

Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas

MARIANO LÓPEZ DE HARO

JULIA TAGÜEÑA

El Dr. López de Haro es investigador del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, en Temixco, Morelos e Investigador Emérito del Sistema Nacional de Investigadores. Es Premio de la Academia de la Investigación Científica, A. C., receptor de la Medalla “Marcos Moshinsky” y Premio a la Investigación Científica de la Sociedad Mexicana de Física. Es miembro fundador de la Academia de Ciencias de Morelos. La Dra. Tagüeña es Investigadora Emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y colaboradora en el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3). Es Premio de Comunicación de la Ciencia de la RedPop 2017. Es Premio Nacional de Divulgación de la Ciencia Alejandra Jaidar 2020 y recibió en 2021 *The Public Understanding and Popularization of Science Award 2021*, TWAS-LACREP. Es miembro fundador de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

“Si usted piensa que entiende de la mecánica cuántica es que no la ha entendido.”
Richard Feynman (1918-1988)

Introducción

Una de las mayores motivaciones de las y los científicos es el comprender las leyes que rigen el universo. Además del enorme placer intelectual que da el entender cómo funcionan las cosas, se abre un mundo de posibilidades que pueden mejorar nuestras vidas. En efecto, comprender nos da la posibilidad de modificar, innovar y generar nuevos desarrollos para bien de la humanidad. Un ejemplo excelente de ello es la *mecánica cuántica*, una rama de la Física. Motivada inicialmente por el deseo de entender el comportamiento de la materia y la energía a escalas microscópicas, no solamente ha logrado ese objetivo, sino que ha transformado completamente nuestras vidas. Desarrollos como los láseres, la fibra óptica, los sistemas actuales de telecomunicación, los sistemas de posicionamiento global, la resonancia magnética nuclear en medicina, son desarrollos producto de la mecánica cuántica.

Para popularizar la importancia y el impacto de la ciencia cuántica y sus aplicaciones en todos los aspectos de la vida, el año 2025 ha sido designado por Naciones Unidas como *Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas*. La elección de la fecha no es casual, puesto que en este 2025 se cumplen cien años de la publicación del artículo de Werner Heisenberg (1), que junto con otros artículos de ese mismo año por Max Born y Pascual Jordan (2) y por Max Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan (3), crearon las bases de la llamada mecánica cuántica matricial, formulación que vendría a reemplazar a la vieja

teoría cuántica y conduciría a la mecánica cuántica moderna. Cabe destacar que Heisenberg recibió en 1932 el Premio Nobel de Física precisamente por su contribución al desarrollo de la mecánica cuántica. Al año siguiente de la mecánica cuántica matricial, en 1926 el físico austriaco Erwin Schrödinger, quien recibió el premio Nobel de Física en 1933, formuló la ecuación que lleva su nombre y apoyó la mecánica cuántica moderna al plantear el esquema para explorar de forma sistemática el mundo atómico y subatómico.

¿Cuál es el origen de estos desarrollos? ¿Cuáles son los avances logrados por la mecánica cuántica? Acompañemos a descubrir una interesante y sorprendente historia.

Antecedentes

A finales del siglo XIX, la física consistía esencialmente en la mecánica clásica de Newton, el electromagnetismo clásico de Maxwell y la termodinámica de Clausius y Carnot. La primera permitía la descripción de la dinámica de cuerpos materiales y el segundo se encargaba del estudio de la radiación. La materia y la radiación eran descritos mediante partículas y ondas, respectivamente, y las interacciones entre radiación y materia se describían bien mediante la fuerza de Lorentz o mediante la termodinámica. Debido a los innumerables éxitos de estas teorías, entonces se creía que ya se había llegado a la descripción definitiva de la naturaleza y que todos los fenómenos físicos podían ser explicados mediante las teorías generales de radiación y materia. El universo era explicable.

Sin embargo, al iniciarse el siglo XX, la teoría de la relatividad de Einstein, que describe lo que sucede a velocidades cercanas a la velocidad de la luz (c), y la disponibilidad de técnicas experimentales nuevas que permitían explorar las estructuras atómicas y subatómicas, dieron al traste con la creencia de que ya se sabía todo. En particular se hizo evidente que la validez de la física clásica NO se mantenía a nivel microscópico y que era necesario introducir nuevos conceptos para describir varios fenómenos microscópicos como la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, la estabilidad de los átomos y la espectroscopía atómica.

