Interpretaciones de la mecánica cuántica

Claudia E. Vanney
Modo de citar:
Vanney, Claudia E.. 2016. "Interpretaciones de la mecánica cuántica". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck.
URL=http://dia.austral.edu.ar/Interpretaciones_de_la_mecánica_cuántica

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.

El objetivo de este trabajo es presentar las características más relevantes de las principales interpretaciones de la mecánica cuántica, indicando la posición que cada una de ellas asume en los temas más controvertidos. Se señala, además, que todavía se está muy lejos de alcanzar un consenso incluso en las cuestiones más esenciales entre los investigadores que trabajan en los fundamentos de esta teoría.

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 Ψ 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).

2 Cuestiones controvertidas ↑

Las peculiaridades del mundo cuántico condujeron muy pronto al desarrollo de explicaciones muy diversas. Se fueron gestando así tanto distintas interpretaciones del formalismo cuántico original, como nuevas aproximaciones teóricas que modifican el formalismo primitivo o incluso introducen nuevos elementos teóricos relevantes. Los fundamentos de la mecánica cuántica continúan siendo muy discutidos en el seno de la comunidad científica actual, sin que se alcance un consenso ni siquiera en las cuestiones más esenciales, como muestran dos relevamientos realizados en el año 2013 (Schlosshauer, Kofler y Zeilinger 2013, Norsen y Nelson 2013). Entre las principales cuestiones controvertidas se encuentran las siguientes:

¿Cuál es el significado del estado cuántico? No hay acuerdo acerca del significado ontológico de la función de onda en las diversas interpretaciones de la mecánica cuántica. Mientras que algunas interpretaciones sostienen que la función de onda es real, otras niegan su realidad objetiva. “Los estados cuánticos son los objetos matemáticos centrales de la teoría cuántica. Es por tanto sorprendente que los físicos no hayan podido ponerse de acuerdo sobre qué representa verdaderamente un estado cuántico. Una posibilidad es que un estado cuántico puro corresponda directamente a la realidad. Sin embargo, hay una larga historia de sugerencias acerca de que un estado cuántico (incluso un estado puro) representa sólo conocimiento o información sobre algunos aspectos de la realidad” (Pusey, Barrett y Rudolph 2012, 475).

¿Es la mecánica cuántica una teoría no-local? La interpretación del entrelazamiento cuántico dio lugar a posturas diversas. Algunas interpretaciones, como la mecánica bohmiana, sostienen que la mecánica cuántica es una teoría no-local. Es decir, una teoría para la cual los efectos físicos se pueden transmitir de un lugar a otro con una rapidez mayor a la velocidad de la luz, admitiendo una *acción-causal-a-distancia* instantánea. Aunque la compatibilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad especial es una cuestión muy controvertida, algunas interpretaciones buscan evitar la posibilidad de violar el espíritu de la relatividad subyacente en la no-localidad, proponiendo asumir una *no-separabilidad holística* y no una no-localidad. Esta no-separabilidad implica que las partes que integran un sistema compuesto no tienen propiedades individuales independientemente de las propiedades del sistema completo (Redhead 2001).

¿Es la mecánica cuántica una teoría completa? Para algunas interpretaciones, como la de Copenhague, la mecánica cuántica es una teoría completa. Sin embargo, tampoco faltaron físicos, como Albert Einstein, que se resistieron al indeterminismo de la mecánica cuántica, y sostuvieron que el indeterminismo no es una característica de la

naturaleza, sino la mera consecuencia de una ignorancia relativa a ciertos factores relevantes o *variables ocultas* (Einstein, Podolsky y Rosen 1935). Así, para algunas interpretaciones, el indeterminismo cuántico simplemente manifestaría que la mecánica cuántica no es una teoría completa. Las interpretaciones que asumen este supuesto aspiran al desarrollo de una teoría más completa que permita volver a conectar los objetos microscópicos con leyes deterministas y sin azar.

Pero esta aspiración cuenta con ciertas restricciones conocidas como *desigualdades de Bell*. En 1964 Bell probó que una teoría cuántica realista (todos los observables tienen una existencia independiente del observador para todo tiempo) y local (no admite interrelaciones instantáneas entre regiones espacialmente distantes) no puede reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica (Bell 1964, Bell 1966). Como las desigualdades de Bell fueron empíricamente confirmadas -primero por Aspect (Aspect, Dalibard y Roger 1982, Aspect 1999, Aspect 2007) y más recientemente por Hensen (Hensen et al. 2015)- cualquier teoría cuántica que se ajuste a la experiencia debe contradecir la realidad objetiva o la localidad o ambas.

¿Es real el indeterminismo cuántico? La respuesta a esta pregunta es muy diversa según la interpretación que se elija. El indeterminismo implica que un pasado dado es consistente con una variedad de posibles futuros. Algunas interpretaciones de la mecánica cuántica, como por ejemplo la mecánica bohmiana, se apoyan en las características de la ecuación de Schrödinger para afirmar que el universo entero, concebido como un sistema cuántico aislado, evoluciona de un modo totalmente determinista. Otras interpretaciones destacan, en cambio, que no es posible predecir unívocamente el valor que adquieren las magnitudes de un sistema cuántico, sino sólo inferirlas probabilísticamente. Las diferentes interpretaciones que asumen esta segunda posición suelen fundamentar el indeterminismo cuántico de diversas maneras (Vanney 2015).

¿Cómo se resuelve el problema de la medición cuántica? Una de las mayores preocupaciones interpretativas de la mecánica cuántica se encuentra en explicar el problema de la medición. Para la visión estándar de la mecánica cuántica, el estado cuántico es una superposición de varios estados diferentes, asociados a los diversos resultados posibles de la medición de un observable particular. Cuando se realiza una medición de ese observable se obtiene un único valor entre todos los valores posibles. Como veremos luego, algunas interpretaciones explican esta reducción del estado cuántico postulando un *colapso de la función de onda*. Pero el colapso no es una consecuencia de la evolución dinámica del sistema, sino una condición extra impuesta por algunas interpretaciones a la teoría. Las interpretaciones de la mecánica cuántica que incorporan el colapso de la función de onda difieren entre sí en el modo de interpretarlo. Si bien durante el siglo XX la visión mayoritaria de los investigadores asumió la hipótesis del colapso, el interés por las interpretaciones que no lo admiten resurgió con intensidad en las últimas décadas.

¿Cuál es el papel del observador en la medición? Se suele afirmar que la física newtoniana es realista pues aspira a describir el mundo tal como es en sí mismo, con independencia del observador. Esto mismo no puede afirmarse de un modo rotundo en la mecánica cuántica, porque para algunas interpretaciones el observador cumple una función relevante en el proceso de medición. Algunas de ellas, por ejemplo, lo consideran el principal responsable del colapso de la función de onda (Shimony 1963, Nauenberg 2007).

¿Cómo se lleva a cabo la transición entre el mundo cuántico y el mundo clásico que percibimos? Un primer intento consistió en pretender obtener el formalismo de la mecánica clásica mediante la aplicación de un límite matemático del formalismo cuántico, como sucede, por ejemplo, en la relatividad especial. Sin embargo, muy pronto se vio que este camino era inconducente. Así, en las últimas décadas, el problema del límite clásico ha dejado de pensarse exclusivamente en términos de relaciones interteóricas, para asumir que también involucra algún tipo de proceso físico, al que se llamó *decoherencia cuántica*. El proceso de decoherencia es tratado de diversas maneras en las distintas interpretaciones (Bacciagaluppi 2012).

