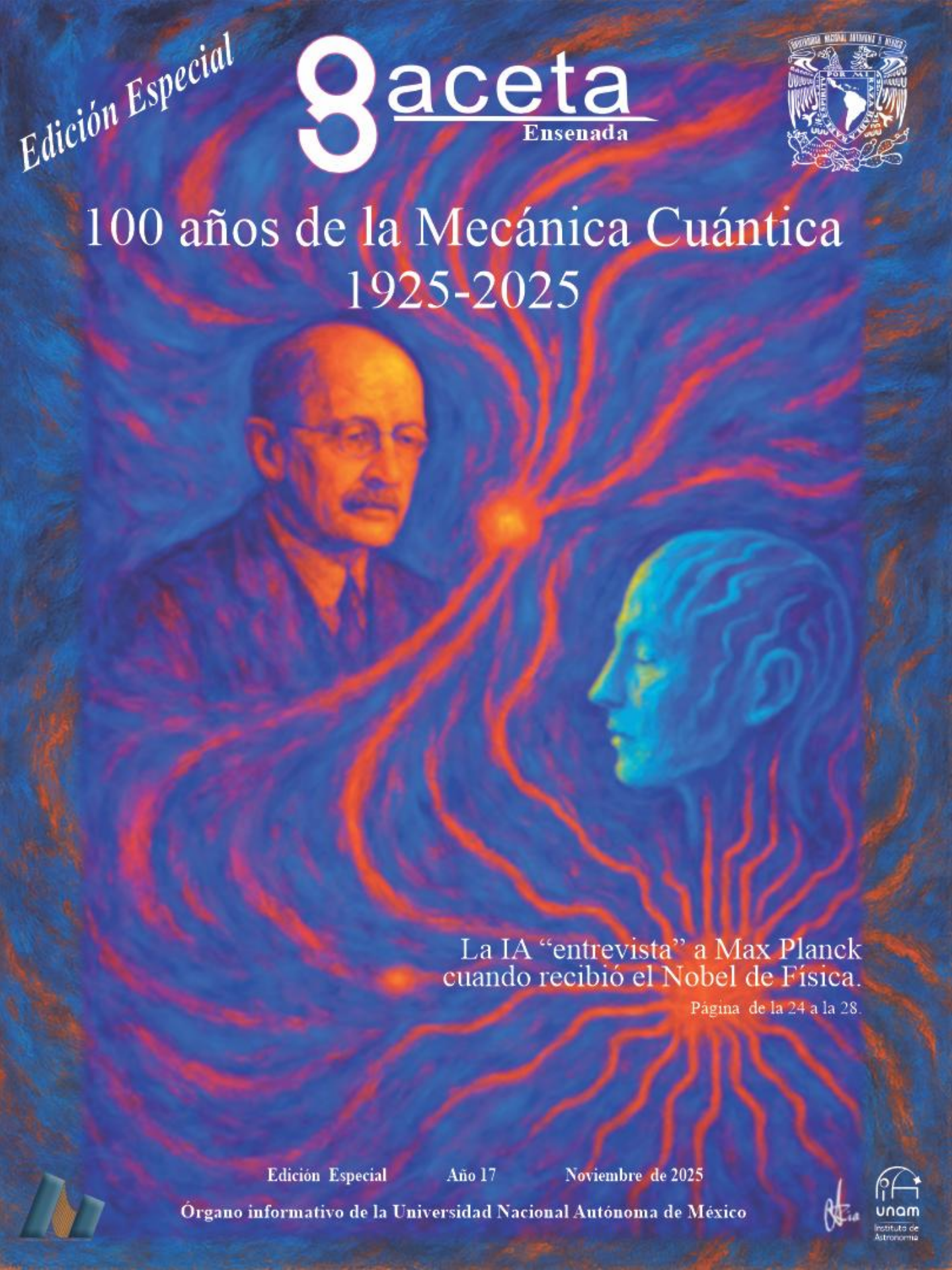




Edición Especial

gaceta
Ensenada



100 años de la Mecánica Cuántica 1925-2025

La IA “entrevista” a Max Planck
cuando recibió el Nobel de Física.

Página de la 24 a la 28.

Edición Especial

Año 17

Noviembre de 2025

Órgano informativo de la Universidad Nacional Autónoma de México





DIRECTORIO UNAM

Dr. Leonardo Lomeli Vanegas
Rector

Dra. Patricia Dolores Dávila Aranda
Secretaria General

Mtro. Tomás Humberto Rubio Pérez
Secretario Administrativo

Dra. Diana Tamara Martínez Ruiz
Secretaria de Desarrollo Institucional

Dra. María Soledad Funes Argüello
Coordinadora de la Investigación Científica

Dr. Yair Emmanuel Krongold Herrera
Director del Instituto de Astronomía

Dr. Fernando Rojas Iñiguez
Director
Centro de Nanociencias y Nanotecnología
Ensenada, B. C.

Consejo Editorial para este número especial.

Dr. Gerardo Soto Herrera
Ing. Israel Gradilla Martínez
Dr. Armado Reyes Serrato
D. G. Norma Olivia Paredes Alonso

Diseño, formación y fotografía
Norma Olivia Paredes Alonso

Gaceta Ensenada, es una publicación cuatrimestral editada por el Centro de Nanociencias y Nanotecnología y el Instituto de Astronomía de la UNAM Ensenada, Baja California, México.

Dirección:

Carretera Tijuana-Ensenada km. 107
Ensenada, Baja California, México.

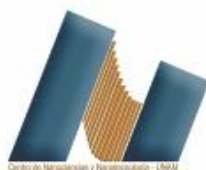
Teléfono: (646) 175 06 50 y (646) 174 45 80

Dirección electrónica:

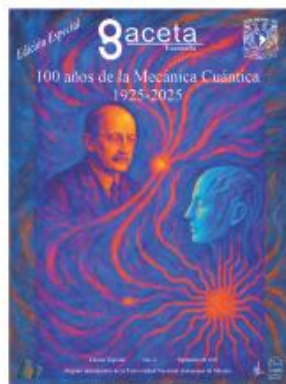
gerardo@ens.cnyn.unam.mx

nparedes@ens.cnyn.unam.mx

gaceta@ens.cnyn.unam.mx



Nuestra Portada Gaceta Ensenada CNyN-UNAM



Gaceta Ensenada Edición Especial
100 años de la mecánica cuántica
1925-2025

Descripción de Portada

La portada es el resultado de hacer una solicitud explícita a un sistema de inteligencia artificial para que ilustre "El Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas".

(<https://quantum2025.org/es/>)
que tome en cuenta el eslogan,

"100 AÑOS DE CUÁNTICA ES SÓLO EL PRINCIPIO"

y que identifique e ilustre el origen del "PRINCIPIO" que se menciona. He aquí el resultado: Planck que encontró la constante que lleva su nombre, la teoría de la Mecánica Cuántica, la dualidad onda-partícula, el desarrollo tecnológico que nos lleva a los circuitos integrados y actualmente al surgimiento, entre otras cosas, de sistemas de inteligencia artificial. Encontró el origen en una constante de valor numérico insignificante, pero de consecuencias inversamente proporcionales a su valor.

Gaceta Ensenada actual y anteriores en:
<https://sites.google.com/ens.cnyn.unam.mx/gaceta/>

Contenido

- 3.- La nanotecnología como heredera directa de los avances en mecánica cuántica.
- 5.- Las ideas de Thomas Kuhn y la revolución de la mecánica cuántica.
- 6.- El Universo Cuántico: ¿Un Juego de Dados?.
- 7.- Sobre la charlatanería en torno a la mecánica cuántica y el papel de la comunidad científica.
- 8.- La evolución del concepto de energía: desde la filosofía antigua hasta la consolidación en el Siglo XIX y su transformación en la física cuántica.
- 10.- El salto cuántico al desarrollo sostenible.
- 12.- Desde el foco incandescente hasta el LED azul: la belleza de la mecánica cuántica en la vida cotidiana.
- 14.- Entre la belleza cuántica y la sombra nuclear.
- 15.- La mecánica cuántica en la superconductividad.
- 18.- Espín electrónico: A 100 años de su descubrimiento.
- 24.- La IA "entrevista" a Max Planck cuando recibió el Nobel de Física.
- 29.- La seguridad digital y la criptografía cuántica
- 30.- Más allá de los imanes: redescubriendo el efecto Hall espontáneo.
- 32.- Poniendo a trabajar al entrelazamiento cuántico.
- 34.- De la mecánica cuántica a zeolitas como plataformas inteligentes de aplicaciones biocidas y descontaminantes.
- 35.- Efemérides del desarrollo de la mecánica cuántica.
- 36.- Niels Bohr: el arquitecto de una nueva visión del átomo.
- 38.- Caos cuántico y sus aplicaciones en nanotecnología: Una perspectiva a 100 Años de la mecánica cuántica.
- 40.- Dispositivos semiconductores de última generación.
- 42.- La física del siglo XIX hasta el 'quantum' de Planck.
- 44.- Nanomagnetismo cuántico: el poder del espín en la era de lo invisible... y cómo está revolucionando la tecnología del futuro.
- 46.- Zeolitas en la frontera cuántica.

La nanotecnología como heredera directa de los avances en mecánica cuántica

Por Gerardo Soto Herrera
Editor, *Gaceta Ensenada*
gaceta@ens.cyn.unam.mx

En 1925 nació formalmente la mecánica cuántica, una teoría revolucionaria que modificó profundamente nuestra comprensión de la materia, la energía y las leyes fundamentales que rigen el universo. Cien años después, sus principios no sólo siguen vigentes, sino que han dado origen a tecnologías que transforman la vida cotidiana. Entre ellas, destaca la nanotecnología: el arte y la ciencia de manipular la materia a escalas atómicas y moleculares.

Como editor de *Gaceta Ensenada*, me complace en lanzar este número especial conmemorativo para celebrar el centenario de uno de los mayores logros científicos de la humanidad. Esta edición busca resaltar las múltiples formas en que la mecánica cuántica ha trascendido el ámbito teórico para convertirse en la base de tecnologías que hoy marcan el pulso de la innovación, como es el caso de la nanotecnología.

Un legado cuántico

La nanotecnología no sería posible sin la mecánica cuántica. A escalas nanométricas —del orden de una milmillonésima de metro— los efectos cuánticos dominan el comportamiento de los materiales. Las reglas clásicas de la física pierden su validez, y conceptos como la dualidad onda-partícula, la cuantización de la energía y el túnel cuántico se vuelven esenciales para entender fenómenos como la conductividad eléctrica, las propiedades ópticas o la reactividad química de los nanomateriales.

Cada vez que se diseña un punto cuántico, una nanopartícula magnética o una hoja de grafeno, se está aplicando directamente la teoría cuántica. La ingeniería de materiales a esta escala exige entender y controlar la estructura electrónica, los niveles de energía discretos, las interacciones spin-órbita y otros efectos que sólo la mecánica cuántica puede describir correctamente.

Ver lo invisible: STM y AFM

Un parteaguas fundamental en el desarrollo de la nanotecnología fue el advenimiento de técnicas de microscopía basadas en principios cuánticos. En 1981, la invención de la microscopía de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés) permitió por primera vez visualizar y manipular átomos individuales sobre una superficie, gracias al fenómeno del túnel cuántico. Poco después, la microscopía de fuerza atómica (AFM) amplió esta capacidad a materiales no conductores, haciendo posible explorar la topografía, fricción, magnetismo y otras propiedades con resolución atómica. Estas

herramientas no solo confirmaron la realidad de los modelos cuánticos, sino que brindaron a la ciencia un nuevo tipo de "vista": la capacidad de interactuar directamente con la materia en su nivel más fundamental.

Aplicaciones con raíces cuánticas

Los dispositivos más avanzados del presente —desde sensores biomoleculares y nanotransistores hasta paneles solares de tercera generación y terapias dirigidas con nanovehículos— son impensables sin los avances teóricos y experimentales que surgieron del estudio cuántico de la materia. Por ejemplo:

- **Puntos cuánticos:** nanocristales semiconductores cuyo color de emisión depende del tamaño, explicable únicamente mediante confinamiento cuántico.
- **Nanomateriales 2D** como el grafeno o los dicalcogenuros de metales de transición, cuyo transporte electrónico obedece a leyes relativistas cuánticas.
- **Espintrónica:** tecnologías que manipulan el espín del electrón más allá de su carga, abriendo camino a la reducción dramática del tamaño de los dispositivos de almacenamiento de información y memorias no volátiles.

De Bohr y Schrödinger al laboratorio de nanociencia.

Como veremos en esta edición especial de *Gaceta Ensenada*, la mecánica cuántica nació como una teoría abstracta, desarrollada por físicos como Heisenberg, Schrödinger, Dirac y Pauli. Ver también: **Gaceta Ensenada No. 49**, 100 años de la Mecánica Cuántica, páginas 14-16 diciembre(2024). Hoy en día, sus ecuaciones se aplican de forma rutinaria en los laboratorios de nanociencia para simular propiedades de materiales, interpretar espectros experimentales y diseñar nuevos dispositivos. La conexión entre la teoría y la aplicación es más estrecha que nunca.

En el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, por ejemplo, se desarrollan materiales funcionales y dispositivos que aprovechan directamente estos principios. Las técnicas de síntesis, caracterización y modelado computacional están profundamente impregnadas de mecánica cuántica, desde la espectroscopía Raman hasta la teoría funcional de la densidad.

Un centenario que mira al futuro.

A cien años de su nacimiento, la mecánica cuántica ha dejado de ser una curiosidad teórica para convertirse en el lenguaje natural de la innovación tecnológica. La nanotecnología es uno de sus herederos más claros y ambiciosos. Conforme avanzamos hacia la computación cuántica, la medicina personalizada y la fabricación atómica, la relación entre ambas disciplinas seguirá fortaleciéndose.

Celebrar el centenario de la mecánica cuántica es también reconocer su descendencia: la nanotecnología, que nos permite construir el futuro partícula por partícula. 

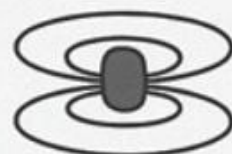
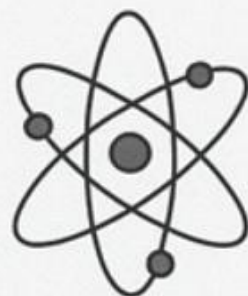
De la mecánica cuántica a la nanotecnología: un siglo de avances



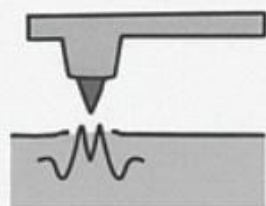
Orígenes teóricos

$$H\psi = E\psi$$

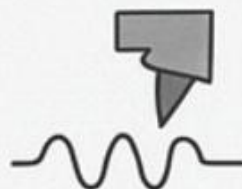
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



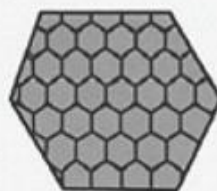
Aplicaciones en Nanotecnología



STM



AFM



Grafeno



Espín

Figura. De la mecánica cuántica a la nanotecnología: Los conceptos fundamentales son las herramientas clave.

Las ideas de Thomas Kuhn y la revolución de la mecánica cuántica



Thomas Samuel Kuhn (1922-1996), historiador y filósofo de la ciencia.

Gerardo Soto
CNyN-UNAM

Editor, Gaceta Ensenada
gerardo@ens.cnyun.unam.mx

Thomas Kuhn, filósofo e historiador de la ciencia, revolucionó nuestra comprensión del avance del conocimiento. Su obra, *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), introdujo conceptos como el de **cambio de paradigma** y **ciencia normal**, y mostró que el progreso científico no es un proceso lineal y acumulativo, como se creía. En su lugar, Kuhn describió el desarrollo de la ciencia como una serie de cambios radicales que rompen con las ideas previas y reorganizan la forma en que entendemos el mundo. Un ejemplo perfecto de esto es la **mecánica cuántica**.

La ciencia normal y el paradigma clásico

Según Kuhn, la mayor parte del tiempo, los científicos trabajan en lo que él denominó **ciencia normal**. Durante este periodo, la comunidad científica sigue un conjunto de teorías, conceptos y métodos ampliamente aceptados, lo que Kuhn llamó un **paradigma**. En la física clásica, por ejemplo, los científicos operaban bajo el paradigma newtoniano, que describía el comportamiento de los objetos en el mundo macroscópico mediante las leyes del movimiento de **Newton** y las teorías electromagnéticas de **Maxwell**. Este paradigma fue exitoso para explicar muchos fenómenos físicos y guió la investigación durante gran parte del siglo XIX.

Sin embargo, mientras los científicos trabajaban dentro de este marco, comenzaron a aparecer anomalías, es decir, fenómenos que el paradigma no podía explicar adecuadamente. Estas anomalías no son inmediatamente vistas como amenazas al paradigma; los científicos las tratan como problemas que pueden resolverse con más investigación. Pero cuando las anomalías se acumulan y no se pueden resolver dentro del marco existente, el paradigma entra en crisis.

La crisis de la física clásica

A finales del siglo XIX, la física clásica enfrentaba varias anomalías importantes. El problema del cuerpo negro, donde las predicciones de la física clásica sobre la radiación emitida por un objeto caliente no coincidían con los resultados experimentales, y el efecto fotoeléctrico, que mostraba cómo la luz puede liberar electrones de ciertos metales, no podían explicarse adecuadamente utilizando las teorías clásicas.

Según Kuhn, cuando estas anomalías alcanzan un punto crítico, la ciencia entra en un periodo de crisis. En este contexto, surge la necesidad de un **nuevo paradigma** que pueda explicar estos fenómenos anómalos. Fue entonces cuando la **mecánica cuántica** emergió como una respuesta revolucionaria.

El cambio de paradigma: la mecánica cuántica

Entre 1900 y 1925, los físicos como **Max Planck**, **Albert Einstein**, **Niels Bohr**, **Werner Heisenberg** y **Erwin Schrödinger** introdujeron ideas radicalmente nuevas que cambiaron por completo la comprensión del mundo subatómico. En lugar de tratar la energía como una cantidad continua, los físicos comenzaron a describirla en términos de **cuantos** (paquetes discretos de energía), idea revolucionaria que rompía con el paradigma clásico. También surgió la **dualidad onda-partícula**, que sostiene que las partículas como los electrones pueden comportarse tanto como partículas como ondas. Esto desafiaba las nociones previas de que los objetos tenían una naturaleza fija.

Esto es lo que Kuhn denominó un cambio de paradigma o una revolución científica. La mecánica cuántica no fue solo un ajuste a la física clásica; fue una reconstrucción completa de la forma en que los científicos comprendían el comportamiento de la materia y la energía a nivel subatómico. Para los científicos habituados a pensar en términos clásicos, la mecánica cuántica resultaba difícil de aceptar, ya que el nuevo paradigma operaba bajo reglas totalmente diferentes.

La mecánica cuántica es un ejemplo icónico de las ideas de Thomas Kuhn sobre el cambio de paradigma en la ciencia. No solo resolvió las anomalías que la física clásica no podía explicar, sino que también introdujo una nueva forma de entender la realidad, en la que la incertidumbre y las probabilidades juegan un papel fundamental. Las ideas de Kuhn nos recuerdan que la ciencia no avanza de manera lineal, sino que experimenta revoluciones que transforman radicalmente nuestro conocimiento del mundo. 



El Universo Cuántico: ¿Un Juego de Dados?

Eurydice Carolina Arroyo Sahagún¹, Miguel Ángel Armenta Gutiérrez²

¹Tecnológico Nacional de México

Instituto Tecnológico de Ensenada (TecNM-ITE)

²Instituto Tecnológico de Sonora

*carroyo@ite.edu.mx

La mecánica cuántica no es solo una teoría abstracta; tiene aplicaciones reales en nuestra vida diaria. Los láseres, los transistores, la resonancia magnética y la criptografía moderna; todos estos avances se basan en principios cuánticos.

La investigación en mecánica cuántica sigue avanzando a pasos agigantados. Hoy en día, se están explorando las posibilidades de la computación cuántica y otras tecnologías que podrían revolucionar nuestro mundo.

Pero, ¿qué es la realidad? ¿Cómo funciona el universo a nivel microscópico? Imagina un universo donde las cosas no son tan definidas como parecen. Donde una partícula puede estar en dos lugares al mismo tiempo, o donde la simple acción de observarla cambia su comportamiento. Este es el mundo de la mecánica cuántica, una teoría que revolucionó la física a principios del siglo XX.

Pero no todos estaban convencidos. Entre los que dudaban se encontraba Albert Einstein, el genio de la relatividad, quien creía que la mecánica cuántica era incompleta y que debía existir una descripción más profunda de la realidad. Del otro lado estaba Niels Bohr, uno de los padres de la mecánica cuántica, que defendía la nueva teoría con fervor.

Las Conferencias Solvay, reuniones anuales de los físicos más inteligentes del mundo, fueron el lugar donde Einstein y Bohr chocaron sus ideas sobre la mecánica cuántica. Uno de los puntos más debatidos era una idea llamada el "principio de incertidumbre" de Heisenberg. Este principio establece que hay un límite a lo que podemos saber sobre las partículas: no podemos conocer con total precisión al mismo tiempo dónde están y qué tan rápido se mueven. Einstein no estaba de acuerdo con esto. Él pensaba que si no podíamos saber esas dos cosas,

era porque nuestros instrumentos no eran lo suficientemente buenos. Para demostrarlo, se le ocurrió una idea ingeniosa, **un experimento mental con una caja de luz!** Imagina una caja cerrada con un átomo dentro que puede emitir un rayo de luz. La caja tiene una ventanita que se puede abrir y cerrar. Einstein decía que, si pesabas la caja antes y después de que saliera la luz, podrías saber cuánta energía perdió y cuándo salió el rayo. ¡Y eso, según él, rompía el principio de incertidumbre!

Bohr, por su parte, defendía la interpretación de Copenhague, que afirmaba que la descripción de la realidad es probabilística y que la medición afecta al estado de un sistema cuántico. Utilizando la propia teoría de la relatividad de Einstein, demostró que el experimento mental no era tan contundente como parecía y que la mecánica cuántica seguía siendo válida. La idea de que la realidad es probabilística, y que depende de nuestra observación, no le sentó bien a Albert Einstein. "Dios no juega a los dados con el universo", decía. Él creía que la realidad debía ser determinista, que el sistema ya tenía un estado definido, incluso sin que lo supiéramos.

Niels Bohr, uno de los padres de la mecánica cuántica, defendía la interpretación cuántica. Argumentaba que la realidad es probabilística, y que el acto de observar define el estado del sistema.

La disputa entre Einstein y Bohr no se limitaba a la física. Era una batalla por la interpretación de la realidad misma. Einstein, un defensor del determinismo, creía que el universo era predecible y que existía una realidad objetiva, independiente del observador. Bohr, por otro lado, defendía la naturaleza probabilística del mundo cuántico y la influencia del observador en la realidad.

A pesar de que Einstein nunca aceptó completamente la mecánica cuántica, su disputa con Bohr tuvo un impacto significativo en el desarrollo de la física. La controversia obligó a los físicos a examinar con más detalle las bases de la mecánica cuántica y a desarrollar nuevas interpretaciones de la teoría.

Esta disputa, que comenzó en los años 20, sigue viva hasta hoy. Es una de las más famosas de la física, y nos recuerda que la ciencia no es un conjunto de verdades inmutables, sino un proceso de exploración y debate constante. ¿Y tú de qué lado estás? 🎲

Referencias

Saorín, J. L. L. Dios no juega a los dados.

Hawking, S. W. (2005). ¿Juega Dios a los dados?

CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica, 2(10), 4.

Sobre la charlatanería en torno a la mecánica cuántica y el papel de la comunidad científica

Ángel Regalado-Contreras

@regaladodelmundo

Desafortunadamente, junto con el nacimiento de la mecánica cuántica han emergido muchos charlatanes. Estos, partiendo de conceptos abstractos y difíciles de entender, elaboran una suerte de narrativas que descontextualizan totalmente el significado original de los hechos a los que hacen alusión, y que sirven como eje central de la cosmovisión de sus mundos. Mundos en los que, por supuesto, ellos son los principales mesías, los gurús. Y como tales, se ostentan a sí mismos como merecedores de obtener algo en reciprocidad: desde cosas tan simples como un “follow”, hasta grandes regalías comercializando productos milagro, libros, experiencias, sustancias, etc.

Resulta curioso cómo algunas de las ideas charlatanesas emanaron de ciertos “científicos”, como el físico Fritjof Capra. En su libro *El Tao de la Física*, publicado en 1975, expone ideas disparatadas en las que intenta establecer un paralelismo entre conceptos mecánico-cuánticos y dogmas de creencias orientales. Por ejemplo, exalta el supuesto parecido entre el concepto de Yin-Yang (creencia) y la dualidad onda-partícula (hecho). Capra fue probablemente el promotor primigenio de la idea del “misticismo cuántico”, aunque no ha sido el único. Entre los charlatanes cuánticos —aunque muchos no los consideren como tales— figuran nombres conocidos como Deepak Chopra y Joe Dispenza.

Muchas otras personas han tratado de seguir la estela de fama, sensacionalismo y lucro que dejan las ideas pseudocientíficas “inspiradas” en la mecánica cuántica. Estas ideas han permeado tanto en la cultura popular (sorprendentemente más que los conceptos científicos originales) que basta con navegar unos segundos en TikTok o buscar la palabra “cuántico” para atestiguar, por cuenta propia, la cantidad de personas —famosas o desconocidas— que difunden ideas físicas erróneas, presumiéndolas como científicas solo por adornarlas con ese término.

Resulta indignante que se pierda tiempo siquiera mencionando tal fenómeno. Pero es un problema que se ha ido acrecentando con el tiempo, y que puede volverse potencialmente dañino. No solo por el hecho directo de que hay quienes estafan y mienten, sino también por la pérdida de credibilidad que esto genera hacia la comunidad científica —credibilidad que, de por sí, ya es baja en muchos sectores. Además, la charlatanería se ha concentrado específicamente en torno a la mecánica cuántica; no parece haber un fenómeno semejante con conceptos complejos de la química, la biología o las matemáticas, lo cual resulta llamativo. Ante esta realidad, cabe hacerse la pregunta: ¿se puede mitigar el impacto de la charlatanería cuántica? A título personal, considero que sí.

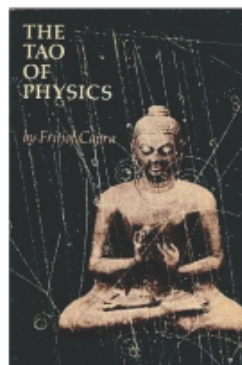
Por un lado, es necesario contraargumentar de manera clara y contundente aquellas ideas equivocadas que escuchemos —vengan de quien vengan, incluso de familiares. No tiene por qué convertirse en un pleito o enemistad; puede ser una amable aclaración de que esas ideas “cuánticas” no tienen nada que ver con lo que se piensa: no, amigo, no diste un “salto cuántico” solo por “manifestar” algo. Los charlatanes, en sus premisas adoctrinantes, siempre se justificarán en el derecho a la libertad de creencias. No obstante, esta libertad se esgrime en el ámbito del dogma, y la mecánica cuántica no es un dogma. Corresponde, por lo menos, desmentirlo.

