

Mecánica cuántica

Sobre su interpretación,
historia y filosofía

FAVIO CALA VITERY
ÉDGAR GUSTAVO ESLAVA CASTAÑEDA



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería
Departamento de Ciencias Básicas

Mecánica cuántica

Sobre su interpretación, historia y filosofía



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería
Departamento de Ciencias Básicas

Cala Vitery, Favio

Mecánica cuántica. Sobre su interpretación, historia y filosofía / Favio Cala Vitery, Édgar Gustavo Eslava Castañeda. – Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas, 2011.

158 p.; 21 cm.

ISBN: 978-958-725-079-4

I. TEORÍA CUÁNTICA. I. Eslava Castañeda, Édgar Gustavo. II. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas. III. tit.

CDD530.12”C125”

Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Carrera 4 N° 22-61 – PBX: 242 7030 – www.utadeo.edu.co

Mecánica cuántica. Sobre su interpretación, historia y filosofía

ISBN: 978-958-725-079-4

Primera edición: 2011

Rector: José Fernando Isaza Delgado

Vicerrector Académico: Diógenes Campos Romero

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería: José Daniel
Bogoya Maldonado

Director del Departamento Ciencias Básicas: Favio Ernesto Cala Vitery

Director editorial (E): Jaime Melo Castiblanco

Coordinación editorial: Andrés Londoño Londoño

Diseño y diagramación: Francisco Javier Jiménez Montero

Impresión: Imageprinting Ltda.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin
autorización escrita de la Universidad.

Impreso en Colombia
Printed in Colombia

Contenido

Prefacio	9
1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica	11
Las desigualdades de Bell y el desafío mecánico- cuántico a la localidad	39
2. Más allá de Copenhague: el problema de la medición ..	53
2.1. Respuesta al problema de la medición cuántica en términos de decoherencia	55
2.2. Respuesta al problema de la medición cuántica en términos de historias	61
2.3. Algunas respuestas alternativas al problema de la medición cuántica	71
3. Sobre la construcción social de la mecánica cuántica	87
3.1. El dilema del determinismo	97
3.2. Las tesis de Forman	102
4. La versión de Bohm de la mecánica cuántica	115
4.1. Sobre los objetivos de la ciencia	121
4.2. Sobre el formalismo cuántico y su interpretación	124
4.3. Interpretación de Copenhague	126
4.4. Interpretación de Bohm	129

4.5. Localidad, separabilidad y la indiferencia de	
Einstein	137
Referencias bibliográficas	145

Favio Cala Vitery
Édgar Gustavo Eslava Castañeda

Mecánica cuántica
Sobre su interpretación, historia y filosofía

A la realidad le gustan las simetrías y los leves anacronismos.

Jorge Luis Borges

—Tienes el pan ahí, sobre el mantel —dice Johnny mirando el aire—. Es una cosa sólida, no se puede negar, con un color bellissimo, un perfume. Algo que no soy yo, algo distinto, fuera de mí. Pero si lo toco, si estiro los dedos y lo agarro, entonces hay algo que cambia, ¿no te parece? El pan está fuera de mí, pero lo toco con los dedos, lo siento, siento que eso es el mundo, pero si yo puedo tocarlo y sentirlo, entonces no se puede decir realmente que sea otra cosa, o ¿tú crees que se puede decir?

—Querido, hace miles de años que un montón de barbudos se vienen rompiendo la cabeza para resolver el problema.

Julio Cortázar, «El perseguidor»

Prefacio

Casi un siglo después de que empezara a gestarse la revolución cuántica sigue existiendo un alto grado de controversia sobre lo que esta teoría significa. La paradoja resultante es la siguiente: nadie duda de la eficacia predictiva de la mecánica cuántica y sin embargo nadie parece estar del todo convencido sobre su significado físico. Dicho de otra manera; mientras el mundo ha podido maravillarse con desarrollos tecnológicos tales como los láseres, semiconductores, tratamiento de imágenes, computación, superconductores, energía nuclear, microondas y demás aplicaciones, no existe consenso alrededor de cuestiones tan esenciales como: ¿cuál es la imagen del mundo revelada por la teoría cuántica? ¿Revela, en definitiva, tan sólo una imagen del micromundo? Y acaso, ¿tiene sentido hablar de una imagen cuántica de los fenómenos físicos?

Se trata de un asunto sin precedentes en la historia de la física. Si bien las teorías fundamentales como la mecánica de Newton, el electromagnetismo y la relatividad general nacieron en medio de importantes debates interpretativos, de latentes tensiones a veces de orden metafísico, a veces de orden conceptual; con el tiempo y el sólido aval de la contrastación empírica, de la recurrente verificación de predicciones y el desarrollo de aplicaciones tecnológicas, todas estas tensiones interpretativas fueron superadas. Como resultado de ello pareció alcanzarse una imagen unificada del mundo, una idea

universal sobre cómo discurren los fenómenos físicos, sobre cómo evolucionan los sistemas físicos para dar cuenta de lo que hay. Una única ontología para cada teoría.

La mecánica cuántica es distinta. Introduce un principio de incertidumbre sin que quede claro si la incertidumbre subatómica es inherente a la naturaleza o es introducida por el observador. He ahí la fuente de todos los problemas. Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Pauli y muchos más de los creadores de la teoría reflexionaron largamente sobre el asunto.

