nunca volvía a montar las cosas». Ya en la adolescencia, recuerda un impulso clave: «Mi padre me regaló un microscopio a los 14 años, y jugué con él».

La mudanza a Viena encauzó esa inclinación con buenos modelos y un ambiente propicio: «Tuve un profesor fantástico de física... estaba claramente entusiasmado con lo que nos enseñaba»; y, mirando en retrospectiva, se siente «muy afortunado por haberme formado en Viena», una ciudad con «un espíritu de apertura a las preguntas muy fundamentales, donde la idea de que algo deba ser útil es secundaria».

EL MAESTRO DE LOS EXPERIMENTOS IMPOSIBLES

Tras estudiar Física y Matemáticas en la Universidad de Viena, se doctoró en 1971 bajo la supervisión de Helmut Rauch, un pionero en interferometría con neutrones. Su tesis versaba sobre experimentos con haces de neutrones y lo llevó a trabajar durante varios años en reactores nucleares e instalaciones experimentales, donde se acostumbró a pensar con las manos. Era un físico experimental que construyó interferómetros —incluido uno para neutrones muy fríos—, diseñó y ajustó dispositivos de óptica cuántica y lideró montajes históricos, como la teleportación cuántica de 1997.

SU TESIS LO LLEVÓ A TRABAJAR DURANTE VARIOS AÑOS EN REACTORES NUCLEARES E INSTALACIONES EXPERIMENTALES



Zeilinger y su grupo lograron entrelazar fotones a distancias récord.

Su paso por Estados Unidos, en particular por el MIT y el College of France, amplió sus horizontes. Conoció a físicos como John Clauser, Alain Aspect y Daniel Greenberger, que le hablaron de un experimento que aún parecía ciencia ficción. Se trataba de medir correlaciones entre partículas entrelazadas separadas por kilómetros. Zeilinger comprendió que esa no era solo una rareza teórica, sino una ventana radical al modo en que funciona la realidad.

Durante décadas, Zeilinger convirtió la ciudad de Viena en uno de los epicentros mundiales de la investigación cuántica. Cofundó el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica de la Academia Austríaca de Ciencias y, al frente de su sede de Viena, formó un equipo de jóvenes investigadores con el que impulsó algunos de los experimentos más influyentes de la física cuántica reciente.

Uno de sus sellos distintivos ha sido convertir en realidad lo que otros pensaban que era inviable. No solo replicó y mejoró los experimentos de Aspect para verificar las desigualdades de Bell, sino que los llevó más lejos: logró entrelazar fotones a distancias récord, transmitir estados cuánticos mediante teleportación cuántica, e incluso enviar información cuántica entre islas del mar Adriático. Su equipo fue el primero en realizar una teleportación cuántica entre dos ciudades y en usar satélites para extender el entrelazamiento a cientos de kilómetros.

Zeilinger no es solo un científico riguroso, sino también un narrador cautivador. Explica sus experimentos como quien cuenta un truco de magia, sin es-

ZEILINGER CONVIRTIÓ LA CIUDAD DE VIENA EN UNO DE LOS EPICENTROS MUNDIALES DE LA INVESTIGACIÓN CUÁNTICA

conder la dificultad, pero revelando poco a poco el asombro. En conferencias y entrevistas ha usado metáforas literarias, juegos visuales y hasta referencias a Borges para explicar el carácter paradójico del mundo cuántico. En una entrevista tras ser galardonado con el Nobel, dijo: «Podemos observar la realidad, podemos tomar medidas, pero no creo que podamos decir nada sobre la esencia de la realidad». ¿Qué mejor forma de expresar esta paradoja cuántica?

PREMIO NOBEL Y DESPEDIDA DE LOS LABORATORIOS

En 2022, cuando muchos pensaban que su carrera ya había dado lo mejor de sí, recibió el Premio Nobel de Física junto a John Clauser y Alain Aspect. Fue un reconocimiento tardío pero merecido, no solo a sus resultados, sino a su estilo de hacer ciencia: meticuloso, valiente, poético.