Por otro lado, quizás sea necesario intensificar activamente las acciones de comunicación pública de la ciencia, que traten de desmenuzar conceptos cuánticos para hacerlos “digeribles” y comprensibles “para todos”. Hay que recordar que no se busca una educación de estricto rigor académico. Más bien, se trata de comunicar efectivamente la esencia fundamental del concepto o teoría científica en cuestión. Así, quizás, se pueda evitar que la ciudadanía no científica utilice el término “cuántico” para describir entornos y sistemas que claramente no lo son. Así, gana el conocimiento, y ganamos todos.

A más de cien años del nacimiento de la mecánica cuántica, sigue siendo asombroso cómo una teoría tan sólida, precisa y revolucionaria ha sido también malinterpretada, distorsionada y convertida en una especie de comodín esotérico por muchos. Justamente por eso vale la pena recordarla con respeto, con rigor, y sobre todo con claridad. No necesita adornos místicos ni reinterpretaciones fantasiosas: su historia real es más fascinante que cualquier invento. 🍀

Referencias:

Capra, F. (1975). *The Tao of Physics: An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism*. Shambhala Publications.



El Tao de la Física: Una exploración de los paralelismos entre la física moderna y el misticismo oriental es un libro de 1975 del físico Fritjof Capra. Un éxito de ventas en Estados Unidos, ha sido traducido a 23 idiomas. Capra resumió su motivación para escribir el libro: «La ciencia no necesita el misticismo, ni el misticismo necesita la ciencia. Pero el hombre necesita ambos».



La evolución del concepto de energía: desde la filosofía antigua hasta la consolidación en el Siglo XIX y su transformación en la física cuántica

Gerardo Soto*
Editor Gaceta Ensenada
*gerardo@ens.cnyn.unam.mx

La noción de "energía", un concepto fundamental en física, ha recorrido un fascinante camino desde sus raíces filosóficas hasta su formalización científica y su posterior transformación en el siglo XX. La palabra misma, "energía", tiene sus orígenes en el término griego *ἐνέργεια* (*enérgeia*), que significa "actividad interior" o "estar en trabajo". Si bien los filósofos griegos antiguos exploraron el movimiento, la fuerza y la causa primera del universo, su comprensión de la *enérgeia* era más cualitativa que cuantitativa. La distinción de **Aristóteles** entre *dynamis* (potencia) y *enérgeia* (acto) se acerca a la idea de energía como la capacidad de realizar trabajo, pero carecía de la noción de conservación y medición precisa que surgiría siglos después.

Tras la especulación filosófica sobre la naturaleza que caracterizó a la antigüedad griega, el Renacimiento y la Revolución Científica del siglo XVII dirigieron la atención hacia la cuantificación y la experimentación. En este nuevo panorama, la obra de **Gottfried Wilhelm Leibniz**, con su innovador concepto de *vis viva* (fuerza viva), representó un avance crucial hacia la formulación moderna de la energía. Leibniz argumentó que la "fuerza" de un cuerpo en movimiento era proporcional a la masa multiplicada por el cuadrado de su velocidad (mv^2). Esta cantidad, la *vis viva*, se identifica hoy como el doble de la energía cinética, pues Leibniz omitió el factor $1/2$ en su definición. Aunque Leibniz no llegó a

formalizar un concepto de energía en los términos que conocemos, sembró la semilla para el desarrollo posterior de este principio fundamental.

Fue a principios del siglo XIX cuando el término "energía" comenzó a ganar terreno en la comunidad científica. **Thomas Young**, en una conferencia en la Royal Society en 1802, fue uno de los primeros en utilizar el término "energía" de una manera más cercana a su significado actual, reemplazando gradualmente la noción de *vis viva*. Posteriormente, **William Rankine** jugó un papel clave en la formalización del uso del término "energía" en el campo emergente de la termodinámica, contribuyendo a establecer la distinción entre diferentes formas de energía y a comprender cómo se pueden transformar unas en otras.

Este marco conceptual fue esencial para los descubrimientos que consolidarían el concepto de energía. A lo largo del siglo XIX, numerosos científicos contribuyeron a establecer la equivalencia entre diferentes formas de energía, solidificando el concepto. Los experimentos de **James Prescott Joule** demostraron la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor, mientras que **Hermann von Helmholtz** formuló un principio general de conservación de la energía, aplicándola a una amplia gama de fenómenos físicos. Fue a finales del siglo XIX que el concepto de energía, entendido como una cantidad

conservada que puede transformarse de una forma a otra, pero que no puede crearse ni destruirse, se había consolidado como la piedra angular en la física. Sin embargo, esta visión macroscópica estaba a punto de ser transformada por una nueva revolución científica.

Sin embargo, fue **Ludwig Boltzmann** (1844-1906) quien revolucionó la comprensión de la energía. Trabajando en la segunda mitad del siglo XIX, Boltzmann no solo consolidó la idea de la energía como una cantidad fundamental, sino que también estableció una conexión profunda entre la termodinámica, la mecánica y la probabilidad. Su obra cumbre fue la interpretación estadística de la entropía ($S = k \log W$), publicada en 1877. Esta ecuación establece que la entropía (S) de un sistema macroscópico es proporcional al logaritmo del número de microestados (W) correspondientes a dicho estado macroscópico. Esta idea revolucionaria explica la irreversibilidad termodinámica como una consecuencia de la probabilidad: los sistemas tienden a evolucionar hacia los estados más probables, es decir, aquellos con el mayor número de microestados. De esta forma, la mecánica estadística emergió como un puente crucial, vinculando las propiedades microscópicas de un sistema (la energía de sus partículas individuales) con sus propiedades macroscópicas (temperatura, presión, entropía). En este marco, la energía se convierte en una propiedad fundamental de las partículas que componen el sistema, y su distribución se describe a través de herramientas probabilísticas, como la distribución de Boltzmann.

Posteriormente, la teoría de la relatividad de **Albert Einstein** revolucionó aún más nuestra comprensión de la energía. La famosa ecuación $E=mc^2$ demostró la equivalencia entre masa y energía, transformando nuestra visión de la materia y el universo. A continuación, la mecánica cuántica reveló que la energía no es una cantidad continua, sino que está cuantizada, es decir, solo puede tomar valores discretos específicos. La ecuación de **Schrödinger**, base de la mecánica cuántica, establece el estado cuántico de un sistema y su evolución. En esencia, relaciona la energía total de un sistema cuántico con su función de onda, que a su vez contiene toda la información posible sobre el sistema. La energía, representada como un operador en la ecuación, no es simplemente un valor numérico, sino una propiedad dinámica que influye en el comportamiento y las posibles transiciones del sistema. La solución de la ecuación de Schrödinger proporciona los posibles valores de energía que puede tener un sistema cuántico, revelando la naturaleza discreta y cuantificada de la energía a nivel atómico y subatómico. Así, la energía se convierte en un parámetro fundamental para comprender y predecir el comportamiento de los sistemas cuánticos, desde átomos y moléculas hasta partículas elementales. Además, la física moderna describe la energía en términos de campos, como el campo electromagnético y el campo de **Higgs**, que son capaces de almacenar y transportar energía y desempeñan un papel fundamental en las

interacciones entre partículas. La investigación en física cuántica, centrada en el estudio de las energías y los estados energéticos de las partículas fundamentales, representa una frontera en la exploración de los límites mismos de nuestra comprensión del universo.

La consolidación del concepto ha tenido implicaciones prácticas para el desarrollo de tecnologías de energía renovable, como la solar, eólica e hidroeléctrica. El principio de conservación de energía ha permitido diseñar sistemas más eficientes para el uso y almacenamiento de energía, incluidos los modernos sistemas de baterías. Los principios de termodinámica y mecánica han optimizado los procesos industriales y de manufactura, minimizando el impacto ambiental. En medicina, los equipos de diagnóstico dependen de la precisión de la energía fotónica de los principios de física nuclear y electromagnetismo. La física de la energía ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales con propiedades específicas para la absorción, almacenamiento e impedimento de la transferencia de energía, que ha contribuido significativamente a los esfuerzos por hacer un uso más sostenible y eficiente de los recursos naturales.

Sin embargo, es importante aclarar el uso del término "energía" en contextos pseudocientíficos. Si bien el concepto nació desde una perspectiva filosófica, ha sido adaptado por la ciencia como una cantidad observable y cuantificable, sujeta a leyes físicas precisas y verificables experimentalmente. En diversas disciplinas y creencias, la palabra "energía" se emplea a menudo para describir fuerzas vitales, flujos sutiles o poderes místicos que no están definidos por las leyes de la física y que carecen de evidencia verificable. Por ejemplo, se promocionan dispositivos que supuestamente "equilibran tu energía vital" o "aumentan tu frecuencia vibracional", prometiendo beneficios para la salud sin ningún respaldo científico. Estas afirmaciones a menudo se basan en una tergiversación del concepto científico de energía, utilizando el término para dar una apariencia de validez a prácticas sin fundamento. Es por lo tanto importante distinguir claramente entre el concepto científico de energía, rigurosamente definido y estas otras interpretaciones pseudocientíficas.

En conclusión, la energía ha evolucionado de un concepto filosófico vago a una cantidad física precisa, cuantificable y conservada, luego a una entidad fundamental que se manifiesta de diversas formas a nivel microscópico y macroscópico. La energía es un concepto central en la física moderna, y su estudio continúa revelando perspectivas sobre la naturaleza del universo. 

Fuentes consultadas:

Wikipedia. (s.f.). Energía.
LibreTexts. (s.f.). Historia breve de la mecánica clásica. Recuperado de https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics
Universidad de La Laguna. (s.f.). La conservación de la energía. Recuperado de <https://www.ull.es/>

El salto cuántico al desarrollo sostenible

María de Lourdes Serrato de la Cruz¹², María Fernanda Martínez-Valladares²³,
Gabriel Alonso Núñez¹, Gabriel Isacc Alonso⁴, Evodio Sánchez Rodríguez²

¹CNyN-UNAM, Ensenada, B.C., México

²Universidad Anáhuac Norte, CDMX

³Facultad de Posgrado, Universidad Tecnológica Centroamericana, Tegucigalpa, Honduras

⁴University at El Paso, Texas, USA

pa_lourdes@ens.cnyn.unam.mx

Introducción

La computación cuántica se basa en los principios fundamentales de la mecánica cuántica y utiliza qubits (bits cuánticos), los cuales reemplazan a los bits clásicos de las computadoras tradicionales. Esta tecnología emergente tiene el potencial de transformar múltiples industrias gracias a algoritmos optimizados capaces de resolver problemas de alta complejidad con una velocidad inalcanzable para los sistemas clásicos.

Además de su capacidad de procesamiento, la computación cuántica ya está generando un impacto considerable en áreas como la criptografía, la simulación de moléculas, la inteligencia artificial y los modelos financieros, lo que la convierte en una de las tecnologías con mayor potencial disruptivo en la actualidad.

Aplicaciones en el sector empresarial.

La computación cuántica se perfila como una herramienta clave en distintos sectores económicos, y su desarrollo ya está siendo explorado por diversas industrias con el fin de mejorar procesos y optimizar recursos. Entre las áreas con mayor interés se encuentran:

- Finanzas y banca: Simulación avanzada, análisis de riesgo y optimización de portafolios.
- Salud y farmacéutica: Simulación molecular para el diseño de nuevos medicamentos.
- Energía y recursos naturales: Optimización de redes eléctricas y exploración eficiente de recursos.
- Automotriz y aeroespacial: Simulación de materiales avanzados y aerodinámica de vehículos.
- Ciberseguridad: Desarrollo de nuevas técnicas de encriptación resistentes a ataques cuánticos.

Computación cuántica y desarrollo sostenible.

¿Puede esta poderosa tecnología ayudarnos a enfrentar los grandes desafíos del desarrollo sostenible?

Las tecnologías cuánticas ofrecen soluciones innovadoras a problemas complejos en múltiples sectores. Por ejemplo, su capacidad para optimizar procesos puede aplicarse en la gestión del tráfico urbano, el control de inventarios o la planificación de rutas logísticas, lo que permitiría reducir tiempos, costos y, de forma indirecta, la huella de carbono asociada a las cadenas de suministro. Este tipo de soluciones contribuyen directamente a objetivos como la industria, la innovación, la infraestructura y la construcción de ciudades más sostenibles.

En el ámbito de la simulación, la computación cuántica también podría acelerar el desarrollo de nuevos fármacos para la prevención y tratamiento de enfermedades, así como el diseño de materiales con propiedades más sostenibles, aptos para su incorporación en procesos industriales que reduzcan el uso de recursos naturales y materiales sintéticos contaminantes. Como se muestra en la Figura 1, estas aplicaciones están alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU, especialmente en los ámbitos de salud, energía, industria, ciudades sostenibles y acción climática.



Figura SEQ Figura * ARABIC 1. Aplicaciones de la computación cuántica en apoyo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Pese al potencial transformador de la computación cuántica, también es necesario considerar los riesgos éticos, sociales y legales que pueden derivarse de su uso. Por esta razón, organismos multilaterales y financieros han desarrollado guías de gobernanza para esta tecnología emergente.

Entre estas propuestas se encuentra el documento del Foro Económico Mundial que plantea siete principios de gobernanza aplicables a la computación cuántica. Estos principios no solo buscan asegurar un desarrollo ético y equitativo de la tecnología, sino también garantizar que sus aplicaciones sean sostenibles y beneficien a toda la sociedad [1,2]. La Tabla 1 presenta un resumen de estos principios.

Tabla SEQ Tabla * ARABIC 1. Principios de gobernanza para el desarrollo sostenible de la computación cuántica.	
Valor	¿En qué consiste
El bien común	En emplear la capacidad transformadora de esta tecnología para beneficio de la humanidad
Responsabilidad	Contar con mecanismos para garantizar que no se acepte su uso malicioso
Inclusión	Considerar las diversas perspectivas de los sectores para evitar su uso perjudicial
Equidad	Que se distribuya de forma justa en la medida de lo posible
No maleficencia	Utilizarla de forma segura, ética y responsable
Accesibilidad	Cultivar la capacidad en los distintos actores de poder utilizar esta tecnología para el bien
Transparencia	Explicitar el propósito e intenciones sobre el uso de la computación cuántica

Investigación cuántica en México

En México, desde hace más de dos décadas, se han desarrollado múltiples esfuerzos para fortalecer la investigación en el área de la computación cuántica. Estos avances incluyen la creación de divisiones académicas, eventos especializados y laboratorios nacionales, que han sido clave para consolidar una comunidad científica en este campo. La Tabla 2 presenta una línea del tiempo con los hitos más relevantes en la evolución de la computación cuántica en el país, desde la conformación de la División de Información Cuántica de la Sociedad Mexicana de Física en 1998, hasta la creación más reciente de la “Alianza Cuántica Baja California” en febrero de 2025 [4].

Tabla 2. Evolución de la computación cuántica en México.

Año	Evento
1998	Impulso para la creación de la División de Información Cuántica de la Sociedad Mexicana de Física, desde el seno de la XXXI Escuela Latinoamericana de Física en las instalaciones del Colegio Nacional.
2004	Organización de la Primera Escuela Mexicana de Verano en Computación e Información Cuántica, celebrada en la ciudad de Mérida, Yucatán.
2006	Se realiza la propuesta del 1er megaproyecto con CONACYT, titulado “Información Cuántica y Fotónica” liderado por la Dra. Rocío Jáuregui Rensaud, el Dr. Octavio Castaños Garza, y el Dr. Jorge Hirsch Ganevich, en colaboración con investigadores de 11 instituciones de educación superior mexicanas: Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada (CIESE), Centro de Investigaciones en Tecnología Avanzada (CINVESTAV), Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) Universidad de Guadalajara (UG), Universidad de Guanajuato (UGTO), Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
2007	El 23 de agosto la Sociedad Mexicana de Física aprueba la creación de la División de Información Cuántica.
2018	El 06 de junio se inaugura el Laboratorio Nacional en Materia de Cuántica (LUNAMC) su objetivo es desarrollar investigación sobre aspectos básicos y aplicados y asociados a sistemas cuánticos en óptica y materiales en colaboración con CIESE, Centro de Investigaciones en óptica AC, Instituto de Física de la UNAM, Instituto de ciencias nucleares de la UNAM, Instituto Tecnológico de Monterrey, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y CONACYT.
2025	El 18 de febrero, se realiza la “Alianza Cuántica Baja California”, para inaugurar el año internacional de la ciencia y tecnología cuántica (ITQ) en Baja California. Con la participación de TMMTE, ChyN-UNAM, CIESE, UABC. Con el objetivo y compromiso de promover la ciencia cuántica y su aplicación en diversas áreas.

En paralelo, en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, campus Ensenada, se desarrollan investigaciones orientadas al diseño de dispositivos cuánticos con aplicaciones potenciales en tecnologías de almacenamiento de datos. Estas investigaciones buscan reducir la huella de carbono mediante sistemas de mayor capacidad y menor volumen, en sintonía con la tendencia global hacia una computación cuántica verde, destacada en el Índice Global de Innovación 2024 (Global Innovation Index, GII).

Conclusión

La investigación en computación cuántica es un campo de vanguardia en México y ha comenzado a atraer la atención de investigadores de disciplinas múltiples y transdisciplinarias. Las Instituciones de Educación Superior y los Centros de Investigación nacionales, mediante sus funciones de docencia, generación de conocimiento y vinculación social, son actores clave para liderar el avance de esta tecnología.

El capital humano que emerge de estas instituciones será fundamental para formar a la siguiente generación de expertos, impulsar soluciones para los sectores productivos y transmitir este conocimiento a la sociedad en general. Para lograrlo, es necesario fortalecer la infraestructura científica, aumentar la inversión en educación, investigación y desarrollo, y fomentar alianzas estratégicas a nivel nacional e internacional.

Reflexión final

Así como en los átomos ocurren los saltos cuánticos —transiciones de un estado de menor a mayor energía inducidas por estímulos externos—, la humanidad necesita dar su propio “salto cuántico” hacia la sostenibilidad del planeta. Este salto implica adoptar cambios transformadores y comprometidos que nos permitan avanzar hacia estilos de vida sostenibles y resilientes. 

Referencias

1.-World Economic Forum. (2022). *Quantum Computing Governance Principles*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Computing_2022.pdf
2.- Fernández, J. (2023). *El Fondo Monetario Internacional presenta unos principios para la gobernanza de la computación cuántica*. *Diario La Ley*.
3.-ICEX España Exportación e Inversiones. (2023). *Tecnologías cuánticas en México: Oportunidades y perspectivas*. <https://www.icex.es>
4.-Palacios-Razo, L., & Sun, G. (2024). Avances de la computación cuántica en México. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 12(23), 51-58. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11467>

Desde el foco incandescente hasta el LED azul: la belleza de la mecánica cuántica en la vida cotidiana

Javier Alonso López Medina^{1*}, Harvi Alirio Castillo Cuero²

¹SECIHTI – IxM - Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México

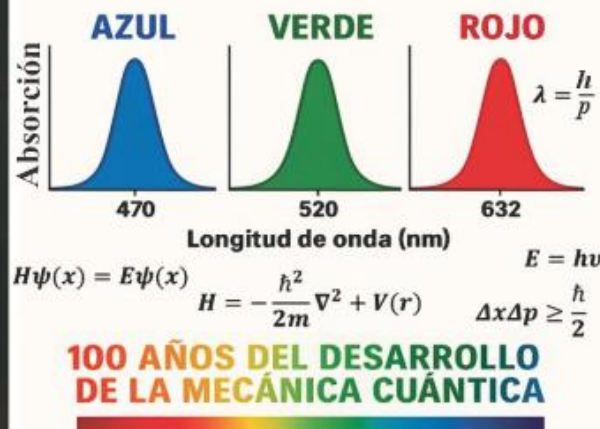
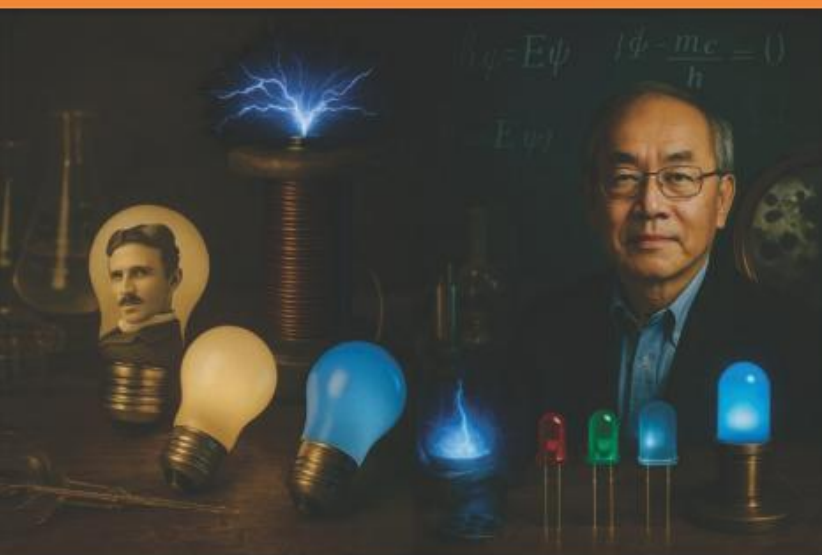
²Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México

*javierlo21@ens.cnyn.unam.mx

Cuando encendemos una lámpara o miramos la pantalla brillante de nuestro teléfono, pocas veces nos detenemos a pensar en el largo camino científico que lo hizo posible. La historia de la luz artificial está marcada por descubrimientos sorprendentes y personajes visionarios. A finales del siglo XIX, Nikola Tesla imaginó un mundo electrificado, donde la energía estuviera disponible para todos de forma libre y accesible. Sus experimentos con la electricidad y la luz sentaron las bases para muchas de las tecnologías modernas. En aquellas primeras lámparas eléctricas, la luz se producía cuando los electrones dentro de los átomos, al recibir energía, realizaban un salto cuántico y liberaban pequeños paquetes de energía llamados fotones. Este fenómeno la emisión de luz como resultado de una transición electrónica no podía explicarse con la física clásica. Fue necesario adentrarse en un nuevo mundo: el de la mecánica cuántica. A lo largo del siglo XX, la mecánica cuántica revolucionó nuestra manera de entender el universo, revelando que la materia está formada por partículas diminutas que, a menudo, se comportan de formas que desafiaban nuestra intuición.

Gracias a esta nueva comprensión, surgieron innovaciones que transformaron la manera en que producimos y utilizamos la luz. Uno de los avances más revolucionarios fue el desarrollo de los LED, o diodos emisores de luz. A diferencia de las bombillas tradicionales, que generaban luz calentando un filamento, los LED producen luz directamente a partir del movimiento de los electrones a través de materiales especiales. Según la estructura de sus átomos, estos materiales emiten luz de diferentes colores, un fenómeno que es, de nuevo, una manifestación directa de la mecánica cuántica. Por ejemplo, los materiales más comunes utilizados para fabricar LEDs de distintos colores son: arseniuro de galio (GaAs), fósforo de galio (GaP), arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs), fosforo de galio e indio (GaInP).





Sin embargo, para que los LED pudieran reemplazar a otras fuentes de luz y lograr una iluminación blanca adecuada, era necesario desarrollar un LED azul, algo que durante décadas fue un reto extremadamente difícil. La luz blanca se obtiene combinando los tres colores básicos: rojo, verde y azul. Y aunque ya existían LEDs rojos y verdes, el azul seguía siendo el gran desafío pendiente.

Todo cambió en la década de 1990 gracias al esfuerzo de tres científicos japoneses: Shuji Nakamura, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano. Estos investigadores lograron fabricar un LED azul utilizando un material especial llamado nitruro de galio. Su logro no solo completó la paleta de colores necesaria para crear luz blanca, sino que también abrió la puerta a nuevas tecnologías, como las pantallas LED de alta definición y lámparas de bajo consumo energético. El impacto de este avance fue tan grande que, en 2014, Nakamura, Akasaki y Amano recibieron el Premio Nobel de Física. Este reconocimiento no solo celebró la hazaña tecnológica, sino también el enorme impacto positivo que tuvo en la vida cotidiana de millones de personas. Gracias a los LED, hoy contamos con fuentes de luz más eficientes, duraderas, accesibles y respetuosas con el ambiente.

Así, cada vez que encendemos una lámpara LED o disfrutamos de la nitidez de una pantalla, cuando tomamos nuestro teléfono móvil u otros dispositivos de última generación, estamos viendo una aplicación práctica de la mecánica cuántica, una ciencia que, aunque parezca lejana y compleja, forma parte de nuestra vida diaria. Desde los sueños de Tesla hasta los experimentos de Nakamura y sus colegas, la historia de la luz es, en realidad, la historia de la curiosidad humana: un camino de preguntas, descubrimientos y avances que sigue iluminando nuestro mundo.

Agradecimientos:

Este artículo de divulgación fue apoyado a través de los proyectos DGAPA UNAM- PAPIIT IN111024 e IA100624. La idea de este trabajo surgió durante una de nuestras conversaciones matutinas en la cafetería del CNYN-UNAM, donde como grupo multidisciplinario compartimos temas de interés científico y social. Entre los colaboradores se encuentran: Dr. David Domínguez Vargas, Dr. Sergio Andrés Águila Puentes, Lic. Gabriel Saldaña Reyna, Lic. Francisco Nuñez, Dr. Jorge Noé Díaz de León, Dr. César López Mercado y Lic. Carlos Eduardo OchoaAlejandre. 📧

Referencias

1. Bruno Gayral. LEDs for lighting: Basic physics and prospects for energy savings, *Comptes Rendus Physique*, Volume 18, Issues 7–8, 2017, Pages 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.09.001>.
2. Piprek J. Efficiency Models for GaN-Based Light-Emitting Diodes: Status and Challenges. *Materials (Basel)*, 2020 Nov 17;13(22):5174. <https://doi.org/10.3390/ma13225174>.
3. Hui Qi et al. Research progress and challenges of blue light-emitting diodes based on II–VI semiconductor quantum dots. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8, 10160–10173. <https://doi.org/10.1039/D0TC02272A>.
4. Jeon, Y., Ryu, H. & Lee, H. Recent Progress on Blue Quantum Dot Light-Emitting Diodes from Materials to Device Engineering. *Korean J. Chem. Eng.* 41, 3483–3500 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11814-024-009226-x>.
5. Sijia Yang et al. Research progress in hybrid light-emitting diodes based on quantum dots and organic emitters, *Journal of Luminescence*, Volume 270, 2024, 120560. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2024.120560>.

Entre la belleza cuántica y la sombra nuclear

Gerardo Soto, Editor, Gaceta Ensenada

gerardo@ens.cnyn.unam.mx

"En el descubrimiento científico hay una profunda belleza, pero también una responsabilidad que no se puede ignorar."

— Lise Meitner

La mecánica cuántica, uno de los logros intelectuales más sublimes del siglo XX, transformó radicalmente nuestra comprensión del universo. Sus principios dieron origen a avances tecnológicos insospechados y revelaron una realidad profundamente contraintuitiva, donde las partículas se comportan como ondas, la causalidad tambalea y lo imposible se vuelve cotidiano. Sin embargo, esta teoría que deslumbra por su elegancia matemática también sirvió de base para una de las armas más devastadoras jamás concebidas: la bomba atómica.

