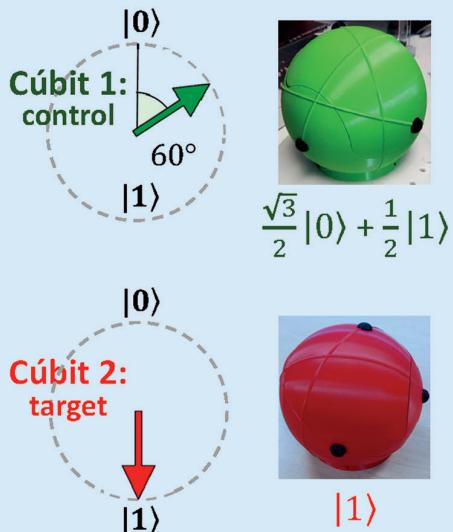
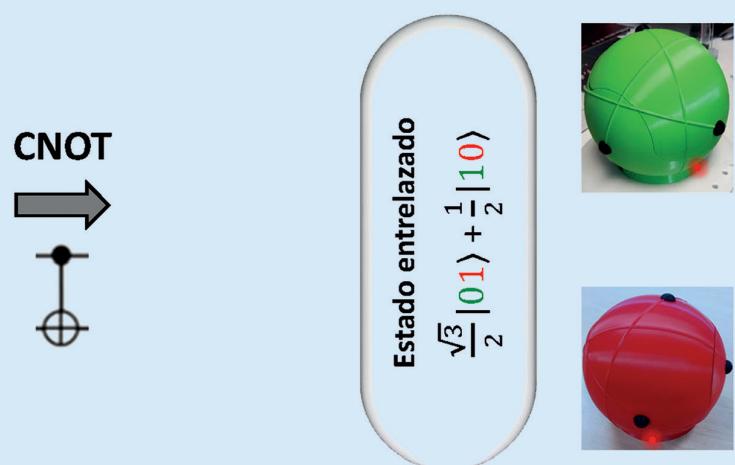


# CÚBITS PARA TOCAR CON LAS MANOS

**Antes de CNOT:**  
superposición de estados



**Después de CNOT:**  
Estado entrelazado



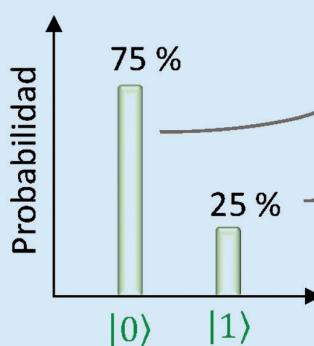
Medida sobre **cúbit 1**



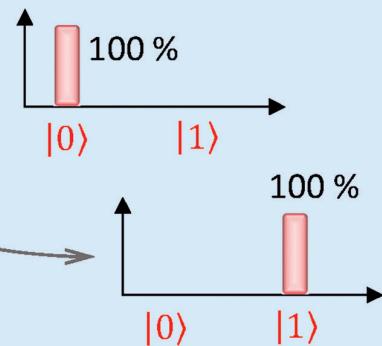
Medida sobre **cúbit 2**



**Resultado:**



**Resultado:**



- Fin a 100 años del misterio “dualidad onda-partícula”
- Física cuántica e información
- Computación cuántica

- El descubrimiento del espín
- Modelos para describir la luz en Bachillerato



**FECYT**  
FUNDACIÓN ESPAÑOLA  
PARA LA CIENCIA  
Y LA TECNOLOGÍA



RED DE UNIDADES DE  
CULTURA CIENTÍFICA  
Y DE LA INNOVACIÓN

**REVISTA ESPAÑOLA DE FÍSICA (REF)**  
[www.revistadefisica.es](http://www.revistadefisica.es)

Es una publicación de la Real Sociedad Española de Física, que es miembro de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física (FEIASOFI) y de la European Physical Society (EPS) y mantiene acuerdos con la American Physical Society (APS) y otras sociedades científicas. El equipo de dirección, que no se hace responsable del contenido de los trabajos que aparecen firmados, agradece a los autores su contribución voluntaria

**Director:**

Rafael García Molina, Universidad de Murcia

**Subdirectores:**

Verónica González Fernández, Universidad Complutense de Madrid  
José Manuel Vaquero Martínez, Universidad de Extremadura  
Nicolás A. Cordero Tejedor, Universidad de Burgos

**Editor General:**

Miguel Ángel Fernández Sanjuán, Universidad Rey Juan Carlos

**Secretaria de redacción:**

Itziar Serrano Pons, Virginia González Moro, Gema María Alberca Cano, Facultad de Ciencias Físicas, UCM Plaza de las Ciencias, 1 28040-Madrid

**Consejo editorial:**

María Teresa Flores Arias, Universidad de Santiago de Compostela  
Manuel Francisco Alonso Sanchez, IES Leonardo da Vinci, Alicante  
Aran Garcia-Lekue, Donostia International Physics Center  
Javier Argüello Luengo, ICFO  
Abel Calle Montes, Universidad de Valladolid  
Lara Lloret Iglesias, Universidad de Cantabria-CSIC  
María Matilde Ariza Montes, IES Pedro Espinosa, Antequera  
María Moreno Llácer, IFIC-Universidad de Valencia  
Alexandre Wagemakers, Universidad Rey Juan Carlos  
María José Martínez Pérez, INMA, CSIC-Universidad de Zaragoza  
Belen Maté Naya, Instituto de Estructura de la Materia-CSIC, Madrid  
Laura Rodríguez Arriaga, Universidad Autónoma de Madrid  
Juan Jesús Ruiz Lorenzo, Universidad de Extremadura  
Alejandro Pozas Kerstjens, Université de Genève, Suiza  
David Pámos Ortega, IES Levante, Algeciras  
David Barrado Navascués, Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)  
Carlos Hernández García, Universidad de Salamanca  
Chantal Ferrer Roca, Universidad de Valencia

**Diseño y maquetación**

Disgraf Soluciones Gráficas, S. L.

**Entidades patrocinadoras de la Real Sociedad Española de Física:**

Universidad Complutense de Madrid  
Fundación BBVA  
Fundación Ramón Areces  
CIEMAT  
Ministerio de Educación y Formación Profesional  
Sidilab

La *Revista Española de Física* se publica a razón de cuatro números por volumen anual, por la Real Sociedad Española de Física

**Depósito Legal:** M-20734-1986

**ISSN:** 0213-862X

**Real Sociedad Española de Física**

Facultad de Ciencias Físicas-UCM  
Plaza de las Ciencias, 1  
28040 Madrid

<http://rsef.es>

**Para temas relacionados con la REF:**

[revista.de.fisica@rsef.es](mailto:revista.de.fisica@rsef.es)

**Tel.:** 91 394 4359/50

Para enviar artículos o colaboraciones consultar la página web de la Real Sociedad Española de Física en el apartado de Normas de Publicación

## ÍNDICE

**Temas de física**

- 1** Fin a 100 años del misterio “dualidad onda-partícula” en la física cuántica, José Bernabéu  
**6** Física cuántica e información: nuevas tecnologías para el siglo xxi, Laia Serradesanferm Córdoba y Antonio Acín  
**12** Computación cuántica: 25 años después, Alba Cervera Lierta  
**17** El descubrimiento del espín y la búsqueda de nueva física, Miguel Ángel Sanchis Lozano y Roger Sanchis Gual  
**25** 2025, el año cuántico, ¡júntete a la revolución!, Araceli Venegas-Gómez

**Notas de clase**

- 30** ¿Son tan raros los números cuánticos? Una manera de introducirlos mediante analogías con ondas clásicas, José Adrián Castelo Martínez  
**33** ¿Cómo se emite y absorbe radiación? Una introducción a la física cuántica, Francisco Savall Alemany  
**36** Descripción de la luz en Bachillerato: Modelo ondulatorio clásico, modelo fotónico y teoría cuántica, Pedro González Marhuenda y Manuel Alonso Sánchez  
**42** Cúbits para tocar con las manos, Jorge Pérez-Bailón, Fernando Luis y María José Martínez-Pérez

**Comentario invitado**

- 47** Premio Nobel de Física 2024. Descubrimientos e inventos fundamentales que impulsan el aprendizaje automático con redes neuronales artificiales, Néstor Parga

**54** *Hemos leído que...*

**56** *Puntos de interés*

**Reseñas de libros de interés**

- 61** *Métodos matemáticos para la física. Variable compleja, probabilidad y variables aleatorias*, de Manuel Gadella y Luis Miguel Nieto  
**62** *Un mundo magnético. La omnipresencia de los imanes*, de Francesc Lloret Pastor

**In memoriam**

- 63** Manuel García Doncel (1930-2025)  
**64** Antonio Ferrer Soria (1945-2025)

**Noticias**

- 65** Eloísa López Pérez: Miembro Distinguida de la Real Sociedad Española de Física  
**66** Récord de participación en las Preliminares de PLANCKS 2025: 28 sedes, 140 equipos y más de 450 participantes  
**67** David Barrado es nombrado delegado español en el Consejo del Observatorio Austral Europeo  
**68** Premio Breakthrough a los miembros de ALICE, ATLAS, CMS y LHCb

Ilustración de la cubierta: Los cúbits pueden estar en superposición (existe una cierta probabilidad de obtener 0 o 1 al medirlos) y pueden entrelazarse mediante puertas lógicas cuánticas (la medida de uno afecta instantáneamente el resultado esperado al medir el otro). Créditos: María José Martínez-Pérez, Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (CSIC-Universidad de Zaragoza).

# Fin a 100 años del misterio “dualidad onda-partícula” en la física cuántica

José Bernabéu

Como la quintaesencia aristotélica para el cielo, el flogisto para la combustión, el fluido calórico para los estados de la materia o el éter para las ondas electromagnéticas, las “ondas de materia” de la física cuántica son un remanente histórico sin correspondencia real en el mundo natural. El concepto cuántico —no clásico— fundamental es la amplitud de probabilidad, sin importar que haga referencia a propiedades espaciales o internas de los sistemas físicos.

© Freepik

**E**l misterio de la “dualidad onda-partícula”, presente en el lenguaje de la física cuántica desde sus orígenes históricos hace 100 años, no tiene una correspondencia real con el comportamiento de la naturaleza al ser observada. El dilema de la llamada “interferencia con partículas separadas” no es entre partículas y ondas: la interferencia en física cuántica es entre amplitudes de probabilidad para alternativas distintas no marcadas en una transición entre estados definidos. En este artículo se muestra que la misma base conceptual aparece en una pléthora de “sistemas de dos estados” como consecuencia del principio de superposición lineal, sin importar que los observables hagan referencia a propiedades espaciales o internas. Se discuten ejemplos que van desde el experimento de Young de doble rendija al fenómeno de oscilación del “sabor” de neutrinos en un lenguaje interpretativo común.

En 1924 Louis de Broglie publicó el artículo “Tentative Theory of Light Quanta” en *Philosophical Magazine* 47, 446 (1924). En él se postula la relación entre la longitud de onda  $\lambda$  de ondas y el momento  $p$  de partículas

$$\lambda = h / p , \quad (1)$$

conectados para todo sistema físico, no solo para cuantos de luz —fotones—, sino también para la materia, a través de la constante  $h$  de acción de Planck. Aunque la naturaleza de esas “ondas” era desconocida, la ecuación de De Broglie permitió una razón de ser sencilla de las reglas de cuantización *ad hoc* de la vieja teoría cuántica y representó la primera idea influyente que alimentó la avalancha de la construcción de la mecánica cuántica. La “mecánica ondulatoria” de Schrödinger, con la ecuación de Schrödinger para esas “ondas de materia”, y la mecánica de matrices de Heisenberg convergieron en una síntesis formulada en términos de estados y observables. La interpretación de la “función de ondas” vino con Max Born como “amplitud de densidad de probabilidad” y el lenguaje fue moldeado por Niels Bohr en la llamada interpretación

de Copenhague. El principio de complementariedad de Bohr para dos observables conjugados —incompatibles—, apareciendo en las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, fue incluso extendido para explicar una “dualidad onda-partícula” universal.

La revolución científica que la mecánica cuántica ha representado no tiene precedentes en la historia de la física. Además de explicar los fenómenos previamente observados incompatibles con la física clásica, ha predicho novedosos efectos paradójicos con un dominio de validez universal que la catapultan como la unificación de conceptos de mayor éxito en la descripción de la naturaleza. El teorema de John Bell para sistemas enmarañados establece que ninguna teoría clásica futura será capaz de reproducir todos los resultados de la mecánica cuántica. El Premio Nobel de Física de 2022 a Aspect, Clauser y Zeilinger reconoce la prueba experimental de las correlaciones cuánticas entre observables de dos partes más allá de una relación causal, conduciendo a una falta de realismo local y al nuevo campo de información cuántica. Los últimos 100 años han visto desarrollos complementarios de la teoría, desde discusiones epistemológicas a física real, desde nuevos efectos observados en múltiples campos de la física a tecnologías cuánticas. Esos avances, incluyendo nuevos sensores cuánticos para explorar nuevos fenómenos en una variedad de física desafiante, no ocultan, sin embargo, preguntas pendientes acerca de los fundamentos del mundo cuántico y la clarificación de su base conceptual.

En este artículo se discute si el concepto de una “dualidad onda-partícula”, que persiste después de 100 años en el lenguaje de muchos científicos, tiene una base real en el comportamiento de la naturaleza o es simplemente un remanente de los orígenes históricos de la teoría. Aun hoy se lee en libros de texto estándar y en artículos de investigación frases como: “el fotón es una onda al propagarse y una partícula al detектarse” o “la existencia de interferometría atómica se debe a las ondas de materia de la física cuántica”. Esas expresiones vienen motivadas porque las ondas interfieren, las partículas no. Para este análisis, se supone que el lector está familiarizado

zado con la formulación de la mecánica cuántica, de tal modo que no se darán aquí deducciones matemáticas ni referencias explícitas.

Se puede formular la pregunta esencial como **¿Es la función de ondas  $\psi(x,t)$  un campo en el espacio-tiempo?**

*A priori*, puede parecer que la formulación de la teoría en la imagen de evolución temporal de los estados —realismo instantáneo— y la representación de posiciones como variable observable conduce a una descripción de la dinámica de una partícula en términos de una “verdadera” función de ondas que satisface una ecuación de ondas con todas las propiedades ondulatorias. Esta formulación explica, en particular, la interferencia espacial en experimentos canónicos al mejor nivel cuantitativo y daría crédito al lenguaje de “ondas de probabilidad” en el espacio-tiempo. ¿Es “real” este lenguaje o es un artefacto de la interpretación de la representación usada para el comportamiento de una partícula separada?

Para responder a esta pregunta, el punto crucial es **¿Qué es “x”?: un punto espacial o el observable de posición de la partícula.**

La propia formulación proporciona la respuesta en favor de la segunda acepción, porque:

- (1) La misma predictibilidad se puede obtener mediante la representación de momentos, con los estados base siendo el observable momento conjugado, que conduce a una “función de ondas”  $\psi(p,t)$  en el espacio de momentos. Identificamos la “realidad instantánea” con el estado  $\Psi(t)$  —el tiempo no es un observable cuántico—, independiente de la representación usada.
- (2) Para un sistema de dos partículas (1,2), incluso en la representación de posiciones, la función de ondas  $\psi(x_1, x_2; t)$  está definida en el espacio de configuración, no en el espacio ordinario. Las dos variables hacen referencia al observable de posición para cada partícula.

¿Por qué entonces la interferencia espacial en un experimento de doble rendija con partículas separadas se manifiesta exactamente como en el lenguaje de la dualidad onda-partícula? De hecho, el resultado experimental con partículas separadas preparadas en el mismo estado desconectadas una-a-una se anuncia en ocasiones como: “La dualidad onda-partícula observada en el experimento de Young de doble rendija con sensibilidad para partículas individuales”. Como una partícula separada no se puede compartir entre las dos rendijas, se invoca su “onda dual” para dar una explicación. Sin embargo, el único ingrediente necesario es la interferencia de amplitudes de probabilidad para las dos alternativas, como consecuencia del principio de superposición lineal de los dos posibles estados de paso de la partícula. Por qué rendija

pasa la partícula no está definido en la superposición de estados y, por tanto, no es una pregunta permitida. En consecuencia,

- (3) si  $\Psi_1(t)$  es el estado para una propagación definida por la rendija 1 y  $\Psi_2(t)$  lo es para el paso por rendija 2, el estado de la partícula viene dado por su superposición lineal, conduciendo a la suma de las correspondientes amplitudes de probabilidad en su llegada a la pantalla en un experimento de interferometría espacial.

Las componentes que interfieren en mecánica cuántica no son partículas —ni ondas asociadas—, son las amplitudes de probabilidad para diferentes alternativas no marcadas accesibles en el experimento. **Es el hecho de que las amplitudes de probabilidad sumen como números complejos lo que es responsable de todas las interferencias cuánticas.** Un fotón, electrón o átomo no es “compartido” por las dos rendijas como se describe invocando a su onda asociada. La suma coherente de amplitudes conduce a la figura de interferencia para la densidad de probabilidad en cada punto de la pantalla. Lo que nos demuestra el experimento de interferometría con partículas separadas es que cada partícula tiene toda la información, aunque la evidencia experimental de la figura de interferencia necesite la acumulación estadística de llegadas individuales de las partículas a la pantalla. En la formulación de Feynman de integrales de camino no hay lenguaje alguno “ondulatorio”: reemplaza la trayectoria, determinada clásicamente, mediante el principio de acción estacionaria, por la integral funcional sobre todas las trayectorias cuánticas posibles, con las amplitudes de probabilidad dadas por su acción, en el cálculo de la probabilidad de transición. La aplicación práctica del método funcional para resolver la dinámica cuántica, sin embargo, no compite bien en general con el método bien desarrollado de resolver una ecuación diferencial como la de Schrödinger.

Si las dos alternativas en el montaje experimental de las dos rendijas son distinguibles, incluso si no son en la práctica distinguidas, la superposición lineal no es operativa. El comportamiento de la partícula es entonces de probabilidades clásicas, pudiendo hablar de su paso por una u otra rendija. La probabilidad de transición a la pantalla sería la suma (incoherente) de las dos probabilidades. Y concluimos que

- (4) la denominada “interferencia con partículas separadas” ha de ser entendida con precisión llamándola “interferencia de las amplitudes de probabilidad para cada partícula” en un experimento de medidas repetidas separadas.

Esta argumentación proclama que el experimento de interferencia de Young de la doble rendija para partículas separadas tiene la misma base conceptual como otros de la plétora de fenómenos cuánticos para “sistemas de dos estados”, con el principio de superposición como guía. Para un sistema ligado, el ejemplo paradigmático del **enlace covalente** del ion molecular  $H_2^+$  sigue el mismo razonamiento: el estado del electrón en la molécula es una superposición lineal de los dos estados atómicos del electrón con cada protón. La simetría entre las dos alternativas asegura que el estado fundamental de este ion molecular (en la aproximación de Born-Oppenheimer) es la superposición simétrica de los dos estados atómicos. La superposición lineal implica una lógica cuántica en la que la frase diciendo que el electrón está “o bien con un protón o con el otro” no tiene sentido, está prohibida. Así

- (5) En el estado fundamental del ion molecular  $H_2^+$ , el estado deslocalizado del electrón con energía definida tiene igual **amplitudes de probabilidad** para los dos estados localizados. El lenguaje misterioso de “el electrón es compartido por los dos protones” en el enlace covalente es meramente un remanente del lenguaje de su onda dual, no su comportamiento físico real.

Históricamente, quizás el ejemplo más clarificador de los conceptos involucrados en un sistema de dos estados es el de la molécula de amoníaco  $NH_3$ . Los dos posibles estados geométricos, con el átomo de nitrógeno a derecha o izquierda del plano de los tres hidrógenos, son dos alternativas para describir la molécula de energía definida  $E$ . Esos estados geométricos serían —por simetría bajo paridad— degenerados con energía  $E_0$ . Sin embargo, existe una mezcla “A” entre ellos inducida por efecto túnel cuántico, de modo que el hamiltoniano  $H$  del sistema en la base geométrica viene dado por la matriz  $2 \times 2$

$$H = \begin{pmatrix} E_0 & A \\ A & E_0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Los estados estacionarios con evolución temporal definida que diagonalizan  $H$  son los dos estados con simetría izquierda-derecha definida, simétrica o antisimétrica, con igual u opuesta amplitud de probabilidad para los dos estados geométricos. El estado fundamental tiene la simetría de  $H$  y los dos estados, fundamental y excitado, rompen la degeneración  $E_0$  de los estados geométricos y son de energías  $E$  no degeneradas. Como corolario, la producción de la molécula en uno de los dos estados geométricos conduce al fenómeno de “oscilación de la molécula” con el tiempo entre los dos estados geométricos. El lenguaje preciso para la interferencia izquierda-derecha responsable de la oscilación es

- (6) ¿cuál es la probabilidad como función del tiempo que, habiendo preparado la molécula  $NH_3$  en el estado izquierdo, aparezca en el estado derecho?

Este es un experimento de aparición, que puede predecir el lector. Otra pregunta es la probabilidad de supervivencia de seguir en el mismo estado inicial. Esos fenómenos tienen la misma base conceptual que los experimentos de interferencia espacial, asociados con la superposición lineal de estados. Si tenemos un nitrógeno localizado, su energía no está definida. Si tenemos energía definida, la posición relativa del átomo de nitrógeno no está definida. No hay traza alguna de tener que invocar un lenguaje ondulatorio. Esas propiedades cuánticas son esenciales en el comportamiento de  $NH_3$  en presencia de un campo eléctrico dependiente del tiempo, usando los momentos dipolares opuestos de los dos estados geométricos. La preparación con población invertida del estado energético excitado conduce a la emisión estimulada de radiación de microondas en el máser de amoníaco, creado por primera vez por Charles H. Townes en 1953.

Desde mediados del siglo xx, la física de partículas ha visto la aparición de partículas con grados de libertad internos, identificados como cargas más allá de la carga eléctrica, llamados “sabores”. El primer caso fue la “extrañeza”, necesaria para distinguir el mesón- $K^0$  de su antipartícula  $\bar{K}^0$ , así como para otras partículas incluyendo bariones.  $K^0$  y  $\bar{K}^0$ , tienen carga eléctrica nula y extrañeza opuesta, mientras el mesón- $\pi^0$  no extraño es su propia antipartícula. La extrañeza se conserva en las interacciones fuertes y electromagnéticas y es violada en las interacciones débiles, contrariamente a la conservación rigurosa de la carga eléctrica. Las interacciones débiles mezclan  $K^0$  y  $\bar{K}^0$ . En la base de extrañeza definida, la dinámica del kaón neutro se describe como un sistema de dos estados con un hamiltoniano  $H$  como el de la ecuación (2). Ello conduce a dos estados estacionarios con masa y energía definidos por una superposición simétrica (antisimétrica) de extrañezas opuestas en el estado fundamental (excitado). Así, el estado fundamental (excitado) tiene igual (opuestas) amplitudes de probabilidad de  $K^0$  y  $\bar{K}^0$ . El lector habrá notado que, debido a la mezcla, hablamos de dos estados del Kaón neutro en vez de hablar de dos partículas. La superposición de estados de extrañeza opuesta fue introducida por primera vez por Gell-Mann y Pais en 1955.

- (7) La mezcla de extrañeza y la no-degeneración de los dos estados con masa definida predice “oscilaciones del kaón neutro” entre los dos estados  $K^0$ - $\bar{K}^0$  de extrañeza definida. Ello se debe a la interferencia de las amplitudes de

probabilidad de que un estado de  $K^0$  (o  $\bar{K^0}$ ) tenga una u otra masa alternativas.

Esas oscilaciones han sido observadas en distintas instalaciones experimentales produciendo, por ejemplo,  $K^0$ . Se inducen por una interferencia que involucra propiedades internas —cargas de sabor— que nada tienen que ver con ondas en el espacio-tiempo. Pero la base conceptual para la interferencia en el kaón neutro y para el experimento de Young de la doble rendija con partículas separadas es la misma: **la superposición lineal de estados con la interferencia de las dos amplitudes de probabilidad**. En el caso de la oscilación del kaón neutro, las amplitudes para tener una u otra masa; en la interferencia espacial, las amplitudes para pasar por una u otra rendija.

Para beneficio del lector, se ha de añadir que la física del kaón neutro posee otros efectos que son “complicaciones esenciales”: i) es inestable con los dos estados de masa y evolución temporal bien definidos teniendo vidas medias muy distintas, así que para tiempos lejanos hay decoherencia desapareciendo la interferencia; ii) regeneración del estado de vida media corta por interacción con la materia ordinaria; iii) la mezcla “A” entre materia ( $K^0$ ) y antimateria ( $\bar{K^0}$ ) no es simétrica, por lo que “A” ha de ser compleja con  $H_{12} = A$  y  $H_{21} = A^*$ , encontrándose la primera violación de la simetría materia-antimateria en 1964. Con todo ello, Feynman, Lee y Okun han elevado este sistema de dos estados a ser la joya de laboratorio más preciada de la naturaleza para entender los entresijos del mundo cuántico.

Las tres familias de leptones —electrón, muon y tauón— contienen la correspondiente especie de neutrino con interacciones débiles tan solo. La física de esos tres “sabores” de neutrinos es tan fascinante como desafiante para su observación: la materia ordinaria es (casi) transparente a la propagación de neutrinos. Si no tenemos en cuenta la “complicación esencial” de tener tres sabores —esencial para una posible asimetría entre neutrinos y antineutrinos aún (en 2025) no observada— en vez de dos, tendríamos con los neutrinos otro “sistema de dos estados” entre los estados de sabor neutrino-e y neutrino-mu. De hecho, esta es una buena aproximación para describir el problema de neutrinos solares, emitidos como neutrinos-e en las reacciones de fusión nuclear en el corazón del Sol. Debido a la mezcla de sabores, que nos dicen que los estados de sabor definido son distintos a los estados de masa definida, el lenguaje apropiado de “oscilación del sabor de neutrinos” se aplica a su propagación desde el Sol a la Tierra. Y preguntamos

(8) ¿cuál es la probabilidad de supervivencia de que un neutrino-e producido en el Sol siga siendo un neutrino-e al detectarse en la Tierra?

Bruno Pontecorvo, que había predicho la existencia del segundo neutrino antes de su descubrimiento en 1962, anticipó el “problema de neutrinos solares” en la respuesta al punto (8). Una probabilidad de supervivencia inferior al 100 % para el neutrino-e es predicha con los dos ingredientes mencionados: mezcla con neutrino-mu y no degeneración de los estados de masa y energía definidos. La física de las cargas de sabor es aún un problema abierto en el campo de las partículas elementales y una posible simetría entre los estados de sabor no está establecida. El hamiltoniano  $H$  de la ecuación (2) tendrá por tanto elementos de matriz desiguales  $E_1, E_2$  en la diagonal principal en vez de un  $E_0$  común. Tal matriz real y simétrica se diagonaliza mediante una matriz ortogonal

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

con una superposición  $\cos \theta \neq \sin \theta$  no máxima en general. El déficit de neutrinos-e observado en 2002, comparado al flujo total llegado desde el Sol, dio una probabilidad de supervivencia de  $1/3$  y estableció el fenómeno cuántico de la “oscilación del sabor de neutrinos-e solares”. En 1998, la “oscilación del sabor de neutrinos-mu atmosféricos” había sido observada en la llegada de neutrinos-mu producidos en la atmósfera terrestre por las interacciones de rayos cósmicos. Esos resultados implican que los neutrinos tienen masas no nulas, mucho menores que las de los demás constituyentes de la materia. El Premio Nobel de Física de 2015 se concedió a Takaaki Kajita y Arthur McDonald por esos descubrimientos.

Las oscilaciones del sabor de neutrinos han sido también observadas con reactores nucleares terrestres y aceleradores a distintas distancias —hasta el millar de kilómetros— entre su producción y detección. Esos experimentos son hoy el método de explorar cuestiones abiertas sobre las propiedades de neutrinos. La interferencia de amplitudes de probabilidad hace referencia en este caso a estados de sabor, sin relación alguna con propiedades espaciales. De hecho, todos los neutrinos de distinto sabor se propagan en la misma dirección espacial y no hay posibilidad de hablar el lenguaje de ondas duales en el espacio ordinario.

## Conclusión

Con esta discusión conceptual de la interferencia de amplitudes de probabilidad que aparecen en la física de una variedad de sistemas cuánticos de dos estados descubrimos que hay un origen fundamental común: la superposición lineal de estados. Las propiedades alternativas no marcadas presentes en la superposición pueden ser espaciales o internas, sin necesidad de invocar una dualidad misteriosa e inconsistente para explicar el caso de la interferencia espacial. Las ondas satisfacen el

principio de superposición en el espacio-tiempo, pero no es el que aparece en la física cuántica. La comparación de los distintos casos discutidos en los puntos del (1) al (8) dice que el dilema histórico para la interferencia no es entre partículas y ondas. La interferencia es entre amplitudes de probabilidad de tener propiedades alternativas no marcadas presentes en la superposición de estados cuánticos. **Amplitud de probabilidad** es el concepto fundamental. En la lógica cuántica, gracias a la superposición lineal de estados, las cosas no son necesariamente una u otra.

El autor no pretende erradicar un lenguaje tan enraizado en la literatura sobre física cuántica. Pero la conclusión de este análisis es llamar la atención que, después de 100 años del desarrollo de la teoría más precisa sobre la respuesta de la naturaleza cuando es observada, el misterio de la dualidad onda-partícula asociado a su lenguaje no tiene una correspondencia conceptual con la realidad física.

Otros misterios del mundo cuántico asociados al papel de la observación en la descripción

de la realidad no están abordados en este análisis y persisten en los fundamentos de la física cuántica.

#### Agradecimientos

El autor agradece a Francisco Botella, Catalina Espinoza y Arcadi Santamaría las muchas discusiones científicas sobre el tema de este artículo. La investigación ha sido financiada por los proyectos CIPROM/2021/054 (Prometeo, Generalitat Valenciana), PID2023-151418NB-I00 (MCIU/AEI/10.13039/501100011033/ FEDER, UE) y CEX2023-001292-S (SO, MCIU/AEI).



**José Bernabéu**  
Dpto. de Física Teórica, Universidad  
de Valencia, e IFIC, Centro Mixto  
UV-CSIC, Burjassot, Valencia



# Física cuántica e información: nuevas tecnologías para el siglo XXI

Laia Serradesanferm Córdoba y Antonio Acín

¿Qué sucede si codificamos información en sistemas cuánticos? Hace unos cincuenta años, un grupo de científicos y científicas se planteó esta misma pregunta, dando origen a la teoría de la información cuántica. Esta disciplina, hoy en día ya consolidada, nos ha proporcionado un amplio abanico de nuevas herramientas para procesar y transmitir información, cuyo potencial apenas comienza a explorarse.

**L**a información es un concepto clave en nuestra sociedad, con un impacto muy directo en nuestro día a día: desde que nos levantamos hasta que nos acostamos, miles de mensajes son intercambiados por internet, así como miles de operaciones, de mayor o menor complejidad, son ejecutadas en los distintos dispositivos procesadores de información, desde supercomputadores hasta nuestros propios móviles. La información ha modificado de tal manera el modo en que vivimos y convivimos que a menudo se conoce a nuestra sociedad como la sociedad de la información.

Todas las aplicaciones de información operan con bits, que no es más que su unidad básica y que puede tomar dos valores, cero o uno. Nuestra conexión de internet en casa o en el trabajo, la capacidad de memoria de nuestro móvil o la velocidad del procesador de nuestro portátil, todo se mide en bits. La teoría de la información, iniciada por medio de los trabajos pioneros de Shannon a mediados del siglo XX, proporciona las herramientas para entender y optimizar el uso de bits de cara a resolver las distintas tareas de procesamiento de la información.

La física cuántica fue otra de las revoluciones que nos deparó el siglo XX. Es el formalismo que explica todos los fenómenos microscópicos que nos rodean. Al tratar con el mundo de lo más pequeño, su impacto en nuestra sociedad no es tan evidente a primera vista. Sin embargo, esta conclusión es incorrecta por superficial. Por un lado, y desde un nivel fundamental, las predicciones de la física cuántica supusieron un cambio radical en la comprensión de la naturaleza, ya que son en muchos aspectos muy distintas de las predicciones de la hasta entonces imperante física newtoniana. Desde una perspectiva más aplicada, la física cuántica ha sido y es crucial para comprender los materiales, la química y la estructura molecular y, por lo tanto, gran parte de la ciencia y la tecnología modernas. Aplicaciones como el láser, que se usa desde para leer el código de barras en el supermercado hasta en complejas operaciones quirúrgicas, o el transistor, que es fundamental para el funcionamiento de cualquier ordenador,

solo fueron posibles gracias a la comprensión del mundo microscópico que proporcionó la física cuántica.

## Partículas cuánticas para procesar y transmitir información: cambio de paradigma

La teoría de la información y la física siempre habían ido avanzando de manera independiente. Los bits se comportaban siguiendo unas reglas que nada tenían que ver con las leyes de la mecánica, el electromagnetismo, la termodinámica o la gravedad. A partir de los años setenta y ochenta, diversos investigadores comenzaron a plantearse qué pasaría si usáramos partículas cuánticas, como los átomos o los fotones de luz, para transmitir y procesar información. *A priori*, esta pregunta no parecía tener demasiado recorrido, dado que la teoría de la información siempre se había visto como una disciplina abstracta, al margen de la realización física de los bits. Sin embargo, pronto se comprendió que el bit almacenado en una partícula descrita por la física cuántica, el bit cuántico o cúbit, es distinto y más rico que el bit clásico, es decir, aquel almacenado en una partícula que se rige por la física clásica. Esto desencadenó una ristra de nuevas incógnitas. ¿Podrían las exóticas propiedades cuánticas servir de alguna utilidad? ¿Cómo se transformaría la teoría de la información tras mezclarse con la física cuántica? ¿Qué nuevas aplicaciones nos proporcionarían los bits cuánticos? Pero por aquel entonces, y a pesar de que eran unas preguntas muy estimulantes desde un punto de vista conceptual y teórico, implementarlas era una posibilidad cercana a la ciencia ficción teniendo en cuenta el estado de las tecnologías.

Sin embargo, los esfuerzos no cesaron y de la sinergia entre información y física cuántica nació una nueva disciplina: la teoría de la información cuántica. Pese a su enfoque teórico inicial, el dramático progreso tecnológico permitió a los puros conceptos materializarse en aplicaciones tangibles, e ideas que parecían más propias de la de ciencia ficción se han convertido en realidad.

En particular, ya se tiene el conocimiento y las técnicas para almacenar bits en partículas cuánticas como los átomos

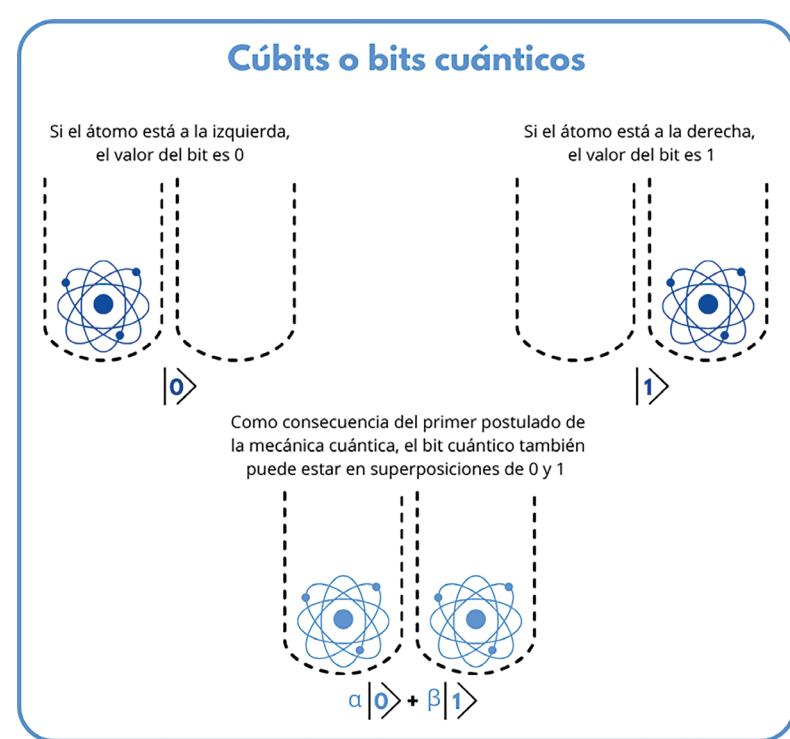
o fotones, lo que proporciona, como hemos avanzado, un bit distinto al tradicional.

Para codificar un bit tradicional basta con encontrar un soporte físico que pueda estar en dos estados distintos. Entonces se asocia uno de ellos con el cero y el otro con el uno. Por ejemplo, imaginemos que somos capaces de restringir la posición de un átomo a dos opciones, izquierda o derecha (véase la fig. 1). Si está a la izquierda, diremos que el valor del bit es cero, mientras que si está a la derecha diremos que es uno. Ahora bien, este átomo es una partícula cuántica, donde las leyes del formalismo cuántico se aplican. En concreto, el átomo se verá afectado por el principio de superposición. Se trata, ni más ni menos, del primer postulado de la disciplina (recordemos que los postulados de una teoría no se discuten, sino que se aceptan), según el cual, si una partícula cuántica puede estar en dos estados, también puede encontrarse en cualquier estado que sea la superposición de los mismos.

De manera más formal, el primer postulado nos dice que: (i) a todo sistema físico le corresponde un espacio de Hilbert y (ii) la descripción del estado del sistema está representado por un vector normalizado  $|\psi\rangle$  en este espacio (estos símbolos  $|\rangle$ , llamados kets, se usan en mecánica cuántica para representar a los vectores). A su vez, todo vector normalizado es un posible estado válido del sistema. Por lo tanto, si tenemos dos estados posibles, el átomo estando a la izquierda y el átomo estando a la derecha, cada uno vendrá representado por un vector normalizado, llamémosles  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . Pero, según álgebra lineal básica, la combinación lineal de vectores también da lugar a un vector, es decir a un estado válido del sistema. Traduciendo al lenguaje de la mecánica cuántica, de la combinación lineal de dos estados posibles surge otro estado posible,  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números complejos que cumplen  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , ya que el vector debe seguir estando normalizado. Así, a nivel formal, la superposición no es nada más que una combinación lineal de vectores.

Sin embargo, más allá de las matemáticas de los espacios vectoriales, a nivel físico la interpretación y las consecuencias del concepto de superposición son difíciles de asimilar para nuestra intuición, ya que este fenómeno ocurre en el mundo microscópico, de los átomos y las moléculas, que no vemos con nuestros ojos, ni oímos, ni podemos tocar; en el mundo en el que vivimos, que sí percibimos, las superposiciones desaparecen. No existe por tanto analogía que podamos usar para explicarlas y es algo intrínseco a ese mundo de lo pequeño.

Volviendo a nuestra motivación inicial, lo que sí podemos concluir es que de codificar un bit en una partícula cuántica se sigue que el bit cuántico, o cúbit, es distinto al bit tradicional, o clásico, ya que puede tomar los dos valores habituales de cero y uno, pero también cualquier superposición de los



mismos. El cambio de paradigma adquiere así su máxima expresión: la naturaleza de la información depende de manera crucial de las leyes físicas que describan el soporte donde la almacenamos.

Fig. 1. Esquema que representa un átomo en superposición.

### Otro cambio de paradigma: del determinismo al indeterminismo

Pese a nuestra dificultad por comprender intuitivamente el fenómeno de la superposición, sus consecuencias son innegables: desde el nacimiento de la cuántica, este principio ha permitido explicar los resultados de numerosos experimentos de manera adecuada, consolidándose así su aceptación entre la comunidad científica. Una de las consecuencias más trascendentales es la pérdida del determinismo, lo que supuso otro cambio de paradigma, uno quizás más sorprendente aún.

Antes del nacimiento de la mecánica cuántica, las leyes de la física dictaban que todo comportamiento en el universo era, al menos en principio, predecible. La única barrera que nos obligaba a usar probabilidades venía impuesta por nuestra ignorancia. Por el contrario, la superposición provoca que al medir un cúbit no obtengamos 0 o 1 de manera determinista (como sí que ocurre con los bits clásicos), sino probabilística. Eso significa que, dado un mismo cúbit, existe una cierta probabilidad de obtener tanto un 0 como un 1 al medirlo. El resultado final no está definido de antemano y no se puede predecir con total seguridad.

De nuevo, este fenómeno es una consecuencia directa de otros postulados de la disciplina. Estos nos dicen que, dado el estado de nuestro cúbit, definido en general por una superposición  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , la probabilidad de obtener un 0 al medirlo es  $|\alpha|^2$  y, en ese caso, el cúbit pasará a

estar en el estado  $|0\rangle$  (es decir, se convertirá en un bit clásico con valor 0, sin superposición alguna). Análogamente, la probabilidad de obtener un 1 al medirlo será  $|\beta|^2$ , dejando el cíbit en el estado  $|1\rangle$  (de nuevo, un bit clásico sin superposición). Es decir, al medir un sistema cuántico (en nuestro caso, un cíbit), se destruye la superposición cuántica inicial. Y lo que es más importante: aunque tengamos un conocimiento perfecto, sin ignorancia, tanto del estado de la partícula como de la medida que se lleva a cabo, la teoría no nos permite más que hacer una predicción del futuro en términos de probabilidades.

### Los ordenadores cuánticos

Una vez queda clara la diferencia entre bits cuánticos y clásicos, vale la pena revisitar todos los usos que hacemos de la información y ver cómo se modifican bajo los fenómenos de la física cuántica. Uno de los usos más habituales es el cálculo y la resolución de problemas, una tarea que los ordenadores actuales realizan constantemente. Esto lleva de manera inmediata a la idea del ordenador cuántico. No hace falta revestir de excesivo misterio este concepto, que en el fondo es muy parecido al de ordenador clásico. Simplemente, donde los ordenadores convencionales procesan información codificada en bits clásicos, un ordenador cuántico lo hace en bits cuánticos. Y de manera análoga, se definen los algoritmos cuánticos, series de operaciones a ejecutar sobre cíbits de cara a resolver un problema.

La diferencia sin embargo radica en que este procesado se realiza usando los fenómenos de la física cuántica, sin análogo en nuestro mundo macroscópico clásico y que, por tanto, son inaccesibles a nuestros ordenadores actuales operando sobre bits clásicos. Es decir, el ordenador cuántico puede usar más operaciones, tiene a su disposición más herramientas para resolver problemas complejos y, por lo tanto, puede llegar a proporcionar soluciones a estos de manera mucho más eficiente. En este último caso, se produce la llamada ventaja computacional cuántica. Aunque hay situaciones en las que un ordenador cuántico no ofrece ninguna ventaja respecto a los ordenadores tradicionales, existen problemas para los que sí que es posible obtenerla. El ejemplo más paradigmático es el algoritmo de Shor [1]. Dado un número inicial,  $N$ , dicho algoritmo demostró cómo un ordenador cuántico permite encontrar dos factores,  $p$  y  $q$ , tales que su producto sea igual al número inicial,  $N = p \times q$  (excluyendo la solución trivial definida por 1 y  $N$ ), algo para lo que no existe algoritmo eficiente en un ordenador clásico. ¿Existen otros algoritmos más allá de Shor? La respuesta es afirmativa y distintos ejemplos han sido obtenidos en las últimas décadas.

De la existencia de ventajas computacionales cuánticas nace el gran empeño que se está ponien-

do a nivel mundial por construir un ordenador cuántico con suficiente potencia (es decir, con la capacidad de procesar un gran número de cíbits) y sin que cometa errores. Pese a que el objetivo final aún dista de estar cerca, en los últimos años ya se han producido grandes progresos en esta dirección. En concreto, ya disponemos de ordenadores cuánticos en el régimen conocido como NISQ [2], por Noisy Intermediate-Scale Quantum. Se trata por tanto de ordenadores con algo de ruido, sin corrección de errores, y de un tamaño intermedio (centenares de cíbits). Estos ordenadores no son suficientes para factorizar grandes números, pero han dado lugar a experimentos de ventaja computacional cuántica [3], si bien solo en problemas de poca, por no decir nula, relevancia práctica. Al mismo tiempo se trabaja en la implementación de métodos de corrección de errores para conseguir ordenadores sin ruido, habiéndose realizado considerables avances en los últimos años [4, 5]. Los plazos hacia la ventaja cuántica práctica, es decir, hacia la existencia de un ordenador capaz de resolver un problema de interés para la sociedad mejor que las máquinas clásicas actuales, se van acortando año a año.

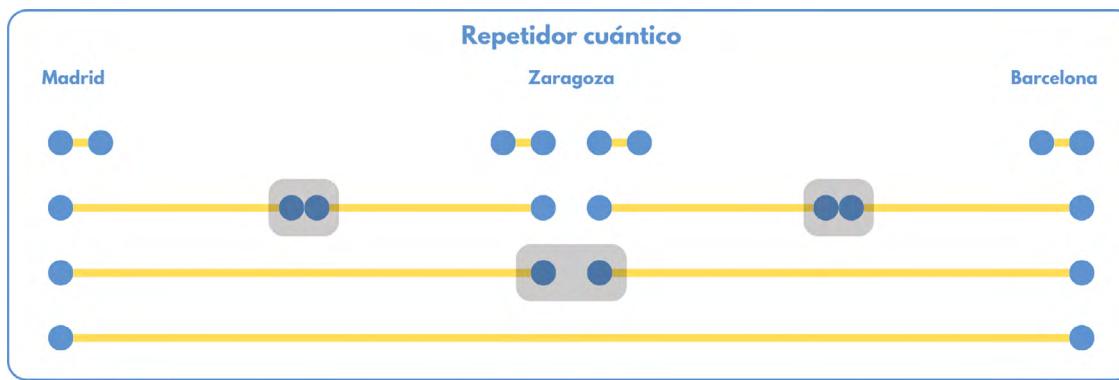
### Criptografía cuántica

Otra importante aplicación de la información más allá de la computación es la comunicación. Y un aspecto clave en las comunicaciones actuales es el de la privacidad: casi tan importante como el poder enviar información de un lugar a otro es el poder hacerlo de manera segura, sin que un posible espía o enemigo tenga acceso a los mensajes que se envían.

Ahora mismo, el campo de la criptografía clásica nos proporciona las herramientas para diseñar métodos de transmisión privada. Por lo general, estos métodos se basan en el concepto de complejidad computacional, es decir, en la dificultad de los ordenadores (clásicos) para encontrar la solución a algunos problemas matemáticos. Por ejemplo, actualmente los intercambios de información confidencial son seguros porque se basan en el algoritmo RSA [6], que explota la ausencia de un algoritmo eficiente para la factorización de grandes números. Sin embargo, el algoritmo de Shor demostró que un ordenador cuántico sí que sería capaz de factorizar de manera eficiente y, por tanto, romper RSA<sup>1</sup>. Esto nos obligó a replantear la seguridad de los esquemas de encriptación actuales.