3 Principales interpretaciones ↑

Para decirnos algo acerca del mundo real, cualquier formalismo matemático debe poder interpretarse en función de cantidades medibles. Pero a su vez, para que un formalismo matemático se transforme en un formalismo físico

también se requiere una interpretación ontológica. Si el paso del formalismo matemático a su interpretación ontológica muchas veces resultó problemático en la mecánica, las características anti-intuitivas del mundo cuántico y su referencia a un ámbito inobservable agudizan esta dificultad, abriendo el camino al surgimiento de diversas interpretaciones de esta teoría.

3.1 Interpretaciones que asumen el colapso de la función de onda ↑

El *postulado de proyección* o *colapso de la función de onda* en el proceso de medición fue propuesto originalmente por Heisenberg, para dar cuenta del paso desde la distribución de probabilidad de valores potenciales (estado cuántico antes de la medición) al único valor del estado medido (estado cuántico después de la medición) (Heisenberg 1927). Es decir, a pesar de que un estado cuántico es una superposición de sus posibles estados, al ser medido éste se *proyecta* o *colapsa*. En otras palabras, durante el proceso de medición, el sistema adopta aleatoriamente uno de sus posibles estados en una evolución *indeterminista*. El colapso, como ya se ha mencionado, no es una consecuencia de la evolución del sistema según la ecuación de Schrödinger, sino un postulado adicional que se impone como tal a la teoría. La causa del colapso de la función de onda en un único resultado radica en la interacción entre el sistema y el observador (o el aparato de medición).

3.1.1 Interpretación de Copenhague ↑

La interpretación de Copenhague fue el primer intento de explicación del mundo de los átomos tal como es representado por la mecánica cuántica. También conocida como interpretación ortodoxa o estándar, esta interpretación reunió un conjunto de ideas discutidas desde 1927 por un grupo de pensadores (Niels Bohr, Werner Heisenberg y Max Born, entre otros), que coincidieron en afirmar que la mecánica cuántica es una teoría correcta y completa (Faye 2014, Howard 2004). La interpretación de Copenhague fue presentada de un modo unitario -y por primera vez con este nombre- por Heisenberg en 1955 (Heisenberg 1958). Bajo esta denominación actualmente se agrupa una familia de interpretaciones de la mecánica cuántica que enfatizan el indeterminismo cuántico, la importancia de la *complementariedad*, y el papel que juega el aparato de medición clásico al definir la naturaleza de la medición y en la determinación de sus resultados efectivos.

Esta interpretación considera que el estado cuántico es un catálogo probabilístico de disposiciones. La función de onda o estado cuántico define para cada propiedad (posición, energía, momento) la distribución de probabilidad de sus valores posibles, identificando el cuadrado de la amplitud de la función de onda con una probabilidad, según la regla de Born.

Pero aunque la regla de Born permitió cierta interpretación del estado cuántico, no solucionó todas las dificultades interpretativas. El paradigmático experimento de las dos rendijas (Bohr 1958, 41-47), por ejemplo, pronto puso en evidencia que las probabilidades clásicas no interfieren entre sí del mismo modo que las probabilidades cuánticas (Plotnitsky 2010). Bajo estas circunstancias, Niels Bohr propuso el *principio de complementariedad*. Según este principio la teoría cuántica implica la admisión de modos de descripción complementarios, mutuamente excluyentes y cada uno completo en sí mismo. Un ejemplo de esta complementariedad es la dualidad onda-corpúsculo (Bohr 1937, Bohr 1950).

3.1.2 Interpretaciones que asumen un colapso subjetivo ↑

A pesar de que Bohr y otros fundadores de la teoría negaron categóricamente la tesis ontológica de que el sujeto que mide impacta de un modo directo sobre el resultado de la medición, la hipótesis del colapso condujo también a interpretaciones subjetivistas de esta teoría. En este sentido, varios pensadores atribuyeron el colapso de la función de onda durante el proceso de medición a una intervención intrínseca de la mente del observador.

En *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, von Neumann analizó el problema de la medición cuántica con profundidad, proponiendo extender la interacción entre el objeto y el instrumento de medida hasta alcanzar al observador. Argumentó que la medición de una propiedad observable sólo está completa cuando el resultado de la observación es registrado por quien mide. “La experiencia sólo permite hacer afirmaciones de este tipo: un observador ha hecho una afirmación cierta (subjetiva); y nunca una como ésta: una propiedad física tiene un cierto valor” (von Neumann 1955, 43). Con posterioridad a este trabajo seminal de von Neumann otros autores, como John Wheeler, incluyeron la conciencia del observador en el proceso de medición: “Ningún fenómeno es un fenómeno hasta que es un fenómeno observado” (Wheeler 1978, 43).

Sin embargo, tal vez fue Eugene Wigner quien primero propuso una interpretación subjetivista radical del problema de la medición. En la cosmovisión general de Wigner, el contenido de la conciencia constituye la realidad primaria y la realidad de los objetos físicos es sólo relativa a ella (Wigner 1964). Si se asume este contexto, no resulta posible una formulación consistente de las leyes de la mecánica cuántica que no refiera a la conciencia. Así, el vector de estado, para Wigner, no representa un aspecto cuántico de la realidad, sino el estado de la mente del experimentador. De manera que el salto implicado en el colapso ocurriría en la conciencia del observador, manifestando el cambio discontinuo que se produce en el estado de conocimiento del sujeto que mide (Wigner 1967).

Más recientemente, el *Bayesianismo cuántico* o *QBism* también interpreta el colapso de la función de onda de un modo marcadamente subjetivo. Esta interpretación considera que la mecánica cuántica es una herramienta que cualquier agente puede usar para evaluar, sobre la base de sus propias experiencias pasadas, sus expectativas de probabilidad de experiencias futuras, organizando así su propia experiencia. El QBism asume explícitamente una visión personalista de la probabilidad: las probabilidades de un evento son asignadas por un agente y son propias de él. Así, el estado cuántico tampoco sería una descripción de la realidad física externa, sino la expresión del grado personal de expectativas o creencias de un agente individual respecto a experiencias personales futuras específicas (Fuchs, Mermin y Schack 2014, Fuchs y Schack 2015).

Para el QBism, las mediciones no revelan un estado preexistente de las cosas. En cambio, la asignación de estados cuánticos es un juicio personal del agente. Una medición es la acción -o intervención- de un agente sobre el mundo que resulta en la creación de un resultado. Como el resultado de la medición a su vez es una nueva experiencia para ese agente, el colapso de la función de onda actualiza las asignaciones de estados según la nueva base de experiencias. Así, cuando en una medición se obtiene un resultado, el formalismo cuántico –que determina las probabilidades mediante la regla de Born- guía al agente en la actualización de las probabilidades de las mediciones siguientes. De esta manera la realidad difiere de un agente a otro. Lo que un agente considera real se apoya completamente en sus experiencias subjetivas. En definitiva, la mecánica cuántica en sí misma no trata directamente del mundo objetivo, sino que refiere a las experiencias del agente particular que utiliza la teoría.

