



## VISUALIZACIÓN DE LOS OBJETOS CUÁNTICOS EN LA INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE. UNA APROXIMACIÓN HISTÓRICO-FILOSÓFICA

Visualization of quantum objects in the Copenhagen interpretation. A historical-philosophical approach

KARIM GHERAB-MARTÍN  
Universidad Rey Juan Carlos, España

---

### PALABRAS CLAVE

*Mecánica cuántica  
Física cuántica  
Interpretación de  
Copenhague  
Dualidad onda-corpúsculo  
Imagen onda-corpúsculo  
Complementariedad  
Imágenes verbales*

---

### RESUMEN

*Este artículo trata de la importancia concedida a las imágenes verbales en el discurso descriptivo utilizado en la física cuántica y, más concretamente, en la concepción de lenguaje científico defendida por los partidarios de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica a principios del siglo XX. La interpretación de Copenhague, cuyas raíces se remontan al principio filosófico de complementariedad de Niels Bohr, considera que los fenómenos subatómicos no pueden ser evocados directamente, sin hacer referencia al contexto observacional y experimental.*

---

### KEYWORDS

*Quantum mechanics  
Quantum physics  
Copenhagen interpretation  
Wave-particle duality  
Wave-particle imaging  
Complementarity  
Verbal images*

---

### ABSTRACT

*This article deals with the importance given to verbal images in the descriptive discourse used in quantum physics and, more specifically, in the conception of scientific language defended by supporters of the Copenhagen interpretation of quantum mechanics at the beginning of the 20th century. The Copenhagen interpretation, whose roots go back to Niels Bohr's philosophical principle of complementarity, considers that subatomic phenomena cannot be evoked directly, without reference to the observational and experimental context.*

---

Recibido: 13/09/2022  
Aceptado: 03/12/2022

## 1. Introducción.

Los objetos científicos son objetos de conocimiento cuyo modo primario de percepción es sobre todo visual y, por eso, se representan localizados dentro de un marco espacial tridimensional y sujetos a una evolución temporal. Sin embargo, las imágenes —fotografías, esquemas, tablas, mapas— suelen ir siempre acompañadas de palabras o de números —o de otros símbolos—, es decir, usamos el lenguaje para referirnos a dichos medios visuales. Es más, las imágenes y los textos se refuerzan entre sí, de modo que, combinándolos, el científico puede lograr un conocimiento mayor que la suma de las partes. Pero hay ocasiones en las que la ciencia se enfrenta a fenómenos naturales que no se pueden visualizar, por ejemplo, los objetos microscópicos y las estructuras de cuatro o más dimensiones.

A finales del siglo XIX, el ideal de una completa visualización de los fenómenos naturales, basada en una descripción causal dentro de un marco espacial y temporal, estaba fuera de toda duda. Pero, nada más iniciarse el siglo XX, este ideal se vio amenazado por la Teoría de la Relatividad —primero la Especial y luego la General— y por la Teoría de los Cuantos. Al contrario que la Mecánica y la Electrodinámica Clásicas, la Teoría Especial de la Relatividad ya no trataba el espacio y el tiempo en términos absolutos, sino relativos, y eliminaba la imagen del *éter* como medio de transporte de las ondas electromagnéticas, poniendo en su lugar el *vacío*. Por su parte, la Teoría General de la Relatividad describía las fuerzas gravitatorias como estructuras espacio-temporales con geometrías tetradimensionales. Pero el ejemplo preeminente en el siglo XX fue la Mecánica Cuántica (en adelante MC), que describe los fenómenos que pertenecen a las escalas microscópicas, es decir, trata de explicar y predecir el comportamiento de objetos del tamaño de un átomo, o incluso muchos más pequeños —electrones, fotones, protones, neutrinos, quarks, etc.—. Los físicos descubrieron que, no sólo diferían notablemente las propiedades de los fenómenos a escala microscópica y a escala macroscópica, sino que los objetos subatómicos escapaban a la intuición espacio-temporal y además parecían reírse de conceptos filosóficos tan importantes y enraizados en la ciencia como eran la *objetividad*, la *causalidad* o la *localidad*.

El presente artículo puede leerse en combinación con otro artículo (Rubio, 2022). Ambos autores trataremos, desde perspectivas distintas, de la importancia concedida a las imágenes verbales en el discurso descriptivo figurativo utilizado en la física cuántica y, más concretamente, en la concepción de lenguaje científico defendida por los partidarios de la *interpretación de Copenhague* de la MC a principios del siglo XX. La interpretación de Copenhague, cuyas raíces se remontan al principio filosófico de *complementariedad* de Niels Bohr, considera que los fenómenos subatómicos no pueden ser evocados directamente, sin hacer referencia al contexto observacional y experimental.

En este artículo, me enfocaré en una descripción histórico-filosófica de la teoría cuántica y dejaré a Rubio (2022) la tarea de establecer un diálogo filosófico-pictórico entre los protagonistas de la revolución cuántica. Aquí, relataré cómo nació el *quantum* de la mano de Max Planck (1900) y Albert Einstein (1905), haré un rápido repaso de los primeros modelos que se propusieron para describir el átomo, explicaré el modelo atómico de Bohr (1913) y su evolución hasta 1925 tras fructificar la idea de que la luz estaba compuesta de corpúsculos (Compton, 1923) y la electricidad compuesta de ondas (de Broglie, 1924). Hablaré de la invención de la MC matricial (Heisenberg, 1925) y de la MC ondulatoria (Schrödinger, 1926), dejando a Rubio (2022) la tarea de analizar el bronco debate surgido entre Heisenberg —mecánica matricial— y Schrödinger —mecánica ondulatoria— en torno a los conceptos visualización e inteligibilidad. Finalmente, describiré brevemente los pasos que llevaron a Heisenberg (1927) a derivar el *principio de indeterminación* a partir de la propiedad de no-conmutatividad del álgebra de matrices y que culminó con la presentación, en 1927, del *principio de complementariedad* de Bohr a la comunidad científica. El desarrollo de la mecánica cuántica no terminó ahí. A lo largo de los siguientes años surgieron nuevos desarrollos matemáticos —acompañados de innovadoras notaciones y simbolismos—, apasionantes debates filosóficos y sorprendentes experimentos mentales que llevaron al límite de sus capacidades a la más brillante generación de físicos jamás conocida. Sin embargo, la limitación de espacio impide —y el sentido común desaconseja— cubrir lo sucedido durante algo más de medio siglo de éxtasis cuántico-filosófico, de modo que —prudentemente— me contentaré con abarcar, con cierto detalle, únicamente el periodo comprendido entre 1900 y 1927, año en el que se presenta en sociedad la llamada *interpretación de Copenhague*.

## 2. El nacimiento de la física cuántica.

Como es sabido, una barra de metal al ser calentada cambia de color. Esto es debido a que la materia absorbe y emite luz, en distintas frecuencias en función de su temperatura, de lo que se deduce que la energía desprendida de un objeto material viene dada por la distribución de frecuencias de la luz emitida. Un objetivo prioritario para los físicos en el cambio de siglo era pues deducir una ley de distribución que se ajustara a los datos observados. Había dos fórmulas distintas, que funcionaban muy bien por separado para rangos muy distintos de frecuencias y temperaturas, pero que nadie sabía cómo unificar en una sola fórmula o ley universal:

- (a) Por un lado, la *Ley de Wien*, que funcionaba muy bien para frecuencias emitidas a altas temperaturas, pero no para bajas temperaturas.
- (b) Y, por otro lado, la *Ley de Rayleigh* —que posteriormente se llamó *Ley de Rayleigh-Jeans*—, que funcionaba muy bien para frecuencias bajas, pero no para frecuencias altas.

En el verano de 1900, tras conocer los resultados de un nuevo experimento realizado en Berlín para comprobar el espectro de la radiación térmica del cuerpo negro con el objetivo final de deducir la ley de distribución correcta, el físico teórico alemán Max Planck<sup>1</sup> se vio forzado a introducir *ad hoc* una cantidad física discreta —que llamó *quantum de acción*— extremadamente pequeña relacionada con una constante  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J/s —que hoy llamamos *constante de Planck*— para explicar una extraña discontinuidad en la energía radiada por dicho cuerpo. Incrédulo con la posibilidad de que la energía pudiera realmente emitirse en paquetes discretos, consideró su hallazgo como “una suposición puramente formal” (Sánchez Ron, 2001, p. 139). Esta constante no significaba para él nada físicamente real. Durante varios años, buscó —sin éxito— la forma de eliminarla o de relacionarla con las dos leyes —ya consideradas antiguas— de la radiación térmica que hemos mencionado antes, con el fin de ajustar su teoría a los datos experimentales observados. Antes de que Planck añadiera a regañadientes su artificio, todos los físicos del momento esperaban obtener una ley física que representara una propagación continua —es decir, ininterrumpida— de la energía. Pero, los resultados experimentales parecían sugerir la emisión de paquetes discretos de energía, siempre en cantidades cuyo valor resultaba ser un múltiplo entero del valor de la constante introducida *ad hoc* por Planck. Publicó esta revolucionaria hipótesis en diciembre de ese mismo año, 1900, dando así inicio a la era de la física cuántica.

La *constante de Planck* —o sea,  $h$ — no adquirió un sentido físico real hasta que Albert Einstein<sup>2</sup> la utilizó en 1905 para explicar el *efecto fotoeléctrico*, un proceso —descubierto por Heinrich R. Hertz en 1887— en el que los electrones son expulsados de una superficie metálica iluminada por la luz. Fiel a su estilo creativo y disruptivo, Einstein (1905) hizo una sorprendente y atrevida propuesta: mostró que podía ser muy útil considerar que la luz poseía las mismas propiedades que las partículas, es decir, estar compuesta de *cuantos* de luz —del original en alemán *Lichtquant*—, que interpretó como mínimas cantidades discretas de energía. Este término fue traducido al inglés como *light quantum*. Naturalmente, esto es lo que hoy en día llamamos *fotón*, un afortunado neologismo que no fue utilizado hasta 21 años después, cuando lo introdujo el físico-químico Gilbert N. Lewis (1926). De momento, utilizaré indistintamente los términos *cuanto* o *quantum* y evitaré hablar del *fotón*, ya que denota claramente una partícula, y casi todos los físicos de la época estaban convencidos de que la luz se propagaba como una onda, y no como una partícula. A pesar de que el físico estadounidense Robert A. Millikan<sup>3</sup> (1916) lograría verificar experimentalmente la presencia de los cuantos de luz predichos por Einstein para el efecto fotoeléctrico, tampoco creyó que el *quantum* fuera una partícula real —es decir, un fotón—. Hubo que esperar al experimento de Compton, en 1923, para que una buena mayoría de físicos se convencieran ya de la existencia real del fotón.

Pero en 1905, casi todos los físicos de primera fila —como Lorentz, Planck y, posteriormente, Bohr— se opusieron al concepto de los cuantos de luz porque la imagen corpuscular sugerida por Einstein era a todas luces contradictoria con la imagen ondulatoria que se observaba en el experimento de las dos rendijas de Young. Este famoso experimento mostraba, con una evidencia

---

<sup>1</sup> Premio Nobel de Física en 1918.

<sup>2</sup> Premio Nobel de Física en 1921.

<sup>3</sup> Premio Nobel de Física en 1923.

palmaria, los típicos patrones de difracción y de interferencia que se manifiestan en los procesos ondulatorios —como consecuencia de una sucesión de interacciones constructivas y destructivas—, de modo que era casi impensable imaginar la luz como una colección de innumerables *quantums* propagándose por el espacio como una lluvia de microscópicas canicas de energía. Einstein fue probablemente la única excepción: “Einstein intentaba hacer compatibles, por el momento a nivel básicamente programático, aspectos continuos y discretos (los asociados a los cuantos) [...] una primera manifestación —o premonición— de la dualidad onda-corpúsculo” (Sánchez Ron, 2001, p. 175). Fue de Broglie quien sistematizó y resolvió la cuestión muchos años después, entre 1923 y 1924.

Como es obvio, nadie podía imaginar en 1905, ni remotamente, que tanto la luz como la materia pudieran ser ambas cosas a la vez en la escala microscópica, porque las ondas y las partículas eran —y son— conceptos claramente opuestos en la escala macroscópica. Y puesto que el experimento de Young revelaba claros patrones de difracción e interferencia en la propagación de la luz y, por consiguiente, se manifestaba de manera absolutamente inapelable la presencia de ondas, entonces la gran mayoría de los físicos —por no decir casi todos— optaron por concebir las ondas de luz como lo real y el *quantum* de Einstein como un artificio útil para la física, como una herramienta conceptual, pero sin un referente real en forma de partícula. Einstein fue la excepción. Faltaban todavía 20 años de maduración cuántica para que hubiera una nueva generación de físicos que no se atragantaran con una hipótesis, tan revolucionaria y contraria al sentido común, como fue la *dualidad onda-corpúsculo*.

### 3. La representación de la estructura atómica. Modelos visuales.

A principios del siglo XIX, el químico inglés John Dalton observó que los elementos químicos se combinaban entre sí mediante unidades de peso discretas y rescató el antiguo vocablo griego<sup>4</sup> *ἄτομος* —átomos— para referirse a ellas, por considerarlas indivisibles. No obstante, a finales del siglo XIX, tales objetos microscópicos —e invisibles— todavía eran descartados por físicos de la talla de Ernst Mach, que los consideraban no observables —ni al ojo humano ni al microscopio— y, por consiguiente, las tachaban de meras especulaciones metafísicas.

