

# Interpretaciones de la mecánica cuántica

Claudia E. Vanney

Universidad Austral

El surgimiento de la mecánica cuántica condujo, a inicios del siglo XX, a una revisión del paradigma clásico. Por un lado, los fenómenos microscópicos estudiados por esta teoría se encuentran muy lejos de nuestra observación directa; y muchos de sus resultados experimentales, además, desafiaron fuertemente el sentido común. Por otro lado, se requiere una interpretación para relacionar el formalismo teórico con los resultados empíricos, con el lenguaje común y con una visión ontológica.

Mientras que las aplicaciones tecnológicas de la mecánica cuántica son extraordinariamente abundantes, la cosmovisión que brinda esta teoría es una cuestión altamente controvertida. Como existen actualmente muchas interpretaciones diversas de la mecánica cuántica compatibles con los datos empíricos, elegir una interpretación entre las múltiples opciones vigentes no resulta sencillo.

## 1 Peculiaridades del mundo cuántico ↑

En general, el estado de un sistema físico se define a partir del valor que asumen un conjunto de variables dinámicas relevantes. Uno de los mayores cambios conceptuales de la física cuántica es que, a diferencia de lo que sucede en la física clásica, el estado del sistema cuántico no da un acceso a las magnitudes físicas observables o medibles de un modo directo.

En 1926 Erwin Schrödinger propuso un primer formalismo ondulatorio para describir el mundo cuántico (Schrödinger 1926). En este formalismo, el estado cuántico se encuentra representado por una función compleja  $\psi(X,t)$ , denominada *función de onda*, donde  $X$  representa alguna magnitud física -u observable- asociada al sistema como, por ejemplo, la posición o el momento cinético en el caso de una partícula.

Si bien la amplitud de  $\psi$  es un número complejo, su cuadrado  $|\psi|^2$  es un número real que puede ser interpretado como una magnitud física. El primero en proponer esta interpretación del estado cuántico fue Max Born, quien consideró que  $|\psi|^2$  representaba la probabilidad de obtener uno de los posibles valores de un observable físico si se efectúa la medición adecuada (Pais 1982). En el caso de una partícula única, por ejemplo, si su estado está representado por la función de onda  $\psi(q,t)$ , la probabilidad de hallar la partícula en la posición  $q$  en el instante  $t$  es  $|\psi(q,t)|^2$ .

A la versión ondulatoria de Schrödinger pronto siguió una nueva formulación vectorial más rigurosa, que es la que se utiliza en la actualidad. En 1932 (versión en inglés en 1955) John von Neumann estableció un tratamiento axiomático riguroso de la mecánica cuántica enmarcado en el espacio vectorial de Hilbert (von Neumann 1955). En la formulación de von Neumann, el estado del sistema está representado por un vector normalizado  $|\psi\rangle$  (vector de estado). La nueva formulación incorporó la idea de Born

sobre el modo de calcular las probabilidades asociadas a un cierto estado cuántico con el nombre de *regla de Born*.

La principal diferencia entre los estados de los sistemas cuánticos y los estados de los sistemas clásicos se encuentra en que, incluso la especificación más completa que brindan los estados cuánticos es siempre probabilística. Pues para cada magnitud física -u *observable*- el estado cuántico sólo especifica una distribución de probabilidades de los distintos valores posibles de la magnitud, también llamado *espectro de autovalores*. En la nueva formulación matricial los observables se representan mediante operadores lineales hermíticos, cuyos *autovectores* -estados asociados a un *autovalor*- son ortogonales entre sí, y en algunos casos definen una base en el espacio de Hilbert.

Pero los estados cuánticos también tienen otra peculiaridad. En los sistemas cuánticos, el principio de superposición establece que no sólo los autovectores -*estados puros*- son estados del sistema, sino que también lo es cualquier combinación de ellos. Es decir, tener y no-tener una propiedad determinada también es un posible estado cuántico. El principio de superposición introduce así una profunda diferencia entre la descripción clásica y la descripción cuántica, distinción tradicionalmente ejemplificada con el famoso experimento pensado del gato de Schrödinger (Schrödinger 1935a). En este experimento hipotético, un gato es encerrado en una caja que contiene un dispositivo letal, que es accionado mediante un átomo radiactivo que tiene un 50% de probabilidad de decaer durante el tiempo de observación. Si se describe el sistema entero con el formalismo cuántico se obtiene la aparentemente absurda conclusión de que, si se abriera la caja, el gato se encontraría en el estado de superposición de 'estado vivo' y 'estado muerto'.