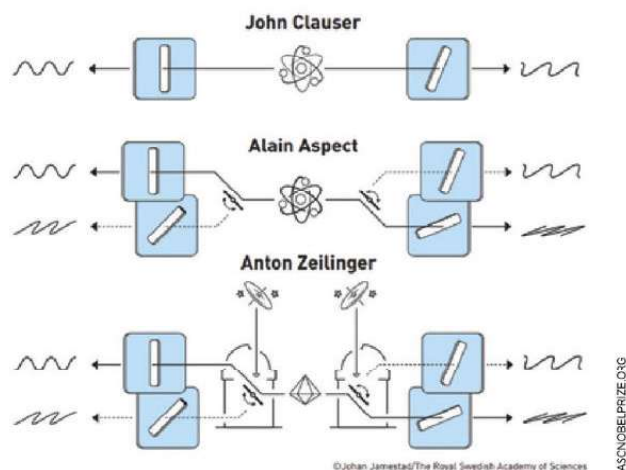
Tras el Nobel, Zeilinger mantuvo una agenda intensa de charlas y actos académicos y subrayó la importancia de seguir ideando «nuevos experimentos



Anton Zeilinger durante una conferencia de prensa tras recibir el Premio Nobel de Física en 2022.

Violación de las desigualdades de Bell: cerrar todas las puertas

La interpretación ortodoxa de la física cuántica afirma que no existen variables ocultas que determinen los resultados de los experimentos de forma local. Para demostrarlo empíricamente se recurre a las desigualdades de Bell: si estas se violan en una medición,



Para evitar el resquicio de la libre elección, Zeilinger decidió usar fotones emitidos hace unos 7800 millones de años por cuásares.

entonces el mundo no puede ser descrito por teorías locales con variables ocultas. Zeilinger no se conformó con violar las desigualdades de Bell, sino que fue cerrando, una a una, todas las «lagunas» que podrían permitir a las explicaciones clásicas colarse por la puerta trasera. Redujo la llamada «laguna de detección», aumentó la separación espacial entre detectores, sincronizó relojes con precisión nanosegundo y recurrió a generadores de números aleatorios cósmicos, como la luz de estrellas lejanas, para garantizar que las elecciones de medición fueran libres. La culminación de estos experimentos no fue una «prueba» fi-

nal contra el realismo local, pero sí el acercamiento más limpio y convincente que la ciencia ha logrado hasta la fecha para mostrar que el entrelazamiento cuántico es un fenómeno profundamente no local, como había anticipado John Bell.

fundamentales», agradeciendo de forma habitual el trabajo de sus estudiantes y colaboradores, sin constar una dedicatoria formal concreta.

En el corazón de los experimentos de Zeilinger hay una pregunta que obsesiona a la física desde sus inicios cuánticos: ¿existe una realidad independiente de nuestras mediciones? Durante décadas, esta cuestión fue vista como filosófica, casi impertinente para muchos físicos experimentales. Zeilinger, en cambio, la convirtió en un problema técnico, de laboratorio. Su apuesta era sencilla en apariencia y radical en consecuencias: si las leyes de la cuántica afirman que el resultado de una medida no existe antes de ser medido, entonces eso debe poder comprobarse de forma empírica. La realidad no como una suposición, sino como una pregunta experimental.

**LA PREGUNTA EN EL CORAZÓN DE
SUS EXPERIMENTOS ES: ¿EXISTE UNA REALIDAD
INDEPENDIENTE DE NUESTRAS MEDICIONES?**



El Premio Nobel de Física 2022 fue otorgado conjuntamente a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por sus experimentos con fotones entrelazados.