Con el cambio de siglo, los átomos evolucionaron de ser objetos hipotéticos hasta convertirse en objetos que podían estudiarse con mucho detalle en los laboratorios. Con el paso de los años, los físicos tuvieron la certeza de que los átomos existían y de que su carga era neutra. Empezaron a proponerse diversas representaciones visuales, como por ejemplo los modelos de Joseph Larmor (1897) y de Jean Perrin (1901), que comparaban los átomos con microscópicos “sistemas solares”, o bien como la “teoría del átomo cúbico” de G. N. Lewis (1902). Uno de los primeros en hacer experimentos con tubos de rayos catódicos para estudiar las propiedades de la electricidad fue el inglés Sir Joseph John Thomson<sup>5</sup>. Este físico experimental, director del prestigioso Laboratorio Cavendish entre 1884 y 1919, fue quien descubrió en 1897 que los rayos catódicos eran en realidad chorros de electrones, de modo que el *electrón* se convirtió en la primera partícula subatómica conocida, de carga negativa. Esto hizo sospechar de la supuesta indivisibilidad del átomo defendida por Dalton. Tras lograr el celebrado descubrimiento del electrón, J. J. Thomson aplicó técnicas experimentales similares para investigar la estructura de los átomos, concluyendo que este contenía en su interior cargas positivas y negativas — electrones—. Esta nueva imagen del átomo implicaba admitir que los átomos, considerados indivisibles durante más de 2.000 años, tenían algún tipo de estructura interna. Por consiguiente, para explicar el comportamiento tanto de los electrones como de las cargas positivas en el interior del átomo, era necesario desarrollar una teoría del átomo o *teoría atómica*. En un principio, todo parecía indicar que sería suficiente con extender al interior del átomo la misma física —hoy conocida como *física clásica*— que se aplicaba al exterior, el resto del universo. A pesar de que Thomson pensó inicialmente que todos los átomos, incluidos los más simples —como el Hidrógeno—, contenían al menos 1.000 electrones, adaptó posteriormente su modelo a los resultados experimentales, llegando a la conclusión de que la realidad del átomo involucraba cantidades mucho más modestas. En 1904, propuso un modelo que representaba al átomo como un fluido esférico con cargas positivas en su

<sup>4</sup> El término griego *ἄτομος* proviene de la combinación de *α* —“sin”— y *τόμος* —“sección”—, de modo que *ἄτομος* es lo que “no se puede seccionar”, lo “indivisible”. Su origen se remonta a la antigüedad clásica, en la antigua Grecia, siendo un principio básico en la cosmovisión atomista defendida por los filósofos jónicos Leucipo de Mileto, Demócrito de Abdera y Epicuro de Samos.

<sup>5</sup> Premio Nobel de Física en 1906.

interior y cargas negativas —electrones— en la superficie exterior. Este modelo es conocido popularmente —y quizás injustamente— como “modelo del pudin de pasas”.

Ese mismo año, el físico japonés Hantaro Nagaoka propuso una teoría planetaria del átomo, que se llamó “modelo saturniano” debido a su analogía con la estabilidad de los anillos de Saturno. Abandonó esta idea en 1908 por falta de apoyo experimental, pero tuvo dos intuiciones muy valiosas. Pensó que, del mismo modo que los anillos de Saturno son muy estables porque sus elementos orbitan alrededor de un planeta muy masivo, la estabilidad del átomo también podría explicarse a partir de un núcleo positivo muy masivo y una colección de electrones orbitando a su alrededor.

En 1911, el físico neozelandés Ernest Rutherford<sup>6</sup> se basó en las intuiciones del modelo saturniano de Nagaoka —a quién citó— para desarrollar un modelo atómico muy parecido a un sistema planetario en miniatura. Junto con su ayudante Hans Geiger, Rutherford realizó una serie de experimentos de gran precisión<sup>7</sup> para analizar la dispersión de partículas en láminas metálicas, llegando a la conclusión de que un átomo era estructura casi completamente vacía: un núcleo minúsculo de carga positiva, pero extraordinariamente denso en el centro, ocupaba una milmillonésima parte del volumen del átomo, rodeado por cierto número de electrones —carga negativa— de tamaño aún menor girando a su alrededor en órbitas fijas, atrapados por su poder de atracción. El modelo atómico de Rutherford planteó nuevos problemas físicos y filosóficos. Por ejemplo, el siguiente dilema filosófico: parecía paradójico e inverosímil que todos los objetos sólidos del mundo macroscópico resultaran tener, en la escala microscópica, volúmenes mayoritariamente vacíos<sup>8</sup>. La pregunta inmediata era: ¿cómo es posible que los objetos estén casi vacíos en la escala microscópica y, sin embargo, den la sensación de ser materialmente muy densos en la escala macroscópica? El físico teórico alemán Max Born lo relataba con tono de drama:

Hemos llegado al final de nuestro viaje por los abismos de la materia. Buscábamos un suelo firme y no lo hemos encontrado. Cuanto más profundamente penetramos, tanto más inquieto, más incierto y más borroso se vuelve el Universo. (Born, 1969, p. 166)

El astrofísico inglés Sir Arthur S. Eddington, excelente escritor y divulgador científico, lo narraba con tono de comedia cuando, al hablar de una mesa, primero la describía por experiencia directa —percepciones sensoriales— y luego lo contaba con base en lo revelado por la ciencia —o sea, Rutherford—. Nótese que este autor insistía en que, aun siendo muy diferentes los conceptos y las imágenes que asociamos a cada mesa, ambas mesas son equivalentes desde el punto de vista práctico:

[La mesa No. 1] me resulta familiar desde mis primeros años. Es un objeto común de ese entorno que llamo mundo. Tiene extensión, es comparativamente permanente, está coloreada, es sobre todo *substancia* [...] no se derrumba si me apoyo en ella. Es una *cosa*. (Eddington, 1928, p. xi)

La mesa No. 2 es mi mesa científica. La he conocido hace muy poco y no estoy tan familiarizado con ella [...]. Está mayormente vacía. Escasamente dispersas en ese vacío hay numerosas cargas eléctricas moviéndose a gran velocidad, pero su volumen combinado equivale a menos de una milmillonésima parte del volumen de la mesa. [...] A pesar de su extraña construcción, es una mesa totalmente eficiente. Sostiene mi papel de escribir tan satisfactoriamente como la mesa No. 1, porque cuando coloco el papel sobre ella, las pequeñas partículas eléctricas con su velocidad vertiginosa siguen golpeando la parte inferior, de modo que el papel en forma de volante se mantiene estable a una altura prácticamente constante. Si me apoyo en esta mesa no la atravesaré; o, expresado con estricta precisión, la probabilidad de que mi codo científico atraviese mi mesa científica es tan excesivamente pequeña que

---

<sup>6</sup> Premio Nobel de Química en 1908.

<sup>7</sup> Rutherford estaba a la vanguardia en física experimental porque había trabajado como ayudante del ya mencionado J. J. Thomson en el Laboratorio Cavendish.

<sup>8</sup> Tomemos como referencia el átomo más sencillo, el de Hidrógeno, que sólo tiene un electrón orbitando alrededor de un protón —el núcleo—. Imaginemos ahora que dicho átomo tuviera el tamaño del famoso coliseo donde juega el Real Madrid, el Estadio Santiago Bernabéu. En proporción, su núcleo —el protón— tendría el tamaño de una pelota de golf colocada justo en el centro del estadio y el electrón sería un grano de arena girando en derredor y trazando una trayectoria circular —su órbita— del tamaño del estadio. Si sumáramos la cantidad de *materia* contenida en protón y electrón combinados y la comparáramos con el volumen de *espacio vacío* que hay entremedias —básicamente el volumen total del estadio—, obtendríamos como resultado del cálculo que el 99,999999999999% del átomo es puro vacío.



puedo ignorarla en mi vida diaria. [...] No hay nada *substancial* en mi mesa científica. Es casi todo espacio vacío. (Eddington, 1928, p. xii)

[...] Incluso en la minúscula parte que no está vacía, no debemos proyectar la antigua noción de substancia. Al diseccionar la materia en cargas eléctricas nos hemos alejado mucho de la imagen que dio origen a la concepción de substancia, y el significado de esa concepción —si es que alguna vez tuvo alguno— se ha perdido en el camino. [...] Conceptualmente existe toda la diferencia del mundo entre mi mesa científica [...] mayormente vacía y la mesa de la experiencia diaria que asociamos a la imagen de realidad sólida [...], pero no hay diferencia alguna en mi tarea práctica de escribir en el papel [apoyado en la mesa]. [...] Hablamos paradójicamente de dos mundos. ¿No serán realmente dos aspectos o dos interpretaciones de un mismo mundo?". (Eddington, 1928, p. xiii-iv)

El modelo de Rutherford también planteaba un problema para la propia física clásica. Una consecuencia negativa del modelo atómico planetario de Rutherford era que no coincidía con las predicciones teóricas de la electrodinámica clásica. Esta teoría, aceptada por todos, establecía que un electrón que estuviera orbitando circularmente alrededor del núcleo debía irradiar energía constantemente, de modo que terminaría por caer en espiral hacia el núcleo atómico al agotar toda su energía. Por consiguiente, o bien Rutherford había hecho mal los experimentos, o bien la electrodinámica clásica era una teoría incompleta que no predecía correctamente. El físico danés Niels Bohr<sup>9</sup>, que había realizado una estancia de investigación con Rutherford y conocía bien los detalles de los experimentos, optó por lo segundo; decidió retocar conceptualmente la teoría para ajustarla a los datos experimentales. Y la solución del físico danés, publicada en 1913, tuvo enormes consecuencias visuales y filosóficas.

Para hacer compatible la estabilidad de los átomos con el modelo de Rutherford, Bohr (1913a; 1913b; 1913c) postuló la existencia de órbitas discretas<sup>10</sup>. Así, la transición de un electrón de una órbita a otra era abrupta, es decir, se producía de manera discontinua e iba acompañada de la emisión de un cuanto de energía —luz— detectable empíricamente como una línea espectral. Este fue el origen del concepto de *salto cuántico* que puso el punto final al axioma metafísico leibniziano *natura non facit saltus*, también llamado *principio de continuidad* —o *ley de continuidad*—, heredado de Aristóteles y considerado casi como incuestionable durante dos milenios y medio. Por su interés, reproducimos aquí un extracto de lo escrito<sup>11</sup> por Leibniz:

Nada sucede de golpe, y es una de mis grandes y más comprobadas máximas que la naturaleza nunca da saltos. La llamé *ley de continuidad*, cuando hablé de ella en otra ocasión en las noticias de la república de las letras; y el uso de esta ley es muy notable en la Física. (Leibniz, 1965, p. 11)

Bohr introdujo un claro elemento de discontinuidad, que funcionó a la perfección para explicar la estabilidad del modelo atómico de Rutherford. El *postulado de Bohr* fue rápidamente adoptado por la comunidad de físicos, ya que mostró de inmediato un gran poder explicativo y predictivo, a pesar de que la mayoría de los físicos se sentían incómodos traicionando la máxima filosófica de *natura non facit saltus* (Heisenberg, 1971, p. 50). La idea de Bohr implicaba que el tránsito del electrón no podía visualizarse, en la medida en que era empíricamente inobservable. Esta nueva imagen del átomo, apodada “modelo atómico de Bohr”, heredaba la noción de discontinuidad ya presente en el trabajo

<sup>9</sup> Premio Nobel de Física en 1922.

<sup>10</sup> Hacemos notar al lector el uso de la palabra “órbita” en vez del término “orbital” que se usa actualmente. Como veremos, una “órbita” hace referencia a trayectorias curvas —continuas— que admiten una descripción visual de localización espacio-temporal. La noción de “orbital”, en cambio, no sería introducida hasta años más tarde, a partir de Max Born (1926), para hacer referencia a la densidad de probabilidad de encontrar un electrón en una determinada región del espacio alrededor del núcleo atómico. En otras palabras, el término “orbital” se introdujo para hacer referencia a la —aparente— imposibilidad de describir y visualizar la trayectoria espacio-temporal del electrón.

<sup>11</sup> La traducción es nuestra. Del original en francés: “Rien ne se fait tout d’un coup, & c’est une de mes grandes maximes & des plus vérifiées, que la nature ne fait jamais des sauts. J’appellois cela la loi de la continuité, lorsque j’en parlois autre fois dans les nouvelles de la république des lettres; & l’usage de cette loi est très-considerable dans la Physique” (Leibniz, 1765, p. 11). Este es un extracto de la obra *Nuevos ensayos sobre el entendimiento humano* —del original en francés *Nouveaux essais sur l’entendement humain*—, que Gottfried Leibniz escribió en respuesta a John Locke (1689) y que completó en 1704, pero que no fue publicada —póstumamente— hasta 1765.

seminal de Planck (1900) y en la explicación teórica del efecto fotoeléctrico propuesta por Einstein (1905). Era, pues, la tercera vez que hacía acto de aparición el *quantum*. Esto hizo que algunos físicos empezaran a sospechar que, quizás, no era tan loco pensar que el cuanto de luz pudiera ser una partícula real, pero las fuertes evidencias del experimento de Young en favor de la naturaleza ondulatoria de la luz seguían siendo más convincentes para la mayoría. La inquietud, no obstante, iba en aumento. Inquietaba que, si bien la idea de Bohr solucionaba la estabilidad del átomo, también generaba nuevos problemas a la física clásica: primero, violaba la mecánica clásica porque permitía solo ciertas órbitas<sup>12</sup> a los electrones; y, segundo, violaba el electromagnetismo clásico porque restringía la emisión de radiación del electrón a cantidades discretas en su tránsito entre órbitas. En su artículo sobre la estructura atómica, Bohr (1913a; 1913b; 1913c; 1988, p. 78) postuló lo siguiente:

- a) La existencia de órbitas circulares concéntricas y estables —llamadas *estacionarias*— que mantienen a los electrones girando alrededor del núcleo atómico sin radiar energía y que están localizadas a distancias discretas del núcleo. No puede haber otras órbitas fuera de las órbitas que están a distancias discretas.
- b) Las órbitas estacionarias corresponden a una serie de valores discretos de energía —por ejemplo, los niveles de energía  $E_0, E_1, E_2, E_3, E_4$ , etc., donde  $E_0 < E_1 < E_2 < E_3 < E_4$ , etc.—, de modo que cualquier variación en la energía del átomo es el resultado de una transición —o *salto*— de un electrón entre dos órbitas distintas —por ejemplo, un salto de  $E_2$  a  $E_3$  o bien de  $E_1$  a  $E_3$ , o al revés—. El nivel  $E_0$  es la órbita con menor energía y es lo más cerca que un electrón puede estar del núcleo atómico.
- c) La frecuencia ( $f$ ) de la radiación de energía emitida o absorbida por un átomo se establece en función de la diferencia de energía entre dos órbitas, según la fórmula:  $nhf = E_{n+m} - E_m$ , donde  $n$  y  $m$  son dos números enteros cualesquiera —es decir  $m=n=0,1,2,3,4,5\dots$ —. Así, el salto de un electrón de  $E_3$  a  $E_1$  significa que el átomo *emite* un paquete de energía igual a  $2hf$  —o sea, dos *quantums*— y el salto de  $E_0$  a  $E_3$  significa que el átomo *absorbe* un paquete de energía igual a  $3hf$  —o sea, tres *quantums*—.