A diferencia de la física newtoniana, diversas propiedades de los sistemas físicos (posición, velocidad, energía, tiempo, etc.) no se encuentran todas bien definidas simultáneamente. El principio de indeterminación de Heisenberg establece que las diversas variables pueden agruparse en pares (posición/momento lineal, tiempo/energía) correspondiendo con el hecho de que dos magnitudes de un par no pueden ser medidas simultáneamente con una precisión infinita (Heisenberg 1927). Por ejemplo, si se conoce la posición de una partícula con gran precisión, su momento debe establecerse con menor certeza. Así, la trayectoria de una partícula en mecánica cuántica no puede definirse como en la mecánica clásica, pues no es posible determinar simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula.

En la física clásica, partículas idénticas como dos electrones son distinguibles, porque durante su movimiento es posible seguir las trayectorias de cada una, manteniendo así su identidad separada. Pero como en la mecánica cuántica no hay trayectorias observables, las partículas idénticas son indistinguibles.

La evolución temporal de un sistema cuántico se encuentra regida por la *ecuación de Schrödinger*:

$$i\hbar \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

donde  $H$  es el operador hamiltoniano del sistema, que corresponde a (al observable de) la energía total del sistema. La ecuación de Schrödinger establece una sucesión unívoca entre estados (*evolución unitaria*), de manera que es una ecuación determinista.

Medir, en general, consiste en asignar experimentalmente un valor cuantitativo a una magnitud observable. La medición no supone un problema en la física clásica, porque en ella, cuando se repite la medición de una variable en las mismas condiciones se obtiene siempre el mismo resultado. En un contexto cuántico, en cambio, si el sistema se encuentra en un estado de superposición y no en un estado puro, el resultado de la medición de un observable puede ser cualquiera de sus *autovalores*. Como la teoría cuántica sólo permite calcular la probabilidad de obtener un resultado particular, el núcleo del problema de la medición cuántica consiste en explicar cómo se obtuvo un resultado específico en una medición particular (Krips 2013). El problema de la medición ha jugado un papel central en el debate Einstein-Bohr (Bohr 1958), estableciendo también el contexto para muchas de las paradojas de la teoría (Wheeler y Zurek 1983).

Los estados cuánticos de los sistemas compuestos por varias partículas también difieren de los clásicos. A diferencia de lo que sucede en los sistemas macroscópicos, el estado de un sistema compuesto cuántico no puede expresarse mediante un simple producto de los estados de sus componentes, sino que es necesario añadir también un término de *interferencia*. El fenómeno de interferencia es una característica bien conocida en la superposición de ondas, y consiste en que se refuerzan o cancelan -según estén en fase (ambos máximos coinciden) o no (el máximo de una onda coincide con el mínimo de la otra)- dando lugar a zonas de máximos y mínimos de intensidad.

Otra peculiaridad del mundo cuántico es la relación que existe entre los estados de las partículas que han interactuado. En 1935 Erwin Schrödinger explicó que, cuando hubo una interacción física temporal entre dos partículas, ambas deben describirse mediante una única función de onda (Schrödinger 1935b). Esta propiedad se conoce con el nombre de *entrelazamiento cuántico* (Bub 2014). El entrelazamiento implica que si un sistema cuántico interactúa con otro en un momento cualquiera, ambos sistemas continúan manteniendo una asombrosa correlación, que persistirá incluso después de que hayan sido separados por grandes distancias (Aspect, Dalibard, and Roger 1982). Esta afirmación tiene consecuencias notables. En la física newtoniana, todo sistema puede ser analizado en partes, cuyos estados y propiedades determinan las propiedades del conjunto que componen. Pero los estados entrelazados de la mecánica cuántica se resisten a este análisis, oponiéndose así al reduccionismo metodológico de la física de Newton (Healey 2009).

Texto tomado de:

*Vanney, Claudia, E. Interpretaciones de la mecánica cuántica, en: Diccionario Interdisciplinar Austral © Instituto de Filosofía - Universidad Austral. 2016.*

*ISSN: 2524-941X.*