En este contexto, los bits cuánticos vuelven a abrir nuevas posibilidades para la encriptación de

<sup>1</sup> Es importante recordar que no hay prueba de que no haya un algoritmo eficiente de factorización en ordenadores clásicos, aunque su no existencia parece probable teniendo en cuenta los numerosos esfuerzos que se han llevado a cabo para encontrarlo, sin resultado.



**Fig. 2.** Esquema de cómo un repetidor cuántico establecería entrelazamiento (línea amarilla) entre Madrid y Barcelona. El proceso va de arriba abajo: primero se empieza con 4 pares de partículas (círculos lilas) entrelazadas. Luego, una partícula de cada par se envía a una estación intermedia donde se realiza una medida concreta, llamada medida de Bell (caja gris). Esto permite que el entrelazamiento se extienda, primero de Madrid a Zaragoza y, paralelamente, de Zaragoza a Barcelona y, repitiendo el procedimiento, de Barcelona hasta Madrid. En este [enlace](#) se puede consultar una versión más extendida de este ejemplo [13].

información y permiten el diseño de los llamados protocolos de criptografía cuántica. En esta disciplina, el tipo de seguridad proporcionado deja de lado la complejidad matemática y, en su lugar, se basa en las propias leyes de la física cuántica. La seguridad se convierte en algo fundamental e intrínseco al propio algoritmo de encriptación, independiente a los desarrollos en capacidad computacional que puedan llegar a ocurrir en el futuro.

El primer esquema de criptografía cuántica fue propuesto en 1984 por Charles Bennett y Gilles Brassard y se conoce como protocolo BB84 [7]. En él, dos partes honestas, llamadas generalmente Alice y Bob, se intercambian cíbits para establecer una clave secreta que luego será usada para enviar información de manera segura. Las acciones del enemigo, tradicionalmente llamado Eva, no pueden violar las leyes de la física cuántica. En particular, no pueden violar el teorema de no-clonación [8], según el cual la información cuántica no se puede copiar. Al no poder duplicar la información, Eva tendrá que medir los cíbits originales directamente, introduciendo un error en el canal que la hará detectable. Así, el cíbit perderá su superposición cuántica inicial,  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , y se transformará en un bit clásico,  $|0\rangle$  o  $|1\rangle$ , en función del resultado obtenido. Esta pérdida de la superposición permite a los usuarios honestos darse cuenta de que alguien externo está escuchando y abortar la comunicación insegura a tiempo.

Yendo un paso más allá, los físicos ahora están trabajando en protocolos de criptografía cuántica que no solo se sostengan en el formalismo cuántico y no en la dificultad computacional, sino cuya seguridad tampoco dependa de las implementaciones en *hardware* real. Estos métodos “independientes de los dispositivos” [9] permiten, como su propio nombre indica, asegurar la comunicación sin realizar hipótesis sobre los equipos que se empleen para llevarla a cabo. La privacidad, en este caso, está garantizada por el comportamiento estadístico que obedecen.

Para ello, hacen uso de, quizás, la más exótica de las características cuánticas. En concreto, se apoyan en el llamado entrelazamiento, un fenómeno que provoca que los estados cuánticos de dos o más partículas no estén definidos individual-

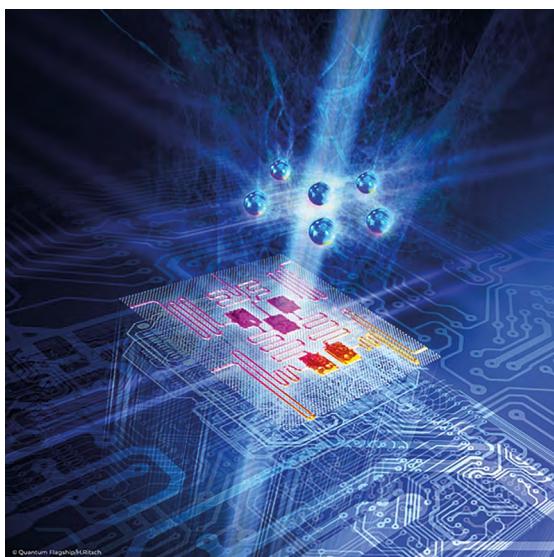
mente, sino tan solo de manera conjunta. Un estado entrelazado podría ser, por ejemplo, un estado de dos cíbits tal que, al medirlos, con un medio de probabilidad obtengamos 0 en el primero y 0 en el segundo, y con otro medio de probabilidad obtengamos 1 en el primero y 1 en el segundo (esto vendría dado por  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle$ , donde el subíndice indica el cíbit al que nos referimos). Nótese que no se puede definir el estado cuántico de ninguno de los cíbits de manera individual; ambos están encapsulados en un único estado conjunto.

Los resultados al medir partículas entrelazadas presentan correlaciones que son imposibles de obtener en física clásica. Las correlaciones clásicas (como podrían ser dos dados trucados para que siempre salgandobles) satisfacen una serie de condiciones, conocidas como desigualdades de Bell [10]. En cambio, los resultados de medidas realizadas en ciertos estados entrelazados las violan. Este tipo de tests de Bell son los que se usan en criptografía independiente a los dispositivos para probar la seguridad del protocolo. Si se supera la prueba, es decir, si las correlaciones son puramente cuánticas, significa que el estado ha permanecido entrelazado durante el protocolo y que, por lo tanto, Eva no ha interferido realizando una medida (una acción que destruiría la superposición cuántica y, por ende, el entrelazamiento). Si no se supera la prueba, no se puede asegurar que la comunicación sea segura y hay que buscar otra manera de enviar el mensaje.

### Comunicación cuántica

Además de la privacidad, la cuántica también puede aplicarse a la comunicación por sí misma. Enviando bits cuánticos en vez de clásicos entre dos puntos cualesquiera del planeta se sustituye la comunicación clásica por la comunicación cuántica. Establecer comunicaciones cuánticas a largas distancias no es sencillo, justamente debido al teorema de no-clonación, que en este caso es una barrera a sortear. En comunicaciones clásicas, la señal que contiene el mensaje en bits que queremos transmitir se degrada rápidamente mientras viaja a través de una fibra óptica. Para que el mensaje llegue correctamente a su destino, la

**Fig. 3.** Representación artística de las operaciones con qubits (© Quantum Flagship/H).



señal se amplifica (es decir, se copia) a lo largo de su recorrido. Esta posibilidad, perfectamente lícita en comunicaciones clásicas, está en clara discrepancia con el teorema de no-clonación.

Por ello, la comunicación cuántica debe recurrir a otros métodos, como los llamados repetidores cuánticos [11], para poder enviar mensajes entre dos puntos lejanos. Estos repetidores cuánticos permiten entrelazar partículas por tramos pequeños (de modo que haya muy pocas pérdidas) hasta conseguir entrelazamiento entre dos puntos lejanos (véase la fig. 2), un recurso indispensable para que la comunicación cuántica se realice con éxito. Una vez establecido el entrelazamiento entre dos puntos lejanos, se puede usar esta propiedad cuántica para enviar mensajes y comunicarnos, por ejemplo, a través de la teleportación cuántica [12]. Estos métodos ya se están poniendo en práctica, con la esperanza de que, en un futuro, se pueda llegar a establecer un internet cuántico global, consiguiendo comunicación cuántica a grandes distancias.

### Conclusiones

Esta breve introducción a la información cuántica puede resumirse en dos mensajes clave. El primero debería estar claro: la información es un concepto crucial en nuestra sociedad y la física cuántica nos proporciona nuevas herramientas para su procesamiento y transmisión. Este mensaje ya ha sido asimilado a escala mundial e importantes iniciativas e inversiones están llevándose a cabo por grandes y pequeñas empresas, así como entidades gubernamentales<sup>2</sup>, para transformar ideas que pueden sonar un tanto futuristas de entrada, como el ordenador o el internet cuántico, en una realidad tangible y útil.

<sup>2</sup> En nuestro territorio, existe por ejemplo una iniciativa paneuropea en tecnologías cuánticas llamada [Quantum Flagship](#).

El segundo mensaje es una llamada a un optimismo cauteloso o una cautela optimista. Preparar, manipular, almacenar y transmitir cíbits es mucho más complicado que hacer lo propio con bits clásicos. Si el bit cuántico deja de estar en una superposición, se convierte en un bit clásico que solo toma los valores cero o uno, perdiéndose cualquier ventaja cuántica. Pero mantener las superposiciones es una tarea compleja, dado que no solo las medidas intencionadas, sino también el ruido y las interacciones no controladas con el entorno las destruyen. Es un comportamiento parecido al que, según nos solían contar nuestros padres, los reyes magos siguen la víspera del 6 de enero: si te quedas durmiendo y no sales de tu habitación, la magia de los reyes se mantiene intacta y te levantarás con tus regalos más deseados; pero si te pica la curiosidad y decides espiarlos, o incluso si por accidente los pillas in fraganti, la magia desaparecerá y te quedarás sin nada. Esta fragilidad de los efectos cuánticos, la misma que permite detectar cuando alguien nos está espiando durante una comunicación secreta, es también uno de los mayores escollos para el desarrollo de las tecnologías de la información cuántica.

En resumen, si queremos que los cíbits sigan siendo cíbits, es necesario prepararlos y procesarlos en un entorno aislado del exterior (por ejemplo, a muy baja temperatura) y que se pueda manipular de manera controlada (ver fig. 3). Aquí reside el gran desafío tecnológico. Esto explica por qué, a pesar de años de esfuerzo, los ordenadores cuánticos o esquemas de comunicación cuántica existentes presentan todavía importantes desafíos que limitan su implementación práctica. El camino no es sencillo y está lleno de obstáculos. Pero la motivación y objetivo final están claros y existen distintos resultados que demuestran que las tecnologías de la información cuántica permitirán resolver problemas que en la actualidad limitan nuestro progreso y bienestar como sociedad.

### Referencias

- [1] P. W. SHOR, Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring, *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (Santa Fe, NM, EE. UU.), p. 124, 1994.
- [2] J. PRESKILL, Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond, *Quantum* **2**, 79 (2018).
- [3] F. ARUTE *et al.*, Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor, *Nature* **574**, 505 (2019).
- [4] R. ACHARYA *et al.*, Suppressing Quantum Errors by Scaling a Surface Code Logical Qubit, *Nature* **614** (7949), 676 (2023).
- [5] D. BLVSTEIN *et al.*, Logical Quantum Processor Based on Reconfigurable Atom Arrays, *Nature* **626**, 58 (2024).

- [6] R. RIVEST, A. SHAMIR y L. ADLEMAN, A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems, *Communications of the ACM* **21**, 120 (1978).
- [7] C. H. BENNETT y G. BRASSARD, Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing, *Proceedings of the International Conference on Computers, Systems & Signal Processing* (Bangalore, India) vol. 1, p. 175 (1984).
- [8] W. WOOTTERS y W. H. ZUREK, A Single Quantum Cannot be Cloned, *Nature* **299**, 802 (1982).
- [9] A. Acín *et al.*, Device-independent Security of Quantum Cryptography against Collective Attacks, *Physical Review Letters* **98**, 230501 (2007).
- [10] J. S. BELL, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, *Physics Physique Fizika* **1**, 195 (1964).
- [11] H. J. BRIEGEL, W. DÜR, J. I. CIRAC y P. ZOLLER, Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication, *Physical Review Letters* **81**, 5932 (1998).
- [12] C. H. BENNETT, G. BRASSARD, C. CRÉPAU, R. JOZSA, A. PERES y W. K. WOOTTERS, Teleporting an unknown Quantum State Via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels, *Physical Review Letters* **70**, 1895 (1993).
- [13] ICFO, [https://www.youtube.com/watch?v=FKv5xW\\_AzKdg](https://www.youtube.com/watch?v=FKv5xW_AzKdg) (diciembre 2024).

**Laia Serradesanferm Córdoba**  
Escritora científica en el ICFO.  
Science Communication, ICFO-  
Instituto de Ciencias Fotónicas,  
Barcelona



**Antonio Acín Dal Maschio**  
Profesor ICREA en el ICFO-Instituto  
de Ciencias Fotónicas, Barcelona





info@atisistemas.com

# ¿te gusta investigar?



La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación

\* alimentación HV-LV \* crates de alimentación \* racks \* electrónica de control y adquisición \* espectroscopía \* detectores (silicio, HPGe, centelleadores, Cd/Zn/Te...) \* cables y accesorios \* gestión de adquisiciones

# Computación cuántica: 25 años después

Alba Cervera Lierta

Analizamos los avances en computación cuántica 25 años después del primer artículo publicado en la *Revista Española de Física*. En estos años se han desarrollado pocos algoritmos cuánticos fundamentalmente diferentes a los ya conocidos en los noventa, aunque su rango de aplicación se ha multiplicado. Por otro lado, las tecnologías cuánticas han avanzado sustancialmente haciendo posible el uso (cada vez más extendido) de ordenadores cuánticos. Curiosamente, las tecnologías cuánticas para computación que se anticipaban hace 25 años no son las más utilizadas hoy en día. ¿Qué maravillas nos deparará la futura computación cuántica que no somos capaces de aventurar hoy?

© Freepik

Los primeros experimentos sobre computación cuántica están teniendo lugar. Sin embargo, todavía es muy pronto para saber si algún día tendremos ordenadores cuánticos.

Juan Ignacio Cirac Sasturain,  
Quanta y Computación,  
*Revista Española de Física* 14(1), 48 (2000).

Han pasado 25 años desde el primer artículo sobre computación cuántica publicado en la *Revista Española de Física* [1]. Su autor fue un joven Juan Ignacio Cirac, que pocos años después empezó a cosechar reconocimientos de la talla del premio Príncipe de Asturias, premio Wolf, medalla Max Planck entre muchos otros. En su artículo, Cirac presentaba las ideas básicas de la computación cuántica y cómo podrían implementarse experimentalmente. Veinticinco años después de ese artículo, ¿qué ha cambiado? ¿Superamos los retos tecnológicos para conseguir el tan ansiado ordenador cuántico?

Lo cierto es que en la comunidad impera una superposición de sensaciones. Por un lado, hace años que se pronostica que “quizás de aquí a cinco años” tendremos un ordenador cuántico capaz de hacer tareas mejor que uno clásico (a veces se cambia el cinco por el diez, dependiendo del pesimismo de la persona). Por otro lado, año tras año somos testigos de avances relevantes que nos acercan más y más al ordenador cuántico tolerante a fallos, lo que provoca (sobre todo entre los investigadores e investigadoras más jóvenes) ilusión y motivación por formar parte de un campo en plena expansión. En cualquier caso, es innegable que el campo ha avanzado muchísimo desde el 2000. Los ordenadores cuánticos son una realidad, y aunque todavía no son tolerantes a fallos, empezamos a entrar en el régimen donde la corrección cuántica de errores no solo es posible, sino que ya se ha demostrado.

## ¿Para qué queremos un ordenador cuántico? Los retos algorítmicos

La primera aplicación obvia de un computador cuántico es la simulación cuántica. Simular sistemas cuánticos requiere de una memoria que crece exponencialmente con el número de partículas, haciendo inviable una simulación exacta de grandes sistemas. Aunque existen técnicas de simulación

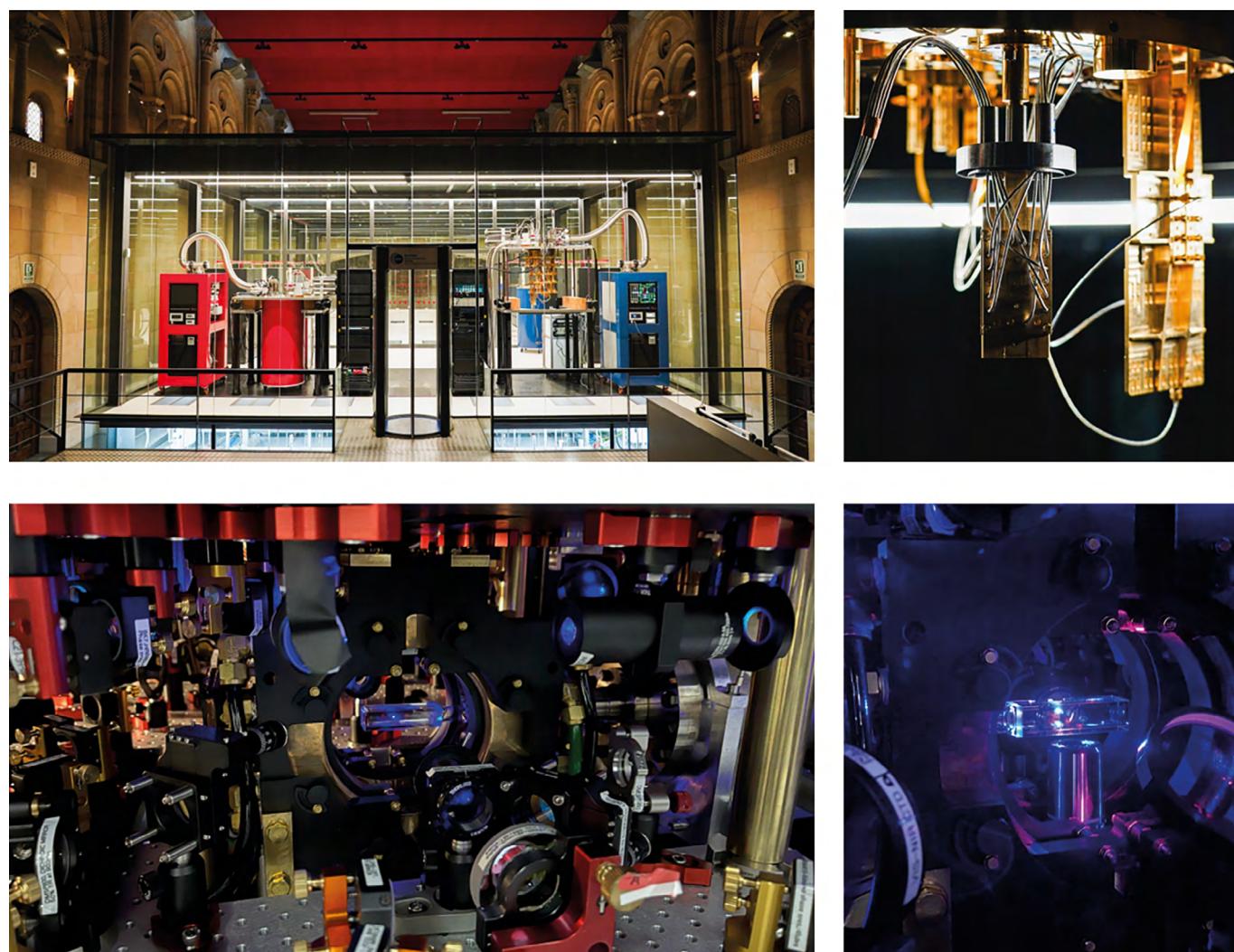
clásica muy eficientes como las redes de tensores (RT), estas tienen sus limitaciones cuando tratamos sistemas cuánticos con mucha correlación.

Hay varias formas de simular sistemas cuánticos con un dispositivo cuántico programable. La primera es la de usar un simulador cuántico, es decir, un sistema físico que pueda emular al sistema que queremos estudiar. Típicamente, se emplean sistemas descritos con hamiltonianos del modelo de Ising 2D o de Hubbard. Su programabilidad radica en poder manipular las interacciones de estos hamiltonianos para adecuarlas a los parámetros del sistema teórico que queremos estudiar. Una vez preparado ese sistema, podemos experimentar directamente sobre él: observar su estado fundamental, medir sus propiedades magnéticas o estudiar sus propiedades fuera del equilibrio [2]. El reto algorítmico en este caso es encontrar el modo de representar los sistemas físicos de interés usando los hamiltonianos de los simuladores cuánticos. Experimentalmente, la tecnología líder en estos momentos son los átomos neutros. Cientos, incluso miles, de estos átomos (típicamente de rubidio o estroncio) se atrapan y manipulan con pinzas ópticas, siendo de las tecnologías cuánticas que más ha escalado (ver imágenes de la parte inferior de la figura 1). Hay que tener en cuenta que no son considerados ordenadores cuánticos universales, dado que solo pueden simular ciertos modelos físicos y no cualquier operación unitaria. Sin embargo, se están desarrollando nuevas técnicas de manipulación de átomos neutros para poder ser usados para computación cuántica digital universal.

La otra estrategia de simulación cuántica consiste en “trocear” la evolución temporal de un cierto hamiltoniano de modo que cada pieza pueda ser implementada con unas pocas puertas lógicas cuánticas que actúan en pequeños grupos de cíbits. Esta técnica de computación cuántica digital emplea el formalismo de la descomposición de Lie o Trotter. Dado un operador  $C = A + B$ , su evolución temporal se puede expresar con la expansión  $e^{-itC} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( e^{-\frac{it}{n}A} e^{-\frac{it}{n}B} \right)^n$ . Si  $A$  y  $B$  son términos que actúan entre parejas de espines, se pueden implementar fácilmente con puertas lógicas cuánticas. Por ejemplo, si  $A = \sigma_x \otimes \sigma_x$ ,  $e^{-\frac{it}{n}A}$  es una puerta lógica a dos cíbits. Al ser una serie infinita, la evolución que se simula tiene que

truncarse en un cierto  $n$ , de modo que, para conseguir mucha precisión, se requerirá de un circuito cuántico de muchas puertas, lo cual puede ser un factor limitante a corto y medio plazo. Y es que los mejores ordenadores cuánticos digitales actuales contienen alrededor de 100 cúbits con tiempos de coherencia limitados. Con esta técnica nos encontramos en un régimen donde las RT pueden todavía simular estos sistemas. Para tratar de reducir los requerimientos experimentales de la simulación cuántica digital, han surgido una familia de algoritmos cuánticos llamados “variacionales” o “híbridos” que proponen una suerte de ingeniería inversa: se propone un circuito cuántico modelo cuyos parámetros pueden ser ajustables, y, mediante la aplicación del teorema variacional, se busca qué parámetros minimizan el valor esperado del hamiltoniano en cuestión. Estos algoritmos cuánticos tienen la ventaja de ser muy versátiles en cuanto a aplicaciones, además de adaptarse al estado del arte del *hardware* cuántico experimental. Sin embargo, son algoritmos heurísticos que sufren de problemas fundamentales en el proceso de minimización, provocando que sea muy difícil converger hacia una solución cercana a la teórica.

Más allá de las aplicaciones en simulación cuántica, la computación cuántica abre las puertas a resolver problemas matemáticos complejos que la computación tradicional no puede resolver eficientemente. El ejemplo por excelencia es el de la factorización de números enteros, que forma parte de una familia más amplia de problemas llamados “problemas del grupo oculto” para grupos abelianos finitos. Un ordenador cuántico puede teóricamente resolver estos problemas de forma eficiente mediante el uso de técnicas como la transformada de Fourier cuántica. La principal limitación es experimental: para que estos algoritmos cuánticos puedan implementarse correctamente, se requiere de puertas lógicas ideales y largos tiempos de



**Figura 1.** dos ejemplos de ordenadores cuánticos actuales desarrollados e instalados en España. *Superior*: Ordenador cuántico digital instalado en el Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). Forma parte de la partición cuántica del superordenador MareNostrum5, llamada “MareNostrum Ona”. Su tecnología es de cúbits superconductores. El chip se encuentra en la parte inferior del criostato del refrigerador de dilución (ver detalle a la derecha), que enfriá sus componentes hasta temperaturas cercanas al cero absoluto. *inferior*: Ordenador cuántico analógico “Quione” desarrollado en el Institut de Ciències Fotòniques (ICFO). Su tecnología es de átomos neutros. A la derecha, detalle de la nube de átomos de estroncio generada para poder realizar experimentos de simulación cuántica (Créditos de las imágenes: Mario Ejarque [BSC-CNS], Sandra Buob [ICFO] y Alina Hirschmann [ICFO]).

coherencia, es decir, se requiere de corrección cuántica de errores (CCE) [3].

Además de los algoritmos cuánticos mencionados, existen también aquellos basados en oráculos. Como su nombre indica, dada una superposición de estados cuánticos, es posible “marcar” aquellos que representan la solución a un cierto problema mediante la aplicación sucesiva de una operación unitaria sobre la superposición (el oráculo) [4]. El reto en este caso es doble: ¿cómo se crea este oráculo? Alguien tiene que “programarlo” sin saber la respuesta al problema. Además, se requiere de nuevo de un ordenador cuántico tolerante a fallos. Volvemos de nuevo a la necesidad de la CCE.

Y con esto concluimos la revisión de las grandes familias de algoritmos cuánticos. Es evidente que no hay mucha variedad. Y este es en el fondo el gran reto de la algoritmia cuántica: la búsqueda de nuevos algoritmos. Sabemos como hacer CCE, el *hardware* cuántico tiene claros sus retos y objetivos, pero necesitamos seguir innovando en técnicas cuánticas que permitan resolver problemas más allá de las capacidades de la computación tradicional.

### Receta para construir un ordenador cuántico

La lista de sistemas físicos que se han propuesto para implementar la computación cuántica es extensa. Muchas de las tecnologías cuánticas se han terminado descartando para computación, aunque se puedan utilizar para otras aplicaciones, como las comunicaciones o la sensórica. Hace 25 años, David P. DiVicenzo estableció una lista de criterios básicos que una tecnología cuántica debía cumplir para poder hacer computación universal [5]:

#### 1. Un sistema físico escalable capaz de caracterizar cúbits

Un cúbit es un sistema cuántico con dos niveles energéticos separados por un cierto “gap”. Para que un cúbit pueda estar bien definido, estos niveles deben estar protegidos de algún modo del resto de niveles cuánticos del sistema y bien aislados de su entorno. Al mismo tiempo, tenemos que ser capaces de controlar individualmente varios cúbits y controlar la interacción entre ellos para realizar operaciones programables.

Hay varias tecnologías capaces de fabricar cúbits bien caracterizados. De las primeras fueron los iones atrapados (propuestos por Cirac y Zoller en 1995). Se atrapan iones con trampas magnéticas para manipularlos individualmente con láseres. Se utilizan dos de los niveles energéticos de los iones para definir los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . Mediante pulsos de láser y emisión estimulada se implementan las puertas lógicas cuánticas [1]. Actualmente, los ordenadores cuánticos iónicos están compuestos de alrededor de 20 cúbits. Para escalar estos dispo-

sitivos se requiere de campos magnéticos cada vez más sofisticados, pues es fácil que, a medida que la interacción de Coulomb entre iones crece por la cantidad de estos, se puedan “perder” algunos antes de terminar de ejecutar el circuito.

Otra tecnología capaz de construir cúbits son los circuitos superconductores. Estos circuitos son similares a los circuitos LC resonantes, pero sustituyendo la inductancia por una unión de Josephson. En consecuencia, cuando el circuito está en régimen de superconductividad, los niveles energéticos correspondientes corresponden a los de un oscilador cuántico anarmónico. Los cúbits superconductores se controlan enviando ondas en la frecuencia de resonancia de cada uno de los circuitos superconductores del chip. Estos ordenadores cuánticos están compuestos de alrededor de 100 cúbits (aunque la fabricación ya va por los mil), y es de las tecnologías más extendidas. Escalarla es complejo por dos principales motivos. El primero es que se requiere de un sistema de enfriamiento para que los circuitos estén en superconductividad, es decir, se requiere de refrigeradores de dilución capaces de enfriar hasta mK. La otra dificultad se haya en la fabricación de los circuitos: es casi imposible no introducir pequeños defectos que provoquen que los cúbits no estén bien acoplados o que sus frecuencias de resonancia sean demasiado cercanas entre sí, lo que provoca errores de “cross-talk”.

Otra tecnología cuántica que ha emergido con fuerza es la óptica lineal. Usando la polarización de fotones como cúbits, y mediante el uso de espejos, divisores de haz y módulos de cambio de fase, se pueden implementar las operaciones lógicas. La fotónica tiene la ventaja de poder usarse también para comunicaciones cuánticas, además de ser muy limpia en términos de coherencia. Esta ventaja se torna en desventaja por la dificultad de interaccionar los fotones entre sí, lo que aumenta la complejidad de los sistemas cuánticos fotónicos y complica su escalabilidad.

Existen otras tecnologías prometedoras, como los ya mencionados átomos neutros que mediante su excitación a niveles de Rydberg pueden usarse para computación cuántica digital, además de como simuladores cuánticos. También hace años que se está explorando el uso de puntos cuánticos o moléculas como cúbits, aunque su escalabilidad es, actualmente, limitada.

#### 2. La posibilidad de inicializar los cúbits a un estado de referencia

Cualquier algoritmo cuántico requiere el repetir las operaciones suficientes veces para poder obtener la distribución de probabilidad del estado de los cúbits. Para ello, es fundamental

que un ordenador cuántico pueda prepararse en un estado inicial estable y que esta preparación se pueda repetir las veces que haga falta. Este estado inicial suele ser el estado de energía fundamental de los cíbits (el  $|000\dots0\rangle$ ) y se puede llegar a él o bien esperando a que los cíbits se “relajen” o bien acelerando el proceso con ciertas operaciones cuánticas.

En general, si el criterio 1) está resuelto, este no debería suponer un factor limitante para esa tecnología. Sin embargo, hay que tener en cuenta el tiempo requerido para esa inicialización: si es demasiado largo, el algoritmo cuántico en cuestión puede requerir de tiempos de ejecución muy largos, perdiendo así su potencial ventaja cuántica.

### 3. Tiempos de coherencia suficientemente largos para implementar las operaciones cuánticas

Para que los circuitos cuánticos de nuestro algoritmo puedan ser implementados, también se requiere que los cíbits tengan tiempos de coherencia suficientemente largos. Estos tiempos, junto con los tiempos de ejecución de las operaciones, nos dictan cuánto tiempo tenemos para implementar el circuito o cómo de largo (profundo) puede ser. Tecnologías como los iones atrapados o los átomos neutros tienen tiempos de coherencia muy largos, de segundos incluso. Sin embargo, el tiempo de ejecución de sus puertas lógicas es también largo. Por otro lado, los circuitos superconductores tienen tiempos de coherencia muy cortos, de microsegundos, pero también cuentan con puertas lógicas muy rápidas, de nanosegundos.

### 4. Un set universal de puertas lógicas cuánticas

A diferencia de la computación clásica, donde dado un set de puertas universal, se puede construir cualquier operación aritmética booleana con un número finito de estas puertas, en computación cuántica eso es imposible, dado que hay un número incontable de posibles operaciones unitarias. Afortunadamente esta aparente limitación tiene solución con el teorema de Solovay-Kitaev: dado un set universal de puertas lógicas cuánticas y una cierta operación unitaria, se puede aproximar tal operación usando un número polinómico de puertas. Es decir, podemos aproximar cualquier operación unitaria requiriendo un número de puertas que no crece exponencialmente. ¡Menos mal!

Hay muchos sets de puertas cuánticas universales. Como es lógico, cada tecnología escoge el que se asemeja mejor a las operaciones físicas nativas de sus cíbits. En general, suelen estar compuestos por puertas a un cíbit que puedan generar superposición (como la puerta Hadamard,  $|0\rangle \rightarrow (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ ,  $|1\rangle \rightarrow (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ ,

generar entrelazamiento (como la puerta a dos cíbits CNOT, que invierte el estado del cíbit objetivo si el cíbit control se encuentra en el estado  $|1\rangle$ ), y al menos una puerta que no forme parte del grupo de Clifford (como la puerta a un cíbit T, que introduce una fase  $\pi/4$  sobre los cíbits en el estado  $|1\rangle$ ). Este último punto es muy relevante, dado que existe un algoritmo clásico eficiente para poder representar circuitos compuestos únicamente de puertas del grupo de Clifford (teorema de Gottesman-Knill).

### 5. Poder medir el estado de los cíbits

Por último, para poder extraer información de cualquier sistema cuántico, requerimos de un proceso de medida que colapse la función de onda de los cíbits. Este proceso es en muchos casos indirecto utilizando medidas no-destructivas, y, por tanto, se puede utilizar también para la preparación de estados cuánticos (por ejemplo, la inicialización). También puede convertirse en un factor limitante, si este proceso de medida requiere de un tiempo considerable, dado que habrá que repetirlo en numerosas ocasiones.

### Más allá de los criterios de DiVicenzo

Estos criterios se convirtieron en una *check list* básica que sirvió de inspiración para explorar diferentes tecnologías cuánticas para computación. Sin embargo, es evidente que 25 años después se han quedado cortos para poder ser usados como guía para el diseño de los ordenadores cuánticos actuales. En los siguientes párrafos, analizamos algunos criterios más que son fundamentales para seguir avanzando en la computación cuántica actual:

### 6. Capacidad de implementar operaciones cuánticas en paralelo

De poco sirve un ordenador cuántico capaz de implementar puertas con errores muy bajos si estas no se pueden aplicar en paralelo entre subgrupos de cíbits. La ventaja cuántica de los algoritmos desaparecería en muchos casos, además de la imposibilidad de implementar CCE. La capacidad de operar en paralelo puede conllevar nuevas fuentes de error y decoherencia en los cíbits. En cualquier caso, cualquier algoritmo cuántico debe asumir que las puertas aplicadas a cíbits distintos serán aplicadas en paralelo, y así se mide la complejidad del circuito.

### 7. Medidas e inicialización de cíbits durante la ejecución del circuito

Para poder aplicar CCE necesitamos medir los cíbits auxiliares (los que nos proporcionan información acerca del error) en mitad del circuito para así rápidamente corregir ese error antes de que se propague. A menos que descubramos una forma de tener cíbits ilimitados,

lo esperado es reutilizar estos cíbits auxiliares para el siguiente ciclo de corrección de errores, es decir, necesitamos reciclarlos e inicializarlos de nuevo una vez medidos. Las medidas e inicialización intermedias no son experimentalmente obvias, dado que hay que ingeníárselas para realizar una operación controlada sobre únicamente un grupo de cíbits del ordenador cuántico sin afectar al resto, que debe seguir en un estado superposición coherente.

### 8. Rápida interconexión cuántico-clásica

En un artículo reciente [6] ya hablamos de la necesidad de integrar los ordenadores cuánticos con los superordenadores. Además de por las aplicaciones híbridas que se pueden desarrollar, tener una rápida interfaz entre las señales que entran y salen del ordenador cuántico y el computador utilizado para procesarlas es fundamental para cualquier algoritmo cuántico. Más aun si se pretende implementar CCE, donde hay que medir el estado de los cíbits auxiliares, identificar el error y corregirlo, todo ello en paralelo sobre todos los cíbits lógicos y múltiples veces en el circuito. Si esa conexión y procesamiento clásico no es suficientemente rápido, los errores que se pretenden corregir se acumularan antes de poder ser mitigados.

### 9. Calibraciones rápidas y eficientes

La estabilidad de los sistemas cuánticos tiene que mantenerse en todo momento para que los algoritmos implementados den los resultados esperados. Para ello, las frecuencias de resonancia de los cíbits, los pulsos enviados para realizar las operaciones o las medidas tienen que estar calibradas a la respuesta física de los cíbits. Pequeñas variaciones en la temperatura, campos electromagnéticos externos o vibraciones pueden afectar a los parámetros de funcionamiento del sistema. Por ello, los protocolos de calibración tienen que realizarse con cierta periodicidad. Depende de la tecnología cuántica empleada, esas calibraciones pueden requerirse muy a menudo. Además, conforme tenemos ordenadores cuánticos de más y más cíbits, técnicas de caracterización de cada uno de ellos como la tomografía cuántica se vuelven exponencialmente costosos y toca idear protocolos más estadísticos como el “randomized benchmarking”. En cualquier caso, estas calibraciones deben ser lo más rápidas posible, ya que para cada una de ellas hay que parar el ordenador cuántico.

#### Una mirada al futuro

En el artículo de Cirac [1] se mencionaban tres tecnologías cuánticas con potencial para la computación: las óptico-cuánticas (átomos o iones atrapados), las basadas en sólidos (circuitos su-

perconductores o puntos cuánticos) y la resonancia magnética nuclear (RMN). De entre todas ellas, la más prometedora eran los iones atrapados. En estos momentos, podemos asegurar que estos siguen siendo de las tecnologías más empleadas, pero en algunos casos superadas por los átomos neutros y los circuitos superconductores. También han surgido otras como la fotónica, y se ha descartado casi por completo la RMN.

Los ordenadores cuánticos son una realidad. Se han hecho varios experimentos que demuestran la ventaja cuántica con simulaciones que no pueden ser replicadas ni por el mayor superordenador del planeta. También hemos entrado en la era de la CCE y empezamos a ver demostraciones de computación cuántica tolerante a fallos [7]. Computadores y simuladores cuánticos están siendo instalados en centros de supercomputación junto a máquinas de computación de altas prestaciones (ver figura 1, parte superior). Es más que probable que la tecnología cuántica que nos traiga la era tolerante a fallos todavía no haya sido descubierta en su totalidad. También que desconozcamos los algoritmos cuánticos que más se emplearán en el futuro. Espero que estas últimas líneas sirvan de inspiración para que un investigador o investigadora joven del 2050 abra su artículo sobre las maravillas, inimaginables en 2025, que nos ha deparado la computación cuántica.

#### Referencias

- [1] J. I. CIRAC SASTURAIN, Quanta y Computación, *Revista Española de Física* **14**(1), 48 (2000).
- [2] J. ARGÜELLO LUENGO y A. GONZÁLEZ TUDELA, Simuladores cuánticos analógicos: Una herramienta para entender la materia que nos rodea, *Revista Española de Física* **35**(1), 5 (2021).
- [3] P. J. SALAS PERALTA y Á. L. SANZ SÁENZ, Corrección de errores en ordenadores cuánticos, *Revista Española de Física* **20**(1), 20 (2006).
- [4] M. CALIXTO, Computación Cuántica: un reto tecnológico, *Revista Española de Física* **15**(2), 35 (2001).
- [5] D. P. DiVincenzo, The Physical Implementation of Quantum Computation, *Fortschritte der Physik*, **48**(9-11), 771 (2000).
- [6] A. CERVERA LIERTA, Supercomputación y computación cuántica: el camino hacia la integración, *Revista Española de Física* **38**(2), 37 (2024).
- [7] GOOGLE QUANTUM AI y cols., Quantum error correction below the surface code threshold, *Nature* **638**, 920 (2025).

Alba Cervera Lierta  
Barcelona Supercomputing Center,  
investigadora Ramón y Cajal



# El descubrimiento del espín y la búsqueda de nueva física

Miguel Ángel Sanchis Lozano y Roger Sanchis Gual

El espín ha jugado en el pasado, y juega actualmente, un papel fundamental en el conocimiento de las leyes de la naturaleza. Su descubrimiento, mediante el experimento de Stern y Gerlach durante la década de 1920, fue un ejemplo de serendipia, pues no se correspondía con la interpretación inicial. Sin embargo, una vez aceptada la existencia del espín del electrón como un nuevo número cuántico, se abrieron las puertas a un desarrollo sin precedentes de la incipiente mecánica cuántica, incluyendo la existencia de la antimateria y, en última instancia, conduciendo a la formulación de la teoría cuántica de campos. Aplicaciones en medicina, como la resonancia magnética nuclear, o en la búsqueda de la llamada nueva física más allá del modelo estándar de partículas elementales, son ejemplos de su importancia actual.

## Introducción histórica

Como la historia de la ciencia enseña, no siempre un hallazgo experimental ratifica o coincide con aquello que se esperaba encontrar dentro del paradigma científico entonces válido. En ocasiones, de tal discrepancia surge una teoría más general que no anula enteramente la anterior, sino que la completa o amplia. Un ejemplo lo constituye el resultado “fallido” del experimento de Michelson-Morley en 1887, que intentaba determinar la velocidad relativa de la Tierra con respecto al éter y, por ende, al espacio absoluto newtoniano. En 1905, Albert Einstein reinterpretó tal resultado negativo proponiendo su teoría de la relatividad especial, con sorprendentes consecuencias como la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes, desencadenando toda una revolución en el pensamiento científico y filosófico posterior.

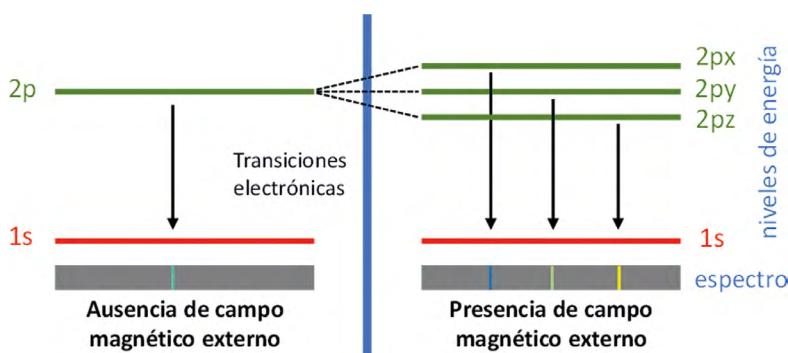
Un caso semejante aconteció en la década de 1920, con el experimento de Stern y Gerlach [1-2] (ESG) y el descubrimiento, *a posteriori*, del espín del electrón. Aunque el resultado experimental (que describiremos con detalle después) fue incorrectamente interpretado al principio, proporcionó un valioso apoyo a la incipiente teoría cuántica, entonces sin una aceptación generalizada entre la comunidad científica. Max Planck había iniciado, en 1900, una revolución conceptual en la física al postular que la energía no se emitía de manera continua en el espectro del cuerpo negro, sino en “paquetes” discretos: los cuantos [3-4]. Siguiendo esa línea de pensamiento aplicada a los espectros atómicos, Niels Bohr propuso en 1913 [5] un modelo atómico donde únicamente ciertas órbitas circulares de los electrones estaban permitidas, según unas reglas de cuantización del momento angular orbital. Poco después, Arnold Sommerfeld amplió las órbitas posibles a elípticas en general, como un minúsculo sistema solar cuyos planetas serían los electrones de la corteza atómica. De ese modo, se intentaba explicar el desdoblamiento de los niveles energéticos en subcapas, puesto de manifiesto por la espectroscopía atómica de alta resolución. Cabe señalar la importante contribución de Miguel Catalán [6] al introducir la idea (y nombre) del *multiplete*, para designar tales subestructuras atómicas.

Pese a sus logros en espectroscopía (especialmente en átomos hidrogenoides) el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld (BS) adolecía de una base teórica sólida. Además, era incapaz de dar cuenta de todas las reglas de selección en transiciones entre niveles atómicos, y mucho menos sus ritmos (probabilidades) de transición. Hubo que esperar a Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg, entre otros físicos de gran nivel como Louis de Broglie (quien introdujo el importantísimo concepto de la dualidad onda-corpúsculo, proporcionando una primera explicación de la cuantización un tanto arbitraria de las órbitas según Bohr), para lograr una formulación más rigurosa y formal de la mecánica cuántica (MC) [7-8].

Señalemos que, por aquel entonces, la comunidad científica se mostraba reticente a aceptar la ahora denominada vieja teoría cuántica, que conllevaba conceptos difícilmente aceptables para una mentalidad clásica [4]; pero una prueba definitiva sobre su validez estaba en camino. Se trataba del ya citado ESG cuya finalidad era detectar la llamada cuantización espacial de las órbitas de los átomos en el seno de un campo magnético externo. Pero antes traslademos nuestra atención a los espectros atómicos, como constatación de la existencia de niveles energéticos discretos, es decir, cuánticos.

Históricamente, Isaac Newton introdujo en el siglo XVII el concepto de espectro (del latín *spectrum*: aparición) cuando mediante un prisma separó, por refracción, la luz solar en sus diferentes componentes visibles. Pero fue Josef von Fraunhofer quien dio el gran impulso a la espectroscopía al observar rayas de absorción complementarias a las líneas de emisión de los elementos químicos. Las rayas en los espectros atómicos son como “huellas dactilares” de los elementos, lo cual permitió que algunos de ellos (como el cesio o el rubidio) fueran descubiertos posteriormente por Robert Bunsen y Gustav Kirchhoff gracias al espectroscopio de su invención en 1859.

Por otro lado, el efecto Zeeman (descubierto en 1896 por Pieter Zeeman) consiste en el desdoblamiento de las líneas espectrales atómicas en más componentes al situar los átomos dentro de un campo magnético externo débil (véase la figura 1).



**Fig. 1.** Efecto Zeeman normal, mostrando el desdoblamiento de niveles de energía de un átomo en presencia de un campo magnético, originando tres rayas donde antes no había más que una. Las tres rayas se asocian a las tres proyecciones posibles del momento angular orbital a lo largo del campo aplicado.

Existe otro fenómeno equivalente, el llamado efecto Stark (descubierto en 1913) cuando en lugar de un campo magnético se aplica un campo eléctrico externo, que no desarrollaremos en este artículo por cuestiones de espacio, pese a su indudable interés. Por similares razones, tampoco abordaremos los espectros moleculares, limitando nuestra atención al caso atómico.

Bajo la acción de un campo magnético sobre los átomos, cabe distinguir entre el efecto Zeeman normal y el anómalo en espectroscopía. Este último, descubierto por Thomas Preston en 1897, presentaba unas características distintas en la multiplicidad y polarización de la luz en el desdoblamiento de rayas, inexplicables según el modelo cuántico primitivo. Por esa razón, se le denominó "anómalo", pues no existía entonces ninguna explicación satisfactoria a falta de la posterior introducción del espín en el formalismo teórico. En realidad, el efecto Zeeman anómalo es más frecuente en espectroscopía que el "normal", proporcionando un ejemplo de un uso desafortunado de la terminología en física, que posteriormente no se corrige por su utilización ya habitual.

Por un lado, la física clásica podía proporcionar una explicación razonable del efecto Zeeman normal mediante la fuerza de Lorentz ejercida por un campo magnético externo sobre los electrones girando en órbitas permitidas alrededor del núcleo atómico según el modelo de BS. Por el contrario, era totalmente incapaz de dar cuenta del efecto Zeeman anómalo, como el desdoblamiento en multipletes de la serie de líneas del sodio, con o sin campo magnético externo aplicado.

En efecto, si se examinan con alta resolución las líneas espectrales de átomos como el hidrógeno (hidrogenoides) sin campo magnético externo, se encuentra que algunas de ellas, poco espaciadas entre sí, forman dobletes; de ahí el nombre de estructura fina. Su origen radica principalmente (aunque no únicamente) en la interacción entre el espín del electrón y su momento angular orbital alrededor del núcleo, creando un campo magnético efectivo que "siente" el electrón [9]. Por ello, se le puede considerar como un efecto Zeeman "interno" estando su magnitud (separación entre rayas) controlada por la constante de estructura fina,  $\alpha \approx 1/137$ , introducida por Sommerfeld al in-

corporar correcciones relativistas al movimiento orbital del electrón según el modelo cuántico primitivo.

