



LECTURA FILOSÓFICA DE LA CONSTITUCIÓN HISTÓRICA DEL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD DE BOHR

Philosophical view of the historical constitution of Bohr's complementarity principle

CARMEN SÁNCHEZ OVCHAROV

Universidad Complutense de Madrid (UCM), Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED),
España

KEY WORDS

*Complementarity
Bohr
Philosophy of Physics
Ondulatory
Corpuscular
Theoretical Model*

ABSTRACT

This paper is a chronology of the theoretical proposals and experiments that led to Bohr's complementarity principle. This work exhibits how, under this principle, two classical models underlie: ondulatory and corpuscular. These are an analogy to describe and predict quantum phenomena. These models are mutually exclusive in both areas, classic and quantum. Nonetheless, the quantum phenomena require the application -though not simultaneously - of both to achieve the complete treatment. The question is whether the extrapolation of these models, in addition to their instrumental adequation, can be considered as close to reality.

PALABRAS CLAVE

*Complementariedad
Bohr
Filosofía de la física
Ondulatorio
Corpuscular
Modelo teórico*

RESUMEN

En este artículo se realiza un recorrido cronológico por las propuestas teóricas y experimentos que condujeron a la constitución del denominado principio de complementariedad, enunciado por Bohr. Se muestra como a dicho principio subyacen dos modelos clásicos (ondulatorio y corpuscular) que se toman como analogía para describir y predecir fenómenos de carácter cuántico. Dichos modelos son excluyentes en ambos ámbitos, clásico y cuántico; no obstante, los fenómenos cuantizados requieren la aplicación – aunque no simultánea - de ambos para conseguir un tratamiento completo. La cuestión es si esta extrapolación de modelos, más allá de su adecuación instrumental, puede considerarse cercana a la realidad.

Precisamente, en 1899, un año antes de que Planck diese la solución definitiva al problema del espectro de radiación del cuerpo negro, P.N. Lébedev, comprobaba experimentalmente por primera vez el fenómeno de la presión o *acción ponderomotriz* de la luz, predicho por Maxwell hacia 1873. El experimento consistía en hacer incidir una onda electromagnética sobre la superficie de un cuerpo para comprobar si ejerce presión sobre él. Conseguir observar este efecto pondría de manifiesto que el flujo de radiación no sólo posee energía sino también cantidad de movimiento, una característica propia de la masa en movimiento e impropia de una onda. En el experimento de Lébedev¹, un juego de espejos hacía incidir luz sobre unas aletas ligeras de diferentes metales, suspendidas de un hilo y, efectivamente, la luz incidente hacía girar las aletas retorciendo el hilo. Aunque este experimento confirmaba la teoría electromagnética de Maxwell, por ser una de las predicciones de su teoría, cuando se estableció la mecánica cuántica, ésta resultó ofrecer las mismas ecuaciones para la descripción de este fenómeno. Se podría pensar que el carácter “corpuscular” de la radiación, como portadora de una cantidad de movimiento, ya estaba contenido en la teoría electromagnética de Maxwell.

La idea de la radiación como colección de porciones discretas fue inaugurada, en 1900, por Max Planck con la formulación de una nueva ley² para la explicación de lo que él mismo llamó el “espectro normal” (*Normalspektrum*), nombre que adoptó para la distribución de la densidad de la energía de radiación del cuerpo negro³ de Kirchoff. Planck, subsanando las deficiencias de la ley de Wien, había hallado una ley correcta de distribución de la radiación de ese cuerpo, pero, en un principio, no alcanzaba a ver su explicación teórica, su “significado físico real” (citado por Rivadulla 2003, p.171). La dificultad para esa explicación teórica radicaba en una nueva constante física que Planck había introducido en su ley de radiación como una suposición “puramente formal” y que implicaba la idea de que la energía de radiación se emitía de forma *discreta*, no continua, en porciones múltiplo de una cantidad constante: h . Esta suposición meramente formal supuso el tránsito de la física clásica a la cuántica y recibió el nombre de *constante de Planck* o *cuanto de acción* h (también expresado como $\hbar=h/2\pi$). De este modo, el carácter continuista clásico de la luz (establecido por

analogía directa con las ondas materiales) quedaba cuantizado y establecida su *corpuscularidad*.