Un cuerpo negro es un objeto idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él. Se conoce como *radiación de cuerpo negro* a la energía que radia un sistema así y el término generalmente se utiliza para referirse al espectro de luz emitida por cualquier objeto que se calienta. La intensidad espectral de esta radiación tiene un pico a una frecuencia que aumenta con la temperatura del objeto emisor. Para explicar este fenómeno, Planck introdujo el concepto de cuanto (“*quantum*”) de energía y logró reproducir los resultados experimentales, al postular que el intercambio de energía entre la radiación y sus alrededores se llevaba a cabo en cantidades discretas (cuantizadas). Argumentó que el intercambio de energía entre una onda electromagnética de frecuencia ν y la materia solamente sucede en múltiplos enteros de $h\nu$, siendo h una constante fundamental, la llamada constante de Planck,

que tiene un valor de 6.63×10^{-34} J·s, muy pequeño, pero significativo en el mundo atómico. Por cierto, son los cuantos los que le dan el nombre a la nueva teoría.

Este concepto lo consolidó Einstein en su trabajo acerca del *efecto fotoeléctrico*. Este efecto consiste en la emisión de electrones cuando incide luz de una cierta energía, en algunos materiales. Experimentalmente se observó que la energía cinética máxima de los electrones emitidos no variaba con la intensidad de la luz (como se esperaría si la luz fuera considerada una onda) sino que era proporcional a la frecuencia de la luz incidente. Lo que si determinaba la intensidad de la luz era el número de electrones emitidos. Lo que Einstein señaló fue que la cuantización también debía aplicarse a la luz, la que estaba formada de paquetes discretos de energía o pequeñas partículas a las que denominó *fonones*.

Otro hito en el desarrollo de esta disciplina lo constituye el trabajo de Niels Bohr quien, poco después del descubrimiento de Ernest Rutherford del núcleo atómico, introdujo en 1913 su famoso modelo del átomo de hidrógeno, en el que combinó el modelo atómico de Rutherford, el concepto de cuanto de Planck y los fotones de Einstein. En dicho modelo propuso que los electrones en los átomos solamente podían encontrarse en estados discretos de energía y que la interacción entre los átomos y la radiación, esto es, la emisión o absorción de radiación por parte de los átomos, solamente se llevaba a cabo en cantidades discretas puesto que era el resultado de las transiciones de alguno de los electrones entre sus diversos niveles de energía.

La idea del comportamiento corpuscular de la luz sugerido por Einstein para el efecto fotoeléctrico fue confirmada experimentalmente por Compton en 1923. Al dispersar rayos X con electrones, Compton encontró que efectivamente los fotones de los rayos X se comportaban como partículas con ímpetu $h\nu/c$, siendo ν la frecuencia de los rayos X. Con ello quedó definitivamente establecido que las ondas electromagnéticas se comportan como partículas a nivel microscópico. En ese mismo año Louis de Broglie introdujo un nuevo concepto que era totalmente incompatible con la física clásica: postuló que no solamente las ondas mostraban comportamiento como partículas, sino que las partículas también podían mostrar comportamiento ondulatorio. La confirmación experimental de este fenómeno la realizaron Davisson y Germer en 1927 al encontrar que se podían obtener patrones de interferencia (una propiedad de las ondas) con partículas materiales como los electrones (Figuras 1 y 2).

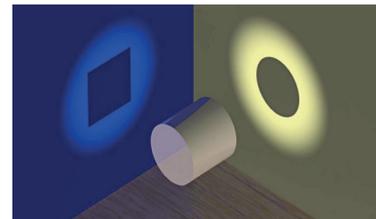


FIGURA 1. EN esta imagen se puede ver un círculo o un cuadrado, según como midamos. Así se da la dualidad onda-partícula según la medición. (https://es.wikipedia.org/wiki/Dualidad_onda_corpúsculo#:~:text=La%20dualidad%20onda%2Dcorpúsculo%2C%20también,%20localizadas%20en%20otros%20experimentos).