En este libro se condensa parte de la discusión alrededor de los problemas interpretativos de la mecánica cuántica, señalando al final posibles rutas para su solución. Para ello, en el primer capítulo, se desarrolla, desde la perspectiva conceptual, una visión histórica de su interpretación. En el segundo capítulo se perfila una taxonomía de los problemas interpretativos y las posibles soluciones alternativas, todo ello centrado alrededor del problema de la medición. En el tercer capítulo se cuestiona la tesis según la cual la mecánica cuántica ha llegado a ser lo que es por cuestiones de contingencia histórica. Finalmente, en el cuarto, se argumenta que una interpretación –la causal– puede considerarse como una alternativa que permite resolver buena parte del nudo interpretativo.

Si bien gran parte de la discusión en el presente texto ha sido desarrollada pensando en el público general, la imperiosa necesidad de introducir algunos elementos matemáticos y formales hacen que los autores del libro recomienden un conocimiento básico de los fundamentos de la teoría al abordar su lectura.

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

La teoría cuántica fue desarrollada al inicio del siglo xx como un formalismo matemático que dio a los físicos la capacidad de predecir resultados de una serie de experimentos que parecían no encajar muy bien dentro del marco descriptivo de la mecánica clásica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell. La distribución de las líneas espectrales, la radiación del cuerpo negro, y muchos otros resultados experimentales hicieron pensar a los científicos en la necesidad de un nuevo conjunto de principios que permitieran formalizar el comportamiento no clásico de un número creciente de procesos físicos que en general desafiaban los modelos clásicos sobre la estructura de la materia y la naturaleza de la radiación. Planck, por ejemplo, abriendo el siglo había cedido a la hipótesis desesperada de empaquetar la energía para describir acertadamente la radiación de cuerpo negro. Bohr, para salvar la estabilidad del átomo proponía saltos discontinuos y destruía con ello la idea de que éste fuera un calco en miniatura de un sistema planetario. Y Einstein, con su explicación del efecto fotoeléctrico, invitaba a pensar que la radiación podía tener propiedades corpusculares. La síntesis formal de esta especie de catálogo de experiencias se produjo por dos vías: la analítica, que llevó a Schrödinger a proponer una ecuación ondulatoria que describe la evolución de los sistemas

cuánticos, y la positivista, centrada en la correspondencia empírica, que condujo a Heisenberg a desarrollar la mecánica matricial. Después se probaría la equivalencia matemática entre las dos versiones.

Para el final de la tercera década del siglo, la teoría cuántica se había establecido como un sistema sólido para modelar el comportamiento del mundo al micro-nivel, convirtiéndose en el marco interpretativo de la evolución dinámica de los microsistemas. Se había convertido en mecánica cuántica.

La mecánica cuántica describe la evolución de un sistema por medio de la llamada función de estado; una fórmula de tipo ondulatorio que contiene la información dinámica del sistema cuántico en un momento determinado. De acuerdo con la teoría, las condiciones dinámicas de un sistema físico pueden ser representadas por medio de una función de onda que depende de las coordenadas espaciales y temporales del sistema dentro de un marco de referencia adecuado. En otras palabras, la función de onda de un sistema físico describe tanto el estado instantáneo de un sistema como su evolución temporal. El estado instantáneo del sistema se obtiene de las soluciones del conjunto de ecuaciones diferenciales de movimiento en un tiempo t específico, mientras que la evolución temporal del sistema se obtiene al calcular la integral de la función de estado del sistema para un intervalo de tiempo determinado. Las funciones de onda constituyen entonces el núcleo formal de la mecánica cuántica.

Adicionalmente a su estructura formal, la mecánica cuántica se sirve de una definición específica del proceso de medición:

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

Si la magnitud Q siendo medida tiene el valor qi , supongamos que el indicador observable asociado R da la lectura ri . La medición entonces consiste en establecer una relación física, o interacción, entre el sistema atómico y el aparato macroscópico con la propiedad que qi queda correlacionado con ri . Los estados particulares en que las mediciones funcionan de la forma descrita son referidos como los estados propios (*Eigenstates*) de Q (Redhead, 1995, 34-35).

Las mediciones son entonces los puentes que nos permiten correlacionar la lectura de aparatos macroscópicos, tales como los amperímetros, voltímetros y similares, con los estados del sistema microscópico bajo observación, grabando en la máquina de medición la función de onda del vector de estado del sistema microscópico observado. Esto hace que la pregunta acerca del papel que desempeñan los observadores sea de suma importancia; después de todo, son los observadores quienes determinan cuáles de las variables del sistema serán medidas, quienes preparan los experimentos para lograr la relación adecuada entre las variables macroscópicas y las microscópicas y quienes evalúan e interpretan los resultados de las mediciones. Una definición clara del tipo de interacciones que tienen los observadores con los sistemas mecánico cuánticos nos ayudará a comprender la forma en que los resultados de las mediciones se relacionan con los estados que se dice que representan.