Para ello, se apoyó en el entrelazamiento cuántico, un fenómeno predicho por la teoría, esbozado por Einstein, Podolsky y Rosen en 1935 y confirmado parcialmente en los años 70 y 80 por Clauser y Aspect. Zeilinger llevó este fenómeno al límite técnico. Para ello, diseñó nuevas fuentes de pares de fotones entrelazados, mejoró la eficiencia de detección y diseñó esquemas de interferometría cuántica con una precisión sin precedentes.

TELEPORTACIÓN CUÁNTICA: SIN TRAYECTO PERO CON DESTINO

Una de las hazañas más icónicas del grupo de Zeilinger fue la primera teleportación cuántica de un estado de fotón, realizada en 1997. Este logro se basaba en una idea profundamente contraria a la intuición clásica. Se trata de la posibilidad de transferir el estado cuántico de una partícula a otra sin que nada «viaje» físicamente entre ambas. No se trata de mover la partícula, sino de trasladar su información cuántica a una partícula distante.

El procedimiento requiere tres elementos: una fuente de pares entrelazados, una partícula cuyo estado se desea transferir y un protocolo de medición específico que «rompe» el entrelazamiento en un lado para reconstituirlo en el



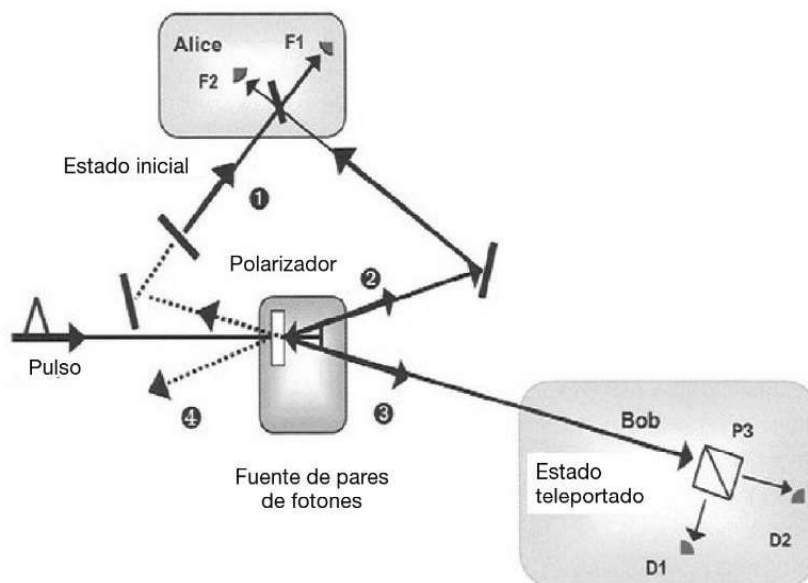
ISTOCK

Criptografía cuántica: la huella de Zeilinger en la seguridad del siglo XXI

Aunque Anton Zeilinger no inventó la criptografía cuántica, fue uno de los primeros en demostrar que sus principios eran más que una curiosidad teórica. En los años noventa, junto a su equipo, llevó a cabo algunas de las primeras pruebas de concepto que aplicaban el entrelazamiento cuántico a la distribución de claves secretas entre dos usuarios remotos, lo que hoy se conoce como QKD («Quantum Key Distribution», en español «Distribución cuántica de claves»). Estos experimentos no solo confirmaron la validez de los principios teóricos, sino que demostraron que era posible implementarlos en condiciones reales, con fibras ópticas comerciales y detectores disponibles fuera del laboratorio.

A partir de estas bases, se abrieron múltiples caminos. En 2004, se logró por primera vez transmitir claves cuánticas entre dos bancos suizos a través de la red de Zurich. Años más tarde, se consolidaron enlaces cuánticos seguros entre sedes gubernamentales, y la Unión Europea lanzó proyectos piloto para extender la infraestructura cuántica a nivel continental, con Viena como uno de los nodos clave. Zeilinger no solo aportó tecnología, pues también ayudó a cimentar la legitimidad científica del uso del entrelazamiento como garantía de seguridad absoluta.