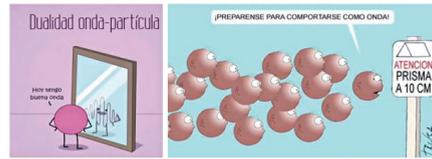


FIGURA 2. HAY muchos memes en Internet con “bromas físicas” sobre la dualidad onda-partícula.

En 1922 Stern y Gerlach pasaron un haz atómico por un campo magnético inhomogéneo y notaron que se desviaba, lo que llevó a proponer que los electrones tenían un momento magnético intrínseco. En 1925 Uhlenbeck y Goudsmit establecieron que el momento magnético del electrón existe, se llama *espín*, es intrínseco y está cuantizado ($+1/2, -1/2$ de h). Esto permite entender el ferromagnetismo desde la mecánica cuántica, con los llamados modelos de Ising (4) y de Heisenberg. La existencia de imanes es un ejemplo muy cotidiano de propiedades cuánticas.

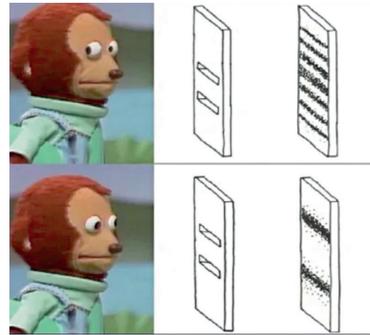
Las dos versiones de la mecánica cuántica.

A pesar del éxito predictivo del modelo de Bohr, tanto el esquema de la cuantización de Planck como las hipótesis en las que se basa dicho modelo no eran del todo satisfactorios en sus fundamentos teóricos. Esto fue lo que llevó a Heisenberg (1925) y Schrödinger (1926) a formular dos versiones independientes de la nueva teoría que ahora se conoce como la mecánica cuántica: la *mecánica cuántica matricial* y la *mecánica cuántica ondulatoria*. Basándose en las ideas de la cuantización de las ondas de Planck y en el modelo de Bohr, Heisenberg basó su formulación en el concepto de que los únicos intercambios de energía permitidos entre sistemas microscópicos son aquellos que son discretos (cuanta) y, expresando cantidades dinámicas como la energía, la cantidad de movimiento y el momento angular por medio de matrices, obtuvo un problema de valores propios para una matriz, la llamada *matriz Hamiltoniana*, que permite describir la dinámica de dichos sistemas microscópicos. La mecánica cuántica matricial es particularmente exitosa en la descripción de los quanta discretos de luz emitidos o absorbidos por los átomos.

La mecánica cuántica ondulatoria, formulada por Schrödinger, es una generalización del postulado planteado por de Broglie, sobre la naturaleza ondulatoria del electrón. Esta formulación, mucho más intuitiva que la matricial, describe la dinámica de los sistemas microscópicos a través de una función que satisface una ecuación de onda, la ecuación di-

ferencial ahora conocida como *ecuación de Schrödinger*. Las soluciones de dicha ecuación proporcionan el espectro de energía y la función de onda del sistema en estudio. Fue Max Born quien propuso una interpretación probabilística de la formulación ondulatoria al tomar el cuadrado del módulo de las funciones de onda que son soluciones de la ecuación de Schrödinger como *densidades de probabilidad*.

Aunque las dos formulaciones anteriores son muy diferentes, se demostró que en realidad son equivalentes y ambas se pueden obtener de la generalización propuesta por Paul Dirac, quien consideró objetos abstractos como estados vectoriales: kets, bras y operadores. Además, Dirac incluyó en sus ecuaciones al espín (5). Uno de los resultados más sorprendentes de la mecánica cuántica es que los objetos cuánticos pueden estar simultáneamente en dos o más estados. Solo cuando medimos los estados se colapsan y se mantienen. Mientras no los medimos están en un estado ambivalente. Cuando el sistema interactúa con el medio ambiente hay *decoherencia* (Figura 3).



LA MIRADA DEL observador colapsa el patrón de difracción (meme de Internet).

Schrödinger, para hacer una broma de este fenómeno, planteó la existencia de un gato (no es un gato real) que está en una caja donde hay un veneno



FIGURA 4. EN este meme de Internet la veterinaria le dice al Dr. Schrödinger que tiene para su gato una noticia buena y una mala.

que puede o no matarlo. Mientras no abrimos la caja, el gato está en ambos estados y en combinaciones de ellos. Solo cuando abrimos la caja y observamos, el gato vive o muere. No deja de ser gracioso que el gato se ha vuelto más popular que su creador (Figura 4).

