

CÓMO
LA
MECÁNICA
CUÁNTICA
CAMBIÓ
NUESTRA
IDEA
DE
REALIDAD

DE LA CAVERNA DE PLATÓN A COPENHAGUE

Desde las sombras de la caverna de Platón hasta los multiversos de Everett, no hemos parado de preguntarnos qué es la realidad. A lo largo del siglo XX, físicos como Heisenberg, Schrödinger y Bohr formularon las leyes de la mecánica cuántica y se desencadenó la mayor discusión científica, filosófica e intelectual del pasado siglo. Copenhague fue entonces una especie de *meca* para los grandes cerebros de esta historia.

TEXTO: JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON ILUSTRACIÓN: SR. GARCÍA



E

n uno de los capítulos, el VII, de *La República*, Platón presentó el famoso mito de la caverna. Sostenía allí que lo que observamos acaso no sea sino sombras de la auténtica realidad, a la que no podemos acceder, encadenados como estamos a nuestras limitadas facultades cognitivas. En ningún campo del conocimiento la cuestión que planteó Platón es más relevante que en la ciencia, cuyo objetivo es conocer esa realidad y establecer las leyes que rigen sus comportamientos. Y dentro de la ciencia, en ninguno como el que surgió a raíz de las implicaciones epistemológico-cognitivas en el contexto de la mecánica cuántica.

La primera formulación de una mecánica cuántica se debió a un joven doctorando de Arnold Sommerfeld en Múnich, Werner Heisenberg, que había ampliado estudios primero con Max Born en Gotinga y luego con Niels Bohr en Copenhague. Su versión de la mecánica cuántica es la denominada “mecánica cuántica matricial” (1925), por el papel que un objeto matemático, las matrices, desempeñaba en ella. A esa versión siguió poco después, en 1926, la que propuso Erwin Schrödinger. Se trataba de una mecánica cuántica diferente, cuyo elemento principal era una función, ψ , definida en el campo de los números complejos, la denominada “función de onda”. Mientras que la mecánica matricial de Heisenberg era altamente abstracta, renunciando a representar “realísticamente” los objetos que describe, como por ejemplo los

“Sostenía Platón que lo que observamos acaso no sea sino sombras de la auténtica realidad”



electrones, la de Schrödinger pretendía explicar esas partículas como paquetes de ondas; sin embargo, Hendrik Lorentz, el físico más respetado, demostró que esos paquetes se dispersan, lo que hacía imposible sostener la interpretación de las partículas como ondas.

Finalmente se demostró que ambas versiones eran equivalentes, pero esto no impidió que se produjera un profundo debate entre los “realistas”, que preferían la versión de Schrödinger, y los “abstractos”, que optaban por la de Heisenberg. Entre los primeros se encontraba Albert Einstein, y entre los segundos Niels Bohr, que se erigió en su líder. A pesar de que los partidarios de la mecánica matricial no recibieron con agrado la idea de que la mecánica ondulatoria representaba, en el fondo, la misma realidad física que la matricial —el propio Schrödinger y Wolfgang Pauli demostraron que eran equivalentes—, la teoría de Schrödinger terminaría imponiéndose debido a ser mucho más fácilmente manejable. Y los antiguos proponentes del esquema alternativo acabarían también no solo pasándose al bando contrario, sino contribuyendo a configurar su interpretación física, una interpretación que sería muy diferente a la que Schrödinger había deseado. Fue Max Born quien realizó la aportación más relevante en este sentido, en un artículo que publicó en *Zeitschrift für Physik* el 10 de julio de 1926, titulado “Sobre la teoría cuántica de las colisiones (Comunicación preliminar)”, donde propuso que el producto de ψ por su conjugado complejo ψ^* —esto es, $|\psi|^2$ — debía representar la densidad de probabilidad de los electrones (o de otras partículas).