3.1.3 Teorías que proponen un colapso objetivo ↑

Para las teorías que asumen un colapso objetivo, en cambio, la reducción del vector de estado sucede objetiva y espontáneamente, sin que el observador asuma un papel relevante. El estado cuántico, según ellas, es real y evoluciona según una historia única. Sostienen, además, que durante el proceso de medición se quiebra el entrelazamiento que existía previamente entre el sistema y el entorno, dando lugar a una reducción del estado del sistema. Como en cierto sentido estas teorías consideran que la mecánica cuántica no es una teoría completa, las diversas variantes añaden alguna hipótesis que permite dar cuenta de la relación entre la evolución unitaria del vector de estado y su colapso. Entre las teorías que proponen un colapso objetivo del estado cuántico destacan las de Giancarlo Ghirardi (Ghirardi, Rimini y Weber 1986) y de Roger Penrose (Penrose 2009 [1989]).

La modificación que sugiere Ghirardi consiste en añadir a la ecuación de Schrödinger determinista y lineal un término estadístico y no-lineal. Esta incorporación permite que el estado de un sistema cuántico pueda sufrir un colapso espontáneamente durante su evolución natural (Ghirardi 2011, Ghirardi 2013).

Penrose, en cambio, propuso considerar los efectos gravitacionales en la estructura de la mecánica cuántica. Sugirió

así "*gravitacionar*" la mecánica cuántica, en lugar de seguir el camino habitual de intentar *cuantizar* la relatividad (Penrose 2014). Bajo estos supuestos, postuló que la causa del fenómeno de reducción del estado cuántico es gravitacional, y predijo que los estados cuánticos permanecen en un estado de superposición sólo hasta que la diferencia entre las energías (autoenergías) de los estados que lo componen alcanza un nivel determinado. A este valor crítico lo llamó *energía de un gravitón* (Penrose 2009 [1989]). Es decir, Penrose sostuvo que los estados cuánticos en superposición tienen un tiempo de vida finito, debido a que las inestabilidades de las superposiciones cuánticas implican desplazamientos significativos de masa, que si bien pueden ocurrir en el aparato de medición y en la recepción de un fotón en la retina o nervio óptico del observador, tienen mayoritariamente lugar en el entorno. Por esta razón, cuando el entorno se encuentra entrelazado con el sistema cuántico en estudio, la reducción espontánea del estado cuántico del entorno también es necesariamente acompañada de una reducción de los sistemas cuánticos entrelazados con él (Penrose and Marcer 1998).

3.2 Interpretaciones estadísticas ↑

Las interpretaciones de la mecánica cuántica que asumen el colapso de la función de onda consideran que el estado del sistema describe de un modo completo las características de un sistema individual. Para las interpretaciones estadísticas, en cambio, la función de onda describe sólo ciertas propiedades estadísticas de un conjunto de sistemas que fueron preparados de un modo similar. Es decir, para las interpretaciones estadísticas la función de onda es una función estadística abstracta, que se aplica únicamente a procedimientos similares que se repiten. Esta interpretación tiene como consecuencia que la indeterminación ya no es una propiedad ontológica, sino un principio de dispersión estadística.

Max Born fue el primero en proponer que la función de onda no refiere a un experimento individual, al afirmar que la función de onda representa el resultado estadístico de muchos experimentos (Born 1955, Pais 1982). Enfatizó así la distinción entre un conjunto de réplicas de una partícula en su entorno experimental y un haz de partículas (que es un tipo de sistema de muchas partículas).

En general, las interpretaciones estadísticas consideran a la mecánica cuántica como una teoría clásica de procesos probabilísticos o estocásticos, y exclusivamente interpretan su formalismo sin modificarlo. Aunque también existen propuestas afines a las interpretaciones estadísticas que sugieren extender el formalismo cuántico de diversos modos. Estas propuestas suelen añadir nuevos elementos que son compatibles tanto con el formalismo estándar de la mecánica cuántica como con las interpretaciones de la mecánica estadística. Un ejemplo es la consideración de una distribución de probabilidad conjunta para observables que no conmutan (Ballentine 1970). Otra variación que resulta compatible con las predicciones estadísticas es la que incorpora las interpretaciones que asumen que la mecánica cuántica no es una teoría completa (Einstein, Podolsky y Rosen 1935). En estos casos, las distribuciones estadísticas de la teoría cuántica se corresponden con los valores promedio de ciertas *variables ocultas* (variables sin acceso empírico) que son las que permiten determinar los resultados de los eventos individuales.

3.3 Mecánica bohmiana ↑

El ejemplo más simple de una teoría de variables ocultas es la *teoría de la onda-piloto*, propuesta inicialmente por de Broglie en 1927 (de Broglie 1970) y luego por David Bohm en 1952 (Bohm 1952a, b). Consiste en una reformulación del formalismo de la mecánica cuántica que incluye la postulación, a un nivel inferior, de ciertas variables ocultas integradas al estado cuántico. En la mecánica bohmiana, la posición y la velocidad de las partículas juegan el mismo papel que en la termodinámica estadística, de modo que sólo se manifiestan macroscópicamente a través de sus valores medios. Las variables ocultas completan la información de la función de onda, fijando las trayectorias de las partículas y restaurando el determinismo en el nivel microfísico. "La mecánica bohmiana es el modo mínimo de completar la ecuación de Schrödinger de un sistema de partículas no relativistas, para conseguir una teoría que describa un genuino movimiento de partículas" (Goldstein 2013). Es, además, una teoría empíricamente indistinguible de la mecánica cuántica estándar.

Para esta versión de la mecánica cuántica, la causa de probabilidades radica en una ignorancia inevitable de ciertos factores relevantes del sistema físico, coexistiendo así en ella un determinismo ontológico con un indeterminismo epistemológico. Debido al carácter ontológicamente determinista de la propuesta de Bohm, se la conoce también con el nombre de *mecánica cuántica causal*.

Según la teoría de la onda piloto, las partículas son guiadas por la función de onda, que evoluciona bajo el régimen de la ecuación de Schrödinger sin colapsar nunca. Una característica de la mecánica bohmiana es que admite una descripción de los fenómenos cuánticos basada en una ontología clásica. Considera partículas puntuales que se mueven en el espacio, con su posición y velocidad bien determinadas en todo momento. La evolución de las partículas, a su vez, se encuentra regida por la ecuación de Hamilton-Jacobi, según la reformulación de las leyes de Newton llevada a cabo por la mecánica racional.

Para explicar los peculiares resultados experimentales de la mecánica cuántica con una ontología clásica, Bohm propuso considerar al sistema cuántico como partículas definidas con precisión sobre las que actúa –además del potencial clásico- un potencial cuántico (*potencial de Bohm*). Es decir, Bohm postuló la existencia de una nueva fuerza de la naturaleza que actúa en el nivel cuántico: la *fuerza cuántica*. El comportamiento anómalo de los fenómenos cuánticos se debería así a la acción de esta fuerza, que necesariamente debe ser no-local, pues depende de un modo instantáneo de la posición y de la velocidad de todas las partículas del sistema.