Se ha hecho famosa la siguiente afirmación de Bohr, que es la que dio pie posteriormente a la expresión “salto cuántico”:

[...] el equilibrio dinámico de los sistemas en las [órbitas estables] puede discutirse con ayuda de la mecánica ordinaria, mientras que el paso de los sistemas entre las diferentes [órbitas estables] no puede tratarse sobre esa base. (Bohr, 1913a, pp. 3-4)

La discontinuidad del átomo introducida por Bohr se manifestaba en las órbitas discretas de los electrones alrededor del núcleo atómico, describía con creciente precisión las líneas espectrales observadas en el átomo de hidrógeno. Pero, como ya hemos dicho, el modelo de Bohr violaba la electrodinámica clásica, porque postulaba la emisión o absorción de cantidades discretas de energía —en vez de radiación continua e ininterrumpida—, y violaba la mecánica clásica porque postulaba la existencia de saltos en las transiciones de los electrones entre una órbita y otra. Debemos insistir en que Bohr negaba la existencia de trayectorias visualizables en el espacio-tiempo únicamente para el caso concreto de los saltos entre distintas órbitas, de modo que aceptaba la existencia de trayectorias circulares continuas para cada órbita electrónica discreta, es decir, representables en el espacio-tiempo mediante círculos concéntricos.

Propuesto en 1913, el modelo atómico de Bohr cosechó varios éxitos durante los siguientes 10 años. Explicaba con precisión las líneas espectrales en el átomo de Hidrógeno, que es el primero en aparecer en la tabla periódica de los elementos. Sin embargo, a partir del año 1923, el modelo de Bohr empezó a declinar debido a su incapacidad para explicar, con una precisión razonable, las líneas espectrales del átomo de Helio, que es el segundo en aparecer en la tabla periódica. La dificultad con el Helio se debe a su condición de *gas noble* —es químicamente inerte al tener saturado con dos electrones su nivel más bajo de energía  $E_0$ —. El modelo de Bohr mejoró las predicciones con el ion de Helio y cumplió razonablemente bien con el Litio, que es el siguiente elemento de la tabla periódica en aparecer. Las predicciones fueron empeorando dramáticamente para átomos más pesados. Como es

---

<sup>12</sup> Curiosamente, contrariamente a sus colaboradores, Bohr prefería utilizar el término “anillo” en lugar de “órbita”.

lógico, al añadir cada vez más electrones se iban poblando más órbitas, de modo que Bohr y su equipo de colaboradores debían tener en cuenta también las fuerzas de repulsión entre los electrones, lo que implicaba renunciar a las órbitas estacionarias circulares en favor de órbitas elípticas. Además, debían explicar por qué las órbitas sólo podían aceptar un determinado número de electrones, un límite máximo que variaba según cada nivel de energía, de modo que un átomo que tuviera las dos primeras órbitas ya completas —es decir, 2 electrones en el nivel  $E_0$  y 8 electrones en el nivel  $E_1$ — no podría absorber un electrón adicional si antes no emitía otro electrón que dejara una vacante. Otro aspecto que el modelo debía explicar era el “efecto pantalla”: los electrones de las órbitas exteriores no solo orbitan alrededor del núcleo atómico —con carga positiva—, sino que orbitan también alrededor de los electrones de las órbitas interiores, por lo que la fuerza de atracción del núcleo —su carga positiva efectiva— se reduce en función del número de electrones —carga negativa— que haya en las órbitas interiores. Otro asunto para los teóricos consistía en tener en cuenta que el movimiento orbital de cada electrón en movimiento generaba, a su vez, campos magnéticos que afectaban al resto de partículas cargadas.

Naturalmente, la lista de asuntos a tratar y resolver sería interminable, de modo que finalizaremos esta sección mencionando otro reto que debían afrontar los físicos atómicos: debían explicar por qué el tamaño de los átomos tiende a hacerse más pequeño hacia la derecha de la tabla periódica y se hacen mucho más grandes al comenzar la siguiente línea de la tabla; o explicar por qué los átomos a la derecha de la tabla tienden a ganar electrones, mientras que los átomos a la izquierda tienden a perderlos; explicar por qué los elementos de la última columna de la tabla son químicamente inertes. Como puede verse, la creciente complejidad de los átomos estudiados obligó, poco a poco, a abandonar el modelo atómico de Bohr, así como sus modelos derivados. Y, además, en el periodo entre 1923 y 1927, se aceleraron los acontecimientos de manera colosal. El *principio de correspondencia*, propuesto por Bohr en 1923, fue probablemente el punto de inflexión.

#### 4. El principio de correspondencia.

Ya hemos visto que, de acuerdo con la electrodinámica clásica, la radiación continua de energía emitida por un electrón en su desplazamiento circular alrededor del núcleo atómico debía producir dos consecuencias inevitables: primero, que dicho átomo emitiera un espectro electromagnético continuo; y, segundo, que el electrón se aproximaría al núcleo describiendo una trayectoria en espiral hasta chocar finalmente con él. Si, por un lado, la observación confirmaba que los átomos eran estructuras estables, y, por el otro, la teoría clásica predecía que los modelos planetarios del átomo eran inestables, entonces los físicos se enfrentaban a un dilema. Se dieron cuenta que las herramientas conceptuales que tan bien habían funcionado en el mundo macroscópico —clásico— eran ya inservibles para explicar el mundo microscópico —cuántico—. ¿Cómo debían pues orientarse en ese nuevo mundo?

Enfrentado a este problema de reconciliar las discontinuidades —cuánticas— de los fenómenos microscópicos con la naturaleza continua —clásica— de nuestra experiencia ordinaria, Bohr razonó más o menos del siguiente modo:

- (i) Primera premisa: la teoría cuántica describía con extraordinaria precisión el comportamiento de los objetos microscópicos —por ejemplo, los electrones—.
- (ii) Segunda premisa: la teoría clásica era la que mejor funcionaba para describir las propiedades de los objetos macroscópicos —por ejemplo, las mesas o incluso los planetas—.
- (iii) Hipótesis o premisa auxiliar: era de suponer que las leyes de la física son universales.
- (iv) Si las tres proposiciones anteriores eran verdaderas, entonces cabía esperar que las leyes de la naturaleza no sufrirían interrupciones bruscas, ni generarían discontinuidades en su transición —previsiblemente, suave y gradual— del microcosmos al macrocosmos, y viceversa.

Así, Bohr procedió a extender el rango de los conceptos clásicos a la frontera del *límite clásico*<sup>13</sup> —una región de transición con leyes semiclásicas—, ahí donde empezaban a sentirse los fenómenos

<sup>13</sup> Se conoce como el *límite clásico* el punto en el cual la mecánica clásica deja de funcionar porque los fenómenos cuánticos y, en concreto la constante de Planck —el *quantum* de acción—, empiezan a tener efectos visibles.



cuánticos. Es más, postuló que las leyes de la física clásica eran tan sólo una aproximación —un caso límite— de las leyes cuánticas, que, ellas sí, se parecían más a las —verdaderas— leyes de la naturaleza, tanto para el microcosmos como para el macrocosmos. En otras palabras, la física clásica funcionaba en el nivel macro, pero no era válida —ni en la teoría ni en la práctica— para el nivel micro. En cambio, la física cuántica era válida tanto para el nivel micro como para el macro, solo que menos práctica que la teoría clásica en su aplicación a la macroescala. En principio, debía ser posible usar las leyes cuánticas para determinar la trayectoria de un proyectil terrestre o la órbita de un planeta, pero la tarea complicaría innecesariamente los cálculos. Lo práctico y aconsejable era pues aplicar la física clásica para las grandes escalas. La pregunta que surge de inmediato es: ¿qué tamaño consideramos suficientemente pequeño o grande para saber qué leyes —cuánticas o clásicas— debemos utilizar?

El *principio de correspondencia* que Bohr propuso en 1923 establecía lo siguiente: el comportamiento cuántico de un sistema puede reducirse a un comportamiento clásico cuando el número de *quants* —o sea, cuantos de energía— involucrados empieza a ser elevado. O, dicho de otra manera, cuando la constante de Planck —o *quantum* de mínima acción— puede despreciarse en comparación con la acción total ejecutada —o la energía total aplicada— en el proceso de medida asociado a un objeto de mayor tamaño. Para números cada vez más altos de cuantos de energía, la radiación emitida tiende asintóticamente hacia el cumplimiento de las predicciones de la física clásica. Por ejemplo, al estudiar procesos químicos que involucran cantidades cercanas a 1 mg, el científico puede despreciar los efectos que puedan provocar los *quants*, ya que, proporcionalmente, la constante de Planck es —a todos los efectos prácticos— igual a cero.

### 5. Un *quantum* con dos caras. La dualidad onda-corpúsculo.

En 1922, el físico estadounidense Arthur H. Compton<sup>14</sup> realizó y presentó públicamente un experimento, cuyos resultados se publicaron en 1923, que anunciaba el descubrimiento experimental de un nuevo fenómeno físico que posteriormente se llamó *efecto Compton* —o también *dispersión Compton*—. Parece ser que este fenómeno fue también descubierto, de forma independiente, por el físico holandés Peter Debye a principios de 1923. La importancia del efecto Compton fue que, para muchos físicos, significó aceptar la imagen corpuscular de la luz, es decir, los fotones. Sin embargo, aceptar la imagen corpuscular no implicaba desechar la imagen ondulatoria de la luz... ¡la perplejidad de los físicos estaba en máximos históricos!

En su experimento, Compton envió rayos X —que son ondas electromagnéticas de alta energía— hacia una colección de electrones, viendo como resultado la dispersión de los rayos X y un retroceso de la posición de los electrones<sup>15</sup>. Tuvo la gran perspicacia de interpretar correctamente lo sucedido. Sin entrar al detalle, indicaremos brevemente el razonamiento efectuado. Como es bien sabido, la energía  $E$  de una onda es directamente proporcional a su frecuencia —simbolizada con  $f$ — e inversamente proporcional a su longitud de onda —simbolizada con  $\lambda$ —. Interpretando ahora los rayos X como cuantos de energía y midiendo el ángulo de dispersión —es decir, el ángulo de salida con respecto al ángulo de entrada— de esos *quants* tras colisionar con los electrones, Compton pudo colegir que los *quants* se habían comportado como partículas reales —fotones— colisionando con otras partículas reales —electrones—. El retroceso de los electrones era causado por una transferencia de energía y de momento de los fotones incidentes hacia los electrones porque los fotones dispersados habían perdido energía y momento en igual cantidad. La imagen corpuscular revelada en el experimento de Compton reproducía en el microcosmos la familiar imagen macroscópica de unas canicas o bolas de billar chocando.

Como hemos señalado antes, Einstein empezó a sospechar en fecha tan temprana como 1905 que la naturaleza de la luz era dual, pero tan pronto como conoció los resultados obtenidos por Compton, su sospecha se convirtió en certeza. Le llamó fuertemente la atención que los fenómenos que podían explicarse recurriendo a la naturaleza corpuscular de la luz —fotones— no podían explicarse aplicando la teoría ondulatoria; y que los fenómenos que se dejaban tratar por la mecánica ondulatoria no podían ser explicados apelando a la teoría corpuscular de la luz. El *efecto Compton* le convenció

<sup>14</sup> Premio Nobel de Física en 1927.

<sup>15</sup> En realidad, Compton provocó la dispersión de rayos X sobre láminas metálicas, que a su vez emitían electrones, pero hemos simplificado la explicación en aras de facilitar la comprensión.

definitivamente de que los físicos estaban obligados a aceptar la naturaleza dual de la luz, por muy paradójica y contraintuitiva que fuera esta nueva cosmovisión, de modo que empezó a hacer campaña en favor de esta idea. El experimento de Compton y, sin duda también, el tremendo prestigio de Einstein empujaron a que los físicos más obstinados —con frecuencia, los más veteranos o, como veremos, aquellos con ideas de influencia positivista— comenzaran a atribuir una cierta realidad al cuanto de luz, aunque todavía a un nivel de realidad inferior al de su naturaleza ondulatoria. Otros físicos —con frecuencia, los más jóvenes o con ideas filosóficas más próximas al realismo científico— empezaron a tomarse muy en serio la disruptiva propuesta de Einstein: por muy paradójico que pudiera resultar, quizás las partículas de luz eran tan reales como las ondas luminosas.