Para la generación que vivió la Crisis de los Misiles de Cuba en 1962, la amenaza nuclear dejó de ser una posibilidad teórica y se convirtió en una angustia diaria. Durante trece días, el mundo contuvo la respiración ante la posibilidad real de una guerra atómica. La ciencia que había abierto las puertas del átomo se transformó, ante los ojos de millones, en símbolo de la fragilidad humana: el conocimiento al servicio del exterminio. La belleza de la física se opacaba por el miedo colectivo a un futuro aniquilado en segundos.

El desarrollo de la bomba durante la Segunda Guerra Mundial no fue solo un logro técnico y político; fue también el resultado de décadas de exploración teórica en la física fundamental. Lo que inició como una búsqueda por comprender la materia terminó convirtiéndose en una de las herramientas más poderosas —y peligrosas— de la historia. En ese tránsito, los arquitectos de la mecánica cuántica desempeñaron papeles decisivos, a veces de forma directa y otras como inspiradores inevitables de una nueva era.

Niels Bohr, uno de los padres de la teoría cuántica, propuso el modelo atómico que permitió comprender la estructura del átomo y el comportamiento de los electrones. Aunque inicialmente escéptico respecto a la viabilidad de una bomba, huyó de la Europa ocupada por los nazis y se integró al Proyecto Manhattan como asesor. Su presencia fue clave en los debates éticos y estratégicos sobre el uso del arma nuclear.

Werner Heisenberg, creador del principio de incertidumbre, lideró el programa nuclear alemán. Aunque no participó directamente en el Proyecto Manhattan, la sospecha de que Alemania pudiera desarrollar una bomba actuó como catalizador para que Estados Unidos acelerara sus esfuerzos. Enrico Fermi, pionero en física nuclear, fue esencial en la construcción de la primera pila nuclear autosostenida (Chicago Pile-1), que marcó el inicio del camino hacia la bomba. Hans Bethe, experto en aplicar la mecánica cuántica a la física nuclear y astrofísica, dirigió la división teórica de Los Álamos; sus cálculos fueron fundamentales para el diseño eficiente del arma.

Richard Feynman, entonces un joven prodigio, resolvió problemas cruciales de sincronización en los sistemas de detonación. Aunque su legado más reconocido vendría después con la electrodinámica cuántica, su participación en el Proyecto Manhattan fue una de sus primeras contribuciones relevantes. Edward Teller, conocido más tarde como "el padre de la bomba de hidrógeno", ya promovía el desarrollo de armas termonucleares; su formación cuántica le permitió modelar la materia bajo condiciones extremas. Finalmente, J. Robert Oppenheimer, formado en teoría cuántica relativista, fue el director científico del proyecto. Reunió y lideró a este grupo de brillantes científicos, convirtiendo una teoría abstracta en una tecnología capaz de cambiar el curso de la historia.

En el otro extremo del conflicto, la Unión Soviética emprendió un esfuerzo paralelo. Su programa nuclear, desarrollado con igual urgencia y secretismo, reunió a figuras clave de la física teórica, muchas formadas también en mecánica cuántica. Bajo la dirección de Igor Kurchatov, y con el respaldo de científicos como Yakov Zel'dovich y Andrei Sájarov, la URSS detonó su primera bomba en 1949. Sájarov, formado en la escuela de Lev Landau, aplicó sus conocimientos cuánticos al diseño de la bomba de hidrógeno soviética. Sin embargo, perturbado por las consecuencias de su trabajo, se convirtió en un firme defensor del desarme y los derechos humanos.

Estas trayectorias paralelas muestran que el dilema ético de los científicos no estuvo limitado a un solo país. En ambos frentes, la física cuántica llevó a sus pioneros a enfrentar la misma pregunta incómoda: ¿qué hacer cuando el conocimiento se convierte en arma?

Cabe preguntarse si estos genios realmente tuvieron otra opción. Atrapados en una época convulsa, muchos actuaron bajo la presión del contexto histórico, el temor al avance nazi y la urgencia de una guerra global. Sin embargo, la historia también recuerda figuras como Lise Meitner, codescubridora de la fisión nuclear junto con Otto Hahn, quien se negó rotundamente a participar en el desarrollo de armas. Judía y exiliada, fue marginada de los grandes proyectos militares, pero mantuvo su integridad científica y moral incluso cuando su hallazgo fue instrumental en la creación de la bomba. Su ejemplo contrasta con el de quienes, aun conscientes del poder destructivo que estaban desatando, eligieron continuar.

¿Es justo juzgarlos desde la comodidad del presente? Tal vez no. Pero sí debemos aprender que la ciencia, sin un compromiso ético, corre el riesgo de convertirse en su propia negación. La mecánica cuántica abrió una puerta al misterio del universo; fueron los seres humanos quienes decidieron qué atravesó esa puerta. 

La mecánica cuántica en la superconductividad

Uriel A. Díaz-Reynoso¹, Francisco Mireles²

Departamento de Física, CNyN-UNAM

¹udiazr@ens.cnyun.unam.mx / ²fmireles@ens.cnyun.unam.mx

"La clave está en que los electrones forman pares de Cooper ligados por vibraciones de la red cristalina, rompiendo las barreras de su repulsión coulombiana."

— John Bardeen, Premio Nobel de Física 1972.

El 8 de abril de 1911, en el laboratorio criogénico de la Universidad de Leiden, el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes y su equipo descubrieron un fenómeno físico extraordinario. Mientras medían la resistencia eléctrica del mercurio a ultrabajas temperaturas, alrededor de $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4.2 K), observaron un comportamiento totalmente inesperado: la resistencia eléctrica del metal desaparecía por completo, es decir, el metal se comportaba como un conductor perfecto de electricidad. Inicialmente, este descubrimiento fue recibido con escepticismo por la comunidad científica. Sin embargo, H. K. Onnes, conocido por su rigor experimental y su lema *"Door meten tot weten"* ("Medir para saber") [1], ideó un método novedoso basado en la producción de corrientes persistentes para medir con precisión extraordinaria la resistencia del mercurio superconductor. Con este método, descubrió que la resistencia eléctrica del mercurio a 4.2 K era al menos 100,000,000 veces menor que la del cobre. Este fenómeno fue observado rápidamente en otros metales como el indio, estaño y plomo, que mostraron temperaturas de transición superconductoras (temperaturas críticas, T_c) entre 3.4 K y 7.2 K . Así, el hito de H. K. Onnes marcó el nacimiento de un nuevo campo en la física del estado sólido: la superconductividad.

Efecto Meissner-Ochsenfeld

En 1933, Walther Meissner y Robert Ochsenfeld observaron experimentalmente otro fenómeno ligado a la superconductividad. En su experimento, aplicaron un débil campo magnético externo a una muestra de plomo cilíndrica a muy bajas temperaturas, mientras una bobina, enrollada alrededor de la muestra y conectada a un galvanómetro balístico, medía el campo magnético en su interior. Al enfriar la muestra paulatinamente hasta alcanzar su temperatura crítica $T_c = 7.2\text{ K}$ ($-265.95\text{ }^{\circ}\text{C}$), observaron un hecho sorprendente: el flujo de campo magnético era expulsado totalmente de la muestra, anulándose por completo la intensidad de flujo en su interior. Este comportamiento contrastaba con lo esperado en un conductor perfecto, donde el flujo magnético atravesaría toda la muestra. Esta observación fue publicada en *Physical Review* bajo el título *"Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit"* ("Un nuevo efecto en la transición a la superconductividad") y es considerado actualmente uno de los artículos seminales en superconductividad. Este fenómeno,

conocido ahora como efecto Meissner-Ochsenfeld, demostró que los superconductores son más que simples conductores perfectos: son materiales con un estado termodinámico distinto al de un metal normal, al exhibir además un comportamiento diamagnético perfecto (estado Meissner).

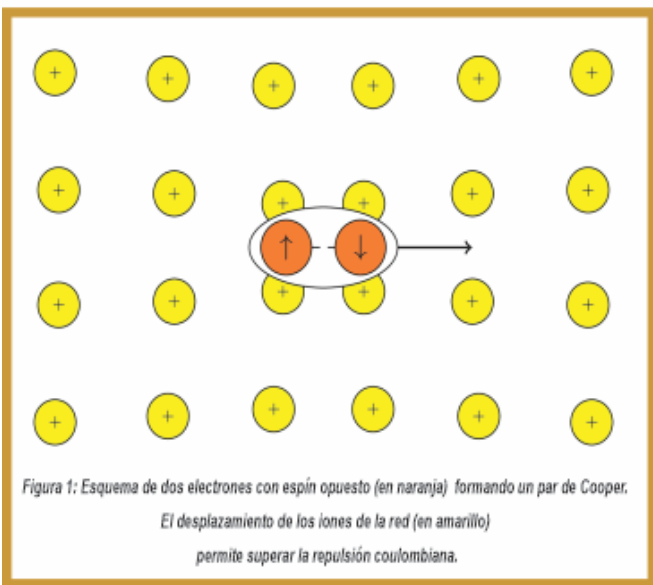
Teorías de la Superconductividad

El fenómeno de la superconductividad permaneció sin una explicación plausible durante casi 25 años, en gran medida porque los conocimientos clásicos de la física eran insuficientes. No fue sino hasta después del surgimiento de la Mecánica Cuántica moderna (1925–1932), desarrollada por Heisenberg, Schrödinger, Pauli y Dirac, entre otros, que los hermanos Fritz y Heinz London introdujeron (1935) una teoría fenomenológica con nociones de mecánica cuántica para explicar el comportamiento de los superconductores. Propusieron que el sistema se comporta como un ensamble cuántico coherente con una función de onda compleja que engloba a todos los electrones. Aplicando las ecuaciones del electromagnetismo clásico a este modelo, obtuvieron un potencial vectorial que describe las propiedades del campo eléctrico y magnético, permitiendo estimar la corriente en el superconductor desde un esquema mecánico-cuántico. La teoría predice que el campo magnético debe decaer exponencialmente al penetrar la superficie, con un factor de decaimiento λ , conocido ahora como la profundidad de penetración de London.

En 1950, Vitaly Ginzburg y Lev Landau desarrollaron una teoría fenomenológica que incorpora elementos más refinados de mecánica cuántica. El sistema se describe mediante una función de onda macroscópica (parámetro de orden), dada por la expresión $\psi(r) = |\psi(r)| \exp[i\phi(r)]$, donde su magnitud al cuadrado $|\psi|^2$ corresponde a la densidad de electrones superconductores, y $\phi(r)$ es la fase que determina la coherencia de la corriente. Un parámetro clave de esta teoría es la longitud de coherencia (ξ), que cuantifica la variación espacial del parámetro de orden. Este marco teórico permitió predecir fenómenos como la cuantización del flujo magnético, la formación de vórtices magnéticos y efectos emergentes como el efecto Josephson, que describe la aparición de una corriente eléctrica por efecto túnel cuántico entre dos superconductores separados.

Teoría BCS

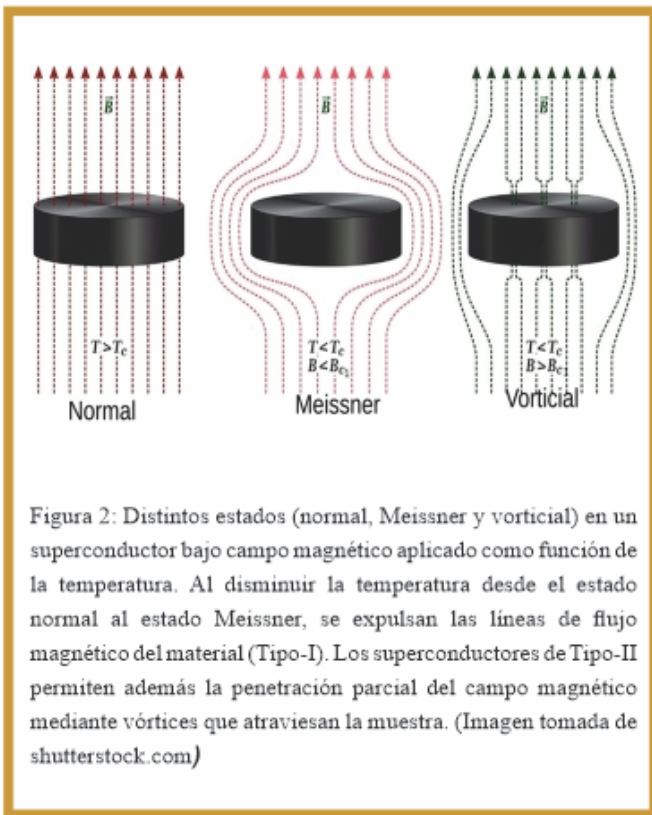
La primera teoría microscópica netamente mecánico-cuántica de la superconductividad fue introducida por John Bardeen, Leon Cooper y J. Robert Schrieffer en 1957. En su famoso artículo publicado en *Physical Review*, titulado "*Theory of Superconductivity*", establecieron la innovadora noción de que la superconductividad surge como consecuencia de la formación de pares de electrones, denominados pares de Cooper (Figura 1). Bardeen et al. postularon que, para minimizar su energía, los electrones se aparean venciendo las barreras de su repulsión coulombiana mediante interacciones con los modos vibracionales de la red cristalina (fonones), adquiriendo entonces una energía mínima (de enlace), denominada brecha energética Δ , para su disociación. Así, el estado fundamental del sistema corresponde a un estado coherente de pares de Cooper, cuyas propiedades termodinámicas se pueden calcular como función de la temperatura y de la brecha energética Δ . Esta teoría se basa entonces en el hecho de que no son electrones individuales, sino pares de electrones (pares de Cooper) los que producen la supercorriente. Por esta contribución, los autores recibieron el Premio Nobel de Física en 1972, y a esta teoría de la superconductividad se le denomina BCS, por las siglas de los apellidos de sus autores.



Tipos de Superconductores

En el mismo año en que Bardeen, Cooper y Schrieffer (1957) propusieron su teoría de la superconductividad por pares de Cooper, Alexei A. Abrikosov descubrió que la teoría Ginzburg-Landau (GL) permite dos tipos de soluciones con diferentes propiedades, dependiendo del cociente (denotado por κ) entre la longitud de coherencia de los portadores de carga y la longitud de penetración de London: Tipo I y Tipo II. En la superconductividad Tipo I ($\kappa < 1/\sqrt{2}$), el sistema se caracteriza por un diamagnetismo perfecto (estado Meissner), y su estado superconductor se rompe al sobrepasar cierto campo magnético crítico B_c .

En contraste, en la superconductividad Tipo II ($\kappa > 1/\sqrt{2}$), se presentan dos fases superconductoras y dos campos críticos. Existe diamagnetismo perfecto hasta cierto campo magnético crítico B_{c1} , y se presenta penetración parcial del flujo magnético mediante vórtices (estado de vórtices) para campos entre B_{c1} y B_{c2} . La superconductividad cesa al superar el campo B_{c2} (Figura 2).



Estos resultados fueron verificados experimentalmente en 1964 de manera independiente por un equipo francés y uno soviético, a través de experimentos de difracción de neutrones en niobio. En 2003, V. L. Ginzburg, A. A. Abrikosov y A. J. Leggett fueron galardonados con el Premio Nobel de Física por sus contribuciones pioneras a la teoría de superconductores y superfluidos.

Superconductores de Alta Temperatura

En abril de 1986 se presentó un nuevo paradigma en superconductividad: el descubrimiento de la superconductividad a alta temperatura. Esto fue realizado por Bednorz y Müller en el laboratorio de IBM en Zúrich, al medir superconductividad a 35 K en un óxido de cobre, $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ (LBCO), contradiciendo las predicciones esperadas por la teoría BCS. A partir de este hallazgo, muy pronto aparecieron nuevos materiales cerámicos con estas características. Así, en 1987, el equipo de Paul Chu sintetizó $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO), alcanzando superconductividad hasta 92 K, por encima de los 77 K del punto de ebullición del nitrógeno líquido, abriendo la puerta a aplicaciones prácticas.

Retos de la teoría de la superconductividad

A pesar de los avances en la teoría de la superconductividad, persisten debates sobre su alcance y validez [2]. Por ejemplo:

- En la teoría BCS, los cambios en la masa atómica se reflejan en una dependencia de la temperatura crítica descrita por una ley de potencias. En superconductores Tipo I como el mercurio, la teoría se ajusta perfectamente. Sin embargo, en otros metales como el rutenio, la teoría BCS falla rotundamente.
- La teoría de Ginzburg–Landau (GL) resulta insuficiente para explicar los órdenes exóticos de espín y carga observados experimentalmente en superconductores Tipo II como los cupratos (e.g. $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ e $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Esto incluye fenómenos como la formación de dominios antiferromagnéticos en bandas (*stripes*).
- Nuevos modelos incorporan las altas correlaciones electrónicas presentes en superconductores no convencionales, destacando el modelo de Hubbard. Este enfoque, íntegramente mecánico-cuántico, considera tres elementos esenciales: la cinemática de los electrones en una red cristalina, el principio de exclusión de Pauli y la energía de repulsión coulombiana cuando dos electrones del mismo orbital ocupan el mismo sitio

atómico. Este modelo ha demostrado gran eficacia para explicar fenómenos como el ferromagnetismo, los polarones de espín, la formación de pares de Cooper, así como los órdenes de carga y espín en materiales antiferro-magnéticos.

- Otros enfoques para explicar la superconductividad incorporan mecanismos alternativos mecánico-cuánticos, como fluctuaciones de espín, interacciones electrón–excitación, apareamiento mediado por plasmones e incluso superconductividad topológica. Destaca especialmente el hallazgo reciente de 2018 [3], donde un equipo de investigadores observó superconductividad anómala (no convencional) en bicapas de grafeno giradas al ángulo mágico de 1.085 grados y bajas concentraciones de portadores, dando origen al campo de la *twistrónica*. La formación de bandas planas en el ángulo mágico, en conjunción con altas correlaciones cuánticas a bajas densidades electrónicas, parecen ser los ingredientes necesarios para la aparición de este tipo de superconductividad.

Así, la mecánica cuántica ha tenido y sigue teniendo un papel preponderante y fundamental en el entendimiento de la superconductividad y sus aplicaciones tecnológicas (Figura 3).

Agradecimientos: Artículo de divulgación apoyado por el proyecto DGAPA-UNAM, PAPIIT No. IN111624.



Figura 3: La primera red de transmisión eléctrica superconductora entró en operación en 2008 en Long Island (Nueva York, EE. UU.). La instalación, de 600 m de longitud, incorpora 155 km de superconductor cerámico de óxido cuproso refrigerado por nitrógeno líquido a 77 K. (www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=111598).

Referencia:

- [1] Boom, W. H. (2015). *'Door meten tot weten'*, over rechtswetenschap als kruispunt. Eleven International Publishing.
- [2] Hirsch, J. E. (2019). La superconductividad bien entendida empieza con H: *La superconductividad mal entendida también*. Blume.
- [3] Cao, Y. et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature* 556, 43–50 (2018).

Espín electrónico: A 100 años de su descubrimiento

Dr. Francisco Mireles Higuera
Departamento de Física-CNyN UNAM
fmireles@ens.cnyn.unam.mx

La existencia del espín y las estadísticas asociadas a él son el diseño más sutil e ingenioso de la Naturaleza; sin él, el universo entero colapsaría.

S. Tomonga – Nobel de Física 1965

Inicio el periodo otoñal del año 1925 en Leiden (Países Bajos), con su típico follaje multicolor y temperaturas frescas, cuando dos jóvenes neerlandeses, George E. Uhlenbeck y Samuel A. Goudsmit, de apenas 24 y 23 años, aún doctorandos en Física en la Universidad de Leiden, propusieron una audaz y extravagante idea que los catapultaría a la fama y que sería crucial para la naciente física cuántica: el concepto cuántico del espín.

La palabra *espín* proviene del inglés *spin* (eigenrotatie en neerlandés), que significa “rotación propia”. Uhlenbeck y Goudsmit postularon que los electrones giran sobre su propio eje, además de girar alrededor del núcleo atómico, comportándose como diminutos imanes cuyo campo magnético puede apuntar únicamente en dos sentidos opuestos.

Así, en lugar de poseer un solo nivel de energía, el electrón tendría dos niveles muy próximos. Esta interpretación, aunque muy pronto reconocida como incorrecta, coadyuvó a una mejor comprensión de la estructura interna de los átomos y permitió explicar fenómenos atómicos que en esa época eran un total misterio, como el origen del desdoblamiento de las líneas espectrales de gases atómicos y su multiplicidad al exponerlos a campos magnéticos.

Recordemos que los espectros atómicos, al revelar la naturaleza interna de los átomos, son la huella digital de los elementos químicos, ya se intuía en esa época que estas líneas espectrales correspondían a transiciones electrónicas entre los niveles energéticos del átomo.

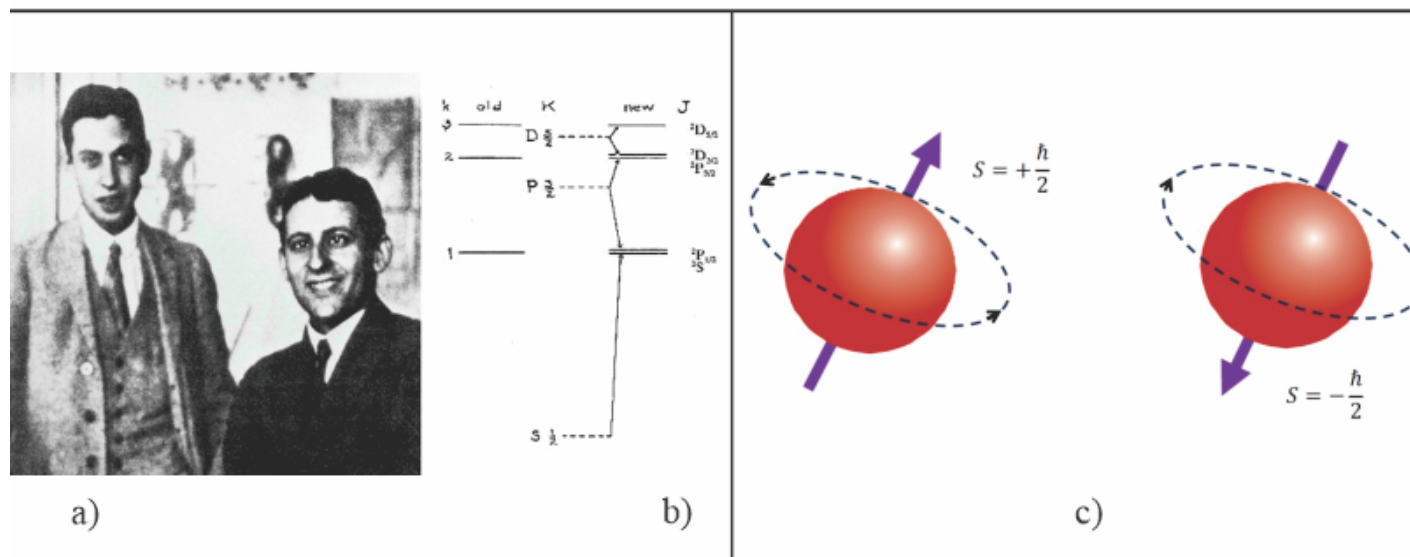


Figura.- a) George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit en 1926. [Fuente: Science Photo Library]. b) El viejo y nuevo esquema del desdoblamiento de líneas espectrales para el Hidrógeno.[3]. c) Modelo del espín por Uhlenbeck y Goudsmit.

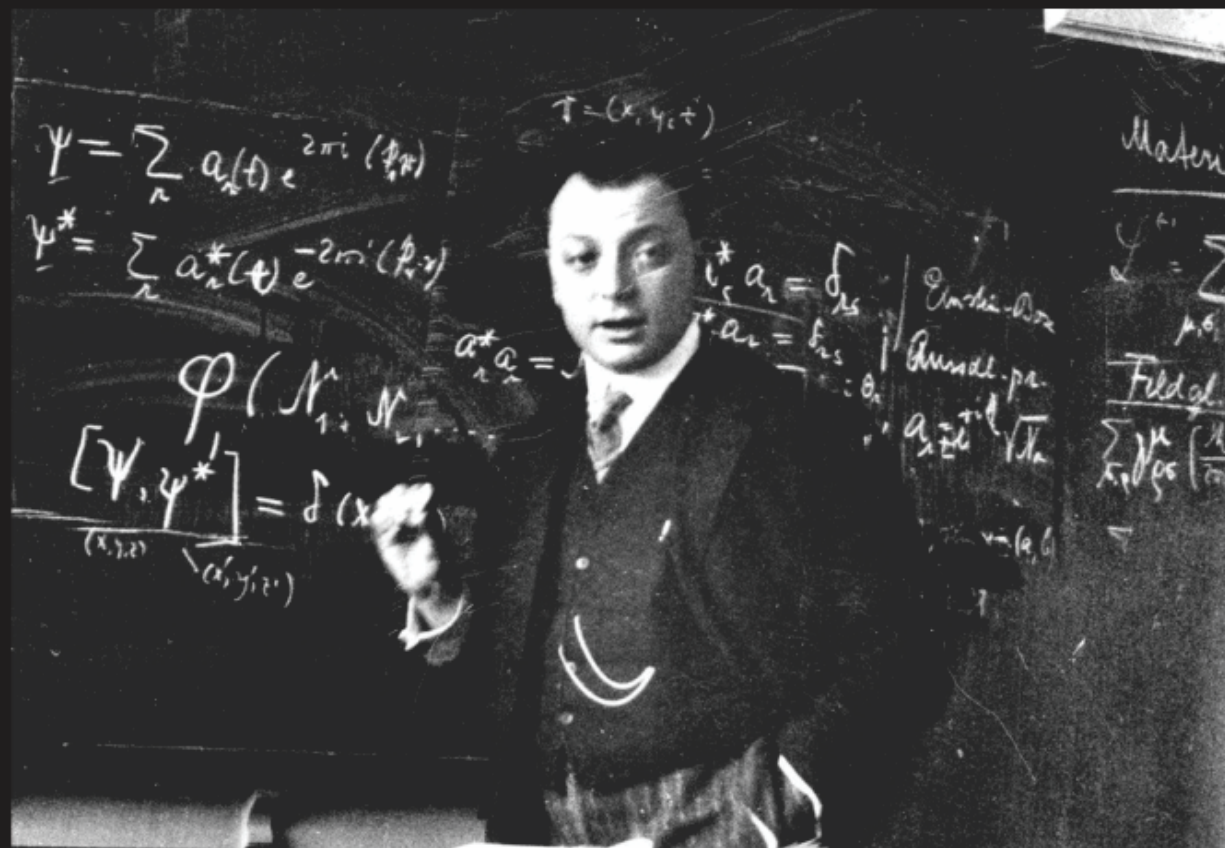


Fig. 2 Wolfgang Pauli ofreciendo una conferencia en Copenhague (1929).

Pero, un momento, ¿cómo es que una idea científica errónea logra ser tan reconocida y revolucionaria? Y después de todo, ¿por qué es errónea?