UN INSTITUTO DE FÍSICA PARA BOHR

Desde que en 1913 Bohr publicó su trilogía sobre “La constitución de los átomos y moléculas” su presencia e importancia en la comunidad internacional de físicos no hizo más que aumentar. En marzo de 1914, solicitó al gobierno danés que se creara una cátedra de física teórica en Copenhague para él, pero mientras esto se decidía, en octubre regresó a Manchester donde permaneció hasta comienzos del verano de 1916; en mayo recibió el nombramiento de catedrático que había pedido. Al año siguiente, comenzó una campaña para que se estableciera en Copenhague un instituto de física teórica con él de director. El 3 de marzo de 1921 ese instituto se inauguró oficialmente.

Ψ

El elemento principal de esta mecánica cuántica diferente era una función, ψ , definida en el campo de los números complejos: la denominada “función de onda”.



“No podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles”

Werner Heisenberg
(en su artículo de 1927 en *Zeitschrift für Physik*).

El Universitetets Institut for Teoretisk Fysik se convirtió rápidamente en una especie de *meca* a la que acudían con frecuencia muchos jóvenes científicos que deseaban profundizar en sus conocimientos de la física cuántica, permaneciendo allí períodos de tiempo variables. Entre 1921 y 1930, visitaron el Instituto 63 físicos de 17 nacionalidades. Todos, o al menos la mayoría de esos científicos visitantes, llevaron las ideas de Bohr y de Heisenberg por todo el mundo.

FÍSICA Y FILOSOFÍA EN COPENHAGUE

En las ideas que se manejaban y los desarrollos que surgían confluían la física y la filosofía, como fue el caso del principio de incertidumbre (o de indeterminación) de Heisenberg o la denominada interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica.

Léon Rosenfeld, uno de los colaboradores más fieles de Bohr, resumió la novedad de lo que se estaba tratando en uno de los dos capítulos con los que contribuyó al libro colectivo en honor de Bohr, *Niels Bohr. His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues* (1967): “La novedad de esta situación para los físicos era que tuvieron que enfrentarse a problemas de epistemología de una naturaleza mucho más profunda que aquellos con los que se habían encontrado antes”.

Primero fue el principio de incertidumbre, al que Heisenberg llegó tras intensas y agotadoras discusiones con Bohr. La intensidad de los intercambios entre ambos alcanzó tal grado que, agotado, Bohr decidió en febrero de 1927 viajar a Noruega para descansar y esquiar. Esto resultó favorable para Heisenberg, pues le permitió ▶

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

El principio de incertidumbre

Heisenberg centró sus esfuerzos en representar matemáticamente la trayectoria de un electrón en una cámara de niebla dentro de la mecánica cuántica. El resultado fue el principio de incertidumbre, $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$, donde Δx representa la incertidumbre de la medida, x la posición, p el momento lineal (el producto de la masa por la velocidad) y \hbar la constante de Planck.

pensar a solas. Allí concentró sus esfuerzos en la cuestión de cómo puede representarse matemáticamente en la mecánica cuántica la trayectoria de un electrón en la cámara de niebla. El resultado fue el principio de incertidumbre, que expresa la relación

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

donde Δx representa la incertidumbre de la medida, x la posición, p el momento lineal (el producto de la masa por la velocidad) y \hbar la constante de Planck.

Inmediatamente preparó un artículo, “Sobre el contenido concreto de la cinemática mecánica de la teoría cuántica”, que publicó en *Zeitschrift für Physik* en 1927. Justo al final del artículo, Heisenberg extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance: “Lo que es incorrecto en la formulación fuerte de la ley causal, ‘Si conocemos exactamente el presente, podemos predecir el futuro’, no es la conclusión, sino la premisa. No podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles [...] Como el carácter estadístico de la teoría cuántica está tan íntimamente ligado a todas las percepciones, uno se puede ver conducido a la presunción de que detrás del universo estadístico de la percepción se esconde un mundo ‘real’ regido por la causalidad. Pero tales especulaciones nos parecen —y hacemos hincapié en esto— inútiles y sin sentido. La física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre observaciones”.