Ante este nuevo estado de cosas, algunos profesores universitarios empezaron a decir, en tono de broma, que tendrían que enseñar la teoría ondulatoria de la luz los lunes, miércoles y viernes, y la teoría corpuscular los martes, jueves y sábados. Dejando de lado las bromas, lo cierto es que la confirmación teórico-experimental de la doble naturaleza ondulatoria-corpúscular de la totalidad del espectro electromagnético estimuló la imaginación y el desarrollo de nuevas teorías que acelerarían espectacularmente la consolidación de una nueva física: la mecánica cuántica. El primer avance teórico que tuvo una fuerte repercusión apareció un año después de la publicación de Compton, de la mano del físico teórico francés Louis De Broglie. No obstante, es justo advertir que tanto Louis como su hermano mayor Maurice de Broglie —que dirigía un laboratorio de rayos X en París y había sido uno de los dos secretarios científicos del primer congreso Solvay celebrado en Bruselas— se hicieron partidarios de la imagen dual ondulatoria-corpúscular propuesta por Einstein mucho antes de que Compton publicara sus resultados.

En 1924, el joven príncipe —posteriormente duque— Louis Victor de Broglie<sup>16</sup> leyó en París una tesis doctoral que contenía una serie de brillantes deducciones físico-matemáticas, con consecuencias revolucionarias, desarrolladas a partir de hipótesis físicas muy plausibles que pretendían hacer de puente —apoyándose en el *principio de correspondencia*— entre la mecánica y la electrodinámica del macrocosmos —heredadas de Isaac Newton y de James Maxwell— y una eventual nueva teoría aplicable al microcosmos —compatible con los descubrimientos cuánticos de Planck, Einstein, Bohr y Compton—. Una de las predicciones más sorprendentes del trabajo teórico presentado por Louis de Broglie —que sin duda se basó en lo aprendido durante muchos años como ayudante de su hermano Maurice— consistía en extender la dualidad onda-corpúsculo al mundo material, y no sólo a la luz. Es decir, postuló que, si las ondas lumínicas podían comportarse a veces como fotones, quizás también podrían las partículas materiales, tales como los electrones, comportarse a veces como ondas. A las ondas asociadas con partículas materiales —electrones, protones, neutrones, etc.— las llamó “ondas de materia” u “ondas materiales”. De Broglie relató en el prólogo de su tesis doctoral la motivación que le llevó a postular la existencia de ondas electrónicas<sup>17</sup>, la creencia en una especie de principio universal de uniformidad de la naturaleza:

Después de largas reflexiones en soledad y meditación, de repente tuve la idea, durante el año 1923, de que el descubrimiento hecho por Einstein en 1905 debía generalizarse extendiéndolo a todas las partículas materiales y en particular a los electrones. (De Broglie, 1924; también citado en Pais, 1988, p. 252)

La idea que tuvo de Broglie en 1923 consistió en asociar al electrón una “onda asociada ficticia” de frecuencia  $f$  y longitud de onda  $\lambda$ .<sup>18</sup> Al aplicar su hipótesis al modelo atómico de Bohr-Sommerfeld, descubrió que podía explicar la ubicación exacta de las órbitas electrónicas. En concreto, se dio cuenta que un electrón solo podía ocupar aquellas órbitas estacionarias cuyo perímetro fuera igual a un múltiplo entero de la longitud de onda de su “onda asociada ficticia”. De Broglie calculó que la longitud

<sup>16</sup> Premio Nobel de Física en 1929.

<sup>17</sup> El descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones derivó inmediatamente en una carrera por desarrollar el microscopio electrónico, cuya invención se logró concretar en 1931 y patentar en 1932. El microscopio electrónico era incomparablemente más potente que el tradicional microscopio óptico, que se basaba en la naturaleza ondulatoria de la luz y que había sido inventado tres siglos atrás. El secreto para lograr este gran salto tecnológico fue saber que la longitud de onda del electrón es, como mínimo, 100.000 veces menor que la de cualquier fotón. El primer microscopio electrónico comercial se fabricó en Inglaterra en 1935.

<sup>18</sup> Sabemos que, si una onda se propaga a una velocidad  $v$ , entonces  $\lambda=v/f$ .

de onda  $\lambda$  de una partícula material con masa  $m$  era inversamente proporcional a su velocidad  $v$ , lo cual expresó con la ecuación  $\lambda=h/p$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $p=mv$  es el momento de la partícula. Y basándose en la relación obtenida por Einstein para los cuantos de luz, postuló que la frecuencia  $f$  de una partícula material era proporcional a su energía  $E$ , es decir:  $f=E/h$ . En concreto, el trabajo proponía también concebir los electrones no sólo como partículas que orbitaban alrededor del núcleo atómico, sino como ondas estacionarias que rodeaban dicho núcleo. Una onda estacionaria es una onda que sufre cambios con el paso del tiempo, su ecuación del movimiento no depende de  $t$ , es un invariante temporal. Nótese que la propuesta de de Broglie afectaba a la representación visual del átomo, ya que convertía en un problema la idea de pensar las órbitas electrónicas como movimientos de partículas —los electrones— trazando trayectorias alrededor del núcleo. Si los experimentos futuros que debían confirmar o refutar su audaz propuesta mostraban que los electrones se comportaban como ondas estacionarias —invariantes con respecto a  $t$ —, entonces estaba fuera de lugar describir a los electrones como puntos microscópicos en movimiento recorriendo una cierta distancia espacial  $d$  —que rodea al núcleo— en un determinado tiempo  $t$ . Aunque la confirmación empírica definitiva en favor de la dualidad onda-corpúsculo de los electrones no llegaría hasta 1927, ya existían a mediados de 1925 datos empíricos provisionales concluyentes que apoyaban esta hipótesis. Los físicos experimentales George P. Thomson<sup>19</sup> —en el Reino Unido— y Clinton Davisson<sup>20</sup> y Lester Germer —en los EEUU— demostraron empíricamente en 1927 que los haces de electrones lanzados hacia sólidos cristalinos mostraban patrones de difracción. Experimentos posteriores, utilizando montajes similares al de la doble rendija de Young, lograron mostrar patrones de interferencia con electrones. Desde entonces, se han observado patrones de difracción e interferencia para moléculas cada vez más grandes, algunas de las cuales son lo suficientemente grandes<sup>21</sup> como para ser observadas con un microscopio electrónico.

Fue una sorpresa general comprobar que los electrones poseían propiedades ondulatorias, “algo que parece que el propio Einstein nunca había imaginado” (Sánchez Ron, 2001, p. 404). Una cosa era admitir que la luz —que siempre fue considerada escurridiza e imponderable— presentara un doble aspecto, y otra muy distinta, sin duda un bocado más difícil de digerir, era asimilar que algo tan presente, tangible, masivo y aparentemente compacto como la materia pudiera comportarse como una onda. Para muchos físicos, hablar de “ondas de materia” equivalía a expresar un oxímoron. Sin embargo, los resultados de de Broglie se difundieron rápidamente porque un miembro del tribunal de la tesis doctoral, el físico francés Paul Langevin, hizo llegar una copia del trabajo a Einstein. Y este, no sólo le dio su beneplácito de inmediato, como demuestra la carta que envió a Hendrik Lorentz el 16 de diciembre de 1924, donde describía dicha contribución como “el primer tenue rayo de luz sobre el peor enigma de nuestra física” (citado en País, 1994, p. 48), sino que se apresuró a publicar unos artículos —aparecidos en 1925— en los que citaba y elogiaba el trabajo y los resultados obtenidos por el físico francés. Einstein era a la sazón una eminencia mundial, su prestigio como físico hacía las veces de una caja de resonancia, algo así como el noticiero en *prime time* de la TV actual: si el eminente físico alemán respaldaba una idea o un autor, cualquier anécdota se convertía en noticia y sus juicios —a favor o en contra de algo— ejercían un notable efecto amplificador. Así fue como Erwin Schrödinger tuvo noticia de la posible existencia de ondas materiales —alias *hipótesis de Broglie* por aquel entonces— y las tomó como punto de partida de sus investigaciones cuánticas.

Con Compton y de Broglie —y, en parte, quizás también un poco Schrödinger— finalizó el periodo cuántico conocido como *Teoría cuántica antigua*, comprendido entre 1900 y 1924. Este periodo se caracterizó por su estilo más heurístico, por un avance más lento en los descubrimientos, por su cercanía a los experimentos, por ser más fiel a la visualización y estar más apegado a los viejos conceptos de la física, mientras que el nuevo periodo, comprendido entre 1925 y 1932, se caracterizará por las matemáticas, las abstracciones, los símbolos, el rechazo a las imágenes y todo lo que suene a metafísico. Si hemos escogido hablar de Schrödinger y no de Heisenberg en la siguiente sección, es precisamente porque este gran pensador austriaco representó, mejor que nadie, *ese físico*

<sup>19</sup> Premio Nobel de Física en 1937, compartido con el físico estadounidense Clinton Davisson.

<sup>20</sup> Premio Nobel de Física en 1937, compartido con el físico inglés George P. Thomson.

<sup>21</sup> Por ejemplo, Arndt *et al.* (1999) lograron demostrar la dualidad onda-corpúsculo para la famosa molécula de fullereno  $C_{60}$  —que contiene 60 átomos de carbono y cuya forma recuerda a un balón de fútbol— y, más recientemente, Fein *et al.* (2019) lo han logrado con una macromolécula que supera los 2.000 átomos.

que unos pueden ver como *el último de la especie* del primer periodo y otros como *el pionero* del nuevo periodo. Como explicaremos en breves instantes, su mecánica ondulatoria y —en parte— su ecuación de ondas —*ecuación de Schrödinger*— pertenecen claramente al primer periodo porque son causales, deterministas y visualizables. En cambio, la *función de onda* —también introducida por Schrödinger— pertenece al nuevo periodo porque es una noción —podríamos decir— genuinamente mecano-cuántica que está a punto de cumplir un siglo de vida con su carismática *imagen de marca*:  $\Psi(x, t)$ . Además, dicho sea de paso, el físico austriaco introdujo un protagonista inesperado cuyo protagonismo ha ido *in crescendo*: el gato —vivo y muerto— de Schrödinger (1935).

## 6. La armoniosa música del cosmos. La mecánica (cuántica) ondulatoria.

Desde su despacho en la Universidad de Zurich, el polifacético físico vienés Erwin Schrödinger<sup>22</sup> se propuso responder al reto lanzado por el neerlandés Peter Debye, quien, al tener conocimiento de las ondas materiales, planteó la siguiente pregunta: si los electrones son ondas, entonces... ¿dónde está la ecuación de ondas? Schrödinger (1926a; 1926b; 1928) logró derivar una ecuación de onda que capturaba la esencia de la teoría de de Broglie, dándole además un aspecto más formal. Publicó su hallazgo en 1926. Su trabajo fue extraordinariamente bien recibido por la comunidad de físicos, y muy en particular por Einstein, porque su ecuación de onda era determinista, se basaba en gran medida en la física clásica y parecía restituir el principio de continuidad y el viejo adagio de *natura non facit saltus*. El nuevo formalismo que introdujo Schrödinger se llamó *mecánica ondulatoria* y estaba acompañado de un nuevo concepto llamado *función de onda*, denotado con el símbolo  $\psi(x, t)$ , una función matemática que describía la evolución espacio-temporal de un conjunto de ondas con ciertos niveles de energía que determinaban sus órbitas atómicas. El ingenioso modelo atómico de Schrödinger consistía en explicar la transición —o “salto”— de un electrón desde un estado orbital estacionario hasta otro mediante una función de onda cuya evolución en el espacio-tiempo mostraría la ocurrencia de superposiciones constructivas y destructivas. Así, las superposiciones ondulatorias constructivas representarían regiones espacio-temporales permitidas para el electrón, es decir, estados orbitales con una determinada energía, que sería la suma neta de la amplitud de todas las ondas superpuestas. En cambio, las superposiciones ondulatorias destructivas representarían regiones espacio-temporales no permitidas para el electrón, lo cual explicaría los aparentes saltos de los electrones de unos niveles orbitales a otros.

Siguiendo este modelo atómico ondulatorio, Schrödinger calculó que el tiempo de transición entre dos órbitas era muy pequeño —del orden de  $10^{-9}$  segundos—, pero no cero como estipulaba el modelo de Bohr. La aparición de la ecuación de Schrödinger asociaba al átomo una imagen realista, donde los electrones eran concebidos como compactos paquetes de ondas moviéndose y superponiéndose —constructiva y destructivamente— alrededor del núcleo. En otras palabras, en la cosmovisión de Schrödinger, el mundo en su conjunto era *un ir y venir* de ondas lumínicas y materiales, ondas reales de diversos tamaños y en movimiento perpetuo, cuya interacción en el espacio y en el tiempo podían generar concentraciones de superposiciones constructivas —aparición de fotones y/o electrones— y superposiciones destructivas —el vacío—. En este mar de ondas, en ocasiones podían darse altas concentraciones ondulatorias de crestas o de valles —con ligeros desfases entre sí— localizadas en regiones muy pequeñas del microcosmos, de tal manera que a escala humana nos parecerían erróneamente partículas puntuales. Muy al contrario, el modelo del físico austriaco representaba a estas aparentes partículas —por ejemplo, los electrones— como *paquetes de ondas*, es decir, “una superposición de funciones propias elegidas de cierta manera que en un instante dado parece una mancha localizada en una más o menos pequeña región” (Pais, 1991, p. 285). En su trabajo, Schrödinger había logrado mostrar que la evolución temporal de un paquete de ondas en un oscilador armónico —por ejemplo, del movimiento en rotación de un electrón alrededor del núcleo— era estable y permanecía compacto, es decir, no se disgregaba o expandía en el espacio, no se diluía sobre una mayor región con el paso del tiempo. Esta condición de no disgregación o no dilución era necesaria para explicar la estabilidad y la compacidad —empíricamente observada— tanto del electrón como del átomo en su conjunto.