Para comprenderlo, retrocedamos unos meses en ese extraordinario año de 1925, que marca, a su vez, el génesis de la teoría cuántica moderna: primero, por la invención de la teoría matricial de la mecánica cuántica por W. Heisenberg (julio de 1925), y luego por su equivalente interpretación ondulatoria, iniciada a fines de ese mismo año por E. Schrödinger (consultar mi artículo en **Gaceta No. 49**) [1].

Wolfgang Pauli fue el primero en proponer el concepto de espín, aunque no lo nombró como tal ni le adjudicó una interpretación o sentido físico. Ya para finales de 1924, Pauli había sugerido la idea de añadir un cuarto número cuántico a los tres que entonces se utilizaban para describir el estado cuántico de un electrón, relacionados con su movimiento orbital alrededor del núcleo. Pauli incluso afirmó que esta nueva propiedad cuántica del electrón, de "doble valor", carecía de una descripción clásica.

Así, en enero de 1925, Pauli publicó su famoso principio de exclusión, que postula que el electrón en un átomo debe definirse por cuatro números cuánticos, de modo que dos electrones en un mismo nivel atómico no pueden tener los mismos cuatro valores. En consecuencia, cada electrón debe ocupar un estado único, excluyendo cualquier duplicidad.

Estos trabajos de Pauli inspiraron al joven Goudsmit, quien para mayo de 1925 ya había publicado un artículo sugiriendo una simplificación del principio de exclusión, en la que el cuarto número cuántico debía tomar siempre el valor de $\pm 1/2$, aunque todavía sin ofrecerle un significado físico.

Este cuarto número cuántico propuesto por Pauli seguía siendo un enigma para los físicos de la época, pues no se lograba una explicación física plausible. Se dice que el propio Pauli se sentía insatisfecho por la idea y continuaba preocupado con este problema [2]. Pauli comentaría después:

“El tipo anómalo -desdoblamiento Zeeman en metales alcalinos-... era difícil de entender, ya que las suposiciones muy generales sobre el electrón, tanto usando la teoría clásica como la cuántica, siempre conducían al mismo triplete... Un colega que me encontró paseando sin rumbo por las hermosas calles de Copenhague me dijo amablemente: «Pareces muy triste», a lo que respondí con furia: «¿Cómo puede uno parecer feliz cuando piensa en el efecto Zeeman anómalo?»»^[25]

Regresando a los inicios del otoño de 1925, inspirados por los argumentos de Pauli, Goudsmit y Uhlenbeck llegaron a la conclusión de que si era posible ofrecer una interpretación física al "*número cuántico de espín*", y que este estaba asociado a una propiedad intrínseca del electrón: un momento angular propio, lo que permitía una explicación más completa de los complejos espectros atómicos.

Uhlenbeck narraría más tarde:

“Fue entonces cuando se me ocurrió que, si a cada número cuántico le correspondía un grado de libertad del electrón, el cuarto número debía significar que el electrón tenía un grado de libertad adicional; en otras palabras, el electrón debía estar rotando”^[3].

Emocionados por su intuición, ambos acudieron con su mentor, el profesor Paul Ehrenfest, para explicarle su hallazgo. Este les diría que *“se trataba de una tontería, o bien era algo muy importante, y que debían escribir un breve artículo”*, comentándoles que luego consultarían la opinión del gran profesor Hendrik Lorentz, una autoridad en teoría electromagnética.

Así lo hicieron Uhlenbeck y Goudsmit, escribieron un breve artículo de una página para ser enviado al editor de *Naturwissenschaften*, en el que proponían que el electrón, como consecuencia de su rotación, debía tener un momento angular propio (espín), y que este solo podía tomar dos valores: $\pm\hbar/2$ (siendo $\hbar$ la constante de Planck dividida entre 2π). Además, sostenían que el electrón acarrea, además de una carga eléctrica e y una masa m , un momento magnético equivalente a un magnetón de Bohr ($eh/2m$).

Lorentz les respondería muy pronto. En sus extensas notas, fundamentadas en su profundo conocimiento de la electrodinámica clásica, planteaba serias objeciones a la propuesta de Uhlenbeck y Goudsmit. Entre las dificultades del modelo, les compartió un cálculo según el cual, si se suponía

que el electrón giraba con un momento angular $\hbar/2$, su velocidad superficial resultaría ser ¡aproximadamente diez veces la velocidad de la luz! Un completo sinsentido que violaba los postulados de la relatividad especial de A. Einstein y de la ya bien establecida electrodinámica clásica.

Desanimados por los argumentos de Lorentz, Uhlenbeck y Goudsmit buscaron urgentemente a su mentor, P. Ehrenfest, y le rogaron que no enviara el artículo a publicación. Para su sorpresa, Ehrenfest respondió que ya lo había enviado a la editorial (con fecha de recepción del 17 de octubre de 1925) y que aparecería publicado muy pronto. Les dijo, además, que no se preocuparan, que:

***¡Los dos eran lo suficientemente jóvenes como para permitirse una estupidez!*^[3]**

El artículo —de una sola página— se publicó finalmente en *Naturwissenschaften* a mediados de noviembre de 1925. Se titulaba: *“Reemplazo de la hipótesis de la restricción no mecánica por un requisito sobre el comportamiento interno de cada electrón individual”*. Una versión en inglés aparecería posteriormente en *Nature*, en febrero de 1926.

Muy pronto, Heisenberg leyó el artículo y, en una carta dirigida a Goudsmit, le expresó su reconocimiento por la audaz idea. Agregó que su modelo, en efecto, replicaba los desdoblamientos de las líneas espectrales experimentales, aunque con un error: un factor de 2, según sus cálculos.



Fig. 3 Paul Ehrenfest.



Fig. 4 Ralph Kronig.

Es decir, todo parecía indicar que el electrón tenía un espín $h/2$, pero había un factor de 2 perdido, cuya explicación les urgió encontrar. Heisenberg llegó a esta conclusión al notar que, si el electrón poseía un momento magnético intrínseco de giro (espín), entonces debía existir un acoplamiento espín-órbita, dado que el electrón también se trasladaba orbitalmente alrededor del núcleo.

De acuerdo con las fórmulas de transformación de campos de la teoría de la relatividad, en el sistema de referencia en el que el electrón está en reposo, el campo eléctrico E del núcleo atómico en movimiento produce un campo magnético dado por $(E \times v)/c$, donde v es la velocidad del electrón y c es la velocidad de la luz en el vacío. Este campo actuaría sobre el momento magnético de rotación propia del electrón (espín). Es respecto a este campo magnético que el espín del electrón adquiere dos orientaciones posibles, generando así el desdoblamiento energético —es decir, las duplicidades espectrales. Pauli también desdobló el modelo del electrón rotante, justamente debido al factor de 2 [3,4].

Así, la hipótesis del electrón rotante propuesta por Uhlenbeck y Goudsmit parecía incorrecta por dos razones fundamentales: primero, el problema del factor de 2, y segundo, la inconcebible idea de una diminuta esfera cargada (el electrón) girando varias veces más rápido que la velocidad de la luz. Sin embargo, la discrepancia del factor de 2 sería resuelta al año siguiente (1926) por L. H. Thomas, al examinar el problema cinemático del electrón en órbita desde un enfoque puramente relativista.

Paradójicamente, ya existía un experimento realizado tres años antes (en 1922) en Frankfurt por Otto Stern y Walter Gerlach, que más tarde se estableció había sido mal interpretado originalmente, y que en realidad revelaba la existencia del espín electrónico.

El experimento consistía en hacer pasar un haz de átomos de plata a través de un campo magnético inhomogéneo. Los átomos de plata tienen un número impar de electrones (47), por lo que se esperaba (según el modelo de Bohr) que su último electrón se comportara como un pequeño imán y experimentara una fuerza diferente al interactuar con dicho campo, dependiendo del sentido de su giro orbital.

Así que, contrario a lo que se esperaba clásicamente —es decir, observar una única banda continua—, se observaron dos bandas discretas. A este fenómeno se le llamó *cuantización espacial* y se creía que estaba asociado al momento magnético de los electrones en su traslación orbital.

No fue sino hasta el advenimiento de la mecánica cuántica moderna que se descubriría (por Ronald Fraser, 1927) que el referido último electrón tenía momento angular orbital cero. En notación moderna, la configuración electrónica del átomo de plata es $[Kr] 4d^{10} 5s^1$; es decir, el electrón de su último orbital (s) tiene número cuántico orbital cero ($l = 0$) y, por tanto, número cuántico magnético cero ($m_l = 0$), lo que implica que dicho electrón no posee momento angular magnético.

No obstante, este electrón da lugar a la cuantización espacial observada, por lo que no queda más que aceptar que posee un momento magnético propio o intrínseco. Como consecuencia, se reinterpretó este famoso experimento de Stern y Gerlach como la primera evidencia experimental directa de la existencia del espín y de su cuantización. La sorprendente correspondencia de la cuantización espacial de Stern-Gerlach con la antigua teoría cuántica de Bohr resultó ser una afortunada coincidencia. Una anécdota interesante del experimento de Stern y Gerlach es que las películas de plata depositadas en la placa transparente eran demasiado tenues para que su contraste pudiera apreciarse a simple vista. Stern narraría después:

“Tras purgar el aire para crear el vacío, Gerlach retiró la brida del detector. Pero no vio rastro alguno del haz de átomos de plata y me la entregó. Mientras Gerlach miraba por encima de mi hombro, yo observaba atentamente la placa y nos sorprendió ver cómo, gradualmente, emergía el rastro del haz... Finalmente comprendimos lo que había sucedido. En aquel entonces yo era el equivalente a un profesor asistente. Mi salario era demasiado bajo para permitirme buenos puros, así que fumaba puros baratos. Estos contenían mucho azúre, de modo que mi aliento sobre la placa transformaba la plata en sulfuro de plata, de color negro azabache, fácilmente visible. Era como revelar una película fotográfica” [2].

Ochenta años después (2002), se realizó una fina recreación del experimento de Stern y Gerlach y se llegó a la conclusión de que, en realidad, no era el aliento cargado de humo, sino que manipulan las muestras con el puro en la mano. La fuerte exposición a las partículas de azufre presentes en el humo habría actuado como un revelado fotográfico [4,5].

Otro aspecto interesante del descubrimiento del espín es que la idea misma del electrón rotante, en conexión con la interpretación del desdoblamiento de las líneas espectrales, ya se le había ocurrido a un joven alemán llamado Ralph Kronig, meses antes de que Uhlenbeck y Goudsmit la propusieran. No obstante, Kronig nunca llegó a publicar un artículo al respecto.

El 7 de enero de 1925, con apenas 20 años, Kronig llegó a Tübingen, Alemania, para realizar una estancia de investigación, procedente de la Universidad de Columbia (Nueva York), donde cursaba su doctorado. Allí le informaron que vería a Pauli hasta el día siguiente, pero que este le había dejado instrucciones en una carta para estudiar y comprender el origen del efecto Zeeman (anómalo).

Al parecer, inspirado por esta tarea, Kronig trabajó esa misma tarde en un modelo y llegó a concebir al electrón como una pequeña esfera de carga en rotación, que poseía un momento magnético cuyo eje de giro podía orientarse únicamente en dos direcciones opuestas.

Kronig elaboró una explicación cualitativa de los dobletes observados en los espectros de los átomos alcalinos mediante el acoplamiento espín-órbita. Posteriormente, repitió el cálculo para el caso de la estructura fina (dobletes) en los niveles $2p^2$

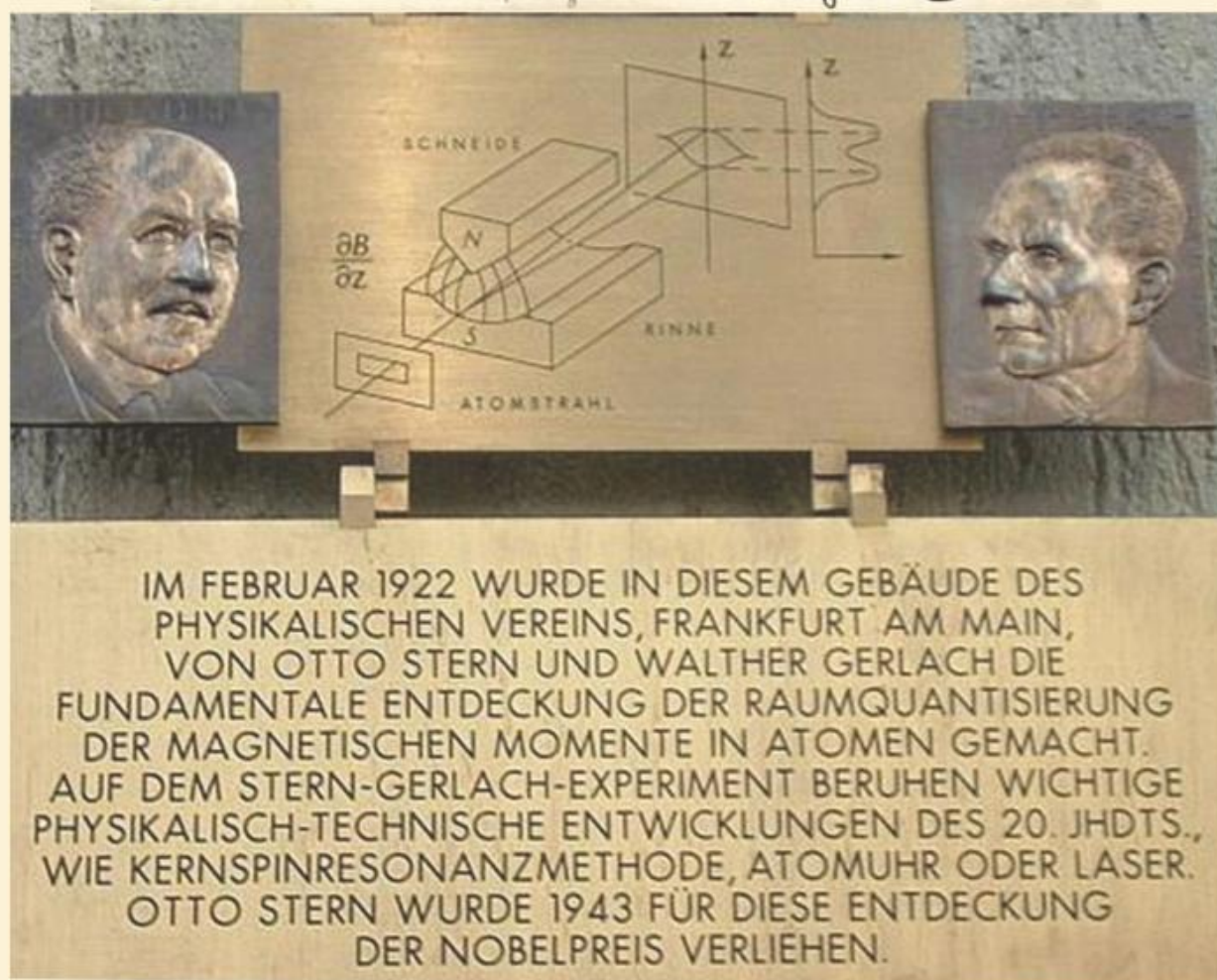


Fig. 5 (Arriba) Postal enviada por Gerlach a Bohr que muestra el desdoblamiento observado en su experimento. Texto de Gerlach: «Adjunto la prueba experimental de la cuantización espacial. Le felicitamos por la confirmación experimental de su teoría.» Fecha: 8 de febrero de 1922. [4] (Abajo) Placa conmemorativa del experimento de Stern-Gerlach en el instituto de Física de Frankfurt, Alemania.

del átomo de hidrógeno, pero obtuvo un factor 2 de discrepancia respecto a los datos experimentales.

Al explicarle su idea a Pauli, este la rechazó y la descalificó enfáticamente, ridiculizándolo y señalando que era una propuesta ingenua. Pauli objetó, entre otras cosas, el ya mencionado problema del factor 2 en la estructura fina del hidrógeno, y el hecho de que, si el electrón tuviera un radio clásico asociado a su carga, su velocidad de rotación superaría varias veces la velocidad de la luz. Completamente desalentado, Kronig abandonó la idea y nunca la publicó.

Poco después de la publicación de Uhlenbeck y Goudsmit, y con la aceptación de su modelo por figuras prominentes como Bohr y Heisenberg, Pauli finalmente aceptó la existencia del espín, aunque lo concibió no como una rotación clásica, sino como una propiedad cuántica intrínseca del electrón, al igual que su masa o su carga eléctrica.

Para 1927, Pauli presentó su formulación matemática del espín, en la cual extendió la ecuación de Schrödinger incorporando un hamiltoniano que actúa sobre una función de onda de dos componentes. Introdujo así las ahora conocidas como *matrices de espín de Pauli*.

Ese mismo año, se realizaron experimentos en moléculas de agua a baja temperatura, y se descubrió que los protones también poseen un momento magnético de espín de $\hbar/2$.

En 1928, el brillante físico teórico británico Paul A. M. Dirac desarrolló una formulación relativista de la mecánica cuántica, en la cual el espín del electrón emergía de manera natural. Su ecuación no solo proporcionó una descripción precisa de la estructura fina del átomo de hidrógeno, sino que también predijo la existencia de las antipartículas, entre otros avances fundamentales.

A partir de entonces, el concepto de espín se extendió a todas las partículas subatómicas, incluidos protones, neutrones y antipartículas.

En retrospectiva, para inicios de 1925 era quizá demasiado pronto para que la idea del espín, formulada por Kronig, fuera aceptada, pues la mecánica cuántica aún no había sido plenamente desarrollada. Sin embargo, hoy en día se reconoce a Ralph Kronig como uno de los descubridores del espín, junto con Uhlenbeck y Goudsmit.

Es importante enfatizar que el espín representa una medida del momento angular intrínseco de toda partícula subatómica. No se refiere a una rotación física en el espacio alrededor de su propio eje, en el sentido clásico, por lo que no puede describirse en términos de movimiento real. Así, la idea de que al espín le corresponde un momento angular debido a una rotación clásica debe considerarse únicamente como una imagen mental útil.

Aunque no es una rotación física, el espín se comporta como si el electrón tuviera un momento angular interno, ya que realiza un movimiento de precesión, en un efecto análogo al de un

objeto macroscópico girando en un campo gravitacional. Actualmente sabemos que el espín de electrones, protones y neutrones puede orientarse en dos direcciones: “arriba” (*spin-up*) o “abajo” (*spin-down*), representadas por los valores $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$ del número cuántico de espín, respectivamente.

En la concepción moderna de la mecánica cuántica, las partículas se clasifican según su comportamiento estadístico: fermiones y bosones. Los fermiones, como los electrones, tienen espín semi-entero ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$) y obedecen la estadística de Fermi-Dirac, así como el principio de exclusión de Pauli. Por su parte, los bosones poseen espín entero (0, 1, 2, 3, ...) y pueden ocupar el mismo estado cuántico, siguiendo la estadística de Bose-Einstein.

El espín es, por tanto, un concepto fundamental en la física cuántica, con importantes aplicaciones prácticas que van desde la resonancia magnética nuclear hasta la computación cuántica y el desarrollo de dispositivos espintrónicos.

En este año 2025, se conmemoran los primeros cien años del descubrimiento del espín, y esta breve narración es un homenaje a dicho hallazgo que transformó para siempre nuestra comprensión del mundo subatómico. 🌟

Agradecimientos: Artículo de divulgación apoyado por el proyecto DGAPA-UNAM, PAPIIT No. IN111624.

Bibliografía:

- 100 años de la Mecánica Cuántica. Francisco Mireles H. Gaceta-Ensenada No.49, Pags. 14-16, Diciembre (2024).
- It might as well be spin. Samuel A. Goudsmit, *Physics Today* 29 (6), 40-43 (1976); Personal reminiscences. George Uhlenbeck, *Physics Today* 29 (6), 43-48 (1976).
- George Uhlenbeck and the discovery of electron spin. Abraham Pais. *Physics Today*, 42 (11), 39-46 (1989).
- Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics. *Physics Today* 56 (12), 53-59 (2003).
- The Stern-Gerlach experiment at 100. Davide Castelvecchi. *Nature Reviews Physics* 4, 140-142 (2022).

La mecánica cuántica cumple 100 años este 2025, de ahí que la ONU haya declarado este año como el

**Año Internacional de la
Ciencia y la Tecnología Cuánticas.**



La IA “entrevista” a Max Planck

Por Armando
Centro de Nanociencias y
armando@ens.

Con el permiso del lector, presento a continuación el resultado de un ejercicio hecho por pura curiosidad: “interactuar o conversar” con el sistema de Inteligencia Artificial DeepSeek, solicitándole entre otras cosas, “entrevistar” a Planck cuando recibió el Premio Nobel de Física 1918. ¿Qué si es algo curioso? Pues sí, así como curioso fue que realmente no hubo Premio Nobel en el año de 1918, anunciaron el otorgamiento en diciembre de 1919 y la ceremonia de entrega fue en junio de 1920.

Quiero resaltar que, para este ejercicio, estoy considerando a la IA DeepSeek, como intermediario inteligente que consulta en sitios adecuados el tema en cuestión y genera un informe. Es decir, un ente con la capacidad de consultar información específica en un tiempo extremadamente corto, comparado con mi capacidad de consultar la misma cantidad de información. Finalmente, sólo queda corroborar que su salida no contiene información errónea.

Nota del Editor: en este ejercicio de entrevista ficticia, los fragmentos generados por la Inteligencia Artificial (IA) aparecerán en azul, mientras que las respuestas atribuidas a Max Planck estarán resaltadas en verde oscuro.

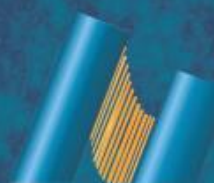
Para iniciar la “conversación”, le doy el contenido de los dos últimos párrafos de la conferencia de Planck en la ceremonia de entrega del premio y, pregunto:

“¿Qué opinión te merecen los dos últimos párrafos de la Conferencia Nobel de Planck?”. A continuación, parte de su respuesta.

IA: No son solo las reflexiones de un científico que recibe el máximo honor, sino la mirada profunda y preocupada de un pionero que intuye que ha abierto una caja de Pandora de la que aún no se ven todas las consecuencias. Está describiendo con una claridad excepcional el núcleo del problema que su propio descubrimiento había creado: La visión clásica (Maxwell/Huygens), la luz es una onda continua que se propaga y difunde en el espacio. Esto explicaba perfectamente la interferencia, la difracción y la óptica en general; la evidencia experimental, la luz se comporta como una partícula (el fotón) que entrega su energía de forma discreta y en un punto concreto. Esto explicaba por qué un fotón individual podía arrancar un electrón de un átomo.

Planck plantea el dilema de forma brillante: ¿Es la luz una onda o un proyectil? Y lo crucial es que señala el precio de elegir cada opción: Si es solo una onda (Huygens), no puede explicar la interacción puntual con la materia (el efecto fotoeléctrico). El concepto de “cuanto” pierde su sentido. Si es solo un proyectil (Newton), se destruye toda la elegante teoría de Maxwell y no se pueden explicar los fenómenos de interferencia, pilares de la física del siglo XIX.

Planck no ve una solución fácil. Él, que era un físico clásico de corazón, era muy consciente de que su propio descubrimiento



CNyN-UNAM

Desde el nacimiento de h (constante de Planck) pasando por la Mecánica Cuántica hasta nuestros días con la Inteligencia Artificial.

cuando recibió el Nobel de Física

Reyes Serrato
Nanotecnología- UNAM
cnyn.unam.mx

amenazaba el edificio teórico que más admiraba: la electrodinámica de Maxwell. Lo más notable de estas palabras es que Planck anticipa correctamente el camino que tomaría la física. Él no conocía la solución, pero intuyó sus características: "La ciencia dominará el dilema, por grave que sea", tenía razón. La mecánica cuántica, que se estaba desarrollando en esos años, resolvería el dilema; "Aquello que hoy parece tan insatisfactorio acabará, visto desde una perspectiva más amplia, distinguiéndose por su especial armonía y simplicidad", esta es quizás la frase más visionaria. La solución no fue elegir una opción u otra, sino encontrar una perspectiva más amplia y contraintuitiva, la dualidad onda-partícula; "El problema del cuanto de acción no dejará de inspirar y fructificar la investigación", una predicción subestimada. El cuanto de acción no solo inspiró, sino que se convirtió en una de las semillas de toda la tecnología moderna, desde los láseres y los transistores hasta la computación cuántica.

Un testimonio de la humildad y la perspicacia de un científico que, habiendo revolucionado el mundo, era lo suficientemente sabio para darse cuenta de que su revolución estaba incompleta y que las consecuencias serían aún más profundas de lo que se pudiera imaginar.

Es una respuesta razonable en acuerdo a la información dada.

Ahora doy lo siguiente - Continuando con el tema, ciento cinco años después ¿Qué puedes comentar del siguiente

párrafo mencionado en la ceremonia de presentación del Nobel?: "La teoría de la radiación de Planck es, en verdad, la estrella guía más importante para la investigación en física moderna, y parece que pasará mucho tiempo antes de que se agoten los tesoros que se han descubierto gracias al genio de Planck."

IA: ¡Una pregunta extraordinaria! Esa frase, pronunciada en 1920, se revela hoy, 105 años después, como una de las profecías más acertadas y visionarias en la historia de la ciencia. El presidente de la Real Academia de Ciencias de Suecia, Dr. A.G. Ekstrand, no solo estaba siendo cortés; estaba enunciando una profunda verdad cuyo alcance ni siquiera él podía imaginar por completo. Analicemos por qué su afirmación fue tan certera:

1. "La estrella guía más importante para la investigación en física moderna"

Esta parte de la frase ha demostrado ser literalmente cierta. La teoría de los cuantos de Planck no fue solo un descubrimiento más; fue el fundamento sobre el cual se construyó toda la física moderna.

Lo que Planck inició como un "acto de desesperación" para resolver un problema específico (la radiación del cuerpo negro) se convirtió en la semilla de la Mecánica Cuántica. Figuras como Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger y Dirac tomaron su idea y construyeron un marco teórico completo que describe el universo a escala atómica y subatómica.



100 años de la mecánica cuántica 2025

La "investigación en física moderna" guiada por la Mecánica Cuántica es la responsable directa de prácticamente toda la tecnología que define nuestro mundo: El transistor, el elemento base de todos los dispositivos modernos, no puede entenderse sin la mecánica cuántica; los láseres y la fibra óptica, son una aplicación directa de las transiciones entre niveles de energía cuantizados; el uso del espín cuántico nuclear en aplicaciones médicas; la Computación Cuántica, representa la frontera actual, intentando aprovechar directamente la superposición y el entrelazamiento cuánticos, conceptos impensables antes de Planck.