De acuerdo con algunos científicos, sin observadores no hay nada que se pueda decir acerca del estado real de un sistema cuántico, al menos no más allá de notar el hecho de que el comportamiento del sistema puede predecirse a partir

de las probabilidades asociadas con la función de onda del sistema, algo que resulta evidente a partir del formalismo de la teoría. Pero determinar de forma clara y definitiva el estado en que se encuentra un sistema requiere la presencia de un observador que evidencie el estado del aparato macroscópico usado para llevar a cabo la medición, una presencia que, en la frontera entre los niveles macroscópico y microscópico, parece interferir con el proceso que está siendo llevado a cabo. De acuerdo con otros, no parece que exista la posibilidad de que los observadores interfieran con la evolución de micro-sistemas físicos. Las observaciones o mediciones son invasivas sólo en tanto que sin ellas nunca podríamos obtener evidencia alguna ni de la existencia ni del comportamiento de los estados que predice el formalismo de la teoría. Afirmar que el estado de un sistema físico se ve alterado por la presencia de observadores requiere hacer explícitas las alteraciones que serían introducidas por el acto de observación, algo que, al menos en principio, parece exceder los límites del análisis formal de los procesos físicos que tienen lugar. Dicho de otra forma, hay una clara diferencia entre un evento físico y nuestro acceso epistémico a éste, una diferencia que quienes definen las mediciones en términos de la presencia o ausencia de observadores parecen olvidar.

Este asunto acerca del papel de los observadores generó un cambio de dirección en el desarrollo de la teoría, haciendo que del análisis de los fundamentos matemáticos y formales se pasara a cuestiones sobre la interpretación de la teoría, tanto en sus aspectos formales como en los experimentales. Para el final de la década de los años veinte e inicio de la década de los treinta, las preguntas acerca de los presupuestos metafí-

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

sicos y los compromisos ontológicos de la teoría empezaron a jugar un papel tan importante en la consolidación del paradigma de la mecánica cuántica como el que las cuestiones acerca de su estructura matemática había jugado una década antes. En este sentido, los temas originales tales como la mecánica ondulatoria, la experimentación y los procesos de medición dieron paso gradualmente a intereses por obtener una formulación e interpretación definitiva del núcleo formal y metafísico de la teoría. En lo que resta de este capítulo vamos a presentar una visión general de algunas de las interpretaciones de la mecánica cuántica más relevantes desde el punto de vista histórico y conceptual.

La interpretación estándar de la mecánica cuántica es conocida como la *interpretación de Copenhague*, llamada así en honor a la ciudad en que se estableció el Instituto Niels Bohr, en donde una generación de jóvenes científicos fue formada en los principios básicos del floreciente paradigma mecánico cuántico. De acuerdo con la interpretación de Copenhague, lo que caracteriza a los sistemas cuánticos es que éstos se encuentran en una permanente superposición de estados, es decir, que su comportamiento dinámico, representado por su función de onda, puede expresarse como una combinación lineal de las funciones de onda que representa estados diferentes. En otras palabras, si ψ_1 y ψ_2 son funciones de onda admisibles para una sistema cuántico, entonces una combinación de ellas de la forma $a\psi_1 + b\psi_2$, siendo a y b un par de constantes complejas arbitrarias, también es una función de onda del sistema.

La interpretación de Copenhague del comportamiento de los sistemas mecánico cuánticos descansa sobre tres principios

básicos: el principio de Von Neumann, el principio de indeterminación de Heisenberg y el principio de complementariedad de Bohr. El principio de Von Neumann sostiene que por cada estado dinámico de un sistema mecánico cuántico (por cada estado propio) existe una probabilidad definida que representa la posibilidad de encontrar al sistema en dicho estado, el denominado valor propio del sistema. Esta correspondencia entre el estado propio y el valor propio establece un límite entre el estado en que se encuentra un sistema microscópico y el conocimiento que podemos adquirir acerca de ese estado.

El principio de Heisenberg formaliza esta ineludible indeterminación en el resultado de cualquier medición, por medio de una correlación entre pares de variables dinámicas del sistema. Si tomamos el momentum \mathbf{p} y la posición \mathbf{q} de un sistema cuántico, un fotón o un electrón, por ejemplo, encontramos que $d\mathbf{p} = h d\mathbf{q}$, en donde $d\mathbf{p}$ y $d\mathbf{q}$ son los resultados de las mediciones del momentum y la posición del fotón, o electrón, y h es la constante de Planck. Este principio muestra que cuando tiene lugar una medición de una de la dos variables, entre más conocemos de ella, menos podemos conocer de su compañera correlacionada. En otras palabras, el principio mostraría que los sistemas mecánico cuánticos son inherentemente indeterminísticos. Finalmente, el principio de complementariedad de Bohr subraya la indeterminación mostrando que la única forma de comprender la naturaleza de los sistemas cuánticos es reconociendo la limitación intrínseca impuesta por el hecho de que los conceptos que pueden ser usados para describir los sistemas cuánticos dependen de las propiedades detectables de los sistemas, definidas por las máquinas de medición con las cuales interactúan (cf. Omnès, 1994, 160).

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

La teoría cuántica se caracteriza por el reconocimiento de una limitación fundamental en las ideas físicas clásicas cuando se aplican a los fenómenos atómicos. La situación entonces creada es de una naturaleza peculiar dado que nuestra interpretación del material experimental descansa esencialmente sobre conceptos clásicos. A pesar de las dificultades que, por lo tanto, forman parte de la formulación de la teoría cuántica, parece [...] que su esencia puede ser expresada en el llamado postulado cuántico, que atribuye a cualquier proceso atómico una discontinuidad esencial, o individualidad, completamente extraña a las teorías clásicas [...]. Este postulado implica una renuncia frente a la coordinación espacio-temporal causal de los procesos atómicos. De hecho, nuestra descripción causal de los fenómenos se basa enteramente en la idea de que los fenómenos objeto de estudio pueden ser observados sin ser perturbados apreciablemente (Bohr, 1934, 88).

