



La incertidumbre cuántica (*)

Peter V. Landshoff

Centre for Mathematical Sciences

Universidad de Cambridge

e-mail: P.V.Landshoff@damtp.cam.ac.uk

página web: <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/pvl>

La mecánica cuántica ha tenido un enorme impacto en nuestras vidas cotidianas. Es crucial para entender cómo funcionan muchos artilugios: los transistores de nuestros radios, los láseres de nuestros reproductores de CD, los microchips de nuestros ordenadores.

La mecánica cuántica es la física de lo extremadamente pequeño, mucho más pequeño de lo habitual para la mayoría de nosotros. Por ejemplo, describe los átomos, que son 10 millones de veces más pequeños que un grano de arena. En un átomo, los electrones se mueven alrededor de un núcleo central, de forma parecida a como los planetas orbitan en torno al sol en nuestro sistema planetario. Pero la mecánica cuántica que necesitamos para sistemas extremadamente pequeños, como el de un átomo, es diferente de la mecánica clásica creada en el siglo XVII por el matemático y científico de Cambridge, Sir Isaac Newton, para describir el sistema solar.

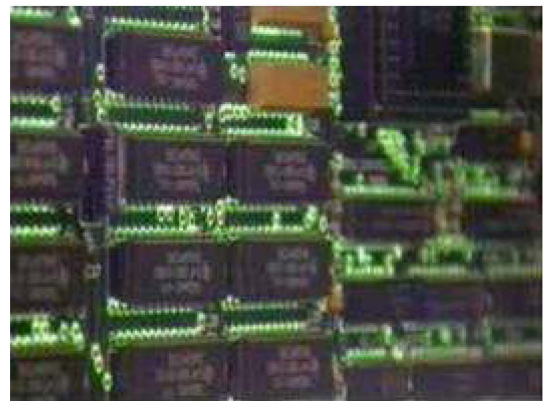
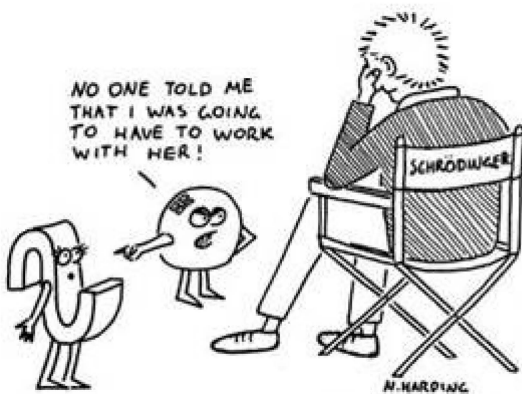


Figura 1. La mecánica cuántica nos ha permitido diseñar semiconductores cada vez mejores.

Es fácil habituarse a la mecánica clásica, ya que describe el movimiento familiar de las cosas que vemos a nuestro alrededor, pero la mecánica cuántica es muy diferente. Al principio todo el mundo la encuentra muy extraña. Porque se sale de nuestra experiencia ordinaria, necesitamos un lenguaje especial para hablar de ella, y este lenguaje son las matemáticas. Las matemáticas son esenciales para establecer la teoría y para inferir sus sorprendentes y sutiles consecuencias. Entre éstas están que nada es siempre cierto en el mundo de la mecánica cuántica y que todas las partículas se comportan como ondas.

Los átomos

El sistema solar se mantiene junto gracias a las fuerzas gravitacionales. Para los electrones en un átomo las fuerzas son eléctricas, más que gravitacionales –los electrones y los núcleos están cargados eléctricamente–. Pero si los electrones están en órbita alrededor de los núcleos, justamente como los planetas lo hacen respecto del Sol, surge una seria dificultad: las partículas que se mueven en órbitas están continuamente cambiando su dirección de movimiento y, cuando esto sucede a una partícula cargada, irradia energía: este es el principio básico de la radiotransmisión.



¡Nadie me dijo que iba a tener que trabajar con ella!

Así pues, con la física clásica el electrón perdería continuamente energía y espiralaría hacia el núcleo, por lo que el átomo colapsaría. La razón por la que esto no sucede fue explicada por un modelo atómico ideado en 1913 por el físico danés Niels Bohr. Este científico se dio cuenta de que los sistemas muy pequeños, tales como los átomos, no obedecen a la mecánica clásica. En su nueva mecánica cuántica únicamente se permiten ciertos valores discretos de energía. Cuando el electrón está en su nivel de energía permitido más bajo no puede irradiar ninguna energía más, y de este modo el colapso del átomo no es posible.