La mecánica ondulatoria fue muy bien recibida por la comunidad de físicos porque reintroducía los elementos visuales tradicionales heredados de la física clásica en el escenario cuántico. Sin embargo, el

---

<sup>22</sup> Premio Nobel de Física en 1933.



modelo ondulatorio tuvo una teoría rival, desarrollada en la Universidad de Gotinga, que se llamó mecánica cuántica matricial. En realidad, la mecánica matricial fue anterior a la mecánica ondulatoria. Hemos introducido primero la mecánica ondulatoria porque la teoría de Schrödinger era la derivación natural de las ideas propuestas por de Broglie.

### 7. Terremoto Gotinga. La mecánica (cuántica) de matrices.

Gotinga fue sin duda uno de los lugares centrales en el exitoso desarrollo de la física cuántica. En su prestigiosa universidad se estableció por primera vez la mecánica cuántica —matricial— gracias al trabajo conjunto de Max Born y sus dos ayudantes —anteriormente alumnos— Werner Heisenberg y Pascual Jordan. La Universidad de Gotinga tenía una sólida reputación y una larga tradición en los estudios de matemáticas. Carl F. Gauss, probablemente el mejor matemático del siglo XIX —conocido como el “príncipe de los matemáticos”—, enseñó e investigó allí entre 1807 y 1855. Y entre sus sucesores y discípulos, que también trabajaron en Gotinga, destacan Johann P. G. Lejeune Dirichlet, Bernhard G. F. Riemann, Rudolf F. A. Clebsch, Hermann A. Schwarz y Heinrich Weber. A estos grandes matemáticos les siguieron otros también del más alto nivel durante el cambio de siglo, Hermann Minkowski, Felix Klein y David Hilbert, que dieron un renovado impulso tanto a las matemáticas puras como a las matemáticas aplicadas, sobre todo, a la física. Así, durante las primeras dos décadas del siglo XX, se unieron a ellos Carl Runge, Emmy Noether, Ludwig Prandtl, Max Born, Walther Nernst<sup>23</sup>, Peter Debye<sup>24</sup> y James Franck<sup>25</sup>. Fueron los cuatro últimos quienes orientaron las matemáticas aplicadas a la física atómica y molecular. En concreto, Born se interesó en la física atómica en 1909, tras asistir a una conferencia de Einstein, estudiando tanto los modelos de Thomson y Rutherford como los de Bohr y Sommerfeld.

En mayo de 1925, Werner Heisenberg estaba trabajando en el problema de calcular las líneas espectrales del hidrógeno, tratando de describir los sistemas atómicos solo mediante observables, cuando formuló una teoría matemática, basada en matrices, que predecía correctamente la energía de las órbitas del modelo atómico de Sommerfeld. Sin embargo, dicha teoría carecía de interpretación visual ya que prescindía de cualquier descripción de los electrones moviéndose en órbitas —ni circulares, ni elípticas, ni de cualquier otra figura—. En su artículo, Heisenberg renunció a cualquier representación pictórica de las partículas, dejando que las matrices hicieran su trabajo operando con las entidades  $X$  y  $P$  para derivar los observables cuánticos. Basándose en el *principio de correspondencia* mencionado antes, el joven físico asoció las matrices  $X$  y  $P$  a las cantidades clásicas de posición  $x$  y de momento  $p$  —masa por velocidad—. La conexión entre el mundo a escala atómica y el mundo a escala humana venía dada por la correspondencia entre los operadores ( $X, P$ ) y las variables  $(x, p)$ , es decir, entre su modelo teórico —pura sintaxis— y las observaciones experimentales —vínculo semántico con lo empírico—.

Una propiedad importante del álgebra de matrices es que, a diferencia de los números ordinarios, no es conmutativa en el caso general. Es decir, si  $A$  y  $B$  son dos matrices, el producto  $AB$  por lo general no es igual al producto  $BA$ . Heisenberg había descubierto que, si bien la propiedad conmutativa  $pq - qp = 0$  se cumplía siempre en la mecánica clásica, el caso más general en la MC matricial era la no-conmutatividad:  $PQ - QP \neq 0$ . Esta propiedad algebraica de las matrices resultó tener un significado físico de vital importancia para entender los fenómenos cuánticos, ya que —como descubriría dos años después Heisenberg— la no-conmutatividad de las matrices estaba estrechamente relacionada con aquellas cantidades de la mecánica cuántica que no se pueden medir simultáneamente. Puesto que  $pq$  significaba “medir  $p$  y luego medir  $q$ ” y que  $qp$  significaba “medir  $q$  y luego medir  $p$ ”, entonces la fórmula  $PQ - QP \neq 0$  arrojada<sup>26</sup> por la MC matricial implicaba que el orden en se realizaban las medidas era determinante: sean  $p_i$  y  $q_i$  dos propiedades observables de una partícula subatómica cualquiera, el estado final de dicha partícula si medimos primero  $p_i$  y luego  $q_i$  será diferente a su estado final si medimos primero  $q_i$  y luego  $p_i$ . Antes de entregar el borrador del artículo a su jefe, Max Born,

<sup>23</sup> Premio Nobel de Química en 1920.

<sup>24</sup> Premio Nobel de Química en 1936.

<sup>25</sup> Premio Nobel de Física en 1925.

<sup>26</sup> Max Born derivó posteriormente la relación exacta,  $PQ - QP = \frac{i\hbar}{2\pi} \mathbb{I}$ , donde  $\mathbb{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  es la matriz identidad. Esta relación no-conmutativa entre  $P$  y  $Q$  fue la antesala del *principio de indeterminación* de Heisenberg.



Heisenberg comentó lo siguiente a Wolfgang Pauli: “Todo sigue siendo vago y poco claro para mí, pero parece que los electrones ya no se moverán en órbitas”.

Max Born se dio cuenta que la formulación de Heisenberg podía extenderse aún más al lenguaje del álgebra de matrices y, con la ayuda de Pascual Jordan, comenzaron de inmediato la transcripción y ampliación del formalismo al caso más general posible. Los tres juntos publicaron meses después los resultados (Born, Heisenberg & Jordan, 1926) en un artículo que terminó de completar la mecánica cuántica matricial. Mostraron que todo el aparato matemático de la mecánica clásica, convenientemente reinterpretado, podía incorporarse a la nueva MC. Demostraron que algunos conceptos clásicos —tales como la energía o el momento— podían mantener su vigencia y utilidad en la escala subatómica. Su estrategia tuvo sus frutos ya que logró construir una MC matricial basada en propiedades físicas medibles experimentalmente —por ejemplo, las líneas espectrales de los átomos— en vez de propiedades no observables tales como las órbitas electrónicas. Al no ofrecer una imagen mental del átomo, en realidad la MC matricial de Heisenberg parecía abocaba a los físicos a navegar sin rumbo.

## 8. Dios juega a los dados. La interpretación estadística de la mecánica cuántica.

La gran idea de Max Born<sup>27</sup>, presentada en 1926 en dos artículos —en junio y julio—, fue recuperar la mecánica ondulatoria de Schrödinger, pero en vez de interpretar las ondas como entidades materiales distribuidas en el espacio-tiempo, las interpretó como distribuciones de probabilidades. Primero, renunció a la noción de una trayectoria asociada al movimiento de una partícula y, en consecuencia, también a adscribirle una posición y un momento. Y, segundo, propuso interpretar el módulo al cuadrado de la función de onda  $\psi(x, t)$  como la probabilidad de hallar la partícula en algún punto localizado del espacio-tiempo. Matemáticamente, lo expresó del modo siguiente: si  $|\psi(x, t)|$  representaba el módulo de la función de onda, entonces  $|\psi(x, t)|^2$  era su densidad de probabilidad —es decir, la probabilidad de hallar la partícula en una posición específica  $x$  del espacio en un instante de tiempo ( $t$ ) dado—.

Para conocer la probabilidad de encontrar la partícula en una región del espacio —por ejemplo, el volumen de un cubo— en un instante concreto, habría que hacer una triple integral para los tres ejes del espacio abarcando  $(x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0)$ . Si nos limitamos al caso unidimensional —una recta— para no complicar la explicación, la probabilidad de encontrar la partícula dentro del segmento  $x_1 - x_0$  correspondiente al eje  $x$  sería simplemente calcular<sup>28</sup> la siguiente integral:

$$\int_{x_0}^{x_1} |\psi(x, t)|^2 dx$$

Esta interpretación estadística implicaba una profunda alteración en la forma en que se describía el estado de un sistema físico. Mientras la mecánica clásica describía el estado de un conjunto de canicas estipulando las posiciones y los momentos de todas las canicas, la mecánica cuántica sólo podía recurrir a la probabilidad de detectar las partículas en una determinada región del espacio, usando la función de onda  $\psi(x, y, z)$  en vez de las posiciones  $(x, y, z)$  y los momentos  $(p_x, p_y, p_z)$  de las partículas. Además, al añadir a la mecánica ondulatoria la interpretación probabilista, Born firmaba la sentencia de muerte de la causalidad y el determinismo:

Uno no obtiene una respuesta a la pregunta “¿cuál es el estado después de la colisión?”, sólo se obtiene una respuesta a la pregunta “¿qué probabilidad hay de obtener un resultado específico después de la colisión?”. [...] Aquí surge todo el problema del determinismo. Desde el punto de vista de nuestra mecánica cuántica no existe una cantidad que, para casos individuales cualesquiera, fije causalmente el resultado de la colisión [...]. Yo mismo tiendo a renunciar al determinismo en el mundo atómico. (Born, 1926a, p. 866)

Sin embargo, en su primer artículo, Born (1926a) parecía no tener muy clara la distinción entre la nueva probabilidad —de la mecánica cuántica— y la antigua probabilidad —de la mecánica estadística

<sup>27</sup> Premio Nobel de Física de 1954.

<sup>28</sup> Puesto que  $\psi(x, t)$  es en general una función compleja —con una parte real y otra imaginaria—, entonces  $|\psi(x, t)|^2$  es igual a multiplicar  $\psi$  por su conjugado complejo  $\psi^*$ , es decir,  $|\psi(x, t)|^2 = \psi(x, t)\psi^*(x, t)$ .

clásica—. Pero, en el segundo, Born (1926b) despejó las dudas al introducir la novedosa noción de *probabilidad de obtener un estado* concreto en lugar de vincularla con la *probabilidad de transición* correspondiente al *salto cuántico* de un electrón entre niveles orbitales de un átomo. Para lograrlo, introdujo el caso de un sistema físico discreto no degenerado, definiendo la función de onda como  $\psi = \sum_{i=1}^N c_n \psi_n$ , donde  $\psi_n$  es uno de los autoestados posibles y  $c_n$  es un coeficiente tal que  $|c_n|^2$  es la probabilidad de que el sistema esté en el estado  $n$  al realizar una medida. Puesto que la propagación de las ondas materiales —según la ecuación de Schrödinger— era determinista, introdujo la nueva probabilidad y sintetizó la nueva imagen cuántica del microcosmos diciendo que: “El movimiento de las partículas sigue las leyes de probabilidad, pero la probabilidad misma se propaga según la ley de causalidad” (Born, 1926b, p. 804). Así hacía compatibles la ocurrencia acausal e indeterminista de los saltos cuánticos —probabilidades de transición— con la dinámica causal y determinista de la imagen ondulatoria de Schrödinger. La inmediata conclusión fue que, para describir los fenómenos subatómicos, la mecánica cuántica debía incluir dos leyes dinámicas aparentemente opuestas entre sí. El matemático inglés Paul A. M. Dirac<sup>29</sup> (1930) y el matemático húngaro John von Neumann (1932), completarían este puzle.

La antigua probabilidad de la mecánica clásica tenía que ver con nuestra ignorancia o carencia de información derivada de la imprecisión de nuestros instrumentos científicos, mientras que la nueva probabilidad de la mecánica cuántica estaba asociada a procesos aleatorios inherentes a la propia naturaleza del microcosmos. En el primer caso, la limitación es tecnológica, las imprecisiones provocan incertidumbre en el científico. En el segundo caso, la limitación es la propia naturaleza, cuyo comportamiento indeterminado parecía violar la ley de causalidad. Años más tarde, Bohr (1952) lo explicó de la siguiente manera: “No se trata aquí de una limitación práctica en la precisión de las mediciones, sino de un aspecto de las leyes de la naturaleza, asociado con el cuanto de acción, que establece un límite inferior para la interacción entre los objetos y los instrumentos de medición”.

La respuesta que Einstein —tenaz defensor del realismo filosófico— envió por carta a su buen amigo Born el 4 de diciembre de 1926 fue fulminante:

La mecánica cuántica es ciertamente imponente. Pero una voz interior me dice que todavía no es la última palabra. La teoría nos dice mucho, pero apenas nos acerca al secreto del Viejo. De todas maneras, yo estoy convencido de que Él no juega a los dados. (Einstein & Born, 1971, p. 91)

Transcurridos casi 20 años, la posición de ambos no cambió un ápice a tenor de otra carta que Einstein envió a Born el 7 de septiembre de 1944:

Nos hemos vuelto antípodas en nuestras perspectivas científicas. Tú crees en el Dios que juega a los dados, y yo creo en el orden total y en las leyes de un mundo que existe objetivamente y que trato de captar en una forma locamente especulativa. (Einstein & Born, 1971, p. 149)

La nueva interpretación probabilista parecía implicar el abandono del ideal clásico que imaginaba unas partículas inmersas en una malla espacio-temporal. La nueva visión del microcosmos permitía interpretar *pragmáticamente* las funciones de onda como probabilidades de detectar una partícula en una región espacio-temporal concreta a condición de aceptar la *falsedad metafísica* de dicha imagen.