Esta característica de los estados cuánticos permite un nuevo desarrollo tecnológico basado en la mecánica cuántica (Figura 5). Toda la tecnología moderna está basada en la cuántica, por ejemplo, los transistores usados en los chips de las computadoras, los discos compactos, las celdas solares, etcétera. Pero su impacto tecnológico no ha terminado.



FIGURA 5. LA computadora cuántica usa cúbits, que pueden estar en combinaciones 0 y 1, que son los valores que toman los bits. (imagen gratuita de Pixabay).

La mecánica cuántica y su relación con la filosofía.

Se puede afirmar que la mecánica cuántica es la base sobre la que descansa toda la física moderna: la física del estado sólido, la física atómica, la nuclear y la de partículas, la óptica, la termodinámica y la mecánica estadística, etc. Además de eso, también se considera fundamental para la química y la biología. Pero no solamente ha influido en estas disciplinas, sino que ha conducido a un profundo debate filosófico.

El desarrollo de la mecánica cuántica y las aparentes contradicciones respecto a lo que es “real” han tenido implicaciones filosóficas muy profundas, incluyendo lo que verdaderamente significan las observaciones científicas. Einstein y de Broglie creían firmemente que las partículas de los sistemas microscópicos tenían objetivamente una posición y un ímpetu en todo tiempo, aunque ambas no pudieran ser medidas. En ese sentido podemos decir que eran realistas. En contraste, Heisenberg se puede considerar antirrealista al afirmar que el conocimiento directo de lo que es real queda más allá del ámbito de la ciencia. De hecho, en su libro *The Physicist's Conception of Nature* (6), Heisenberg señala que solamente podemos hablar sobre el conocimiento (números y tablas) que describe algo acerca de las partículas de los sistemas microscópicos, pero nunca se tendrá un verdadero acceso a dichas partículas. Esta idea queda claramente reflejada en su relación de incertidumbre (Figura 6).



FIGURA 6. RELACIÓN de incertidumbre de Heisenberg, donde x es la posición, p es el ímpetu (la masa por la velocidad), y h la constante de Planck (figura gratuita de Pixabay)

En ese sentido, no se puede hablar del comportamiento de las partículas independientemente del proceso de observación. Como consecuencia, las leyes de la naturaleza formuladas matemáticamente en la mecánica cuántica no tratan directamente con las partículas elementales sino con el conocimiento que tenemos de ellas. Tampoco es posible hacerse preguntas acerca de si esas partículas existen objetivamente en un espacio y un tiempo dados. Así pues, cuando se habla de la imagen de la naturaleza que surge de la ciencia exacta de nuestro tiempo, no se trata de la imagen verdadera de la naturaleza sino de la imagen de nuestra relación con dicha naturaleza. Entonces la ciencia no confronta a la naturaleza como un observador objetivo, sino que se ve a ella misma como un actor en la interrelación entre el ser humano y la naturaleza. Es claro por lo tanto que el método científico de analizar, explicar y clasificar tiene limitaciones que provienen del hecho de que, por su intervención, la ciencia altera y remodela el objeto de la investigación. Esto es, método y objeto no pueden ser disociados.

Lo anterior refleja la posición de la llamada interpretación ortodoxa o de la escuela de Copenhague de la mecánica cuántica que ha sido durante décadas la posición dominante entre los físicos. Sin embargo, esta interpretación no está exenta de problemas. No obstante ser una teoría exitosa, deja a los físicos buscando probabilidades en lugar de certezas y rompe la liga entre causa y efecto. Habla de partículas que pueden ser ondas y ondas que pueden ser partículas, gatos que pueden estar a la vez vivos y muertos y muchas otras rarezas cuánticas espeluznantes acerca de fenómenos difíciles de explicar. De hecho, el propio Einstein, a pesar de la mutua admiración que se profesaban, sostuvo prácticamente desde el inicio un debate con Bohr acerca de dicha interpretación. A pesar de que fueron víctimas de indiferencia, las voces disidentes de la interpretación ortodoxa (que además de Einstein y de Broglie incluyen a Bell, Mermin, Bohm y Clauser) no se rindieron y su perseverancia ayudó a crear los fundamentos de una incipiente industria de computación cuántica que se espera generará mucho dinero en un futuro no muy lejano.