Cada acto de medición afecta al sistema haciendo imposible el obtener cualquier tipo de información precisa sobre el estado del sistema en los instantes anteriores a su observación. La realidad se define sólo cuando se llevan a cabo observaciones, y es precisamente esta dependencia en los observadores lo que separa a los sistemas clásicos de los sistemas cuánticos. Bohr insistió en la necesidad de comprender esta condición claramente.

La naturaleza misma de la teoría cuántica nos fuerza a considerar la coordinación espacio-temporal y a la afirmación de causalidad, la unión de los cuales caracteriza a

las teorías clásicas, como características complementarias pero excluyentes de la descripción, y que simbolizan la idealización, la observación y la definición, respectivamente. De la misma forma en que la teoría de la relatividad nos ha enseñado que la conveniencia de distinguir claramente entre espacio y tiempo descansa solamente en la pequeñez de las velocidades ordinarias cuando se las compara con la velocidad de la luz, aprendemos de la teoría cuántica que la adecuación de nuestra descripción espacio-temporal causal corriente depende enteramente del pequeño valor del cuanto de acción¹ cuando se la compara con las acciones involucradas en la percepciones sensibles ordinarias (Bohr, 1934, 89-90).

Por lo tanto, cualquier intento por formular una teoría física que integre los sistemas clásicos y cuánticos debe reconocer la existencia de tal línea divisoria y desarrollar una interpretación que incluya ambos lados de la frontera, cada uno en sus propios términos. Tanto la mecánica cuántica, según Bohr, como la mecánica clásica deben ser consideradas teorías físicas completas en el sentido que cada una dice todo lo que es posible decir acerca de los sistemas físicos a que se refiere. Cada teoría describe un dominio concreto, uno cuántico y el otro clásico, pero esto no hace a ninguna de ellas una teoría incompleta, son niveles complementarios de explicación de los fenómenos físicos.

El problema de tratar de determinar lo que sucede en la frontera entre los aparatos de medición y los sistemas

¹ Bohr se refiere a la constante de Planck $h = E/\nu$, donde E = energía y ν = frecuencia (Planck, 1900).

medidos es la versión de Copenhague del llamado *problema de la medición cuántica* (PMC). De una parte, el formalismo cuántico establece que el resultado de la interacción que tiene lugar durante el proceso de medición es la superposición de los estados físicos del sistema observado y del aparato usado para observarlo. El acto de medida pone en estado de superposición tanto al objeto como al instrumento de la medición, haciendo que la indeterminación que caracteriza al mundo cuántico se convierta también en parte del mundo al nivel clásico. De otra parte, tal y como enseña la experiencia, siempre es el caso que las lecturas de los indicadores de los aparatos de medición son definidas, es decir, no hay espacio para ambigüedades en su lectura. Sin importar el estado de superposición que el formalismo requiere, un observador nunca encontrará estados superpuestos de la aguja de registro, siempre obtendrá una lectura única de la posición del indicador. La pregunta acerca del lugar en el que el colapso de la superposición, de la función de onda, tiene lugar, o, en otras palabras, de dónde definir exactamente los límites entre el mundo cuántico y el mundo clásico es una pregunta abierta, nunca respondida por Bohr ni por ninguno de los miembros de la escuela de Copenhague, a pesar de que sus consecuencias son una parte central de su interpretación de la teoría.

Inconformes con los resultados de esta forma de crear particiones en el mundo físico, diferentes grupos de científicos se opusieron a la interpretación de Copenhague y presentaron marcos alternativos de interpretación con la intención de socavar los principios sobre los cuales descansa la interpretación estándar: la completitud de la teoría,

la linealidad de la evolución temporal y el colapso de la función de onda. Sin lugar a dudas la más famosa de estas alternativas críticas fue la propuesta por Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) en un artículo considerado hoy en día como una de las fuentes básicas para el debate del PMC (Einstein, Podolsky y Rosen, 1935). En el artículo EPR, como se le conoce, sus autores declaran que la existencia de valores específicos para las variables dinámicas de un sistema físico es tan real para los sistemas mecánico cuánticos como lo es para los sistemas clásicos, sin importar la exactitud de los resultados de las mediciones o incluso la posibilidad de que estas puedan o no llevarse a cabo. Esta aproximación realista a las variables dinámicas está en abierta contradicción con la conclusión de Bohr según la cual después de las interacciones que tienen lugar entre los aparatos de medición y los sistemas físicos “ni el observable medido ni las lecturas del indicador tienen valores determinados” (Bub, 1997). En contraste, Einstein, Podolsky y Rosen declaran que la mera posibilidad de medir cada variable requiere dar por sentada la existencia de las propiedades correspondientes de las variables; consecuentemente, las descripciones que niegan la existencia de las variables dinámicas, como lo hace la interpretación de Bohr, no tienen cabida en la física.² De acuerdo con EPR, la realidad objetiva de un sistema físico es independiente de nuestra selección del marco teórico usado para su interpretación y debe ser diferenciada claramente de los conceptos que esas teorías usan para representar los sistemas. De hecho,

2 Existen diferentes interpretaciones acerca del posible significado del “realismo” para Einstein. Para la discusión de este asunto Fine (1986), Ballentine (1972) y Shimony (1981) son excelentes fuentes de información.