En 1919, el efecto Zeeman había captado la atención de Alfred Landé, cuyo director de tesis había sido Sommerfeld, obteniendo importantes resultados, especialmente en la suma vectorial de momentos magnéticos y su relación con los momentos angulares atómicos según la MC, conduciendo al famoso factor  $g$  que lleva su nombre. Invitado por Landé, llegó a Tübingen (Alemania) en 1925 un joven Ralph Kronig, procedente de la Universidad de Columbia (USA). Allí explicó a un escéptico Wolfgang Pauli su idea de un electrón girando como una peonza, introduciendo por primera vez el concepto de espín (*spin* en inglés significa girar alrededor de sí mismo) para explicar el efecto Zeeman anómalo. De hecho, Pauli ya estaba considerando un cuarto número cuántico atómico (además de los ya conocidos: principal, orbital y magnético), con dos posibles valores (pero sin significado físico), formulando el principio de exclusión a finales de 1925 [10]. Sin embargo, Pauli rechazó de manera un tanto desdenosa (véase el recuadro 1) la propuesta, entonces algo ingenua, de Kronig.<sup>1</sup> Entre otros motivos, un electrón girando como una diminuta esfera (con el llamado radio clásico del electrón) conducía a dificultades insalvables al superar la velocidad de la luz en su periferia con el fin de reproducir numéricamente el momento dipolar magnético necesario. El crédito de la introducción del espín en la física se atribuye habitualmente a George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit, discípulos de Paul Ehrenfest en la universidad de Leiden (Países Bajos), quienes, ignorantes acerca de la sugerencia inicial de Kronig, presentaron una propuesta semejante mediante un corto artículo en 1925. Anecdóticamente, tras entregarlo a Ehrenfest para una revisión previa a su envío, y tras una fundamentada crítica de Hendrik Lorentz, reconsideraron su publicación. Sin embargo, Ehrenfest, a quien le atrajo de inmediato la idea pese a su atrevimiento (o quizás por ello), ya lo había remitido a la revista [11], justificándose ante ellos: "sois lo suficientemente jóvenes como para poder decir algunas tonterías". Pero no eran tonterías...

### Experimento de Stern-Gerlach y el descubrimiento a posteriori del espín

Otto Stern, nacido en Prusia en 1888, comenzó su carrera científica siendo el primer estudiante de Einstein, inicialmente en Praga y posteriormente en Zúrich, de quien adquirió su interés por la teoría cuántica y el problema del átomo. A principios de los años 20 del pasado siglo, Stern investigaba sobre gases moleculares en el Instituto de Física Teórica en Frankfurt bajo la dirección de Max Born. Walther

<sup>1</sup> Arthur Compton fue el primer científico en sugerir, en 1921, que el electrón poseía un momento magnético intrínseco, pero no desarrolló más allá la idea.

Gerlach, también nacido en Prusia en 1889, quien hizo su doctorado con Friedrich Paschen, coincidió con Stern al incorporarse al Instituto de Física Experimental en Frankfurt, contiguo al teórico, una afortunada coincidencia.

A lo largo de 1921 y comienzos de 1922, Stern y Gerlach diseñaron y llevaron a cabo un experimento histórico que contribuyó de manera definitiva a la aceptación y posterior desarrollo de la teoría cuántica propuesta por Bohr y Sommerfeld para explicar los niveles energéticos atómicos. La idea era enviar un haz bien colimado de átomos neutros de plata a través de un campo magnético externo uniforme junto con otro de gradiente no uniforme perpendicular a su dirección de movimiento (ver figura 2). Cada átomo debería comportarse como un pequeño imán bajo la acción del campo magnético del dispositivo. Se pensaba entonces (erróneamente) que el “último” electrón desapareado (de valencia) del átomo de plata poseía un número cuántico orbital igual a 1 y, por tanto, momento dipolar magnético no nulo que caracterizaba las propiedades magnéticas del átomo en su conjunto.

Por un lado, la física clásica predecía que, según la orientación (al azar) del momento magnético del átomo de plata, la fuerza magnética que actúa sobre los diferentes átomos sería diferente, desviando la trayectoria en diversos grados. Por tanto, se esperaba una mancha continua, formada por los impactos de los átomos sobre la placa recolectora situada a la salida del campo magnético.

En cambio, de acuerdo con la teoría cuántica, cada átomo debería orientarse hacia arriba o hacia abajo (con respecto al campo magnético aplicado) con una probabilidad del 50 % en cada caso, sin posibilidades intermedias. La mitad de los átomos de plata estarían sometidos a una fuerza en sentido contrario a la otra mitad, al desplazarse por la región del imán, de manera que la marca final estaría formada únicamente por el contorno de la mancha continua según la física clásica. Es lo que suponía Bohr. Por otro lado, Born esperaba muy razonablemente tres manchas: una más debida al momento angular orbital perpendicular al campo, como en el efecto Zeeman normal.

Tras un año de trabajo y superando numerosas dificultades en condiciones económicas difíciles por la hiperinflación,<sup>2</sup> Stern y Gerlach finalmente encontraron que los átomos desviados por el campo magnético se concentraban en dos únicas manchas en la placa recolectora, en vez de llenar la zona entre ellas. Fue gracias al humo de los cigarrillos baratos que fumaba Stern, ricos en azufre, que pudieron visualizar por primera vez las manchas al formarse sulfuro de plata, como en

un revelado fotográfico [12]. Posteriormente utilizaron una película de emulsión fotográfica para registrar la señal. No obstante, los resultados no eran del todo concluyentes y el desánimo cundió entre ellos decidiendo, en una reunión en Gottinga a principios de 1922, abandonar el experimento. Sin embargo, una huelga de ferrocarriles retrasó durante un día el regreso de Gerlach a Frankfurt, lo que le dio tiempo para repensar cómo mejorar el dispositivo experimental, conduciendo al éxito final tras reanudar el trabajo.

¿Se hubiese descubierto el espín sin el ESG de 1922? Sin duda que sí, al igual que otros grandes descubrimientos experimentales o formulaciones teóricas que, más tarde o más temprano, han de acontecer prosiguiendo el curso lógico, aunque a veces irregular, de la ciencia. Pero este comentario no resta mérito alguno a la capacidad y perseverancia demostradas por Stern y Gerlach en su experimento, y se extiende a cualquier hallazgo similar.

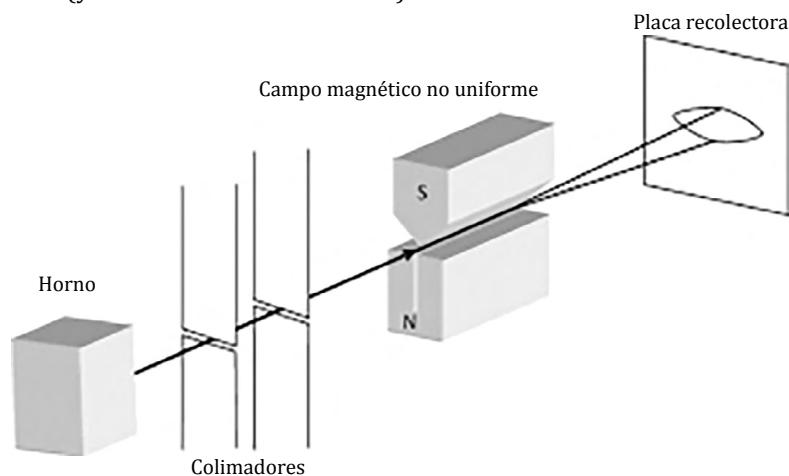
Una vez comprobado, tras una mejora del alineamiento del haz, que eran dos manchas claramente diferenciadas, Gerlach envió un telegrama a Stern (entonces en Rostock) con el siguiente texto: “Bohr tenía razón después de todo”. Pero en realidad solo a medias...

En 1927, Ronald Fraser, uno de los estudiantes de Stern, llegó a la conclusión de que el momento magnético orbital del átomo de plata era, en realidad, cero! Utilizando la nomenclatura actual, de los 47 electrones que posee un átomo neutro de plata, 46 llenan los primeros orbitales, mientras que el “último” se encuentra en el orbital esférico 5s [13]. Esto significaba que el haz de plata no debería haber sido afectado por el campo magnético aplicado y, por tanto, dividirse en dos. En consecuencia, la motivación y fundamento teórico del resultado del ESG eran... incorrectos. Faltaba un ingrediente fundamental, aunque por aquel entonces desconocido. Un caso típico de serendipia...

### Momento angular orbital y de espín

Según la MC se puede establecer una relación lineal (ya conocida en física clásica) entre el mo-

**Fig. 2.** Esquema del experimento de Stern y Gerlach en 1922. Un haz bien colimado de átomos neutros de plata calentados a unos 1000 °C en un horno atraviesa una región con un campo magnético uniforme (de una décima de tesla) y otro no homogéneo (de 10 teslas por centímetro), desviándose transversalmente en dos trayectorias que originan sobre una placa recolectora dos manchas simétricas con un espacio entre medias, mientras la física clásica predecía una mancha continua. La explicación final de la cuantización espacial observada supuso, *a posteriori*, el descubrimiento experimental directo del espín del último electrón (desaparecido) de la plata y sus dos posibles orientaciones con respecto al campo magnético aplicado. Este tipo de experimento se ha repetido con diferentes elementos químicos, como el hidrógeno o el sodio, con idéntico resultado.



2 El banquero de origen alemán Henry Goldman donó al experimento unos cientos de dólares a petición de Born. Einstein también prestó alguna ayuda económica a su antiguo discípulo Stern.

mento magnético dipolar  $\vec{\mu}_L$  y el momento angular  $\vec{L}$  de una partícula como el electrón  $\vec{\mu}_L = -g_L(e\hbar/2m_e)\vec{L}/\hbar = -g_L\mu_B\vec{L}/\hbar$ , donde  $\hbar = h/2\pi$  es la constante de Planck reducida;  $e$  y  $m_e$  denotan la carga (en valor absoluto) y masa del electrón, respectivamente. El factor  $g_L$  representa la razón giromagnética entre el momento dipolar magnético (expresado en unidades del magnetón de Bohr,  $\mu_B = e\hbar/2m_e$ ) y el momento angular correspondiente (en unidades de  $\hbar$ ). Notemos que  $g_L$  vale 1, coincidiendo con el caso clásico; no obstante, el símbolo se mantiene por razones de simetría del caso orbital con el espín, como se verá a continuación. Si el momento angular orbital  $L$  fuera nulo (como en el átomo de plata neutro), el momento magnético asociado  $\mu_L$  también lo sería, por lo que la interpretación inicial del ESG era claramente incorrecta.

A finales de los 1920, la idea de un nuevo número cuántico para el átomo, que podría explicar el efecto Zeeman anómalo, ya estaba rondando en la comunidad científica. De tal modo, un electrón poseería un momento angular intrínseco  $S$  originando un momento dipolar magnético de espín según la expresión  $\vec{\mu}_s = -g_S\mu_B\vec{S}/\hbar$ .

Si nos centramos en este último caso, la energía de interacción  $U$  entre un campo magnético  $\vec{B}$  y el momento magnético de espín de un electrón se escribe como el producto escalar  $U = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B}$ , que se corresponde con una expresión general (clásica) que conduce a un antialineamiento entre el espín y el campo magnético debido a una menor energía que en el caso del alineamiento.

Ahora bien, considerando la naturaleza cuántica del espín se distinguen los denominados estados *up* y *down* (según la proyección a lo largo de la dirección del vector  $\vec{B}$ ) que originan, consecuentemente, un desdoblamiento o *splitting* del nivel energético del electrón con respecto al átomo sin campo magnético, fundamental para interpretar correctamente el resultado del ESG.

En una configuración inicial de un dipolo magnético en un campo magnético, sin posibilidad de disipación de energía, su energía de orientación permanecerá constante. Bajo tales circunstan-

cias,  $\vec{\mu}_s$  precesa alrededor de  $\vec{B}$  con una frecuencia angular determinada mediante la expresión:  $v = g_S\mu_B B / 2\pi\hbar$ , conocida como la frecuencia de Larmor. Este fenómeno juega un papel primordial, por ejemplo, en la resonancia magnética nuclear, aunque, en este caso, el responsable de la precesión sea el espín de los núcleos atómicos.

Regresemos ahora a 1925, cuando Goudsmit y Uhlenbeck estudiaban el desdoblamiento de ciertas líneas del espectro óptico del hidrógeno y de los átomos alcalinos, encontrando que, en ausencia de un campo magnético externo, estaban compuestas por parejas muy próximas. Se trataba de la estructura fina ya abordada por Sommerfeld en su modelo atómico, quien la atribuía a las correcciones relativistas del movimiento del electrón alrededor del núcleo. Esa interpretación funcionaba adecuadamente para el caso del hidrógeno. Sin embargo, en los elementos alcalinos, con velocidades orbitales de los electrones menos elevadas (por tanto, con efectos relativistas mucho menores), el desdoblamiento de niveles observados era incluso mayor que en el caso del hidrógeno. Algo fallaba.

En resumen, con el fin de reproducir adecuadamente los desdoblamientos de las rayas espectrales de los elementos alcalinos, pero no el hidrógeno, debía emplearse el valor  $g_S = 2$ , el doble del factor orbital  $g_L = 1$ . En cambio, en el caso del hidrógeno se requería  $g_S = 1$ , lo cual era una contradicción. Por todo ello, Pauli acogió con desconfianza la propuesta inicial de Kronig sobre el espín de un electrón que gira.

Ahora bien, en 1926, Llewellyn Thomas [14] consiguió demostrar, mediante transformaciones de Lorentz, que en el caso del hidrógeno el factor  $g_S$  efectivo era muy cercano a 1, en vez de 2, mientras que en los otros átomos polielectrónicos el grado extra de libertad introducido por el espín del electrón explicaba adecuadamente la estructura fina, siendo las correcciones relativistas claramente insuficientes por sí mismas.

Al fin, Pauli se convenció de la necesidad y realidad del espín (identificándolo con "su" cuarto número cuántico) para explicar la interacción espín-órbita (generando la estructura fina de los espectros atómicos), y reinterpretar *a posteriori* el resultado del ESG. Por todo ello, la comunidad científica comenzó a aceptar la existencia del espín, y del momento dipolar magnético asociado, como un nuevo número cuántico: una propiedad intrínseca del electrón (aun siendo puntual, es decir, elemental), como su masa o carga eléctrica, y no como consecuencia de una rotación de una minúscula esfera alrededor de un eje.

Así pues, fue en 1927, cinco años tras el ESG, y tras la observación de Fraser ya citada sobre la falta de momento angular orbital de la plata, cuando se reinterpretó el resultado del desdoblamiento del haz mediante el concepto cuántico del espín. En ese año, Pauli extendió la ecuación de Schrödinger

#### Recuadro 1: El experimento de Stern-Gerlach y el "efecto Pauli"

Wolfgang Pauli (1900-1958) fue un extraordinario físico teórico, premio Nobel en 1945, con grandes aportaciones a la mecánica cuántica (como el famoso principio de exclusión que lleva su nombre), aunque temido por sus críticas a menudo despiadadas hacia sus colegas (excepto a su maestro Arnold Sommerfeld a quien veneraba). Sin embargo, se propagó una leyenda (que llegó a creer él mismo) conocida como "efecto Pauli": su cercanía a un equipo experimental provocaba una avería sin causa aparente. Tal era la fama de "gafe", que su amigo y colega Otto Stern le prohibió tajantemente entrar en las instalaciones del instituto en Frankfurt donde, junto con Walther Gerlach, se descubrió el espín del electrón, fundamental en el desarrollo y aplicación del principio de exclusión de Pauli.

para incluir un término de interacción entre el momento dipolar de espín y un campo magnético externo, mediante la introducción de unas matrices  $2 \times 2$  (que llevan su nombre). Sin embargo, tan importante éxito quedaba viciado de origen por el carácter no relativista de la ecuación de Schrödinger y su falta de motivación fundamental más allá de la fenomenología.

En realidad, Schrödinger ya había formulado, en 1926, la ahora denominada ecuación de Klein-Gordon para describir partículas relativistas. Sin embargo, cuando Oskar Klein y Walter Gordon la intentaron aplicar al electrón, encontraron graves dificultades, entre otras la aparición de densidades negativas de probabilidad. Fue Paul Dirac quien, en 1928, formuló una ecuación cuántica relativista con la decisiva ventaja de contener solo derivadas primeras respecto al tiempo (y al espacio), evitando de este modo tales probabilidades negativas. Actualmente la ecuación de Klein-Gordon se aplica a partículas sin espín (genéricamente llamadas bosones, como los piones o el bosón de Higgs) y la dificultad inicial de probabilidades negativas se solucionó al considerar densidades de carga eléctrica, con una clara interpretación física.

La ecuación de Dirac, ampliando el formalismo de Pauli a matrices de dimensión  $4 \times 4$ , no solo evitaba las (entonces) problemáticas densidades negativas, sino que además aportaba un extraordinario "valor añadido": los estados "etiquetados" mediante las dos posibles proyecciones del espín  $\frac{1}{2} \hbar$  del electrón. El orden de magnitud del momento magnético asociado a dicho espín queda determinado por el magnetón de Bohr (véase el recuadro 2) prediciendo, de manera natural, el factor  $g_s=2$  en el límite no relativista, un logro nada trivial.

Por otro lado, el espín quedaba fundamentado sobre firmes principios físicos, íntimamente ligado con la relatividad especial de Einstein (más específicamente, con el grupo de transformaciones de Lorentz). Señalemos también el carácter típicamente cuántico del espín (proporcional a  $\hbar$ ), resultando imposible alcanzar un límite clásico mediante el procedimiento habitual de hacer  $\hbar$  tender a cero.

No menos importante, según la inicial interpretación de Dirac, las soluciones de su ecuación le llevaron a postular la existencia del llamado "mar de Dirac", entendido como un conjunto infinito de estados de energía negativa (lo que significa, inobservables) que llenan todo el espacio. Al tratarse de partículas de espín semientero, el principio de exclusión de Pauli prohíbe que electrones de energía positiva (observables) "caigan" y ocupen tales estados por el principio básico en física de mínima energía. Ahora bien, si un fotón suficientemente energético impacta sobre un electrón de energía negativa, le dotará de energía positiva (por tanto, volviéndose observable), dejando un "hueco" en el mar de Dirac que se comportará como un antielectrón, o positrón. Algo (relativamente) análogo suce-

de en los semiconductores, donde se forman pares electrón-hueco, aunque en este caso los huecos deben contemplarse como cuasipartículas (no reales), mientras que los positrones (de igual masa que los electrones, pero con carga eléctrica opuesta) sí que se consideran verdaderas (anti)partículas elementales. Prosiguiendo con la interpretación de Dirac, cuando un electrón se encuentra con un positrón, ocupa el hueco correspondiente, liberando energía en forma de rayos gamma: materia y antimateria se aniquilan. La predicción de la antimateria por Dirac, años antes del descubrimiento experimental del positrón por Carl Anderson en 1932 observando rayos cósmicos en una cámara de burbujas, representa uno de los más portentosos éxitos de la mente humana en solitario.<sup>3</sup> Ahora sabemos que la antimateria comprende "duplicados" de todas las partículas elementales, como quarks y leptones, aunque en nuestro universo observable domina la materia frente a la antimateria, un misterio aún por explicar.

Sin menoscabo del extraordinario logro intelectual de Dirac, la actual descripción teórica de la antimateria, debida a Richard Feynman y Ernst Stueckelberg, contempla al positrón (viajando hacia el futuro) como un electrón de energía negativa viajando hacia el pasado. No es necesario, por tanto, recurrir a la noción del mar de Dirac, no exento de graves dificultades conceptuales. No obstante, la "imagen" y denominación de mar de Dirac, aplicada a quarks, aún se utiliza para describir la complejidad de la estructura dinámica de protones y neutrones en la difusión de electrones y neutrinos con alto momento transferido.

Ahora bien, lo que la ecuación de Dirac ponía claramente de manifiesto es que el problema relativista y cuántico de una única partícula pierde sentido al involucrar (necesariamente) nada menos que infinitas partículas inobservables (del mar). Además, observaciones detalladas en la ordenación energética de los niveles atómicos, como el desplazamiento de Lamb entre los subniveles 2s y 2p del átomo de hidrógeno, requieren para su explicación de procesos que van más allá de la ecuación de Dirac, como la autointeracción de un electrón consigo mismo. Todo lo anterior, junto con otras muchas razones (formales, teóricas y prácticas) condujeron a un formalismo superior a la MC aplicada a partículas: la teoría cuántica de campos (históricamente denominada segunda cuantización) cuyo abordaje cae fuera del objetivo de este artículo, pero proponemos algunas referencias [16, 17].

A pesar de tales carencias, la elegante simplicidad, sólido fundamento y poder predictivo de la ecuación de Dirac, proporcionaron el empuje definitivo a la aceptación del espín como nuevo

<sup>3</sup> Dirac inicialmente identificó al antielectrón con el protón, al ser la única partícula elemental de carga positiva entonces conocida. Para una exposición detallada de la vida y obra de P. A. M. Dirac, véase la referencia [15].

número cuántico esencial en la física. Además de contribuir a explicar los espectros atómicos, el espín juega un papel fundamental en muchas propiedades físico-químicas de la materia ordinaria, como es el caso del magnetismo, un tema de extraordinario interés científico y tecnológico [18]. Por último, el espín permite duplicar el número de electrones al poblar los estados cuánticos de los átomos polielectrónicos, respetando el principio de exclusión de Pauli. Sin el espín, la tabla periódica de los elementos, y el mundo en consecuencia, serían muy diferentes de lo que conocemos.

El espín no es exclusivo de partículas elementales como los electrones, sino que partículas compuestas como protones o neutrones (y los núcleos atómicos en general) también pueden exhibir dicha propiedad cuántica. Así, la interacción entre el espín nuclear (en realidad, del momento angular total  $\vec{J}$  resultante de la superposición de los espines de los

nucleones constituyentes y de su momento angular orbital) y la corteza electrónica del átomo genera la denominada estructura hiperfina de los espectros atómicos, manifestándose como un desdoblamiento de las rayas espectrales en subconjuntos de niveles muy cercanos, al observarse con alta resolución.

Por supuesto, el espín también juega un papel trascendental en la estructura del propio núcleo atómico, sus desintegraciones y transiciones entre niveles. A su vez, los propios protones y neutrones (en general hadrones) están constituidos por quarks y antiquarks, dotados de espín  $\frac{1}{2}\hbar$ , cuyas propiedades y dinámica están descritas según el llamado modelo estándar (ME), actual paradigma de la física de partículas y de sus interacciones [19,20]. Notemos que en el marco del ME, todas las partículas (realmente) elementales constituyentes de la materia, son fermiones (espín semientero) mientras que los portadores de la interacción fuerte y electrodébil son bosones (espín uno), más el bosón de Higgs (espín cero).

En resumen, el estudio del espín abarca numerosísimos campos de la ciencia, desde la cosmología, astrofísica, física atómica, nuclear y de partículas, física de la materia condensada, fotónica, etc. hasta aplicaciones tecnológicas, imposibles de enumerar en su totalidad en este artículo. Citemos, a modo de ejemplo, la resonancia magnética nuclear (heredera histórica del ESG y conocida popularmente por su aplicación diagnóstica en imagen médica) o los ordenadores cuánticos donde los cíbits (del inglés *quantum bits*) se corresponden con estados (entrelazados) *up* y *down* de espín en ciertos prometedores dispositivos.

Seguidamente abordaremos brevemente la búsqueda de nueva física (NF) más allá del ME, donde el espín juega un papel decisivo. Conviene aclarar, primero, qué se entiende por NF en este contexto: no se trata de buscar un modelo alternativo que cancele al ME, y sus extraordinarios éxitos cosechados, sino de un marco más general que contemple al ME como una teoría *efectiva*, válida dentro de un margen de aplicación más reducido.<sup>4</sup>

### El espín del muon y la búsqueda de nueva física

Nos centraremos en la determinación muy precisa del momento dipolar magnético asociado a un “parente” más pesado del electrón, el muon, con una masa unas cien veces mayor y que se desintegra rápidamente, pero con una vida media lo suficientemente larga como para permitir la medida con precisión de sus propiedades.

La ecuación de Dirac predice para la razón giro-magnética  $g_e$  del electrón un valor igual a 2, en el límite no relativista, explicando en primera aproxi-

<sup>4</sup> Una situación diametralmente opuesta se dio con Galileo y Newton durante el nacimiento de la ciencia moderna, que supuso la completa desaparición de la “física” aristotélica.

### Recuadro 2: El magnetón de Bohr frente al magnetón nuclear

En física es importante conocer de antemano las escalas (de energía, longitud, etc.) que caracterizan a los fenómenos que se van a estudiar. En el caso del magnetismo atómico, la unidad natural es el magnetón de Bohr ( $\mu_B = e\hbar/2m_e \approx 5,78 \times 10^{-5}$  eV/T), que se corresponde con la mitad del momento dipolar magnético del electrón en primera aproximación. Su valor numérico es tan pequeño que podría pensarse en una contribución no apreciable del espín en el desdoblamiento de los niveles atómicos. Sin embargo, el campo magnético que “siente” un electrón atómico (considerando al núcleo girando a su alrededor) es considerable, de manera que el desdoblamiento debido a la estructura fina resulta observable espectroscópicamente. Así, en el caso del hidrógeno, el campo magnético interno es de unos 0,4 teslas. El desdoblamiento en energía de la interacción espín-órbita para el nivel  $n = 2$  es aproximadamente  $4,5 \times 10^{-5}$  eV, equivalente a una diferencia de longitudes de onda de 0,016 nanómetros para la célebre línea roja H $\alpha$  (por ejemplo, la transición... 3s  $\rightarrow$  2p de la serie de Balmer).

Por otro lado, protones y neutrones poseen un momento dipolar magnético cuyo orden de magnitud viene gobernado por el magnetón nuclear  $\mu_N = e\hbar/2m_N$ , donde  $m_N$  es la masa del nucleón (protón o neutrón), de manera que su valor es unas dos mil veces menor que en el caso del electrón.

Resulta irónico que Pauli, que rechazó durante bastante tiempo la idea del espín propuesta por Kronig, una vez convencido de su validez, lo utilizó para explicar la estructura hiperfina de niveles atómicos como consecuencia de la interacción magnética entre la corteza electrónica y el espín nuclear. Poco después, Kronig publicó un artículo opuesto a tal explicación al pensarse entonces que el núcleo atómico contenía electrones, además de protones, que deberían contribuir al espín nuclear total como un magnetón de Bohr. Por tanto, resultaba inverosímil que la estructura hiperfina observada tuviera un espaciado tan pequeño. La crítica de Kronig era sólida y resulta curioso que se le hubiese escapado a Pauli en su artículo. Sin embargo, poco después el neutrón fue descubierto por James Chadwick, entendiéndose entonces el núcleo compuesto por protones y neutrones, sin electrones, por lo que la crítica de Kronig perdió todo sentido.

mación la estructura fina y el ESG. En realidad, ese valor se aplica a cualquier partícula elemental de espín  $\frac{1}{2}\hbar$ , como es el caso del muon. Notemos que los muones se producen copiosamente en las interacciones de los rayos cósmicos en la alta atmósfera, alcanzando fácilmente la superficie terrestre debido a la dilatación Lorentz del tiempo. También se pueden producir en aceleradores de partículas, y orbitar durante un tiempo en un anillo mediante la acción de un campo magnético, como en el experimento muon g-2, primero en el National Brookhaven Laboratory y actualmente en FERMILAB (EE. UU.). De ese modo, se consigue medir el momento dipolar magnético llamado anómalo del muon con una precisión comparable a la del electrón. Distinguiremos los factores de espín del electrón y del muon mediante los símbolos  $g_e$  y  $g_\mu$ , respectivamente. En primera aproximación se verifica que  $g_e = g_\mu = 2$ .

No obstante, las partículas, incluso elementales, interactúan consigo mismas y con el vacío cuántico a su alrededor, por ejemplo, mediante la emisión y absorción de fotones virtuales los cuales, a su vez, crean pares de partículas y antipartículas virtuales, según el principio de indeterminación de Heisenberg. Tales procesos, que se describen mediante "búcles" (*loops*) en los diagramas de Feynman, pueden alterar las propiedades intrínsecas de las partículas puntuales.

Para determinar la desviación o anomalía con respecto al valor 2 de una partícula "pura" de Dirac, como el electrón, se introduce el factor  $a_e$ , tal que  $g_e = 2(1+a_e)$ .

La primera corrección del valor esperado de  $g_e$  es debida a Julian Schwinger en 1948, que obtuvo  $a_e = (g_e - 2)/2 = \alpha/2\pi$ , donde  $\alpha$ , recordemos, toma el valor aproximado de  $1/137$ . Se trata, pues, de una corrección pequeña pero medible, que acercaba el valor predicho al observado. Ahora bien, hay muchas más contribuciones, a cuyo arduo cálculo se han consagrado expertos durante años (citemos especialmente a Toichiro Kinoshita y su equipo, con más de doce mil diagramas de Feynman), alcanzando un extraordinario acuerdo con la determinación experimental de  $0,21$  partes por millón. Tal concordancia representa uno de los mejores resultados de precisión en toda la física y un éxito rotundo de la teoría cuántica de campos (y en particular de la electrodinámica cuántica) dentro del ME. También sugiere estudiar cualquier discrepancia entre la teoría y la observación experimental mediante esta propiedad magnética derivada del espín.

Con tal fin, analizaremos seguidamente el momento dipolar magnético anómalo del muon mediante el correspondiente factor  $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$ .

Citemos que el muon ofrece mucho mejores oportunidades que el electrón para el descubrimiento de NF debido a su mayor masa, pues las nuevas interacciones se amplificarían proporcionalmente a las masas (al cuadrado) de las partículas implicadas.

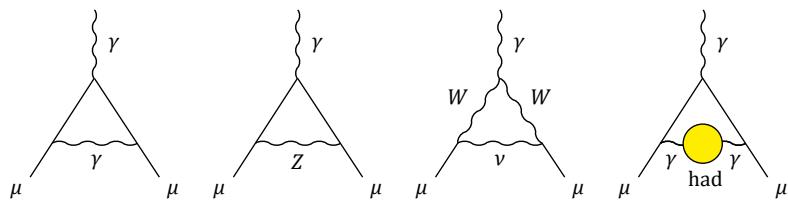
La última medida experimental realizada en Fermilab durante 2023 proporcionó un valor promedio  $a_\mu = 0,00116592059(22)$  donde, entre paréntesis, se indica el error experimental. Por otro lado, el valor teórico resultaba ser  $a_\mu = 0,00116591810(43)$  incorporando las correcciones (véase la figura 3) de todo tipo de interacciones dentro del ME, incluidas débiles y fuertes (hadrónicas). Con aproximadamente cinco desviaciones estándar de diferencia entre ambas, se consideró tal discrepancia como un posible descubrimiento de la tan ansiada NF.

Sin embargo, hace pocos meses, el cálculo de la contribución hadrónica (mediante la polarización del vacío especialmente, y la dispersión luz por luz) al factor  $g_\mu$  ha variado significativamente dando un vuelco a la situación. Con anterioridad, la corrección correspondiente se obtenía empíricamente a partir de datos procedentes de colisiones  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Sin embargo, utilizando la llamada cromodinámica cuántica en el retículo (*lattice QCD* en inglés), se ha recalculado recientemente dicha contribución, proporcionando esta vez un valor (y error) considerablemente menor. En resumen, el resultado actual resultado actual implica una discrepancia entre la predicción teórica del ME y la medida experimental de tan solo  $0,9$  desviaciones estándar (en lugar de  $5$ ), siendo, por tanto, compatible con una fluctuación estadística o error sistemático, descartando (por ahora) el descubrimiento de NF mediante el momento magnético anómalo del muon [21, 22]. Nuevas comprobaciones teóricas y experimentales están de camino, aunque, innegablemente, el nuevo valor teórico de la anomalía cercano al experimental ha supuesto una decepción entre la comunidad de física de partículas.

### Fronteras del conocimiento: intensidad versus alta energía

Como hemos visto, la determinación precisa del momento magnético anómalo del muon puede proporcionar pistas sobre la existencia de NF. La clave radica en aquellos procesos virtuales "internos" (búcles como en la figura 3) en los diagramas de Feynman, inaccesibles directamente a la observación, que, no obstante, originan modificaciones sutiles de las propiedades medibles de las partículas y de sus interacciones. Es este un ejemplo de un tipo de búsqueda de NF (cuya escala de energía es presumiblemente mucho mayor que la puesta en juego en el proceso estudiado) basado en correcciones virtuales de canales de producción o desintegración de partículas. Se habla pues de la *frontera de la intensidad o precisión*, por la gran estadística necesaria para alcanzarla.

Alternativamente, se puede buscar NF aumentando la energía del experimento (es decir, del acelerador) con el fin de superar el umbral de manifestación de nuevos fenómenos mediante la



**Fig. 3.** Distintas contribuciones a la interacción del muon con un campo magnético externo (representado mediante el fotón superior del vértice), alterando su momento dipolar magnético. El primero por la izquierda fue calculado por Schwinger en 1948, y actualmente más de 12 000 diagramas de Feynman han sido incluidos en el cómputo. El cuarto grafo a la derecha no se puede calcular perturbativamente, constituyendo una de las principales fuentes de incertidumbre teórica. Faltaría una contribución adicional (o más) en caso de que la NF contribuyera como una corrección más allá del ME con nuevas partículas y/o mediadores de interacción.

producción real, ya no virtual, de nuevas partículas o emergencia de interacciones. Se trata de la *frontera de la alta energía* en física de partículas. Un ejemplo de lo anterior se encuentra en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el CERN, y en sus futuras extensiones para incrementar luminosidad (intensidad) o energía, como el FCC (Future Circular Collider) de unos 100 km de circunferencia.

Por último, existe otro modo de explorar “territorios” desconocidos del conocimiento de la naturaleza, inaccesibles mediante los anteriores métodos. Se trata de aquellas observaciones astronómicas y astrofísicas que permiten investigar fenómenos extremadamente violentos en el universo, que tuvieron lugar a distancias considerables tanto en el espacio como en el tiempo: fusión de agujeros negros y consiguiente generación de ondas gravitatorias, materia y energía oscuras y sus efectos (anti)gravitatorios a gran escala, rayos cósmicos, fondo cósmico de microondas y de neutrinos, ondas gravitatorias primordiales que se remontan a pocos instantes después del *Big Bang*, pero que todavía pueden permanecer como un (débil) fondo en el universo actual [23-25].

Tales energías solo se pueden estudiar a escala astrofísica o cósmica, ciertamente inalcanzables por cualquier acelerador actual o futuro construido por la mano del ser humano. La cosmología/astrofísica de precisión está, por tanto, estrechamente vinculada con las anteriores fronteras, de intensidad y energía, considerándose todas ellas complementarias en el avance del conocimiento del micro y del macrocosmos, las dos caras de una misma moneda del saber.

## Referencias

1. W. GERLACH y O. STERN, Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld, *Zeitschrift für Physik* **9**, 349 (1922).
2. R. EISBERG y R. RESNICK, *Física cuantica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas* (Limusa, 1978).
3. P. A. TIPLER, *Física Moderna* (Reverté, 1980).
4. J. M. SÁNCHEZ RON, *Historia de la física cuántica (Crítica, 2025)*.
5. H. KRAGH, *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913-1925* (Oxford University Press, 2012).
6. A. GALINDO TIXAIRE, Miguel Catalán, una obra, un ejemplo, *Revista Española de Física* **17** (6), 5 (2003).
7. A. GALINDO y P. PASCUAL, *Mecánica Cuántica* (Alhambra, 1978).
8. D. J. GRIFFITHS, *Introduction to Quantum Mechanics*, (Prentice Hall, 1995).

9. S. GASIOROWICZ, *Quantum physics* (John Wiley & Sons, 1974).
10. N. STRAUMANN, The Role of The Exclusion Principle from Atoms to Stars: A Historical Account, arXiv:quant-ph/0403199v2
11. G. E. UHLENBECK y S. GOUDSMIT, Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons, *Naturwissenschaften* **47**, 953 (1925).
12. B. FRIEDERICH y D. HERSCHBACH, Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics, *Physics Today* **56** (12), 53 (2003).
13. C. E. HOUSECROFT y A. G. SHARPE, *Química inorgánica* (Pearson/Prentice Hall, 2006).
14. L. H. THOMAS, The motion of the spinning electron, *Nature* **117**, 514 (1926).
15. J. A. de AZCÁRRAGA, P. A. M. Dirac, el ingeniero que imaginó casi todo antes que todos, *Revista Española de Física* **31** (1), 57 (2017).
16. L. H. RYDER, *Quantum Field Theory* (Cambridge University Press, 1996).
17. M. E. PESKIN y D. V. SCHROEDER, *An introduction to quantum field theory* (CRC Press, 2019).
18. D. JILES, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 3rd ed. (CRC Press, 2015).
19. M. THOMSON, *Modern Particle Physics* (Cambridge University Press, 2014).
20. S. NAVAS *et al.* (Particle Data Group), Review of Particle Physics, *Physical Review D* **110**, 030001 (2024).
21. D. CASTELVECCHI, Dreams of new physics fade with latest muon magnetism result, *Nature* **620**, 473 (2023).
22. F. R. VILLATORO, Adiós a la desviación de muon g-2 del Fermilab en el momento magnético anómalo del muon, *La ciencia de la mula Francis* (18 julio 2024).
23. E. ELIZALDE, *Cosmología moderna desde sus orígenes* (Los Libros de la Catarata, 2020).
24. B. J. T. JONES, *Precision Cosmology: The First Half Million Years* (Cambridge University Press, 2017).
25. M. GUIDRY, *Modern General Relativity* (Cambridge University Press, 2019).

**Miguel Ángel Sanchis Lozano**

Dpto. de Física Teórica e Instituto de Física Corpuscular, Universitat de València-CSIC



**Roger Sanchis Gual**

Instituto de Ciencia Molecular (ICMol), Universitat de València



# 2025, el año cuántico, ¡únete a la revolución!

**Araceli Venegas-Gómez**

Es ahora, o nunca. Si existe un punto de inflexión para concienciar sobre las nuevas tecnologías emergentes que van a cambiar nuestra sociedad, es ahora, aprovechando la celebración del Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas

**E**s ahora, o nunca. Si existe un punto de inflexión para traer concienciación sobre las nuevas tecnologías emergentes que van a cambiar nuestra sociedad, es ahora. Las Naciones Unidas han designado 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas [1], reconociendo que la ciencia cuántica ha llegado al punto en que se está saliendo de la fase experimental y entrando en el ámbito de las aplicaciones prácticas.

Por supuesto, podemos argumentar que las aplicaciones prácticas de la física cuántica tampoco es cosa nueva. ¿Por qué entonces tanto trajín y novedad? Vayamos por partes.

## Primero: ¿por qué el 2025?

En este año se celebra un siglo de descubrimientos cuánticos. Hace justo 100 años, después de décadas de observaciones desconcertantes y experimentos innovadores, los científicos habían descubierto algo profundo: las reglas que gobiernan las partes más pequeñas de nuestro universo son fundamentalmente diferentes de las reglas que vemos a nuestro alrededor. Esa comprensión transformó nuestro mundo de maneras que hoy damos por sentado.

Y es que, en 1925, por un lado, la mecánica matricial como formulación de la mecánica cuántica fue creada por Werner Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan. Por otro, Erwin Schrödinger desarrolló su interpretación en base a la mecánica de ondas dando origen a su famosa ecuación.

Hasta hoy, hablar de "poder estar en dos estados a la vez", como en la famosa paradoja del gato de Schrödinger, donde en este experimento ficticio el gato estaba a la vez vivo o muerto, a menos que se abriera la caja, en el caso de la superposición, o que haya una propiedad que permite que dos partículas separadas, incluso a kilómetros de distancia, estén conectadas de una forma que la física clásica no puede explicar, hacen que la cuántica siga teniendo una connotación de inalcanzable, incomprensible, o incluso esotérica.

Estamos hablando de las bases teóricas que en las décadas siguientes traerían avances experimentales dando lugar a una primera revolución tecnológica.

## Tecnologías cuánticas 1.0

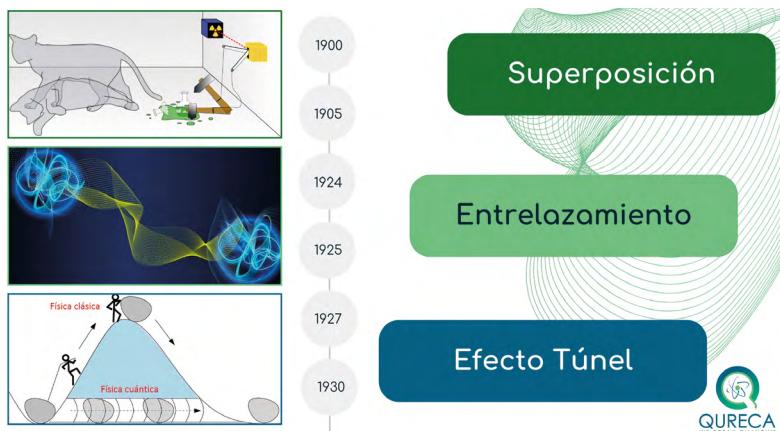
Muchas de las tecnologías que usamos diariamente y que nos son más que familiares se basan en fenómenos cuánticos.

Los láseres se encuentran en una amplia variedad de aplicaciones y lugares en nuestra vida cotidiana, por ejemplo, en impresoras, procedimientos quirúrgicos, fibra óptica, espectroscopía y microscopía, sistemas de seguridad, manufactura, y astronomía. Incluso los lectores de códigos de barras cuando vamos a pagar la compra en los supermercados. Un láser utiliza la mecánica cuántica porque su funcionamiento se basa en el principio de emisión estimulada de radiación, que es un fenómeno cuántico. En un láser, los átomos o moléculas se excitan a un estado de energía más alto y, cuando regresan a su estado fundamental, emiten fotones. La mecánica cuántica describe cómo estos fotones pueden ser emitidos de manera coherente y en una sola dirección, lo que resulta en la luz intensa y enfocada que caracteriza a los láseres.

El GPS, Sistema de Posicionamiento Global, se basa en la mecánica cuántica principalmente a través de la precisión de los relojes atómicos que se utilizan en los satélites. Estos relojes son extremadamente precisos y funcionan gracias a principios cuánticos, como la transición de electrones entre niveles de energía en los átomos.

La resonancia magnética utiliza principios cuánticos para obtener imágenes detalladas del interior del cuerpo, aprovechando las propiedades de los núcleos atómicos, especialmente el hidrógeno, que es abundante en el agua y los tejidos del cuerpo. La mecánica cuántica es fundamental en la resonancia magnética al describir cómo los núcleos atómicos interactúan con los campos magnéticos y cómo se comportan a nivel subatómico.

Los transistores están presentes en todos los dispositivos electrónicos actuales, desde teléfonos móviles y ordenadores, ya que son los componentes básicos de los microprocesadores y chips de memoria, a automóviles y electrodomésticos modernos, como dispositivos de control y seguridad. Se basan en principios de mecánica cuántica debido al comportamiento de los electrones a escalas de nanómetros, la escala



**Fig. 1.** Fenómenos cuánticos descritos hace alrededor de un siglo.

típica en las estructuras de transistores modernas, y el efecto túnel, un fenómeno cuántico donde las partículas, en este caso los electrones, pueden atravesar barreras de energía que no podrían superar según la física clásica.

Y si ya tenemos tecnologías cuánticas desde hace mucho tiempo, ¿a qué viene tanto alboroto?

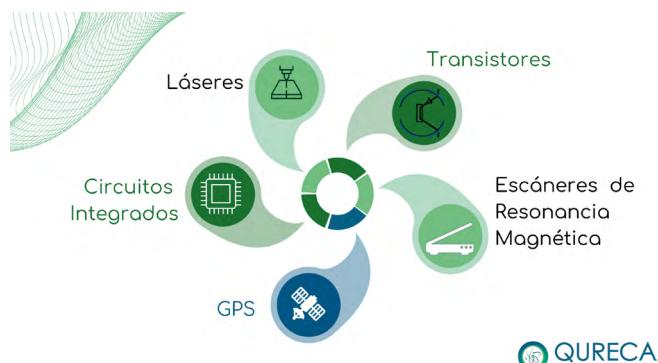
### Tecnologías cuánticas 2.0: la revolución

Todas las tecnologías anteriormente mencionadas se basan en fenómenos cuánticos de muchas partículas. Por ejemplo, en un láser tenemos un elevado número de fotones (la partícula fundamental de la luz), y hablamos de controlar estos fotones. En un transistor, tenemos un elevado número de electrones; en la resonancia magnética hablamos de las moléculas de agua en el cuerpo humano, un número extremadamente alto. Eso fue solo el comienzo, ya que ahora hemos entrado en una fase aún más extraordinaria.

En las últimas décadas se ha alcanzado una nueva etapa, ya que los científicos han conseguido controlar los fenómenos cuánticos (superposición, entrelazamiento, efecto túnel, etc.) al nivel de una sola partícula, un control preciso sobre el mundo cuántico, dando lugar a nuevas tecnologías que están en diferentes niveles de desarrollo. Desde la computación cuántica y la criptografía, hasta los sensores y sistemas de comunicación avanzados, las tecnologías cuánticas de segunda generación ya están comenzando a impactar nuestro mundo, y su influencia no hará más que crecer.

Lo que comenzó como una revolución científica es ahora una revolución tecnológica, con tecnolo-

**Fig. 2.** Tecnologías cuánticas de primera generación.



gías cuánticas preparadas para ayudar a resolver algunos de los mayores desafíos de la humanidad, desde acelerar las soluciones climáticas hasta asegurar nuestra infraestructura digital, y revolucionar el diagnóstico y la navegación médica. La verdadera oportunidad radica en lo que las tecnologías cuánticas hacen posible. Al igual que en los primeros días de las computadoras en el siglo pasado, hoy en día solo podemos vislumbrar algunas aplicaciones inmediatas: mejores materiales, redes más seguras, mediciones ultraprecisas. Las aplicaciones cuánticas más transformadoras probablemente ni siquiera se hayan imaginado todavía. Pensemos en la década de 1990, el comienzo de la revolución digital. Cuando internet apenas empezaba a conectar computadoras en todo el mundo, pocos podrían haber predicho cuán profundamente transformaría la sociedad actual.

La segunda revolución cuántica abarca una variedad de tecnologías emergentes con potenciales casos de uso que van a cambiar la sociedad tal y como la conocemos.

- **Computación y simulación cuántica:** A diferencia de los ordenadores clásicos, que procesan la información en forma binaria (0 y 1), los ordenadores cuánticos utilizan el concepto del bit cuántico (qubit, o cúbit en español) donde gracias al fenómeno de superposición de la mecánica cuántica, se consigue lograr una combinación lineal de dos estados, 0 y 1 en una partícula cuántica. Esta superposición que hace posible manejar cálculos complejos “a la vez” significa que los ordenadores cuánticos serán exponencialmente más potentes para ciertos tipos de cálculos, desde problemas de optimización hasta las simulaciones de nuevos fármacos y materiales. Todos los sectores industriales van a obtener una ventaja cuántica, y en estos momentos se intentan buscar casos de uso que podrán ofrecer esa ventaja.

¿Cómo podría ser un mundo en el que combinando la inteligencia artificial y la computación cuántica el desarrollo de nuevas vacunas o medicamentos individualizados pudiera hacerse en un periodo récord?