En 1905, Albert Einstein⁴ amplió la hipótesis de Planck: no solo la emisión, sino también la absorción y la propagación de la radiación tiene lugar de forma cuantizada, como un conjunto de partículas con energía $E = h\nu$, que posteriormente recibieron el nombre de *fotoes* (C.N. Lewis, 1929). En base a estas consideraciones, Einstein ofrece la primera interpretación de las leyes que rigen el *efecto fotoeléctrico*⁵, que es el fenómeno de la emisión de electrones (*fotoselectrones*) de átomos y moléculas por incidencia sobre ellos de radiación electromagnética de cierta frecuencia. La cuantización de la propagación y absorción de la luz permitió a Einstein explicar las regularidades (contradictorias con la teoría clásica de la luz) que los experimentos establecían para el efecto fotoeléctrico, a saber: a) que para cada sustancia hay una frecuencia mínima o umbral de radiación (independientemente de su intensidad), por debajo del cual no se emiten fotoselectrones, y b) que el número de fotoselectrones por unidad de tiempo es proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Einstein concluyó que la energía $E = h\nu$ de un fotón incidente se convierte en trabajo A_e de la salida del fotoselectrón y en su energía cinética (de movimiento), según la relación $E = h\nu = A_e + \frac{1}{2}m_e v^2$.

La naturaleza corpuscular de la luz pareció hacerse más evidente todavía, de la mano de Arthur H. Compton quien, en 1922, probó experimentalmente que la dispersión de la luz por electrones libres se puede interpretar como una colisión elástica entre dos *partículas* (de altas energías). Esto demostraba definitivamente que los fotones de Einstein eran verdaderas “partículas” de luz, que colisionaban cumpliendo las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento de la cinemática clásica. En este proceso de colisión entre el fotón y el electrón, denominado *efecto Compton*⁶, el fotón, aparte de la energía $E = h\nu$, posee una cantidad de movimiento $p = h/\lambda$, y su longitud de onda λ experimenta una variación $\Delta\lambda$ que depende de una constante denominada *longitud de onda de Compton para el electrón* λ_0 . Energía y cantidad de movimiento del fotón quedan determinadas, así, por la relación $E = cp$ (pues, si $p = h/\lambda$, entonces $E = h\nu = p\lambda v = pc$), de manera que se demuestra experimentalmente que, junto con las propiedades ondulatorias (detectables en

¹ Este efecto está descrito con detalle en Prótorov (1996, t.3, pp. 992-994).

² Sobre la evolución histórica de la hipótesis cuántica y la ley de radiación de Planck ver Rivadulla (2003, pp.166-172). Un tratamiento físico-matemático en profundidad se encuentra Eisberg-Resnick (1986, pp. 19-41).

³ Rivadulla (2002, pp.43-55).

⁴ “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, en *Annalen der Physik* 17, 1905, pp. 132-148.

⁵ Sobre el efecto fotoeléctrico y la solución cuántica de Einstein para sus leyes, Eisberg-Resnick (1986, pp. 47-55).

⁶ En profundidad, Eisberg y Resnick (1986, pp. 55-60).

fenómenos de difracción, interferencia, etc.) la radiación posee propiedades corpusculares. No obstante, como comenta Bunge (1978, p.132), “el tratamiento elemental de la dispersión de la luz por electrones (efecto Compton) es un ejemplo típico del triunfo parcial y fracaso final de la *analogía* como método para enfrentar problemas nuevos”. Como veremos, esta analogía dio algunas respuestas erróneas, a la vez que no supo dar ningún tipo de respuesta a ciertos interrogantes.

El descubrimiento del carácter ondulatorio-corpúscular de la materia

Demostrada la dualidad de la naturaleza de la radiación, De Broglie propuso, en 1924, la hipótesis simétrica: la dualidad de la naturaleza de la materia a escala subatómica. Su propuesta consistía en que cada partícula material, con una cantidad de movimiento p , posee una onda asociada a ella (del mismo modo que el fotón), mediante la relación $\lambda = h/p$, donde λ es la denominada longitud de onda de De Broglie⁷ (perteneciente a cierta característica ondulatoria, por determinar, de la partícula). Se desprendía de la hipótesis de De Broglie que no sólo los fotones, sino también los electrones deberán manifestar sus propiedades ondulatorias en fenómenos característicos del movimiento ondulatorio. En 1926, Elsasser consideró posible comprobar la naturaleza ondulatoria de la materia del mismo modo que inicialmente se había probado la naturaleza ondulatoria de los rayos X – por medio de la difracción.