La denominada “interpretación de Copenhague” de la mecánica cuántica fue el resultado de un complejo proceso del que quiero señalar únicamente un elemento central, el llamado colapso de la “función de onda”, el he-

cho de que antes de realizar una observación “la realidad” está representada por una función de onda que es la suma del conjunto de autofunciones del sistema (los estados posibles que puede tomar ese sistema), y que *al realizar una medida* la función de onda “colapsa”, con una cierta probabilidad (que proporciona la teoría), en una de esas autofunciones. Es como si antes de que se realice una observación, la “realidad” se encontrara en un estado borroso, concretándose solo cuando se procede con una observación. No es extraño que quienes, como Einstein, se adherían firmemente a la idea de que la “realidad” es una, que además obedece al principio de causalidad, renegasen de esa interpretación y subsidiariamente de la mecánica cuántica como la interpretaban Bohr y sus seguidores.

MULTIVERSOS

Aunque el Instituto de Copenhague continuó aportando al desarrollo de la física cuántica, a la nuclear especialmente, su importancia, como la de Europa, fue decayendo y pasando el liderazgo a Estados Unidos. Uno de los desarrollos que se produjeron allí, y que tiene que ver con la interpretación de la mecánica cuántica, fue la idea de que acaso no hay uno, sino múltiples, infinitos, universos (*multiversos*). El principal responsable de esta idea fue Hugh Everett III (1930-1982), un doctorando en la Universidad de Princeton de John A. Wheeler, un antiguo colaborador de Bohr.

La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica no convenía a Everett, en especial la extraña mezcla entre los mundos clásicos y cuánticos: la función de onda seguía su camino cuántico hasta que el “colapso de la función de onda”, una medida clásica, concretaba, con una cierta probabilidad (que la teoría cuántica permitía calcular), un estado determinado de entre los diferentes estados con los que había “navegado”. Lo que se propuso fue prescindir del postulado del colapso de la función de onda y tratar de incluir al observador en la función de onda. En un artículo que publicó en 1957 en *Reviews of Modern Physics* y que coincide con la versión final de su tesis doctoral, resumió la esencia de su pensamiento como sigue: “Con cada observación (o interacción) sucesiva, el estado del observador ‘se ramifica’ en un número de estados diferentes. Cada rama representa un resultado diferente de la medición y de los correspondientes autoestados para el estado objeto-sistema. Todas las ramas existen simultáneamente en la superposición tras cualquier secuencia dada de observaciones”.

Se abrió así una nueva puerta a la interpretación de la mecánica cuántica, una puerta que continúa abierta. Relevante en este sentido es lo que un físico tan notable como Steven Weinberg expuso en un artículo, *El problema con la mecánica cuántica*, publicado en *The New York Review* el 19 de enero de 2017: “Los problemas de comprender la medida en la forma actual de la mecánica cuántica pueden alertarnos de que la teoría necesita ser modificada. La mecánica cuántica funciona tan bien para los átomos que cualquier

“Con cada observación (o interacción) sucesiva, el estado del observador ‘se ramifica’ en un número de estados diferentes”

Hugh Everett III
(en su artículo de 1957 en *Reviews of Modern Physics*).



nueva teoría tendría que ser casi indistinguible de la mecánica cuántica cuando se aplique a semejantes pequeñas cosas. Pero bien podría diseñarse una nueva teoría de manera que la superposición de estados de las cosas grandes, como los físicos y sus aparatos, incluso aislados, sufran un rápido y efectivo colapso espontáneo, en el que las probabilidades evolucionen para dar los resultados esperados en mecánica cuántica. Las muchas historias de Everett colapsarían de manera natural en una sola historia. El fin de inventar una teoría nueva es hacer que esto suceda sin dar a la medida un estatus especial en las leyes de la física, sino como parte de lo que en la

teoría post-cuántica serían los procesos ordinarios de la física”.

Desgraciadamente, tal teoría aún no existe, y no sabemos si llegará a existir algún día. ■

Historia de la Física Cuántica, de José Manuel Sánchez Ron, es una trilogía que narra la evolución de esta disciplina desde sus raíces clásicas hasta la actualidad (Editorial Crítica).