**HA DEFENDIDO QUE LA INFORMACIÓN
CUÁNTICA NO ES UN SUBPRODUCTO, SINO EL
CORAZÓN MISMO DE LA TEORÍA**



Durante la teleportación, un fotón inicial que lleva la polarización que se va a transferir y uno de un par de fotones entrelazados se someten a una medición tal que el segundo fotón del par entrelazado adquiere la polarización del fotón inicial.

otro. La teleportación no viola ninguna ley de la física, es decir, ni supera la velocidad de la luz ni permite enviar información más rápido que esta. En cambio, sí demuestra que las propiedades cuánticas no están ligadas al soporte físico que las contiene. De esta forma, el estado cuántico, en este sentido, es más una relación que una propiedad.

Desde entonces, Anton Zeilinger y su equipo han refinado la técnica hasta lograr teleportación de fotones entre islas separadas por varios kilómetros e incluso en enlaces tierra-satélite, acercando mucho más la posibilidad de una futura internet cuántica global.

Zeilinger ha defendido que la información cuántica no es un subproducto, sino el corazón mismo de la teoría. De alguna manera es como afirmar que el universo no está hecho de cosas, sino de relaciones, y que toda medida en cuántica es, en el fondo, una decisión de qué mundo habitar. Esta visión filosófica no lo ha alejado en ningún momento del rigor experimental. Al contrario, pues sus experimentos han demostrado que la física cuántica no es solo un modelo eficaz, sino un lenguaje preciso para describir las restricciones que la naturaleza impone a lo que podemos saber.

A medida que las tecnologías cuánticas avanzan, el trabajo de Zeilinger adquiere nuevas resonancias. La idea de usar entrelazamiento para construir redes cuánticas, ordenadores tolerantes a errores o telescopios distribuidos cuánticamente tiene su semilla en sus experimentos. Y su enfoque experimental, metódico pero lúdico, ha inspirado a nuevas generaciones de físicos a pensar en la realidad no como un dato, sino como un resultado. Como escribió alguna vez: «La física cuántica no dice que el mundo sea extraño. Dice que somos nosotros los que apenas hemos empezado a entender qué significa ver». ■

BIBLIOGRAFÍA

PLANCK

- Darrigol, O. (1992). *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*. University of California Press.
- Kragh, H. (2002). *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton University Press.
- Heilbron, J. L. (2000). *The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck and the Fortunes of German Science*. Harvard University Press.

EINSTEIN

- Pais, A. (1982). *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- Fine, A. (1986). *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*. Univ. of Chicago Press.
- Howard, D. (1985). *Einstein on Locality and Separability*. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 16(3), 171–201.

MILEVA MARIC

- Renn, J., & Schulmann, R. (Eds.). (1992). *Albert Einstein/Mileva Maric: The Love Letters*. Princeton University Press.
- Stachel, J. (2002). *Einstein from B to Z*. Birkhäuser.
- Highfield, R., & Carter, P. (1993). *The Private Lives of Albert Einstein*. Faber & Faber.

BOHR

- Stachel, J. (2002). *Einstein from B to Z*. Birkhäuser.
- Highfield, R., & Carter, P. (1993). *The Private Lives of Albert Einstein*. Faber & Faber.

NOETHER

- Rowe, D. E., & McCleary, J. (Eds.). (2020). *Emmy Noether – Mathematician Extraordinaire*. Springer.
- Kosmann-Schwarzbach, Y. (2011). *The Noether Theorems: Invariance and Conservation Laws in the Twentieth Century*. Springer.
- Weyl, H. (1935). *Emmy Noether*. *Scripta Mathematica*, 3, 201–203.

PAULI

- Enz, C. P. (2002). *No Time to be Brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli*. Oxford: Oxford University Press.
- Kragh, H. (1990). *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mehra, J., & Rechenberg, H. (1982–2001). *The Historical Development of Quantum Theory (Vols. 1–6)*. New York: Springer.
- Pais, A. (1986). *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford: Clarendon Press.
- Laurikainen, K. V. (1988). *Beyond the Atom: The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*. Berlin: Springer-Verlag.