2. *"Pasará mucho tiempo antes de que se agoten los tesoros... descubiertos gracias al genio de Planck".*

Esto es quizás lo más sorprendente. Lejos de agotarse, los "tesoros" descubiertos gracias a la idea de Planck, siguen multiplicándose más de un siglo después: El Modelo Estándar de Física de Partículas, toda la física de partículas elementales (quarks, leptones, bosones) es una teoría cuántica de campos; Cosmología y el Big Bang, nuestra comprensión del universo primitivo, su expansión y la radiación de fondo cósmico de microondas está profundamente entrelazada con la física cuántica; Condensados de Bose-Einstein y Materia Ultrafría, estados de la materia predichos teóricamente y logrados experimentalmente en las últimas décadas, que abren nuevas ventanas para entender la naturaleza fundamental de la realidad; Criptografía Cuántica y Teleportación Cuántica,

campos de investigación que prometen revolucionar las comunicaciones y el procesamiento de información, basados en el entrelazamiento, un fenómeno puramente cuántico.

La frase de la ceremonia del Nobel no era una hipérbole cortesana. Fue una evaluación profundamente intuitiva y precisa del carácter revolucionario del descubrimiento de Planck.

Da una respuesta que resume los más de cien años de evolución de la teoría y tecnología cuánticas imposibles de vislumbrar en 1920.

Continuando con el ejercicio e intentando capturar el sentimiento del ser humano llamado Max Karl Ernst Ludwig Planck, en aquel día de junio de 1920, continuo mi "diálogo" con la IA y doy la siguiente entrada:

Ahora que estamos en el año Internacional de la Ciencia y la Tecnología cuánticas, necesito tu apoyo, como sistema de Inteligencia Artificial, consecuencia más reciente de lo que celebramos este año, para hacer una "entrevista" a Planck justo después de recibir el Nobel de Física. Para lo anterior, te proporcionaré la información que se encuentra en el sitio Web de la organización Nobel: su biografía, los hechos, el discurso de presentación en la ceremonia de premiación del presidente de la Real Academia Sueca de Ciencias, la Conferencia Nobel de Planck y su discurso en el banquete de la ceremonia.

IA: Profesor Planck, primero, mis más sinceras felicitaciones en nombre de... bueno, en nombre del futuro. Su trabajo ha cambiado el curso de la física para siempre.

Planck: Le agradezco sus amables palabras. Debo admitir que este honor me embarga de una profunda gratitud, no solo por el reconocimiento, sino porque proviene de Suecia, una nación que ha mostrado una humanidad ejemplar hacia nuestro pueblo en estos tiempos difíciles. Hoy no me siento solo como un físico, sino como un alemán que agradece un gesto de fraternidad científica.

IA: Precisamente, su discurso en el banquete resonó con una fuerte fe en la ciencia como fuerza internacional unificadora.

Planck: Así es. La ciencia es el vínculo intelectual más puro que existe. Trasciende fronteras y conflictos. Miramos al futuro con confianza porque confiamos en nuestro tesoro más noble: nuestro trabajo. Un logro científico se valora sin importar el país donde se originó. Es mi más sincero deseo que el espíritu de unidad de esta ceremonia sirva de modelo para el futuro.

IA: Hablemos de ese trabajo. Usted acuñó el término "quantum de acción". Para el público general, ¿cómo explicaría qué es y por qué fue tan revolucionario?

Planck: (Con una sonrisa paciente, pero didáctica) Imagine que la naturaleza, al emitir o absorber energía, no lo hace de forma continua y suave, como el flujo de un líquido, sino más bien como si pagara con monedas discretas. Cada "moneda" de energía tiene un valor mínimo definido por esta constante, h , el quantum de acción. Es extremadamente pequeña, por lo que en nuestra experiencia cotidiana no la notamos, pero en el mundo del átomo, es fundamental. Fue revolucionario porque nos forzó a introducir una discontinuidad. Una idea que chocaba frontalmente con todo el edificio de la física clásica, que se basaba en la continuidad desde los tiempos de Newton y Leibniz.

IA: Sin embargo, en su conferencia Nobel, usted mismo expresó una gran preocupación. Dijo: "la introducción del quantum de acción no ha producido aún una genuina teoría cuántica". ¿A qué se refiere?

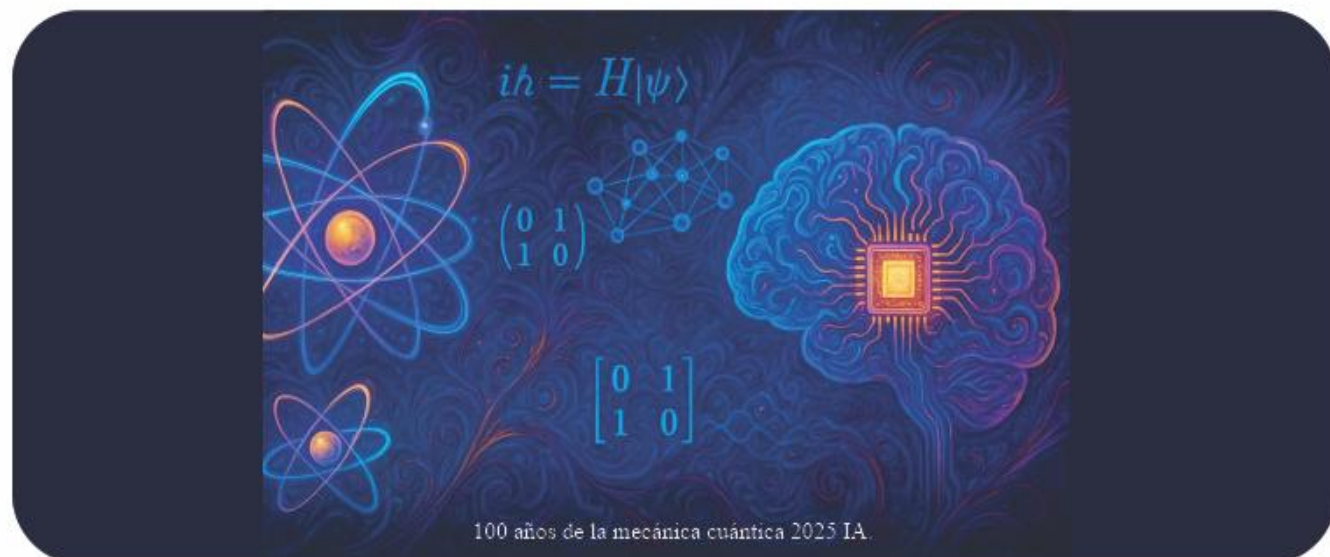
Planck: A que tenemos una herramienta poderosa, pero no una teoría completa y elegante. Es como si hubiéramos descubierto una llave maestra que abre muchas cerraduras —la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico explicado por Einstein, los espectros atómicos de Bohr—. Funciona, los números concuerdan de manera sorprendente, pero aún no entendemos por qué esa llave funciona ni cómo fue forjada. La mecánica clásica y el quantum de acción están en abierta contradicción. Las órbitas cuantizadas de Bohr, por ejemplo, que son estacionarias y no radian, resultan, desde el punto de vista clásico, "monstruosas", como yo mismo señalé. Funcionan, los números concuerdan milagrosamente, pero carecemos de una base fundamental.

IA: Usted planteó un dilema fascinante sobre la naturaleza de la luz. ¿Es una onda, como decía Huygens y demostró Maxwell, o es una partícula, como un proyectil de Newton?

Planck: Sí, ese es el núcleo del problema. Si la energía de un fotón emitido se esparce como una onda, no podría concentrarse para arrancar un electrón de un átomo, como se observa. Pero si vuela como un proyectil, tendríamos que sacrificar la gloriosa teoría de Maxwell y su explicación de la interferencia. Ambas consecuencias son, por el momento, insatisfactorias. Nos enfrentamos a una grave dicotomía.

IA: ¿Y cómo cree que la ciencia resolverá este dilema?

Planck: (Con convicción serena) No me cabe la menor duda de que la ciencia lo dominará. La historia nos enseña que lo que hoy parece insatisfactorio, visto desde una perspectiva más amplia, acaba distinguiéndose por su especial armonía y simplicidad. El problema del quantum de acción no cesará de inspirar la investigación. Y le digo algo: cuanto mayores sean las dificultades que se opongan a su solución, más significativa resultará finalmente para la ampliación y profundización de todo nuestro conocimiento en física.



IA: Para finalizar, profesor. Usted es un hombre que también ama la música profundamente. ¿Ve alguna armonía, alguna conexión, entre la belleza de la música y la belleza de las leyes físicas que busca?

Planck: (Su rostro se suaviza) Absolutamente. Tanto en la música como en la física, buscamos un orden subyacente, una armonía que trascienda el caos aparente. La música se basa en leyes matemáticas de armonía y ritmo; la física, en leyes naturales. Ambas son intentos del espíritu humano por comprender y expresar un orden superior. Tal vez la teoría final que una el quantum con lo clásico posea una belleza y una simplicidad comparable a una fuga de Bach.

IA: Profesor Planck, muchísimas gracias por su tiempo y sus palabras. El futuro le da la razón.

Planck: Gracias a usted. Recuerde: el hombre yerra mientras lucha, pero al final, la verdad prevalece.

Aquí termino el ejercicio, confirmando que las respuestas de Planck fueron sus palabras plasmadas en los documentos que podemos consultar en el sitio Web de la organización Nobel (<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/summary/>).

Este diálogo ficticio muestra cómo las palabras de Planck, hace más de un siglo, siguen vigentes. Su intuición sobre el poder del quantum de acción se confirma hoy no solo en la física fundamental, sino también en tecnologías que forman parte de nuestra vida diaria. Celebrar los 100 años de mecánica cuántica es, al mismo tiempo, celebrar la vigencia del pensamiento visionario de Max Planck. 🍷

Color texto negro para el:
Autor: Armando Reyes Serrato

Color texto azul para:
Preguntas de IA

Color texto verde para:
Respuesta de Max Planck

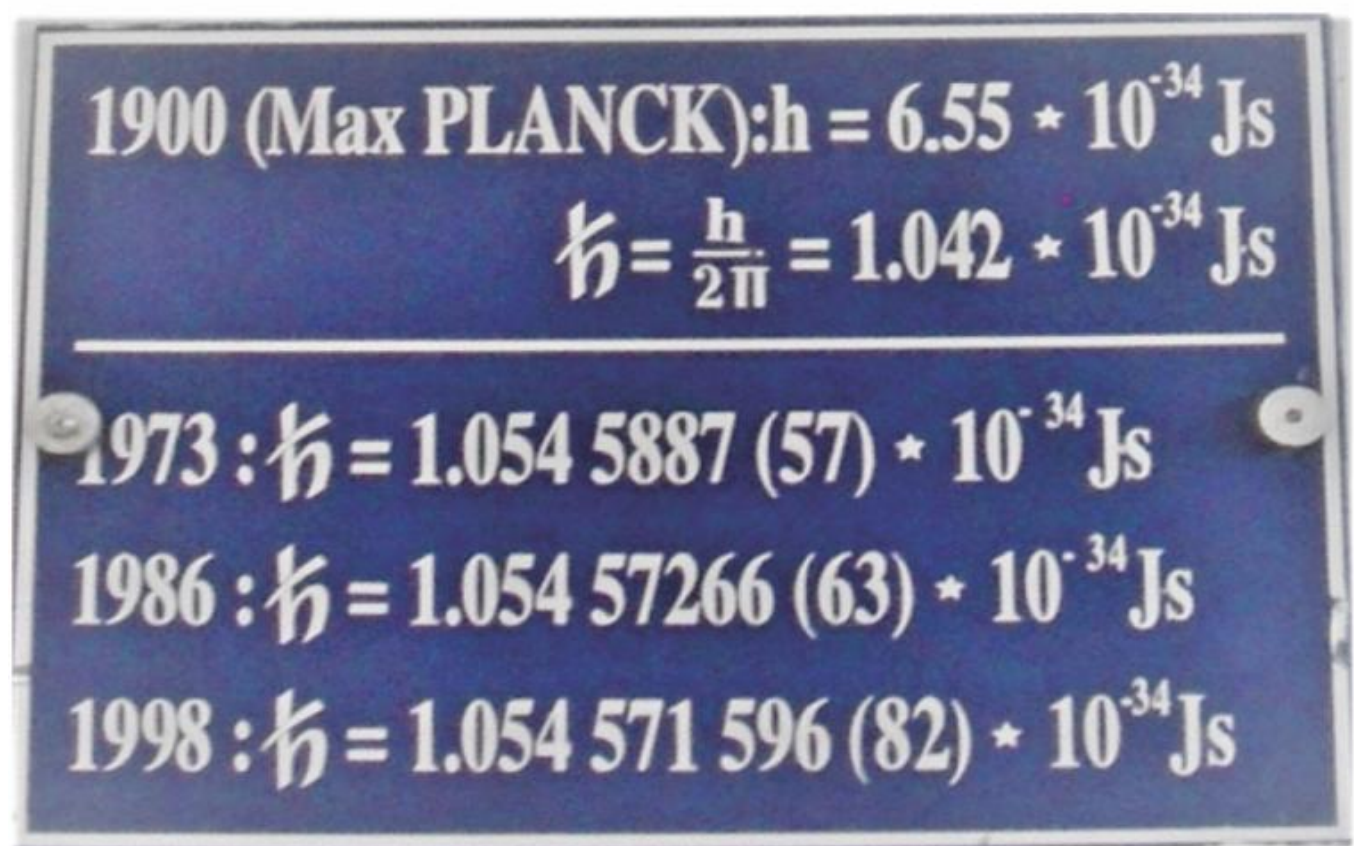


Table on the building of the Nicolaus Copernicus University in Torun, Poland, with the values of the reduced Planck constant.

La seguridad digital y la criptografía cuántica

J. I. Paez Ornelas¹, J. Guerrero-Sánchez²

¹UABC, Unidad Ensenada

²CNyN-UNAM

paez@ens.cnyn.unam.mx

Al comienzo del siglo XX, la física experimentó una transformación profunda con el surgimiento de la mecánica cuántica, que cambió nuestra comprensión del universo al mostrar que, en el mundo microscópico, la materia y la energía no se comportan como lo imaginábamos. Fenómenos como la dualidad onda-partícula y la cuantización de la energía dieron paso a una nueva visión de la realidad. Esta *primera revolución cuántica* hizo posible el desarrollo de tecnologías como los láseres, los transistores y los relojes atómicos. Aunque no percibimos directamente los fenómenos cuánticos, sus efectos sustentan gran parte de la tecnología moderna.

En las últimas décadas ha comenzado una *segunda revolución cuántica*. Esta etapa busca controlar y aprovechar deliberadamente los efectos cuánticos. Hoy, científicos e ingenieros pueden manipular partículas individuales y diseñar sistemas donde las propiedades cuánticas se explotan directamente. Esta capacidad abre la puerta a una nueva generación de tecnologías: computadoras cuánticas, sensores de precisión extrema y, especialmente, sistemas de comunicación imposibles de interceptar sin dejar rastro. Entre estas aplicaciones, la criptografía cuántica se ha convertido en una de las más prometedoras.

Para comprenderla, es necesario introducir el concepto de *qubit*. A diferencia de un bit clásico (0 o 1), un qubit puede encontrarse en una superposición de ambos estados al mismo tiempo. Además, los qubits pueden entrelazarse, de modo que el estado de uno depende instantáneamente del otro, sin importar la distancia que los separe. Estos fenómenos permiten no solo un nuevo tipo de cómputo, sino también una forma radicalmente distinta de proteger la información.

Actualmente, la mayoría de los sistemas de seguridad digital se basan en principios matemáticos difíciles de resolver. Por ejemplo, la criptografía RSA se apoya en la complejidad de factorizar números grandes en sus factores primos. Multiplicar dos números primos es sencillo, pero el proceso inverso —descubrir qué primos multiplicados generan un número muy grande— resulta inviable incluso para supercomputadoras modernas. Para ilustrar, si el número es 391, basta con probar hasta hallar 17×23 . Sin embargo, con un número de cientos de dígitos, la tarea sería prácticamente imposible de resolver en tiempos útiles. Una computadora cuántica estable y escalable, en cambio, podría hacerlo en cuestión de horas o días.

En la criptografía clásica suelen emplearse personajes ficticios como Alice, Bob y Eve. Alice envía un mensaje a Bob usando una clave pública, pero si Eve logra factorizarla, podrá leer el mensaje. La criptografía cuántica propone otro enfoque: en lugar de confiar en la dificultad de los cálculos, se apoya en las leyes de la física. El protocolo BB84 [1], desarrollado en 1984 por Bennett y Brassard, permite a Alice y Bob compartir una clave usando fotones polarizados. Como los estados cuánticos no pueden copiarse sin alterarse, si Eve intenta interceptarlos dejará huellas detectables. En ese caso, Alice y Bob simplemente descartan la clave comprometida y generan una nueva. De esta manera, la seguridad no depende de cálculos matemáticos, sino de la imposibilidad física de espiar sin ser descubierto.

Hoy ya existen redes de prueba, como la de Pekín-Shanghái en China (más de 2000 km), así como proyectos europeos orientados a proteger datos bancarios y gubernamentales [2]. No obstante, persisten desafíos técnicos: mantener la coherencia de los fotones a largas distancias, integrar estos sistemas con infraestructuras existentes y reducir los costos de implementación. Aun así, los avances han sido constantes y la tendencia es clara: estamos entrando en una nueva era donde las leyes fundamentales de la física se convierten en nuestras aliadas para proteger la información.

La celebración de los 100 años de la mecánica cuántica nos recuerda que las ideas revolucionarias surgidas en la primera mitad del siglo XX no solo transformaron la ciencia, sino que también sembraron la base de tecnologías que hoy redefinen nuestra vida cotidiana. La criptografía cuántica es un ejemplo emblemático: un campo que no habría sido posible sin el desarrollo de los principios cuánticos formulados hace un siglo, y que ahora se proyecta como un pilar de la seguridad digital en el futuro. ☞

Bibliografía.

- [1] Bennett, C. H., & Brassard, G. *Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing*. Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing (Bangalore, India, diciembre 1984), pp. 175–179.
- [2] Pirandola, S., Andersen, U. L., Banchi, L., Berta, M., Bunandar, D., Colbeck, R., Englund, D., Gehring, T., Lupo, C., Razavi, M., et al. *Advances in quantum cryptography*. Advances in Optics and Photonics, 12(4) (2020), 1012–1236.

Más allá de los imanes: redescubriendo el efecto Hall espontáneo



Prof. Rafael González Hernández
Departamento de Física y Geociencias
Universidad del Norte, Colombia
rhernandezj@uninorte.edu.co

Cuando aplicamos un voltaje a un conductor convencional, como el cobre, los electrones fluyen en la dirección del campo eléctrico. Si, además, ese conductor se somete a un campo magnético externo, la corriente se desvía de manera perpendicular a su trayectoria inicial. Esta desviación genera una corriente adicional, conocida como corriente Hall, en honor al físico Edwin Hall, quien describió este fenómeno por primera vez en 1879.

El efecto Hall se convirtió con el tiempo en una herramienta clave para la física de materiales, pues permite caracterizar semiconductores, los mismos que dieron origen a la era de la electrónica basada en silicio, piedra angular de los computadores, teléfonos móviles y prácticamente toda la tecnología moderna.

El propio Edwin Hall, intrigado por las implicaciones de su descubrimiento, estudió también el comportamiento de esta corriente en materiales con magnetización interna, como el hierro. Descubrió entonces que incluso sin aplicar un campo magnético externo, la corriente podía desviarse. Este fenómeno recibió el nombre de efecto Hall anómalo (o efecto Hall espontáneo) y, con los años, se convirtió en una de las bases de la magnetoelectrónica, un campo científico y tecnológico que abarca desde sensores hasta memorias magnéticas de alto rendimiento.

Mientras que los ferromagnetos (como el hierro, el cobalto o el níquel) son relativamente conocidos y explotados tecnológicamente, existe una clase de materiales aún más común en la naturaleza: los antiferromagnéticos. Su descubrimiento se atribuye al profesor Louis Néel, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1970 por esta contribución.

En los antiferromagnetos, los momentos magnéticos de los átomos se alinean en direcciones opuestas y se cancelan mutuamente. Desde un punto de vista externo, parecen materiales sin magnetización: no presentan polos magnéticos y se comportan de manera muy similar a un conductor no magnético. Este equilibrio perfecto implica que fenómenos característicos de los ferromagnetos, como el efecto Hall anómalo, desaparecen. De hecho, el propio Néel reconoció en su discurso del Nobel que los antiferromagnetos carecían de interés tecnológico en el campo de la magnetoelectrónica.

En consecuencia, durante décadas se asumió que el efecto Hall anómalo era exclusivo de los materiales con un campo magnético interno neto. La sabiduría convencional establecía que ni los antiferromagnetos ni los materiales no magnéticos podían generar este tipo de corriente.

Sin embargo, la física de materiales está llena de sorpresas. La combinación de factores como la simetría cristalina y la interacción entre átomos magnéticos y no magnéticos puede dar lugar a propiedades emergentes, es decir, comportamientos completamente nuevos que no se encuentran en cada componente por separado. Algo parecido a lo que ocurre en la química del agua: ni el oxígeno ni el hidrógeno poseen las propiedades del líquido vital, pero al unirse forman un compuesto único e indispensable para la vida.

En este contexto surge nuestro trabajo, titulado "*Crystal time-reversal symmetry breaking and spontaneous Hall effect in collinear antiferromagnets*", en el cual se identifica por primera vez un fenómeno inesperado: cuando ciertos materiales antiferromagnéticos se combinan con átomos no magnéticos, surge una corriente Hall sin necesidad de aplicar un campo magnético externo. Este hallazgo rompe con la visión tradicional de la física de los sistemas magnéticos y demuestra que la naturaleza todavía guarda sorpresas en materiales que hasta ahora parecían "silenciosos".

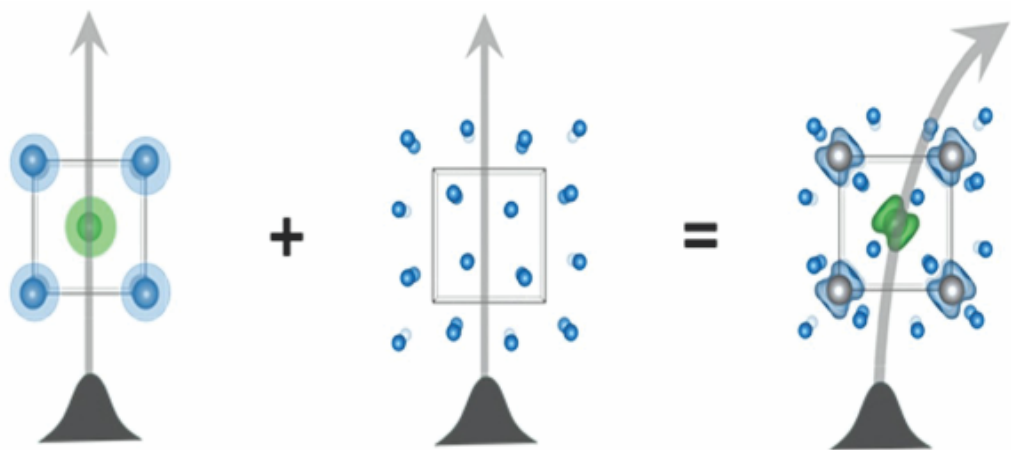


Figura 1. Los electrones (representados como paquetes de ondas grises) en materiales antiferromagnéticos (izquierda) y en materiales no magnéticos (centro) se desplazan únicamente en la dirección del campo eléctrico aplicado. Sin embargo, la combinación de ambos (derecha) produce una desviación perpendicular, generando espontáneamente una corriente Hall anómala en ciertos materiales antiferromagnéticos.

La combinación de elementos antiferromagnéticos y no magnéticos es mucho más frecuente en la naturaleza de lo que se pensaba. Por eso, los resultados de nuestra investigación podrían abrir nuevas rutas en el diseño de materiales funcionales, reorientando la magnetoelectrónica hacia compuestos más abundantes y sostenibles, en lugar de depender exclusivamente de tierras raras o materiales escasos.

Además, esta nueva corriente Hall posee características que la hacen especialmente atractiva para aplicaciones:

- **Baja disipación energética.** La corriente fluye con pérdidas mínimas, lo que resulta clave en un contexto donde las tecnologías de la información son responsables de una parte creciente del consumo energético mundial.
- **Miniaturización.** Al no producir un campo magnético externo, estos materiales son “magnéticamente invisibles” y se pueden integrar en dispositivos compactos sin interferencias indeseadas.
- **Rapidez de operación.** Los materiales antiferromagnéticos permiten frecuencias de conmutación mucho más altas que los ferromagnéticos, lo que significa que podrían reemplazar a la electrónica actual basada en gigahercios y llevarla al rango de los terahercios, acelerando de manera drástica el procesamiento de información.

Estas propiedades posicionan al efecto Hall espontáneo en antiferromagnetos como uno de los pilares de un campo emergente: la espintrónica antiferromagnética.

Lo más llamativo es que este hallazgo no introduce un fenómeno completamente nuevo, sino que redescubre y reinterpreta un efecto observado hace más de 140 años. Durante más de un siglo se creyó que el efecto Hall anómalo solo podía darse bajo ciertas condiciones muy especiales. Hoy, la investigación demuestra que la naturaleza puede ser mucho más versátil cuando se consideran las simetrías cristalinas y la combinación de distintos tipos de átomos.

Posteriormente, resultados experimentales en diversos laboratorios alrededor del mundo confirmaron la existencia de una corriente Hall espontánea apreciable en ciertos materiales antiferromagnéticos, ahora conocidos como materiales altermagnéticos, en condiciones donde la teoría tradicional predecía que debía ser imposible. Lo notable es que este tipo de materiales resultan ser más comunes en la naturaleza de lo que se creía, lo que multiplica sus posibles aplicaciones.

A partir de este conjunto de hallazgos a nivel global ha emergido el concepto de altermagnetismo, una nueva fase magnética que combina características propias del ferromagnetismo y del antiferromagnetismo, pero que no se reduce a ninguno de ellos. Los altermagnetos presentan simetrías cristalinas particulares que permiten corrientes y fenómenos de transporte electrónicos únicos, como el Hall espontáneo, incluso en ausencia de campos magnéticos externos. Este campo, apenas en sus primeros pasos, está despertando un enorme interés internacional porque promete abrir horizontes aún más amplios para la espintrónica de nueva generación, con aplicaciones que podrían transformar desde la computación cuántica hasta las tecnologías de comunicación ultrarrápidas.

El efecto Hall espontáneo en materiales antiferromagnéticos constituye un ejemplo fascinante de cómo la ciencia avanza cuestionando sus propias certezas. Lo que alguna vez se consideró imposible ahora se revela como una oportunidad para transformar la electrónica del futuro.

Así como Edwin Hall, en el siglo XIX, abrió con su descubrimiento el camino hacia la electrónica moderna, este hallazgo demuestra que aún existen territorios inexplorados en la física del estado sólido. Nos recuerda que la naturaleza guarda secretos capaces de revolucionar nuestra manera de entender y manipular la materia. 

Poniendo a trabajar al entrelazamiento cuántico

Jesús M. Siqueiros Beltrones
Centro de Nanociencias y Nanotecnología-UNAM
siqueiros@ens.cnyn.unam.mx

La mecánica cuántica, además de fenómenos como la superconductividad y la superfluidez, es conocida por describir el comportamiento de lo extremadamente pequeño, donde la naturaleza atómica se manifiesta claramente. Muchos de los fenómenos en este nivel desafían el sentido común, como el entrelazamiento cuántico. Este fenómeno, explicado de manera sencilla, ocurre cuando un par o grupo de partículas se conecta de tal forma que el estado de cualquiera de ellas no puede describirse de manera independiente; su estado está correlacionado con el de las demás, incluso si están separadas por grandes distancias. Así, una medición en una partícula afecta instantáneamente a su partícula entrelazada, sin importar la distancia que las separe.