Las diferentes etapas históricas en el desarrollo de la humanidad se han basado principalmente en revoluciones tecnológicas que han tenido que ver con materiales (la edad de piedra, edad de los metales, edad antigua con la aparición de la escritura, la revolución industrial, la era digital, etc.). Imaginemos poder diseñar materiales “a la carta”, donde las propiedades eléctricas y magnéticas sean exactamente las requeridas para una aplicación específica (hablemos de superconductores o un material aún más exótico que el grafeno, o nuevas baterías con un almacenamiento energético más eficiente). La era cuántica será la nueva etapa en nuestra historia.

- **Comunicaciones y criptografía cuántica:** Una nueva era de comunicación ultrasegura, en par-

ticular para intercambios de datos sensibles, como transacciones financieras, comunicaciones gubernamentales y defensa, está emergiendo, utilizando los principios de la mecánica cuántica para crear sistemas de comunicación seguros. Una de las aplicaciones más conocidas es la distribución de claves cuánticas (o QKD, Quantum Key Distribution, por sus siglas en inglés), que garantiza que cualquier espionaje en un canal de comunicación alterará la información transmitida, haciéndola detectable, lo que significa que es invulnerable a cualquier ataque. Varias naciones, incluidas China, Estados Unidos y varios países europeos, ya han probado y desplegado sistemas QKD a través de redes de fibra óptica e incluso a través de comunicaciones satelitales. Estos avances podrían allanar el camino para canales de comunicación seguros que sean prácticamente inquebrantables.

Los métodos de cifrado tradicionales se basan en algoritmos matemáticos que no pueden ser descifrados por potentes ordenadores clásicos, pero que, gracias al algoritmo de Shor, podrían ser vulnerables a un ordenador cuántico, ¡por lo que toda la criptografía actual está en riesgo una vez los ordenadores cuánticos sean suficientemente potentes! Aunque el riesgo sea las nuevas tecnologías cuánticas, en este caso la computación cuántica, la solución también son las tecnologías cuánticas. Una combinación de cifrado cuántico con QKD y nuevos algoritmos cuánticos hará de la criptografía cuántica la clave para la transmisión segura de datos en el futuro.

- **Metrología cuántica:** Los sensores cuánticos aprovechan los fenómenos cuánticos para lograr mediciones de precisión que van mucho más allá de las capacidades de los instrumentos clásicos. Estos sensores se pueden utilizar en campos como la navegación, la vigilancia medioambiental y el diagnóstico médico. Por ejemplo, los sensores mejorados por la tecnología cuántica ya se utilizan para medir ondas gravitacionales, detectar cambios sutiles en los campos magnéticos para aplicaciones en los sectores de la construcción, la minería, y la salud, y crear relojes atómicos ultrasensibles.

Aunque en los medios de comunicación se suele leer más sobre los ordenadores y la criptografía cuántica, son los sensores cuánticos los grandes desconocidos. Es una tecnología que ya está en el mercado y a disposición de la industria y los gobiernos para poderse usar. Los nuevos desarrollos se enfocan en una miniaturización de los productos para ser más portables y seguros.

### Inversión en tecnologías cuánticas: un esfuerzo global

La revolución cuántica no es solo un esfuerzo científico, sino un fenómeno global. En la última década, las naciones de todo el mundo han reco-



**QURECA**  
WE SPEAK QUANTUM

nocido el potencial transformador de las tecnologías cuánticas y está invirtiendo fuertemente en su desarrollo. Desde Estados Unidos y Europa hasta Asia y América Latina, los países compiten por convertirse en líderes en este campo emergente.

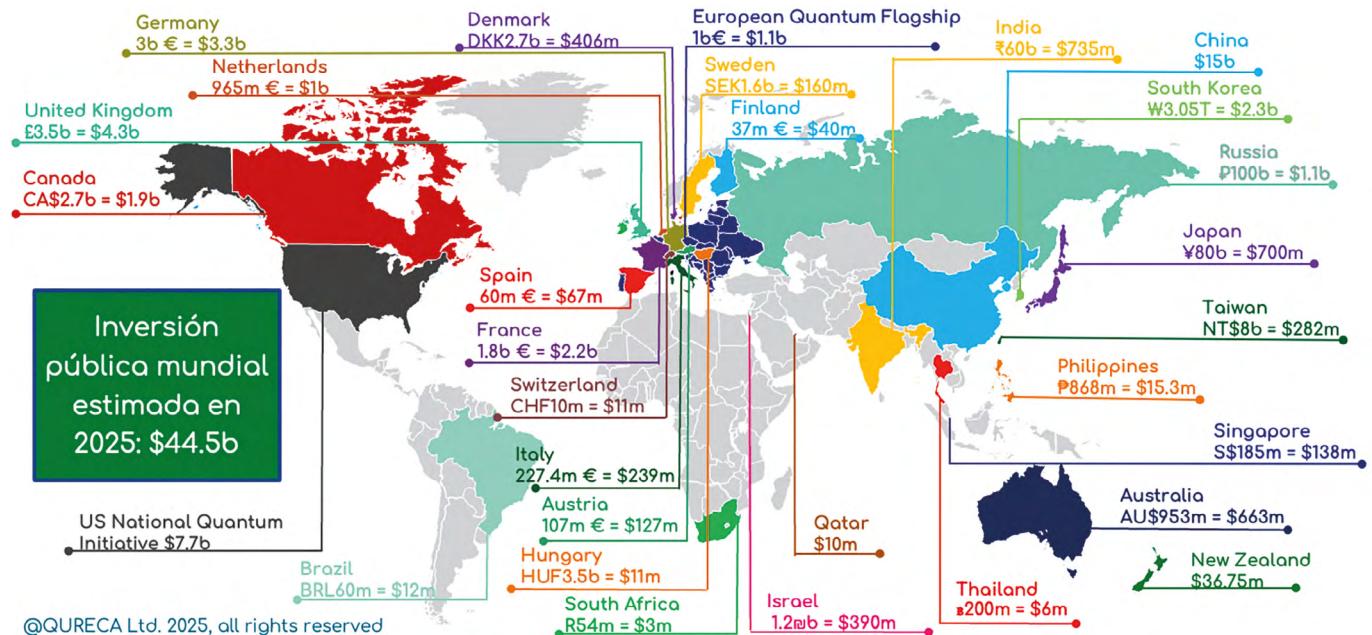
El Reino Unido fue el primer país en establecer un programa cuántico nacional. En 2014, el Reino Unido lanzó su “Programa Nacional de Tecnologías Cuánticas”, cuyo objetivo era acelerar la comercialización de tecnologías cuánticas y apoyar la investigación cuántica en universidades y centros de investigación de todo el país. A esta iniciativa le han seguido programas similares en otros países, incluidos en el 2018 la “Iniciativa Cuántica Nacional” de los Estados Unidos y el “Quantum Flagship” de la Unión Europea, establecido para coordinar la investigación y el desarrollo de las tecnologías cuánticas bajo la Comisión Europea.

En 2021, España dio un paso importante al anunciar una inversión de 60 millones de euros para impulsar y financiar una infraestructura competitiva y completa de computación cuántica en España a través del proyecto Quantum Spain. Este proyecto forma parte de un esfuerzo más amplio para fomentar un ecosistema cuántico nacional, contribuyendo a la posición de España en la carrera cuántica global. Se espera que España lance un plan estratégico sobre tecnologías cuánticas muy pronto.

La inversión concreta que se ha hecho en China en tecnologías cuánticas no está del todo confirmada, pero en numerosas referencias se habla de una masiva a gran escala. En total, las inversiones públicas globales en tecnologías cuánticas han alcanzado más de 44000 millones de dólares [2], una cifra que sigue creciendo a medida que los gobiernos reconocen la importancia estratégica de los avances cuánticos.

Si bien América del Norte, Europa y Asia han dominado el desarrollo de las tecnologías cuánticas, hay indicios de que las regiones emergentes, incluidas América Latina y África, están comenzando a dar pasos adelante en este campo. Por ejemplo, en 2021 se lanzó la iniciativa Quantum Latino [3] para promover la tecnología cuántica en América Latina. Este evento reúne a investigadores, emprendedores y líderes de la industria para construir una infraestructura cuántica sólida en la región, y hacia afuera, generando conciencia sobre las tecnologías

**Fig. 3.** Tecnologías cuánticas de segunda generación.



**Fig. 4.** Inversión mundial en tecnologías cuánticas.

cuánticas y fomentando la colaboración entre la academia, la industria y las empresas emergentes.

En África también se están realizando esfuerzos para construir centros de investigación cuántica y promover la educación en ciencias cuánticas. Con la inversión y el apoyo adecuados, estas regiones podrían convertirse en actores importantes en el ecosistema cuántico global, contribuyendo a la diversificación de la investigación cuántica y la comercialización en todo el mundo.

Además de los programas nacionales, ha habido un aumento de las inversiones del sector privado, con grandes empresas como IBM y Google liderando la investigación en computación cuántica. Igualmente, está surgiendo una ola masiva de empresas emergentes a nivel mundial [4]. Algunas de estas relativamente nuevas empresas han llegado incluso a cotizar en bolsa, como IonQ, Rigetti Computing, D-Wave y Quantum Computing Inc., lo que indica que el ecosistema cuántico está prosperando y madurando. Asimismo, los diferentes sectores industriales, como las telecomunicaciones, los productos farmacéuticos y la industria aeroespacial, están explorando aplicaciones en criptografía cuántica, detección y ciencia de materiales.

Que haya nuevas empresas no solo está desarrollando estas nuevas tecnologías de vanguardia, sino que también contribuyen al crecimiento de la fuerza laboral cuántica, que es esencial para satisfacer la creciente demanda de profesionales cualificados.

### La necesidad de un talento escaso

A medida que el ecosistema cuántico continúa expandiéndose, uno de los desafíos más urgentes es la necesidad de una fuerza laboral altamente cualificada [5, 6]. Las tecnologías cuánticas son complejas y requieren experiencia en física, informática, ingeniería y otras disciplinas. Actualmente, la

mayoría de los profesionales en el campo cuántico tienen calificaciones académicas avanzadas, generalmente a nivel de doctorado. Sin embargo, a medida que el campo madura, existe una creciente necesidad de una gama más amplia de profesionales, incluidos ingenieros, desarrolladores de negocios, comercializadores y gerentes de producto, que puedan cerrar la brecha entre la investigación de vanguardia y las aplicaciones del mundo real.

Ya existe una creciente demanda de talento en el sector cuántico. Más de la mitad de las empresas cuánticas están contratando activamente, pero muchas informan de dificultades para encontrar personas con las habilidades adecuadas. Esta escasez, a menudo denominada el “cuello de botella cuántico”, se ve agravada por el hecho de que el campo aún está en sus inicios, lo que significa que hay aún mucho desconocimiento de las posibles opciones laborales en el campo de las tecnologías cuánticas, tanto actualmente como a largo plazo.

Para abordar esta brecha de talento, es esencial comenzar a formar a la fuerza laboral del futuro. Hay varias iniciativas en marcha para integrar la educación cuántica en los planes de estudio académicos generales, desde la educación primaria y secundaria hasta los programas de educación superior centrados en la ingeniería cuántica y la informática. Universidades de todo el mundo están ofreciendo programas especializados en tecnologías cuánticas [7] y se espera que más instituciones sigan su ejemplo.

Un ejemplo notable es España, donde varias universidades (como la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad del País Vasco, la Universidad de la Rioja, o un consorcio de universidades y centros de investigación en Barcelona) ofrecen programas de máster dedicados a las tecnologías cuánticas. Estos programas están diseñados para dotar a los estudiantes de las habilidades necesarias para

afrontar las demandas de la fuerza laboral cuántica. De manera similar, organizaciones como QURECA [8] ayudan a cerrar la brecha al ofrecer orientación profesional para la academia y servicios de formación para la empresa, entre otros productos.

### Preparándonos para un futuro cuántico

La comprensión de las tecnologías cuánticas es fundamental para su aceptación y adopción. A medida que estas tecnologías comienzan a integrarse en aplicaciones cotidianas, es vital que el público general comprenda sus principios básicos y beneficios. La divulgación efectiva puede ayudar a desmitificar conceptos complejos, como la superposición y el entrelazamiento, permitiendo que más personas se sientan cómodas con su uso y potencial.

La divulgación no solo informa al público, sino que también inspira a la próxima generación de científicos e ingenieros. Profesionales de la educación a todos los niveles necesitan poder presentar las tecnologías cuánticas de manera accesible, para despertar el interés en campos como la física, la informática y la ingeniería. Esto es crucial para cultivar un ecosistema a largo plazo.

Es importante añadir que las tecnologías cuánticas no están exentas de desafíos éticos y sociales. Por ejemplo, la criptografía cuántica promete una seguridad sin precedentes, pero también plantea preguntas sobre la privacidad y el acceso a la información. La exacerbación de las implicaciones de otros riesgos tecnológicos emergentes (como la inteligencia artificial), las relaciones geopolíticas y el acceso a la tecnología, o el potencial uso dual y militar de las tecnologías cuánticas abre cuestiones sobre cómo prepararnos ante revoluciones disruptivas con consecuencias impredecibles.

Como ejemplos de preparación ante esta nueva disruptión tecnológica podemos encontrar los principios de gobernanza de la computación cuántica desarrollados por el Foro Económico Mundial en el 2022 [9] o el Documento informativo sobre tecnologías cuánticas del Global Forum on Technology (GFTech) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [10]. La divulgación permite abrir un diálogo sobre cuestiones que afectan a la humanidad, involucrando a la sociedad en la discusión sobre cómo queremos que se utilicen estas tecnologías y qué regulaciones podrían ser necesarias. La divulgación proactiva puede preparar a las empresas y a los trabajadores para estos cambios, ayudándoles a adaptarse y aprovechar las oportunidades que surgen. Esto es especialmente importante en un mundo donde la transformación digital es constante y rápida.

La segunda revolución cuántica está en marcha y su potencial es ilimitado. Desde la computación cuántica y la criptografía hasta la detección y la ciencia de los materiales, las tecnologías cuánticas prometen abrir nuevas fronteras en la ciencia y la industria. A medida que los gobiernos y los actores del

sector privado destinan recursos a la investigación cuántica [11], se inicia la carrera para desarrollar tecnologías cuánticas que darán forma al futuro.

Sin embargo, esta revolución tecnológica no ocurrirá de la noche a la mañana. Se requieren inversiones significativas en educación, infraestructura y desarrollo de la fuerza laboral para garantizar que la próxima generación esté preparada para las oportunidades y los desafíos que plantean las tecnologías cuánticas. Al fomentar la colaboración global, alentar la diversidad e invertir en educación, podemos garantizar que la revolución cuántica beneficie a todas las naciones y comunidades.

Este año 2025, el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, es el momento de celebrar el increíble progreso que se ha logrado y mirar hacia el futuro, hacia los cambios transformadores que las tecnologías cuánticas traerán a nuestro mundo. La revolución cuántica no es un sueño lejano: está sucediendo ahora y su impacto se sentirá en las generaciones venideras. Concienciación, estrategia y colaboración serán cruciales para preparar a la sociedad en esta nueva y emocionante era cuántica.

### Referencias

- [1] Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, <https://quantum2025.org/es/>
- [2] Quantum Initiatives Worldwide 2025, <https://www.quareca.com/quantum-initiatives-worldwide/>
- [3] Quantum Latino 2023, <https://www.quantum-latino.com>
- [4] Quantum Computing Companies: A Full 2024 List, <https://thequantuminsider.com/2023/12/29/quantum-computing-companies/>
- [5] The Quantum Ecosystem and Its Future Workforce, <https://doi.org/10.1002/phvs.202000044>
- [6] Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives, <https://doi.org/10.1111/1.OE.61.8.081806>
- [7] <https://www.quareca.com/learn-quantum/masters-and-phd-opportunities-in-quantum/>
- [8] <https://www.quareca.com>
- [9] [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Quantum\\_Computing\\_2022.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Computing_2022.pdf)
- [10] <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/networks/global-forum-on-technology/global-forum-on-technology-quantum-technologies-brief-2024.pdf>
- [11] A. PUROHIT, M. KAUR, Z. C. SESKIR, M. T. POSNER, A. VENEGAS-GOMEZ, Building a quantum-ready ecosystem, *IET Quantum Communication* 5, 1 (2024).



**Araceli Venegas-Gomez**  
QUARECA (Quantum Resources and Careers), Glasgow, UK, y Barcelona, España

# Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

## ¿Son tan raros los números cuánticos? Una manera de introducirlos mediante analogías con ondas clásicas



**José Adrián Castelo Martínez**  
IES "Izpísúa Belmonte", Dpto. de Física y Química,  
Hellín, Albacete

Me parece que lo esencial es que en la prescripción cuántica ya no aparece la enigmática "exigencia de números enteros", sino que esta ha sido rastreada un paso más atrás: su fundamento radica en el hecho de que una cierta función espacial es finita y univaluada.

ERWIN SCHRÖDINGER [1]

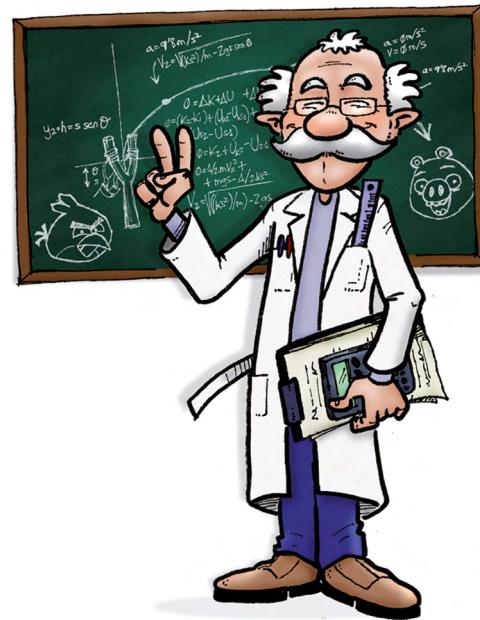
### Introducción

Es innegable que los inicios en la física cuántica son, cuando menos, poco intuitivos. Esto se maximiza al transmitirla a un alumnado poco maduro matemáticamente y con unos cimientos sobre el comportamiento de sistemas físicos y químicos aún por asentar.

En los libros de física y química de secundaria y bachillerato podemos encontrar acercamientos a la física cuántica ya no solo poco acertados, sino a menudo erróneos. Ejemplos comunes incluyen definiciones como que "un orbital atómico es la zona del espacio en la que hay mayor probabilidad de encontrar a un electrón con determinada energía" (lo que, en un espacio tridimensional, nos dejaría con superficies bidimensionales); que "los orbitales  $p_x$ ,  $p_y$  o  $p_z$  están asociados a los valores del número cuántico  $m_l$ " (cuando estos orbitales no son autoestados del operador  $L_z$ ); o el ya casi *meme* de que el espín representa el giro (horario o antihorario) del electrón sobre sí mismo (una partícula puntual girando sobre sí misma, algo que para nada va a hacer sospechar a nuestros alumnos de la veracidad de los conocimientos que les impartimos).

Sin embargo, lo que más puede desconcertar a un alumno al estudiar la estructura atómica es lo siguiente: ¿por qué, si los sistemas físicos estudiados hasta ahora se describen con variables continuas, los átomos requieren variables discretas, a saber, los números cuánticos?

Durante años, nuestros estudiantes han analizado cómo unas variables continuas dependen de otras: cómo la posición o la velocidad de un móvil dependen del tiempo; cómo se relacionan presión, volumen y temperatura en los gases;



índice - 13 -

Ilustración por gentileza de  
Alberto García Gómez (albertogg.com).

o cómo la temperatura de un material varía con el calor transferido. De repente, y sin el tiempo necesario (debido al extenso currículo), se les introduce una descripción de la materia basada en variables discretas. Esto dificulta establecer conexiones con los conocimientos previos, obstaculizando el aprendizaje significativo.

La extraña "cuantización" de la materia fue precisamente lo que, en 1926, motivó a Erwin Schrödinger [1] a buscar el origen de los números cuánticos de forma más coherente para los físicos: mediante ecuaciones diferenciales aplicadas a ondas (de materia) y condiciones de contorno. Este enfoque, hoy conocido como mecánica cuántica ondulatoria, contrastaba con la abstracta mecánica matricial desarrollada por Heisenberg, Born y Jordan. Como señala la cita al inicio del artículo, Schrödinger quería que los números cuánticos surgieran de forma natural (lo que para los físicos de la época significaba a partir de una ecuación diferencial y condiciones de contorno).

Una forma de introducir esta discretitud es a través del estudio de espectros atómicos [2] (como de hecho ocurrió históricamente). Sin embargo, este artículo propone una línea de razonamientos y analogías que permita a los alumnos conectar la estructura atómica con sistemas conocidos, donde también aparecen la cuantización y la incertidumbre.

Pues en el fondo, el origen de los números cuánticos para describir el estado de los electrones en los átomos tiene su origen en su, en última instancia, comportamiento ondulatorio.

### Del descubrimiento del electrón al modelo de Bohr

En 1897, J. J. Thomson descubrió el electrón, marcando el inicio de la búsqueda de un modelo para los átomos, que hasta entonces se consideraban partículas indivisibles y sin estructura interna.

En los institutos, lo más práctico es seguir el desarrollo histórico (aunque con ciertas precauciones [3]) hasta llegar al primer modelo cuántico:

- Thomson descubrió que el electrón era casi 2000 veces más ligero que el átomo más pequeño conocido, lo que le llevó a pensar que formaba parte de estos. Así, propuso el modelo del "pudín de pasas", donde los electrones estaban incrustados en una masa positiva formando los átomos.
- Los experimentos de dispersión de partículas alfa con láminas de oro, realizados por Rutherford y sus colaboradores, mostraron que la mayoría de las partículas alfa pasaban directamente a través de las láminas de oro sin desviarse, lo que sugirió que la masa del átomo estaba concentrada en un núcleo central.

radores, mostraron que casi toda la masa del átomo se concentra en un núcleo positivo, con los electrones orbitando a gran distancia por atracción coulombiana, similar a un sistema planetario.

- El modelo planetario es inestable, ya que los electrones, al estar acelerados, deberían irradiar energía, perder velocidad y colapsar en el núcleo. Además, no explicaba los espectros discretos de los gases excitados, que los químicos estudiaban desde hacía décadas.
- Niels Bohr propone que las energías disponibles a los electrones pertenecen a un conjunto *discreto* de energías. En estos estados, los electrones no radiarían y los átomos serían estables.

¡Por fin aparece el primer modelo propiamente cuántico! En el modelo de Bohr, válido únicamente para átomos hidrogenoides, el electrón puede hallarse en cualquier nivel de una serie de niveles cuantizados de energías  $E_n = -13,62 Z^2 eV/n^2$ , donde  $Z$  es el número atómico y  $n \in \mathbb{N}$  etiqueta el nivel energético del electrón. Hemos pasado de describir el estado de las partículas con variables continuas (posición, velocidad, tiempo) a hacerlo con variables discretas (nivel energético).

Pero ¿es eso tan raro? ¿Etiquetar estados físicos con variables discretas es algo exclusivo de la física cuántica?

### En la física clásica también etiquetamos estados

Nuestros alumnos también han de estudiar en el instituto un sistema físico que viene descrito por variables discretas: las ondas estacionarias.

En la asignatura de física de 2.º de Bachillerato, por ejemplo, estudiarán cómo se generan ondas estacionarias en instrumentos musicales, como cuerdas atadas por ambos extremos (guitarras o violines) o columnas de aire con diferentes configuraciones (un extremo cerrado y otro abierto, como en el saxofón, o ambos abiertos, como en la flauta traversa). En estas situaciones, solo se establecen las ondas que "encajan" en el instrumento, es decir, aquellas cuya longitud de onda cumple ciertas condiciones respecto al tamaño del sistema. Esto selecciona un conjunto discreto de ondas posibles, llamadas armónicos, cuyas frecuencias son múltiplos de una frecuencia fundamental:  $f_n = n f_0$ ,  $n \in \mathbb{N}$ .

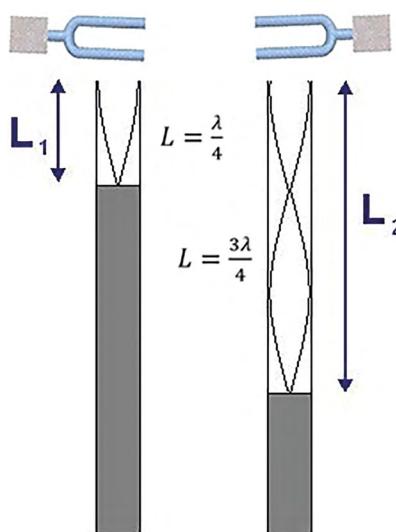


Fig. 1. Montaje para el establecimiento de ondas estacionarias en una cubeta con agua en su interior en la que se puede regular la altura de la columna de aire.

Así, el "estado ondulatorio" de la onda, aunque de naturaleza continua, se describe con variables discretas.

Es interesante no limitarse a la teoría y mostrar a los alumnos cómo se generan los armónicos en clase. Una actividad sencilla consiste en utilizar una probeta con agua para amplificar el sonido de una onda con la frecuencia adecuada (y sus múltiplos impares en este caso, ya que tenemos un extremo abierto y otro cerrado). Podemos usar un móvil con una aplicación de generación de tonos puros (como Physics Toolbox) o un diapasón. Con el móvil, basta ajustar la frecuencia deseada; con el diapasón, tendremos que modificar la altura de la columna de aire hasta encontrar el armónico correspondiente (ver figura 1). Es fascinante ver cómo un sonido inicialmente casi inaudible se amplifica enormemente al establecerse una onda estacionaria.<sup>1</sup>

En el caso de sistemas unidimensionales (como una onda confinada en una cuerda o en un tubo de aire) solo necesitamos un número natural para etiquetar los estados ondulatorios. Pero bajo esta base, les será casi natural asimilar que para ondas estacionarias en dos dimensiones necesitaremos dos números naturales. Podemos ilustrarlo con animaciones accesibles en Wikipedia o con vídeos que muestran patrones de sal sobre una placa metálica conectada a un generador sinusoidal.

Siguiendo esta lógica, los alumnos podrán comprender que para ondas tridimensionales se necesitan tres números enteros para describir sus estados.

Llegados a este punto, surge inevitablemente la pregunta: ¿qué relación tiene todo esto con los electrones, esas (por ahora) pequeñas "bolitas" que orbitan el núcleo del átomo?

### De partículas a ondas

Si seguimos el hilo histórico, tras el modelo de Bohr, el siguiente hito relevante para nuestra propuesta es la introducción de la dualidad onda-corpúsculo por Louis de Broglie.

En 1905, un joven Albert Einstein, inspirado por los avances de Max Planck, propuso que las ondas electromagnéticas podían entenderse como un conjunto de partículas que más adelante el químico Gilbert Lewis bautizaría como fotones.

Las asimetrías en la naturaleza son llamadas de atención para los físicos, y de Broglie respondió a esta: ¿qué tenían de especial los fotones para ser los únicos entes cuya naturaleza era dual?

De Broglie extendió esta idea al resto de partículas y, en su tesis doctoral, sugirió comprobarlo mediante un experimento de difracción de electrones, llevado a cabo más tarde en 1927 por Davisson y Germer, quienes confirmaron su propuesta.

Podemos acercar este concepto a los alumnos mediante el famoso experimento de la doble rendija (figura 2), una versión simplificada de la difracción de electrones. Aquí, seguir el enfoque de Richard Feynman en sus *Lectures on Physics* [4] puede ser muy útil, ya que introduce la idea de que los electrones no son ondas en un sentido clásico, sino que su

1 Otra experiencia mecánica que se puede ligar con la cuántica es la resonancia entre dos diapasones, donde los alumnos pueden ver que la absorción de frecuencias concretas por un sistema físico es algo que también ocurre en física clásica, no solo en cuántica.

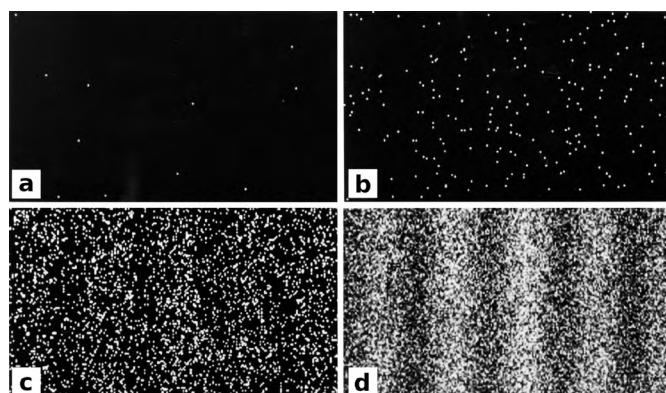


Fig. 2. Secuencia en la que se muestra el patrón de interferencia del experimento de la doble rendija lanzando electrón a electrón [5].

comportamiento viene determinado por una función de onda probabilística.

Vista esta naturaleza ondulatoria, la conexión con el modelo de Bohr surge de forma natural. Los electrones solo pueden oscilar con longitudes de onda que “encajen” en sus órbitas, cumpliendo la condición  $2\pi r = n\lambda$ , con  $r$  la distancia del electrón al núcleo y  $\lambda$  la longitud de onda del electrón. Usando la relación propuesta por de Broglie,  $\lambda = h/p$ , esta ecuación nos devuelve la condición del modelo de cuantización del momento angular del modelo de Bohr  $L = n\hbar$ .

El uso de algún simulador interactivo también se muestra interesante para que los alumnos visualicen esto (figura 3).

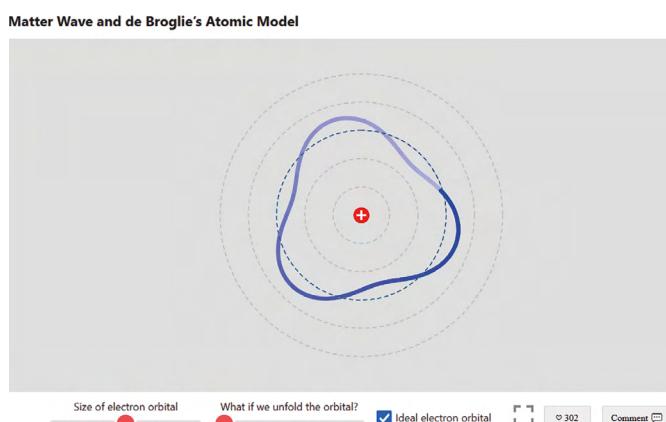


Fig. 3. Simulación que nos permite mostrar a nuestros alumnos cómo solo interieren constructivamente consigo mismo los electrones que cumplen cierta relación entre su longitud de onda y el tamaño de la órbita (Enlace: [https://javalab.org/en/matter\\_wave\\_en/](https://javalab.org/en/matter_wave_en/)).

A partir de aquí, resulta más sencillo para los alumnos asimilar que el estado ondulatorio de los electrones atrapados por el núcleo, igual que nuestras ondas confinadas en una probeta, debe describirse (*etiquetarse*) mediante números enteros. Sin embargo, los electrones no son ondas unidimensionales ni bidimensionales: son ondas tridimensionales, por lo que necesitamos tres números enteros ( $n, l$  y  $m_l$ ) para describir su estado.

Esta necesidad de funciones de onda tridimensionales está directamente relacionada con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Las ondas que describen partículas en física cuántica comparten propiedades con las ondas clásicas:

- Si conocemos con precisión su momento, desconocemos su posición por completo (como en una onda plana).

- Si conocemos con precisión su posición, desconocemos su momento (como en un paquete de ondas muy localizado). Nuestros alumnos llegan incluso a usar el famoso  $\Delta x_i \cdot \Delta p_i \geq \hbar/2$ . Este principio explica por qué los electrones no pueden ser ondas en una ni dos dimensiones (en un espacio tridimensional). Por ejemplo, si un electrón estuviera confinado al plano  $xy$ , conoceríamos con precisión su velocidad en la dirección  $Z$  ( $v_z = 0$ ), lo que imposibilitaría conocer su posición en  $Z$ . Como resultado, el electrón no podría permanecer confinado en dicho plano.

Por lo tanto, teniendo accesibles tres dimensiones espaciales, los electrones han de comportarse como ondas tridimensionales. Cuando están sujetos a la atracción del núcleo, su estado puede describirse mediante funciones de onda tridimensionales que, aunque continuas en sí mismas, se etiquetan mediante números enteros.

## Conclusiones

En este artículo hemos propuesto un enfoque para presentar la estructura atómica a los estudiantes de bachillerato, conectándola con ejemplos de sistemas que ya conocen. El objetivo es hacer que la aparición de números enteros, como los que describen al electrón como onda confinada al átomo, les resulte natural.

Una primera traba con la que nos podemos encontrar es que, en el currículo, la estructura atómica se aborda en detalle en la asignatura de química de segundo curso de bachillerato, mientras que en física se cubre principalmente la teoría cuántica antigua (de 1900 a 1925). Esto puede hacer que este enfoque sea más útil en química, pero también podría verse limitado por la falta de conocimientos previos en física, especialmente porque no todos los estudiantes cursan ambas asignaturas simultáneamente.

Por otro lado, entender los electrones como ondas tridimensionales confinadas por la atracción del núcleo nos permite ver de forma intuitiva la necesidad de tres números enteros para describir su estado:  $n, l$  y  $m_l$ . Sin embargo, en bachillerato también es necesario introducir el concepto de espín en relación con el principio de exclusión de Pauli para estudiar átomos multielectrónicos. En este caso, nuestra analogía queda limitada, algo que no es sorprendente, dado que el espín no puede explicarse completamente con la mecánica cuántica no relativista, sino que requiere de la teoría cuántica de campos.

## Referencias

- [1] E. SCHRÖDINGER, Quantisierung als Eigenwertproblem, *Annalen der Physik* **79**, 361 (1926).
- [2] J. M. TORREGROSA *et al.*, La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada. *Revista de Enseñanza de la Física* **28**, 77 (2016).
- [3] J. SOLBES MATARREDONA y V. SINARCAS GRANELL, Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales* **23**, 123 (2009).
- [4] R. P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON, y M. SAND, *Física* (Fondo Educativo Interamericano, 1972).
- [5] A. TONOMURA *et al.*, Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics* **57**, 117 (1989).

# ¿Cómo se emite y absorbe radiación? Una introducción a la física cuántica

Francisco Savall Alemany  
IES Veles e Vents, Gandia



La UNESCO ha designado el año 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica. En la enseñanza de la Física, es en bachillerato cuando los estudiantes se enfrentan por primera vez al estudio de la física cuántica, especialmente en el segundo curso. Una primera lectura de los textos de uso más habitual para la enseñanza de la física cuántica en bachillerato nos permite observar que suelen presentar una secuencia histórica de los “tópicos cuánticos” (la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, los espectros de los gases, la dualidad onda-partícula de De Broglie, etc.)[1], a pesar de que han pasado más de 100 años desde que se establecieron sus principios más básicos. La investigación didáctica ha constatado que a través de estas propuestas no se consigue que los estudiantes adquieran unos modelos cuánticos de la materia y la radiación coherentes, y que incluso tienen dificultades para explicar los mismos fenómenos que se encuentran en el origen de la teoría cuántica, como el efecto fotoeléctrico o los espectros de los gases.

**E**n este artículo presentamos una propuesta para mejorar la enseñanza de la física cuántica en los cursos introductorios de física, cuya implementación en 2.º de Bachillerato ha permitido obtener resultados positivos en el aprendizaje de los espectros atómicos por parte del alumnado y en la adquisición de un modelo cuántico del átomo [2]. Esta propuesta se puede usar, con pequeñas modificaciones o adaptaciones, en los cursos introductorios de física cuántica a nivel universitario. No nos centraremos en la presentación de un conjunto de actividades, sino que identificaremos, de manera fundamentada, las ideas clave de un modelo cuántico de la radiación y la materia que tenga capacidad suficiente para explicar fenómenos de emisión y absorción de radiación.

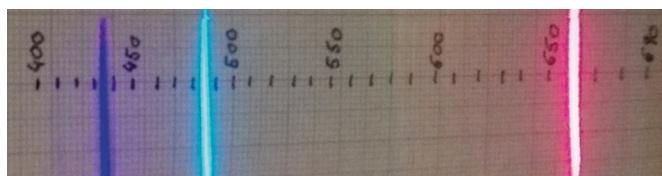
## Identificación del problema que llevará a un modelo cuántico de emisión y absorción de radiación

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX existía entre la comunidad de físicos a nivel internacional una cierta sensación de que la física estaba cerca de estar terminada. Solo quedaban algunos aspectos por dilucidar, entre los que se encontraban algunos fenómenos de emisión y absorción de radiación, como el efecto de emisión del cuerpo negro, los espectros de los gases o el efecto fotoeléctrico. Durante el siglo XIX se establecieron las ecuaciones de Maxwell, que per-

mitieron predecir la existencia de ondas electromagnéticas, cuya detección tuvo lugar con posterioridad. De acuerdo con el modelo electromagnético, la emisión de ondas electromagnéticas de una determinada frecuencia es debida a la oscilación de un sistema cargado que oscila a la misma frecuencia que la onda emitida.

Siendo esta la problemática que dio origen a la física cuántica, iniciamos el estudio de la física cuántica planteando a los estudiantes el problema de buscar un modelo que explique la emisión y absorción de radiación. Presentado de este modo, el problema es excesivamente complejo, y se impone la necesidad de hacer un primer análisis, identificando problemas más sencillos que nos permitan avanzar. Es por esto que valoramos de qué maneras podemos emitir luz y qué características tiene la luz emitida en cada caso. No tardamos en identificar fuentes de luz como los procesos de combustión (en los cuales el color de la llama depende de la composición de la sustancia que arde), las bombillas incandescentes (cuyo color depende de la temperatura), las bombillas de bajo consumo o de gases (cuyo color depende del gas que contienen) o los materiales fluorescentes o fosforescentes, que solo emiten luz cuando son estimulados por determinadas radiaciones.

A simple vista, las únicas características que podemos identificar en la luz emitida por las diferentes fuentes son el color y la intensidad. Si pretendemos establecer un modelo que dé cuenta de las características de la radiación emitida por las diferentes fuentes necesitamos conocerlas con más detalle. Para ello, proponemos la construcción y uso de un espectroscopio calibrado para analizar la luz emitida por las fuentes antes citadas [3]. Después de obtener sus espectros, observamos que la combustión y la incandescencia generan luces de espectro continuo, con una infinidad de frecuencias. Sin embargo, los tubos de gases emiten luces de espectro discreto, con pocas frecuencias, algunas más intensas que otras (figura 1). Entre todos los gases, destaca el espectro del hidrógeno por su simplicidad, contiene únicamente cuatro frecuencias, cada una con una intensidad marcadamente diferente, siendo más intensa la radiación de mayor longitud de onda (correspondiente a la línea roja) y la menos intensa la correspondiente a la línea violeta de menor longitud de onda (prácticamente inapreciable en el espectro por su baja intensidad). Parece, por tanto, que el espectro más sencillo de explicar, *a priori*, será el del hidrógeno. La decisión de empezar abordando la explicación del espectro del hidrógeno se ve reforzada por el hecho de que la fuente, los propios átomos de hidrógeno, son los más sencillos: están formados por un único electrón orbitando alrededor de un protón.



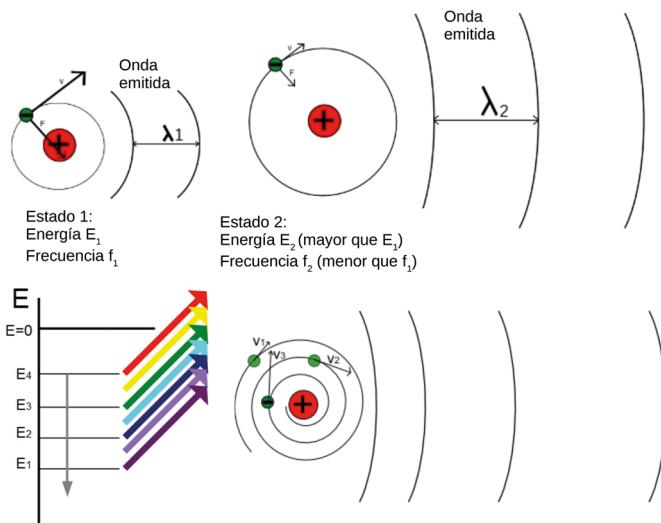
**Fig. 1.** Espectro de emisión del hidrógeno. Se observan claramente tres líneas con sus respectivas longitudes de onda (en nm) y una cuarta línea de intensidad muy baja de 410 nm de longitud de onda.

## Explicación clásica del espectro del hidrógeno

Un primer modelo que dé cuenta del espectro del hidrógeno a partir de la teoría electromagnética lleva a considerar que,

si en la radiación se detectan cuatro frecuencias, debe haber átomos de hidrógeno en la fuente luminosa con un movimiento periódico que corresponda a cada una de esas cuatro frecuencias (figura 2). Por otro lado, el hecho de que la línea roja tenga mayor intensidad se puede atribuir a que haya un mayor número de átomos para los cuales el movimiento periódico de sus cargas coincide con el de dicha radiación. Sería menor el número de átomos cuyas cargas oscilan con la frecuencia de la línea azul, y así sucesivamente para las líneas violetas. Dar por válido este modelo supondría aceptar que cada átomo está vibrando con una de cuatro posibles frecuencias. ¿Quiere decir esto que solo vibran en una de cuatro posibles frecuencias y que no se producen cambios entre ellas? ¿No supondría eso la existencia de 4 tipos diferentes de átomos de hidrógeno, tal vez con propiedades químicas diferentes? No tenemos evidencia de que eso sea así.

Surgen mayores problemas cuando se plantea un análisis energético más complejo. A medida que cada átomo emite radiación debe ir perdiendo energía, lo que se traduce en un acercamiento del electrón al protón en su movimiento orbital, y un cambio en la frecuencia de emisión que no se detecta en los espectros.



**Fig. 2.** De acuerdo con el modelo electromagnético de emisión de radiación, los átomos de hidrógeno deberían realizar un movimiento periódico de frecuencia coincidente con la de la radiación emitida. En la parte superior se muestra este hecho para dos átomos y frecuencias. La emisión continua de radiación debería llevar a una pérdida paulatina de energía y a la emisión de un espectro continuo, que no se detecta (parte inferior).

El modelo electromagnético no puede explicar la emisión del espectro del hidrógeno, el del átomo más sencillo. Es más, de acuerdo con dicho modelo, el átomo de hidrógeno ni siquiera es estable. Llegados a este punto, es de gran importancia que los estudiantes se enfrenten a esta situación de crisis para tomar conciencia de que nos enfrentamos a la construcción de un nuevo modelo que rompe con la física aceptada hasta el momento, a un cambio que supuso una profunda crisis en la comunidad científica de principios del siglo xx.

### Establecimiento de un primer modelo cuántico que explique el espectro del hidrógeno

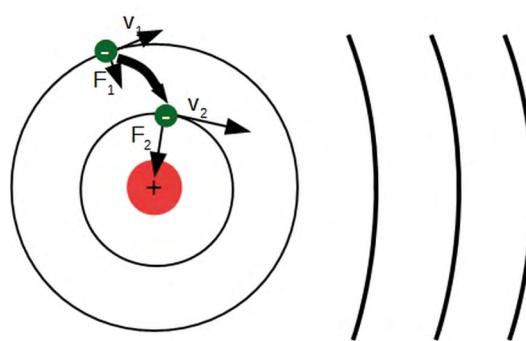
La crisis a que nos enfrentamos obligó a la comunidad científica a proponer hipótesis que entraban en conflicto con la

física sólidamente consolidada hasta el momento, y es así como debemos avanzar. Para explicar el espectro del hidrógeno Niels Bohr tuvo que postular que la emisión de radiación se produce cuando los átomos de hidrógeno realizan transiciones entre estados de energía estacionarios, en los cuales los electrones orbitan sin emitir radiación [4, 5]. Este nuevo modelo de emisión rompe con dos aspectos esenciales del modelo electromagnético de emisión de radiación. Por una parte, desvincula la emisión del movimiento periódico de las cargas eléctricas de la fuente, los electrones orbitan en un estado estacionario sin emitir energía. Por otra parte, considera que la frecuencia de la radiación emitida no guarda relación con la frecuencia de oscilación de las cargas eléctricas en la fuente, sino que se relaciona con la diferencia de energía de los estados estacionarios entre los que tiene lugar la transición que da origen a dicha radiación, a través de la ecuación  $\Delta E_{\text{átomo}} = h\nu_{\text{radiación}}$ , donde  $h$  es la constante de Planck. Para dar cuenta de las líneas espectrales del hidrógeno, Bohr postuló que la energía de los estados estacionarios del hidrógeno debía responder a la expresión

$$E = \frac{-13,6 \text{ (eV)}}{n^2} \quad (1)$$

siendo  $n$  un número natural.

De acuerdo con los postulados de Bohr, el hecho de que haya cuatro líneas en el espectro del hidrógeno se relacionaría con cuatro transiciones diferentes entre estados estacionarios de sus átomos al ser excitados (figura 3). Esta primera explicación cualitativa no nos debería parecer suficiente para dar por aceptados unos postulados que rompen radicalmente con todo lo que se sabe sobre emisión de ondas electromagnéticas. Buscamos en el hidrógeno más evidencias que apoyen este nuevo modelo.



**Fig. 3.** La emisión de radiación de una determinada frecuencia tiene lugar cuando el átomo lleva a cabo una transición entre estados estacionarios. La frecuencia de la radiación ya no guarda relación con el movimiento periódico orbital del electrón.

La primera evidencia la podemos encontrar en la ionización. Para ionizar los átomos de hidrógeno es necesario iluminarlos con luz de una frecuencia de mínima de  $3,28 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ . Este resultado es coherente con el nuevo modelo cuántico: con la absorción de esta radiación se produce en el átomo una transición de 13,6 eV, que permitiría ionizar a los átomos de hidrógeno (figura 4). Con radiaciones de frecuencia superior se producirían transiciones más energéticas, todas ellas darían una energía positiva al sistema protón-electrón y supondrían la ionización del átomo, fuese cual fuese su energía inicial de acuerdo con la ecuación 1.

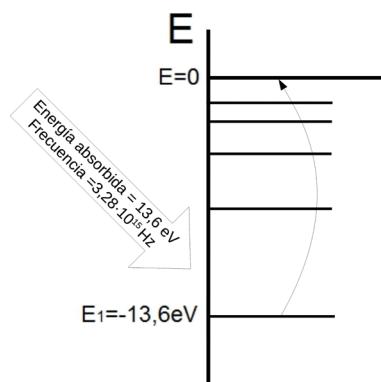


Fig. 4. La emisión de radiación de  $3,28 \cdot 10^{15}$  Hz o frecuencia superior lleva al átomo a una energía igual o superior a 0, ionizando el átomo.

Usando la ecuación 1 podemos calcular las frecuencias de la radiación que emite el hidrógeno y compararlas con las registradas en el espectroscopio. Para ello, calculamos la energía de los primeros estados estacionarios del hidrógeno y las frecuencias de las radiaciones que se emiten cuando se producen transiciones entre ellos. Observamos que las frecuencias de las radiaciones registradas con el espectroscopio se corresponden con las transiciones de los átomos de hidrógeno desde los estados 3, 4, 5 y 6 al estado 2 (figura 5). Este avance es crucial (puesto que aporta una sólida evidencia cuantitativa) pero genera dos nuevos problemas:

¿Por qué se observan solo cuatro frecuencias en el espectro y no todas las calculadas? ¿Dónde están las líneas que faltan en el espectro? Una primera reflexión nos permite darnos cuenta de que las frecuencias por las que nos preguntamos corresponden a radiación no visible, siendo así imposible registrarla con nuestro espectroscopio. El uso de técnicas adecuadas, no disponibles en laboratorios escolares, nos permite encontrar las frecuencias no visibles del espectro del hidrógeno y confirmar que coinciden con las que hemos calculado.