Se puede usar también la mecánica cuántica para describir el sistema solar. Como en el caso de los electrones, los niveles de energía permitidos de los planetas son discretos. Pero la separación entre estos niveles es tan pequeña

que no es una restricción muy real y la mecánica clásica es perfectamente adecuada para describir el sistema. Los efectos de la mecánica cuántica únicamente son importantes, en general, para sistemas submicroscópicos.

La versión de Bohr de la mecánica cuántica contenía la primera indicación de que los electrones, aunque son partículas, se comportan como ondas. Ello fue hecho explícito en 1926 por el físico austriaco Erwin Schrödinger, cuyas ecuaciones son usadas todavía hoy como punto de partida de la mayoría de los cálculos.

Al mismo tiempo, Werner Heisenberg en Alemania inventó una formulación de la mecánica cuántica que parecía muy diferente de la de Schrödinger: más que ondas, involucraba matrices. Poco después, Paul Dirac, ganador de un premio Nobel y ocupante de la misma cátedra que una vez desempeñó Newton en Cambridge, demostró que la teoría de Heisenberg podía ser llevada a la forma de Schrödinger mediante una ingeniosa transformación matemática. Así la gente comenzó a creer que entendía la estructura matemática de la teoría, pero sus peculiares consecuencias continúan, hasta hoy mismo, dejándonos perplejos y fascinados.

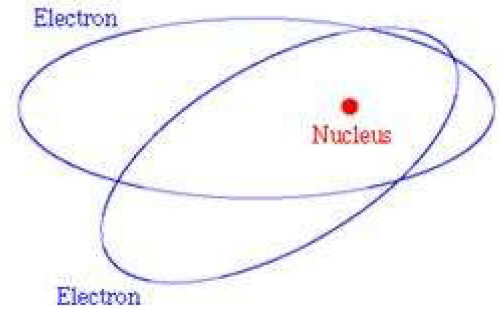


Figura 2. Dibujo clásico de electrones en órbita alrededor del núcleo de un átomo.

Los electrones como ondas

La luz tiene una naturaleza dual: a veces parece estar compuesta de partículas, y otras veces se comporta como las ondas. Pero resulta que ello también es cierto para los electrones y muchas otras partículas. Si un haz de electrones pasa a través de un cristal, experimenta una difracción, un fenómeno usualmente asociado con el comportamiento ondulatorio de la luz.

Cuando se coloca una pantalla fluorescente detrás del cristal, aparece un patrón de difracción sobre la pantalla. Los átomos espaciados regularmente en el cristal originan la difracción. Este patrón puede ser explicado asociando a los electrones una onda de longitud λ , la cual cambia con el momento p del electrón de acuerdo con la relación descubierta por el físico francés Louis de Broglie^[1]:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Se trata exactamente de la misma relación que se aplica a los fotones, las “partículas” de la luz. En efecto, la mecánica cuántica asocia una onda con cualquier tipo de partícula, y la relación de De Broglie es universal.

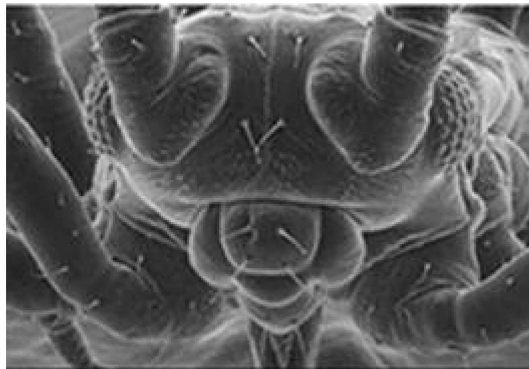
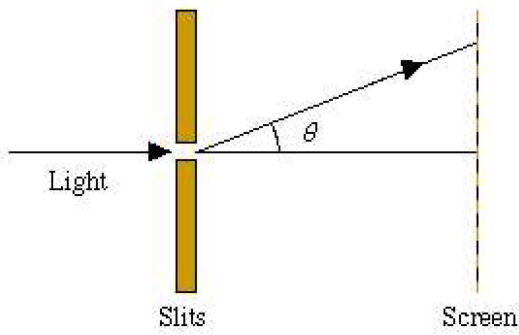


Figura 3. Imagen de una mosca mediante un microscopio electrónico. La potencia de resolución de una lente óptica depende de la longitud de onda de la luz utilizada. Un microscopio electrónico aprovecha las propiedades ondulatorias de las partículas para mostrar detalles que sería imposible ver con la luz visible. [Fuente: LEO Electron Microscopy Ltd, Imagen de una mosca].

Las ondas de luz o las ondas electromagnéticas son flujos de fotones. El número de ellos es proporcional a la intensidad de la luz.