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

Los elementos de la realidad física no pueden ser determinados por consideraciones filosóficas a priori, sino que deben encontrarse apelando a los resultados de experimentos y mediciones. [...] Debemos darnos por satisfechos con el siguiente criterio, que consideramos razonable. Si, sin perturbar de forma alguna un sistema, podemos predecir con certeza (es decir, con una probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad que corresponde a esa cantidad física (Einstein, Podolsky y Rosen, 1935, 777).

El punto central del artículo EPR es presentar y defender una situación en la que es posible determinar experimentalmente valores definidos para un par de variables complementarias, por medio de un experimento mental cuya estructura es la siguiente: después de mostrar que sobre un sistema de dos partículas pueden llevarse a cabo mediciones que no perturben el sistema, los autores aplican su criterio de realidad física a los resultados de algunas posibles mediciones permitidas por el formalismo de la mecánica cuántica. La situación resultante es que los resultados obtenidos del proceso de medición sobre una de las partículas garantizan el conocimiento, de manera indirecta, de las variables correspondientes de la segunda partícula. Einstein, Podolsky y Rosen concluyen entonces que, dado que la completitud de la mecánica cuántica es incompatible con la noción de realidad física de los autores, la hipótesis de completitud debe ser desechada a fin de hacer justicia a los resultados experimentales.

El experimento propuesto en el artículo³ consiste en una

3 Usamos aquí la versión modificada del experimento tal y como la presenta Bohm (1952) en lugar de la versión original ya que resulta ser más intuitiva que ella, permitiendo comprender más fácilmente las conclusiones. De hecho, éste es el motivo por el cual el experimento EPR es usualmente presentado en la versión de Bohm.

molécula compuesta de dos átomos con spin $\pm\hbar/2$. A partir de un estado inicial de spin cero, la molécula se desintegra como resultado de un proceso que deja inalterado su momento angular total, haciendo que sus átomos se separen hasta que la interacción entre ellos resulta despreciable. Debido a que el spin se conserva en el proceso de separación, el spin total del sistema, esto es, la suma del spin de los dos átomos, mantiene su valor de cero en cada momento posterior a la separación inicial. Lo significativo del experimento se hace evidente una vez se considera cómo la mecánica cuántica describe la medición de las variables dinámicas del sistema. Esta medición muestra que si se encuentra que el componente del spin en una dirección determinada es, digamos, $-\hbar/2$, se puede inferir que la componente de spin (en la misma dirección) del segundo átomo es, debido a la condición de conservación, $+\hbar/2$. Dado que la medición sobre el primer átomo no ha perturbado al segundo, el valor inferido satisface las condiciones para ser considerado un elemento de realidad. Entonces, el proceso descrito por el arreglo experimental implica la posibilidad de obtener un resultado definido de la medición de las variables dinámicas de los dos extremos espacio-temporales del sistema, de los átomos de la molécula, un resultado que atenta contra la interpretación estándar de la mecánica cuántica.

Einstein, Podolsky y Rosen concluyen que la diferencia explicativa entre los marcos clásicos y cuánticos y la forma en que esta diferencia afecta la posibilidad de comprender los fenómenos no sujetos a medición no es algo que subyace a la naturaleza de los sistemas cuánticos sino a nuestra deficiente comprensión de su comportamiento. Al sostener, como lo hace la interpretación de Copenhague, que los fenómenos

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

no observados no existen hasta que no son registrados por un aparato de medición, la mecánica cuántica genera una brecha explicativa entre los fenómenos observados y los no observados. Por supuesto,

Uno podría objetar a esta conclusión sobre la base de que nuestro criterio de realidad no es lo suficientemente restrictivo. De hecho, uno no llegaría a nuestra conclusión si insistiese que dos o más cantidades físicas puedan ser consideradas como elementos simultáneos de realidad sólo cuando pueden ser medidas o predichas simultáneamente. Desde este punto de vista, ya que bien una u otra, pero no las dos simultáneamente, de dos cantidades P y Q puede ser predicha, no son reales simultáneamente. Esto hace que la realidad de P y Q dependa del proceso de medición que se lleva a cabo sobre el primer sistema, que no perturba al sistema de forma alguna (Einstein, Podolsky y Rosen, 1935, 780).

Ésta es la versión EPR del problema de la medición cuántica, un problema que los autores consideran que sólo puede ser resuelto por medio de una reinterpretación de la mecánica cuántica de acuerdo con los principios de realidad objetiva e independencia entre la realidad física y la medición que ellos defienden en su artículo. De lo contrario, uno terminaría teniendo una teoría incompleta, como es el caso con la interpretación de Bohr, una que no da cuenta de cada elemento de realidad física. La interpretación de la mecánica cuántica de EPR, entonces, adhiriéndose al principio de linealidad, rechaza la interpretación de la mecánica cuántica como una teoría completa debido a que ella implica una

indeseable dependencia entre el acto de medición y la realidad física como la expresada por el supuesto colapso que tiene lugar al momento de la medición.