### 9. La síntesis de Copenhague. De la indeterminación a la complementariedad.

Bohr disponía de fondos para invitar a brillantes jóvenes investigadores a pasar breves estancias en Copenhague. Le encantaba aplicar el método dialéctico mediante largas conversaciones que podían prolongarse hasta altas horas de la noche, exprimiendo a sus invitados al máximo. Heisenberg (1972, p. 96) cuenta que “Bohr venía con frecuencia a mi cuarto ya muy entrada la noche, y discutíamos todos los experimentos mentalmente posibles para ver si en realidad habíamos entendido de manera completa la teoría”. Y ha comparado su estilo con “los métodos de la filosofía hegeliana” (Heisenberg, 1974, p. 23), probablemente porque dichos métodos se apoyaban en el esquema tesis-antítesis-síntesis, es decir, dos argumentos opuestos que pueden reconciliarse en un nivel superior.

En el otoño de 1926, Bohr y Heisenberg comenzaron sus famosas discusiones en Copenhague con el fin de encontrar una interpretación física de la mecánica cuántica. Por esas fechas, Heisenberg ya

<sup>29</sup> Premio Nobel de Física en 1933.

otorgaba una cierta realidad física a los fotones, pero en una escala inferior al grado de realidad física que concedía a los “objetos del mundo cotidiano” —por ejemplo, los electrones—. Alegaba al respecto que era evidente que los objetos materiales del mundo cotidiano no mostraban comportamientos ondulatorios tales como la difracción y las interferencias. Claramente, no aceptaba todavía la teoría de la dualidad onda-corpúsculo propuesta por de Broglie en 1924.

Por esas mismas fechas —finales de 1926— Bohr ya había aceptado la dualidad onda-corpúsculo como una realidad física incontestable, tanto para la luz —fotones— como para la materia —electrones y protones—. Al tener ya interiorizada esta dualidad como una realidad fenoménica de carácter inevitable, Bohr empezó a manejar con solvencia experimentos mentales basados en imágenes. Comparó las dificultades en visualizar los fenómenos de la escala subatómica a los dilemas que enfrentaron los físicos con la teoría de la relatividad especial, al tratar con velocidades —altísimas— cercanas a la velocidad de la luz. Los resultados de la teoría desarrollada por Einstein en 1905 condujeron a una interpretación aparentemente sin sentido, como por ejemplo el carácter relativo de la simultaneidad. Es conocida la polémica iniciada por Henri Bergson (1923) contra la relatividad de la simultaneidad de Einstein (Canales, 2020). Bohr comprendió que, en ambos casos, la física se enfrentaba a fenómenos del mundo muy alejados de la escala de las percepciones humanas —de un lado, la enorme velocidad de la luz, y del otro, tamaños del orden del nanómetro, es decir,  $10^{-9}$  metros—, de modo que la pequeñísima escala del *quantum* ponía de relieve las restricciones que nuestro lenguaje ha de imponer a las imágenes.

En cambio, Heisenberg insistió en su idea de colocar el aspecto corpuscular de la materia —para el cual había un “esquema matemático consistente”— en un nivel de realidad superior al carácter ondulatorio de la luz. Sólo después de conocer la demostración de Dirac<sup>30</sup> de cómo transformar la imagen ondulatoria de Schrödinger en la imagen matricial de Heisenberg, y viceversa, el físico alemán comenzó a entender cómo “se relacionaban las cosas” y empezó a pensar en los experimentos mentales utilizando modelos matemáticos. Sin embargo, dijo que “ya no sabemos lo que significan las palabras ‘onda’ y ‘partícula’” y admitió que, a finales de 1926, tanto Bohr como él estaban sumidos en un “estado de completa desesperación”. Bohr, que ya estaba totalmente convencido de que la dualidad onda-corpúsculo era una propiedad universal que se manifestaba tanto en la luz como en la materia, atacó con vehemencia las conclusiones de Heisenberg. El físico danés colocó ambas representaciones visuales —ondulatoria y corpuscular— en pie de total igualdad.

A principios de 1927, Heisenberg<sup>31</sup> (1927) hizo un hallazgo que marcaría un antes y un después en la historia de la MC, descubrió una propiedad fundamental a la que llamó inicialmente *Ungenauigkeit* —cuya traducción literal es “inexactitud” o “imprecisión”— y que hoy en día conocemos como *principio de indeterminación* —mal llamado a veces *principio de incertidumbre*—. Heisenberg derivó primero la indeterminación en la medición de la posición y del momento (1927, p. 175), y extrapoló este resultado para obtener después la indeterminación en la medición de la energía y del tiempo (1927, p. 179):

$$\Delta p \cdot \Delta q \sim h \qquad \Delta E \cdot \Delta t \sim h$$

donde  $\Delta p$ ,  $\Delta q$ ,  $\Delta E$  y  $\Delta t$  representaban el error promedio al medir la posición  $p$ , el momento  $q$ , la energía  $E$  y el intervalo de tiempo  $t$ , respectivamente. Tomando por ejemplo el caso  $\Delta p \cdot \Delta q$ , su significado era el siguiente: cuando el tamaño del sistema objeto de estudio se acerca a las dimensiones de  $h$ , obtenemos que cualquier aumento en la precisión de la medición que determina la posición de una partícula provoca un aumento en la imprecisión de la medición que determina su momento, y viceversa.

Como decíamos, Heisenberg (1927) utilizó inicialmente y casi exclusivamente la expresión alemana *Ungenauigkeit* en su artículo<sup>32</sup>. Sin embargo, en un apéndice añadido posteriormente, utilizó una vez la expresión *Unsicherheit* —cuya traducción es “incertidumbre”—, probablemente empujado por Bohr, ya que el danés usó la traducción al inglés de esta expresión —*Uncertainty*— seis meses más tarde al exponer por primera vez su concepto de complementariedad. Pero es a partir de 1929 cuando

<sup>30</sup> Premio Nobel de Física en 1933.

<sup>31</sup> Premio Nobel de Física en 1932.

<sup>32</sup> Ver Harris (1997), Cassidy (1998), Lévy-Leblond & Balibar (1998) y Battimelli (1998).

Heisenberg empieza a usar de manera regular y consistente la expresión *Unbestimmtheit* —cuya traducción es “indeterminación”—.

Las relaciones de indeterminación derivadas por Heisenberg fueron rápidamente consideradas como la piedra angular de la MC. Y es importante señalar que no se referían a una limitación tecnológica o a la imprecisión de los instrumentos de medición, sino a un límite inherente a la naturaleza en la escala del microcosmos. Consciente de las implicaciones sobre el principio de causalidad, Heisenberg (1927, p. 197) escribió lo siguiente: “Si todos los experimentos están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica y, por tanto, a la ecuación  $\Delta p \cdot \Delta q \sim h$ , entonces la invalidez de la ley causal está definitivamente establecida por la mecánica cuántica”. Sin embargo, a pesar del hallazgo, Heisenberg siguió empeñado en la imagen corpuscular de la materia al tiempo que aceptaba la dualidad onda-corpúsculo para la luz. En otras palabras, interpretó su mecánica de matrices como una teoría de carácter corpuscular, pero cuyos corpúsculos desafiaban la visualización.

Unos pocos meses después del hallazgo de Heisenberg, el estadounidense Earle H. Kennard (1927, p. 339), que había disfrutado de un año sabático —1926— en la Universidad de Gotinga, reformuló las relaciones de indeterminación hasta darles un aspecto más cercano a lo que conocemos hoy:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \hbar/2 \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Posteriormente, Robertson (1929) dedujo una forma más general para cualesquiera cantidades que no conmutan<sup>33</sup>. Este principio, en su versión más general, establecía que es imposible medir simultáneamente y con precisión ciertos pares de propiedades físicas —llamadas *variables complementarias*— de las partículas elementales. Cuanto más precisa sea la medida de una variable, menor será la precisión en la otra.

El descubrimiento de Heisenberg ejerció un impacto inmediato en Bohr, quien generalizó su significado y amplió su alcance filosófico. El físico danés recalcó que la observación de un comportamiento ondulatorio o corpuscular era totalmente dependiente del montaje experimental, es decir, del tipo de dispositivo usado para realizar las mediciones. Según Bohr, era imposible separar el objeto medido del instrumento de medida: existen unos dispositivos que revelan la naturaleza ondulatoria del *quantum* y otros dispositivos que revelan su naturaleza corpuscular, pero no existe un dispositivo que revele ambas naturalezas simultáneamente. Se refirió a ellos como montajes experimentales complementarios y, por consiguiente, se refirió a las ondas y a las partículas como imágenes complementarias. Bohr presentó su *principio de complementariedad* en septiembre de 1927. Explicó a los asistentes que los objetos cuánticos mostraban su imagen ondulatoria o su imagen corpuscular en función de las circunstancias. Y las circunstancias, a su vez, sólo podían cambiar en función del tipo de aparato experimental utilizado para realizar las mediciones. El objeto cuántico podía revelar cualquiera de sus dos caras —según el tipo de aparato utilizado—, pero jamás mostraba ambas caras a la vez.

El físico y filósofo neoboehriano francés Bernard d’Espagnat (1983, pp. 72-73) ha señalado que el principio de complementariedad de Bohr se reduciría a la idea kantiana según la cual existe “una subordinación de la noción de distancia a la noción de facultades *humanas*: la distancia *no está* de forma intrínseca entre este y aquel elemento de la realidad independiente [...] [sino que] somos nosotros quienes la ponemos [como] una *imagen* de la realidad que construimos para nuestros intercambios y nuestros usos”. Por el contrario, el físico alemán Carl F. von Weizsäcker pensaba que el principio de complementariedad no podría aceptar entonces los preceptos kantianos tal y como fueron originalmente expuestos por Kant —aceptar el espacio, el tiempo y la causalidad como intuiciones y categorías *a priori*—. Heisenberg cuenta que, en el transcurso de una visita que le hizo la joven filósofa Grete Hermann para despejar sus dudas sobre las consecuencias epistemológicas de la mecánica cuántica sobre la filosofía kantiana, von Weizsäcker le contestó:

[Von Weizsäcker:] Kant tiene toda la razón en el siguiente sentido: los experimentos que hace el físico, por principio tienen que describirse siempre en el lenguaje de la física clásica porque de lo contrario no

<sup>33</sup> Un ejemplo bien conocido de otras cantidades asociadas a propiedades subatómicas y que no conmutan se produce al medir el espín  $S$  del electrón en función de los ejes de coordenadas espaciales  $(x, y, z)$  de un sistema de referencia tridimensional ortonormal:  $S_x S_y - S_y S_x = i\hbar S_z$

sería posible comunicar a los demás físicos qué es lo que se ha medido. [...] El *a priori* kantiano, por tanto, no está derogado en la nueva física, pero sí, en cierto modo, relativizado. (Citado en Heisenberg, 1972, p. 152)

Según von Weizsäcker, cuando Bohr proponía que la traducción que hacemos al interpretar los fenómenos cuánticos pasándolos a imágenes comprensibles en el marco de la física clásica se debe a “nuestras formas de intuición” (Bohr, 1988, p. 147), parecía referirse al argumento kantiano (Kant, 1781/2016) exclusivamente vinculado a experimentos particulares, es decir, con las intuiciones de espacio y tiempo y la categoría de causalidad relativizados a los montajes experimentales con el propósito de comunicar a otros las observaciones realizadas, atribuyendo “una importancia relativa a lo apriorístico” (Heisenberg, 1974, p. 23). La interpretación de Bohr apoyaba la imagen filosófica de “una realidad intrínseca cuya existencia no se pone en duda, pero que se manifiesta efectivamente de otro modo; de la misma manera que un hombre condenado a llevar gafas azules vería perpetuamente imágenes monocolors, aunque el mundo sea multicolor” (d’Espagnat, 1983, pp. 35-36). El historiador Gerard Holton (1982, pp. 161-162) ha sugerido, además, una posible influencia de Ernst Mach sobre Bohr a través de Harald Høffding por su tenaz insistencia en buscar y defender la unidad de las ciencias por medio del principio de complementariedad.