¿Se producen transiciones entre cualesquiera estados estacionarios sin pasar por los estados intermedios? De no ser así, en el espectro visible solo se registraría la línea roja, correspondiente a la transición entre el tercero y segundo y estado estacionario. Sin embargo, de acuerdo con la física clásica, si un sistema emite energía lo hará de forma continua, recorriendo el continuo de energía desde el estado inicial hasta el estado final. Aceptar el nuevo modelo cuántico de átomo supone admitir que las transiciones entre estados se producen sin recorrer no solo el continuo de energía sino ni siquiera los estados intermedios. Esto lleva, además, a un choque frontal con el principio de conservación de la energía: la emisión de un tren de onda requiere un breve lapso de tiempo en que el foco emite energía de manera continua, aspecto que no pasó desapercibido a los investigadores de principios del siglo xx, algunos de los cuales llegaron a negar la validez general del principio de conservación de la energía, reduciéndola a intervalos suficientemente largos de tiempo.

Este último problema pasa desapercibido al abordar la explicación de los espectros usando el concepto de fotón. Históricamente el trabajo de Bohr data de 1913 mientras que la explicación dada por Albert Einstein al efecto fotoeléctrico es de 1905. Sin embargo, Bohr considera en su trabajo que la radiación está formada por ondas electromagnéticas. De he-

cho, la hipótesis de cuantización de la energía en la radiación propuesta por Einstein en 1905 sufrió un fuerte rechazo por parte de la comunidad científica y no fue hasta 1923, con la explicación del efecto Compton, que dicho modelo es aceptado. Si bien el estudio del espectro del hidrógeno no nos permite introducir de forma sólida la cuantización de la energía en la radiación, sí resulta interesante destacar que pone de manifiesto profundas dificultades relacionadas con el modelo ondulatorio de radiación, tan profundas como que afectan a la validez del principio de conservación de la energía.

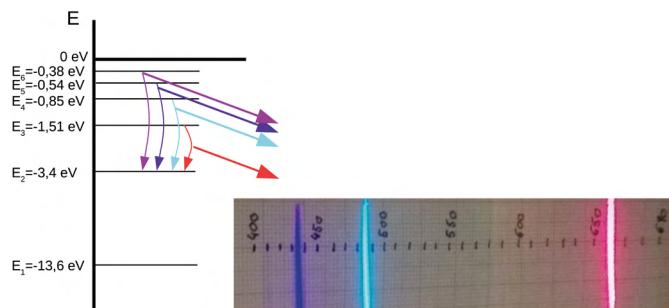


Fig. 5. Las radiaciones detectadas en el espectro visible del hidrógeno se corresponden con las transiciones atómicas desde los estados con  $n = 3$ ,  $n = 4$ ,  $n = 5$  y  $n = 6$  al estado con  $n = 2$ .

Las aportaciones iniciales de Bohr abordaron las frecuencias del espectro del hidrógeno, pero no daban ninguna interpretación de las intensidades. Fue Einstein quien, en 1917, relacionó la intensidad de cada líneapectral con la probabilidad de que se produzca en el átomo la transición electrónica que da lugar a la radiación de dicha frecuencia, de modo que las líneas más intensas del espectro se corresponden con las transiciones más probables en los átomos [6]. El hecho de que las transiciones no tengan lugar necesariamente entre estados estacionarios consecutivos dejaba abierta la cuestión de determinar a qué estado tendrá lugar una transición. La presencia en los espectros de líneas correspondientes a todas las transiciones posibles evidencia que no se pueden hacer predicciones deterministas relativas a los procesos de emisión de los átomos excitados. Esta es otra de las grandes diferencias entre el modelo clásico y cuántico de emisión de radiación [7, 8].

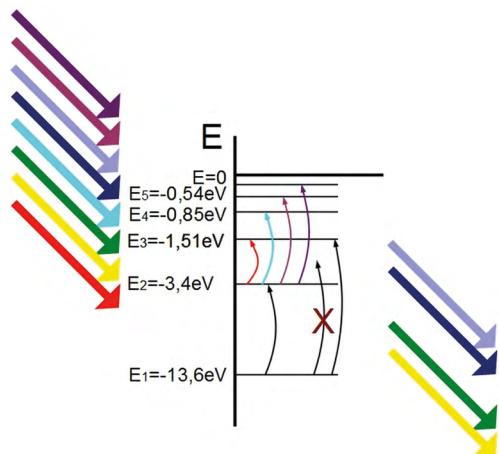
El análisis del espectro de absorción de hidrógeno permite consolidar el modelo establecido e introducir nuevas ideas clave (figura 6). De acuerdo con los postulados de Bohr, las transiciones se pueden producir desde estados de menor energía a estados de mayor energía siempre que se absorba radiación que cumpla con la expresión  $\Delta E_{\text{átomo}} = h\nu_{\text{radiación}}$ . Esta interpretación, que puede parecer obvia, no está exenta de detalles:

Para que los átomos de hidrógeno realicen transiciones desde el segundo estado estacionario hasta estados de energía superior al absorber las radiaciones cuyas frecuencias aparecen en el espectro es imprescindible que haya una proporción importante de átomos que se encuentren en el segundo estado estacionario. Es decir, los átomos deben estar en un estado de excitación previo, en caso contrario las radiaciones visibles del espectro no se absorberán. Esto se puede conseguir, por ejemplo, calentando el gas.

Cuando un átomo absorbe radiación y alcanza un estado excitado emitirá radiación hasta regresar al estado fundamental antes de absorber radiación de nuevo. Las transiciones múltiples a estados cada vez de mayor energía son

extremadamente improbables. Si no fuese así, se podría ionizar los átomos de hidrógeno con radiación de una frecuencia menor a la que se mide experimentalmente.

Aplicando el modelo cuántico de radiación basado en el concepto de fotón para interpretar los espectros de absorción, también evidenciamos que un átomo no puede absorber dos o más fotones y “sumar” su energía para hacer una transición. Así mismo, al analizar la emisión no se ha considerado la posibilidad de que un átomo emita dos fotones al realizar una única transición entre estados estacionarios. A cada transición energética le corresponde la emisión o absorción de una única frecuencia. Este resultado evidencia, en la interpretación de los espectros, la relación entre frecuencia de la radiación y cantidad de energía emitida o absorbida que conecta con el concepto de fotón.



**Fig. 6.** La formación del espectro de absorción del hidrógeno se debe a que los átomos del gas absorben únicamente las radiaciones que conllevan transiciones entre estados estacionarios. Para que esto ocurra, se necesita que los átomos de hidrógeno se encuentren inicialmente en el segundo estado estacionario, lo que se puede lograr aportando calor. La transición tachada con una X no es posible, puesto que no tiene lugar entre estados estacionarios.

### Conclusiones y perspectivas

El modelo establecido se puede emplear para explicar el funcionamiento de las fuentes de radiación que hemos nombrado con anterioridad al estudio en profundidad del espectro del hidrógeno. A pesar de todas sus aplicaciones, la introducción del modelo cuántico de emisión y absorción de radiación no está carente de problemas. Por un lado, supone la aceptación de un modelo corpuscular para la radiación incompatible con el modelo ondulatorio, imprescindible para explicar fenómenos como la interferencia (que da cuenta del funcionamiento del mismo espectroscopio!) o para dar sentido a conceptos como frecuencia o longitud de onda de la radiación. Por otro lado, todas las explicaciones que hemos dado de los procesos de emisión y absorción han sido explicaciones *a posteriori*, es decir, establecemos una estructura de niveles energéticos para el hidrógeno que da cuenta de la radiación que emite, pero no disponemos de ningún principio físico que nos permita determinar dicha estructura de niveles y ponerla a prueba mediante el análisis espectral. Por último, incorpora la idea de aleatoriedad intrínseca. Se requiere el establecimiento de una nueva física, que históricamente tuvo lugar a partir de 1925, para superar estas dificultades y recuperar la coherencia en la física.

### Referencias

- [1] S. B. MCKAGAN, K. K. PERKINS, M. DUBSON, C. MALLEY, S. REID, R. LEMASTER, y C. E. WIEMAN, Developing and Researching PhET Simulations for Teaching Quantum Mechanics, *American Journal of Physics* **76** (4), 406 (2008).
- [2] F. SAVALL, J. GUIASOLA, S. ROSA y J. MARTÍNEZ-TORREGROSA, Problem-based Structure for a Teaching-Learning Sequence to Overcome Students' Difficulties when Learning About atomic Spectra, *Physical Review Pyisics Education Research* **15**, 020138 (2019).
- [3] F. SAVALL, I. CUESTA, N. PEIRÓ, P. ROCHE y A. TOMÁS, Construcció i ús d'un espectroscopi per a Smartphones (2019). <https://www.uv.es/uvweb/experimenta/ca/novetats/projectes-premiats-2019-explicats-protagonistes-1285927554800/Novetat.html?id=1286094586230>.
- [4] N. BOHR, On the constitution of atoms and molecules, *Philosophical Magazine* **26**, 1 (1913).
- [5] N. BOHR, On the constitution of atoms and molecules. Part II. Systems containing only a single nucleus, *Philosophical Magazine* **26**, 476 (1913).
- [6] A. EINSTEIN (1917), Sobre a teoria quântica da radiação, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27** (1), 93 (2005).
- [7] N. BOHR, *Física atómica y conocimiento humano* (Aguilar, 1964).
- [8] M. JAMMER, *The conceptual development of quantum mechanics* (McGrawHill, 1966).

## Descripción de la luz en Bachillerato: modelo ondulatorio clásico, modelo fotónico y teoría cuántica

**Pedro González Marhuenda**

Dpto. de Física Teórica, Universidad de Valencia (UV),  
e Instituto de Física Corpuscular IFIC (UV-CSIC)



**Manuel Alonso Sánchez**

Sección Local de Alicante de la RSEF



En este artículo, tras repasar los principales aspectos del modelo ondulatorio clásico de la luz que se estudian en Bachillerato, desarrollamos el modelo fotónico, mostrando que su aplicación no tiene por qué limitarse al estudio de hechos no explicables con el modelo ondulatorio clásico, sino que se puede extender a la descripción microscópica del comportamiento de la luz en muchos procesos. En este desarrollo también ponemos en evidencia las limitaciones del modelo, haciendo patente la necesidad de su imple-

mentación hacia la teoría cuántica de la luz, de la que proponemos hacer en clase una breve introducción.

## 1. Introducción

Con respecto a las tres descripciones de la luz a las que alude el título de este artículo, los estudiantes de Bachillerato:

- Conocen bastantes aspectos del modelo ondulatorio clásico. En los temas de óptica y de electromagnetismo constatan que explica un gran número de comportamientos de la luz.
- Conocen alguna aplicación del modelo fotónico basado en la hipótesis de que la luz está constituida por partículas, denominadas fotones, que interactúan con la materia pudiendo ser absorbidas o emitidas por esta. En el tema de introducción a la física cuántica constatan que el concepto de fotón permite explicar algunos comportamientos de la luz incompatibles con el modelo ondulatorio clásico en procesos tales como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y los espectros atómicos.
- Desconocen la teoría cuántica de la luz.

Tras repasar algunos aspectos del modelo ondulatorio clásico, dedicaremos la parte principal de este artículo a extender la aplicación del modelo fotónico y a constatar la necesidad de implementar el modelo hacia la teoría cuántica. Nuestra intención es contribuir a que los estudiantes:

- Apliquen el modelo fotónico a otros procesos en los que interviene la luz, más allá de los citados anteriormente.
- Tengan conocimiento de algún experimento con luz muy débil, para tomar conciencia de que los fotones no se comportan como corpúsculos clásicos.
- Conozcan, de manera muy embrionaria, algunos detalles de la teoría cuántica, aprendiendo que es la única capaz de explicar todos los comportamientos de la luz.
- Ubiquen el modelo ondulatorio clásico como un caso límite de la teoría cuántica de la luz.

## 2. Modelo ondulatorio clásico

En este apartado comentamos acerca del tratamiento que puede hacerse de diversos aspectos del comportamiento de la luz en los temas de óptica y electromagnetismo, en los que se consolida a los ojos de los alumnos el modelo ondulatorio clásico.

### Emisión primaria de luz

Una manera de iniciar el tema de Óptica es pedir en clase que se consideren algunas fuentes de luz propia (bombilla tradicional, cerilla, estrella) intentando explicar qué ocurre en ellas. Los estudiantes se dan cuenta de que tiene lugar un proceso físico, químico, nuclear, etc., que propicia la emisión. Como personas situadas en diferentes lugares pueden ver las fuentes, también llegan a la conclusión de que dicha emisión de luz ocurre en todas las direcciones.

### Fuentes secundarias de luz

Para introducir este concepto se puede plantear una pregunta del tipo: ¿Por qué vemos un tomate de color rojo al iluminarlo con luz blanca? Se explica que el tomate absorbe la luz blanca que incide sobre él y luego emite nueva luz, cuya frecuencia dominante corresponde al color rojo. Se aclara también que lo que interpreta nuestro cerebro, a partir de la

luz recibida desde cada punto de un objeto, es la imagen del mismo (figura 1).

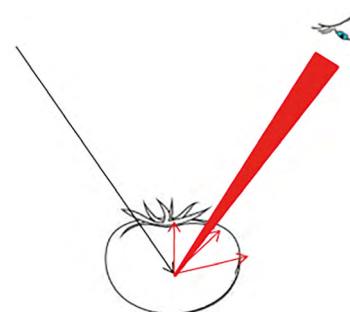


Fig. 1. Esquema para explicar el concepto de fuente secundaria de luz (aplicado a la visión de un tomate).

### Invisibilidad de la luz

Formulando la pregunta de si nosotros vemos la luz, es decir, si vemos las ondas luminosas, es fácil que los alumnos se den cuenta de que incluso la "luz visible" es realmente invisible para nuestros ojos. Para que se asuma completamente este hecho, conviene aclarar por qué en ocasiones parece que vemos "rayos luminosos". Para ello, se puede realizar una experiencia en la que la luz emitida por un puntero láser pasa primero a través de agua y después a través de agua con unas gotas de leche (figura 2).



(a)



(b)

Fig. 2. (a): El rayo de luz láser es invisible en el agua. (b): El mismo rayo sí es "visible" dentro del agua después de haber disuelto unas pocas gotas de leche (experiencia realizada por alumnos del IES Leonardo da Vinci de Alicante).

Los estudiantes comprenden que lo que vemos (figura 2(b)) son las imágenes de gotas de leche disueltas en el agua, que absorben la luz y la emiten en todas las direcciones.

Esta experiencia, al poner en evidencia que la luz láser puede o no ser absorbida dependiendo del medio, ayuda también a plantear los conceptos de **opacidad y transparencia**, ilustrados con algún ejemplo como el vidrio, bastante transparente a la luz visible y bastante opaco a la ultravioleta

(Feynman lo sabía y prescindió de gafas protectoras dentro de un camión para ver una prueba de la bomba atómica).

### Principio de Huygens. Aplicación a la reflexión, refracción, difracción e interferencias

El principio de Huygens, que establece que cualquier punto del medio al que llega una onda luminosa se convierte en un foco emisor de nuevas ondas, se aplica en el tema de Óptica a bastantes comportamientos de la luz, construyendo diagramas gráficos basados en él, por ejemplo, en la reflexión y en la refracción (figura 3).

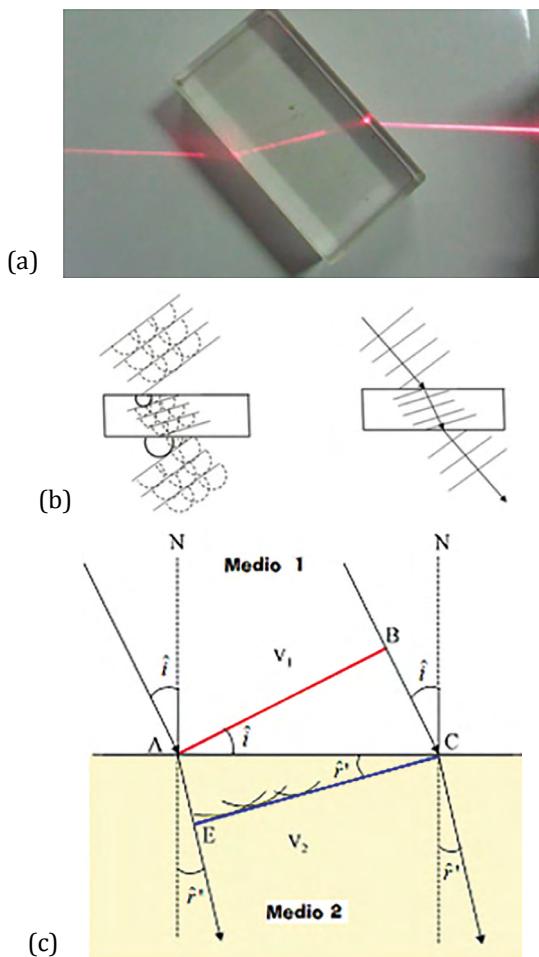


Fig. 3. Refracción de la luz y principio de Huygens. (a): Fotografía de la doble refracción aire-vidrio-aire (tomada por alumnos del IES Leonardo da Vinci de Alicante) (b): Diagramas interpretativos del proceso usando el principio de Huygens (cuantitativo). (c): Diagrama (cuantitativo) para obtener la ley de Snell.

El principio de Huygens también se aplica a la difracción y a las interferencias luminosas, resaltando cómo a partir del siglo XIX estos dos procesos contribuyeron al impulso definitivo del modelo ondulatorio. Se destaca la gran aportación de Young con el experimento de la doble rendija, pudiendo los alumnos reproducir el experimento o uno similar utilizando una red de difracción (figura 4).

También se menciona la teoría ondulatoria de la difracción que Fresnel presentó para optar al premio de la Academia Francesa de Ciencias de París en 1819. Poisson, que era un detractor del modelo ondulatorio de la luz, intentó refutar la teoría de Fresnel usando las ecuaciones presentadas por este para mostrar que de ellas se derivaba un resultado “absurdo”, contrario a la intuición: la sombra de un disco circular opaco

tendría en su centro un punto brillante. Pero el intento fue en vano, pues Arago verificó experimentalmente el resultado y Fresnel ganó el premio y fue nombrado años después miembro de la Academia.

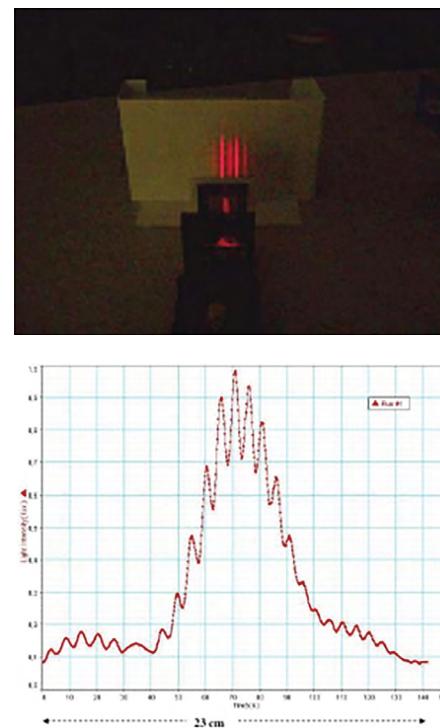


Fig. 4. (a): Franjas de interferencia producidas después de que un rayo de luz monocromática emitido por un puntero láser atraviesa una red de difracción (experimento realizado por alumnos del IES Leonardo da Vinci de Alicante). (b): Gráfica de la distribución de intensidad obtenida con un sensor de luz (experimento realizado por alumnos del IES Sixto Marco de Elche).

### Color

No es tan habitual, pero también vale la pena mostrar en Bachillerato cómo Young usó su modelo ondulatorio para interpretar el color. Empezó cuestionando el modelo newtoniano, según el cual la luz sería una granizada de corpúsculos portadores de los colores (se necesitaría un número enorme de ellos diferentes y en nuestros ojos deberíamos poseer también un número enorme de receptores distintos); luego atribuyó el color a la longitud de onda<sup>1</sup>, y afirmó: “Cuando varios colores viajan juntos se perciben como una onda luminosa de un solo color resultante de la composición de las diferentes longitudes de onda” [1]. Además, comprobó empíricamente que todos los colores se pueden obtener combinando luces de tres colores básicos (verde, rojo y azul intenso).

### Velocidad de la luz en diferentes medios

En el tema de electromagnetismo se explica que la luz es una onda electromagnética y se interpreta el valor de la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , como el cociente  $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$ , donde  $\mu_0$  y  $\epsilon_0$  son respectivamente la permeabilidad magnética y la permittividad eléctrica del vacío. Los estudiantes entienden que en otros medios la interacción con el campo electromagnético es distinta y la velocidad de la luz es menor que  $c$ .

<sup>1</sup> El color realmente está determinado por la frecuencia  $v$ , pero en un medio dado a cada color le corresponde una longitud de onda  $\lambda = v/c$ , donde  $v$  es la velocidad de la luz en el medio.

## Polarización

La polarización fue clave para establecer la transversalidad de las ondas electromagnéticas. Además de destacar esto en clase, pueden mencionarse los trabajos de Malus, pionero en señalar que era un fenómeno inherente a la propia luz. También cabe hacer algunas experiencias (birrefringencia), y considerar aplicaciones tecnológicas (gafas, polariscopios).

## Resumen y crítica

Con todo lo anterior los estudiantes de Bachillerato obtienen un conocimiento amplio de la descripción de la luz mediante el modelo ondulatorio clásico. Pero, enseguida (en el tema de "introducción a la física cuántica"), conocen el fracaso de este modelo para explicar algunos procesos que requieren la consideración de interacciones a nivel microscópico entre luz y materia. Los estudiantes han de saber entonces que el modelo ondulatorio clásico no puede explicarlos porque es incompatible con el carácter discreto de la energía en la luz. Y que, por tanto, aunque de forma global explica exitosamente muchos procesos, no puede dar cuenta de lo que ocurre en ellos a escala microscópica.

### 3. Modelo fotónico

La introducción del cuantos de energía luminosa por Planck (para luz de frecuencia  $\nu$  este cuantos está dado por  $h\nu$ , siendo  $h$  la constante de Planck) para explicar el intercambio de energía entre la luz y la materia, y la hipótesis de Einstein de que la propia luz está constituida por cuantos, posteriormente llamados fotones, junto con conocimientos básicos de relatividad especial estudiados antes, son herramientas suficientes para plantear en Bachillerato un modelo de la luz en términos de fotones. Los estudiantes asumen con naturalidad que los fotones, al no tener masa, han de viajar en el vacío a la velocidad  $c$ .

Mostraremos que la aplicación de dicho modelo no tiene por qué limitarse al estudio de procesos no explicables con el modelo ondulatorio clásico, sino que, combinado con el conocimiento del carácter discreto de la energía de los electrones en la materia (niveles de energía electrónicos) y con la condición de que exista un número máximo de electrones por nivel (ocupación máxima), permite describir cualitativamente a escala microscópica el comportamiento de la luz en otros muchos procesos. Veremos también que los experimentos fotón a fotón muestran que los fotones no se comportan como corpúsculos clásicos, haciendo patente la necesidad de una teoría puramente cuántica de la luz.

## Absorción y emisión de luz

Un primer proceso a describir con el modelo fotónico es la absorción de luz por la materia. Cuando fotones de la luz incidente tienen una energía aproximadamente igual a la diferencia de energía entre dos niveles electrónicos de la materia y el nivel superior no tiene ocupación máxima, puede producirse la absorción de fotones acompañada de saltos de electrones desde el nivel inferior al superior. Este proceso se denomina **absorción estimulada** (figura 5).

Tras un proceso de absorción, la materia queda en un estado excitado, que es inestable, y tiende a volver a su estado no excitado mediante una o varias transiciones (caídas) electrónicas. Este proceso se denomina **emisión espontánea** y tiene lugar en todas direcciones (figura 6).

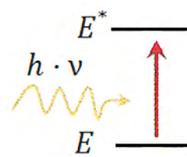


Fig. 5. Esquema elemental del proceso de absorción estimulada. Un fotón con energía  $h\nu$ , igual a la diferencia de energía entre dos niveles,  $h\nu = E^* - E$ , es absorbido y da lugar a un salto electrónico desde el nivel de energía  $E$  hasta el nivel de energía  $E^*$ .

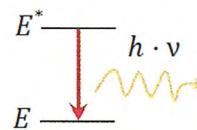


Fig. 6. Esquema elemental del proceso de emisión espontánea de un fotón. En una caída electrónica desde el nivel de energía  $E^*$  al nivel de energía  $E$  se emite un fotón con energía  $h\nu = E^* - E$ .

Estos procesos explican el hecho de que una fuente luminescente presente unas frecuencias de emisión características y distintivas (en el espectro visible cada frecuencia corresponde a un color), ya que emite luz con frecuencias acordes a los niveles de energía electrónicos del material que la compone. Hay fuentes con espectros discretos (como el mercurio gaseoso en el experimento de Franck-Hertz) provenientes de transiciones entre niveles discretos, y también otras con espectros de emisión casi continuos o continuos (como el filamento de tungsteno de una bombilla incandescente) provenientes de transiciones entre niveles de energía muy próximos entre sí o formando un continuo.

Por otra parte, cuando en un material hay niveles de energía intermedios entre  $E^*$  y  $E$ , sin ocupación máxima, la vuelta al estado no excitado puede tener lugar mediante una sucesión de caídas electrónicas, de manera que las energías de los fotones emitidos sean distintas de  $h\nu$ . Por ejemplo, hay materiales denominados fluorescentes que pueden absorber luz ultravioleta y emitir parte de la energía absorbida como luz visible. Un material de este tipo se utiliza en los tubos fluorescentes.

El hecho de que en esta descripción de la absorción-emisión de luz la energía de los fotones ha de corresponder a la de transiciones electrónicas en la materia, permite explicar la **transparencia** de un material en un determinado rango de frecuencias, que ocurre cuando la energía de los fotones es significativamente diferente a la de cualquier posible salto energético en ese material. También explica que no podemos ver, como comentamos anteriormente, un haz de luz láser propagándose en agua, y sí en cambio cuando en ella se han disuelto gotas de leche, porque estas pueden absorber fotones con energía correspondiente a la frecuencia de la luz láser, y emitir nuevos fotones de la misma energía en todas las direcciones, incluidas las que apuntan a nuestros ojos.

Cabe añadir por completitud que, aparte de su posible absorción, un fotón con energía igual a la diferencia de energía entre dos niveles energéticos del material,  $E^* - E$ , puede no ser absorbido y hacer más probable la caída electrónica entre los niveles de energía  $E^*$  y  $E$ , con emisión de un fotón de la misma energía  $E^* - E$ , siempre que el número de electrones en esos niveles permita que se pueda producir dicha caída. Este proceso se denomina **emisión estimulada** y subyace en la emisión de luz láser.

### Reinterpretación del principio de Huygens

Los dos procesos considerados, absorción por la materia de fotones de la luz incidente y emisión posterior de fotones de la luz saliente, se pueden interpretar como una **versión microscópica del principio de Huygens**, en la que los "puntos" materiales a los que llega la luz se convierten en focos emisores de luz nueva. Al atravesar un medio material no transparente la luz se va renovando: van desapareciendo fotones de la luz incidente y apareciendo nuevos fotones que forman parte de la luz saliente.

### Velocidad de la luz

La descripción anterior de la absorción-emisión de luz también permite entender por qué, aunque los fotones viajan solo en el vacío y siempre a velocidad  $c$ , la velocidad de la luz es menor que  $c$  al atravesar un medio material no transparente. La razón es que la absorción de un fotón incidente y la correspondiente emisión de un fotón saliente no son simultáneas, sino que hay un retraso temporal en la emisión. Así, la velocidad de la luz en el medio, definida como el cociente entre la distancia recorrida por la luz (renovada) y el tiempo promedio por fotón incidente empleado en recorrerla, es tanto menor que  $c$  cuantas más absorciones-emisiones tengan lugar. Una imagen nomenclática sugerente para explicar esto es la de un fotón como un relevista en una carrera. Corre a velocidad  $c$  durante su relevo, pero tarda tiempo en la entrega del testigo a otro fotón.

### Difracción e interferencias. Reflexión y refracción. Polarización

La descripción de la difracción e interferencias, así como de la reflexión, refracción y polarización de la luz, con el modelo fotónico, pone de manifiesto que **los fotones no se comportan como corpúsculos clásicos**.

Para mostrar esto en clase se puede empezar aludiendo al experimento pionero de Taylor de 1909 [2], que fotografió la sombra esparcida de una aguja en una pantalla, mostrando que era la misma (el mismo patrón de difracción) tanto cuando usaba luz intensa correspondiente a un gran número de fotones, como cuando, durante mucho más tiempo de exposición, casi tres meses, usaba una luz tan débil que su energía por unidad de tiempo era, en promedio, menor que la de un fotón. Después conviene comentar que, análogamente, en el experimento de doble rendija de Young, si se usa también luz muy débil, se puede observar cómo se van formando, impacto a impacto (fotón a fotón) en la pantalla, las franjas de interferencia (figura 7).

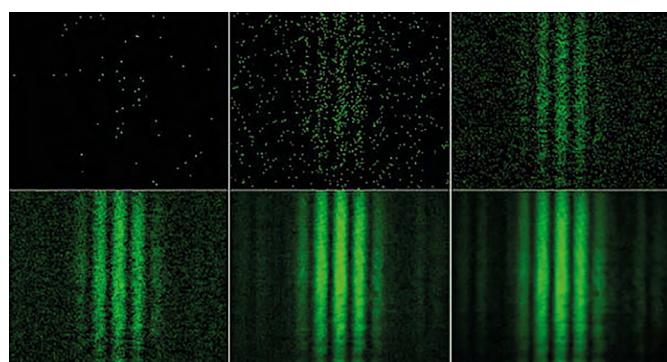


Fig. 7. Ejemplo de secuencias temporales del experimento de doble rendija fotón a fotón [3].

Este comportamiento fotónico es totalmente incompatible con el de un corpúsculo clásico, que nunca daría lugar a esos patrones de difracción e interferencias.

Conviene añadir que en un experimento de reflexión y/o refracción, con luz muy débil, los detectores de fotones acaban registrando máximos de cuentas en las direcciones correspondientes a las leyes de la reflexión y la refracción. De forma análoga, en experiencias de polarización como la birrefringencia se reproducen, fotón a fotón, los resultados experimentales.

### Resumen y crítica

Las aplicaciones desarrolladas en este apartado han de permitir a los estudiantes tener un conocimiento amplio del modelo fotónico y saber que, aunque este modelo proporciona una descripción a escala microscópica de los procesos en que interviene la luz, esta descripción es, o puramente cualitativa, como en el caso de la difracción e interferencias, donde el modelo se limita a presentar los resultados experimentales, o solo parcialmente cuantitativa, como en el efecto fotoeléctrico, donde se puede calcular la frecuencia umbral, pero no la tasa de electrones salientes frente a fotones incidentes (sección eficaz).

Para tener una descripción completa, como se requiere en Física, es necesaria una implementación matemática del modelo que corresponda a una teoría cuántica, capaz de explicar en forma cuantitativa todos los procesos con luz conocidos experimentalmente y de predecir los resultados de nuevos procesos que se puedan diseñar en el laboratorio.

### 4. Teoría cuántica

La teoría cuántica de la luz, o electrodinámica cuántica, nació 20 años después del experimento de Taylor y completó su desarrollo formal 20 después. Describe el comportamiento cuántico de los fotones y de sus interacciones con la materia, proporcionando una descripción cuantitativa completa del comportamiento de la luz.

Proponemos hacer en clase una breve introducción de esta teoría, que puede iniciarse arguyendo que, al igual que un sistema material, como, por ejemplo, un electrón, se describe cuánticamente mediante una función de onda que representa una amplitud de probabilidad, un fotón también se describe mediante una amplitud de probabilidad, que es una función de la posición y del tiempo. El módulo al cuadrado de esa función, en una posición y un instante dados, representa la densidad de probabilidad de presencia de un fotón en ese punto y en ese instante.

Se puede ilustrar el significado de esta descripción probabilística en algunos de los procesos mencionados anteriormente. Por ejemplo:

- i) En el experimento de la doble rendija, fotón a fotón, se producen más (menos) impactos en las zonas de la pantalla en las que la densidad de probabilidad del fotón es mayor (menor), hasta formar la figura de interferencia.
- ii) En un experimento de reflexión (refracción), para luz incidente en una dirección dada, la probabilidad de detectar al fotón es máxima en un detector situado en la dirección de salida predicha por la ley de la reflexión (refracción) de la luz.
- iii) En una experiencia de polarización, como la birrefringencia, la probabilidad de detectar al fotón presenta un

máximo para cada uno de los detectores situados según las dos direcciones de salida de la luz (cada fotón solo es registrado por uno de los detectores). La polarización está relacionada con una propiedad intrínseca del fotón denominada espín.

- iv) En el efecto fotoeléctrico, la probabilidad de que el fotón arranque un electrón del metal sobre el que incide determina la tasa de producción de electrones salientes frente a fotones incidentes.

Proponemos también desarrollar alguna explicación gráfica del funcionamiento de la teoría, haciendo uso de que la amplitud de probabilidad del fotón en una posición y un tiempo es un número complejo, representable mediante un vector en el plano que tiene su origen en dicha posición (figura 8).



Fig. 8. Vector que representa en un instante dado la amplitud de probabilidad de un fotón en la posición P. El cuadrado de su longitud indica la densidad de probabilidad de presencia del fotón en ese punto. La fase,  $\Phi$ , está determinada por el tiempo. A medida que aumenta este, también aumenta  $\Phi$ , y el vector va girando en sentido contrario a las agujas del reloj.

Por ejemplo, se puede estudiar la reflexión especular de la luz, considerando una fuente emisora cuyas frecuencias estén en un intervalo muy pequeño alrededor de un valor central, y suponiendo que la luz emitida por ella se propaga en el vacío e incide sobre un espejo plano antes de alcanzar un detector (figura 9) [4]. Como la luz es emitida por la fuente en todas las direcciones, al detector puede llegar luz reflejada desde cualquier punto del espejo (figura 9(a)), siendo el tiempo de recorrido desde la fuente al detector diferente para cada camino y mínimo para uno de ellos (figura 9(b)).

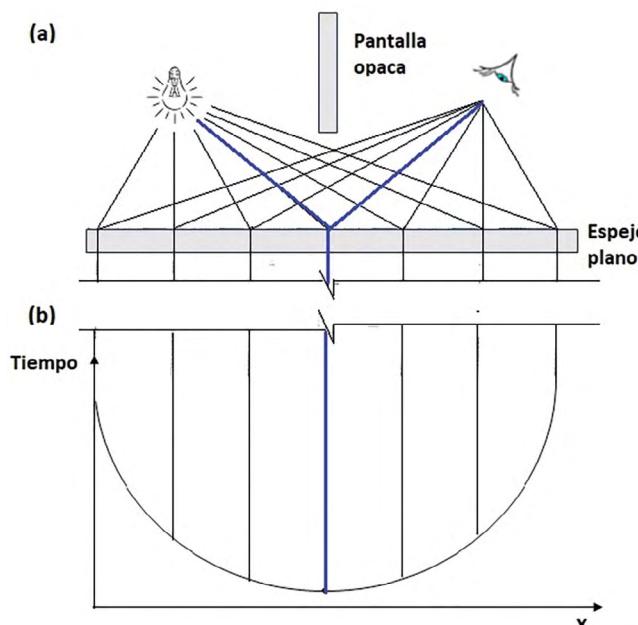


Fig. 9. (a): Algunos caminos de la luz entre la fuente y el detector (aunque solo se han dibujado caminos radiales se pueden tener caminos de cualquier tipo; se ha colocado una pantalla opaca entre la fuente y el detector para indicar que la luz que llega a este procede solo del espejo). (b): Representación del tiempo recorrido por la luz desde la fuente hasta el detector (es mínimo para el camino destacado en color azul).

En cada instante, la amplitud de probabilidad en el punto en que está el detector es la suma de las amplitudes de probabilidad en ese punto correspondientes a los diferentes caminos. Como la fase de cada amplitud de probabilidad depende del tiempo de recorrido desde la fuente, en el detector se tiene una fase diferente para cada camino. Estas fases determinan las interferencias, es decir, si las amplitudes de los diferentes caminos se cancelan o se realzan entre sí (equivalente a decir que la suma de los vectores que representan a las amplitudes da un vector de menor o mayor módulo).

Un análisis detallado muestra que las amplitudes correspondientes a los caminos que están a la izquierda no inmediata del de tiempo mínimo (e igualmente las de los que están a la derecha no inmediata) se cancelan entre sí (interfieren destructivamente) en el detector, debido a la rápida variación de la fase, asociada a la rápida variación del tiempo de un camino a otro (como se aprecia en la figura 9(b)). En cambio, los tiempos de recorrido para los caminos que están próximos al de tiempo mínimo son casi iguales entre sí porque sus fases son muy similares y ello da lugar a una amplitud resultante no nula (interferencia constructiva) en el detector. Ambos casos se representan esquemáticamente en la figura 10.

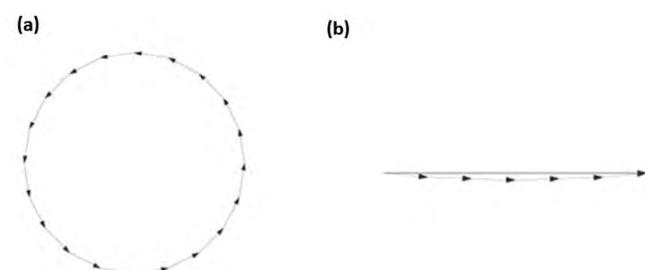


Fig. 10. Representación esquemática de la suma de amplitudes de probabilidad en el detector en un instante dado. (a): Suma nula de amplitudes de caminos no próximos al de tiempo mínimo. (b): Suma no nula de amplitudes de caminos próximos al de tiempo mínimo.

Por tanto, se concluye que la amplitud de probabilidad en el detector es la que corresponde al camino de tiempo mínimo (que incluye los caminos vecinos inmediatos). Lógicamente, para cada posición del detector se tiene un camino de tiempo mínimo diferente, con un punto de incidencia distinto sobre el espejo.

Estos caminos de tiempo mínimo proporcionan una explicación cuántica a los rayos de luz que se utilizan en la descripción clásica para indicar las direcciones de propagación de la luz. También permiten entender las leyes de la reflexión y de la refracción: cuando un rayo de luz incide según un ángulo determinado sobre la superficie de un medio material, los ángulos de salida predichos por estas leyes corresponden a los de los caminos más probables, que son los de tiempo mínimo.

Para complementar el ejemplo anterior, se puede desarrollar la explicación gráfica del experimento de la doble rendija. Se puede considerar, por sencillez, una fuente puntual de luz, equidistante de ambas rendijas (puntuales), cuyas frecuencias están en un intervalo muy pequeño alrededor de un valor central, y que la luz se propaga en el vacío. En cada punto de la pantalla se obtiene la suma de dos amplitudes de probabilidad correspondientes a los dos caminos de tiempo mínimo desde la fuente pasando por las rendijas. Cuando esos tiempos sean tales que los vectores correspondientes a las

amplitudes tengan la misma dirección y sentido, el módulo del vector suma tendrá el mayor valor posible, la densidad de probabilidad será máxima y se tendrá un máximo de luz (como, evidentemente, ocurre en el punto central de la pantalla, que equidista de ambas rendijas). En cambio, cuando los tiempos de ambos caminos sean tales que los vectores tengan la misma dirección y sentido contrario, se tendrá un mínimo de luz. De esta forma, considerando todas las situaciones intermedias, queda descrita la figura de interferencia.

Para finalizar esta breve introducción a la teoría cuántica proponemos hacer énfasis en que la electrodinámica cuántica, que implementa el modelo fotónico de la luz, tiende, en el límite de un número muy grande de fotones por unidad de frecuencia, a la electrodinámica clásica de Maxwell, que es la teoría efectiva macroscópica subyacente en el modelo ondulatorio clásico de la luz.

## 5. Epílogo

Después de que los estudiantes de Bachillerato constatan el fracaso del modelo ondulatorio clásico de la luz para explicar algunos procesos físicos que requieren la consideración de interacciones a nivel microscópico entre luz y materia, es habitual introducir en clase un modelo de la luz en términos de fotones y limitar su aplicación a explicar algunas características de esos procesos físicos particulares.

En este artículo hemos mostrado que este modelo, combinado con otros conocimientos adquiridos previamente, proporciona una descripción microscópica general, a nivel cualitativo, de los procesos en que interviene la luz. También hemos visto que, para tener una descripción completa, se requiere la implementación del modelo hacia la teoría cuántica de la luz, o electrodinámica cuántica, que sí es capaz de explicar en forma cuantitativa todos los procesos con luz conocidos experimentalmente, así como de predecir los resultados de otros que se puedan diseñar en el laboratorio. Hemos incluido una breve introducción a la descripción probabilística de la luz en esta teoría, para que los estudiantes puedan entender su significado y saber que de ella se deriva, en el límite de un número muy grande de fotones por unidad de frecuencia, la descripción del modelo ondulatorio clásico.

## Agradecimientos

P. G. agradece la financiación de la Conselleria de Innovacion, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital, de la Generalitat Valenciana mediante el proyecto GVA PROMETEO/2021/083, la del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades junto con la Agencia Estatal de Investigación, MCIU/AEI/10.13039/501100011033, mediante el proyecto Severo Ochoa CEX2023-001292-S y la de la Unión Europea mediante la EU Horizon 2020 Grant No. 824093 (STRONG-2020).

## Referencias

- [1] Th. YOUNG, The Bakerian Lecture: On the theory of light and colors, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **92**, 12 (1802).
- [2] G. I. TAYLOR, Interference fringes with feeble light, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **15**, 114 (1909).
- [3] T. L. DIMITROVA y A. WEIS, The wave-particle duality of light: A demonstration experiment, *American Journal of Physics* **76**, 137 (2008).
- [4] P. GONZÁLEZ MARHUENDA, *La Naturaleza de la Luz* (PUV, 2018).

# Cúbits para tocar con las manos

Jorge Pérez-Bailón

Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza



Fernando Luis

Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza



María José Martínez-Pérez

Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza



La computación cuántica está cada vez más cerca de volverse una realidad, pero al mismo tiempo se aleja de la comprensión de la sociedad. Con nuestros cúbits “para tocar con las manos”, podremos explicar de manera tangible conceptos como la teleportación cuántica y las desigualdades de Bell.

**P**arecía realmente lejano y, sin embargo, la posibilidad de ver funcionar un ordenador cuántico tolerante a fallos va tomando forma. En paralelo, también avanza el desarrollo de algoritmos que muestren ventaja cuántica, intentando encontrar aplicaciones que impacten en la sociedad. Gracias a esta tecnología, es posible que en el futuro podamos realizar predicciones financieras, optimizar procesos logísticos, encriptar información segura, simular materiales que aprovechen mejor la energía o diseñar medicamentos a la carta. La sociedad necesita estar preparada para ese momento y ser consciente de sus implicaciones en seguridad y soberanía. El reto es hacer la mecánica cuántica accesible a todo el mundo, sin necesidad de que tengan un grado en física, y hacerlo de modo sencillo, enfatizando la importancia que esta segunda revolución cuántica tendrá sobre nuestras vidas.

Nuestro objetivo es explicar nociones básicas de computación y comunicación cuántica a la sociedad. Para ello, hay dos conceptos básicos con los que se suele comenzar: la superposición y el entrelazamiento. Sin embargo, la descripción matemática de estos estados no suele ser apta para todos los públicos. Esto hace difícil transmitir su significado profundo, cayendo en tópicos como “las partículas pueden estar en dos sitios a la vez”. Además, aun suponiendo que hemos sido capaces de transmitir estos conceptos de manera eficaz, nos enfrentamos a otro reto mayúsculo: describir un algoritmo cuántico [1].

Revisemos, por ejemplo, la secuencia necesaria para hacer teleportación cuántica [2] resumida en la figura 1. Alice tiene

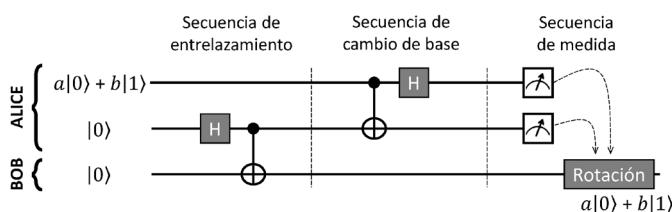


Fig. 1. Algoritmo de teleportación cuántica.

un cuántum en estado  $P = a|0\rangle + b|1\rangle$ , donde los coeficientes complejos  $a$  y  $b$  definen un punto, de entre infinitos posibles, en la superficie de la esfera de Bloch (ver nota final). Alice quiere hacer llegar este estado a Bob. Primero, Alice y Bob comparten dos cuántums que combinan en un estado de máximo entrelazamiento  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ . A continuación, Alice realiza un cambio de base en el cuántum de Bob. Para ello, aplica a sus cuántums una puerta cuántica CNOT seguida de una puerta Hadamard. Posteriormente, Alice mide sus dos cuántums, obteniendo cuatro posibles resultados clásicos: 00, 01, 10 y 11. Esta información es enviada a Bob por un canal clásico. Dependiendo del resultado, Bob aplica a su cuántum una rotación sobre un eje determinado. Como resultado, el cuántum de Bob se encuentra en el estado  $P = a|0\rangle + b|1\rangle$  mientras que el estado original del cuántum de Alice ha sido destruido. Esta explicación se le atraganta a cualquiera. El hecho es que hay un abismo de complejidad entre “los conceptos de superposición y entrelazamiento” y un “algoritmo cuántico”.

### Los cuántums

¿Es posible explicar esto de manera accesible? Para ello, hemos creado un demostrador práctico con dos elementos. El primero es un software gráfico donde podemos visualizar los cuántums como un vector en una circunferencia (versión reducida de la esfera completa de Bloch, ver nota final). El estado fundamental  $|0\rangle$  corresponde a la flecha apuntando hacia arriba y el estado excitado  $|1\rangle$  a la flecha apuntando hacia abajo. El segundo elemento son una serie de cuántums físicos o átomos artificiales gigantes que podremos tocar con las manos. Cada cuántum físico es una bola cerrada de un color determinado cuyo estado se mantiene oculto hasta que la abrimos, tal y como sucede con un cuántum real. Abrir equivale a hacer una medida proyectiva y da como resultado una bombilla apagada (0) o encendida (1).