Bohr replicó rápidamente a la crítica de EPR (Bohr, 1935, 145-152), señalando que sus autores fallaron al intentar comprender la naturaleza de los sistemas cuánticos y, en consecuencia, transfirieron la indeterminación de los sistemas a la física usada para describirlos. La mecánica cuántica no es una teoría incompleta sino una teoría completa que describe un mundo cuyas reglas son diferentes de las reglas del mundo clásico que nos es familiar. La mayor preocupación de Bohr frente a las conclusiones de Einstein, Podolsky y Rosen es que el experimento mental en que descansa ofrece un apoyo inadecuado a la interpretación de incompletitud debido a una ambigüedad en la noción de realidad física. Esta ambigüedad se hace evidente una vez reconocemos que el carácter no perturbador de los procedimientos de medición no se corresponde con el papel que ellos juegan en la definición misma de “realidad física”, en particular de las variables dinámicas del sistema.

El punto resaltado por Bohr es que, aún concediendo que no hay afectación mecánica sobre uno de los átomos de la molécula ocasionada por la medición llevada a cabo sobre el otro átomo, tales mediciones determinan el tipo de predicciones que pueden hacerse sobre el compañero distante del átomo bajo observación. En el caso de una molécula biatómica, la medición del spin de uno de los átomos en, por ejemplo, la dirección x , determina que las únicas predicciones validas que podemos hacer acerca del segundo átomo deben darse en términos del spin- x . Bohr entiende el que los autores de

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

EPR omitan reconocer un resultado tan trivial como un ejemplo de un problema fundamental con la aproximación causal usual a los fenómenos físicos, un problema que sólo puede ser superado por medio de una “revisión radical” de las bases de nuestra definición de realidad física. Naturalmente, Bohr ve la interpretación de Copenhague como la única vía para la tan necesitada revisión. El renunciar a la “aproximación causal usual a los fenómenos físicos” es central en la defensa que Bohr hace de la completitud de la mecánica cuántica. En lugar de señalar un problema en la teoría, lo que la necesidad de una nueva comprensión de las relaciones causales hace es enfatizar la necesidad de una física que reconozca que los fenómenos físicos son conjuntos complejos conformados por observadores, sistemas bajo observación y arreglos experimentales que posibilitan la observación. Es por ello que no existen, no pueden existir, fenómenos no registrados, no medidos.

Desde esta perspectiva, el problema con el argumento de EPR es que su conclusión acerca de la incompletitud de la mecánica cuántica se basa en una definición errada de realidad física. El problema de EPR reside en su uso de un principio de realidad: la independencia entre realidad física y medición, que aunque es natural y funcional para los sistemas clásicos, resulta inaplicable en el terreno de las entidades cuánticas. Pero la lección a aprender del principio de complementariedad es que la aplicabilidad de las teorías físicas debe restringirse al dominio que les es propio (Roldán, Ben-Dov & Guerrero, 2004). Lo que constituye la principal diferencia entre las descripciones cuánticas y clásicas de los fenómenos físicos, de acuerdo con Bohr, no son las limitaciones de sus respectivas visiones sino la diferencia entre las regiones del mundo físico en las que son

efectivas. En el caso de las mediciones, esta diferencia equivale a una diferencia entre los límites que ellas establecen entre las regiones de un sistema que han de ser consideradas como parte de los instrumentos de medición y aquellas consideradas como los objetos bajo investigación (Bohr, 1935).

Obtener una descripción física inclusiva de los mundos clásico y cuántico sería el resultado de la adición de la física cuántica con la clásica. A menos que ese reconocimiento tenga lugar, será imposible comprender que la mecánica cuántica es completa porque nos dice tanto como es posible saber acerca del micro-mundo. En ese sentido, la mecánica cuántica es completa, al menos tan completa como la mecánica clásica, dentro de los límites de su contexto propio de aplicación. W. Pauli expresa esta tensión en términos de las limitaciones en el lenguaje cuando escribe:

Mientras que los medios de observación todavía deben ser descritos en el usual “lenguaje común complementado con la terminología de la física clásica”, los “objetos” atómicos usados en la interpretación teórica de los “fenómenos” no pueden ya ser descritos “de una forma única por medio de atributos físicos convencionales”. Estos objetos “ambiguos” usados en la descripción de la naturaleza tienen un obvio carácter simbólico (Pauli, 1948, 307-308).

El problema de la medición es entonces resultado inevitable de observadores no cuánticos que cruzan las fronteras para medir eventos en el mundo cuántico, limitados por su propia perspectiva, su “lenguaje común”. La importancia de dicha frontera se refleja en la diferencia entre los formalismos necesarios

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

para describir cada dominio y en las diferentes respuestas que cada teoría ofrece a la pregunta sobre qué es real en el mundo.

Como parte de su intento por defender la interpretación de incompletitud de Einstein y por tratar de aclarar los términos en que el debate Bohr-Einstein debería ser entendido, E. Schrödinger propuso un escenario experimental para hacer evidente que la indeterminación de los sistemas cuánticos puede tener consecuencias observables para eventos macroscópicos. De acuerdo con Schrödinger, los modelos formales son herramientas que nos dan información acerca del comportamiento de los sistemas físicos; ellos nos permiten configurar “catálogos de expectativas”, reglas predictivas acerca de la evolución temporal de los sistemas físicos.