HEISENBERG

- Cassidy, D. C. (1992). *Uncertainty: The Life and Science*

of Werner Heisenberg. New York: Freeman.

- Heilbron, J. L. (2000). *The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck and the Fortunes of German Science*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Kragh, H. (1999). *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Walker, M. (1989). *German National Socialism and the Quest for Nuclear Power, 1939–1949*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gomberoff, A. (2003). *Werner Heisenberg y la interpretación de Copenhague*. *Revista de la Sociedad Chilena de Física*, 2(1).

SCHRÖDINGER

- Moore, W. J. (1989). *Schrödinger: Life and Thought*. Cambridge University Press.
- Segrè, G. (2007). *Faust in Copenhagen: A Struggle for the Soul of Physics*. Viking.
- Gribbin, J. (1984). *In Search of Schrödinger's Cat: Quantum Physics and Reality*. Bantam Books.
- Kragh, H. (1999). *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton Univ. Press.

DIRAC

- Farmelo, G. (2009). *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac*. Faber & Faber.
- Kragh, H. (1990). *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge University Press.

MARIE CURIE

- Quinn, S. (1997). *Marie Curie: Una vida*. Crítica.
- Goldsmith, B. (2006). *Obsesión radiactiva: Marie Curie y su mundo*. Barcelona: Andrés Bello.
- Pasachoff, N. (1996). *Marie Curie and the Science of Radioactivity*. Oxford: Oxford University Press.

MEITNER

- Sime, R. L. (1996). *Lise Meitner: A Life in Physics*. University of California Press.
- Rife, P. (1999). *Lise Meitner and the Dawn of the Nuclear Age*. Birkhäuser.

MAYER

- Gom, M. H. (1998). *Maria Goeppert Mayer: Pioneer of the Nuclear Shell Model*. U.S. Department of Energy.
- Heilbron, J. L. (2003). *The Oxford Companion to the History of Modern Science*. Oxford: Oxford University Press.
- Herrick, L. (1996). *Women in Physics: The Role of Maria Goeppert Mayer*. The Physics Teacher.
- Beyer, C. (2012). *Maria Goeppert-Mayer: Pionera de la física nuclear*. *Physics Today* (edición en español), marzo.

FEYNMAN

- Gleick, J. (1992). *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*. Pantheon Books.
- Krauss, L. M. (2011). *Quantum Man: Richard Feynman's Life in Science*. W. W. Norton & Company.

- Gribbin, J., & Gribbin, M. (1997). *Richard Feynman: A Life in Science*. Dutton Books.
- Feynman, M. (2005). *Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Track: The Letters of Richard P. Feynman*. Basic Books.

SCHWINGER

- Mehra, J., & Rechenberg, H. (2001). *The Historical Development of Quantum Theory (Vol. 6)*. Springer.
- Schweber, S. S. (1994). *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton University Press.
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. University of Chicago Press.

DYSON

- Mehra, J., & Rechenberg, H. (2001). *The Historical Development of Quantum Theory (Vol. 6)*. Springer.
- Schweber, S. S. (1994). *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton University Press.
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. University of Chicago Press.

CHIEN-SHIUM

- Chen, L. (2022). *Chien-Shiung Wu and the Broken Mirror: Legacy of a Forgotten Heroine*. Physics Today, 75(10), 38–44.
- Shen, H. (2006). *The Invisible Scissors: Gender and Science in Twentieth-Century China*. Isis, 97(3).
- Liu, J. (2010). *Chien-Shiung Wu: Pionera de la física moderna*. En Rossiter, M. W., *Women Scientists in America* (pp. 212–229). Baltimore: Johns Hopkins.

BOHM

- Bohm, D. (1990). *On dialogue*. D. Bohm Seminars.