Pero como el formalismo de la mecánica bohmiana también se encuentra sub-determinado, es posible a su vez interpretar el potencial de Bohm de diversas maneras, permitiendo el surgimiento de distintas interpretaciones de la mecánica causal que proponen ontologías distintas. Por ejemplo, un monismo de partículas (Dürr, Goldstein y Zanghí 1992), un dualismo de ondas piloto y partículas (Valentini 2010), un dualismo radical de la función de onda universal y la partícula universal (Albert 1996), un dualismo de partículas y fuerzas primitivas (Belousek 2003), entre otras.

3.4 La interpretación everettiana ↑

En 1957, Hugh Everett presentó su tesis doctoral. En ella pretendió desarrollar una meta-teoría de la mecánica cuántica estándar que permitiera tanto deducir desde ella la teoría cuántica tradicional, como facilitar la aplicación de la mecánica cuántica a la relatividad general (Everett 1957). La primera dificultad que encontró fue que la formulación tradicional de la mecánica cuántica no resulta adecuada para el tratamiento de sistemas aislados como el de un universo cerrado, pues refiere a sistemas sujetos a una medición u observación externa, responsable esta última de la reducción del estado cuántico. Para atender a este punto propuso la *formulación del estado relativo de la mecánica cuántica*, una teoría causal fundada puramente en la mecánica ondulatoria y cuyas predicciones concuerdan con los resultados empíricos. También en 1957, John Wheeler, director de tesis de Everett, publicó un artículo apoyando estas nuevas ideas (Wheeler 1957).

En la formulación de Everett, la entidad física más fundamental es la función de onda universal. Ésta se compone con los *estados relativos* de los subsistemas que constituyen el sistema universal. Los estados relativos están correlacionados y no son independientes entre sí, de manera que no tiene sentido considerar el estado absoluto de un subsistema. Como la ecuación de Schrödinger rige la dinámica temporal de la función de onda universal, ésta evoluciona de un modo determinista y reversible.

La propuesta everettiana considera también que la teoría de la observación es un caso especial de la teoría de correlaciones entre subsistemas. Así, Everett se propuso deducir las predicciones estándar de la mecánica cuántica a partir de las experiencias subjetivas de un grupo de observadores, a los que trató exclusivamente como sistemas físicos ordinarios, modelándolos mediante ondas mecánicas. Propuso un modelo matemático específico para describir la interacción entre cada observador y el sistema físico observado. Sostuvo que si se entiende a la experiencia actual como los registros -en la memoria de los observadores modelados- de los resultados de mediciones anteriores, esta puede modelarse exclusivamente mediante ondas mecánicas. Afirmó además que en cada observación (o interacción) sucesiva, el estado del observador se ramifica en una serie de estados diferentes, donde cada rama corresponde a un resultado distinto de la medición y al correspondiente auto-estado del sistema físico. Everett asumió que las diversas

ramificaciones existen simultáneamente, y continúan superpuestas luego de la secuencia de observaciones. El estado de superposición global incluye las observaciones del conjunto de observadores. El objetivo que Everett persiguió con este procedimiento fue demostrar que los registros de la memoria del observador descritos de esta manera coinciden con los resultados del formalismo estándar.

Si bien en un primer momento muy pocos físicos aceptaron las ideas de Everett, las ramificaciones de sus estados condujeron luego a interpretaciones variadas, en términos de múltiples mundos, historias o mentes. Aunque estas diferentes descripciones del mundo cuántico presentan ontologías distintas, todas coinciden en tratar a la función de onda del universo como una multiplicidad de realidades a un nivel u otro.

Uno de los problemas tradicionales al que se enfrentaron todas las interpretaciones everettiana fue el problema de la base privilegiada: puesto que cualquier función de onda puede expresarse como superposición de autoestados de diferentes observables (puede expresarse en diferentes bases del espacio de Hilbert), no queda claro respecto de qué estados privilegiados (de qué base) se produce la ramificación. Desde hace ya varias décadas, estas interpretaciones sustituyen el colapso de la función por un proceso de decoherencia cuántica. Es decir, consideran al tradicional colapso como una consecuencia de las interacciones espontáneas entre el sistema y su entorno, capaces de seleccionar los estados privilegiados y de eliminar los fenómenos de interferencia entre los estados superpuestos, recuperando así un patrón casi clásico de probabilidades (Bacciagaluppi 2012).

En esta línea se inscribe la *interpretación existencial* de Wojciech Zurek, que complementa la *formulación del estado relativo* con un proceso de decoherencia (Zurek 1993). Para Zurek, la decoherencia emerge cuando se reconoce la división del universo en entidades separadas, y surge la necesidad de elegir una rama individual estableciendo el borde entre lo cuántico y lo clásico. Para él, los estados privilegiados son elegidos mediante un proceso de super-selección inducida por el entorno o *Darwinismo cuántico* (Zurek 2003, Zurek 2009).

3.4.1 Múltiples mundos ↑

La interpretación de *múltiples mundos* de Bryce DeWitt y Neil Graham es, posiblemente, la más conocida de la familia de interpretaciones everettianas. Según ella, “la realidad, que se describe conjuntamente por las variables dinámicas y el vector de estado, no es la realidad que habitualmente pensamos, sino una realidad compuesta por múltiples mundos. En virtud de la evolución temporal de las variables dinámicas el vector de estado se descompone naturalmente en vectores ortogonales, evidenciando una división continua del universo en una multitud de mundos mutuamente inobservables pero igualmente reales” (DeWitt y Graham 1973, 6). Es decir, como todos los estados cuánticos se realizan en infinitos mundos que se bifurcan, todas las posibles historias alternativas y futuras son reales, representando cada una de ellas un mundo actual o universo. El multiverso resulta así compuesto por la superposición cuántica de una infinidad de universos o mundos cuánticos, incomunicados entre sí y cada vez más divergentes.

Según Jeffrey Barrett, muchos de los problemas que surgen al considerar mundos que se bifurcan se pueden evitar si, en lugar de identificar los *mundos* con los estados locales mismos, se los identifica con las *trayectorias* de los estados locales. En particular, si aceptan los múltiples mundos pero no sus bifurcaciones, se pueden evitar los problemas que las bifurcaciones implican para el tratamiento temporal de la identidad de los observadores. Esto significaría considerar que cada trayectoria de los estados locales representa la historia de un mundo *posible*, y que la medida de la probabilidad sobre las posibles historias determina la prioridad epistémica de que un mundo posible ocurra realmente en la realidad (Barrett 2003, 179-184).

La idea de una *multiplicidad de mundos o realidades* continúa siendo muy controvertida en la actualidad. Pero a pesar de esto, esta versión de la interpretación everettiana, con sus diversas variantes, se ha vuelto enormemente influyente en la física teórica contemporánea (Saunders et al. 2010, Wallace 2012).

3.4.2 Múltiples mentes ↑

Esta variante de la propuesta de Everett fue formulada originalmente por H. Dieter Zeh (Zeh 1970, Zeh 2000). Esta interpretación se apoya en el hecho de que los diversos estados de conocimiento del observador evidencian procesos físico-químicos en el cerebro, asumiendo así que los sistemas observados se acoplan al soporte físico del conocimiento del observador. Considera, además, que el mundo cuántico (descripto por la función de onda universal) corresponde a *una* superposición de un sinnúmero de componentes, que *clásicamente* representarían mundos diferentes. Puesto que todos los componentes están dinámicamente interrelacionados, pueden acoplarse en ramificaciones. Para esta interpretación, sin embargo, las ramificaciones no representan *mediciones objetivas*, como propuso Everett. Interpreta, en cambio, que no se ramifica el mundo real sino la percepción del observador en diversos niveles de conocimiento aparente del mundo. Además, como sólo ciertas componentes de la función de onda total determinan físicamente el conocimiento, considera que las otras componentes son meras ficciones heurísticas, que se incorporan a la función de onda con el objetivo de obtener leyes dinámicas generales que tienen validez empírica.