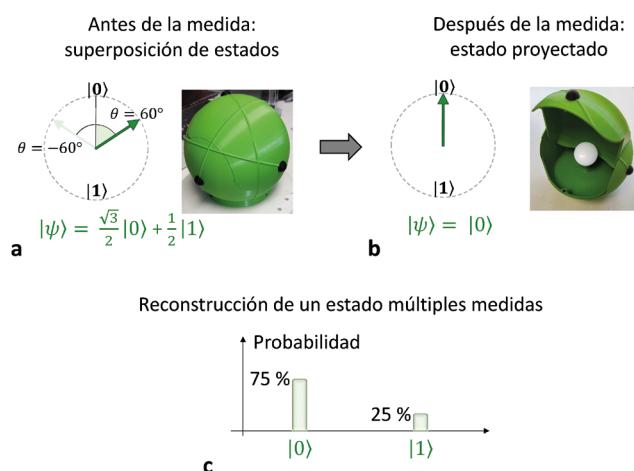


Fig. 2. (a) Cuántum en estado superposición en la base arriba/abajo. (b) Tras abrir la bola, el estado de la flecha se proyecta arriba o abajo con probabilidad  $\cos^2(\theta/2) = 0,75$  y  $\sin^2(\theta/2) = 0,25$ , respectivamente. (c) Realizando múltiples medidas estadísticas puede reconstruirse el estado superposición.

### Preparando el terreno

Comenzaremos explicando el concepto de *superposición*. Un cuántum en un estado superposición corresponde a la flecha apuntando en una dirección de la circunferencia distinta de arriba/abajo, definida únicamente por el ángulo  $\theta$ . El estado se puede describir como  $|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + \sin(\theta/2)|1\rangle$ . A modo de ejemplo, la figura 2a muestra un cuántum en un estado definido por  $\theta = 60^\circ$ . Aquí es donde entran en juego nuestros cuántums físicos. El cuántum permanecerá cerrado, almacenando en su interior el correspondiente estado superposición hasta que realicemos una medida. La medida será efectuada abriendo el cuántum físico (figura 2b). Al hacerlo, observaremos una bombilla apagada (con probabilidad  $\cos^2(\theta/2)$ ) o encendida (con probabilidad  $\sin^2(\theta/2)$ ). A la vez que esto sucede, el software mostrará la correspondiente flecha que habrá sido proyectada hacia arriba o hacia abajo.

Una vez comprendida la superposición, podemos introducir puertas lógicas cuánticas de un cuántum. Por ejemplo, la versión reducida de Hadamard, limitándonos a su parte real (figura 3a). Esta puerta equivale a una rotación horaria de  $90^\circ$  tal que el estado  $|0\rangle$  se transforma en el estado  $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$ . Por otra parte, un giro de  $180^\circ$  en sentido horario correspon-

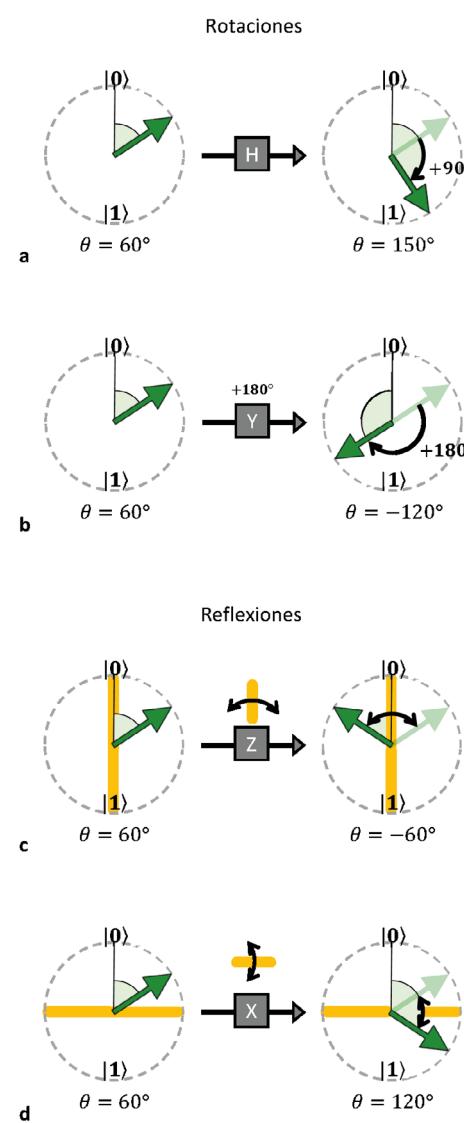


Fig. 3. Puertas lógicas de un cuántum. (a) Hadamard, (b) Rotación de  $180^\circ$  o puerta Y. (c) Reflexión sobre el eje arriba/abajo o puerta Z. (d) Reflexión sobre el eje izquierda/derecha o puerta X.

derá a la puerta Y. Además, será útil introducir las puertas espejo, que reflejan la dirección de la flecha sobre el eje arriba/abajo (puerta Z) o sobre el eje izquierda/derecha (puerta X). La razón de estos nombres (X, Y, Z) será evidente cuando utilicemos la esfera completa de Bloch (véase la nota final).

A continuación, introduciremos el segundo ingrediente de la computación cuántica: el *entrelazamiento*. Para ello, necesitaremos un mínimo de dos cúbites. El entrelazamiento se puede crear, por ejemplo, usando la puerta cuántica CNOT [3]. El funcionamiento de esta puerta es fácil de entender en los casos más sencillos que aparecen en la tabla 1. Cuando el cúbite control está en estado  $|1\rangle$ , el cúbite *target* invertirá su estado. Sin embargo, si el cúbite de control está en estado  $|0\rangle$ , el otro permanecerá inalterado.

Tabla 1. Casos particulares de la aplicación de una puerta CNOT.

Estado inicial		Estado final tras CNOT	
Control	Target	Control	Target
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

Hasta aquí la explicación es sencilla, pero si el cúbite de control se encuentra en un estado superposición, el resultado será una combinación de probabilidades tal que su estado conjunto no puede describirse como un producto de estados individuales (figuras 4a y b). El *software* permite elegir los estados iniciales de los cúbites como flechas dentro de una circunferencia, pudiendo medir individualmente cada uno de ellos para comprobar que su comportamiento es independiente el uno del otro. Una vez aplicada la CNOT, el estado resultante no podrá ser representado mediante flechas, pero sí mediante su correspondiente ecuación matemática. Al hacer esto usando los cúbites físicos, una luz roja se encenderá, indicando que ambos

han sido entrelazados. Al abrir uno de ellos, el entrelazamiento será destruido y el estado del segundo cúbite quedará fijado (figura 4c). Esto se visualizará en el *software* con la proyección de ambas flechas. En este caso, el simulador permite acercar la idea de que un estado entrelazado se define por las correlaciones, no por estados de cada cúbite individual, y explicar que los estados por los que transcurre una computación cuántica codifican la información de forma radicalmente diferente a como lo hace un ordenador convencional.

Hasta aquí, el demostrador nos ha servido para realizar una explicación bastante típica de superposición y entrelazamiento. Sin embargo, a partir de ahora podremos explorar en profundidad estas nociones, usando herramientas únicas.

### Medidas y cambios de base

Inicializaremos nuestro cúbite en un estado superposición cualquiera. Es importante destacar que existen infinitos estados superposición posibles, tantos como puntos hay en la circunferencia. Sin embargo, la medida del cúbite solo nos proporcionará *dos* posibles resultados (bombilla apagada o encendida). Entonces, ¿cómo podemos recuperar la información completa del estado? La respuesta es: realizando múltiples medidas. Para demostrar esto, el usuario podrá abrir y cerrar el cúbite físico varias veces. Cada uno de estos procesos corresponde a un experimento diferente. Es decir, al cerrar el cúbite, este vuelve al estado superposición. Al abrirlo sucesivas veces, el *software* mostrará los resultados obtenidos en un gráfico (figura 2c y figura 4c). Haciendo suficientes medidas, podremos tener una estimación razonable de las probabilidades y, por tanto, del ángulo  $\theta$ .

Nos enfrentamos ahora con un primer problema: no podremos distinguir entre estados con ángulos positivos y negativos, ya que ambos resultarán en las mismas probabilidades  $\cos^2(\theta/2)$  y  $\sin^2(\theta/2)$  (véase la figura 1). Para poder caracterizar bien nuestro cúbite necesitaremos realizar un cambio de base. Por simplicidad, hasta ahora solo hemos utilizado la base arriba/abajo ( $\uparrow\downarrow$ ) pero el *software* también permite hacer medidas proyectivas en otras bases, que podemos elegir a voluntad. La nueva base será representada por el programa como una línea en la circunferencia sobre la que se proyectará el estado de la flecha, por ejemplo, la base izquierda/derecha ( $\leftrightarrow$ ). El resultado final de la medida sobre el cúbite físico será siempre una bombilla encendida/apagada, pero el cambio de base alterará las probabilidades (figura 5). De hecho, bajo el cambio de base apropiado, nuestro estado superposición se convertirá en un estado puro y así podremos demostrárselo a la audiencia.

En este proceso se pone de manifiesto una de las claves de la computación cuántica: el estado de un cúbite no se describe mediante simples probabilidades, sino mediante *amplitudes de probabilidad*. A diferencia de las probabilidades, que siempre son positivas, las amplitudes de probabilidad pueden ser tanto positivas ( $+\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle\uparrow\downarrow$ , como en el ejemplo de la figura 5a) como negativas ( $-\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle\uparrow\downarrow$ ). Este hecho permite que tengan lugar fenómenos de interferencia, ya sea constructiva o destructiva. En el citado ejemplo, los términos que dan lugar al estado  $|0\rangle\leftrightarrow$  interfieren de forma constructiva mientras que aquellos que generan  $|1\rangle\leftrightarrow$  interfieren destructivamente. Como resultado, se obtiene un estado puro (figura 5b).

El segundo problema que enfrentamos es que, en un experimento real, no podremos *rotar la base* de medida. Para

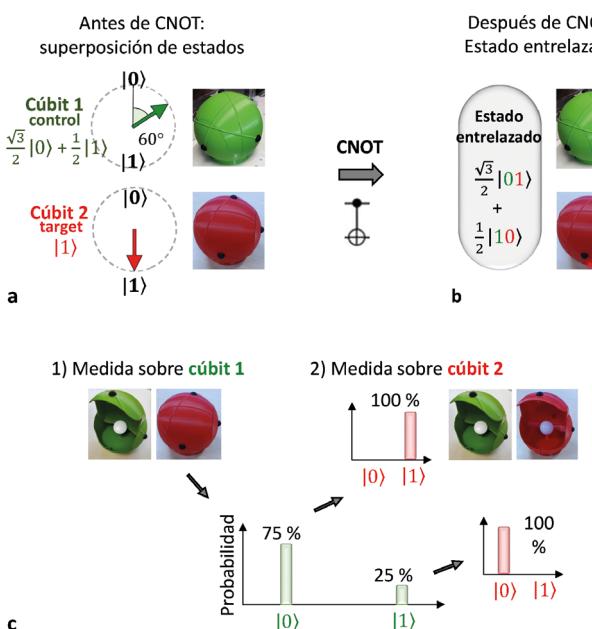


Fig. 4. Estado de dos cúbites antes (a) y después (b) de usar la puerta CNOT, como indica la luz led roja. (c) Caracterización experimental del estado obtenido en (b). Primero medimos el cúbite verde obteniendo 0 o 1 con probabilidad del 75 % y 25 %, respectivamente. Dependiendo del resultado, el estado del cúbite rojo quedará determinado con probabilidad 100 %.

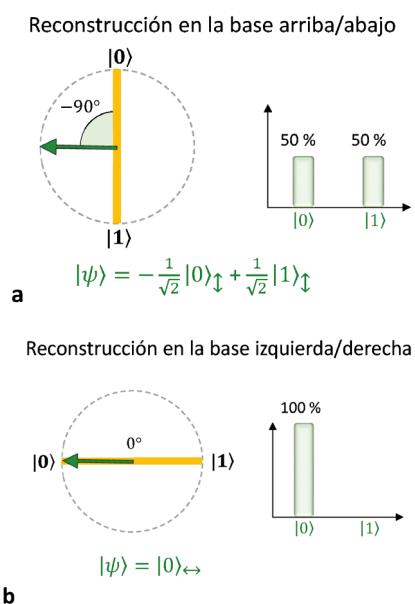


Fig. 5. Cambios de base. Las flechas en (a) y en (b) apuntan en la misma dirección, pero las probabilidades cambian si operamos en la base arriba/abajo (a) o en la base izquierda/derecha (b). Además, nótese que el estado superposición en la base arriba/abajo se transforma en un estado puro en la base izquierda/derecha.

solucionar esto nos bastará con *rotar el estado*. Si, por ejemplo, queremos cambiar de la base arriba/abajo a la base izquierda/derecha, bastará aplicar una puerta Hadamard y hacer las medidas con normalidad. Con todos estos ejemplos podremos mostrar el proceso real de tomografía de un cíbit en un protocolo de medida realista.

### Desigualdades de Bell

Podremos introducir los experimentos de Bell [4]. Tomaremos dos cíbits  $|0\rangle$  y aplicaremos una puerta de Hadamard seguida de una CNOT para obtener un estado de Bell (también llamado de máximo entrelazamiento, como hicieron Alice y Bob en la secuencia de teleportación) como, por ejemplo,  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ . Dos personas de la audiencia podrán realizar medidas en sendos cíbits, eligiendo al azar entre tres posibles bases, por ejemplo, arriba/abajo  $\uparrow$  y  $\downarrow$ , y dos bases diagonales:  $\nwarrow$  y  $\nearrow$ . Tras cada medida, apuntarán los resultados obtenidos, que siempre corresponderán a una bombilla encendida o apagada. Hecho esto unas cuantas veces, ambas personas podrán comparar sus mediciones y deducir la probabilidad de obtener el mismo resultado. El teorema de Bell nos dice que esta probabilidad será diferente si los cíbits están entrelazados o no. Esto nos permitirá explicar la diferencia entre la interpretación clásica del entrelazamiento, basada en el realismo y la localidad, y su interpretación cuántica.

### Primer algoritmo: generación de números aleatorios

Usando únicamente la puerta Hadamard, podremos introducir el primer algoritmo cuántico. La generación de números aleatorios es esencial en procesos de encriptación, pero los métodos clásicos producen dígitos que no son estrictamente aleatorios. Demostraremos cómo un ordenador cuántico puede hacer algo inaccesible para un ordenador clásico. A partir de un cíbit  $|0\rangle$ , aplicaremos Hadamard para llegar a un estado superposición  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ , con una probabilidad realmente aleatoria (del 50 %) de que la medida resulte en 0 o 1.

### Segundo algoritmo: la teleportación cuántica

Comenzaremos entregando un cíbit físico (el cíbit verde) a una persona (Alice) que puede definir su estado superposición  $P$  a su gusto. En paralelo, tomamos dos cíbits (rojo y azul) en un estado de entrelazamiento máximo  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ . Estos dos cíbits son separados y entregados a Alice (cíbit rojo) y a una segunda persona que participe en el experimento (Bob, cíbit azul). A continuación, Alice aplica una puerta CNOT sobre sus dos cíbits, usando el cíbit verde como control, seguida de una puerta Hadamard sobre este mismo cíbit. Esta operación da como resultado:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}|00\rangle(\cos(\theta/2)|0\rangle + \sin(\theta/2)|1\rangle) + \frac{1}{2}|10\rangle(\cos(\theta/2)|0\rangle - \sin(\theta/2)|1\rangle) + \frac{1}{2}|01\rangle(\sin(\theta/2)|0\rangle + \cos(\theta/2)|1\rangle) + \frac{1}{2}|11\rangle(-\sin(\theta/2)|0\rangle + \cos(\theta/2)|1\rangle)$$

Este es el corazón del algoritmo: entrelazar tres cíbits produce más posibilidades que entrelazar dos. Ahora Alice tiene que medir sus cíbits verde y rojo. Al hacerlo, el cíbit azul se proyectará en un estado superposición o, lo que es lo mismo, un estado definido en una base distinta de arriba/abajo. Cada base ocurre de manera puramente aleatoria, con probabilidades del 25 %. El siguiente dilema será conocer la base y, para ello, usaremos los resultados obtenidos por Alice sobre los cíbits verde y rojo. Alice abrirá sus cíbits físicos y enviará esta información a Bob mediante un canal clásico (de viva voz, por ejemplo). Si el resultado es 00, Bob no hará nada (esto se ejemplifica aplicando la puerta identidad,  $I$ ). Si el resultado es 10, Bob aplicará la puerta espejo  $Z$ . Si el resultado es 01, Bob aplicará la puerta espejo  $X$ . Finalmente, si recibe un 11, Bob aplicará la puerta  $Y$ . En cualquier caso, el resultado final es que el cíbit de Bob se encontrará en el estado  $P = \sin(\theta/2)|0\rangle + \cos(\theta/2)|1\rangle$  y el cíbit de Alice habrá resultado alterado.

Según se considere conveniente, profundizaremos más o menos en los pasos intermedios, pero siempre resaltando las oportunidades de aprendizaje de este algoritmo. Primero,

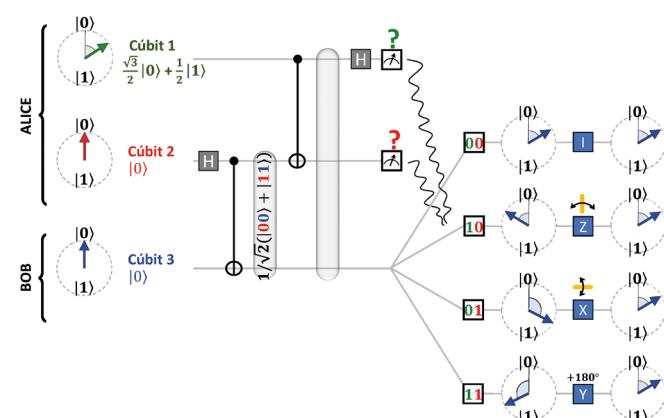


Fig. 6. Programa de teleportación del estado del cíbit verde al azul. El cíbit rojo es auxiliar. El usuario puede definir el estado del cíbit verde a su gusto. Despues continuará pulsando los botones correspondientes a las puertas Hadamard y CNOT. Finalmente abrirá sendos cíbits verde y rojo. En función del resultado, elegirá aplicar las puertas I, Z, X o Y.

el teorema de no clonación [5]: este concepto queda claro al demostrar que el estado  $P$  es teleportado y no clonado. De hecho, después de aplicar el algoritmo, el cúbbit verde de Alice habrá cambiado. Esto es relevante a la hora de diseñar algoritmos cuánticos, sobre todo algoritmos de corrección de errores basados en redundancia. Segundo, podremos hablar de los cúbbits auxiliares: aunque la intuición nos puede llevar a creer que bastan dos cúbbits para teleportar información, este algoritmo nos demuestra que, inevitablemente, necesitamos entrelazar tres. El concepto de los cúbbits auxiliares también es recurrente en computación cuántica ya que permiten realizar medidas de manera indirecta, sin destruir el estado del cúbbit principal. Tercero, hablaremos del uso de los canales clásicos de comunicación: Esto deja patente el hecho de que la información no puede viajar más deprisa que la luz en el vacío, evitando problemas con la teoría de la relatividad especial. Cuarto, podemos resaltar que la transmisión segura no está garantizada por este protocolo, ya que no permite detectar si el estado de uno de nuestros cúbbits ha sido medido en algún momento. Para evitar esto, hay que combinar medidas en distintas bases como en distribución de clave cuántica [6]. Finalmente, y más importante, habremos demostrado a nuestra audiencia que la teleportación es imposible con un circuito clásico de comunicación y que lo que se teletransporta es el estado cuántico, y no el cúbbit.

## Conclusiones

Hemos fabricado un demostrador para actividades de divulgación que nos permite acercar la mecánica cuántica a la sociedad. Adaptando la explicación a la audiencia podremos introducir principios básicos como la superposición o el entrelazamiento y profundizar en sus implicaciones, usando, por ejemplo, las desigualdades de Bell. También, la audiencia podrá ejecutar una secuencia de teleportación cuántica, un esquema de mayor complejidad pero que genera gran interés entre la población. En el futuro, el *software* puede ampliarse para implementar códigos sencillos de corrección de errores, una versión sencilla del algoritmo de Shor para factorizar en números primos o incluso admitir una programación libre “a la Qiskit”.

*Nota final:* Todos los experimentos mencionados pueden explicarse sin recurrir al plano complejo. No obstante, podemos sustituir la circunferencia en el plano real por la esfera completa de Bloch. En este caso, la descripción completa del cúbbit requiere de un ángulo adicional  $\varphi$ , de manera que  $P = \cos(\theta/2) |0\rangle + e^{i\varphi} \sin(\theta/2) |1\rangle$ . En este caso, la puerta Hadamard corresponde a una rotación de  $\theta = 90^\circ$ , seguida de una rotación  $\varphi = 180^\circ$ . Finalmente, las rotaciones y reflexiones definidas por las puertas X, Y, Z corresponden a rotaciones de  $180^\circ$  en torno a los ejes  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ , respectivamente.

## Detalles técnicos

En su versión actual, el demostrador incluye cinco cúbbits fabricados en impresión 3D en diferentes colores (figura 7). Estos cúbbits funcionan con baterías recargables a través de una conexión USB-C y están conectados mediante Bluetooth al ordenador. Cada cúbbit tiene un interruptor, un dispositivo LED de encendido/apagado, y otro diodo LED que se enciende solo si dos o más cúbbits están entrelazados. Finalmente, un detector óptico avisa si la esfera se abre para activar la proyección de las flechas durante la medida. Los cúbbits se almacenan en un maletín para su transporte. Para el *software*, se han utilizado dos lenguajes de programación: LabView permite la comunicación con los cúbbits físicos y la parte visual del programa, con flechas que permiten inicializar el estado del cúbbit y botones para aplicar puertas lógicas. Python se usa para las operaciones y cálculos sobre los estados de los cúbbits y para generar las imágenes de la esfera de Bloch.

cenan en un maletín para su transporte. Para el *software*, se han utilizado dos lenguajes de programación: LabView permite la comunicación con los cúbbits físicos y la parte visual del programa, con flechas que permiten inicializar el estado del cúbbit y botones para aplicar puertas lógicas. Python se usa para las operaciones y cálculos sobre los estados de los cúbbits y para generar las imágenes de la esfera de Bloch.

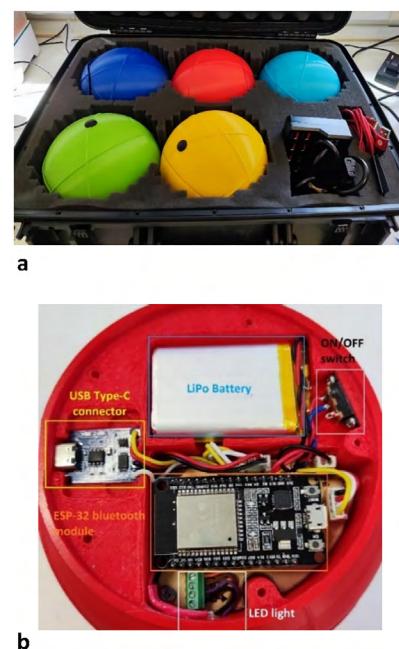


Fig. 7. Imágenes de los cúbbits: (a) maletín con cinco cúbbits y cargadores, y (b) componentes electrónicos del cúbbit.

## Agradecimientos

Agradecemos al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de Zaragoza, y a la Unidad Técnica en Ingeniería de Microdispositivos (UTIM) del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA-CSIC), en especial a Pedro Téllez y Carlos Cosculluela por su dedicación y aportaciones en la fabricación del demostrador. Damos las gracias a David Zueco por sus comentarios. Este demostrador ha sido financiado gracias a la Unión Europea (FET-OPEN 862893 FATMOLS) y el Consejo Europeo de Investigación (ERC) bajo el programa Horizon 2020 (948986 QFaST).

## Referencias

- [1] D. DEUTSCH, Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer, *Proceedings of the Royal Society of London A. Mathematical and Physical Sciences* **400**, 97 (1985).
- [2] C. H. BENNET, G. BRASSARD, C. CRÉPEAU, R. JOZSA, A. PERES y W. K. WOOTTERS, Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels, *Physical Review Letters* **70**, 1895 (1993).
- [3] M. A. NIELSEN e I. L. CHUANG, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000).
- [4] J. S. BELL, On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox, *Physics* **1**, 195 (1964).
- [5] W. WOOTTERS y W. ZUREK, A Single Quantum Cannot be Cloned, *Nature* **299**, 802 (1982).
- [6] C.H. Bennett y G. Brassard, Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing, *Theoretical Computer Science* **560**, 1 (2014).

## COMENTARIO INVITADO

# Premio Nobel de Física 2024

Descubrimientos e inventos fundamentales que impulsan el aprendizaje automático con redes neuronales artificiales

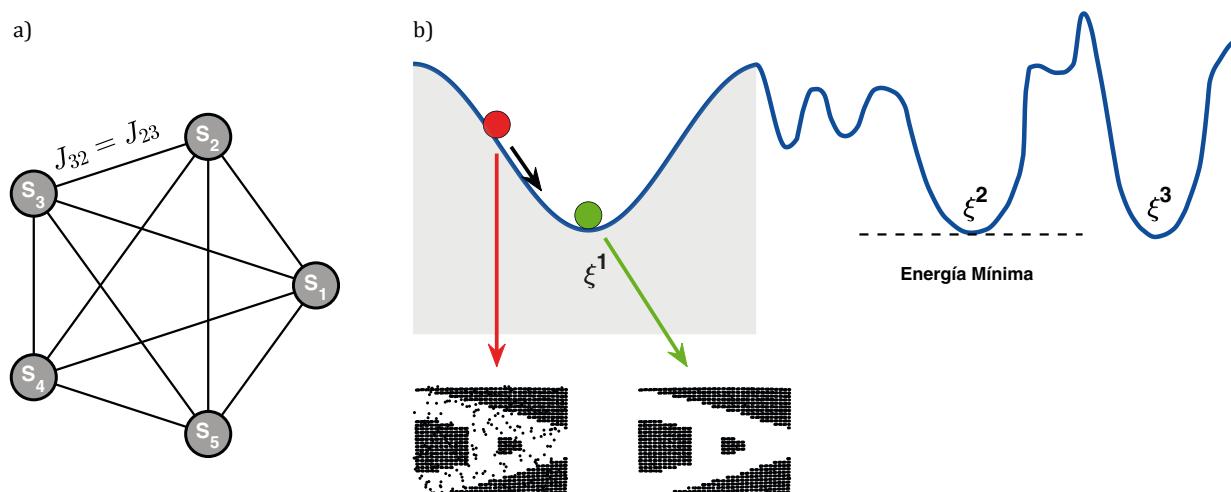
Néstor Parga



El Premio Nobel de Física del año 2024 marca un hito fundamental en la historia de la ciencia, ya que, por primera vez, se otorgó a avances en redes neuronales, disciplina que impulsa el aprendizaje automático y la inteligencia artificial en la actualidad. Este reconocimiento pone de manifiesto el profundo impacto de este campo, destacando su papel esencial en la transformación tanto de los marcos teóricos como de las aplicaciones prácticas en la ciencia contemporánea.

### Reconocimiento a las redes neuronales

John J. Hopfield y Geoffrey Hinton recibieron el premio Nobel de Física por sus contribuciones al desarrollo de las redes neuronales artificiales. El modelo de memoria asociativa propuesto por Hopfield [1] reveló que el almacenamiento y la recuperación de información en redes neuronales pueden surgir como propiedades emergentes de su dinámica. El modelo se inspiró en conceptos de sistemas magnéticos, estableciendo una analogía entre el aprendizaje en redes neuronales y la dinámica colectiva de espines interactuantes.



**Fig. 1.** (a) Red de Hopfield.  $s_i$  indica el estado de la neurona  $i$ -ésima a un tiempo fijo de la dinámica de la red.  $J_{ij}$  es el acoplamiento simétrico entre las unidades  $i$  y  $j$ , que se construye en términos de las  $P$  memorias almacenadas en la red. (b) Memoria asociativa en una red de Hopfield. En la parte superior, el paisaje de energía, donde se almacenan tres patrones, por ejemplo, representaciones de la letra A y otras dos letras, utilizando círculos y espacios en blanco. En la parte inferior: a la derecha, la representación del patrón A; a la izquierda, una versión ruidosa del mismo con un 10 % de ruido. La red, al ser inicializada con una versión alterada del patrón, evoluciona hasta recuperar completamente el patrón memorizado A, corrigiendo así los errores. La red posee estados de mayor energía. La zona en gris indica la cuenca de atracción del patrón A.

## Modelo de Hopfield

El modelo de Hopfield [1] es una red neuronal recurrente que almacena  $P$  patrones de actividad  $\xi_i^\mu$ , con  $i = 1, \dots, N$  representando las  $N$  neuronas de la red, y  $\mu = 1, \dots, P$  indicando los distintos patrones. Cada componente espacial  $\xi_i^\mu$  es una variable binaria que toma los valores  $\xi_i^\mu \in \{-1, 1\}$ . El estado de actividad de la neurona  $i$  en el tiempo  $t$  se denota como  $S_i(t)$ , con  $S_i(t) \in \{-1, 1\}$ . La actualización del estado de cada neurona sigue la siguiente regla

$$S_i(t+1) = \text{sgn} \left( \sum_{j=1}^N J_{ij} S_j(t) \right),$$

donde  $J_{ij}$  son las conexiones sinápticas entre las neuronas  $i$  y  $j$ , y  $\text{sgn}(x)$  toma los valores 1 si  $x > 0$  y -1 si  $x < 0$ . Los patrones de actividad  $\xi_i^\mu$  se almacenan en la red mediante una regla hebbiana para las sinapsis (se asume  $J_{ii} = 0$  para evitar autoconexiones)

$$J_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^P \xi_i^\mu \xi_j^\mu.$$

Para demostrar que en el límite  $N \rightarrow \infty$  los patrones de actividad  $\xi_i^\mu$  son atractores de la dinámica, supongamos que el estado inicial  $S_i(0)$  está cerca de uno de los patrones,  $\xi_i^v$ . Entonces  $S_i(t+1)$  es

$$S_i(t+1) = \text{sgn} \left( \sum_{j=1}^N \sum_{\mu=1}^P \xi_i^\mu \xi_j^\mu S_j(t) \right).$$

En el tiempo,  $t$   $S_i(t) \approx \xi_i^v$ . La expresión entre los paréntesis se puede descomponer

$$\frac{\xi_i^v}{N} \sum_{j=1}^N \xi_i^v S_j(t) + \sum_{\mu \neq v} \frac{\xi_i^\mu}{N} \sum_{j=1}^N \xi_j^\mu S_j(t).$$

El primer término corresponde al patrón correcto  $\mu = v$ , mientras que el segundo representa interferencia de los otros patrones. Consideremos el límite de  $N \rightarrow \infty$ . En este límite, la interferencia de los patrones  $\mu \neq v$  tiende a cero, ya que los patrones  $\xi_i^\mu$  son independientes y no correlacionados entre sí. Por lo tanto, en el límite de  $N \rightarrow \infty$  la dinámica del modelo de Hopfield hace que el estado de la red converja al patrón  $\xi_i^v$ , lo que demuestra que los patrones almacenados son atractores de la dinámica.

La dinámica del modelo de Hopfield puede interpretarse como la evolución a temperatura cero de un sistema de física estadística. En este contexto, el sistema minimiza una función de energía (o hamiltoniano) definida como:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{ij} J_{ij} S_i S_j.$$

La actualización de cada neurona corresponde a un proceso de descenso de energía, ya que la regla de actualización  $S_i(t+1) = \text{sgn} \left( \sum_j J_{ij} S_j(t) \right)$  reduce el valor de  $E$  en cada paso de la dinámica. Los atractores corresponden a los mínimos locales de  $E$ , que son precisamente los patrones almacenados  $\xi_i^\mu$  (figura 1b).

Esta relación resalta el vínculo profundo entre la física estadística y la neurociencia computacional. Por otro lado, la máquina de Boltzmann, desarrollada por Hinton y colaboradores [2], aplica principios probabilísticos de la física estadística para habilitar el aprendizaje en redes neuronales. Este enfoque supuso un avance crucial para el aprendizaje automático, facilitando la detección de patrones en datos mediante aprendizaje no supervisado. Los trabajos de Hopfield y Hinton unieron conceptos de la mecánica estadística con la neurociencia computacional y el aprendizaje automático, proporcionando un marco teórico que influiría profundamente en estas disciplinas y en muchas otras áreas de la ciencia y de la tecnología.

## Hopfield y la memoria asociativa

En su trabajo de 1982, Hopfield propuso un modelo de red neuronal recurrente compuesto por simples neuronas binarias [1], con una dinámica gobernada por un principio de minimización de energía (figura 1a; véase el recuadro Modelo de Hopfield). Su gran contribución radicó en mostrar que estas redes podían almacenar múltiples patrones de memoria.

Bajo determinadas condiciones, los patrones almacenados actúan como atractores de la dinámica del modelo, es decir, como puntos fijos estables. El estado inicial de la red determina hacia qué atractor converge su evolución. Cada atractor posee una cuenca de atracción, definida como el conjunto de estados iniciales que conducen a dicho patrón (figura 1b). Debido a que un patrón almacenado puede ser recuperado a partir de una versión incompleta o ruidosa del mismo, se dice que la memoria es de tipo autoasociativa.

La solución de la termodinámica del modelo de Hopfield [3] permitió establecer las condiciones bajo las cuales los patrones almacenados son atractores estables de la dinámica del sistema, en función de la temperatura  $T = 1/\beta y$  del parámetro de carga  $\alpha = P/N$ , donde  $N$  es el número de neuronas y  $P$  es el número de patrones almacenados. Para valores bajos de la temperatura  $T$  y una carga  $\alpha$  pequeña, los patrones almacenados  $\{\xi_i^\mu\}$  ( $\mu = 1, \dots, P$ ) son atractores estables (véase el recuadro Modelo de Hopfield). En esta fase, la actividad de las neuronas se alinea con un patrón  $\mu$ . Su valor medio  $\langle S_i \rangle$  cumple

$$\frac{1}{N} \sum_i \langle S_i \rangle \xi_i^\mu = M, \quad \frac{1}{N} \sum_i \langle S_i \rangle \xi_i^\nu = 0 \quad (\nu \neq \mu),$$

donde  $M$  depende de  $\alpha$  y  $\beta$ . Existen dos estados de recuperación, uno con  $M > 0$  y otro con  $M < 0$ . En esta situación, la red neuronal puede recuperar de manera confiable un patrón almacenado incluso a partir de una versión parcial o ruidosa, gracias a la presencia de una cuenca de atracción suficientemente amplia alrededor de cada patrón.

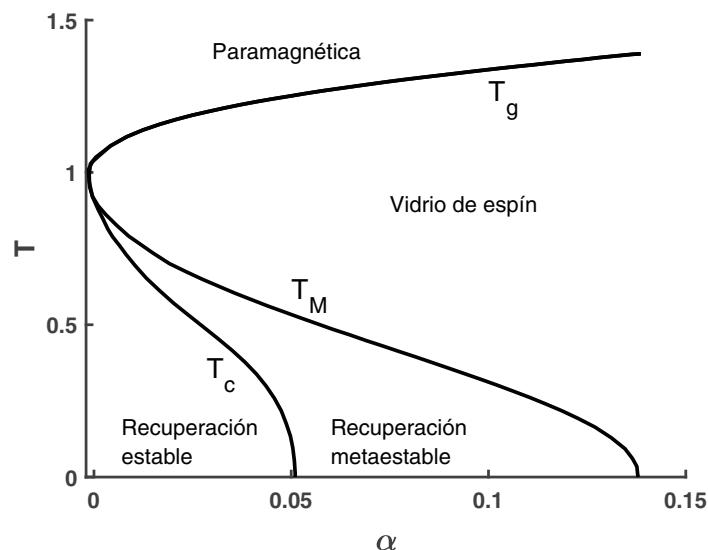
Esta fase es conocida como la fase de recuperación (figura 2).

Los estados de recuperación emergen de forma metastable por debajo de  $T_M(\alpha)$  y se convierten en mínimos globales estables por debajo de  $T_c(\alpha)$ , lo que marca una transición de primer orden. En esta región intermedia entre  $T_c(\alpha)$  y  $T_M(\alpha)$  aparecen estados que son configuraciones de la red que no corresponden exactamente a patrones almacenados, pero que tienen una energía relativamente baja y pueden atrapar transitoriamente la dinámica de la red. Estos estados están relacionados con configuraciones cercanas a los patrones almacenados, pero no son globalmente estables. A valores altos de  $\alpha$  o  $T$ , entre  $T_M(\alpha)$  y  $T_g(\alpha)$ , el sistema entra en la fase de vidrio de espín (figura 2). En esta fase, los estados de la red no están correlacionados con los patrones almacenados. Los estados de vidrio de espín son configuraciones de energía baja pero desordenadas, donde las neuronas presentan una polarización espontánea que no refleja ninguna estructura de los patrones almacenados. Este comportamiento es caracterizado por un parámetro de orden  $\alpha$ , que mide la magnitud del desorden interno en la red, y no hay alineamiento con ningún patrón [4].

$$q = \frac{1}{N} \sum_i \langle S_i \rangle^2 > 0, \quad \frac{1}{N} \sum_i \langle S_i \rangle \xi_i^\mu = 0 \quad \forall \mu.$$

Finalmente, para temperaturas altas,  $T > T_g(\alpha)$ , el sistema se encuentra en una fase paramagnética, donde las neuronas no presentan polarización espontánea, es decir,  $\langle S_i \rangle = 0$  (figura 2). El diagrama de fases refleja la naturaleza rica y compleja del modelo de Hopfield, que combina propiedades emergentes propias de sistemas físicos con capacidades computacionales relacionadas con el almacenamiento y recuperación de información [5].

Tras la aparición del artículo de Hopfield, publicado en la sección de biofísica de la revista *PNAS* [1], las reacciones se extendieron en varias áreas de la ciencia. En neurociencia, el trabajo de Hopfield surgió en un momento de cambio de paradigma. La tradicional doctrina de una neurona, que había dominado desde los estudios de Ramón y Cajal [6], se basaba en la idea de que las capacidades cognitivas del cerebro eran atribuibles a neuronas individuales. Sin embargo, una nueva perspectiva comenzaba a extenderse: la doctrina de los circuitos cerebrales, según la cual las propiedades cognitivas del cerebro no dependen de neuronas aisladas, sino de las interacciones dentro de poblaciones neuronales [7]. El modelo de Hopfield representó un avance crucial hacia esta visión, al demostrar que una red neuronal podía recuperar información almacenada en las conexiones sinápticas entre neuronas, proporcionando un modelo matemático robusto de la memoria asociativa. Por otra parte, la presencia de atractores se utilizó para proponer modelos en los que la in-



formación podría mantenerse en memoria en la forma de actividad neuronal persistente durante tiempos del orden de segundos. Aunque este no es el único mecanismo cerebral que podría dar lugar a la memoria de corto plazo, esta propuesta ha recibido una enorme atención tanto conceptual como experimentalmente [8].

En inteligencia artificial contribuyó a focalizar la atención en redes neuronales artificiales con arquitectura recurrente, en la que todas las unidades que componen la red pueden conectarse entre sí. También motivó un enfoque de la inteligencia artificial basado en la existencia de un hamiltoniano. Un pronto ejemplo de eso fue la máquina de Boltzmann, propuesta por Hinton y colaboradores [2] y, más recientemente, el modelo de memoria asociativa densa, que define redes con enorme capacidad de almacenamiento [9,10].

En el ámbito de la mecánica estadística, donde la emergencia de propiedades macroscópicas en sistemas de partículas interactuantes era un concepto bien establecido, la semejanza entre el modelo de Hopfield y sistemas magnéticos desordenados, particularmente con los vidrios de espín [4], motivó, especialmente desde mediados de la década de 1980, a numerosos físicos a investigar las propiedades de redes neuronales, lo que dio impulso a la neurociencia computacional [5,11,12]. Desde esta disciplina se propusieron soluciones para resolver algunas limitaciones del modelo original.

En el modelo de Hopfield, aprender nuevos patrones más allá de la capacidad máxima destruye la estabilidad de las memorias previamente almacenadas, impidiendo su recuperación. Para resolver este problema, Giorgio Parisi propuso limitar el rango de las sinapsis [13]; la red resultante puede operar en un régimen en el que las memorias antiguas decaen gradualmente al incorporar nuevas. Esto evita la eliminación catastrófica por interferencia, aunque la capacidad del modelo se reduce.

**Fig. 2.** Diagrama de fases de la red de Hopfield. La línea  $T_g$  marca la frontera entre la fase paramagnética y la fase de vidrio de espín. A la temperatura  $T_M$  emerge la fase de recuperación de memorias, la cual, para  $T < T_c$ , se convierte en el mínimo global del sistema.

El modelo de Hopfield emplea una regla de aprendizaje efectiva para almacenar patrones ortogonales. Sin embargo, en el mundo real, el conocimiento se organiza de manera jerárquica, en lugar de conformar conjuntos de patrones aislados e independientes. Para abordar esta limitación, Parga y Virasoro ampliaron el modelo de Hopfield, permitiéndole almacenar un árbol jerárquico completo de categorías junto con sus subcategorías y relaciones. A través de herramientas de la mecánica estadística, demostraron que la categorización surge de manera natural cuando la memoria asociativa incorpora un proceso de codificación en capas y una regla de aprendizaje adaptada a esta estructura [14].

La estrecha relación entre el modelo de Hopfield y los modelos de vidrios magnéticos es evidente en el libro *Spin Glass and Beyond*, de Giorgio Parisi y colaboradores [4], en el cual aparece reimpresso el artículo de Hopfield de 1982, así como también algunos de los artículos mencionados [3,14].

La consideración de redes recurrentes en neurociencia fue mucho más allá de proporcionar modelos de memoria asociativa. Redes con acoplamientos aleatorios condujeron a la explicación de fenómenos de la actividad cortical tales como la irregularidad de los disparos de las neuronas en los circuitos corticales [15] y su asincronidad [16]. En la última década, la posibilidad de entrenar redes neuronales en tareas cognitivas, similares a las utilizadas en laboratorios de electrofisiología, proporcionaron modelos capaces de generar hipótesis sobre cómo el cerebro resuelve esas tareas [17,18,19].

### Hopfield y la memoria asociativa densa

En el modelo de Hopfield, cuando el número de memorias almacenadas es considerablemente mayor que el número de neuronas, la red neuronal entra en una fase de vidrio de espín caracterizada por la presencia de mínimos locales que no guardan correlación con los vectores de memoria (figura 2). Esto implica una baja capacidad del modelo, que solo crece linealmente con el número de neuronas. La cuestión de cómo conseguir un número

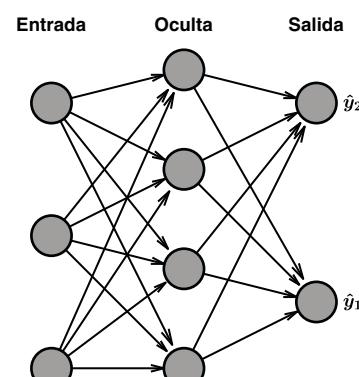
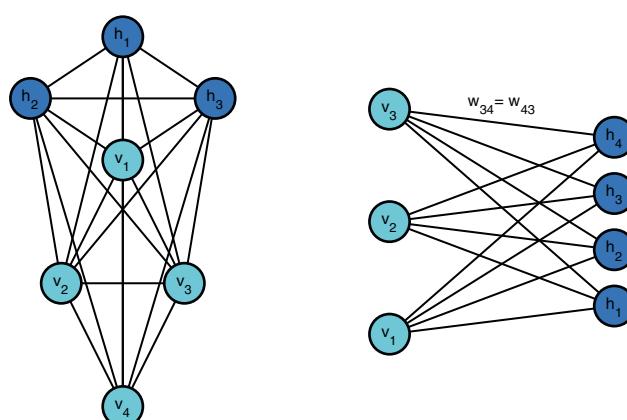
de estados estables que aumente con  $N$  de manera supralineal y que al mismo tiempo tengan cuencas de atracción grandes no se resolvió hasta muy recientemente, con el modelo moderno de Hopfield [9,10]. Como en estos nuevos modelos los patrones almacenados aparecen más densamente que en la red tradicional de Hopfield también se los denomina modelos de memoria asociativa densa (MAD). Se trata de una familia de modelos que generalizan a la red de Hopfield reemplazando la interacción cuadrática en la función energía por una interacción de mayor orden o exponencial. Más específicamente,

$$E = - \sum_{\mu=1}^P F \left( \sum_{i=1}^N \xi_i S_i \right),$$

donde  $F(x)$  es la función de interacción. Krotov y Hopfield propusieron  $F(x) = x_n$  [9], obteniendo una capacidad  $P_{\max} \sim N^{n-1}$  ( $n > 2$ ). Cabe notar que la red de Hopfield tradicional corresponde a  $n = 2$ . Se puede obtener una capacidad aun mayor con una interacción exponencial,  $F(x) = \exp(x)$  [10], en cuyo caso  $P_{\max} \sim \exp(aN)$ , con  $a < \ln 2/2$ . El resultado es sorprendente porque intuitivamente una capacidad grande se asocia con cuencas de atracción pequeñas. Sin embargo, en el caso exponencial, el radio de la esfera que contiene estados que siguiendo la dinámica del modelo convergen a la memoria correcta es similar al de la red de Hopfield [10].

De manera inesperada, el modelo moderno de Hopfield está estrechamente relacionado con un avance fundamental en inteligencia artificial. Recientemente se introdujo en el aprendizaje automático una nueva arquitectura de red neuronal que incorpora un mecanismo de atención y que ha tenido un gran impacto en el procesamiento del lenguaje: el transformador (*transformer*) [20]. Poco después de esta innovación, se propuso una variante del modelo moderno de Hopfield, que utiliza variables continuas y cuya regla de actualización corresponde al mecanismo de atención del transformador, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas arquitecturas profundas [21]. El hecho de que el MAD esté basado en un hamiltoniano es de gran relevancia, ya que introduce la

**Fig. 3. (a)** Máquina de Boltzmann con unidades visibles (azul claro) y ocultas (azul oscuro). Las líneas indican las conexiones simétricas entre las unidades. **(b)** Máquina de Boltzmann Restringida sin sesgos. Se emplean las mismas convenciones que en el panel a. **(c)** Arquitectura de red de avance directo (red *feedforward*) con una única capa de neuronas ocultas. Las dos salidas de esta red se indican con  $\hat{y}_1$  e  $\hat{y}_2$ .



posibilidad de interpretar las reglas que definen los transformadores en términos de principios físicos establecidos, como la optimización de una función de energía, lo que podría facilitar el diseño de nuevas arquitecturas más eficientes y teóricamente fundamentadas.

### Hinton y la máquina de Boltzmann

El modelo de Hopfield tiene varias limitaciones, incluyendo su carácter determinista y que una vez que ha sido preparado para almacenar un conjunto de patrones, los pesos se mantienen constantes. Estas características restringen su aplicabilidad a problemas que requieren manejar incertidumbre, aprender representaciones más complejas, o ajustarse gradualmente a nuevos datos. Para superar estas limitaciones, Hinton y Sejnowski introdujeron la máquina de Boltzmann (MB) como una extensión del modelo de Hopfield, incorporando estocasticidad y actualización gradual de pesos [2].