Aunque complejo, el entrelazamiento cuántico tiene aplicaciones prácticas. Un ejemplo destacado es el trabajo de investigadores del Instituto de Tecnología de California (Caltech), quienes han encontrado una manera de utilizar este fenómeno para mejorar la resolución de los microscopios ópticos. La técnica, conocida como microscopía cuántica por coincidencia (QMC, por sus siglas en inglés), podría revolucionar la obtención de imágenes no destructivas en sistemas biológicos.

Un microscopio óptico convencional tiene un límite de resolución definido por la longitud de onda de la luz utilizada: aproximadamente la mitad de dicha longitud de onda. Para

mejorar la resolución, se podría emplear luz con longitudes de onda más cortas y mayor intensidad, pero esto conlleva riesgos. Las longitudes de onda más cortas tienen energías más altas, lo que puede dañar los objetos observados, como células vivas y otros materiales orgánicos sensibles.

En un artículo publicado en *Nature Communications* [2], un equipo liderado por Lihong Wang propuso una solución innovadora mediante el uso de bifotones entrelazados. Los bifotones son sistemas compuestos que no tienen identidad individual, y su longitud de onda es la mitad de la de un fotón clásico con la misma energía. Esto permite a los bifotones alcanzar una resolución el doble de alta que la de un fotón clásico, manteniendo la misma energía y sin dañar el objeto observado.

Para demostrar esta técnica, Wang y su equipo emplearon un prisma para dividir un fotón en un par de bifotones entrelazados, formados por un fotón "señal" y un fotón "inactivo". Los bifotones recorren trayectorias simétricas diseñadas mediante una red de espejos, lentes y prismas. Mientras el fotón señal atraviesa el camino que contiene el objeto observado, el fotón inactivo viaja sin obstrucciones. Ambos llegan a una placa detectora, que correlaciona la información obtenida del fotón señal con el estado del fotón inactivo para crear una imagen (Fig. 1).

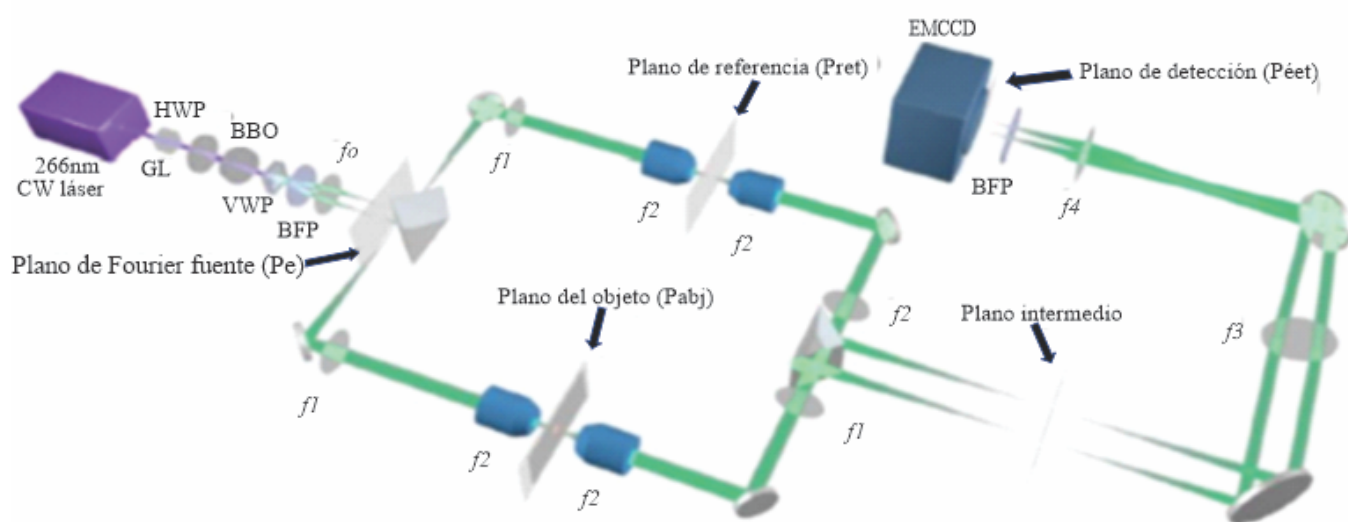


Figura 1. Configuración experimental de QMC. Las etiquetas incluyen CW (onda continua), GL (polarizador Glan-láser), HWP (placa de media onda), VWP (placa de onda variable), BBO (cristal de β -borato de bario), BPF (filtro pasabanda de 532 nm), PBS (divisor de haz polarizado) y EMCCD (cámara CCD multiplicadora de electrones). (Cortesía: Caltech)

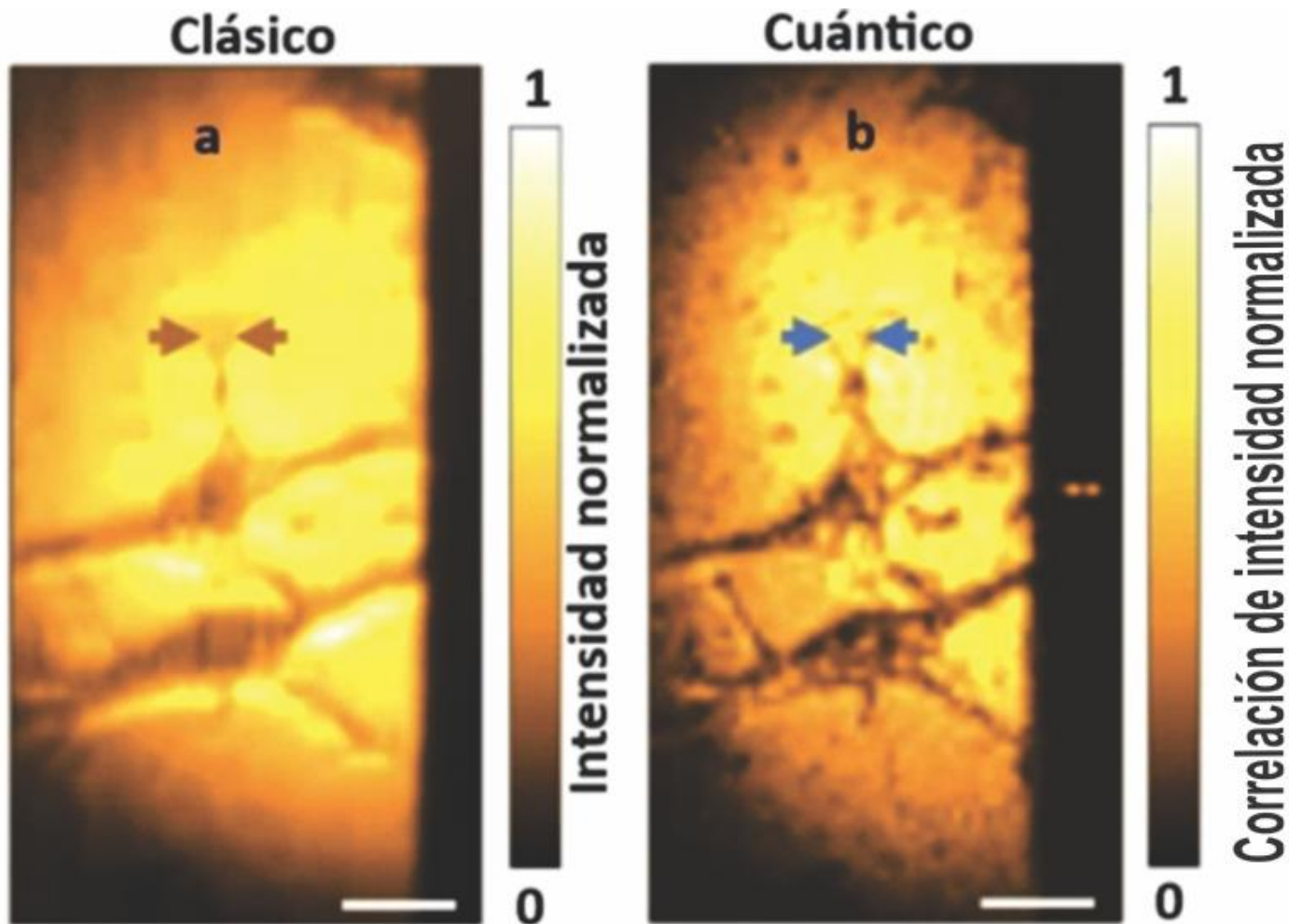


Figura 2. Comparación de imágenes de microscopía clásica (a) y cuántica (b) de una célula cancerosa.

(Cortesía: Caltech)

Históricamente, las aplicaciones de fotones entrelazados en microscopía se limitaban a objetos grandes. El equipo de Caltech logró una configuración viable para resolver detalles a escala celular. Utilizando correlaciones espacio-temporales entre los fotones señal e inactivos, demostraron que el método QMC ofrece ventajas significativas sobre la microscopía clásica en términos de resistencia al ruido y contraste de imagen.

El equipo también mostró la eficacia de QMC en la obtención de bioimágenes de células cancerosas (Fig. 2). Según Wang, esta técnica podría extenderse a la obtención de imágenes no destructivas de materiales fotosensibles y dispositivos de memoria. Además, como QMC mejora el doble la resolución de los microscopios, cualquier avance en microscopía clásica podría potenciarse aún más al aplicar esta técnica.

Sin embargo, QMC enfrenta desafíos importantes, especialmente en términos de velocidad. Los métodos actuales para generar fotones entrelazados son ineficientes, lo que limita la producción de bifotones. Para superar este obstáculo, será crucial desarrollar fuentes cuánticas intensas que permitan generar grandes cantidades de bifotones de manera eficiente. Según Wang, este avance acelerará la adquisición de datos y posicionará a la imagen cuántica como una herramienta de vanguardia en microscopía. 📌

Referencias

1. Unnati Akhouri, Physics World, 06 June 2023.
2. Zhe He, Yide Zhang, Xin Tong, Lei Li & Lihong V. Wang, Nature Communications(2023)14:2441, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38191-4>

De la mecánica cuántica a zeolitas como plataformas inteligentes de aplicaciones biocidas y descontaminantes

Jesús Isaías De León Ramírez^{1,2,3}, Víctor Alfredo Reyes Villegas³

¹ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

² Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM

³ Universidad Autónoma de Baja California

jesus.deleon@ens.cnym.unam.mx

En el contexto de los avances cuánticos, las zeolitas también han incursionado en esta ciencia al ser estudiadas para investigar los efectos cuánticos en sus espacios porosos, particularmente el llamado efecto de confinamiento cuántico.

Pero, ¿qué son las zeolitas? Son minerales de aluminosilicatos cuya estructura tridimensional está formada por tetraedros de silicio y aluminio enlazados por átomos de oxígeno, generando una red microporosa con cavidades y canales de tamaño molecular. Estos materiales se han utilizado como soportes o tamices moleculares, principalmente por su capacidad de alojar y liberar cationes, agua o pequeñas moléculas. Gracias a esta propiedad, resultan altamente versátiles para aplicaciones industriales, ambientales y biomédicas.

Las zeolitas, por sí solas, presentan una alta capacidad de adsorción. Sin embargo, su actividad química puede incrementarse mediante la modificación con metales como zinc o hierro. Esta funcionalización puede realizarse por diversas técnicas, siendo una de las más prometedoras la síntesis asistida por métodos sonoquímicos, que además resultan amigables con el ambiente.

En este enfoque, los ultrasonidos se aplican en diferentes etapas del proceso de síntesis para favorecer la formación de especies activas dentro de la zeolita. Estas especies pueden interactuar con la luz y participar en reacciones fotocatalíticas, ampliando así las aplicaciones del material.

La fotocatalisis es un proceso químico impulsado por la luz. Un material semiconductor, al absorber fotones, promueve electrones de su banda de valencia a la banda de conducción. Esto genera especies que pueden reaccionar con el agua o el oxígeno del medio para formar especies reactivas del oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), como radicales hidroxilo ($\text{HO}\cdot$) o peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La eficacia de este proceso depende directamente de la dinámica electrónica, que a escala nanométrica está regida por principios de la mecánica cuántica.

Para mejorar esta eficiencia, es fundamental el diseño de materiales que controlen la generación y el transporte de carga a escala cuántica. Esto se puede lograr por medio de la inserción de nanoespecies en la red porosa de las zeolitas, lo que genera confinamiento cuántico, un fenómeno en el que las propiedades electrónicas y ópticas de los materiales cambian a medida que su tamaño disminuye hasta niveles comparables con la longitud de onda de un electrón. Así, las zeolitas se convierten en materiales capaces de estabilizar estados cuánticos y potenciar su reactividad. Por otra parte, el confinamiento cuántico puede elevar los niveles energéticos de los orbitales activos, modificar la distribución de carga y favorecer ciertas reacciones químicas. Este efecto es clave para la activación de moléculas como el oxígeno o el agua en ambientes fotocatalíticos.

En esencia, lo que ocurre en el interior o en la superficie de una zeolita funcionalizada no es simplemente una reacción química tradicional, sino una secuencia de procesos guiados por fenómenos electrónicos regidos por principios cuánticos. Cuando se reduce el tamaño de las partículas de un material, o cuando este se apoya en una matriz de zeolita, entra en juego el confinamiento cuántico. Esto permite modificar el *band gap* del material activo y ajustar su respuesta óptica, optimizando la absorción de luz visible para aplicaciones energéticas y ambientales. Asimismo, la superposición de estados cuánticos en las especies activas puede dar lugar a efectos cooperativos en la generación de ROS, acelerando reacciones que procederían mucho más lentamente en condiciones clásicas.

Los microorganismos patógenos, como bacterias y hongos, pueden ser eliminados mediante dos mecanismos principales: la liberación de iones metálicos tóxicos para las células microbianas (como el Zn^{2+}) y la acción de las ROS generadas por fotocatalisis. En sistemas confinados cuánticamente dentro de zeolitas, la generación de estas especies reactivas puede ser más eficiente, gracias a la mayor separación de cargas y a la direccionalidad de los procesos redox. Esto también explica la interacción selectiva con las membranas celulares mediante efectos de

resonancia electrónica, que pueden provocar la muerte de las bacterias. Las nanopartículas metálicas exhiben niveles de energía que coinciden con estados excitados en biomoléculas, como proteínas o ADN de las bacterias, facilitando el traspaso de electrones y causando estrés oxidativo localizado. Estos procesos son difíciles de explicar desde un enfoque puramente clásico y alcanzan las fronteras de los fenómenos cuánticos.

Entre ellos destacan el confinamiento cuántico mencionado anteriormente, que modifica la distribución electrónica de los materiales, y el efecto plasmónico, que amplifica la absorción de la luz visible mediante oscilaciones colectivas de electrones. También se manifiestan fenómenos como el efecto túnel y los saltos cuánticos de energía, que no se presentan en escalas macroscópicas (Rycenga et al., 2011). Estas propiedades emergentes permiten crear entornos catalíticos únicos, donde las reacciones químicas pueden ser dirigidas con gran precisión.

Además, los modelos computacionales que predicen el comportamiento de estos sistemas utilizan principios fundamentales de la física cuántica, como la ecuación de Schrödinger o la teoría del funcional de la densidad (Brus, 1984; Parr & Weitao, 1995). Así pues, la aplicación de la mecánica cuántica no es solo una inspiración teórica, sino también una herramienta práctica para diseñar materiales más eficientes.

El uso de compuestos a base de zeolitas que contienen especies activas insertadas en sus matrices representa una de las fronteras más interesantes de la ciencia de materiales aplicada. Su interacción con la luz, su estructura porosa, su capacidad de adsorción y su posibilidad de ser modificadas a escala cuántica las convierten en herramientas valiosas para enfrentar desafíos contemporáneos en salud y ambiente.

A 100 años del surgimiento de la mecánica cuántica, estas “piedras modificables” nos recuerdan que la física fundamental no solo describe el mundo, sino que también puede transformarlo. La fusión entre lo cuántico y lo cotidiano es, sin duda, una de las claves del progreso tecnológico del siglo XXI. 

Referencias

- Brus, L. E. (1984). *Electron-electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. The Journal of Chemical Physics*, 80(9), 4403–4409. <https://doi.org/10.1063/1.447218>
- Parr, R. G., & Weitao, Y. (1995). *Density-Functional Theory of Atoms and Molecules*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195092769.0010001>.
- Rycenga, M., Cobley, C. M., Zeng, J., Li, W., Moran, C. H., Zhang, Q., Qin, D., & Xia, Y. (2011). *Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic Applications. Chemical Reviews*, 111(6), 3669–3712. <https://doi.org/10.1021/cr100275d>

Efemérides del desarrollo de la mecánica cuántica

- 1900 – **Max Planck** introduce la hipótesis de los cuantos de energía para explicar la radiación del cuerpo negro, marcando el inicio de la física cuántica.
- 1905 – **Albert Einstein** propone que la luz se comporta como un conjunto de cuantos (fotones) al explicar el efecto fotoeléctrico.
- 1913 – **Niels Bohr** desarrolla su modelo atómico con niveles de energía cuantizados, fundamental para comprender la estructura de los átomos.
- 1923 – **Louis de Broglie** plantea la dualidad onda-partícula de los electrones, extendiendo la noción de comportamiento ondulatorio a la materia.
- 1925 – **Werner Heisenberg** formula la mecánica matricial, la primera versión completa de la mecánica cuántica.
- 1926 – **Erwin Schrödinger** presenta la mecánica ondulatoria y su famosa ecuación, que describe la evolución de los sistemas cuánticos.
- 1927 – **Principio de indeterminación de Heisenberg**: establece que no es posible conocer simultáneamente la posición y el momento de una partícula con precisión ilimitada.
- 1927 – **Conferencia de Solvay**: se enfrentan las interpretaciones de Bohr y Einstein sobre el significado de la teoría cuántica, naciendo la interpretación de Copenhague.
- 1932 – **John von Neumann** publica la formulación matemática rigurosa de la mecánica cuántica. Ese mismo año, **James Chadwick** descubre el neutrón, impulsando la física nuclear.
- 1935 – **Paradoja EPR (Einstein, Podolsky y Rosen)** cuestiona la completitud de la teoría cuántica y abre el debate sobre el entrelazamiento.
- 1948 – **Richard Feynman, Julian Schwinger y Sin-Itiro Tomonaga** desarrollan la electrodinámica cuántica (QED), primera teoría cuántica de campos consistente.
- 1964 – **John Bell** formula su teorema, mostrando que el entrelazamiento cuántico produce correlaciones imposibles de explicar mediante teorías clásicas locales.
- 1981-82 – **Alain Aspect** confirma experimentalmente las desigualdades de Bell, validando el entrelazamiento cuántico.
- 1990-2000 – **Nace la información cuántica**, con avances en criptografía, teleportación cuántica y primeros prototipos de computadoras cuánticas.
- 2022 – **Premio Nobel de Física** para Aspect, Clauser y Zeilinger, por experimentos sobre el entrelazamiento y la comunicación cuántica. 

Niels Bohr: el arquitecto de una nueva visión del átomo

Felipe Castellón Barraza
CNyN-UNAM-Ensenada, B. C. México
fcastillon@ens.cnyn.unam.mx

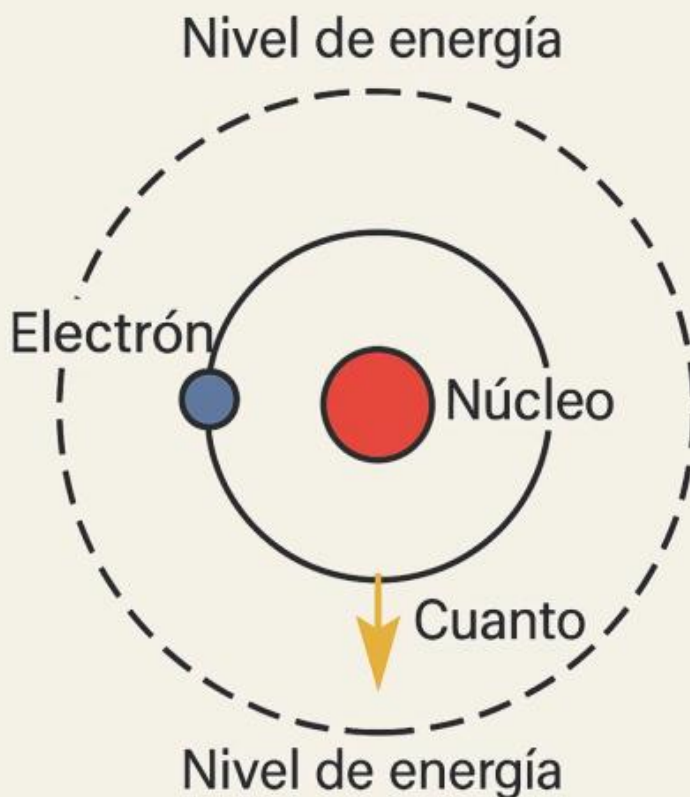


Figura 1. Representación esquemática del átomo de hidrógeno según el modelo de Bohr. El núcleo (con carga positiva) se encuentra en el centro, y el electrón (carga negativa) gira en órbitas circulares definidas. Cada órbita corresponde a un nivel de energía.

A comienzos del siglo XX, la física atravesaba una transformación profunda. Las leyes clásicas de Newton, que durante siglos habían explicado con precisión el movimiento de objetos, empezaban a fallar frente a fenómenos a escalas diminutas, como los átomos y la luz. Fue en este contexto de incertidumbre y descubrimientos sorprendentes que un joven físico danés, **Niels Bohr**, introdujo en 1913 una idea que marcaría un antes y un después en la historia de la ciencia.

Bohr propuso un nuevo modelo para entender la estructura del átomo. Hasta entonces, se pensaba que los electrones podían girar libremente alrededor del núcleo, como satélites caóticos. Pero eso generaba un problema: si se movían de forma continua, debían perder energía y terminar cayendo al núcleo, haciendo inestable al átomo. Sin embargo, los átomos son estables, así que algo no encajaba.

Bohr se atrevió a romper con la física tradicional. Inspirado por su mentor **Ernest Rutherford** y por las ideas emergentes de **Max Planck** y **Albert Einstein** sobre la cuantización de la energía, propuso que los electrones solo pueden ocupar órbitas específicas y definidas alrededor del núcleo. No podían estar en cualquier lugar, y para cambiar de una órbita a otra, debían absorber o liberar una cantidad exacta de energía. Esa energía se manifiesta como luz.

Este modelo explicaba, por primera vez con éxito, los patrones de luz emitidos por el átomo de hidrógeno. Cuando los electrones son excitados —por ejemplo, al aplicar calor o electricidad—, saltan a órbitas más altas y luego regresan a su estado original, liberando energía en forma de luz. El resultado son líneas de colores muy específicas, conocidas como líneas espectrales, que funcionan como una especie de código de barras para cada átomo. Estas líneas fueron descubiertas en diferentes regiones del espectro y llevan nombres como Lyman (ultravioleta), Balmer (visible), Paschen, Brackett, Pfund y Humphrey.

Aunque el modelo de Bohr se desarrolló para el hidrógeno, también pudo aplicarse a otros átomos con un solo electrón, como el **helio ionizado (He^+)** o el **litio doblemente ionizado (Li^{2+})**. Calculó el tamaño del átomo, la velocidad de los electrones y la energía necesaria para los saltos entre órbitas, logrando una concordancia notable con los resultados experimentales.

Un legado que inspiró una nueva era

El modelo de Bohr fue revolucionario, no solo por sus aciertos, sino porque demostró que las ideas cuánticas podían aplicarse a sistemas físicos reales, algo que hasta ese momento era solo una hipótesis. Además, inspiró a toda una generación de científicos, como **Werner Heisenberg**, **Wolfgang Pauli** y **Erwin Schrödinger**, quienes llevaron más lejos el desarrollo de la mecánica cuántica.

Sin embargo, el modelo de Bohr no era perfecto. Funcionaba bien solo para átomos con un electrón. No podía explicar:

- Los espectros de átomos más complejos.
- La división de líneas espectrales en presencia de campos magnéticos o eléctricos (efectos **Zeeman** y **Stark**).
- Las múltiples líneas observadas en lo que parecía una sola transición.
- Fenómenos más recientes como el principio de incertidumbre o la naturaleza ondulatoria del electrón, propuestas clave en la física cuántica moderna.

Aun con estas limitaciones, su contribución fue esencial. En 1925, **Schrödinger** propuso un modelo aún más avanzado, en el que los electrones ya no giran en órbitas definidas, sino que se comportan como nubes de probabilidad en torno al núcleo. Este modelo es el que actualmente enseñamos y utilizamos.

Además de sus aportes científicos, Bohr dejó una profunda huella como líder intelectual. Fundó el **Instituto de Física Teórica de Copenhague**, un centro que se convirtió en un punto de encuentro para los pioneros de la nueva física. Su estilo de pensamiento, que abrazaba el diálogo y la reflexión sobre las paradojas, marcó una forma nueva y humana de hacer ciencia.

Un puente entre dos mundos

Niels Bohr no sólo explicó cómo funcionan los átomos. Redefinió lo que entendemos por realidad física. Su modelo fue un puente entre el mundo predecible de la física clásica y el mundo probabilístico y sorprendente de la física cuántica. Gracias a él y a quienes continuaron su legado, hoy contamos con tecnologías que dependen directamente de estos principios: desde láseres y microchips hasta la resonancia magnética y los teléfonos móviles.

A cien años del nacimiento de la mecánica cuántica, el nombre de Bohr sigue brillando con fuerza. No solo por su genialidad científica, sino porque nos enseñó que comprender lo invisible es también una forma de transformar el mundo. 

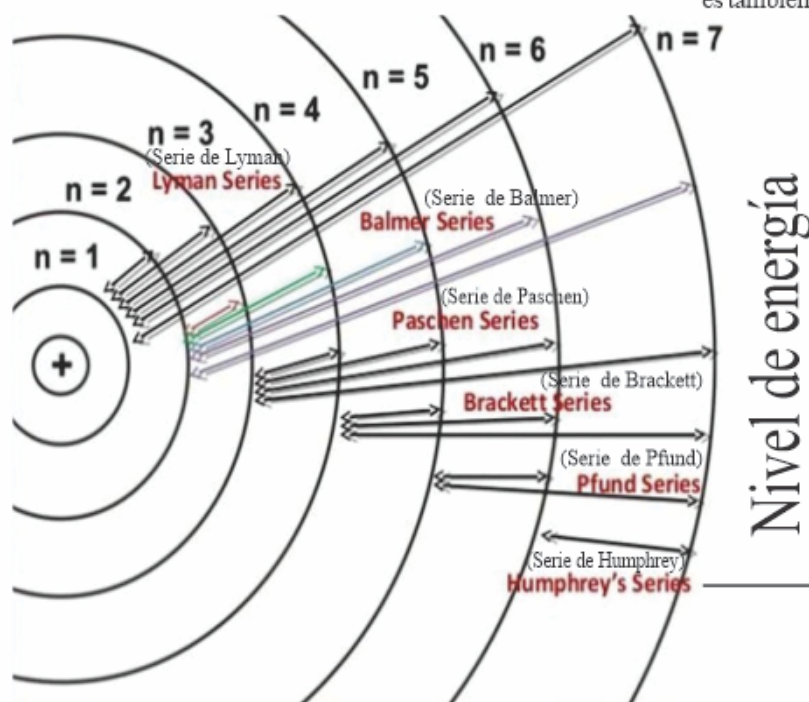


Figura 2.
El átomo de Bohr consiste de varias líneas espectrales en diferentes longitudes de onda.