El nombre de *múltiples mentes* se debió a David Albert y Barry Loewer (Albert y Loewer 1988). La propuesta de estos autores se enmarcó en un *fisicalismo* en filosofía de la mente, que asume que los estados mentales emergen o *supervienen* del estado del cerebro (o del cerebro y el entorno). Pero el costo que implicó declarar esta superveniencia fue postular que cada ser sensible tiene asociado un número infinito de mentes, proponiendo un dualismo radical.

3.5 Interpretaciones modales ↑

Otra familia de interpretaciones que surgieron a principios de 1970 son las interpretaciones modales (van Fraassen 1972, Vermaas 1999, Lombardi y Dieks 2014). Estas interpretaciones focalizan su atención en las propiedades de los sistemas físicos, sin otorgar una especial importancia teórica al proceso de medición. Las interpretaciones modales son realistas, pues asumen que los sistemas cuánticos poseen propiedades definidas en todos los instantes de tiempo con independencia de que se realicen mediciones sobre ellos. Consideran, además, a la medición cuántica como una interacción ordinaria, independiente del observador.

Un elemento central de las interpretaciones modales es la consideración de que el estado dinámico del sistema limita las posibilidades, no las actualidades. “El estado delimita qué puede y qué no puede ocurrir, y cuán probable es –delimita posibilidad, imposibilidad y probabilidad de ocurrencia- pero no dice qué ocurre realmente. La transición desde lo posible a lo actual no es una transición *del* estado, sino una transición *descrita por* el estado” (van Fraassen 1991, 279). Es decir, el estado cuántico no es una descripción de las propiedades que el sistema físico posee, sino una descripción de sus posibles propiedades. Así, la característica específica de las interpretaciones modales es la distinción entre el *estado-valor* del sistema en cualquier instante (que representa todas las propiedades físicas del sistema que se encuentran simultáneamente definidas en un instante particular), y el *estado dinámico* del sistema (que determina qué propiedades físicas puede poseer el sistema y cuáles puede tener más tarde). La relación entre el estado dinámico y el estado-valor es probabilística, ya que la probabilidad mide la propensión a entrar en el ámbito de lo actual que tiene cada propiedad.

Las diversas interpretaciones que integran esta familia utilizan el formalismo estándar de la mecánica cuántica, pero no incorporan la hipótesis del colapso. Consideran que el estado cuántico evoluciona siempre unitariamente de acuerdo a la ecuación de Schrödinger. Es decir, la ecuación de Schrödinger rige la evolución temporal de las probabilidades y no la evolución de las propiedades actuales. Para estas interpretaciones, la mecánica cuántica es una teoría intrínsecamente probabilística, pues asumen que el indeterminismo es una característica de nuestro mundo: el futuro no es simplemente desconocido, sino que es potencial, no está todavía decidido.

Dado que por el teorema de Koche y Specker, no todos los observables del sistema pueden poseer valor definido simultáneamente (Kochen y Specker 1967), cada interpretación modal brinda una *regla de actualización* que recoge, del conjunto de todos los observables del sistema físico, el subconjunto de aquellos que tienen un valor definido. Esta regla no se infiere del formalismo, sino que es introducida como un postulado interpretativo. En la *interpretación atómica modal*, por ejemplo, los sistemas compuestos sólo tendrán las propiedades que heredan de los subsistemas

atómicos que los constituyen (Bacciagaluppi y Dickson 1999). Una interpretación que resolvió apropiadamente el problema de la medición es la *interpretación modal de Kochen-Dieks*. En ella, el valor definido de los observables se escoge mediante una decomposición biortogonal del estado cuántico puro del sistema (Dieks 1988, Dieks 1994). Más recientemente, la *interpretación modal-hamilitoniana* (Lombardi y Castagnino 2008), que basa la regla de actualización en el hamiltoniano del sistema, también ha resuelto el problema de la medición y ha suministrado, además, las bases para comprender el límite clásico de la mecánica cuántica.

3.6 Historias en mecánica cuántica ↑

Entre los intentos más exitosos para resolver el problema de la medición cuántica se encuentran los formalismos de *historias cuánticas*. En ellos el estado cuántico ya no evoluciona según la ecuación de Schrödinger, sino que se introducen evoluciones nuevas en términos de familias, y particularmente, las que se obtendrían del colapso en la medición (Vanni 2015). Entre sus principales variantes se encuentran el formalismo de *historias consistentes*, y el formalismo de *historias contextuales*.

La formulación de *historias consistentes* es una interpretación probabilística de la mecánica cuántica aplicable a sistemas físicos aislados (Griffiths 1984, Griffiths 1993, Omnès 1988). Trabaja con secuencias de eventos o valores registrables en una medición (microscópicos, macroscópicos, o ambos) que ocurren en tiempos sucesivos, a las que llama *historias.* Como esta formulación no otorga una especial relevancia al proceso de medición, evita los problemas del colapso, la irreversibilidad y la implicancia de la conciencia del observador.

La mayor innovación de esta formulación es el uso de una determinada condición de consistencia -que no refiere a las mediciones- para la selección de *historias consistentes* entre todas las historias posibles. La condición de consistencia es un requisito matemático que restringe la elección de la secuencia de eventos a la cual asignar una probabilidad. Cuando se satisface la consistencia, la formulación asigna una probabilidad condicional a los eventos intermedios entre los estados inicial y final. Aunque en esta formulación la ecuación de Schrödinger no determina la evolución del sistema, que resulta totalmente estocástica, sí participa en los cálculos de probabilidades de las historias al brindar la evolución de las probabilidades de los valores de las mediciones. La condición de consistencia se encarga de restringir el conjunto de historias posibles a *familias de historias consistentes.* Las probabilidades que se asignan a las historias de una *familia consistente* pueden ser interpretadas y tratadas matemáticamente como si fueran probabilidades clásicas. Sólo las historias consistentes, además, tienen un significado físico.

La reversibilidad es una característica de esta interpretación, pues el procedimiento completo que determina la consistencia y asigna probabilidades es explícitamente independiente del sentido del flujo del tiempo. Por otra parte, como la interpretación de historias es explícitamente probabilística, no da cabida a las controvertidas afirmaciones everettianas de un universo que continuamente se está dividiendo en mundos separados, con situaciones macroscópicas diferentes en cada uno de ellos. Si bien se puede considerar que esta formulación es una extensión o generalización de la interpretación estándar, es una generalización que no radica en la consideración de variables ocultas.

El formalismo de *historias contextuales*, por su parte, amplía la noción habitual de contexto para permitir el tratamiento de sistemas cuánticos con propiedades diferentes a tiempos distintos. Este formalismo no exige una condición de consistencia, pero requiere que los observables que pertenecen a una historia formen un *contexto*. Es decir, los operadores correspondientes deben sumar la identidad y conmutar entre sí, de modo que se los pueda considerar representativos de un conjunto de propiedades cuánticas exhaustivas y compatibles. En el formalismo de historias contextuales, la ocurrencia de una historia particular es aleatoria, al igual que en el formalismo de historias consistentes. Pero a diferencia de lo que sucede en este último, la evolución de las propiedades en el formalismo de historias contextuales es determinista (Laura y Vanni 2008a, b, Losada, Vanni y Laura 2013).