Aparte de la observación misma de las variables de un sistema durante un período de tiempo, no hay nada que podamos decir de un sistema, sin importar si es clásico o cuántico, salvo que su evolución temporal está descrita por cierta función de onda probabilística. De hecho, tanto para los sistemas clásicos como para los cuánticos, los fenómenos no observados existen de forma indeterminada, como probabilidades, y el acto de observación hace que las probabilidades colapsen en lecturas concretas de indicadores observados. Bajo esta perspectiva, el problema de la medición que surge en la frontera entre los sistemas clásicos y cuánticos no es sino la expresión de las diferencias en el acceso epistémico que tienen los observadores al estado de un sistema. Es precisamente para resaltar esta situación que el conocido experimento mental del gato de Schrödinger fue concebido:

Se encierra a un gato en una cámara de acero, junto a la siguiente máquina diabólica (que debe protegerse contra la interferencia directa del gato): en un contador Geiger hay una pequeña cantidad de una sustancia radioactiva, tan pequeña que quizás en el transcurso de una hora uno de sus átomos decaiga, pero también, con igual probabilidad, tal vez ninguno [lo haga]; si esto sucede, el tubo del contador se dispara y por medio de un relé libera un martillo que despedaza un pequeño frasco de ácido hidrocianídrico. Si se ha dejado todo este sistema sólo por una hora, puede afirmarse que el gato aún vive si mientras tanto el átomo no ha decaído. El primer decaimiento atómico lo habría envenenado. La función Ψ de todo el sistema expresaría este hecho teniendo en ella al gato vivo y al muerto (excusen la expresión) mezclados o difuminados en partes iguales (Schrödinger, 1935, 157).

El gato (macroscópico) atrapado en su ambiente cerrado tiene un 50% de probabilidades de estar con vida y un 50% de probabilidades de estar muerto, después de un cierto período de tiempo; la misma probabilidad que el material radioactivo (microscópico) tiene de decaer o no decaer. La indeterminación originalmente confinada al nivel micro-físico se transforma en una indeterminación macroscópica, haciendo que el estado final del sistema macroscópico, del gato, corresponda a una superposición de estados macroscópicamente diferentes, estar vivo o estar muerto, tal y como es el caso del sistema microscópico asociado. Sorprendentemente, y éste es el corazón del problema de la medición desde la

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

perspectiva de Schrödinger, mientras que no hay forma de que un observador externo elimine la superposición microscópica, la indeterminación macroscópica nunca se evidencia, como lo confirma nuestra posibilidad de hacer mediciones directas sobre el sistema.

En el caso del experimento del gato en la caja, la consecuencia del acto de medición es una dramática perturbación en el sistema bajo observación, que hace que las probabilidades de 50/50 de vida del gato colapsen, bien para entregarnos un gato vivo o uno muerto. Todas las probabilidades previas a la medición se transforman en resultados definidos por el acto de medición, con las perturbaciones generadas por la observación afectando no sólo el estado final del sistema microscópico sino también la vecindad espacio-temporal de los aparatos de medición. El hecho de que la observación, la medición, genere estos dramáticos cambios es una situación sin paralelo dentro del marco de la física clásica. En este contexto, el problema de la medición cuántica pueden entonces ser entendido como:

Decir exactamente qué constituye una medición de un observable mecánico cuántico, y luego explicar cómo es posible que una medición mecánico cuántica que haya sido llevada a cabo adecuadamente permita siempre obtener un resultado definido. Esto es un problema, porque intentos plausibles por expresar en términos puramente mecánico cuánticos qué constituye una interacción de medición implica aparentemente que mediciones cuánticas llevadas a cabo adecuadamente no siempre permiten un resultado definido (Healey, 1998, 54).

Como resultado, dos circunstancias diferentes definen esta nueva situación. De una parte se encuentran las funciones de estado de un sistema, el catálogo de nuestro conocimiento de los estados pasados y presentes del sistema. Estos catálogos están lejos de ser perfectos, son simplemente maximales, en el sentido ya expuesto de decir tanto como es posible exigir de ellos. Así las cosas, Einstein está en lo correcto al afirmar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta; lo es porque no es más que un modelo y cualquier modelo es una herramienta descriptiva limitada, incluso un modelo maximal como la mecánica cuántica. De otra parte, las perturbaciones introducidas en el estado del sistema por el proceso de medición hacen imposible sostener la aproximación de no perturbación necesaria para concretar el intento de EPR de describir los estados futuros de un sistema. El carácter inevitable de las perturbaciones impide la posibilidad de precisión absoluta de cualquier juicio sobre el futuro de un sistema. Es en este sentido que Bohr se manifiesta acerca del estado y la evolución de un sistema; pedir más que esto sería forzar injustamente a la mecánica cuántica a hacer afirmaciones sobre eventos fuera de su alcance, a ir más allá del territorio que le es propio.

Schrödinger resuelve el dilema sobre la completitud de la mecánica cuántica no tomando partido por uno de los dos bandos en disputa sino reconociendo tanto las limitaciones de nuestras descripciones como las consecuencias de nuestra participación como observadores sobre los sistemas que escurramos. “Después de todo”, declara, “existe una diferencia entre una fotografía corrida o fuera de foco y una foto clara de nubes y bancos de niebla” (Schrödinger, 1935, 327). En manos de Schrödinger, el problema de la medición se convier-

1. Las raíces históricas de la interpretación cuántica

te en un problema acerca de nuestras teorías, de su alcance, sus límites y su aplicabilidad, no acerca de la constitución del mundo. En pocas palabras, el problema de la medición resulta ser de carácter epistémico antes que metafísico. En este sentido, la conclusión de Schrödinger lo alía con Einstein y su interpretación de la incompletitud de la mecánica cuántica.