Muchos años después, el físico John S. Bell se refirió a la complementariedad al presentar los objetos cuánticos como cosas de imposible representación unitaria, en la medida en que se les atribuyen propiedades contradictorias:

Hay muy poco que yo pueda decir sobre la “complementariedad”. Pero deseo decir una cosa. Me parece que Bohr usó esta palabra al revés de su significado usual. Considere, por ejemplo, el elefante. Visto de frente tiene cabeza, tronco y dos piernas. Por detrás se ve el trasero, la cola y dos piernas. Desde los lados se ve diferente, y desde arriba y desde abajo es también diferente. Estos diversos puntos de vista son complementarios en el sentido habitual de la palabra. Se complementan entre sí, son consistentes entre sí y todos están relacionados con el concepto unificador de elefante. Tengo la impresión de que suponer que Bohr usó la palabra “complementario” de esta manera ordinaria habría sido considerado por él como un error y una trivialización de su pensamiento. Parece insistir más bien en que debemos usar en nuestro análisis elementos que se contradigan entre sí, que no sumen ni se deriven de un todo. Por “complementariedad” entendía, me parece, lo contrario: lo contradictorio. (Bell, 1992, pp. 1209-1210)

Ya hemos visto que Heisenberg sabía que el principio de indeterminación implicaba el abandono del principio de causalidad, de modo que también era consciente que los fenómenos cuánticos eran incompatibles con la existencia de un marco espacio-temporal presente en un plano objetivo de la realidad, de modo que concibió el espacio-tiempo como una estructura dentro del plano subjetivo de la consciencia, y se negó a desarrollar especulaciones de tipo metafísico (d’Espagnat, 1983, p. 39). Basta recordar su afirmación de que la “descripción de fenómenos atómicos en el espacio-tiempo es complementaria a su descripción determinista” (Heisenberg, 1971, p. 43). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de Bohr, Heisenberg se resistió inicialmente a aceptar la noción de complementariedad y a ver en ella una generalización de sus relaciones de indeterminación. Ante la insistencia del inagotable danés, aceptó a regañadientes, pero en su fuero interno siguió desconfiando de las metáforas formuladas por Bohr. Tardó en aceptarla e interiorizarla. Pero hasta entonces, Heisenberg prefirió seguir los preceptos anti-metafísicos de Mach, declarando que: “tal vez por aquel entonces me sentía yo más dispuesto que Bohr a liberarme de las imágenes objetivas para dar el salto hacia la abstracción matemática” (Heisenberg, 1974, p. 50). Heisenberg pensaba que la física teórica era una creación esencialmente humana, un instrumento que permitía explicar y predecir los resultados experimentales. Por eso, su único afán era lograr describir con un modelo matemático adecuado los fenómenos cuánticos observados, relacionando entre sí los datos empíricos obtenidos mediante un conjunto de reglas matemáticas al margen de cualquier interpretación filosófica, ya fuera metafísica o epistemológica. Le incomodaban interpretaciones como el cuadrado de la función de onda propuesto por Born (Heisenberg, 1972, p. 97) o la noción de complementariedad de Bohr (Heisenberg, 1974, p. 58).

En cambio, Bohr (1937, p. 293) observaba que ya no “estamos en condiciones de hablar del comportamiento autónomo de un objeto físico, debido a la interacción inevitable entre el objeto y los instrumentos de medición”; y proponía incluir el instrumento de medida en la definición de un



*fenómeno físico* (Bohr, 1964, pp. 75, 78, 90), lo que ha llevado a algunos autores (d’Espagnat, 1983, p. 34) a considerarlo como un físico de orientación positivista. Aunque Bohr concebía la imagen fenoménica de la onda y la imagen fenoménica del corpúsculo como dos aspectos alternativos de una misma realidad, le incomodaba hablar de ello debido a las insuperables dificultades que veía en todos los intentos de definir la noción de *realidad*. No obstante, el físico danés sí aceptaba la noción de “realidad bien definida” (d’Espagnat, 1983, p. 34) si se describía o definía el *fenómeno físico* como la suma de la partícula y el instrumento de medida.

Podemos resumir la interpretación de Copenhague de la MC, cuya figura central fue Niels Bohr, apoyándonos sobre cuatro pilares básicos, que están relacionados entre sí:

- 1) El *postulado cuántico*, según el cual la interacción entre el dispositivo de medida y el objeto subatómico —cuyas propiedades se quieren medir— nunca es despreciable y, por consiguiente, no se puede conocer el estado de dicho objeto sin tener en cuenta la acción provocada por el acto de observación.
- 2) Las *relaciones de indeterminación* de Heisenberg, que impiden la medida exacta y simultánea de dos magnitudes conjugadas, como por ejemplo la posición y el momento de una partícula.
- 3) El *principio de complementariedad* de Bohr, según el cual la descripción completa de la realidad a escala subatómica se basa en la dualidad onda-corpúsculo, es decir, la inevitable utilización de montajes experimentales que conducen a representaciones o imágenes mutuamente excluyentes, pero necesarias ambas, para dar cuenta de la doble naturaleza —ondulatoria y corpuscular— de los fenómenos cuánticos.
- 4) La *interpretación probabilista* del cuadrado de la función de onda, propuesta por Max Born, según la cual la función de onda es un recurso simbólico que describe la probabilidad de realizar determinadas observaciones bajo determinadas condiciones.

A los físicos teóricos que apoyaron a Bohr en la exposición y difusión de las tesis anteriores se les conoce como *escuela de Copenhague*. Rigurosamente hablando, no fue una escuela filosófica propiamente dicha, sino que tenían en común la defensa de una concepción ontológica antirrealista, poniendo en duda algunos de los principios y fundamentos de la física clásica, como relataba el propio Heisenberg:

Todos los adversarios de la interpretación de Copenhague están de acuerdo en un punto. [...] Volver al concepto de realidad de la física clásica. [...] Preferirían regresar a la idea de un mundo real objetivo, cuyas partes más pequeñas existen objetivamente del mismo modo que existen las piedras o los árboles, independientemente de si las observamos o no. [...]

Esto, sin embargo, es imposible, o por lo menos no es completamente posible por la naturaleza de los fenómenos atómicos. (Heisenberg, 1959: 106)

Además de Bohr y de Heisenberg, podemos incluir dentro de este grupo de antirrealistas —o *escuela de Copenhague*— a Pauli, Born, Jordan, Dirac y Von Weizsäcker, entre otros muchos.

### 10. La imposible visualización de los objetos cuánticos.

Los fundadores de la MC tropezaron con una serie de dificultades, primero técnicas y luego ontológicas, que parecían insalvables, ya que el formalismo matemático “no permitía una descripción intuitiva [de los objetos cuánticos] en las formas habituales” (Bohr, 1991, p. 256). Sin embargo, estas dificultades tuvieron un impacto decisivo la hora de desarrollar lenguajes descriptivos. Bohr insistió una y otra vez sobre el uso objetivado y descontextualizado del lenguaje ordinario. A pesar de su éxito en adaptarse a la física clásica y en describir el mundo macroscópico, el lenguaje ordinario era inadecuado para representar los objetos cuánticos. Si la “objetividad débil” se refiere a la imposibilidad de utilizar la noción de trayectoria continua en el marco del espacio-tiempo para visualizar los fenómenos cuánticos, entonces resulta igualmente imposible utilizar un “lenguaje objetivista [...] [cuya] forma gramatical nos permitía al menos pensar aquello que tratamos [...] como algo existente independientemente de nosotros” (d’Espagnat, 2002, p. 26). El objeto cuántico no era para Bohr un objeto aislable y preexistente a la observación, sino un conjunto de objetos y de eventos inseparablemente vinculados con las circunstancias de la observación. Y dichas circunstancias incluían

no sólo el objeto microscópico, sino también el instrumento de observación, la disposición del montaje experimental y la propia acción de medir. El uso referencial y sintáctico del lenguaje ordinario recurre a la imagen de objetos fijos y delimitados, que permanecen constantes —inalterados— en el pequeño espacio y en el breve tiempo en que tiene lugar la observación del científico. A este respecto, d'Espagnat (2002, p. 409) ha señalado que, como resultado de la *contextualidad experimental* aludida por Bohr, los objetos cuánticos no pueden constituir “grupos estables de percepciones (o impresiones)” susceptibles de ser objeto de una representación unitaria.

Aunque inicialmente los físicos imaginaron el referente del término “electrón” como una partícula o una microscópica canica, el objeto cuántico asociado al *electrón* no se adecuaba a este esquema verbal, por lo que fue necesario desarrollar estrategias referenciales alternativas para describirlo. Para Bohr, los objetos subatómicos no podían ser descritos inequívocamente mediante palabras tales como “onda” o “partícula” porque era imposible concentrar en una sola imagen montajes experimentales o instrumentos radicalmente diferentes (Bohr, 1964). Sin embargo, algunos neologismos han tratado de ampliar el campo de aplicación del lenguaje denotativo, pero siempre apuntando a referentes que no podían ser visualizados de manera inequívoca. Un ejemplo muy conocido fue el intento de Eddington de llamar “ondículas” —del inglés *wavicles*— a esos misteriosos objetos cuánticos, un hiperónimo construido a partir de los hipónimos “ondas” —*waves*— y “partículas” —*particles*—:

Por el momento nos contentaremos con aceptar el misterio como un misterio. La luz, diremos, es una entidad con la propiedad ondulatoria de extenderse por el espacio [...] y con todas sus conocidas propiedades de difracción e interferencia; y es simultáneamente una entidad con la propiedad corpuscular [...] de concentrar toda su energía en un espacio muy pequeño. Difícilmente podemos describir tal entidad como una onda o como una partícula; como solución de compromiso tal vez sería mejor llamarla “ondícula”. (Eddington, 1928, p. 201)

Volvamos a las ondículas. Si lo que comúnmente hemos considerado como una onda [la luz] participa de la naturaleza de una partícula, [...] puede que surjan también experimentos que pongan de manifiesto el aspecto ondulatorio en la naturaleza del electrón. Por consiguiente, en vez de intentar resolver el misterio, tratemos primero de extenderlo. En lugar de explicar cómo algo puede poseer simultáneamente las propiedades incongruentes de onda y partícula, busquemos mostrar experimentalmente que estas propiedades están universalmente asociadas. No existirían entonces ni las puras ondas, ni las puras partículas. [...] de Broglie nos ha mostrado cómo calcular las longitudes de onda asociadas a un electrón, es decir, considerando que ya no es una partícula pura, sino una ondícula. (Eddington, 1928, p. 202)

Estas palabras pueden hacer pensar que Eddington trataba ingenuamente de describir un referente objetivado y descontextualizado. Todo lo contrario: a la pregunta “¿Qué es lo que realmente observamos?”, Eddington (1958, p. 32) ofreció respuestas hasta cierto punto similares a las de Bohr, ya que priorizaba el aspecto epistemológico al ontológico:

Es el comportamiento del observable, y no el comportamiento objetivo, el que *nos* concierne. (Eddington, 1958, p. 37)

A los átomos o cosas análogas a átomos [...] no se les debe atribuir (en una ciencia exacta) otra naturaleza que la de un conjunto de lecturas de graduaciones. (Eddington, 1945, p. 313)

Un caso menos conocido es Lévy-Leblond (2000, pp. 260-263), que ha propuesto llevar a cabo las siguientes sustituciones terminológicas:

- a) Sustituir los hipónimos “bosones” y “fermiones” por su hiperónimo “quantones”, traducción del francés *quantons*.
- b) Sustituir el concepto de “no-separabilidad” por el de “implexidad”, traducción del neologismo francés *implexité*.
- c) Sustituir el concepto de “no-localidad”
  - por el de “ondiquidad”, traducción del neologismo francés *ondiquité*, que surge de combinar “onda” —*onde*— y “ubiquidad” —*ubiquité*—.
  - por el de “pantopia” —en francés, *pantopie*—, un término proveniente del griego *παντοπία*, que significa literalmente “presencia en cualquier lugar”.

Desde un punto de vista lingüístico, todas las interpretaciones conducen —casi invariablemente— a discursos descriptivos de carácter figurativo basados en enunciados binarios: onda y corpúsculo, micro- y macro-, sujeto y objeto, mente y materia, gato vivo y muerto, etc. Todos los intentos enfatiza la dimensión figurativa del vocabulario utilizado, hasta tal punto que d'Espagnat (2002, p. 431) ha comparado el discurso descriptivo de los objetos cuánticos a una “armadura metafórica” que usa una terminología con dimensión “semi-alegórica” (2002, p. 59). Otras descripciones explican los microfenómenos y el comportamiento de los microobjetos sobre la base de proposiciones observacionales experimentales, sin preocuparse del abismo conceptual que separa el micromundo del macromundo, de modo que no les resulta problemático proponer neologismos (d'Espagnat, 1994, pp. 141-144; 2002, pp. 93, 434, 440, 447) para expresar la serie de principios epistemológicos y ontológicos contraintuitivos que depara la realidad cuántica: la *objetividad débil*, la acausalidad, la *no-separabilidad*, la *no-localidad*, la *superposición cuántica*, el *entrelazamiento cuántico*, el *efecto Zenón cuántico*, la *computación contrafáctica*, la *teleportación cuántica*, etc.

Pero, al tiempo que señalaba las limitaciones del lenguaje ordinario, Bohr también estaba convencido de que los físicos no podían renunciar al lenguaje descriptivo heredado de la física clásica para dar cuenta de los fenómenos. Sólo podemos expresar y comunicar a los demás aquello que podemos experimentar en la escala macroscópica de nuestros sistemas sensoriales.

A este fin es decisivo reconocer que, *por más que los fenómenos rebasen el alcance de la interpretación física clásica, la descripción de todo conocimiento ha de expresarse en términos clásicos*. La razón es simplemente que con la palabra *experimento* aludimos a una situación que nos permite decir a otros lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido, y que, por consiguiente, la descripción del dispositivo experimental y de los resultados de las observaciones ha de expresarse en lenguaje desprovisto de ambigüedades, utilizando de manera adecuada la terminología de la física clásica. (Bohr, 1964, p. 49)

### 11. Conclusiones. Una revolución epistemológica.

A lo largo de este artículo, hemos hecho un breve repaso histórico-filosófico del desarrollo conceptual, pero también pictórico, de la MC. Hemos visto que los objetos cuánticos no poseen propiedades invariantes y bien definidas, no son sustancias permanentes con existencia y características intrínsecas (Mermin, 1985). Los objetos microscópicos tienen un comportamiento fenoménico discontinuo y la mayoría de las propiedades que solemos atribuirles son —salvo casos específicos— válidos solo con respecto a un determinado *contexto experimental*. D'Espagnat (1985, p. 31; 2002, pp. 111, 114, 120) ha señalado que la dependencia del contexto impide asociar al *objeto cuántico* una “objetividad fuerte”; como mucho, una “objetividad débil”. La escuela de Copenhague, liderada por Bohr, rompió la nítida separación entre sujeto y objeto tradicionalmente aceptada en la física y favoreció las aproximaciones intersubjetivas y holistas (d'Espagnat, 1985, pp. 31, 60). A la pregunta de si es lícito considerar el objeto cuántico como una sustancia que preexiste a la observación, la MC responde que no. La gran novedad de la MC fue mostrar que los objetos cuánticos son contextuales. Es por este motivo que d'Espagnat (2002, p. 170), al que podemos también incluir dentro de la escuela de Copenhague, ha precisado que el formalismo de la MC no debe interpretarse como “la probabilidad de que ocurra tal o cual evento, sino como la probabilidad de obtener tal o cual *resultado de la observación*”. Otros físicos y filósofos han visto en este tipo de respuestas una interpretación *positivista* inaceptable porque consideran posible una concepción *ontológica* de la MC. En este artículo, no hemos entrado en este debate, que hemos dejado para ser tratado en Rubio (2022).