- Bohm, David. (1988). *La totalidad del orden implicado*. Editorial Kairós.

EVERETT III

- DeWitt, B. S., & Graham, N. (Eds.). (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton University Press.
- Byrne, P. (2010). *The Many Worlds of Hugh Everett III*. Oxford University Press.
- Barrett, J. A. (1999). *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. Oxford University Press.
- Deutsch, D. (1997). *The Fabric of Reality*. London: Allen Lane.
- Carroll, S. (2019). *Something Deeply Hidden*. New York: Dutton.

BELL

- Whitaker, A. (2006). *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*. Cambridge University Press.
- Maudlin, T. (2011). *Quantum Non-Locality and Relativity*. Wiley-Blackwell.
- Kumar, M. (2008). *Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate About the Nature of Reality*. Icon Books.
- Davies, P. C. W., & Brown, J. R. (Eds.). (1986). *The Ghost in the Atom*. Cambridge University Press.

ZEILINGER

- Ball, P. (2022). *The Quantum Laureates. Nature Physics*, 18, 1311–1313.
- Chadwick, A. (2022). *Anton Zeilinger: El mago cuántico. Investigación y Ciencia*, octubre 2022.
- Kaiser, D. (2022). *Quantum Information Wins the Nobel. Physics Today*, 75(12), 16–18.
- Zeilinger Group. (2022). *Anton Zeilinger: Selected Highlights*. Austrian Academy of Sciences.

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:



REDACCION

Directora: **Carmen Sabalete** (csabalete@zinetmedia.es)
 Subdirectora: **Cristina Enriquez** (cenriquez@zinetmedia.es)
 Coordinador de Diseño: **Oscar Alvarez**

Muy Interesante Digital:

Christian Pérez (cperez@zinetmedia.es)

Autor de los textos:

Eugenio Manuel Fernández Aguilar

Colaboradores: **Carolina Díaz** (edición y corrección),

Ana Belén Sánchez Laguna (edición gráfica)

Andrés Pérez (maquetación).

DIRECCION Y TELEFONO

C/ Alcalá 79 1º A - 28009 Madrid; tel.: 810 58 34 12

Suscripciones: suscripciones@zinetmedia.es



Consejera Delegada: **Marta Ariño**

Director General Financiero: **Carlos Franco**

Director Comercial: **Alfonso Juliá** (ajulia@zinetmedia.es)

Brand Manager: **Marta Espresale** (mespresale@zinetmedia.es)

Editada por **Zinet Media Global, S.L.**

Distribuidor exclusivo en España: Logista Publicaciones

Distribuidor exclusivo en México: Sefeco México, S.A. de C.V., con domicilio en calle Corona No. 23, Colonia Cervecería Modelo, Municipio Naucalpan de Juárez, Estado de México, CP. 53330. Tel. (55) 7586 5532.

Número de Certificado de Reserva de derechos al uso exclusivo del Título MUY INTERESANTE: 04-2025-011715474400-102 de fecha 17 de enero de 2025 ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

IMPRESO EN ESPAÑA. EDICION: 01/2026

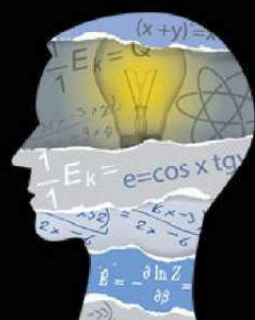
Esta publicación es miembro de la Asociación de Revistas de Información (ARI).



Depósito Legal: M-4343-2020. ISSN 1130 - 4081 © Copyright 2017 Zinet Media Global, S.L. Prohibida su reproducción total o parcial sin autorización expresa de la empresa editora.

**«La ciencia no conoce
patria ni género.
Solo pregunta si algo es
verdadero o falso»**

Chien-Shiung Wu (1912-1997),
física estadounidense nacida en China,
experta en radiactividad



muy
INTERESANTE