3.7 Interpretaciones relacionales ↑

Las interpretaciones relacionales conciben al mundo como una red de componentes que interactúan, y a la mecánica cuántica como la descripción de la red de relaciones que conecta los diversos sistemas físicos entre sí. Según ellas, la mecánica cuántica es una teoría completa, que describe el modo en el que se interrelacionan los diversos sistemas durante una interacción física. La característica fundamental de estas interpretaciones es el rechazo a las nociones de estado absoluto del sistema, sistemas aislados o eventos absolutos. Inspirados en la teoría de la relatividad, asumen, en cambio, que los valores de las magnitudes físicas siempre son relativas al observador, entendiendo al observador como un objeto físico con un determinado estado de movimiento, y no como una mente o una conciencia (Laudisa y Rovelli 2013).

La interpretación relacional más desarrollada es la propuesta por Carlo Rovelli, conocida con el nombre de *mecánica cuántica relacional* (Rovelli 1996). Según ella, la mecánica cuántica refiere a las descripciones físicas de sistemas relativos a otros sistemas, brindando un esquema de descripción completo y auto-consistente del mundo físico, apropiado al nivel de las observaciones experimentales actuales.

La mecánica cuántica relacional destaca que no es físicamente sostenible sobre bases experimentales una descripción del estado del mundo que pueda ser universal o compartida por todos los observadores. Es preferible así reconocer que el estado cuántico es una noción relacional. Pues si observadores distintos dan descripciones diferentes del estado de un mismo sistema, la noción de estado del sistema no es una noción absoluta, sino dependiente del observador. Una descripción cuántica es una formalización de propiedades de un sistema *relativo* a un dado observador. “El significado completo de *q=1* es *q=1 relativo a O*” (Rovelli 1996, 1652).

Es decir, la mecánica cuántica describe sólo *información* relativa. Con la palabra información se indica el carácter relacional de todas las afirmaciones contingentes sobre los valores de las magnitudes físicas o estados del sistema. La cantidad de información es una medida del número de elementos de un conjunto de alternativas entre las cuales se elige una configuración. La información es una cantidad discreta, es decir, hay una cantidad mínima de información intercambiable. El intercambio se realiza a través de interacciones físicas. El mundo puede descomponerse en una colección de sistemas, cada uno de los cuales puede considerarse tanto un sistema observador como un sistema observado. El sistema observador es quien tiene información sobre el sistema observado. El proceso de adquirir información (una medición) puede describirse como una pregunta que un sistema hace a otro.

En 1997 Gyula Bene también propuso una interpretación relacional, al postular un *sistema de referencia cuántico* del que dependen los estados cuánticos de los diferentes sistemas. A partir de esta noción, desarrolló una nueva formulación de la mecánica cuántica, que también da cuenta, de un modo consistente, de la relación entre estados respecto a diferentes sistemas de referencia (Bene 1997).

4 Reflexiones finales ↑

Debido a que las aplicaciones de la mecánica cuántica son inmensamente exitosas, podemos asumir que esta teoría brinda un conocimiento verdadero del mundo natural. Como señala Juan Arana, por ejemplo, el contingentismo radical o el determinismo reduccionista son opciones teóricas que probablemente ya hayan sido descartadas para siempre por influencia de la mecánica cuántica (Arana 2012, 173). Sin embargo, también hemos visto que no existe un consenso acerca de la interpretación de esta teoría, y que las diferentes interpretaciones presentan ontologías muy diversas. Mientras que entre los físicos experimentales no se dan desacuerdos importantes respecto al uso de la física cuántica, las disputas sobre su significado ontológico comenzaron en sus mismos sus inicios y continúan en la actualidad.

Ante el panorama de las múltiples interpretaciones del formalismo cuántico, muchos físicos optan por un uso meramente pragmático de su formalismo matemático, sin preocuparse (de manera tácita o explícita) de sus implicancias ontológicas. Es indudable que la mecánica cuántica significó una expansión importante del conocimiento

científico. Pero como la práctica científica se orienta generalmente a objetivos específicos, los físicos en su trabajo cotidiano pueden eludir las cuestiones relativas al significado ontológico del formalismo cuántico (Fuchs y Peres 2000). En cambio, para los filósofos de la física, dedicados a estudiar los fundamentos de las teorías físicas, esta postura resulta inaceptable.

Así, durante la última centuria, muchos filósofos de la física se vieron involucrados en la interpretación del formalismo cuántico, a pesar de la dificultad que esta tarea lleva consigo. Porque "en lugar de hacer caso omiso de las nubes, lo que en definitiva necesitamos es tenerlas en cuenta si podemos. De lo contrario, el debate sobre las interpretaciones se aislaría de los datos de la física (en su propio detrimento) y sería incapaz de ofrecer a la física ideas heurísticas (en detrimento de la física)" (Butterfield 2001, 113).

Los filósofos que trabajan en los fundamentos de la mecánica cuántica suelen adoptar una interpretación particular, aunque algunos tampoco dejan de señalar, que la física contemporánea en general, y la mecánica cuántica en particular, sugieren una visión ontológica pluralista (Lombardi y Pérez Ranzanz 2012). Sin embargo, así como a los filósofos de la física no les resultan suficientes las consideraciones a veces pragmáticas de los físicos experimentales, y se preguntan por el significado ontológico del formalismo matemático, para los metafísicos, la admisión de múltiples ontologías no puede ser una explicación definitiva, aunque sea suficiente para brindar informaciones parciales válidas.

La existencia de diversas interpretaciones de la física cuántica es una manifestación clara de que no es posible establecer una inferencia válida desde el éxito empírico de la teoría a su verdad ontológica. Como señala Niels Bohr, no se debe considerar a la física como el estudio de algo dado *a priori*, sino como el desarrollo de métodos que ayudan a ordenar la experiencia humana (Bohr 1961). Es decir, la principal dificultad que emerge en las discusiones sobre la interpretación de la mecánica cuántica señalan otra cuestión: se debe reconocer el límite cognitivo de las objetivaciones científicas. Por esta razón, si se pretendiera evaluar las disímiles interpretaciones de la física cuántica, es necesario acudir a criterios meta-científicos. Pero la incorporación de estos criterios es fuente de nuevos desafíos, porque éstos requieren el desarrollo de una teoría del conocimiento, a la altura de nuestro tiempo, capaz de explicar tanto el conocimiento científico como el conocimiento metafísico.

La comprensión de la mecánica cuántica es todavía una cuestión abierta y no exenta de dificultades. Más aún, si además se considera que la mecánica cuántica es sólo el primer paso de una serie de teorías cuánticas más generales (como la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de bucles, etc.), que son las que brindan el marco matemático y conceptual para otras áreas de la física contemporánea como la física de partículas elementales, una buena interpretación de esta teoría resulta particularmente relevante.

5 Bibliografía ↑

Albert, David. 1996. "Elementary quantum metaphysics." En *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, editado por J. T. Cushing, A. Fine y S. Goldstein, 277-284. Netherlands: Kluwer Academic Press.