Caos cuántico y sus aplicaciones en nanotecnología: Una perspectiva a 100 Años de la mecánica cuántica

¹ Dr. Fabián N. Murrieta-Rico, ² Dr. Joel Antúnez-García

¹Universidad Politécnica de Baja California, Mexicali, Baja California, México

²División de Estudios de Posgrado e Investigación, TecNM—Instituto Tecnológico de Ensenada, Ensenada, Baja California, México

¹fmurrietar@upbc.edu.mx / ²jantunez@ite.edu.mx

A un siglo del nacimiento de la mecánica cuántica, esta teoría continúa revelando nuevas y sorprendentes facetas de la naturaleza. Entre ellas, el **caos cuántico** emerge como una de las más intrigantes, al explorar cómo las propiedades caóticas de sistemas clásicos se manifiestan—de manera profundamente distinta—en el dominio cuántico.

En la física clásica, los sistemas caóticos presentan una sensibilidad extrema a las condiciones iniciales (efecto mariposa), lo que lleva a una evolución impredecible en el tiempo. Sin embargo, la mecánica cuántica introduce principios radicalmente diferentes: los estados están cuantizados, la evolución está gobernada por la ecuación de Schrödinger (lineal y determinista), y el principio de incertidumbre impide definir con precisión simultánea posición y momento. En este contexto, la noción de "condiciones iniciales" pierde su sentido tradicional, y con ella la forma clásica del caos.

El caos cuántico no se refiere al desorden clásico, sino a propiedades estadísticas y espectrales de sistemas cuánticos cuyo análogo clásico es caótico. Estas propiedades incluyen la repulsión entre niveles de energía (siguiendo distribuciones universales como la de Wigner-Dyson), la aparición de cicatrices cuánticas en las funciones de onda, y fenómenos como la localización dinámica, análoga a la localización de Anderson, pero inducida por la dinámica no integrable del sistema.

Un ejemplo emblemático es el *billar cuántico*: una partícula confinada en una cavidad con geometría caótica (por ejemplo, una caja cuadrada con un obstáculo circular en el centro). En el régimen clásico, las trayectorias son sensibles a las condiciones iniciales; en el cuántico, la función de onda muestra patrones irregulares, con estructuras interferenciales complejas y alineaciones con trayectorias periódicas inestables del sistema clásico. Estas cicatrices cuánticas evidencian cómo, incluso a nivel cuántico, la huella del caos clásico persiste de forma no trivial.

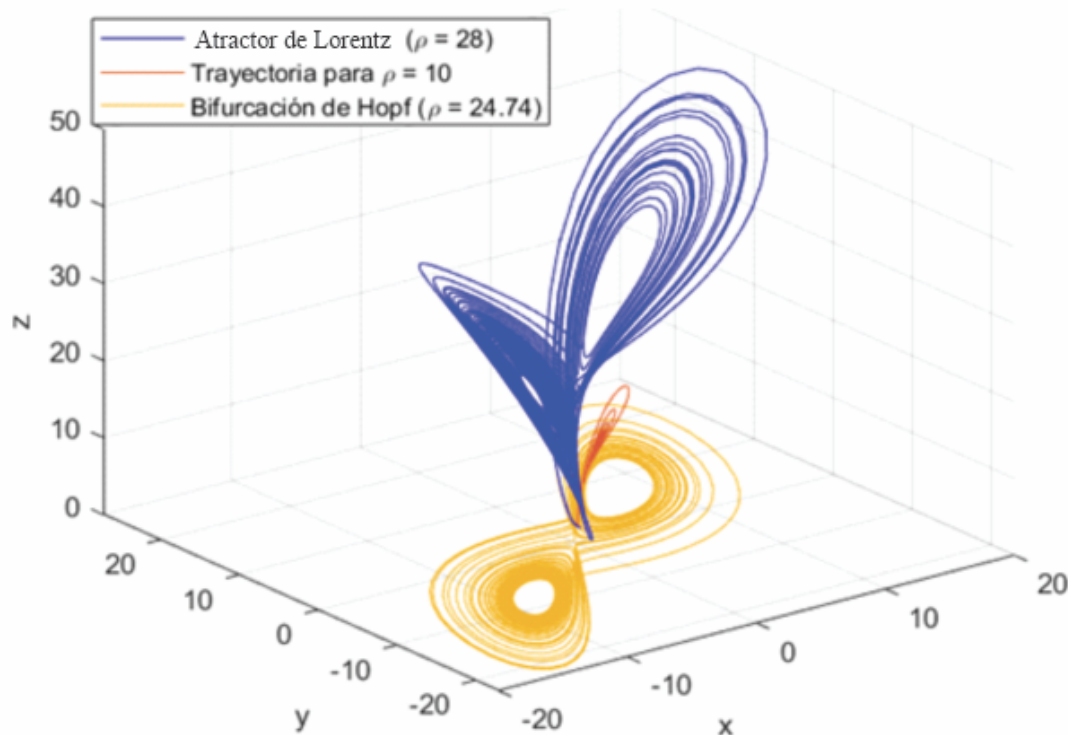


Figura 1. El atractor de Lorenz: representación visual de un sistema caótico clásico. Este tipo de sistemas presenta una fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales, característica fundamental del caos en la física clásica.

Estas ideas no son sólo de interés fundamental. En el contexto de la nanotecnología, donde los dispositivos operan en escalas donde predominan los efectos cuánticos, el conocimiento de las propiedades caóticas de sistemas confinados permite diseñar y optimizar estructuras con funciones específicas. La comprensión del caos cuántico contribuye al control del transporte electrónico en puntos cuánticos, al diseño de cavidades ópticas con respuestas espectrales deseadas, o al análisis de la conductividad térmica en redes fonónicas.

En este sentido, el caos cuántico representa un ejemplo paradigmático de cómo, a 100 años de su formulación, la mecánica cuántica no sólo sigue siendo el pilar de nuestra comprensión de la materia, sino también una fuente inagotable de fenómenos emergentes y aplicaciones tecnológicas.

Este tipo de estudios se conecta con las investigaciones desarrolladas en el CNYN-UNAM, donde se exploran fenómenos de transporte cuántico, cavidades fotónicas, dinámica no lineal en nanodispositivos y simulaciones numéricas de sistemas caóticos, reafirmando la vigencia y riqueza de la mecánica cuántica en el ámbito académico y tecnológico actual. 

Referencias

- Hentschel, M. (2009). Optical microcavities as quantum-chaotic model systems: openness makes the difference!. In *Advances in Solid State Physics* (pp. 293–304). Springer Berlin - Heidelberg. Malyshev, A. V., Domínguez-Adame, F., & Malyshev, V. A. (2011). Regularidad en el desorden: localización de Anderson. *Revista Española de Física*, 18(2).

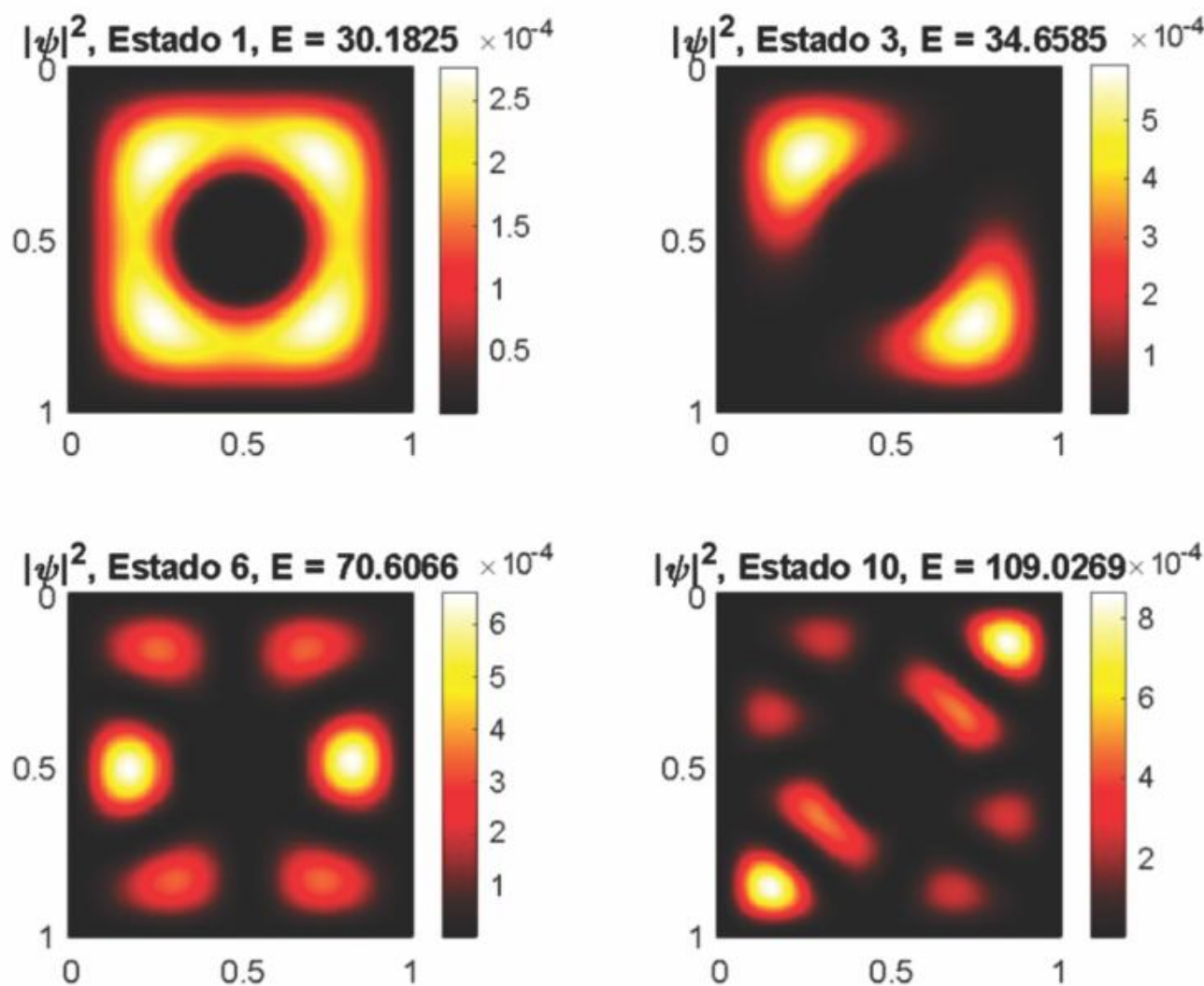


Figura 2. Distribución de una función de onda estacionaria en un billar cuántico bidimensional, obtenida mediante el método de diferencias finitas. La geometría del sistema induce patrones irregulares y estructuras interferenciales conocidas como “cicatrices cuánticas”, reflejo de trayectorias clásicas inestables.

Dispositivos semiconductores de última generación

Juan Pablo Rocha López, Enrique C. Sámano Tirado
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM.
j10_rocha@ens.cnyn.unam.mx/ samano@ens.cnyn.unam.mx

Los dispositivos electrónicos son, indudablemente, ubicuos en nuestra sociedad contemporánea. Cada día es más común encontrar transeúntes que caminan como autómatas con la mirada fija en la pantalla de sus celulares. Pareciera que las personas tuvieran la necesidad urgente de mantenerse constantemente comunicadas, o de consultar a Google, cuál poderoso oráculo moderno. El enorme mercado de la microelectrónica digital ha convertido a la industria de semiconductores en una de las más lucrativas, aunque exige una elevada inversión. Los consumidores demandan dispositivos cada vez más pequeños, rápidos, eficientes y económicos.

En 1965, Gordon Moore publicó un artículo en el que predijo que cada dos años se duplicaría el número de transistores en un circuito integrado (IC). Esta tendencia, conocida como la **ley de Moore**, se mantuvo vigente durante décadas [1]. Gracias a los avances en los procesos de manufactura basados en silicio —el material semiconductor por excelencia en la industria electrónica— los transistores, componentes esenciales de los circuitos, han reducido su tamaño para que las señales eléctricas recorran distancias menores al procesar información.

Los transistores funcionan como interruptores que permiten o impiden el paso de corriente eléctrica, o como amplificadores de señales. En código binario, los transistores representan estados lógicos que se interpretan como “1” (activo) o “0” (inactivo), dependiendo de si permiten o no el paso de corriente. Estos estados binarios constituyen la base de la lógica digital sobre la cual se construyen las operaciones fundamentales de los procesadores. A su vez, estas operaciones son controladas por instrucciones en lenguaje ensamblador, que actúa como puente entre el hardware y los programas de alto nivel. Como se ilustra en la figura 1, los transistores pueden compararse con obreros en una construcción, donde cada uno cumple una función específica que contribuye a un objetivo común. A mayor cantidad de transistores en un chip, mayor será la capacidad de procesamiento y eficiencia. Por ello, aumentar su densidad se ha convertido en una prioridad tecnológica que impulsa la innovación en materiales y técnicas de fabricación.

No obstante su éxito, los transistores convencionales de silicio enfrentan limitaciones conforme se reduce su tamaño, lo que puede afectar su desempeño. Para mantener vigente la ley de Moore, se requiere que los transistores tengan un grosor de apenas unas decenas de átomos. A estas escalas, entran en juego las leyes de la **mecánica cuántica**, base del funcionamiento del transistor desde su invención. Además, el calor generado por la proximidad entre millones de transistores puede llegar a niveles que dañarían el chip. Una solución parcial ha sido el diseño de procesadores “dual-core”, que permiten el procesamiento paralelo y disipan mejor el calor. Sin embargo, los límites de las técnicas convencionales, como la fotolitografía, han incentivado la búsqueda de nanomateriales que puedan ensamblarse átomo por átomo.

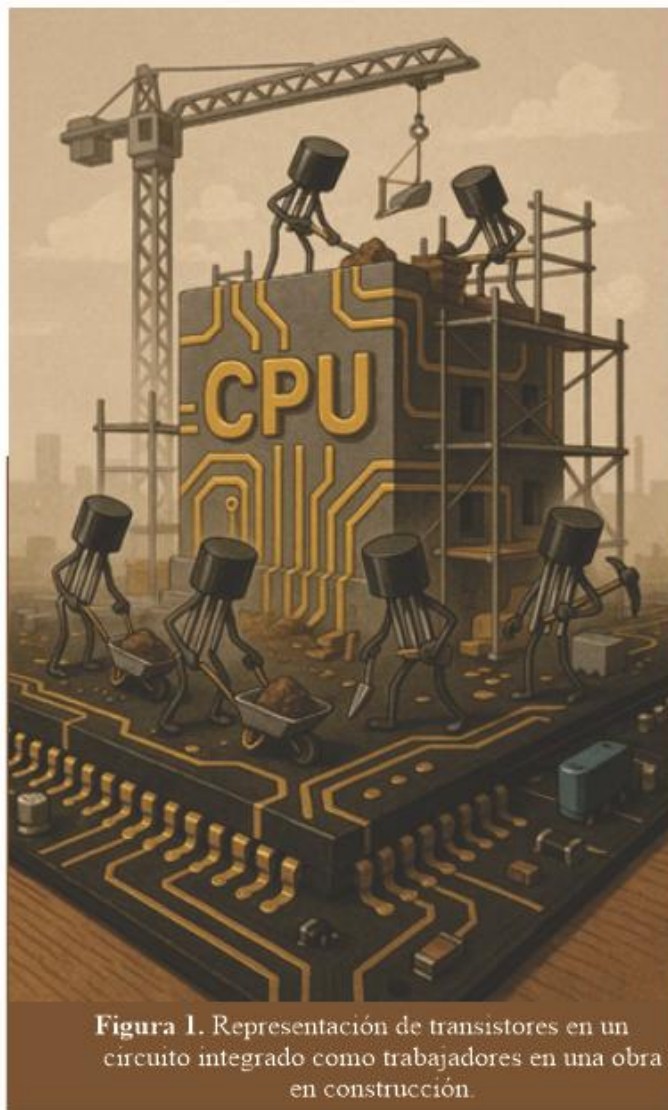


Figura 1. Representación de transistores en un circuito integrado como trabajadores en una obra en construcción.

En esa búsqueda, los materiales bidimensionales (2D) han ganado protagonismo. El grafeno, un alótropo del carbono descubierto hace 21 años, revolucionó la ciencia de materiales por su alta movilidad de carga y estructura electrónica singular. Sin embargo, al carecer de una brecha de banda, no es semiconductor. Otros materiales 2D ofrecen una mayor versatilidad. El nitruro de boro hexagonal (h-BN), por ejemplo, es un aislante con una brecha de banda superior a 5 eV. La familia de los dicalcogenuros de metales de transición (TMDs) presenta brechas que oscilan entre 0.5 y 3 eV, lo que los hace particularmente atractivos para dispositivos electrónicos, ver figura 2 [2].

Al combinar monocapas de diferentes materiales, es posible formar heteroestructuras con propiedades electrónicas únicas. Estas estructuras ultradelgadas podrían revolucionar la nanoelectrónica y la optoelectrónica, permitiendo la fabricación de chips flexibles, de alta densidad y bajo consumo energético. En un futuro próximo, circuitos lógicos y de memoria construidos íntegramente con materiales 2D podrían redefinir el diseño de los dispositivos electrónicos.

Nota final: El desarrollo de los dispositivos semiconductores modernos sería impensable sin el marco teórico de la **mecánica cuántica**. Desde el control de bandas electrónicas hasta el diseño de materiales a nivel atómico, los avances en esta disciplina han hecho posible la revolución tecnológica de nuestra era. A cien años del nacimiento de esta teoría, sus ecuaciones siguen guiando el camino hacia la miniaturización extrema y la creación de dispositivos del mañana. 

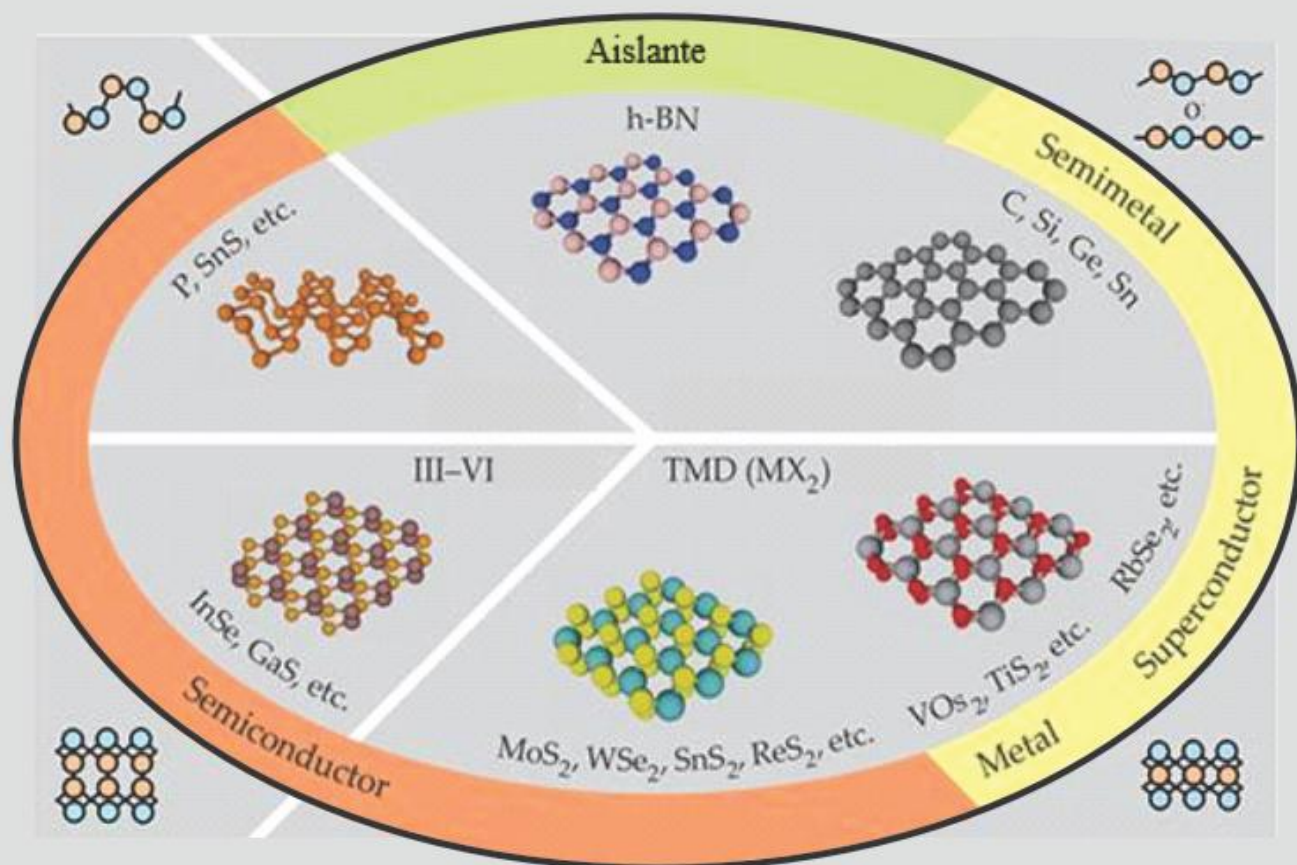


Figura 2. Materiales bidimensionales que incluyen a semimetales, como grafeno y sus análogos, aislantes como el nitrato de boro hexagonal, y dicalcogenuros de metales de transición (TMDs).

La física del siglo XIX hasta el 'quantum' de Planck

Jesús A. Maytorena
CNyN UNAM
jesusm@ens.cnyun.unam.mx

A don EMLO, in memoriam.

La Mecánica Cuántica (MC) es un aparato matemático y conceptual, con un conjunto de reglas o principios que permite entender la estructura del mundo atómico y subatómico. También posibilita la construcción de teorías físicas, por lo que es común hablar, por ejemplo, de Electrodinámica Cuántica, Teoría Cuántica de Campos, Óptica Cuántica, Teoría Cuántica de Sólidos, Información Cuántica, Computación Cuántica, Tecnologías Cuánticas, entre otros muchos campos. Su importancia radica en su enorme capacidad predictiva, escandalosamente exitosa para explicar una amplia diversidad de fenómenos en un gran espectro de sistemas físicos, lo que la convierte, sin discusión, en la teoría más precisa en toda la historia de la Física, acaso la mejor teoría científica que ha producido la humanidad.

Por todo ello, cuando se vuelve la vista atrás y se hace referencia a “la Revolución Cuántica”, suena a algo contundente, firmemente establecido. Pero todo este mito de la Cuántica tuvo un origen, una razón. La palabra *revolución* nos trae a la mente la idea de algo radicalmente nuevo, un giro, una ruptura más o menos drástica con algún estado previo de cosas, que obliga a cuestionar y repensar lo que hasta hace poco parecía cierto, seguro, estable, inamovible. La MC nace de la física del siglo XIX, frente a ella, ante la necesidad de explicar evidencia experimental para la que el edificio de la Física Clásica no hallaba respuesta.

Heredera de Newton, la Física del siglo XVIII se caracterizó por la cuantificación y la búsqueda de leyes matemáticas, todo enmarcado en un programa de explicación mecánica de los fenómenos, como si el mundo fuera un sofisticado mecanismo de relojería, preciso y complejo, pero racionalmente accesible. El siglo XIX fue más rico y ambicioso. Es el siglo de la emergencia del concepto de energía y su conservación (Helmholtz), de la unificación de la electricidad, el magnetismo y la óptica mediante el concepto de *campo* (Faraday, Maxwell), del éter luminífero y sus vibraciones, del concepto de entropía y su irreversible crecimiento (Boltzmann), de intangibles (“imponderables”) como los “fluidos” del calor, la luz, la electricidad y el magnetismo, de la aparición del electrón y las ondas hertzianas. Así se establecieron nuevos campos de investigación como la Termodinámica, la teoría ondulatoria de la luz (Fresnel), la Teoría del Campo Electromagnético, la Teoría Cinética de los Gases y la Fisicoquímica.

La Física del siglo XIX profundizó la matematización como vía para una visión unificada del mundo físico. Laplace, por ejemplo, formuló una teoría matemática de fuerzas entre partículas aplicable al estudio de fenómenos térmicos y ópticos, y la teoría matemática del calor de Joseph Fourier, desarrollada en 1822, extendió el uso del análisis matemático que hasta entonces se aplicaba exclusivamente a problemas mecánicos. Hacia 1830, los experimentos de Fresnel habían revelado el carácter ondulatorio de la luz, entendida como vibraciones de un éter mecánico, lo que llevó a la óptica al campo de la mecánica. Esto daba confianza al uso de analogías, pues una base matemática común permitía la relación entre

fenómenos aparentemente ajenos. La ley de conservación de la energía, enunciada en 1840, era un ejemplo paradigmático de la unidad de concepción que la Física buscaba (y deseaba). Los experimentos de Joule, sobre la equivalencia entre calor y trabajo mecánico, así como el influyente ensayo de Helmholtz que discutía la relación entre mecánica, calor, electricidad, magnetismo y luz como manifestaciones de energía, reforzaban, en un plano epistemológico, la visión mecánica de la naturaleza. Cada nuevo descubrimiento debía acomodarse a esta visión. La materia en movimiento era la base de todos los fenómenos. El eminente físico y matemático británico William Thomson declaraba en 1900 que la construcción del modelo mecánico de un fenómeno era el criterio de inteligibilidad del mismo.

Hacia finales del siglo XIX ya quedaban claras, sin embargo, algunas dificultades conceptuales en tal filosofía mecanicista. Este siglo se caracterizaría también por su exigencia y rigor en la comprobación experimental. Por ejemplo, en la teoría molecular de la materia (las *moléculas* o *átomos*, entendidas como partículas sólidas, sin estructura, pero cuya enorme cantidad y movimiento azaroso hacia necesario un estudio estadístico), se daba la circunstancia de que distintos fenómenos imponían restricciones que entraban en conflicto al plantear modelos de la estructura molecular. La equipartición de la energía en estos sistemas estaba en flagrante contradicción con las mediciones experimentales de propiedades térmicas que implicaban restricciones en el movimiento de las moléculas; pero, por otra parte, dicho teorema permitía establecer la naturaleza monoatómica en consonancia con las observaciones (en argón, por ejemplo).