Para la discusión sobre la realidad y el observador recomendamos el diálogo realizado en 2022 en el Colegio

Nacional sobre si “¿La Luna está ahí cuando no estamos mirando?”, que es una famosa frase de Einstein (Figura 7). Él pensaba que efectivamente, la Luna está ahí independiente de nosotros. Para la mecánica cuántica esto no es así, la Luna depende del observador.



FIGURA 7. EL Colegio Nacional, <https://www.youtube.com/watch?v=9tUAdsxCL0>

En cuanto a la cuestión del debate entre Bohr y Einstein, que en realidad no se ha resuelto a favor del primero independientemente de la creencia más extendida al respecto, la podemos describir como sigue. Para Bohr, la única manera de darle sentido a la mecánica cuántica era aceptar el principio que él introdujo y que llamó principio de complementariedad. De acuerdo con el mismo, los físicos no tenían más remedio que aceptar describir los experimentos cuánticos y sus resultados usando conceptos totalmente incompatibles (pero complementa-

correcta y como parece haber una relación fantasmal. Para leer sobre el “entrelazamiento” se recomienda (8). Aunque hay muchos retos todavía que investigar, nadie plantea que la mecánica cuántica está equivocada.

Celebraciones

Terminamos diciendo que la Universidad Nacional Autónoma de México se ha unido a las celebraciones de este año internacional, con muchas actividades para niñas, niños y jóvenes, que viven en un mundo construido a partir de los conocimientos de la mecánica cuántica (Figura 8).



FIGURA 8. CELEBRACIONES cuánticas en la UNAM

rios) con la física clásica. Esto nos lleva a cuestionar el propósito de la física. ¿La meta más importante es tener una descripción cada vez más detallada y tener el control de los fenómenos independientemente de que los físicos la entiendan? O, por el contrario, ¿se trata de una búsqueda continua de indicios cada vez más profundos acerca de la realidad física? Einstein prefería la segunda opción y se negó a aceptar el principio de complementariedad como la única salida. De hecho, ideó una serie de experimentos mentales muy elaborados, con los que bus-

Con más de 30 actividades académicas y de divulgación, diez entidades de la UNAM festejarán el año 2025 sobre cómo la teoría cuántica ha impactado a la humanidad en comunicaciones, medicina, transporte y medio ambiente, así como su futuro en México y el mundo [9].

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com

Referencias

- Heisenberg, W. “Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen”, *Zeitschrift für Physik*, 33, 879–893 (1925)
- Born, M. y P. Jordan, “Zur Quantenmechanik”, *Zeitschrift für Physik*, 34, 858–888 (1925).
- Born, M., W. Heisenberg y P. Jordan, “Zur Quantenmechanik II”, *Zeitschrift für Physik*, 35, 557–615 (1925).

- López de Haro, M. Cien años del modelo de Ising: una historia exitosa que no comenzó bien. La Unión de Morelos, 4 de noviembre de 2024. <https://acmor.org/publicaciones/cien-a-os-del-modelo-de-ising-una-historia-exitosa-que-no-comenz-bien>
- Feynman, R. P., R. B. Leighton y M. Sands. Lecciones de física de Feynman. III. Mecánica cuántica, ISBN:

- 9786071677921
- Heisenberg, W. *The Physicist's Conception of Nature*, ISBN-10: [0837131073
- Leyvraz Waltz, F. A. Misterios de la mecánica cuántica: el Nobel de Física 2022. La Unión de Morelos, 10 de octubre de 2022. <https://acmor.org/publicaciones/misterios-de-la-mec-nica-cu-ntica-el-nobel-de-f-sica-2022>
- Mochán Backal, W. F. Entrelazados. La Unión de Morelos, 7 de junio de 2021. <https://acmor.org/publicaciones/entrelazados>
- DGCS, UNAM. Celebrará la UNAM un siglo de la revolución cuántica. Enero 29, 2025. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/dboletoin/2025_059.html