La MB es una red neuronal recurrente diseñada para modelar distribuciones de probabilidad. Es un modelo estocástico que consta de dos tipos de unidades: visibles y ocultas. Las unidades visibles representan las variables observables del sistema (datos), mientras que las ocultas modelan características latentes no directamente accesibles. Estas últimas permiten que la MB aprenda representaciones internas más ricas y capte dependencias complejas en los datos. Las unidades visibles se denotan como  $v_i$  y las ocultas como  $h_j$  ( $i = 1, \dots, N_v$  y  $j = 1, \dots, N_h$ , respectivamente) y el estado de la red se indica por  $(\mathbf{v}, \mathbf{h})$ . Todas las unidades tienen estados binarios  $v_i, h_j \in \{0, 1\}$ , y están conectadas mediante pesos simétricos (figura 3a). En el recuadro Máquina de Boltzmann se describe una arquitectura simplificada de MB (figura 3b). Cada unidad tiene una probabilidad de activarse determinada por una función de energía  $E(\mathbf{v}, \mathbf{h})$ , donde la estocasticidad del modelo facilita la exploración de configuraciones múltiples y capture la incertidumbre en los patrones. A diferencia del modelo de Hopfield, la MB no solo sirve para la recuperación de memoria, sino también para el aprendizaje generativo y la clasificación. En tareas generativas, la MB aprende una distribución  $P(\mathbf{v})$ , permitiendo generar ejemplos nuevos mediante muestreo. En clasificación, parte de las unidades visibles se condicionan a las etiquetas de clase, de modo que el modelo aprende la probabilidad condicional  $P(\text{clase}|\text{datos})$ . Gracias a su estructura estocástica y la inclusión de unidades ocultas, la MB ofrece mayor flexibilidad y poder expresivo, aplicándose en un rango más amplio de tareas en comparación con el modelo de Hopfield.

En una MB, los pesos  $w_{ij}$  se actualizan gradualmente siguiendo una regla de aprendizaje basada en gradientes, con el objetivo de minimizar la energía promedio del sistema y ajustar la distribución modelada  $P(\mathbf{v}, \mathbf{h})$  a los datos observados. El

### Máquina de Boltzmann

La máquina de Boltzmann restringida (MBR) es una red de dos capas en la que solo hay conexiones entre unidades visibles y ocultas (figura 3b).

Su función de energía  $E(\mathbf{v}, \mathbf{h})$  para una configuración específica  $(\mathbf{v}, \mathbf{h})$  es

$$E(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = -\sum_{ij} w_{ij} v_i h_j - \sum_i b_i v_i - \sum_j c_j h_j,$$

donde  $w_{ij}$  es el peso entre la unidad visible  $i$  y la oculta  $j$ ;  $b_i$  y  $c_j$  son sesgos asociados a esas unidades, respectivamente.

La probabilidad conjunta de  $(\mathbf{v}, \mathbf{h})$  está dada por la distribución de Boltzmann

$$P(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = \frac{e^{-E(\mathbf{v}, \mathbf{h})}}{Z}, \quad Z = \sum_{\mathbf{v}, \mathbf{h}} e^{-E(\mathbf{v}, \mathbf{h})},$$

donde  $Z$  es la *función de partición*.

La probabilidad marginal de los estados visibles, que es relevante para los datos observables (la *imagen binaria*  $\mathbf{v}$ ), es

$$P(\mathbf{v}) = \sum_{\mathbf{h}} P(\mathbf{v}, \mathbf{h}).$$

La probabilidad de que la red asigne a una imagen de entrenamiento puede aumentarse ajustando los pesos y sesgos para reducir su energía y aumentar la de otras, especialmente aquellas con energías bajas, ya que contribuyen significativamente a  $Z$ . El aprendizaje ajusta los pesos  $w_{ij}$  para maximizar la probabilidad de los datos con el método de gradiente. La derivada de  $P(\mathbf{v})$  con respecto al peso  $w_{ij}$  es

$$\frac{\partial \log P(\mathbf{v})}{\partial w_{ij}} = \langle v_i h_j \rangle_{\text{data}} - \langle v_i h_j \rangle_{\text{model}}$$

que nos da la regla de aprendizaje

$$\Delta w_{ij} = \eta (\langle v_i h_j \rangle_{\text{data}} - \langle v_i h_j \rangle_{\text{model}}),$$

siendo  $\langle \cdot \rangle_{\text{data}}$  y  $\langle \cdot \rangle_{\text{model}}$  valores medios tomados con los datos o con el modelo;  $\eta$  es la tasa de aprendizaje. Como en una MBR no existen conexiones directas ni entre las unidades ocultas ni entre las unidades visibles, es muy sencillo obtener una muestra de  $\langle v_i h_j \rangle_{\text{data}}$ .

Dada una imagen de entrenamiento seleccionada aleatoriamente,  $\mathbf{v}$ , el estado binario  $h_j$  de cada unidad oculta  $j$  se establece en 1 con probabilidad

$$P(h_j = 1 | \mathbf{v}) = \sigma \left( \sum_i w_{ij} v_i + c_j \right),$$

donde  $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$  es la función sigmoidal.

También es muy fácil obtener una muestra del estado de una unidad visible, dado un vector oculto  $\mathbf{h}$

$$P(v_i = 1 | \mathbf{h}) = \sigma \left( \sum_j w_{ij} h_j + b_i \right).$$

Obtener una muestra de  $\langle v_i h_j \rangle_{\text{model}}$  es mucho más complicado. Para lograrlo, se puede iniciar desde un estado aleatorio de las unidades visibles y ejecutar un muestreo de Gibbs alternante durante un tiempo prolongado. No obstante, Hinton introdujo un procedimiento mucho más rápido [21]. La optimización de los sesgos  $\mathbf{b}$  y  $\mathbf{c}$  es similar.

entrenamiento de la MB, tal como fue concebida inicialmente por Hinton y Sejnowski [2], enfrenta serias dificultades computacionales debido a la necesidad de realizar muestreo para implementar la regla de aprendizaje basada en gradientes. Este proceso requiere aproximar la distribución de probabilidad conjunta  $P(\mathbf{v}, \mathbf{h})$  mediante métodos como el *simulated annealing* (recocido simulado), un algoritmo estocástico que explora el espacio de configuraciones reduciendo gradualmente la temperatura del sistema. Sin embargo, este método es extremadamente lento, ya que puede requerir un gran número de iteraciones para converger a una solución cercana al equilibrio. Este coste computacional limita significativamente la escalabilidad del modelo y su aplicación práctica en problemas grandes.

Para superar estas limitaciones, se introdujo la máquina de Boltzmann restringida (MBR) [21]. La MBR simplifica la estructura de la red original eliminando las conexiones entre las unidades de un mismo tipo (figura 3b), lo que facilita su entrenamiento (véase el recuadro Máquina de Boltzmann). Esta restricción reduce drásticamente la complejidad computacional del muestreo, ya que las unidades visibles y ocultas son condicionalmente independientes entre sí dado el estado de las otras. Las MBR han demostrado ser especialmente útiles en el preentrenamiento de redes neuronales profundas [22], facilitando el aprendizaje.

Adicionalmente, Hinton introdujo la regla de aprendizaje llamada *divergencia contrastiva* [21], que proporciona una estimación más eficiente al gradiente de aprendizaje. En lugar de esperar a que el muestreo alcance el equilibrio, la divergencia contrastiva utiliza una cantidad fija y pequeña de pasos de muestreo de Gibbs para estimar la distribución posterior, reduciendo drásticamente el tiempo de entrenamiento sin sacrificar demasiado la calidad del aprendizaje. Aunque esta técnica no garantiza una estimación precisa del gradiente, en la práctica se ha mostrado efectiva para entrenar la MBR y aprender representaciones útiles.

En resumen, la MBR resuelve el problema de la ineficiencia en el muestreo al simplificar la estructura del modelo, mientras que la divergencia contrastiva acelera el aprendizaje aproximando el gradiente de manera computacionalmente eficiente. Estas innovaciones han permitido la amplia aplicación de MBR en diversos problemas de aprendizaje automático.

### Hinton y la retropropagación de errores

En la contribución inicial de Hinton y colaboradores, se estableció formalmente el marco de retropropagación (*backpropagation*) [23]. El objetivo del algoritmo es minimizar por el método de gradiente una función de coste  $C(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$ , que mide la

diferencia entre las salidas predichas  $\hat{\mathbf{y}}$  de una red neuronal en capas (figura 3c) y las verdaderas  $\mathbf{y}$ . En una red con pesos  $\mathbf{w}$  y entradas  $\mathbf{x}$ , el procedimiento consiste en: 1) una propagación hacia adelante en la que se calcula la salida de la red  $\hat{\mathbf{y}}$  y se evalúa el coste  $C(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$ ; 2) una retropropagación del error en la que se calcula el gradiente de  $C$  usando la regla de la cadena

$$\frac{\partial C}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial C}{\partial a_j} \cdot \frac{\partial a_j}{\partial w_{ij}}$$

donde  $a_j$  es la activación de la capa intermedia. Finalmente se actualizan los pesos:  $w_{ij} \leftarrow w_{ij} - \eta \frac{\partial C}{\partial w_{ij}}$ , donde  $\eta$  es la tasa de aprendizaje.

Aunque el trabajo de 1986 tuvo un impacto inicial significativo, el algoritmo de retropropagación no alcanzó su auge hasta finales de la década de 2000. Esto se debió a varios factores: 1) Limitaciones computacionales: el *hardware* disponible en los años 1980 y 1990 no permitía entrenar redes neuronales grandes en tiempos razonables. 2) falta de datos: no existían grandes conjuntos de datos etiquetados, que son esenciales para demostrar el potencial de las redes neuronales profundas [22]. 3) competencia de otros métodos: Las máquinas de soporte vectorial y otros enfoques dominaron el aprendizaje automático.

Los trabajos de Hopfield y Hinton, inspirados en la física, contribuyeron a revitalizar el aprendizaje automático y a reformular principios clave de las redes neuronales. Sus aportes introdujeron conceptos esenciales en la inteligencia artificial. El modelo de Hopfield desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de la neurociencia teórica y computacional actual, atrayendo a físicos al estudio de los sistemas neuronales. También impulsó un enfoque más centrado en las propiedades emergentes de los circuitos cerebrales, abriendo nuevas perspectivas sobre el procesamiento de la información en el cerebro. Este reconocimiento a Hopfield y Hinton pone de relieve el carácter interdisciplinario de la ciencia contemporánea, donde la convergencia entre disciplinas sigue ampliando las fronteras del conocimiento.

### Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a Luis Serrano Fernández por la realización de las figuras que ilustran este comentario.

### Referencias

- [1] J. J. HOPFIELD, Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **79**(8), 2554 (1982).
- [2] G. E. HINTON y T. J. SEJNOWSKI, Learning and relearning in Boltzmann machines, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* **1**, 282 (1986).

- [3] D. J. AMIT, H. GUTFREUND y H. SOMPOLINSKY, Storing infinite numbers of patterns in a spin-glass model of neural networks, *Physical Review Letters* **55**(14), 1530 (1985).
- [4] M. MÉZARD, G. PARISI y M. A. VIRASORO, *Spin Glass Theory and Beyond: An Introduction to the Replica Method and Its Applications* (World Scientific, 1987).
- [5] D. J. AMIT, *Modeling Brain Function: The World of Attractor Neural Networks* (Cambridge University Press, 1989).
- [6] S. RAMÓN Y CAJAL, Estructura de los centros nerviosos de las aves, *Revista Trimestral de Histología Normal y Patológica* **1**, 1 (1888).
- [7] L. DE NO, Studies on the structure of the cerebral cortex, *Journal für Psychologie und Neurologie* **45**, 381 (1933).
- [8] M. KHONA y I. R. FIETE, Attractor and integrator networks in the brain, *Nature Reviews Neuroscience* **23**(12), 744 (2022).
- [9] D. KROTOV y J. J. HOPFIELD, Dense associative memory for pattern recognition, *Advances in Neural Information Processing Systems* **29** (NeurIPS Proceedings, 2016).
- [10] M. DEMIRCIGIL, J. HEUSEL, M. LÖWE, S. UPGANG y F. VERMET, On a model of associative memory with huge storage capacity, *Journal of Statistical Physics* **168**, 288 (2017).
- [11] J. HERTZ, A. KROGH y R. G. PALMER, *Introduction to the Theory of Neural Computation* (Addison-Wesley, 1991).
- [12] E. DOMANY, J. L. VAN HEMMEN y K. SCHULTE, *Models of Neural Networks I* (Springer-Verlag, 1995).
- [13] G. PARISI, A memory which forgets, *Journal of Physics A: Mathematical and General* **19**(10), L617 (1986).
- [14] N. PARGA y M. A. VIRASORO, The ultrametric organization of memories in a neural network, *Journal de Physique* **47**(11), 1857 (1986).
- [15] C. VAN VREESWIJK y H. SOMPOLINSKY, Chaos in neuronal networks with balanced excitatory and inhibitory activity, *Science* **274**(5293), 1724 (1996).
- [16] A. RENART, J. DE LA ROCHA, P. BARTHO, L. HOLLENDER, N. PARGA, A. REYES y K. D. HARRIS, The asynchronous state in cortical circuits, *Science* **327**(5965), 587 (2010).
- [17] V. MANTE, D. SUSSILLO, K. V. SHENOY y W. T. NEWSOME, Context-dependent computation by recurrent dynamics in prefrontal cortex, *Nature* **503**(7474), 78 (2013).
- [18] F. CARNEVALE, V. DE LAFUENTE, R. ROMO, O. BARAK y N. PARGA, Dynamic control of response criterion in premotor cortex during perceptual detection under temporal uncertainty, *Neuron* **86**(4), 1067 (2015).
- [19] L. SERRANO-FERNÁNDEZ, M. BEIRÁN y N. PARGA, Emergent perceptual biases from state-space geometry in trained spiking recurrent neural networks, *Cell Reports* **43**(7), 114412 (2024).
- [20] A. VASWANI, Attention Is All You Need, *Advances in Neural Information Processing Systems* (NeurIPS 30, 2017).
- [21] H. RAMSAUER *et al.*, Hopfield Networks Is All You Need, *Proceedings of the International Conference on Learning Representations* (ICLR, 2021).
- [22] G. E. HINTON, Training products of experts by minimizing contrastive divergence, *Neural Computation* **14**(8), 1771 (2002).
- [23] Y. LECUN, Y. BENGIO y G. E. HINTON, Deep learning, *Nature* **521**(7553), 436 (2015).
- [24] D. E. RUMELHART, G. E. HINTON y R. J. WILLIAMS, Learning representations by back-propagating errors, *Nature* **323**(6088), 533 (1986).



# Hemos leído que...

Registro rápido e informal de noticias que, llegadas a nuestro consejo de redacción, hacen pensar o actuar a un/a físico/a<sup>1</sup>

Sección preparada por Verónica González Fernández

## DESCUBREN “PARAPARTÍCULAS” QUE DESAFÍAN EL MODELO ESTÁNDAR

La aparición en los años setenta del Modelo Estándar de Partículas ha proporcionado muchas alegrías a la física, postulando y demostrando después la existencia de una gran variedad de partículas. Desde que Pauli postulara que dos electrones no pueden estar en el mismo estado, se empezó a clasificar a las partículas en dos grandes categorías: fermiones y bosones. Mientras que los fermiones cumplen el criterio de exclusión de Pauli, los bosones no tienen problemas en compartir ese mismo estado.

Sin embargo, recientes descubrimientos están desafiando este sistema de clasificación. En 2020 se encontraron pruebas de la existencia de los anyones, postulados también en los años setenta, un tipo de cuasipartícula que no es ni un bosón ni un fermión, y que solo se había creado en sistemas bidimensionales.

Ahora, en una publicación en la revista *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08262-7>), investigadores de la Universidad de Houston (EE. UU.) y Garching (Alemania) han propuesto la existencia de un nuevo tipo de partícula que tampoco encajarían en la clasificación binaria habitual. A diferencia de los anyones, **estas parapartículas podrían existir en cualquier número de dimensiones, estando limitadas por su propio tipo de exclusión de Pauli.**

Aunque, como decimos, no es la primera “parapartícula” que se postula, el modelo matemático que la acompaña podría conducir a experimentos en los que dicha partícula se creara utilizando un ordenador cuántico; y debido a su exótico comportamiento, contribuiría a que estos ordenadores fueran menos propensos a errores.

<sup>1</sup> Animamos a que los lectores nos hagan llegar noticias documentadas que la redacción pueda considerar y editar para esta sección.

## COMPUTACIÓN CUÁNTICA PARA ESTUDIAR LA DINÁMICA NUCLEAR

En 2025, ya a nadie le debería pillar por sorpresa que la computación cuántica es un tema candente. Sin embargo, y para deleite de todos, esta área emergente sorprende encontrando nuevos sistemas físicos a los que extender su ámbito de aplicación. En este caso, investigadores de la Universidad de Indiana (EE. UU.) han publicado un estudio en la *Journal of the American Chemical Society* (<https://doi.org/10.1021/jacs.4c07670>) donde utilizan **una computadora cuántica de 11 qubits (Harmony, de IonQ) para investigar dinámicas cuánticas nucleares**, en concreto la evolución temporal de un paquete de ondas cuántico en un sistema con un protón compartido en un enlace de hidrógeno corto y fuerte.

La dinámica cuántica nuclear, es fundamental para comprender multitud de problemas tanto biológicos, materiales, atmosféricos, etc. Sin embargo, la computación clásica de estos sistemas es inabordable debido al aumento exponencial de grados de libertad que implica la existencia de un número creciente de partículas. Es justo aquí donde la computación cuántica ofrece una ventaja fundamental.

Mediante un enfoque basado en iones atrapados y mediante una formalización de redes tensoriales, pudieron descomponer el proceso en parcelas acotadas, permitiendo la resolución computacional.

Tras comparar los resultados con los obtenidos de la creación del paquete de ondas experimental, se pudieron determinar las energías de los modos vibracionales con presiones de una fracción de kcal/mol, superando la precisión de las simulaciones clásicas. Este resultado abre una nueva puerta al estudio de la dinámica química, además de establecer un nuevo hito en el desarrollo de la computación cuántica.



Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

## MEJORANDO LA PRECISIÓN DE LA GRAVEDAD

¿Cuánto vale la aceleración de la gravedad? Todos contestaríamos de manera inmediata  $9,81 \text{ m/s}^2$ . ¿En todos los ámbitos? ¡Claro que sí!, la gravedad es una fuerza de alcance infinito, exclamaríamos sorprendidos por la pregunta.

Sin embargo, quitarlo no resulta tan trivial cuando nos preguntamos por el mundo microscópico. Precisamente por su alcance infinito, la gravedad solo resulta relevante en sistemas macroscópicos, y por ello, desconocemos gran parte de cómo se comporta a nivel microscópico, cuando los efectos cuánticos son dominantes.

En un artículo publicado en *Science Advances* (10.1126/sciadv.adk2949), investigadores de la Universidad de Leiden (Holanda) han medido el acoplamiento gravitacional de una partícula magnética situada en una trampa superconductora y varias masas de referencia, de 1 kg cada una, situadas a medio metro de distancia. El sistema trabaja a temperaturas cercanas al cero absoluto, para reducir el ruido térmico, y aislando electromagnéticamente el conjunto.

Los resultados arrojaron una fuerza de 0.5 fN, una resolución que abre una nueva vía de interacción entre la gravedad y la mecánica cuántica; además de poder aportar nueva información acerca de cómo la gravedad interacciona con otras fuerzas fundamentales.

## 7 DE JULIO ¡SAN FERMÍN!: COMO SE COMPORTAN LAS MAREAS HUMANAS SEGÚN LA FÍSICA

Todos nos hemos visto atrapados en una muchedumbre, y después de un rato de empellones y codazos, hemos comprobado como nos habíamos desplazado de nuestra posición original. Sin embargo, al intentar salir, básicamente nos encontramos que la posición final no dista mucho de la inicial. Como no podía ser de otra manera, la física tiene la respuesta.

Un artículo publicado en *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08514-6>) por investigadores de l'Ecole Normale Superior de Lyon (Francia) analiza el movimiento de estas aglomeraciones en un contexto muy particular: el chupinazo que da comienzo a las fiestas patronales de Pamplona.

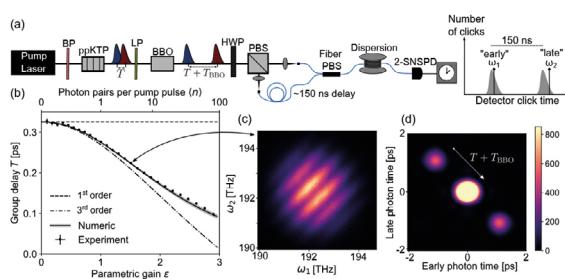
Los investigadores observaron que, al alcanzar una densidad de 6 personas por metro cuadrado, la masa se dividió en grupos de centenares de personas, que empezaron a comportarse de manera espontánea como un fluido, oscilando alrededor de una posición de equilibrio con un período de unos 18 segundos y todo ello sin ningún tipo de estímulo externo.

Para validar los resultados obtenidos, se compararon con imágenes del festival de música alemán Love Parade (celebrado en 2010, y salido con la trágica muerte de 21 personas por una avalancha humana) y encontraron las mismas oscilaciones.

Las implicaciones de este descubrimiento son obvias, puesto que conocer el movimiento inherente de una marea humana podrá ser aplicado para desarrollar estrategias de gestión y seguridad en eventos masivos.

## LOS FOTONES NO TAN ENTRELAZADOS

Cuando hablamos de fotones entrelazados, la presunción básica es que ambas partículas son idénticas e indistinguibles. Este tipo de fotones se pueden generar de manera habitual en cristales no lineales, donde un fotón se divide dando lugar a una señal y un *idler*. Estos dos fotones secundarios comparten casi todas



sus propiedades, siendo una de ellas su capacidad de ser detectados.

Sin embargo, investigadores del Consejo Nacional de Investigación de Canadá han publicado en *Physical Review Letters* (10.1103/PhysRevLett.133.203601) que han encontrado que **dependiendo de las condiciones en las que el fotón original incide en el cristal se pueden obtener desfases entre los fotones secundarios**. Basados en un primer cálculo teórico, los investigadores postularon que, si el fotón incidía con menor energía en el cristal, la conversión se produciría antes (primera mitad del cristal en promedio). Debido a las diferentes longitudes de onda y polarizaciones de los fotones entrelazados generados, sus propagaciones por el cristal restante son diferentes, por lo que se origina una diferencia considerable entre sus tiempos de detección. Por el contrario, si el fotón incidente cuenta con una gran energía, el par entrelazado se producirá cerca del extremo del cristal, por lo que las desfases en el par serán menores al tener un menor recorrido.

Para poder corroborar esta hipótesis, diseñaron un dispositivo experimental interferométrico, en el que hicieron incidir ambos fotones y comprobaron el retraso que presentaban entre ellos. El dispositivo en cuestión consistía en una fibra óptica de varios kilómetros de longitud, para poder asegurar la detección del retraso; y la identificación se realizó mediante detectores superconductores, capaces de capturar fotones individuales con alta resolución.

Este descubrimiento puede afectar al desarrollo de dispositivos tales como los sistemas en chip, aunque el retraso se puede compensar sin problemas en configuración óptica de mayor tamaño.

## LA VIDA ROBADA DE LAS CIENTÍFICAS AFGANAS

Hace ya tres años que los talibanes se hicieron con el control de Afganistán, aunque la situación informativa actual

no dé mucha cuenta de ello. Periódicamente, vuelve a ser noticia por alguna nueva ley que restringe aún más los derechos de la población, y en particular la de las mujeres y las niñas.

Además de restringir de manera casi inmediata el acceso de la población femenina a la educación a partir de los 12 años (la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas, AMIT, publica todos los lunes un mensaje en sus redes sociales recordándolo), se ha restringido también el acceso al trabajo e incluso a la atención médica.

En estas circunstancias, no es de extrañar que unos cinco millones de afganas y afganos hayan abandonado su país, incluyendo a muchos de sus científicos, que han buscado acogida en otros lugares.

Sin embargo, el haber escapado de la crisis humanitaria no soluciona los problemas de estos científicos exiliados. En muchos casos, además de la incertidumbre por sus allegados que se quedaron atrás, su situación administrativa es muy precaria, puesto que en muchos casos sus permisos son temporales y se enfrentan a la posibilidad de pasar a ser indocumentados. Aun con los papeles en regla, en muchos casos el pasaporte afgano es prácticamente papel mojado, pues no permite a sus usuarios viajar a muchas partes del mundo, lo que disminuye aún más las posibilidades de los y las investigadoras.

Para aquellos que se quedaron en el país, la situación es también catastrófica en otros sentidos. Aunque las universidades continúan abiertas para los hombres, los talibanes han reducido drásticamente la financiación, además de no permitir ninguna investigación que pueda cuestionar o ir en contra de sus políticas, como, por ejemplo, encuestas sobre salud pública en el país. Por supuesto, cualquier otra forma de disidencia, tal como protestar por los cambios académicos, el tener diferentes prácticas religiosas, y, sobre todo, objetar el trato hacia las mujeres es duramente castigado, incluyendo penas de cárcel.

Como dice unas de las investigadoras a las que se entrevistó para la pieza original publicada en *Nature* (<https://doi.org/10.1038/d41586-024-02575-3>): **“La toma del poder por los talibanes no solo cambió mi vida, sino que me quitó la vida”**.

# Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica, así como sobre sus actores<sup>1</sup>

## AMS MIDE CON PRECISIÓN LA ANTIMATERIA EN LA RADIACIÓN CÓSMICA

**A**l espectrómetro magnético AMS es un detector de partículas diseñado para analizar con precisión las propiedades de la **materia oscura** y de la **antimateria** en la **radiación cósmica**, en una misión de larga duración que opera en la **Estación Espacial Internacional** desde 2011 (M. Aguilar, J. Berdugo *et al.*, Estudio de la radiación cósmica con el espectrómetro AMS, *Revista Española de Física* 36 (2), 21 (2022)).

Los grupos del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) y del IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) han tenido una contribución muy significativa en el **diseño, construcción y mantenimiento del detector de radiación Cherenkov** de dicho espectrómetro y participan de manera activa en el **mantenimiento, funcionamiento y análisis de los datos obtenidos**.

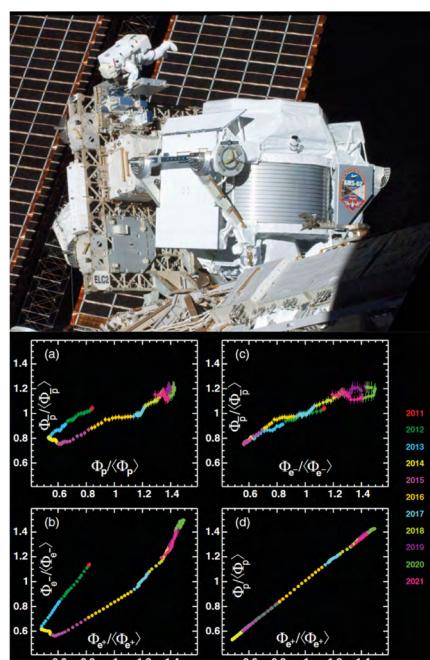
En dos artículos aparecidos recientemente en *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.051001>, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.051002>), la colaboración AMS ha completado la **descripción precisa de la evolución temporal** de las componentes más abundantes de materia y antimateria en la radiación cósmica de origen galáctico con los datos recogidos a lo largo de más de un ciclo solar de 11 años.

Las correlaciones entre las variaciones relativas de los flujos de **antiprotones, protones, positrones y electrones** que se muestran en la figura reproducida de la publicación en *Physical Review Letters* demuestran que las partículas con signo opuesto de carga y misma masa, (a) y (b), exhiben un **claro fenómeno de histéresis**. Sin embargo, las

correlaciones entre partículas con el mismo signo de carga y distinta masa, (c) y (d), muestran un **comportamiento lineal**.

“Este conjunto de medidas permite **validar los modelos de transporte de los rayos cósmicos en la heliosfera** con la precisión necesaria para detectar señales de nueva física”, comenta Jorge Casaus, responsable del proyecto en el CIEMAT y coordinador de la participación española en AMS.

“La precisión de AMS en la medida de las distintas especies de partículas de materia y de antimateria es esencial para la comprensión completa de los



**fenómenos de difusión y deriva en el campo magnético heliosférico**”, dice Carlos Mañá, investigador senior del CIEMAT.

“Este es el **fruto de más de 25 años de trabajo** de nuestro equipo en este proyecto internacional liderado por el premio Nobel S. C. C. Ting”, apunta Manuel Aguilar, de la Real Academia de Ciencias e investigador emérito en el CIEMAT.

“Las precisiones del 1% alcanzadas en estas medidas con un instrumento con



Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

300 000 canales de lectura operado en el espacio se han conseguido gracias a la **monitorización y optimización permanente**”, dice Francesca Giovacchini, investigadora del CIEMAT destacada en el centro de control de la misión en el CERN (Ginebra, Suiza).

“La capacidad de separar entre materia y antimateria en un amplio rango energético y la medida de su carga eléctrica y su masa hacen que este sea el **único instrumento que ha podido completar este programa experimental**”, puntualiza Carlos Delgado, investigador del equipo del CIEMAT y responsable de las medidas de isótopos ligeros.

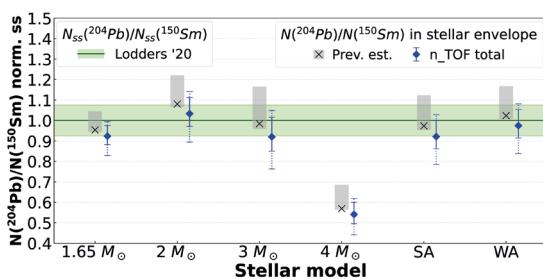
“Estas medidas, junto con las anteriormente publicadas por AMS para electrones y sus antipartículas, los positrones, **constituyen el legado completo de esta misión** para la comprensión de la física de los rayos cósmicos en la heliosfera”, aclara Miguel Ángel Velasco, responsable del análisis de electrones y positrones en el CIEMAT.

Desde su instalación en la Estación Espacial Internacional en 2011, AMS ha colecionado datos de más de 250 mil millones de rayos cósmicos y **continuará tomando datos hasta el final de la operación de la ISS**, previsiblemente en 2030. La **actualización del instrumento que se llevará a cabo en 2026** permitirá aumentar significativamente su sensibilidad en la búsqueda de nueva física mediante el estudio detallado de la materia y antimateria en los rayos cósmicos.

<sup>1</sup> Animamos a que los lectores nos hagan llegar noticias documentadas que la redacción pueda considerar y editar para esta sección.

## UNA NUEVA CONFIRMACIÓN SOBRE EL ORIGEN DEL PLOMO EN LAS ESTRELLAS

**U**n de los temas más fascinantes en el campo de la astrofísica es el origen de los elementos pesados en el universo. Aparte de los elementos más ligeros, como el hidrógeno o el helio, creados en los instantes posteriores al Big Bang, el resto de especies de la tabla periódica se han creado en el interior de las estrellas, a través de reacciones nucleares. En concreto, actualmente se sabe con certeza que



aproximadamente la mitad de las abundancias de elementos más pesados que el hierro en el sistema solar se han creado por reacciones de captura de neutrones en el llamado proceso lento o *s* (del inglés *slow*) de nucleosíntesis estelar.

Una investigación liderada por un equipo científico de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y el Instituto de Física Corpuscular (CSIC-Universitat de València), y publicada en la revista *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.052702>), ha conseguido avanzar en el origen del isótopo de plomo  $^{204}\text{Pb}$ . Este forma parte de un selecto grupo de isótopos producidos casi exclusivamente por el proceso *s*, y, por lo tanto, la abundancia solar que observamos de ellos hoy en día es un rastro directo de este mecanismo de nucleosíntesis. “Estos isótopos son de especial interés porque, mediante la comparación directa con las abundancias solares, sirven para validar los modelos teóricos más avanzados tanto de nucleosíntesis como de la evolución estelar de estrellas gigantes rojas”, explica Adrià Casanovas-Hoste, investigador en UPC y uno de los autores del trabajo.

Sin embargo, la cantidad de  $^{204}\text{Pb}$  que se produce en las estrellas gigantes rojas no se había podido cuantificar de mane-

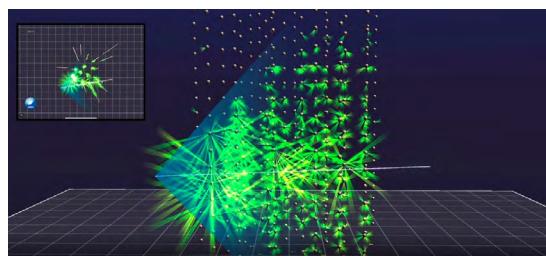
ra precisa hasta la actualidad, principalmente porque no se había conseguido medir cómo reaccionan los neutrones con un isótopo radiactivo del elemento precedente: el  $^{204}\text{Tl}$  (talio-204). Debido a su corta vida media de 3.78 años, la producción de muestras para experimentos es extremadamente compleja.

Para este trabajo, y gracias a una colaboración entre el IFIC, la UPC y la Universidad de Sevilla con el Paul-Scherrer Institute (PSI) en Suiza, y con el reactor nuclear del Institut Laue-Langevin (ILL), en Francia, se consiguió producir una muestra de  $^{204}\text{Tl}$  adecuada y con la suficiente masa para medir, por primera vez, la tasa de de captura neutrónica del  $^{204}\text{Tl}$  en la instalación de haces de neutrones de alta resolución  $n_{\text{TOF}}$  del CERN. Con los resultados experimentales de  $n_{\text{TOF}}$  se realizaron cálculos de nucleosíntesis estelar del  $^{204}\text{Pb}$ , en el marco de la colaboración internacional NuGrid. **Los resultados obtenidos muestran un excelente acuerdo con las abundancias de  $^{204}\text{Pb}$  medidas en meteoritos primitivos del sistema solar.** “Este resultado apunta, por tanto, a que no sería necesario recurrir a hipótesis alternativas de nucleosíntesis de  $^{204}\text{Pb}$ , como explosiones de supernova o posibles mecanismos de fraccionamiento operando en el sistema solar temprano, como se ha apuntado en el pasado”, concluye César Domingo-Pardo, investigador científico de CSIC en IFIC y coautor del estudio.

## KM3NET OBSERVA DESDE EL FONDO DEL MEDITERRÁNEO EL NEUTRINO MÁS ENERGÉTICO JAMÁS DETECTADO

**L**os sucesos lo dirán, Sancho; “que el tiempo, descubridor de todas las cosas, no se deja ninguna que no las saque a la luz del sol, aunque esté escondida en los senos de la tierra”. Así respondía Don Quijote a las preguntas de Sancho sobre lo que había pasado en la cueva de Montesinos (cap. XXV, segunda parte). Algo parecido pondría haber respondido también a lo

que los físicos llevan tiempo preguntándose: **¿qué ocurre en los fenómenos más energéticos del universo?** Para responder a ello contamos con unos aliados muy especiales: los neutrinos. Son partículas fundamentales (las segundas más abundantes en el universo), pero que casi no interactúan. Esto último las hace muy difíciles de detectar, pero también capaces de llegar desde grandes distancias y desde zonas muy densas, lo cual es particularmente interesante para estudiar el universo más cataclísmico, donde se producen partículas de energías extraordinarias. Otros mensajeros más “normales”, como los fotones o los rayos cósmicos, son absorbidos o desviados por campos magnéticos en su camino hacia la Tierra. Para poder observar estos neutrinos de alta energía, la colaboración KM3NeT está construyendo dos detectores en el fondo del mar Mediterráneo llamados ARCA (cerca de Sicilia) y ORCA (cerca de Marsella). Consisten en una serie de detectores de luz instalados en decenas de líneas de cientos de metros de longitud en el fondo del mar que pueden



detectar la luz Cherenkov inducida por los muones producidos por neutrinos que cruzan la Tierra. Recientemente la colaboración anunció la **detección con KM3NeT-ARCA del neutrino de mayor energía nunca observado** (unos 220 PeV, una energía 30 veces mayor del anterior récord, detectado por Ice-Cube, en el Polo Sur). Dicho suceso es realmente extraordinario y mereció la **portada en la revista Nature** (<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08543-1>). **¿Cuál es el origen de tan espectacular suceso? Aún no lo sabemos.** Puede que sea el primer neutrino “cosmogénico” observado, es decir, producido tras la interacción de rayos cósmicos de muy alta energía con el fondo de radiación de microondas que permea todo el universo. Puede que venga de una galaxia de núcleo activo (AGN, por sus siglas en inglés). No se ha identificado una

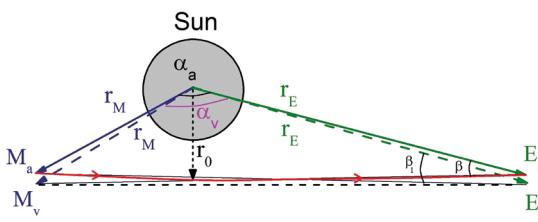
correlación con ninguna fuente astrofísica, pero quizás es porque su fuente es demasiado lejana para poder verla. O puede ser algo aún más exótico. Como dice el profesor de la Universidad de Valencia Juan de Dios Zornoza, coordinador de los grupos españoles en KM3NeT (IFIC, UGR, UPV, IEO, LAB), “cuando se detectó este ‘sucésón’ solo estaba instalado un 15 % de ARCA; estamos impacientes por saber qué más nos queda por ver conforme sigamos construyendo KM3NeT y tomando más datos”.

## UN CÁLCULO MÁS PRECISO DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN GRAVITACIONAL DE LA LUZ

**L**a desviación gravitacional de la luz es un fenómeno bien conocido desde el desarrollo de la mecánica newtoniana. Inicialmente calculado por **Johan Georg von Soldner** a principios del siglo XIX, no fue hasta el desarrollo de la teoría general de la relatividad de Einstein cuando se obtuvieron los famosos 1,75 segundos de arco para luz estelar que “rozaba” la superficie del Sol. Este resultado fue confirmado experimentalmente por Eddington durante sus célebres expediciones del eclipse solar del 29 de mayo de 1919.

Existe otro método para el estudio del efecto de la gravedad sobre la luz, al menos, en las situaciones astrofísicas menos complejas. Se trata de la aproximación del medio material (“Material Medium Approach” o método MMA, por sus siglas en inglés) y está basado en la idea de representar el campo gravitatorio como un “medio óptico” con un índice de refracción efectivo. De hecho, el propio Eddington afirmó que el efecto de la gravedad solar sobre la luz estelar podría ser reproducido considerando la propagación de la luz en un medio óptico con estratificación esférica.

Basándose en esta aproximación MMA, el profesor Óscar del Barco Novillo, de la Universidad de Murcia, ha desarrollado una expresión analítica exacta para el cálculo del ángulo de desviación gravitacional de la luz debido a un objeto masivo estático,



considerando las distancias reales entre la fuente y el observador a la masa gravitacional.

En este trabajo, publicado recientemente en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (<https://doi.org/10.1093/mnras/stae2277>), se estudia la propagación de la luz desde el planeta Mercurio hasta la Tierra, suponiendo una variación continua en el índice de refracción de la luz.

En este contexto, el ángulo de desviación gravitacional  $\alpha$  se calcularía mediante la diferencia entre el ángulo “real”  $\alpha_a$  (obtenido a partir de la ecuación exacta MMA) y el ángulo “virtual”  $\alpha_v$  (mediante cálculos trigonométricos que involucran distancias conocidas).

Estos nuevos resultados han sido comparados con el formalismo post-newtoniano parametrizado (PPN) hasta primer orden, que es el método estándar para el estudio de la desviación gravitacional de la luz en el sistema solar (donde se tienen en cuenta masas gravitatorias como el Sol, planetas e incluso asteroides de mayor tamaño). Como consecuencia, la discrepancia entre el resultado MMA y el formalismo PPN resulta ser del orden de milisegundos (mas), tanto para fuentes emisoras en nuestro sistema solar como para estrellas distantes. Sirva como ejemplo el tamaño angular de la estrella Proxima Centauri, del orden de 1 mas.

En esencia, esta nueva expresión analítica podría ser una herramienta útil en la investigación actual y futura sobre astrometría de alta precisión.

## ALTA VARIABILIDAD INTERANUAL DE LAS PRECIPITACIONES EN EL MEDITERRÁNEO

**U**n grupo interdisciplinario internacional liderado por Sergio M. Vicente-Serrano (Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC), y en el que

participan varios miembros de la RSEF, ha publicado en *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08576-6>) un estudio sobre la precipitación en el Mediterráneo, examinando las variaciones en las precipitaciones en la región mediterránea y sus cambios a largo plazo.

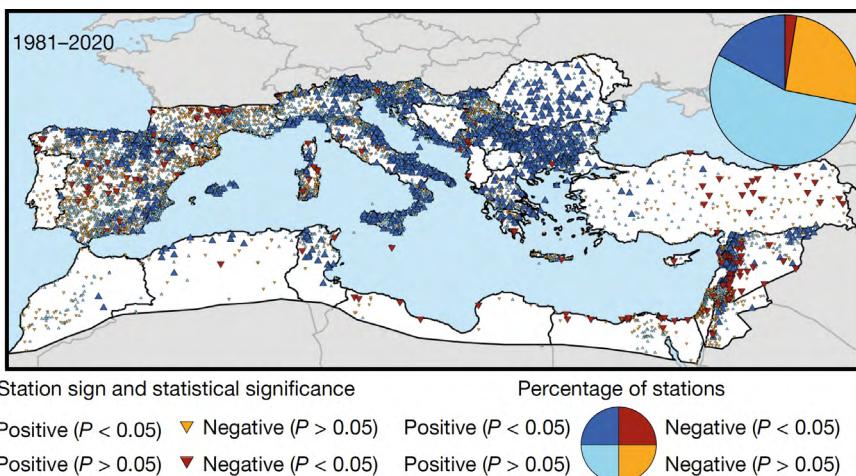
Los modelos climáticos actuales proyectan una reducción significativa de las precipitaciones en el Mediterráneo en el futuro. Sin embargo, estudios basados en datos observados en décadas recientes han reportado tendencias contradictorias, con algunas áreas que muestran disminuciones y otras sin cambios claros. Esta disparidad ha generado incertidumbre sobre la dirección y magnitud de los cambios en las precipitaciones en la región.

Para abordar esta incertidumbre, los autores analizaron una extensa base de datos de precipitaciones diarias, utilizando más de 23 000 estaciones en 27 países mediterráneos, con un total de más de 10 000 000 de datos de precipitación mensual. Este análisis detallado permitió evaluar las tendencias a largo plazo y la variabilidad interanual y decadatal de las precipitaciones en la región.

Los resultados indican que, las tendencias resultan escasas y no estadísticamente significativas en la mayoría de las estaciones analizadas. Más notable es la alta variabilidad interanual de las precipitaciones, que supera cualquier tendencia a largo plazo. Esta variabilidad está fundamentalmente determinada por factores atmosféricos de gran escala, como la Oscilación del Atlántico Norte y otros patrones climáticos que afectan la circulación atmosférica en el Mediterráneo. Estos factores causan la variabilidad temporal y explican las tendencias, tanto positivas como negativas observadas en períodos de tiempo cortos.

Los autores concluyen que, aunque el cambio climático puede influir en las precipitaciones mediterráneas, la alta variabilidad natural complica la identificación de tendencias significativas. Por lo tanto, enfatizan la necesidad de considerar esta variabilidad al desarrollar estrategias de gestión de recursos hídricos y adaptación al cambio climático en la región.

Este estudio subraya la complejidad de los patrones de precipitación en el



**Mediterráneo y la importancia de utilizar datos observacionales detallados para comprender mejor las dinámicas climáticas regionales.** También resalta el importante grado de ajuste entre la evolución de las precipitaciones observada y estimada mediante modelizaciones climáticas y enfatiza la importancia de desarrollar políticas flexibles que puedan adaptarse a la incertidumbre inherente en la dinámica de la precipitación.

**La ausencia de cambios claros en la precipitación no quiere decir que el cambio climático no esté afectando a la región.** Además de los aspectos dinámicos, la precipitación y sus extremos se ven afectados por el incuestionable aumento de la temperatura —que en el Mediterráneo supera la media global— lo que agrava la severidad de las sequías agrícolas e hidrológicas, haciendo a la región especialmente vulnerable al cambio climático.

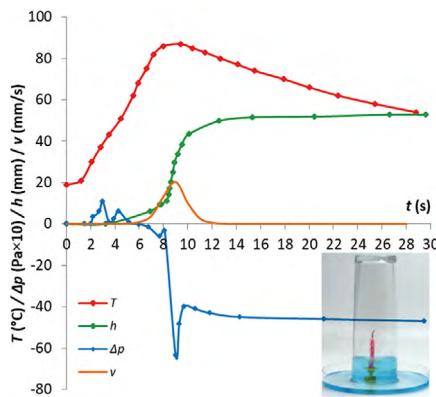
## MEDIDAS DETALLADAS PARA ERRADICAR ERRORES EN LA EXPLICACIÓN DE UN EXPERIMENTO POPULAR

**E**l experimento en el que asciende el agua por el interior de un vaso, cuando se cubre con él una vela encendida, cuya base está rodeada de agua, es una **experiencia clásica para poner de manifiesto la acción de la presión atmosférica**. A pesar de su aparente sencillez, el **experimento suele ser mal interpretado por los estudiantes e, incluso, por parte del profesorado**. Una proporción notable de observadores afirma (acertadamen-

te) que ocurre una disminución de la presión en el interior del vaso, pero **justifica (incorrectamente) la caída de presión por el consumo del oxígeno contenido en el aire atrapado por el vaso**, sin reparar que en la combustión de los componentes de la vela (principalmente, parafina  $C_{25}H_{52}$ ) se forma dióxido de carbono y vapor de agua ( $C_{25}H_{52}(g) + 38 O_2(g) \rightarrow 25 CO_2(g) + 26 H_2O(g)$ ).

Como se señala en las conclusiones de un artículo publicado recientemente por R. García-Molina y A. Tomás-Serrano en *Physics Education* (10.1088/1361-6552/adaf6b), la combustión desempeña un papel fundamental en el experimento, pero no por el consumo de oxígeno, sino por el aumento, y posterior disminución, de la temperatura dentro del vaso, lo que provoca notables cambios en la presión dentro del vaso. Para apoyar estas ideas, **los autores utilizan un sencillo dispositivo experimental (termómetro digital, manómetro diferencial y cámara de video) para medir la variación de la temperatura, de la presión y de la altura del agua dentro del vaso**, durante el transcurso del experimento.

Los resultados obtenidos muestran que la variación de la presión es com-



pleja, dado que las tres variables de las que depende (número de moles de gas, temperatura y volumen) varían durante el curso del experimento. No obstante, **en la práctica totalidad de los casos, la variación de la presión se ajusta al mismo patrón**. Inicialmente, mientras se cubre la vela con el vaso, la presión dentro del vaso permanece igual a la presión atmosférica, debido a que el aumento de temperatura dentro del vaso provoca el escape de aire caliente hacia la atmósfera. En cuanto se debilita la llama, y disminuye la temperatura, la presión se reduce rápidamente y comienza a entrar el agua, hasta que al cabo de unos minutos se alcanza el equilibrio cuando la temperatura dentro del vaso se iguala a la temperatura ambiente.