Similamente, la propuesta de un éter subyacente y sutil en el que se propagaba la luz y cuya dinámica era todo un misterio, se debilitaba catastróficamente al no poder explicar el movimiento de la Tierra a través de él y por la ausencia total de evidencia experimental. Inevitablemente, en el plano filosófico, se planteó la cuestión acerca de la distancia que existe entre la realidad física y los modelos que la representan; la distinción entre las suposiciones sobre los constituyentes básicos de la realidad frente a las hipótesis específicas o modelos sobre esa realidad. A este respecto es célebre el debate (el *agarrón*, si se me permite la expresión) entre el gran físico vienés Ludwig Boltzmann, quien defendía ardientemente la existencia de los átomos para establecer los fundamentos estadísticos de la termodinámica, y el influyente físico y filósofo austriaco Ernst Mach, que se oponía radicalmente, argumentando que los átomos eran solo símbolos útiles para la representación de los fenómenos, y no partículas físicas reales. Más filosófica que física, esta polémica en las postrimerías del siglo evidenció el declive de la visión mecanicista del mundo. Después de todo, se argumentaba desde el punto de vista machiano, el predominio de la mecánica en las teorías físicas solo era “una contingencia histórica”.

Pero dos cuestiones, sobre todo, que contaban con mediciones experimentales, abrieron grietas profundas y fértiles en el

edificio de la Física del siglo XIX, y que a la postre pondrían a los científicos en la senda que daría con la denominada *discontinuidad cuántica* y la estructura del átomo. Una se refiere a las líneas oscuras en el espectro (i.e., la distribución de frecuencias) de la luz del Sol, y a la observación de la emisión y absorción de luz en gases atómicos calientes solo a frecuencias bien definidas y en patrones característicos del elemento en cuestión. La explicación de estos espectros necesitaba una teoría de la estructura de los átomos, y la física clásica simplemente carecía de ella, un misterio.

La otra cuestión era la relacionada con el espectro de radiación térmica, esto es, la distribución en frecuencia (o longitud de onda) de la luz emitida por un cuerpo cuando se encuentra a una temperatura determinada. La similitud entre las curvas de distribución de velocidades de las moléculas de un gas a cierta temperatura y el espectro de radiación térmica sugería un tratamiento estadístico a lo Boltzmann de este problema. Pero entre los átomos y las ondas electromagnéticas existía la diferencia esencial de que el número de aquéllos, aunque grande en un cierto volumen, es finito, mientras que en esa misma región la densidad de vibraciones electromagnéticas es infinita. Ante esto, la aplicación del principio de equipartición de la energía implicaba el paradójico resultado de que a cada una de estas vibraciones le correspondería una cantidad infinitesimalmente pequeña. Por otra parte, los átomos de un gas dentro de una caja chocan entre sí y eventualmente esto da lugar a una distribución pareja de la energía entre ellos. Para distribuir la energía de modos electromagnéticos en una caja, se consideró que las paredes estaban hechas de osciladores que absorbían y reemitían la energía de las ondas. Pero la imposición de la equipartición lleva en este caso a una energía infinita al tratar de repartirla en las frecuencias más altas. Los cálculos mostraban que la densidad de energía era proporcional al cuadrado de la frecuencia: a mayor frecuencia, mayor energía. Esta situación, conocida como *la catástrofe ultravioleta*, mostraba que algo andaba mal en el enfoque termodinámico. El enfoque estadístico boltzmaniano no funcionaba cuando, en vez de átomos, se consideraban vibraciones electromagnéticas. ¿Qué hacer, si solo se contaba con la teoría cinética de Boltzmann, que después de todo le había dado fundamento a la segunda ley de la Termodinámica?

Entonces apareció Max Planck en 1900 con una idea novedosa, muy original, difícil de justificar: “una suposición puramente formal”, “un acto de desesperación”. A su pesar, Planck supuso, postuló, que la radiación estaba en equilibrio con un gran número de osciladores cargados con diferentes frecuencias, y que la energía de cada oscilador con frecuencia ν era un múltiplo entero de $h\nu$, donde h era una constante. Esto equivale a suponer que cada oscilador puede absorber o emitir radiación solo en cantidades discretas, múltiplos enteros del “quantum” $h\nu$. Esto le permitió a Planck obtener la expresión matemática correcta que reproducía la curva experimental de la radiación térmica. La explicación sobre bases firmes llegaría hasta 1905, en un célebre artículo de Einstein, donde se proponía que era la propia radiación electromagnética la que estaba ‘cuantizada’ en paquetes de energía $h\nu$. Esta hipótesis radical permitió explicar el efecto fotoeléctrico medido por Robert Millikan (1914–1916) y la dispersión de rayos X observada por Arthur Compton (1922–1923). Estos experimentos vencieron el escepticismo de los físicos sobre la existencia de los ‘cuantos de luz’, para los cuales en 1926 se acuñaría el nombre de *fotón*.

A pesar de la confusión del momento, Planck intuyó la importancia de la constante h , una nueva constante fundamental de la naturaleza, cuyo valor pudo determinar y que marcaría buena parte del rumbo de la Física del siglo XX y hasta el presente. La ‘discontinuidad’ introducida por Planck, la postulada discretización del intercambio de energía, se reconoce unánimemente como uno de los factores que obligaron a una revisión radical de la ontología de la Física del siglo XIX, y que desembocaría veinticinco años más tarde en el abandono de la causalidad y el determinismo con el desarrollo de la Mecánica Cuántica. El otro factor sería la Teoría de la Relatividad de Einstein, también de 1905, que implicó el abandono de los conceptos de tiempo y espacio absolutos, así como el de la simultaneidad.

“Por la razón, que no cesará de soñar/con un plano del laberinto”, dice un poema de Jorge Luis Borges. Con $E = mc^2$ y $E = h\nu$, la Física entraba al siglo XX buscando ese plano, llena de preguntas, de expectativas, de fascinación. 



Bibliografía

1. P. M. Harman, *Energy, Force, and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge History of Science Series. Cambridge University Press, 1982.
2. José M. Sánchez Ron, *Historia de la física cuántica I. El período fundacional (1860–1926)*. Crítica, 2001.



José M. Sánchez Ron
físico y académico de la Real Academia Española

Nanomagnetismo cuántico: el poder del espín en la era de lo invisible... y cómo está revolucionando la tecnología del futuro

Jonathan Zamora Mendieta

Departamento de Materiales Metálicos y Cerámicos, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.
zamenj@materiales.unam.mx

Una nueva revolución... que no se puede ver

Desde la antigüedad, el magnetismo ha sido un pilar fundamental en el avance de la humanidad: desde la navegación por mar abierto mediante el uso de la brújula, hasta el almacenamiento de datos informáticos a través de dispositivos magnéticos. En el marco del Año de la Tecnología Cuántica, estamos siendo testigos de una nueva revolución silenciosa pero profunda, que ocurre en las fronteras de lo infinitesimal: las nanoestructuras magnéticas. Estos sistemas, diseñados a escala nanométrica, emergen como protagonistas del desarrollo de materiales cuánticos funcionales, los cuales prometen redefinir las tecnologías emergentes.

Aunque el magnetismo forma parte de la historia de la humanidad y la comprensión de este fenómeno ha evolucionado, su esencia más profunda apenas comienza a revelarse. Cuando se piensa en magnetismo, lo primero que suele venir a la mente es un imán decorativo sobre la puerta del refrigerador o una brújula que señala al norte. Sin embargo, muy lejos de esos ejemplos familiares, el magnetismo también existe en escalas diminutas, tan invisibles que escapan a las lentes de los microscopios más potentes y sofisticados. Ahí, en ese mundo nanoscópico, miles de veces más pequeño que el grosor de un cabello, ocurren fenómenos realmente excepcionales. Es precisamente en este reino donde nace el nanomagnetismo cuántico, una de las áreas más prometedoras de la ciencia moderna.

Esta disciplina fusiona de manera fascinante el magnetismo clásico con las misteriosas reglas del mundo cuántico. Juntas, estas áreas nos llevan a imaginar y construir tecnologías completamente nuevas: computadoras que aprovechan el espín en lugar de electricidad, sensores capaces de detectar el campo magnético del corazón humano, o materiales que responden a estímulos casi imperceptibles.

¿Qué es el espín y por qué importa?

En el corazón de esta revolución se encuentra el espín, una propiedad cuántica intrínseca de los electrones. Se puede considerar como si cada electrón fuera una pequeña brújula, apuntando hacia el "norte" o el "sur". Esta metáfora sencilla ayuda a comprender el inmenso potencial del espín para codificar información, de manera análoga a cómo los unos y ceros forman el lenguaje binario informático. Sin embargo, a diferencia de la electrónica tradicional, el espín no necesita moverse a través de un cable eléctrico; basta con orientarlo y leer su estado. Esta característica permite el desarrollo de dispositivos no solo más pequeños y rápidos, sino también exponencialmente más eficientes.

Cuando esta idea se traslada a la escala nanométrica, donde los materiales están formados por unos cuantos átomos, el espín revela comportamientos sorprendentemente inesperados. Por ejemplo, una partícula magnética muy pequeña puede cambiar su orientación por el simple efecto de la temperatura ambiental, un fenómeno que responde al nombre de superparamagnetismo. Esta propiedad ya tiene aplicaciones relevantes en diversos campos. En particular, en el área de la medicina se utiliza en sistemas de liberación controlada de fármacos, donde nanopartículas superparamagnéticas pueden ser dirigidas hacia una zona específica del cuerpo mediante la aplicación de un campo magnético externo, liberando el medicamento de forma localizada. Mientras tanto, en el campo del almacenamiento de datos, estas nanopartículas permiten aumentar la densidad de información, aunque también plantean desafíos debido a su comportamiento magnético a escala nanométrica.

Construyendo la próxima generación: átomo por átomo

Gracias a técnicas avanzadas de nanofabricación, actualmente es posible construir estructuras magnéticas con una precisión sin precedentes, casi como si se tratara de piezas de Lego a escala atómica. Los científicos pueden colocar átomos uno a uno o depositar capas con una exactitud nanométrica. Estas nanoestructuras pueden adoptar diversas formas, desde puntos cuánticos y nanocintas hasta películas delgadas o incluso monocapas de átomos. Lo más asombroso es que su comportamiento magnético puede ajustarse con relativa facilidad modificando solo unas pocas condiciones, como la temperatura, la geometría o la interacción entre capas.

Aplicaciones transformadoras: ¿Para qué sirve todo esto?

El nanomagnetismo cuántico no solo se trata de una curiosidad científica; está transformando radicalmente la forma en que se concibe y diseña la tecnología. Aquí algunos ejemplos:

- **Computadoras cuánticas:** En estos equipos revolucionarios, cada unidad de información el *qubit* puede estar en múltiples estados simultáneamente, utilizando espines para realizar cálculos imposibles incluso para los equipos más potentes de la actualidad.
- **Espintrónica:** Tecnología emergente que busca reemplazar los tradicionales bits eléctricos por bits de espín. Esto ya se está usando en discos duros ultradenso y en memorias no volátiles que conservan la información incluso después de apagar la computadora.

- **Sensores de precisión extrema:** Algunos dispositivos que se basan en el nanomagnetismo pueden detectar campos magnéticos tan débiles como los que produce la actividad cerebral, lo que abre nuevas posibilidades en medicina y neurociencia.
- **Materiales inteligentes:** Materiales innovadores que cambian su estado magnético con una mínima variación de temperatura, presión o luz. El potencial de esta clase de materiales es inmenso y podrían revolucionar significativamente la tecnología actual debido a sus capacidades adaptativas sin precedentes.

¿Qué viene después?

Como en toda frontera científica, el camino no está exento de desafíos. Mantener el espín en estado coherente —es decir, estable y útil durante un periodo prolongado— es complicado, ya que el entorno tiende a perturbarlo. Además, la fabricación de nanoestructuras idénticas a gran escala continúa siendo un reto técnico. No obstante, los avances son constantes y vertiginosos. Cada año, la comunidad científica continúa desarrollando nuevos materiales, perfeccionando técnicas de fabricación e impulsando aplicaciones cada vez más sorprendentes.

Instituciones de vanguardia, como la UNAM, están trabajando en estas líneas de investigación, explorando desde aleaciones magnéticas avanzadas hasta estructuras diseñadas para el control cuántico del espín. Estos esfuerzos, además de formar a las nuevas generaciones de investigadores, posicionan a México en el mapa global de las tecnologías cuánticas.

Un mundo que gira (literalmente) gracias al espín

Detrás de los avances más audaces del futuro estará el trabajo silencioso de estos diminutos imanes cuánticos. Aunque no podamos verlos y suene a ciencia ficción, el espín —esa propiedad oculta en cada electrón— está llamado a ser el motor de nuevas tecnologías que transformarán nuestra realidad. Y no es una predicción lejana: ya está ocurriendo.

En esta era donde lo cuántico ya no es solo teoría, sino ingeniería y aplicación real, el nanomagnetismo nos ofrece un recordatorio poderoso:

NANOMAGNETISMO CUÁNTICO



Figura 1.

Representación artística del nanomagnetismo cuántico: a escala atómica, los espines interactúan dentro de una nanoestructura magnética. Este tipo de sistemas permite el desarrollo de tecnologías avanzadas.

“las grandes revoluciones tecnológicas pueden y, de hecho, suelen comenzar en lo más pequeño”.

Agradecimientos

Este proyecto cuenta con los apoyos de DGAPA-PAPIIT IA104125 e Ig101623.

Zeolitas en la frontera cuántica

Vitalii Petranovskii,
CNyN-UNAM, Departamento de nanocatálisis,
vitalii@ens.cnyn.unam.mx

Las zeolitas son materiales cristalinos de aluminosilicatos caracterizados por su estructura nanoporosa bien definida. Su alta área superficial, estabilidad química y térmica, y capacidad de ajuste estructural las han hecho indispensables en procesos industriales como el craqueo petroquímico, la separación de gases y la recuperación ambiental. Desde hace tiempo, las zeolitas se valoran por sus propiedades catalíticas, de adsorción y de intercambio iónico. Sin embargo, recientemente han llamado la atención debido a una nueva dimensión de su utilidad: su papel en materiales y tecnologías cuánticas. Gracias a sus estructuras microporosas sintonizables y a su capacidad para alojar átomos individuales o cúmulos atómicos en estos nanoporos regulares, las zeolitas constituyen una plataforma única para la síntesis de materiales que presentan fenómenos cuánticos. Así, están emergiendo como protagonistas en la intersección de la ciencia de los materiales y las tecnologías cuánticas.

Inicialmente, para determinar las propiedades estructurales y electrónicas de las zeolitas, se realizaban cálculos basados en la teoría cuántica de manera habitual, como en otros tipos de materiales. En la actualidad, el modelado estructural de las zeolitas es más "realista", y estos cálculos se aplican considerando estructuras cristalinas de las zeolitas que difieren del cristal ideal, lo que permite tratar problemas relacionados con defectos superficiales y sitios activos. Estos métodos ayudan a comprender los sitios catalíticos, la acidez y los efectos de confinamiento de los materiales activos en la superficie de los soportes zeolíticos. Así, los modelos cuánticos permiten un cribado exhaustivo de los posibles sitios activos en las zeolitas, lo que conduce a un mejor diseño de los catalizadores.

Los modelos tradicionales de zeolitas asumen una estructura cristalina perfecta, centrada en los nanoporos internos. Sin embargo, los cálculos basados en la teoría del funcional de la densidad (DFT) han revelado la complejidad de las superficies externas y los defectos de las zeolitas reales. Por ejemplo, estudios de la zeolita ZSM-5 han revelado un conjunto diverso de grupos hidroxilo (Si-OH, Al-OH) y sitios de ácido Lewis (Al(H₂O)) en su superficie externa, significativamente diferentes de los sitios OH unidos en los poros internos.

La modelización cuántica permite estimar la acidez Bronsted de los sitios superficiales, mostrando variaciones en la fuerza donadora de protones (fuerte, media, débil) en función de su

entorno. Además, los efectos de confinamiento residual en la superficie exterior indican actividad catalítica incluso cerca de las aberturas de los poros, lo que contradice la idea de que el confinamiento se limita a los nanoporos interiores.

Esta comprensión cuántica tiene un impacto directo en la aplicación de estos materiales. Por ejemplo, los compuestos de Pd/zeolita optimizados mediante cálculos de DFT muestran una captura superior de NO_x durante el arranque en frío de automóviles (*Aljama 2022*). Del mismo modo, los nanocompuestos de TiO₂/zeolita se benefician de modificaciones superficiales predichas por estudios computacionales para mejorar la adsorción de contaminantes como el amonio y el fosfato. Los métodos cuánticos permiten investigar los mecanismos de formación de defectos, incluidos los mesoporos y defectos puntuales, tendiendo puentes entre la teoría y la confirmación experimental. Los esfuerzos de colaboración pretenden integrar datos experimentales con predicciones computacionales para perfeccionar el diseño de zeolitas para su uso industrial.

Los estudios apoyados en la mecánica cuántica están transformando nuestra comprensión de las zeolitas a escala atómica, permitiendo el desarrollo de materiales especializados para la catálisis, la recuperación ambiental y las aplicaciones energéticas. Al aportar nueva información sobre dinámicas de superficie y estructuras de sitios activos, estas herramientas están llevando a las zeolitas a la frontera cuántica, abriendo nuevas oportunidades para las tecnologías sostenibles.

La llamada "frontera cuántica" es un campo creciente de la ciencia cuántica que incluye tanto la *computación cuántica* como los *materiales cuánticos*. En este segundo ámbito, las zeolitas tienen un enorme futuro. Su estructura cristalina contiene cavidades y canales a nanoescala (Figuras 1 y 2), y se sabe que, al reducirse el tamaño de las partículas por debajo de ciertos límites, estas comienzan a exhibir propiedades cuánticas ausentes en el estado masivo. A medida que los investigadores tratan de aprovechar y manipular los estados cuánticos de la materia, la necesidad de materiales anfitriones precisos, estables y escalables que estabilicen las partículas a nanoescala se vuelve crítica. Las zeolitas, con sus estructuras regulares y su capacidad para estabilizar átomos aislados o cúmulos atómicos bajo un confinamiento cuántico (ver siguiente sección), ofrecen una oportunidad única para

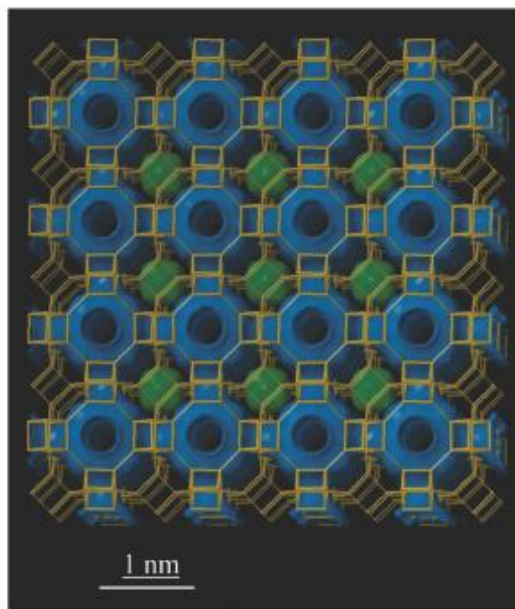


Figura 1

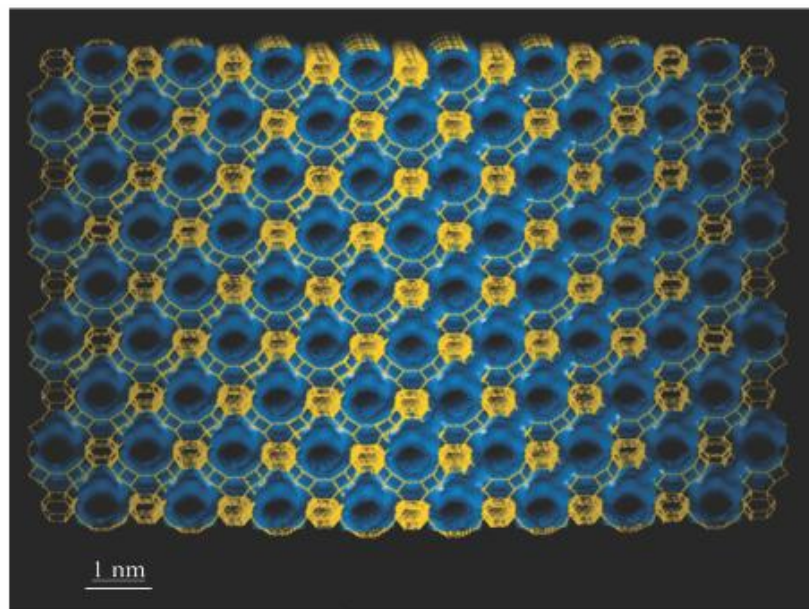


Figura 2

Estas figuras muestran la estructura de dos de las zeolitas más utilizadas. La figura 1 muestra la estructura de la zeolita tipo A (también conocida como LTA). El esquema muestra cavidades grandes vacantes, con un diámetro libre de 1.1 nm, y puntos cuánticos (poliedros verdes) situados en cavidades pequeñas con un diámetro de 0.66 nm. Las barras amarillas son enlaces puente por átomos de oxígeno entre átomos de Si y Al coordinados tetraédricamente. La figura 2 muestra la estructura de la zeolita faujasita. Asimismo, las varillas amarillas muestran los enlaces -Si-O-Al-. La escala de la figura se ha modificado porque esta estructura es más compleja. El diámetro libre de las cavidades es de ~1.2 nm. Las figuras se realizaron con un programa de gráficos en 3D disponible gratuitamente en el sitio web de la Sociedad Internacional de Zeolitas (<https://www.iza-structure.org/databases/>).

contribuir al desarrollo de nuevos materiales. El concepto de "Zeolitas en la frontera cuántica" conecta la ciencia de los materiales en medios porosos con la física cuántica, dos campos que no se solapan en las áreas tradicionales de la ciencia y la tecnología, pero cuando lo hacen, los resultados pueden ser revolucionarios.

Confinamiento cuántico en nanocavidades de zeolita

Uno de los fenómenos cuánticos fundamentales observados en las zeolitas es el confinamiento cuántico (Farrusseng 2017). Los poros a escala nanométrica de las zeolitas, con diámetros que oscilan entre 0.5 y 1.5 nanómetros según la estructura elegida (Figura 3), pueden alojar especies huéspedes como clústeres metálicos o moléculas orgánicas, lo que da lugar a niveles de energía discretos similares a los de los puntos cuánticos. Estos sistemas presentan propiedades electrónicas, ópticas y magnéticas que dependen del tamaño y pueden ajustarse controlando la estructura de la zeolita y la naturaleza de las especies encapsuladas.

La naturaleza aborrece el vacío y lo llena con facilidad, por eso las zeolitas son excelentes adsorbentes. El ser humano ha aprendido a crear nanocontenedores vacíos organizados y a obtener de ellos productos útiles. El espacio vacío organizado inherente a las zeolitas puede utilizarse para crear estructuras supramoleculares confinadas, organizadas y autoensamblables de baja dimensión. Cuando se imparte tal orden a moléculas o cúmulos, estas pueden adquirir nuevas propiedades que a menudo presentan amplias aplicaciones.

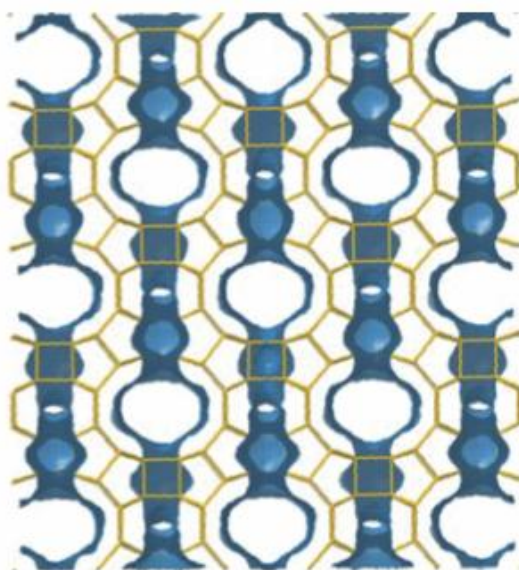
Por ejemplo, en zeolita mordenita, con canales unidimensionales de 0.7 nm de diámetro, es posible obtener conductores unidimensionales (1D). Se forma una matriz dieléctrica con un conjunto de "hilos cuánticos", filamentos conductores con un diámetro/sección transversal a escala nanométrica con un valor del orden de la longitud de onda de De Broglie de un electrón. En un alambre de este tipo, las propiedades de transporte de portadores están gobernadas por la mecánica cuántica.

El objetivo fundamental de la investigación sobre nanomateriales 1D es el estudio de cadenas atómicas/ moleculares cuasi-1D, que deberían presentar fuertes efectos cuánticos y propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas novedosas gracias a sus estructuras únicas. Estas cadenas que pueden ser estables en condiciones ambientales se han obtenido con éxito utilizando plantillas de confinamiento como las zeolitas. Las restricciones espaciales afectan a las propiedades físicas y químicas de estos sistemas mecánico-cuánticos, formados por átomos y moléculas atrapados durante el confinamiento en las cavidades de los tamices moleculares de las zeolitas.

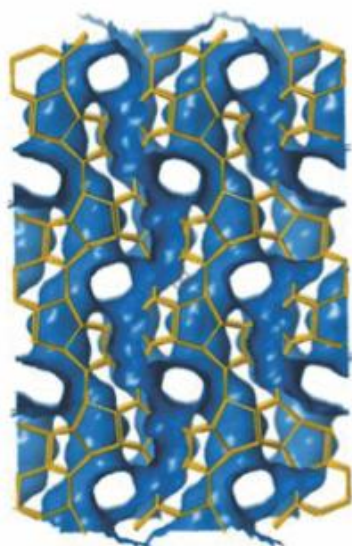
El autoensamblaje de puntos o hilos cuánticos semiconductores en una cavidad de zeolita o tamiz molecular para formar suprarredes cuánticas (Una suprarred es una estructura periódica de orden superior formada por el autoensamblaje de nanopartículas, moléculas o cúmulos en una red ordenada), tiene un gran potencial en el diseño y estudio de sistemas organizados relevantes para la electrónica cuántica, la óptica no lineal, el almacenamiento óptico de datos y la detección quimioselectiva.



Clinoptilolita



Mordenita



ZSM-5



Faujasita

Figura 3. Estructura de los poros en varias zeolitas.

Así, las zeolitas, valoradas desde hace tiempo por sus propiedades químicas macroscópicas, se adentran ahora en el ámbito de la ciencia cuántica. Su capacidad para retener, estabilizar y controlar la materia a escala nanométrica las convierte en atractivas candidatas para producir partículas con propiedades cuánticas novedosas. A medida que avance la investigación en esta intersección, las zeolitas podrían convertirse en materiales fundamentales en las tecnologías cuánticas del futuro. 

Referencia:

-Aljama, H.A., Head-Gordon, M. & Bell, A.T. (2022) Assessing the stability of Pd-exchanged sites in zeolites with the aid of a high throughput quantum chemistry workflow. *Nat Commun* 13, 2910. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29505-z>.

-Farrusseng, D., & Tuel, A. (2017). Zeolite-Encapsulated Catalysts: Challenges and Prospects. In: *Encapsulated Catalysts*, Chapter 11, pp. 33d5–386. doi:10.1016/b978-0-12-803836-9.00011-0