Como hemos visto, la descripción del mundo subatómico implicaba renunciar a la terminología de la física clásica. Bohr recurrió a la idea de *complementariedad*, aunque para algunos fuera más un consuelo filosófico que una herramienta útil para los físicos (Ulam, 2002, p. 176). La filosofía de la complementariedad lograba *disolver*, en vez de *resolver*, los problemas que se derivaban de imaginar que un mismo objeto cuántico pudiera adoptar naturalezas tan opuestas como eran las ondas y los corpúsculos. Bohr adoptó un discurso descriptivo claramente figurativo. Es la yuxtaposición de imágenes mutuamente excluyentes para describir de modo indirecto un objeto imposible de representar lo que da al discurso descriptivo utilizado en el desarrollo temprano de la mecánica cuántica su dimensión figurativa. El motivo es que se asignan predicados contradictorios a los objetos cuánticos. Si tomamos como ejemplo un *quantum* —ya sea un fotón o un electrón—, el uso de la complementariedad en la descripción de los objetos cuánticos equivale a hacer un juicio como el que

sigue: “ $A$  (un *quantum*) es al mismo tiempo  $B$  (una onda) e  $\neg B$  (una partícula)”. Esto provoca un *referente ilógico*, una especie de oxímoron referencial, porque es imposible que el receptor del mensaje pueda imaginar este misterioso objeto, pero también da cuenta de la dualidad onda-corpúsculo y de la oposición continuo-discontinuo. En otras palabras, un *quantum* ( $A$ ) no es ni una onda ni una partícula, pero la yuxtaposición de una imagen ondulatoria ( $B$ ) y una imagen corpuscular ( $\neg B$ ) para describirlo indica la presencia de un *objeto* que escapa por completo a nuestro modo intuitivo de representación. Los predicados contradictorios corresponden previsiblemente a dos manifestaciones fenoménicas alternativas de un *mismo objeto*. Un caso paradigmático más reciente es el *entrelazamiento cuántico* entre dos partículas —demostrado experimentalmente por Aspect *et al.* (1982a; 1982b), Bennett *et al.* (1993) y Bouwmeester *et al.* (1997)—, un fenómeno que describe el comportamiento de *ambos objetos* como si fueran en realidad *el mismo objeto* incluso estando espacialmente muy distantes entre sí. Ontológicamente, sería un sólo objeto. Epistemológicamente, serían dos objetos. Por tanto, podemos afirmar que el discurso de los físicos cuánticos se reduce a “imágenes y parábolas” (Bohr, citado en Heisenberg, 1972, p. 285).

El uso de una estrategia descriptiva en el lenguaje referencial de la física, basada en la yuxtaposición metafórica de representaciones mutuamente excluyentes, condujo a una revolución en el terreno de la epistemología en los años que siguieron. La realidad contextual de los fenómenos del microcosmos obliga a desarrollar una dimensión metafórica en la que el lenguaje utilizado se hace corresponder a las imágenes de la física clásica y a la necesidad gnoseológica de atribuir al extraño objeto cuántico predicados contradictorios. El discurso de la mecánica cuántica rompe con dos postulados de la filosofía racionalista: por un lado, la *inteligibilidad de lo real* con base en las categorías kantianas del conocimiento (d’Espagnat, 2002, pp. 366-368, 449, 451, 457); y, por el otro, el *principio de no contradicción* heredado de la lógica aristotélica. Otro aspecto para destacar es que el principio de complementariedad introdujo una concepción sintética, y no analítica, del objeto cuántico. Bohr consideraba el lenguaje como un instrumento de formalización y comunicación, no como un espejo o una copia de la realidad. El lenguaje utilizado para describir los *objetos cuánticos* no es ontológicamente neutro, sino que proyecta sobre dichos objetos una perspectiva observacional y experiencial particular y, hasta cierto punto, subjetiva, porque para describirlos es necesario yuxtaponer metafóricamente al menos dos representaciones diferentes. Por otro lado, la mecánica cuántica ha bloqueado —quizás definitivamente— cualquier intento de encontrar una representación objetiva y unitaria de la realidad física.

## Referencias

- Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andreae, J., Keller, C., van der Zouw, G., & Zeilinger, A. (1999). Wave-particle duality of  $C_{60}$  molecules. *Nature*, 401(6754), 680-682, <https://doi.org/10.1038/44348>.
- Aspect, A., Grangier, P. & Roger, G. (1982a). Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>.
- Aspect, A., Dalibard, J. & Roger, G. (1982b). Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804-1807, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>.
- Battimelli, G (1998). Answer to Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? *American Journal of Physics*, 66(4), 280.
- Bell, J. S. (1992). Six Possible Worlds of Quantum Mechanics. *Foundations of Physics*, 22(10), 1201-1215, <https://doi.org/10.1007/BF01889711>.
- Bennett, C. H., Brassard, G., Crépeau, C., Jozsa, R., Peres, A. & Wootters, W.K. (1993). Teleporting an unknown quantum state via dual classic and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Physical Review Letters*, 70(13), 1895-1899, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.1895>.
- Bergson, H. (1923). *Durée et simultanéité. À propos de la théorie d'Einstein*. Librairie Félix Alcan.
- Bohr, N. (1913a). On the constitution of atoms and molecules, Part I. *Philosophical Magazine*, 26(151), 1-24, <https://doi.org/10.1080/14786441308634955>.
- Bohr, N. (1913b). On the constitution of atoms and molecules, Part II. *Philosophical Magazine*, 26(153), 476-502, <https://doi.org/10.1080/14786441308634993>.
- Bohr, N. (1913c). On the constitution of atoms and molecules, Part III. *Philosophical Magazine*, 26(155), 857-875, <https://doi.org/10.1080/14786441308635031>.
- Bohr, N. (1928). The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, 121(3050), 580-590, <https://doi.org/10.1038/121580a0>.
- Bohr, N. (1935). Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 48(8), 696-702, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696>.
- Bohr, N. (1937). Causality and complementarity. *Philosophy of Science*, 4(3), 289-298, <https://doi.org/10.1086/286465>.
- Bohr, N. (1949). Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. En P. Schilpp, (Ed.), *Albert Einstein: philosopher-scientist* (pp. 200-241). Library of Living Philosophers.
- Bohr, N. (1964). *Física atómica y conocimiento humano*. Aguilar.
- Bohr, N. (1952). Medical research and natural philosophy. *Acta Medica Scandinavica*, 142(Suppl.), 967-972, <https://doi.org/10.1111/j.0954-6820.1952.tb13446.x>.
- Bohr, N. (1988). *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Alianza.
- Born, M. (1926a). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37(12), 863-867, <https://doi.org/10.1007/BF01397477>.
- Born, M. (1926b). Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 38(11-12), 803-827, <https://doi.org/10.1007/BF01397184>.
- Born, M. (1927). Das Adibatenprinzip in Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 40(3-4), 167-192, <https://doi.org/10.1007/bf01400360>.
- Born, M. (1969). *Physics in my generation*. Springer, Nueva York.
- Born, M., Heisenberg, W. & Jordan, P. (1926). Zur Quantenmechanik II. *Zeitschrift für Physik*, 35(8-9), 557-615, <https://doi.org/10.1007/BF01379806>.
- Bouwmeester, D., Pan, J.-W., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H. & Zeilinger, A. (1997). Experimental quantum teleportation. *Nature*, 390, 575-579, <https://doi.org/10.1038/37539>.
- Canales, J. (2020). *El físico y el filósofo. Albert Einstein, Henri Bergson y el debate que cambió nuestra comprensión del tiempo*. Arpa & Alfil Editores.
- Cassidy, D. C. (1998). Answer to Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? *American Journal of Physics*, 66(4), 278-279.
- Compton, A. H. (1923). A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements. *Physical Review*, 21(5), 483-502, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483>.
- De Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*. Masson.
- Dirac, P. A. M. (1930). *The principles of quantum mechanics*. The Clarendon Press.



- D'Espagnat, B. (1983). *En busca de lo real. La visión de un físico*. Alianza.
- D'Espagnat, B. (1985). *Une incertaine réalité. Le monde quantique, la connaissance et la durée*. Gauthier-Villars.
- D'Espagnat, B. (1994). *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*. Fayard.
- D'Espagnat, B. (2002). *Traité de physique et de philosophie*. Fayard.
- Eddington, A. S. (1928). *The Nature of the Physical World (The Gifford Lectures, 1927)*. The Macmillan Company.
- Eddington, A. S. (1945). *Nuevos senderos de la ciencia*. Montaner y Simón.
- Eddington, A. S. (1958). *The philosophy of the physical science*. Ann Arbor Paperback.
- Einstein, A. (1905). Über einen die erzeugung und verwandlung des liches betreffenden heuristischen gesichtspunkt. *Annalen Der Physik*, 322(6), 132-148, <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. (1935). Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47(10), 777-780, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.
- Einstein, A., Born, M. & Born, H. (1971). The Born-Einstein letters. Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955. The Macmillan Press.
- Fein, Y.Y., Geyer, P., Zwick, P., Kiałka, F., Pedalino, S., Mayor, M., Gerlich, S. & Arndt, M. (2019). Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa. *Nature Physics*, 15(12), 1242-1245, <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0663-9>.
- Harris, W. (1997). Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? *American Journal of Physics*, 65(6), 461.
- Heisenberg, W. (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*, 33(1), 879-893, <https://doi.org/10.1007/BF01328377>.
- Heisenberg, W. (1926). Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 14(45), 989-994, <https://doi.org/10.1007/BF01504651>.
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3-4), 172-198, <https://doi.org/10.1007/BF01397280>.
- Heisenberg, W. (1971). *Physique et philosophie: la science moderne en révolution*. Albin Michel.
- Heisenberg, W. (1972). *Diálogos sobre la física atómica*. La Editorial Católica.
- Heisenberg, W. (1974). *Más allá de la física: atravesando fronteras*. La Editorial Católica.
- Holton, G. (1982). *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Alianza Editorial.
- Kant, I. (1781/2016). *Crítica de la razón pura*. Taurus.
- Kennard, E. H. (1927). Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen. *Zeitschrift Für Physik*, 44(4-5), 326-352, <https://doi.org/10.1007/BF01391200>.
- Lévy-Leblond J.-M. (2000). Mots & maux de la physique quantique. Critique épistémologique et problèmes terminologiques. *Revue internationale de philosophie*, 54(212), 243-265, <https://www.jstor.org/stable/23955584>.
- Lévy-Leblond, J.-M. & Balibar, F. (1998). Answer to Question #62. When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? *American Journal of Physics*, 66(4), 279-280.
- Leibniz, G. (1765). *Oeuvres philosophiques latines & françoises de feu. Tirées de ses manuscrits qui se conservent dans la bibliotheque royale à Hanovre et publiées par Mr. Rud. Eric Raspe*. Amsterdam et Leipzig, Chez Jean Schreuder.
- Lewis, G. N. (1926). The conservation of photons. *Nature*, 118, 874-875, <https://doi.org/10.1038/118874a0>.
- Mermin, N. D. (1985). Is the Moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. *Physics Today*, 38(4), 38-47, <https://doi.org/10.1063/1.880968>.
- Millikan, R. (1916). A direct photoelectric determination of Planck's "h". *Physical Review*, 7(3), 355-388, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.7.355>.
- Pais, A. (1988). *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. Clarendon Press.
- Pais, A. (1991). *Niels Bohr's times: in physics, philosophy, and polity*. Oxford University Press.
- Rayleigh, Lord (1900). LIII. Remarks upon the law of complete radiation. *Philosophical Magazine*, 49(301), 539-540, <https://dx.doi.org/10.1080/14786440009463878>.
- Robertson, H. P. (1929). The uncertainty principle. *Physical Review*, 34(1), 163-164, <https://doi.org/10.1103/physrev.34.163>.

- Sánchez Ron, J. M. (2001). *Historia de la física cuántica*. Crítica.
- Schrödinger, E. (1926a). Über das verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen quantenmechanik zu der meinem. *Annal. Der Physik*, 384(8), 734-756, <https://doi.org/10.1002/andp.19263840804>.
- Schrödinger, E. (1926b). Quantisierung als eigenwertproblem. *Annalen Der Physik*, 386(18), 109-139, <https://doi.org/10.1002/andp.19263861802>.
- Schrödinger, E. (1926c). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 28(6), 1049-1070, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.1049>.
- Schrödinger, E. (1928). *Collected papers on wave mechanics*. London: Blackie & Son.
- Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik. *Naturwissenschaften*, 23(48), 807-812, <https://doi.org/10.1007/BF01491891>  
[Traducido al inglés en E. Schrödinger (1983). The present situation in quantum mechanics: a translation of Schrödinger's 'cat paradox' paper. En J. A. Wheeler & W. H. Zurek, Eds. (1983), *Quantum theory and measurement* (pp. 152-167). Princeton University Press.
- Ulam, S. M. (2002). *Aventuras de un matemático*. Nivola.
- Von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer.
- Wien, W. (1896). XXX. On the division of energy in the emission-spectrum of a black body. *Philosophical Magazine*, 43(262), 214-220, <https://doi.org/10.1080/14786449708620983>.