Albert, David y Barry Loewer. 1988. "Interpreting the many worlds interpretation." *Synthese* 77 (2):195-213. doi: 10.1007/bf00869434.

Arana, Juan. 2012. *Los Sótanos del Universo*. Madrid: Biblioteca Nueva.

Aspect, A. 1999. "Bell's inequality test: more ideal than ever." *Nature* 398 (6724): 189-190.

Aspect, A. 2007. "Quantum mechanics: to be or not to be local." *Nature* 446 (7138): 866-867.

Aspect, Alain, Jean Dalibard, and Gérard Roger. 1982. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time- Varying Analyzers." *Physical Review Letters* 49 (25):1804-1807.

Bacciagaluppi, Guido. 2012. "The Role of Decoherence in Quantum Mechanics." En *The Stanford Encyclopedia of*

Philosophy, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/qm-decoherence/.

Bacciagaluppi, Guido y Michael Dickson. 1999. “Dynamics for Modal Interpretations.” *Foundations of Physics* 29 (8):1165-1201. doi: 10.1023/a:1018803613886.

Ballentine, L. E. 1970. “The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics.” *Reviews of Modern Physics* 42 (4): 358-381.

Barrett, Jeffrey. 2003. *The quantum mechanics of minds and worlds*. Oxford: Oxford University Press.

Bell, J. 1964. “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox.” *Physics* 1: 195-200.

Bell, J. S. 1966. “On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics.” *Reviews of Modern Physics* 38 (3): 447-452.

Belousek, Darrin W. 2003. “Formalism, Ontology and Methodology in Bohmian Mechanics.” *Foundations of Science* 8 (2):109-172. doi: 10.1023/A:1023925900377.

Bene, Gyula. 1997. “Quantum reference systems: A new framework for quantum mechanics.” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 242 (3–4): 529-565. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00254-9.

Bohm, David. 1952a. “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. I.” *Physical Review* 85 (2): 166-179.

Bohm, David. 1952b. “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. II.” *Physical Review* 85 (2): 180-193.

Bohr, Niels. 1937. “Causality and Complementarity.” *Philosophy of Science* 4 (3): 289-298. doi: 10.2307/184445.

Bohr, Niels. 1950. “On the Notions of Causality and Complementarity.” *Science* 111 (2873): 51-54. doi: 10.2307/1677100.

Bohr, Niels. 1958. “Discussion with Einstein on epistemoligical problems in atomic physics (1949).” En *Atomic physics and human knowledge*, 32-66. New York: John Wiley.

Bohr, Niels. 1961. *Essays 1958-1962 on atomic Physics and Human Knowledge*. Woodbridge: Ox Bow Press.

Born, Max. 1955. “Statistical interpretation of Quantum Mechanics.” *Science* 122 (3172): 675-679. doi: 10.2307/1752079.

Bub, Jeffrey. 2014. “Quantum Entanglement and Information”. En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qt-entangle/.

Butterfield, Jeremy. 2001. “Some worlds of quantum theory.” En *Quantum Mechanics. Scientific Perspectives on Divine Action*, editado por R. J. Russell, P. Clayton, K. Wegter-McNelly y J. C. Polkinghorne, 111-140. Vatican City: Vatican Observatory Publication.

de Broglie, Louis. 1970. “The reinterpretation of wave mechanics.” *Foundations of Physics* 1 (1): 5-15.

DeWitt, Bryce Seligman y Neill Graham. 1973. *Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press.

Dieks, D. 1988. “The Formalism of Quantum Theory: An Objective Description of Reality?” *Annalen der Physik* 500 (3): 174-190. doi: 10.1002/andp.19885000304.

Dieks, Dennis. 1994. “Modal interpretation of quantum mechanics, measurements, and macroscopic behavior.”

Physical Review A 49 (4): 2290-2300.

Dürr, Detlef, Sheldon Goldstein y Nino Zanghí. 1992. "Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty." *Journal of Statistical Physics* 67 (5-6): 843-907. doi: 10.1007/BF01049004.

Einstein, A., B Podolsky y N. Rosen. 1935. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" *Physical review* 47 (10): 777-780.

Everett, Hugh. 1957. "'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics." *Reviews of Modern Physics* 29 (3): 454-462.

Faye, Jan. 2014. "Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics." En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/.

Fuchs, Christopher A., N. David Mermin y Rüdiger Schack. 2014. "An introduction to QBism with an application to the locality of quantum mechanics." *American Journal of Physics* 82 (8): 749-754. doi: doi:http://dx.doi.org/10.1119/1.4874855.

Fuchs, Christopher A. y Asher Peres. 2000. "Quantum Theory Needs No 'Interpretation'." *Physics Today* 53 (3): 70. doi: 10.1063/1.883004.

Fuchs, Christopher A. y Rüdiger Schack. 2015. "QBism and the Greeks: why a quantum state does not represent an element of physical reality." *Physica Scripta* 90 (1):015104.

Ghirardi, G. C., A. Rimini y T. Weber. 1986. "Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems." *Physical Review D* 34 (2): 470-491.

Ghirardi, Giancarlo. 2011. "Collapse Theories." En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta.

Ghirardi, GianCarlo. 2013. "The parts and the whole: Collapse theories and systems with identical constituents." *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (1): 40-47. doi: 10.1016/j.shpsb.2011.06.002.

Goldstein, Sheldon. 2013. "Bohmian Mechanics." En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/qm-bohm/.

Griffiths, Robert B. 1984. "Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics." *Journal of Statistical Physics* 36 (1): 219-272. doi: 10.1007/bf01015734.

Griffiths, Robert B. 1993. "Consistent interpretation of quantum mechanics using quantum trajectories." *Physical Review Letters* 70 (15): 2201-2204.

Healey, Richard. 2009. "Holism and Nonseparability in Physics." En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/physics-holism/.

Heisenberg, Werner. 1927. "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik." *Zeitschrift für Physik* 43: 172-198.

Heisenberg, Werner. 1958. "The Copenhagen Interpretation of Quantum Theory." En *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, 44-58. New York: Harper & Brothers Publishers.

Hensen, B., H. Bernien, A. E. Dreau, A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, J. Ruitenberg, R. F. L. Vermeulen, R. N. Schouten, C. Abellan, W. Amaya, V. Pruneri, M. W. Mitchell, M. Markham, D. J. Twitchen, D. Elkouss, S. Wehner, T. H. Taminiau y R. Hanson. 2015. "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres." *Nature* 526

(7575): 682-686. doi: 10.1038/nature15759 http://www.nature.com/nature/journal/v526/n7575/abs/nature15759.html - supplementary-information.

Howard, Don. 2004. “Who Invented the “Copenhagen Interpretation”? A Study in Mythology.” *Philosophy of Science* 71 (5): 669-682. doi: 10.1086/425941.

Kochen, S. y E. P. Specker. 1967. “The problem of hidden variables in quantum mechanics.” *Journal of Mechanics* 17 (1).

Krips, Henry. 2013. “Measurement in Quantum Theory.” En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/fall2013/entries/qt-measurement/}.

Laudisa, F. y C. Rovelli. 2013. “Relational Quantum Mechanics”. En *The Standford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/entries/qm-relational/.