La velocidad con que entra el agua en el vaso (medida mediante una grabación de video) se ajusta razonablemente bien a una curva logística, que es prácticamente nula excepto en el breve período en el que la presión experimenta su mayor caída.

Con los resultados publicados en ese artículo se espera ayudar a la comunidad educativa a acabar con la propagación de una explicación errónea de un fenómeno ampliamente usado en el ámbito docente.

## DILUCIDANDO SI HAY TENSIÓN DE HUBBLE CON SUPERNOVAS GEMELAS

**L**a constante de Hubble,  $H_0$ , mide la tasa actual de expansión del universo. Se conoce como la **tensión de Hubble** la discrepancia entre el valor de  $H_0$  que se deduce de la observación del fondo cósmico de micro-ondas, combinada con el modelo cosmológico estándar ( $\Lambda$ CDM: constante cosmológica más materia oscura fría) y el obtenido al utilizar indicadores locales de distancia como las cefeidas y las supernovas. Tal discrepancia puede llegar a ser del nivel de  $5.7\sigma$  (Riess *et al.* 2024, colaboración SH0ES).

Para medir  $H_0$  hay que determinar con precisión las distancias a galaxias lo bastante lejanas como para que su velocidad de recesión se deba casi exclusivamente a la expansión del universo: que estén en el “flujo de Hub-

ble". Un método muy común requiere tres etapas: 1) Se calibran primero indicadores como las cefeidas, en galaxias cercanas. 2) Por medio de éstos, se calibran las supernovas del Tipo Ia, a distancias intermedias, del orden de los 40 Mpc. 3) Se usa dicha calibración para medir las distancias a supernovas en el flujo de Hubble (de 65 a 200 Mpc). Todo ello se basa en observaciones fotométricas, en mediciones de curvas de luz.

En un artículo recientemente publicado en *The Astrophysical Journal* (10.3847/1538-4357/ad736d) por P. Ruiz-Lapuente, del Instituto de Física Fundamental (CSIC) y J. I. González Hernández, del Instituto de Astrofísica de Canarias, se presenta un **nuevo método para medir distancias extragalácticas**, usando no solo las curvas de luz, sino también espectros tomados a lo largo de la evolución de las supernovas, cuando estas son casi idénticas: el método de las "gemelas de por vida".

El método da una medida directa de la distancia y la hace mucho más precisa, con un error de solo el 2 %, por lo que

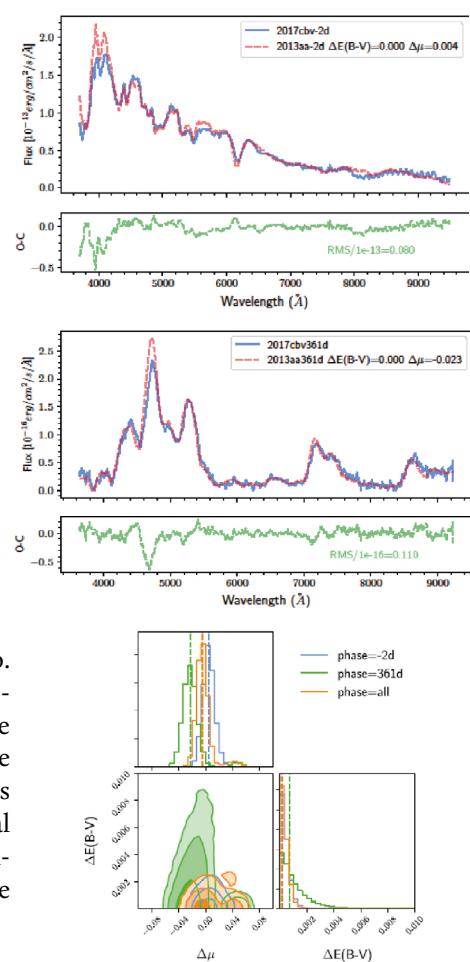
es muy útil para establecer la escala correcta.

Otro 2 % de error proviene de sumar al de las distancias relativas el error en las distancias de anclaje, al obtener las distancias absolutas.

Hay que subrayar que en este método se **comparan directamente supernovas cercanas con las del flujo de Hubble**, sin necesidad de la calibración a distancias intermedias que se precisa en el método más usado.

En la figura se muestran los ajustes de los espectros de una pareja de gemelas: SN 2013aa y SN 2017cbv, en dos fases diferentes: -2 y +361 días con respecto a sus brillos máximos, con los "corner plots" para cada fase y para el conjunto.

Se ha empezado ya a utilizar el método para algunas supernovas del flujo de Hubble. Estas y las cercanas con las que se comparan tienen las mismas curvas de luz, son del mismo subtipo espectral y gemelas perfectas. Los primeros resultados indican que la tensión de Hubble es real.



Real Sociedad  
Española de  
Física

# FÍSICA Y CIENCIA PARA TODOS

CATARATA

# Reseñas de libros de interés



## Métodos matemáticos para la física. Variable compleja, probabilidad y variables aleatorias

**Manuel Gadella y Luis Miguel Nieto**  
Ediciones Universidad de Valladolid (2023), Colección Ciencias, Manuales y Textos Universitarios, n.º 50, 651 págs.

En el *post* “There is more to mathematics than rigour and proofs” de su blog, Terence Tao, Medalla Fields en 2006, insiste en la deseable complementariedad entre rigor matemático y pensamiento intuitivo —por ejemplo, en el uso de analogías con otros campos como la física—. El rigor no debe destruir la intuición, sino separarla selectivamente, identificando la *mala* al tiempo que se clarifica la *buena*. Solo la conjunción de formalismo riguroso y buena intuición permite, en opinión de Tao, el avance. Una vez en posesión de una base rigurosa, uno debería re-aprender sus conocimientos para reforzar las buenas intuiciones, y desechar las malas. He recordado esas ideas del *post* de T. Tao al preparar esta recensión de la obra de M. Gadella y L. M. Nieto.

“Esta obra es fruto de la labor docente que sus autores han desarrollado durante varios lustros, especialmente en la Universidad de Valladolid, pero también en varias universidades europeas y americanas”. Abren así los autores el prólogo, en el que exponen dos directrices básicas de la obra: la presentación debe conjugar cierto nivel de rigor con atención a aplicaciones en otros ámbitos, especialmente en física.

Hay en esa declaración de intenciones cierta concordancia implícita con Tao: una exposición sólida y cuidada —sus autores son destacados especia-

listas en física matemática con un bien ganado prestigio— complementada con ejercicios, ejemplos, comentarios y aplicaciones en física y que tienen un papel destacado en la formación de esas buenas intuiciones, sin las cuales probablemente no se puede hablar de comprensión real de ninguna disciplina.

Se trata de una obra extensa, que en nueve capítulos cubre la teoría de funciones de una variable compleja, y que se complementa con dos capítulos dedicados a la teoría de probabilidad y variables aleatorias. Esta elección, con dos bloques conceptualmente diversos se atiene, ampliándolo, al programa de una de las asignaturas de Métodos Matemáticos de la Física en el actual plan docente del Grado en Física de la Universidad de Valladolid, pero separada o conjuntamente, uno y otro bloque aparecen en las asignaturas de “métodos” en grados de física de otras universidades en España y en Iberoamérica. Conviene aquí recordar que los mismos autores publicaron en 2000 otro texto, *Métodos matemáticos avanzados para ciencias e ingeniería*, centrado en la teoría de ecuaciones diferenciales ordinarias y funciones especiales.

La entidad de la obra, largamente gestada, va bastante más allá de la de unas buenas notas de clase. Partiendo de un nivel cero en los bloques de variable compleja y de probabilidad, el conjunto de los temas expuestos sobrepasa lo que es posible incluir en un programa realista con la duración que permiten los actuales grados. Existen buenos libros (no elementales) que presentan la prolongación analítica, la transformación conforme o las funciones elípticas, pero no hay tantos textos que cubran ese material de manera completa y clara en una organización coherente desde el nivel elemental hasta el más avanzado.

En mi opinión, un acierto importante de la obra es poder servir indistintamente a) como excelente texto de apoyo para estudiantes en asignaturas con un programa básico de variable compleja y de probabilidad, b) como texto fiable de referencia para estudiantes avanzados o investigadores cuyo campo de trabajo requiera técnicas de variable compleja (teoría cuántica de campos, óptica cuántica, teoría de campos conforme, etc.) y c) finalmente, como útil

herramienta en el proceso al que Tao se refería como reaprender, tanto para físicos como para matemáticos.

Cada una de esas finalidades se posibilita y apoya en varios aspectos de la concepción de la obra. La estructura es la propia de un buen texto de matemáticas: enunciados precisos y demostraciones pulidas destacadas tipográficamente con un sangrado que invita a una primera lectura informativa en la que el lector se concentre en comprender los resultados, dejando las demostraciones para una segunda vuelta. Se incluyen excelentes gráficos ilustrativos elaborados con Mathematica. Y se aportan comentarios adicionales que ayudan a la correcta inteligencia de los resultados y que facilitan al lector la formación del mapa mental que es el objetivo del buen aprendizaje en cualquier disciplina.

Salpicados a lo largo de la exposición hay multitud de ejercicios que sirven como control efectivo de una buena comprensión. Aparte, una fracción de la extensión del libro la ocupan los enunciados de un gran número de problemas, agrupados al final de cada capítulo. Algunos sirven como test de las habilidades de cálculo desarrolladas, otros están resueltos con detalle y finalmente hay algunos que suplementan aspectos no discutidos en el texto principal o posibles aplicaciones en otras disciplinas.

Hay brevísimas menciones biográficas a los matemáticos y físicos que van apareciendo en el texto, lo que es muy conveniente dada la general ausencia de historia de la ciencia en los planes. Y finalmente, cada capítulo lleva una bibliografía seleccionada, con textos clásicos y otros más actuales sobre cada tema, y que permite a los estudiantes conocer fuentes fiables y acudir a ellas.

En resumen, una obra muy completa, que deja a gran altura el listón para cualquier nuevo texto sobre su temática, y que no debe faltar en cualquier biblioteca, tanto académica, de facultad o de departamento, como personal de profesores y estudiantes de física o de un doble grado que incluya física y/o matemáticas.

**Mariano Santander**  
Catedrático emérito de Física Teórica,  
Universidad de Valladolid



### Un mundo magnético. La omnipresencia de los imanes

Francesc Lloret Pastor

Editorial PUV (2024), 210 págs. (versión en castellano)

Editorial Bromera (2024), 200 págs. (versión en valenciano)

El magnetismo, ese fenómeno físico tan familiar como esencial en múltiples aspectos de la vida cotidiana, es abordado en este volumen con una claridad y profundidad inusuales en el campo de la divulgación científica. En *Un mundo magnético. La omnipresencia de los imanes*, Francesc Lloret Pastor —investigador en el ámbito del magnetismo molecular— ofrece un recorrido accesible y bien documentado por la historia, los fundamentos y las aplicaciones del magnetismo, tanto en sistemas naturales como en tecnologías modernas.

Quien haya tenido el privilegio de compartir una charla distendida con Francesc Lloret Pastor sabe que su pasión por el magnetismo es tan natural como contagiosa. Para quienes aún no han tenido esa oportunidad, el presente libro ofrece una mirada al amplio conocimiento y al estilo divulgador de su autor: cercano, riguroso y profundamente didáctico.

En poco más de 200 páginas, el autor despliega un recorrido fascinante por la historia del magnetismo, mostrando no solo su relevancia científica y tecnológica, sino también su impacto directo en el desarrollo de la vida en la Tierra y en la sociedad moderna. Lo hace combinando el rigor académico de un investigador con una narrativa fluida y accesible, que refleja tanto su vocación docente como su convicción de que la ciencia debe dialogar con la sociedad.

El libro, galardonado con el XXIX Premio Europeo de Divulgación Científica Estudi General 2023, no es solo un recorrido histórico o técnico; es también una

defensa apasionada de la ciencia como herramienta contra la ignorancia, un posicionamiento claro frente al auge de las pseudociencias que, amparadas en esa aparente "magia" de los imanes, promueven productos y terapias magnéticas sin base científica alguna.

El libro está estructurado en cinco capítulos, cada uno de los cuales muestra un aspecto clave de esa "omnipresencia" magnética en nuestras vidas. El primer capítulo recorre, de forma amena e interesante, la evolución histórica del magnetismo desde la Antigüedad, pasando por el descubrimiento de la brújula y la evolución de las teorías científicas, hasta llegar a las investigaciones de mediados del siglo xx.

Los capítulos siguientes amplían la mirada. Dado que la vida en la Tierra es posible gracias a la existencia de una magnetosfera que nos protege de las altas radiaciones cósmicas, el segundo capítulo discute y analiza el origen y evolución del campo magnético terrestre (el geomagnetismo), así como su influencia en el desarrollo de la vida del planeta. Las temibles inversiones de los polos magnéticos, que han marcado la historia geológica del planeta y la desaparición de muchas especies, se revisan a la luz de los últimos cambios y anomalías del campo magnético terrestre (el paleomagnetismo). Cuestiones como para cuándo la próxima inversión o qué ocurrirá durante la misma se plantean en el libro. También se analizan las recientes investigaciones sobre los campos magnéticos en otros planetas y estrellas, así como su papel en la evolución del universo.

Nuestro propio cuerpo es capaz de crear pequeños campos magnéticos (biomagnetismo). Vivimos y nos desarrollamos, tal y como indica el título del libro, en un mundo magnético, por lo que no es de extrañar que los seres vivos hayan desarrollado capacidades y habilidades para detectarlo y usarlo (magnetobiología). En este sentido, el tercer capítulo introduce al lector en el sorprendente campo de la magnetobiología, mostrando cómo diversos organismos, desde bacterias hasta aves migratorias, han desarrollado mecanismos biológicos capaces de detectar el campo magnético terrestre. Desde las simples bacterias hasta los animales más complejos biosintetizan nanopartículas magnéticas (biomineralización) que les permiten desarrollar brújulas naturales para detectar y orientarse por el campo

magnético (magnetodetección) y así poder realizar extraordinarias migraciones, las cuales el autor recoge y examina. Este capítulo es especialmente revelador, al evidenciar la profunda conexión entre el magnetismo y la evolución de la vida en la Tierra.

El cuarto capítulo se centra en los grandes y colosales electroimanes superconductores, explorando algunas de sus aplicaciones de alto impacto en diferentes áreas, desde la medicina (imagen por resonancia magnética) y el mundo subatómico (colisionadores de partículas), hasta las tecnologías emergentes vinculadas al sector energético (la fusión nuclear) y el transporte (trenes que levitan magnéticamente, MagLev).

Finalmente, el quinto y último capítulo nos conduce al mundo nanoscópico (el magnetismo a escala nanoscópica), donde los nanoimanes o nanopartículas magnéticas abren posibilidades revolucionarias en campos como la medicina (los nanocirujanos) y la computación avanzada (nanobots).

Más allá de su sólida estructura y de la claridad con la que se explican conceptos complejos, lo que distingue a *Un mundo magnético* es, sin duda, la voz del autor. Quienes conocemos a "Paco" reconocemos en cada página su entusiasmo genuino, su espíritu crítico y su compromiso con una divulgación científica honesta y de calidad. Su estilo directo y pedagógico facilita la comprensión de conceptos complejos sin renunciar al rigor, lo que convierte a este volumen en una herramienta útil tanto para el gran público como para estudiantes de ciencias. Es un libro que informa, educa y, sobre todo, invita a pensar.

En definitiva, *Un mundo magnético* no es solo una obra de divulgación sobresaliente, es también el reflejo de una trayectoria académica y humana dedicada al conocimiento, la enseñanza y el pensamiento crítico. Y quienes hemos tenido la suerte de conversar con el autor, sabemos que esta es, probablemente, su mejor enseñanza: el compromiso de la ciencia en desentrañar la mentira. Su publicación es una gran noticia para la divulgación científica en español, y nos deja expectantes ante futuras obras de este autor.

Mario Pacheco Ferreiro

y Rafael Ruiz-García

Instituto de Ciencia Molecular,  
Universitat de València

# In memoriam

## Manuel García Doncel (1930-2025). Físico, teólogo e historiador

**M**anuel García Doncel ha sido catedrático de Física Teórica en la Universitat Autònoma de Barcelona. En 1949 ingresó en la Compañía de Jesús y se licenció en física en Barcelona. Después de graduarse en filosofía en 1956 y en teología en 1962 en la Universidad Estatal de Innsbruck, se doctoró en física en la Universidad de Barcelona en 1967 con una tesis sobre las simetrías internas en la física de las partículas elementales. Hizo su postdoctorado en el Institut des Hautes Études Scientifiques de Bures-sur-Yvette, cerca de París, dónde empezó su fructífera colaboración con el profesor Louis Michel, director entonces del mencionado Instituto. La colaboración continuó cuando Doncel se trasladó a la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN, por las siglas de su denominación en francés), cerca de Ginebra, donde permaneció hasta 1971, cuando que se incorporó a la recién creada Universitat Autònoma de Barcelona.

Doncel se incorporó a la UAB al mismo tiempo que uno de los autores (RP). Junto con Luis Mas, proveniente de París, y el joven licenciado Antoni Méndez, inició un Departamento de Física Teórica en el que se investigaría la física de las partículas elementales y la relatividad general. Con el paso de los años y el crecimiento de la nueva universidad, el grupo se fue consolidando y, aprovechando el momento en que España se reincorporó al CERN, fue el germen de la división teórica del actual Instituto de Física de Altas Energías (IFAE), un Instituto de reconocido prestigio creado en 1991 como consorcio entre la Generalitat de Catalunya y la UAB.

En cierto momento de su carrera, aunque proseguía su labor como físico y su colaboración, entre otros, con Louis Michel, Doncel decantó sus intereses hacia la historia y la epistemología de



la ciencia en general y de las partículas elementales en particular. Lentamente estos campos supusieron su mayor interés, especialmente después de la organización, en 1983, del International Meeting on the History of Scientific Ideas en Sant Feliu de Guíxols, en el que participaron varios premios Nobel, como Murray Gell-Mann o Eugene Wigner, y algunas otras autoridades, como el físico y recién ministro de Cultura Javier Solana, y cuyas actas dieron lugar a la publicación *Symmetries in Physics: 1600-1980* (World Scientific, 1987).

Su carrera académica en la universidad se consolidó primero como profesor agregado en 1975 y como catedrático de física teórica en 1983. Pero pronto su dedicación hacia la historia fue creciendo, así como su dedicación a la creación de una biblioteca especializada en el Centro Borja de Sant Cugat. En 1983 la UAB creó el Seminario de Historia de las Ciencias y en 1995 el Centro de Estudios de Historia de la Ciencia (CEHIC), que desarrolla una amplia actividad y coordina un programa interuniversitario de doctorado y un máster en historia de la ciencia. En

2020 el centro se convirtió en Instituto de Historia de la Ciencia, un instituto propio de la UAB. Estas instituciones han jugado un papel crucial en la consolidación de la historia de la ciencia en Cataluña. Tras su jubilación y su paso a profesor emérito tanto en la universidad como en el Instituto de Teología Fundamental de la Facultad de Teología de Catalunya dirigió allí un seminario de teología y ciencias (STIC).

En 1998 ingresó en la sección segunda de Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona como especialista en historia de la ciencia, en cuya institución ya había colaborado en 1981 con la conferencia “La génesis de la relatividad especial y la epistemología de Einstein” dentro del ciclo “Tres conferencias sobre Albert Einstein”. Pronunció su discurso de ingreso “Los orígenes de nuestra Real Academia y los jesuitas” el año 1998, en el que rememoraba los orígenes de la academia creada hace más de 260 años bajo el impulso de ciudadanos barceloneses en el entorno del Colegio de Cordelles y que fue contestado por el entonces presidente de la academia, Ramon Parés i Farràs. Además de otros trabajos en la academia, fue importante su papel para conseguir que la Academia publicara una edición del *Tratado de astronomía*, curso dictado el año 1760 en la Real Cátedra de Matemáticas del Colegio de Sant Jaume de Cordelles por el padre Tomás Cerdá (1715-1791), así como la transcripción efectuada de su *Tratado de fluxiones* a partir de los manuscritos autógrafos de Cerdà conservados en el archivo de la Real Academia de la Historia de Madrid. Probablemente el primer curso impartido en España del cálculo diferencial.

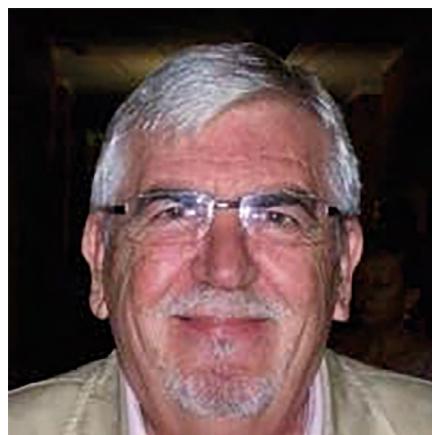
Ramon Pascual y Xavier Roqué  
Universitat Autònoma de Barcelona

# Antonio Ferrer Soria (1945-2025)

El profesor Antonio (Toni) Ferrer Soria (1945-2025) falleció el pasado mes de marzo, dejando atrás una vida dedicada, además de a su mujer Manola, a su otra gran pasión: la física, especialmente de partículas elementales. Toni fue una de esas personas que no dejan indiferente a nadie, con una energía vital que transmitía al hablar y, sobre todo, al actuar. Porque Toni era fundamentalmente un científico de acción, de proyecto, un emprendedor nato con visión de futuro.

El profesor Ferrer obtuvo su doctorado en Física por la Universidad de París-Sud (Orsay) en 1971, tras licenciarse en Física por la Universidad de Valencia en 1967. Desde 1971 hasta 1984, fue investigador en el CNRS (Francia), contribuyendo al desarrollo de experimentos de blanco fijo en los laboratorios del LAL y del CERN. Quienes coincidimos con él en el CERN durante aquella época, recordamos su espíritu generoso y abierto, cuando ante cualquier dificultad acudíamos a su despacho-laboratorio, cariñosamente apodado *chez Toni*, donde siempre nos atendía y orientaba con gran campechanía y sabiduría. Y así durante toda su trayectoria profesional.

Con la incorporación de Toni Ferrer al Instituto de Física Corpuscular (IFIC) en 1984, y la reentrada de España en el CERN, se produjo el gran salto de la física experimental en el IFIC, pasando de ser un reducido grupo de científicos entusiastas a convertirse en el prestigioso Instituto mixto CSIC-Universitat de València en el que se ha convertido hoy. Tanto su actividad como su personalidad dejaron una huella positiva en el crecimiento no solo del Grupo de Altas Energías del IFIC, sino también en los del Instituto de Física de Cantabria y de la Universidad de Oviedo, cuyos primeros miembros colaboraron estrechamente con él y su equipo en el experimento DELPHI.



En la colaboración DELPHI, lideró el diseño y construcción del detector TOF, desde 1984 hasta 1994. Su grupo también jugó un papel fundamental en el desarrollo del Calorímetro FEM. Además, impulsó la computación en el IFIC, con la puesta en marcha del VAX 11/780, lo que marcó un avance significativo en la capacidad de procesamiento de datos.

En 1996, Toni se unió a la colaboración ATLAS, donde hizo importantes contribuciones al detector de trazas SCT y desempeñó un papel crucial en la construcción del Calorímetro TileCal, y apostó por las nuevas tecnologías de la computación distribuida GRID. Su visión y dedicación fueron esenciales para convertir el Calorímetro de TileCal en una realidad y una pieza clave del detector ATLAS. Tras la construcción del detector ATLAS continuó colaborando en su puesta en marcha y operación, actuando como Contacto Nacional en el experimento de 1998 a 2000.

Su gran pasión, además de su amor por el Valencia Club de Fútbol, por la física de partículas, le llevó a interesarse por una amplia gama de temas a lo largo de su carrera. Exploró áreas como la física de neutrinos, la espectroscopia de mesones exóticos, búsqueda de quarks con encanto, la fotoproducción de alta

energía y la física en colisionadores de leptones y hadrones, entre otros temas.

A lo largo de su trayectoria, ocupó varios cargos de relevancia. Fue Gestor del Programa Nacional de Física de Partículas y Grandes Aceleradores (2000-2004). En el seno de la Real Sociedad Española de Física fue el creador y primer presidente de la Sección Local de Valencia, así como vicepresidente de la Real Sociedad Española de Física durante dos mandatos (1999-2007) y (2010-2013).

Además de su destacada labor investigadora, Toni fue un educador comprometido, ocupando el cargo de director del Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear en la Universitat de València, donde fue catedrático desde 1998. A lo largo de su carrera, dirigió más de diez tesis doctorales, siendo autor de varios libros de texto sobre física nuclear y de partículas. Su dedicación a la enseñanza y su legado académico perduran en la formación de nuevas generaciones de físicos. Además, su carácter afable, divertido y apasionado, destacó en multitud de reuniones y congresos, especialmente en las comidas, excursiones o momentos de ocio, tan importantes en las relaciones humanas, y a la postre científicas.

En reconocimiento a sus notables contribuciones a la ciencia, recibió en 2007 la distinción de la Universitat de València por sus méritos en investigación, así como la Medalla de Honor del programa Ciencia en Acción en Comunicación Científica en 2009. La pasión, generosidad y espíritu científico de Toni dejan una marca indeleble en la comunidad de física. Nos unimos al dolor de Manola y demás familia; lo echaremos de menos profundamente.

Carmen García, Antonio Dobado, Alberto Ruiz, José Salt, Enrique Sanchis, Miguel Ángel Sanchis

# Noticias

## Eloísa López Pérez: Miembro Distinguida de la Real Sociedad Española de Física

**E**l pasado 20 de diciembre de 2024 la Junta de Gobierno de la RSEF aprobó, por unanimidad, la designación de la profesora D.<sup>a</sup> Eloísa López como Socia Distinguida de la sociedad. La propuesta, iniciativa de la Junta de Gobierno del Grupo Especializado de Mujeres en Física (GEMF), también ha sido respaldada por numerosas personas de la RSEF.

Eloísa López Pérez nació en Santiago de Compostela en 1938. Se licenció en Ciencias Físicas en 1960 y obtuvo su doctorado en 1973 en la Universidad Complutense de Madrid. Empezó a dar clases de problemas y prácticas en 1959, antes de obtener la licenciatura, en el Departamento de Magnetismo, donde desarrolló una dilatada carrera investigadora y docente. Entre sus publicaciones destacan tanto importantes contribuciones científicas en el campo del magnetismo como diversos libros docentes. En 1964 tradujo al castellano con D. Salvador Velyos el libro *Mecánica*, de L. D. Landau y E. M. Lifshitz. En 1975 entró como profesora adscrita al Departamento de Magnetismo.

Miembro de la RSEF desde 1989, la profesora López Pérez ha realizado desde entonces un gran trabajo por y para nuestra sociedad. Pertenece a la División de Física de la Materia Condensada (DFMC-GEFES), a la División de Enseñanza y Divulgación de la Física (DEDF) y, desde su fundación, al GEMF, liderando y participando en actividades para la promoción de mujeres en las disciplinas STEM. Se ha involucrado con gran vitalidad, dedicación y sabiduría en diversas tareas y puestos de la RSEF, tanto fuera como dentro de la Junta de Gobierno, como vocal. Destacan entre esas posiciones, aquellas en las que ha asumido responsabilidades, quizás poco visibles pero indispensables para el conjunto de la comunidad



de la RSEF (independientemente de la disciplina concreta) y brillado especialmente, quizás porque ahora sabemos que desde niña tuvo una inclinación particular por el mundo editorial, en las relacionadas con las publicaciones de la RSEF.

Eloísa ha dedicado muchos años primero como subdirectora (1992-1997) y luego como directora de la *Revista Española de Física* (1997-2006). El último número de la REF de esta etapa, volumen 20, n.<sup>o</sup> 2 estaba dedicado a "Mujeres en Física", en "Carta del Presidente", el profesor Fernández-Rañada, se refería así a la labor de dirección realizada por Eloísa: "Desde ella (Eloísa) contribuyó eficazmente al notable aumento del número de socios durante estos años. También a mejorarla cuantitativa y cualitativamente, bajo su batuta aumentaron tirada y difusión, se cambió su aspecto para hacer más agradable su lectura —con la cuatricromía, por ejemplo— y aumentaron el número de páginas y el de salidas por año".

La profesora López Pérez ha sido también editora general (2006-2010),

con la responsabilidad de presidir la Comisión de Publicaciones y las Comisiones de selección de Premios y Medallas de la RSEF, en un momento crucial para nuestra Sociedad, pues ejerciendo Eloísa como editora, en 2007 los premios de la RSEF se establecieron definitivamente como convocatorias en coordinación con la Fundación BBVA.

A nadie le cabe duda de que Eloísa es el *alma mater* de nuestro boletín. Ella ha sido directora y editora del boletín *mensual* de la RSEF desde 2012. Una tarea que ha mantenido en solitario hasta el número de septiembre de 2024.

A pesar de que gran parte de su carrera se desarrolló durante unos años en los que las mujeres no tenían la debida visibilidad, Eloísa es unas de las reconocidas pioneras en física en España, que ha servido de ejemplo para numerosas físicas.

Su labor de cooperación en el desarrollo de profesorado en Nicaragua, siendo ya emérita, es un claro ejemplo del compromiso profesional y personal. Ha desarrollado una destacada carrera en la investigación, docencia, y promoción de la física dentro y fuera de nuestro país.

De su profesionalidad, gran capacidad y facilidad divulgadora no solo se han beneficiado muchas promociones de estudiantes universitarios. Gracias a su entusiasmo, vocación de servicio y su enorme generosidad, toda la comunidad de la RSEF se ha beneficiado durante muchos años de la desinteresada labor y trabajo de Eloísa. Y es esta faceta de servicio a nuestra sociedad, la que hace a Eloísa plenamente adecuada a la distinción que ha recibido ahora dentro de la RSEF.

Pilar López Sancho y Carmen Ocal  
Grupo Especializado de Mujeres  
en Física-RSEF

# Récord de participación en las Preliminares de PLANCKS 2025: 28 sedes, 140 equipos y más de 450 participantes

**E**l Grupo de Estudiantes de la Real Sociedad Española de Física (RSEF) se complace en anunciar que las Preliminares de PLANCKS 2025 han alcanzado un hito histórico de participación con 140 equipos inscritos y más de 450 participantes en toda España. Esta es la segunda vez consecutiva que ocurre, superando el récord histórico mundial establecido en la edición 2024.

Las Preliminares de PLANCKS es una competición de física teórica por equipos a nivel universitario. El pasado viernes 7 de marzo se celebró su octava edición con una prueba simultánea en 28 sedes universitarias distribuidas por facultades de física de todo el país. En cada sede, los equipos, supervisados por un/a profesor/a o investigador/a en física, se enfrentaron a problemas que trataban desde cuestiones de mecánica espacial hasta ondas gravitacionales,

pasando por estudiar aplicaciones de la cuántica en la óptica o sistemas controlados. Además, este año se ha presentado un nuevo modelo de examen que se asemeja más a la prueba final internacional a la que se presentarán los tres mejores equipos de esta competición nacional como representantes de nuestro país.

El evento, organizado por el Grupo de Estudiantes RSEF, busca fomentar el interés por la física y proporcionar una plataforma para que los estudiantes demuestren sus habilidades en la resolución de problemas desafiantes. "El año pasado ya fue todo un logro conseguir tanta participación, lo que no esperábamos es que este año el aumento fuera tan pronunciado respecto la edición anterior", dijo Eric Jiménez Zurera, presidente del Comité Organizador. "Este viernes volvemos a demostrar que los estudiantes españoles tenemos una pa-

sión por la física que rompe todos los estándares".

Los mejores equipos clasificados representarán a España en PLANCKS, competición internacional que tendrá lugar en Barcelona entre el 1 y el 5 de mayo. Organizada, también por el Grupo de Estudiantes RSEF, promete ser una final apasionante y llena de ciencia y cultura. Durante el evento, los participantes en la prueba disfrutarán también de charlas y actividades con ponentes de la talla de Anne L'Huillier, ganadora del Premio Nobel de Física en el año 2023.

Además, gracias al apoyo de la Fundación Ramón Areces, se ofrecen 1500 € en premios para los equipos ganadores de las Preliminares.

Para obtener más información sobre las Preliminares de PLANCKS 2025, puede consultarse la página web o escribir a estudiantes@rsef.es.



# David Barrado es nombrado delegado español en el Consejo del Observatorio Austral Europeo

**D**avid Barrado Navascués, profesor de investigación de Organismo Público de Investigación en el Centro de Astrobiología (INTA-CSIC) ha sido nombrado delegado científico en el Consejo del European Southern Observatory (ESO) por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

ESO es un organismo intergubernamental cuyo objetivo es la investigación astronómica, el desarrollo de instrumentación astronómica y de telescopios en Chile. Creado en 1962, tiene sede en Garching, Alemania, y agrupa a 16 países como miembros de pleno derecho. Actualmente opera varios observatorios y está construyendo el Extremely Large Telescope, una gigantesca estructura que albergará un telescopio con un espejo primario de más de 39 metros de diámetro compuesto por múltiples espejos. Se trata del proyecto de telescopio terrestre más ambicioso y operará en los rangos electromagnéticos óptico e infrarrojo. La involucración de empresas e institutos de investigación españoles tanto en el desarrollo y construcción del telescopio como de la instrumentación puntera es muy significativa. El Consejo es el órgano rector de ESO.

David Barrado es doctor en Física, especialidad de Astrofísica, por la Universidad Complutense de Madrid y doctor en Filosofía y Letras, especialidad en Geografía e Historia, por la Universidad de Alicante. Se formó como investigador mediante estancias pre- y postdoctorales en el Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (EE. UU., dentro del programa Fulbright), el Max-Planck



Institut für Astronomie (Alemania) y la Universidad Autónoma de Madrid.

Entre las responsabilidades que ha tenido se encuentran: investigador principal en INTA de MIRI, el instrumento para el infrarrojo medio del telescopio espacial JWST; coordinador los fondos para la contribución española al satélite PLATO, de la Agencia Espacial Europea, en INTA; director ejecutivo del Centro Astronómico Hispano-Alemán y director científico de la Unidad María de Maeztu Centro de Astrobiología.

Entre las temáticas de sus investigaciones destacan la búsqueda y caracterización de las propiedades de los objetos subestelares y las propiedades de las estrellas en cúmulos abiertos. Ha participado en la publicación de más de 300 artículos en revistas internacionales arbitradas. Compagina su trabajo como astrofísico con la investigación en el área de la historia de la ciencia, la

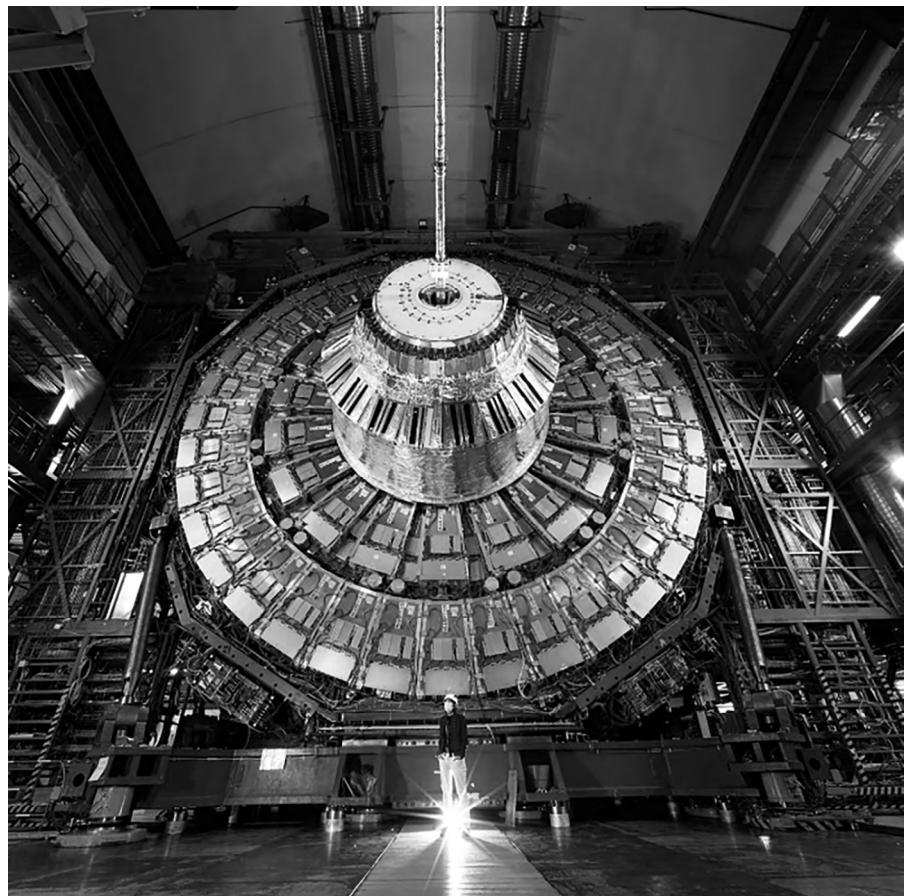
literatura y una intensa actividad como divulgador.

Entre sus reconocimientos se encuentran: Group Achievement Award de la Royal Astronomical Society 2024 por la participación en el instrumento MIRI del JWST; premio 2021 a la mejor tesis doctoral en el área Division C Education, Unión Astronómica Internacional; Sello de Excelencia María de Maeztu como investigador principal de la propuesta; el X Premio de divulgación de la Fundación para el Conocimiento MadrI+D; y dos reconocimientos JWST Significant Achievement Award por la contribución a MIRI, tanto por la Agencia Espacial Europea como por NASA.

Ha publicado varios libros de diversas temáticas, que van desde la astrobiología y el impacto de los seres humanos a diversas escalas, como la interacción entre ciencia y cultura en la Edad de los Descubrimientos.

# Premio Breakthrough a los miembros de ALICE, ATLAS, CMS y LHCb

El prestigioso premio en Física Fundamental concedido por la Fundación de los Premios Breakthrough ha correspondido a los miembros de las colaboraciones ALICE, ATLAS, CMS y LHCb en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN (<https://breakthroughprize.org/Laureates/1>). Entre los cerca de 14 000 científicos se encuentra una amplia representación de los investigadores experimentales de la división DFTP de la RSEF. El premio, que fue recibido por los portavoces de las colaboraciones, se otorgó por sus “mediciones detalladas de las propiedades del bosón de Higgs que confirman el mecanismo de ruptura espontánea de simetría de la generación de masa, el descubrimiento de nuevas partículas con interacción fuerte, el estudio de procesos inusuales y la asimetría materia-antimateria, y la exploración de la naturaleza a distancias muy cortas y en condiciones extremas en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN”. El premio, de 3 millones de dólares, está patrocinado por la Fundación de los Premios Breakthrough, cuya misión es celebrar los logros más sobresalientes de los científicos para el avance del conocimiento, que sirvan como inspiración de nuevos investigadores excelentes y promocionen la ciencia para el beneficio de la sociedad. Es una organización apolítica, que surgió en 2012 por iniciativa de Yuri Milner, fundador de DST Global, quien, junto a Sergey Brin, Priscilla Chan, Mark Zuckerberg y Anne Wojcicki



lanzaron los premios científicos mayores del mundo en Física Fundamental, Ciencias de la Vida y Matemáticas. Popularmente son conocidos como los “Oscar” de la Ciencia. Los jurados de los premios están constituidos, esencialmente, por los laureados de los premios anteriores. Por acuerdo entre las colaboraciones ganadoras, el premio se donará a la Funda-

ción CERN & Society, para ser destinado a ofrecer becas a estudiantes de doctorado de los institutos miembros de las colaboraciones para que dediquen tiempo de investigación al CERN.

Alberto Ruiz Jimeno  
Instituto de Física de Cantabria,  
CSIC-Universidad de Cantabria



# Olimpiadas de Física

## Real Sociedad Española de Física

### Olimpiadas

DE FÍSICA

Fomento de vocaciones • Selección de los equipos  
españoles • Divulgación de la física • Puente universidad  
secundaria • Promoción de la excelencia

- Olimpiada Española de Física
- Olimpiada Iberoamericana de Física
- Olimpiada Internacional de Física



Real  
Sociedad  
Española de  
Física

Para estudiantes de Bachillerato y FP2  
**PARTICIPA EN TU FASE LOCAL**

<https://rsef.es/olimpiada-espanola-de-fisica>

### Real Sociedad Española de Física. Junta de Gobierno

#### PRESIDENTE

Luis Viña Liste

#### VICEPRESIDENTES

Elena Pinilla Cienfuegos

Miguel Ángel Sanchis Lozano

#### SECRETARIA GENERAL

Ana Jesús López Díaz

#### TESORERA

María Varela del Arco

#### VOCALES

Manuel F. Alonso Sánchez. Pablo Artal Soriano. Fernando Bartolomé Usieto. Augusto Beléndez Vázquez. M.ª Reyes Calvo Urbina. María del Carmen Carrión Pérez. Arantxa Fraile Rodríguez. Jordi García Ojalvo. Rosario González-Ferez. Antonio Guirao Piñera. Julia Herrero Albillos. Laura Lechuga Gómez. María del Prado Martín Moruno. Miguel Ángel Rodríguez Valverde. Jacobo Santamaría Sánchez-Barriga. María Amparo Tórtola Baixauli. J. Adolfo de Azcárraga Feliu (Vocal ex-Presidente)

#### EDITOR GENERAL

Miguel Ángel Fernández Sanjuán

#### PRESIDENTES/AS DE SECCIONES LOCALES

J. Francés Monllor (Alicante)  
F. J. Torcal Milla (Aragón)  
J. Pisonero Castro (Asturias)  
J. Rodríguez Fernández (Cantabria)  
M. A. López de la Torre (Castilla-La Mancha)  
J. M. Vaquero Martínez (Extremadura)  
M. Martínez Piñeiro (Galicia)  
R. González Férez (Granada)  
J. F. Echávarri Granado (La Rioja)  
V. Madurga Pérez (Navarra)  
J. Guisasola Aranzabal (País Vasco)  
C. Hernández García (en funciones) (Salamanca)  
C. Soria del Hoyo (Sevilla)  
M.ª A. Tórtola Baixauli (Valencia)  
A. Calle Montes (Valladolid)  
J. Montero Amenedo (Sección Exterior)

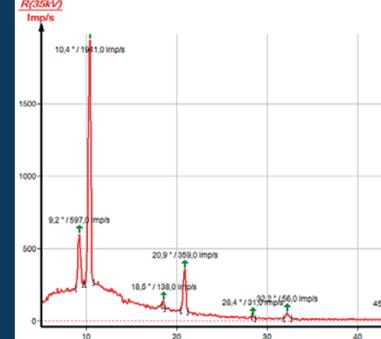
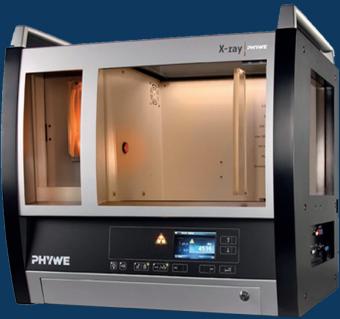
#### PRESIDENTES/AS DE DIVISIONES Y GRUPOS ESPECIALIZADOS

R. Aguado Sola (División de Física de la Materia Condensada DFMC-GEFES)  
A. Dobado González (División Física Teórica y de Partículas-DFTP)  
P. Nacenta Torres (División de Enseñanza y Divulgación de la Física-DEDF)  
M. Porrón Álvarez (Grupo de Estudiantes de la RSEF, GdeE)  
S. Calero Díaz (Adsorción, GEADS)  
V. J. Martínez García (Astrofísica, GEAS)  
J. A. Añel Cabanelas (Física de la Atmósfera y de Océano, GEFAO)  
A. Lesarri Gómez (Física Atómica y Molecular, GEFAM)  
L. A. Pérez Maqueda (Calorimetría y Análisis Térmico, GECAT)  
P. Taboada Antelo (Coloides e Interfases, GECl)  
A. Albert de la Cruz (Cristalográfica y Crecimiento Cristalino, GE3C)  
G. Pinto Cañón (Didáctica e Historia de la Física y la Química, GEDH)  
P. Palacios Clemente (Energía, GEE)  
R. M.ª Benito Zafradilla (Física Estadística y No Lineal, GEFENOL)  
D. Porras Torre (Información Cuántica, GEIC)  
C. Cojocaru (Láseres Ultrarrápidos, GELUR)  
C. Hernández García (Óptica Cuántica y Óptica No Lineal, GEOCONL)  
M.A. Herranz Astudillo (Nanociencia y Materiales Moleculares, GENAM)  
P. García Martínez (Mujeres en Física, GEMF)  
A. Ríos Huguet (Física Nuclear, GEFN)  
D. Mecerreyres Molero (Polímeros, GEPO)  
M. C. García Martínez (Física de Plasmas, GEFP)  
J. Muñoz García (Reología, GERE)  
M. Martínez Piñeiro (Termodinámica, GET)  
G. Llosá Llácer (Física Médica, GEFM)

# Equipo de Rayos X XR4.0 Expert Unit

Único equipo para docencia e investigación aprobado por el Consejo de Seguridad Nuclear

Número de aprobación NHM-X386



## Análisis de Estructuras Física de Rayos X Tomografía Computerizada Radiografía

Sistema de iluminación LED interior

Alta tensión 0,0...35,0 kV en pasos de 0,1 kV

Corriente de emisión 0,0...1,0 mA en pasos de 0,01 mA

Cámara de experimentación (mm): 440 (An) x 345(Al) x 354 (Pr)

Control por PC mediante USB 2.0

Unidad básica controlada por microprocesador con dos circuitos de seguridad y dos circuitos de supervisión

Cuatro tubos de rayos X diferentes (Fe, Cu, Mo y W) visibles durante el funcionamiento

Determinación de la intensidad de los rayos X mediante tubo contador Geiger-Müller con una tensión (0...600 V) y con altavoz integrado

Pantalla TFT en color (dimensiones 4,3")

## ADVACAM

Imaging the Unseen

Cámaras para análisis de materiales, ensayos no destructivos, radiografía en color o seguridad radiológica. Detectan todas las partículas de radiación de casi cualquier tipo, incluidos rayos X, gamma, electrones, iones e incluso neutrones. Basadas en la tecnología del CERN



### Serie MiniPIX

Las cámaras MiniPIX son cámaras de radiación miniaturizadas y de bajo consumo con detector de imágenes y seguimiento de partículas.

### Serie WidePIX

Cámaras de imagen industrial para aplicaciones NDT. Escaneado de alta resolución o imágenes de rayos X "en color".

### Serie AdvaPIX

Diseñadas para rendimiento y la versatilidad. Altas tasas Hit/Frame. Aplicaciones médicas, braquiterapia, terapia con haz de protones,,etc..