Es posible hacer que la intensidad sea tan baja que durante un experimento de difracción únicamente un fotón llegue a las rendijas y pase a la pantalla. (Análogamente, podemos permitir que solamente un electrón atraviese el cristal).

En estos casos no podemos calcular con certeza el ángulo θ con que la partícula es difractada. Sin embargo, si el experimento se repite muchas veces, encontramos una *distribución de probabilidad* para θ que tiene la misma forma que la variación de



θ is the greek letter *theta*

Figura 4. En un experimento de difracción se dirige la luz a través de un par de rendijas en la pantalla, produciendo un patrón de interferencia (véase *Crisis de identidad de la luz*, en otro número de *Plus Magazine*).

la intensidad con θ en un experimento donde hay un flujo continuo de partículas.

La ecuación de Schrödinger

Esto sugiere que la asociación, en mecánica cuántica, de una onda a un fotón, o a cualquier otra clase de partícula, es de algún modo *estadística*. De acuerdo con la teoría cuántica nunca se puede predecir con certeza cuál será el resultado de un experimento particular: lo más que se puede hacer es calcular la *probabilidad* de que el experimento tenga un resultado dado, o se puede calcular el valor promedio del resultado si el experimento se repite muchas veces.

Mientras que en el caso de los fotones las ondas tienen una interpretación física directa como oscilaciones del campo electromagnético, para otras partículas hay construcciones matemáticas mucho más puramente abstractas que serán usadas para calcular las distribuciones de probabilidad.

La “función de onda” que describe un electrón, digamos, varía con la posición \mathbf{r} y el tiempo t y se escribe usualmente como sigue:

$$\Psi(\mathbf{r}, t)$$

Satisface la ecuación diferencial que fue deducida primeramente por Schrödinger. Él no pudo *probar* que su ecuación fuera correcta, si bien llegó a ella mediante un razonamiento plausible a partir de varios hechos conocidos acerca de la naturaleza ondulatoria de la materia. La “prueba” de la ecuación radica en haber sido aplicada, con éxito, a un gran número de problemas físicos.

Resulta que Ψ debe tener dos componentes a fin de describir satisfactoriamente la física. Es una función con valores complejos; las dos componentes son sus partes real e imaginaria.

Cuando se resuelve la ecuación de Schrödinger correspondiente a un electrón en órbita alrededor de un núcleo atómico, llegamos correctamente a los niveles discretos de energía. Es posible efectuar este cálculo sin comprender cuál es el significado físico de la función de onda Ψ . Ciertamente, fue sólo un poco más tarde cuando Bohr sugirió la interpretación física correcta: si se hace una medición de la posición del electrón en el tiempo t , la probabilidad de que se encuentre en un entorno infinitesimal de \mathbf{r} , que los matemáticos escriben como $d^3\mathbf{r}$, es:

$$|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d^3\mathbf{r}$$

Esta es la mejor información que la mecánica cuántica puede ofrecer: si la medición se repite muchas veces, se obtendrán cada vez resultados diferentes, y la única cosa que se puede predecir es la distribución de probabilidad. Esta indeterminación básica ha fascinado a los filósofos a lo largo de los años, pero los físicos ya se han habituado a ella.

Referencias

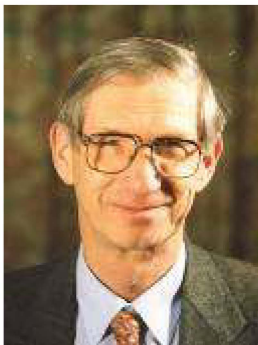
La biografía de los matemáticos mencionados en el artículo están disponibles en el [MacTutor History of Mathematics archive](#):

- Sir Isaac Newton
- Niels Bohr
- Erwin Schrödinger
- Werner Heisenberg
- Paul Dirac
- Louis de Broglie

Reconocimientos

Este texto está basado en el libro *Essential Quantum Physics* del que son autores P.V. Landshoff, A.J.F. Metherell y G.W. Rees, publicado por Cambridge University Press en 1997.

[1] Aquí, h es la constante de Planck (N. del T.).



Sobre el autor

El profesor **Peter Landshoff** centra su investigación en los *quarks* (de lo que estamos hechos nosotros y todas las cosas en el mundo) y explica mecánica cuántica en la Universidad de Cambridge.



matemática

revista digital de divulgación matemática

(*) Este artículo apareció en el número 5 (mayo 1998) de *Plus Magazine*. *Matemática* agradece a los responsables del Millennium Mathematics Project de la Universidad de Cambridge la autorización para publicar su traducción al castellano. (Traductor: José M. Méndez Pérez).

Cerrar ventana