Laura, Roberto y Leonardo Vanni. 2008a. “Conditional Probabilities and Collapse in Quantum Measurements.” *International Journal of Theoretical Physics* 47 (9): 2382-2392. doi: 10.1007/s10773-008-9672-7.

Laura, Roberto y Leonardo Vanni. 2008b. “Time Translation of Quantum Properties.” *Foundations of Physics* 39 (2): 160-173. doi: 10.1007/s10701-008-9268-3.

Lombardi, Olimpia y Mario Castagnino. 2008. “A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39 (2): 380-443. doi: 10.1016/j.shpsb.2008.01.003.

Lombardi, Olimpia y Dennis Dieks. 2014. “Modal interpretations of Quantum Mechanics.” En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta. http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/qm-modal/.

Lombardi, Olimpia y Ana Rosa Pérez Ranzanz. 2012. *Los múltiples mundos de la ciencia. Un realismo pluralista y su aplicación a la filosofía de la física*. México: Siglo XXI.

Losada, Marcelo, Leonardo Vanni y Roberto Laura. 2013. “Probabilities for time-dependent properties in classical and quantum mechanics.” *Physical Review A* 87 (5): 052128.

Nauenberg, Michael. 2007. “Critique of “Quantum Enigma: Physics Encounters Consciousness”.” *Foundations of Physics* 37 (11): 1612-1627. doi: 10.1007/s10701-007-9179-8.

Norsen, T. y S. Nelson. 2013. “Yet Another Snapshot of Foundational Attitudes Towards Quantum Mechanics”. *arXiv:1306.4646 [quant-ph]*.

Omnès, Roland. 1988. “Logical reformulation of quantum mechanics. I. Foundations.” *Journal of Statistical Physics* 53 (3): 893-932. doi: 10.1007/bf01014230.

Pais, A. 1982. “Max Born's Statistical Interpretation of Quantum Mechanics.” *Science* 218 (4578): 1193-1198.

Penrose, R. 2009 [1989]. *La nueva mente del emperador*. Barcelona: Debolsillo.

Penrose, Roger. 2014. “On the Gravitization of Quantum Mechanics 1: Quantum State Reduction.” *Foundations of Physics* 44 (5): 557-575. doi: 10.1007/s10701-013-9770-0.

Penrose, Roger y P. Marcer. 1998. “Quantum Computation, Entanglement and State Reduction [and Discussion].” *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 356 (1743): 1927-1939.

Plotnitsky, Arkady. 2010. “Quantum Phenomena and the Double-Slit Experiment.” En *Epistemology and Probability*, 45-75. New York: Springer.

Pusey, Matthew F., Jonathan Barrett y Terry Rudolph. 2012. “On the reality of the quantum state.” *Nature Physics* 8 (6): 475-478. doi: 10.1038/nphys2309.

Redhead, Michael. 2001. “The tangled story of nonlocality in quantum mechanics.” En *Quantum Mechanics. Scientific Perspectives on Divine Action*, editado por R. J. Russell, P. Clayton, K. Wegter-McNelly y J. C. Polkinghorne, 141-158. Vatican City: Vatican Observatory Publication.

Rovelli, Carlo. 1996. “Relational quantum mechanics.” *International Journal of Theoretical Physics* 35 (8): 1637-1678. doi: 10.1007/bf02302261.

Saunders, Saunders, Jonathan Barrett, Adrian Kent y David Wallace, eds. 2010. *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*. New York: Oxford University Press.

Schlosshauer, Maximilian, Johannes Kofler y Anton Zeilinger. 2013. “A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (3): 222-230. doi: 10.1016/j.shpsb.2013.04.004.

Schrödinger, E. 1935a. “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik.” *Naturwissenschaften* 23 (50): 844-849. doi: 10.1007/bf01491987.

Schrödinger, Erwin. 1926. “An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules.” *Physical Review* 28 (6): 1049-1070.

Schrödinger, Erwin. 1935b. “Discussion of Probability Relations between Separated Systems.” *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31 (04): 555-563. doi: 10.1017/s0305004100013554.

Shimony, Abner. 1963. “Role of the Observer in Quantum Theory.” *American Journal of Phyics* 31: 755-773. doi: 10.1119/1.1969073.

Valentini, Antony. 2010. “De Broglie–Bohm Pilot-Wave Theory: Many Worlds in Denial?” En *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*, editado por S. Saunders, J. Barrett, A. Kent y D. Wallace, 476-509. New York: Oxford University Press.

van Fraassen, Bas C. 1972. “A formal approach to the philosophy of science.” En *Paradigms and Paradoxes: The Philosophical Challenge of the Quantum Domain*, editado por R. Colodny, 303-366. Pittsburg: University of Pittsburg Press.

van Fraassen, Bas C. 1991. *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Oxford: Oxford University Press.

Vanney, Claudia E. 2015. “Is Quantum Indeterminism Real? Theological Implications.” *Zygon* (in press).

Vanni, Leonardo. 2015. “Historias en mecánica cuántica.” En *Fronteras del determinismo científico. Filosofía y ciencias en diálogo*, editado por C. Vanney y O. Lombardi, 85-97. Madrid: Biblioteca Nueva.

Vermaas, Pieter E. 1999. *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics: Possibilities and Impossibilities of a Modal Interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press.

von Neumann, John. 1955. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton: Princeton University Press.

Wallace, David. 2012. *The Emergent Multiverse*. Oxford: Oxford University Press.

Wheeler, John A. 1957. “Assessment of Everett's "Relative State" Formulation of Quantum Theory.” *Reviews of Modern Physics* 29 (3): 463-465.

Wheeler, John A. 1978. “The "past" and the "delay-choice" double-slit experiment.” En *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, editado por A. R. Marlow, 9-48. New York: Academic Press.

Wheeler, John A. y Wojciech H. Zurek, eds. 1983. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press.

Wigner, E. 1964. “Two kinds of reality.” *The Monist* 48 (2): 248-264.

Wigner, Eugene. 1967. “Remarks on the mind-body question.” En *Symmetries and Reflections*, 171-184. Bloomington: Indiana University Press.

Zeh, H. D. 1970. “On the interpretation of measurement in quantum theory.” *Foundations of Physics* 1 (1): 69-76. doi: 10.1007/bf00708656.

Zeh, H. D. 2000. *The problem of conscious observation in quantum mechanical description*. Vol. 13. journal article.

Zurek, Wojciech H. 1993. “Preferred States, Predictability, Classicality and the Environment-Induced Decoherence.” *Progress of Theoretical Physics* 89 (2): 281-312. doi: 10.1143/ptp/89.2.281.

Zurek, Wojciech Hubert. 2003. “Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical.” *Reviews of Modern Physics* 75 (3): 715-775.

Zurek, Wojciech Hubert. 2009. “Quantum Darwinism.” *Nature Physics* 5 (3): 181-188.

6 Cómo Citar ↑

Vanney, Claudia E. 2016. "Interpretaciones de la mecánica cuántica". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck.
URL=http://dia.austral.edu.ar/Interpretaciones_de_la_mecánica_cuántica

7 Derechos de autor ↑

DERECHOS RESERVADOS Diccionario Interdisciplinar Austral © Instituto de Filosofía - Universidad Austral - Claudia E. Vanney - 2016.

ISSN: 2524-941X