Un pariente cercano de la interpretación de incompletitud de Einstein y Schrödinger es la *interpretación de variables ocultas*, una interpretación que postula “la existencia de cantidades físicas aún no observadas y presumiblemente inobservables cuya evolución bajo las leyes adecuadas determinan exactamente el resultado de procesos cuánticos individuales” (Torreti, 1999, 374). El defensor principal de la causa de las variables ocultas, David Bohm, desarrolló una interpretación que conduce a las mismas predicciones sobre los resultados de las mediciones cuánticas que la interpretación estándar de la teoría, pero que evita lo que él considera el mayor problema de todas las interpretaciones previas: el asumir implícitamente que de lo que la mecánica cuántica trata no es del mundo físico sino de nuestro conocimiento de los estados de un sistema. De acuerdo con Bohm, todo lo que se requiere para su nueva interpretación es dar por sentadas algunas asunciones para nada problemáticas acerca de la fenomenología de los sistemas cuánticos. La primera de tales asunciones es que la función de onda de un sistema mecánico cuántico evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, o que preserva la noción de la interpretación estándar según la cual la evolución temporal de la función de onda de un sistema mecánico cuántico individual es determinista. Segundo, asumimos que el momento de una partícula es igual al gradiente unidimensional de su

velocidad, es decir, que estamos operando sobre un espacio probabilístico unidimensional. La tercera asunción es el reconocimiento de que estamos trabajando con un conjunto estadístico y que no podemos controlar la ubicación precisa de ninguno de los subsistemas individuales del conjunto. A partir de estos tres elementos de base, Bohm construye una teoría de la medición que reinterpreta el contenido físico de la ecuación de Schrödinger en términos de algunos parámetros ocultos que permiten descripciones de la evolución de sistemas de una partícula a partir de una configuración inicial probabilística.⁴ Estos parámetros ocultos determinan el resultado de mediciones concretas de una forma tan intrincada e incontrolable que, para todos los fines prácticos, las descripciones de los sistemas cuánticos deben hacerse únicamente como correlaciones estadísticas entre los valores de las variables ocultas y el resultado directamente observable de las mediciones. Ésta es la razón por la cual no nos es posible determinar experimentalmente de forma precisa la posición y el momentum de los sistemas cuánticos. Como consecuencia, Bohm ve el principio de incertidumbre “no como una limitación inherente de la precisión con que podemos concebir correctamente la definición simultánea del momentum y la posición, sino como una limitación práctica de la precisión con que estas cantidades pueden ser medidas

4 Durante los últimos 50 años Bohm ha reformulado su interpretación de diversas formas, dándole el nombre de “interpretación causal” (Bohm, 1974) e “interpretación ontológica” (Bohm & Hiley, 1993). La idea de estas reformulaciones es lograr una interpretación más inclusiva, en el sentido de extender sus consecuencias a un conjunto más amplio de eventos, desde los sistemas meramente mecánico-cuánticos hasta los macroscópicos y, al final, al universo en su totalidad. A pesar de esto, el núcleo central de la interpretación no ha sido dramáticamente modificado, por lo que en este apartado hacemos uso de la original (Bohm, 1952).

simultáneamente (Bohm, 1952, 383). Esto hace concebible, al menos en principio, la existencia de mediciones que violen el principio de incertidumbre.

Desde la perspectiva de las variables ocultas, entonces, la mecánica cuántica es incompleta, pero en un sentido diferente del de Einstein y Schrödinger. En lugar de culpar al formalismo de oscurecer nuestra visión del mundo cuántico y de usar un criterio dudoso de realidad física, Bohm postula un mecanismo desconocido, las *variables ocultas*, y lo hace responsable del comportamiento no clásico de los sistemas cuánticos. La mecánica cuántica es incompleta porque aún no ha encontrado el mecanismo básico que gobierna la evolución de los sistemas cuánticos, un mecanismo que descansa sobre “perturbaciones impredecibles e incontrolables” impuestas sobre el sistema observado por los aparatos de medición, lo que tiene consecuencias dramáticas para la teoría de la medición.

La nueva característica esencial de la medición cuántica es la existencia de una participación mutua e irreducible entre instrumento de medición y el observador entre sí. Como resultado, cualquier intento por discutir este proceso como midiendo “una propiedad únicamente del objeto observado” no será consistente con nuestra interpretación. Por el contrario, decimos que el resultado de la medición es una potencialidad del sistema combinado y solamente puede ser determinado en términos de las propiedades de las partículas, junto con la función de onda del sistema combinado, como un todo (Bohm & Hailey, 1993, 97).



En este libro se condensa parte de la discusión alrededor de los problemas interpretativos de la mecánica cuántica, señalando al final posibles rutas para su solución. Para ello, en el primer capítulo se desarrolla, desde la perspectiva conceptual, una visión histórica de su interpretación. En el segundo capítulo se perfila una taxonomía de los problemas interpretativos y las posibles soluciones alternativas, todo ello centrado alrededor del problema de la medición. En el tercer capítulo se cuestiona la tesis según la cual la mecánica cuántica ha llegado a ser lo que es por cuestiones de contingencia histórica. Finalmente, en el cuarto, se argumenta que una interpretación –la causal– puede considerarse como una alternativa que permite resolver buena parte del nudo interpretativo.



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO
www.utadeo.edu.co