Y, en efecto, tres años después del postulado de las ondas de materia de De Broglie, los físicos K. Davisson y L. Germer obtuvieron su confirmación experimental⁸. Diseñaron un montaje similar al experimento que se solía realizar para la difracción de rayos X. Querían observar la reflexión de un haz de electrones, incidente bajo cierto ángulo sobre un monocristal. Variando la velocidad de los electrones incidentes, un detector (de posición variable) registraría los electrones reflejados. Davisson y Germer determinaron que los electrones experimentaban reflexiones (con un ángulo α) en los diversos planos de la red cristalina (con una distancia d entre los planos). Variando la posición de los detectores comprobaron que los haces de electrones reflejados mostraban unos inesperados máximos y mínimos de intensidad. Dichos máximos resultaron ajustarse a la relación $2d \cdot \cos \alpha = n\lambda$,

que es la condición de Bragg para los máximos de intensidad de los rayos X reflejados por un monocristal, es decir, los máximos para la interferencia de ondas electromagnéticas.

El postulado de De Broglie era conocido por los experimentadores y al comprobar las longitudes de onda asociadas a los electrones difractados, con diferentes velocidades, los resultados mostraron acuerdo con el postulado. El experimento de ambos físicos corroboraba cierta clase de naturaleza ondulatoria asociada a los electrones. Según esta interpretación, el movimiento libre (sin acción de fuerzas externas) de una partícula con masa m y velocidad v , se puede entender como una *onda plana* (la dirección de propagación de la onda es paralela al eje X) *monocromática* (de una determinada longitud de onda λ) asociada a la partícula. Esta onda asociada se denomina *onda de De Broglie* y se propaga en el sentido del movimiento de la partícula con longitud de onda $\lambda_b = h/p$, ó $\lambda_b = h/\sqrt{2mE}$ si la velocidad de la partícula no es demasiado grande.

Por lo tanto, considerando las leyes del movimiento que la partícula manifiesta cumplir en el fenómeno de difracción (leyes de la mecánica ondulatoria), el movimiento de los electrones en el experimento de Davisson y Germer puede ser considerado como un *movimiento ondulatorio*; como la propagación de un grupo de ondas asociadas. Sin embargo, la onda de De Broglie se postula asociada a cada partícula individual. Si se admite el postulado deberían poder observarse experimentalmente características ondulatorias asociadas a una sola partícula. Pues bien, se considera confirmación experimental de este postulado la obtención del patrón de interferencia, en experimentos de lanzamiento de electrones individuales, es decir, uno a uno. Se pudo observar que, con el tiempo, se formaba un cuadro de difracción: cada electrón impacta sucesivamente sobre la pantalla, en la posición correspondiente a una distribución con máximos y mínimos, los cuales caracterizan la interferencia de ondas. Según Prógorov (1995, p. 298):

Esto significa que cada electrón por separado se somete a todas las leyes de la óptica ondulatoria y que el efecto difractivo se debe a la interacción de la onda de De Broglie de cada electrón con los átomos del cristal.

Esta interpretación implica aceptar que cada partícula individualmente posee las características de una onda, lo postulado por De Broglie.

De este modo, la materia y sus últimos elementos constitutivos adquirieron las propiedades clásicas de las ondas: la capacidad de interferir, superponerse y difractar. Quedaba establecido el modelo ondulatorio-corpúscular de la

⁷ La obtención de la longitud de onda de De Broglie está desarrollada en Rivadulla (2003, pp.182-184).

⁸ Independientemente, en 1927 también, realizó la misma comprobación J.P. Thomson, aunque en su experimento seguía un método análogo al de Debye-Hull-Sharres, quienes habían hecho difractar los rayos X por polvo, no por un monocristal.

entidad históricamente corpuscular, la materia y, en particular, del electrón.

La corroboración de la universalidad del dualismo onda-corpúsculo hizo necesario buscar una ecuación que pudiese abarcar las características ondulatorias y corpusculares del movimiento de las micropartículas. E.Schrödinger propuso, en 1926, una ecuación que incorporaba lo corpuscular a lo ondulatorio, que abarcaba las ecuaciones de Newton para el movimiento de las partículas clásicas y las ecuaciones de D'Alembert de las ondas clásicas. Así surgió la *mecánica ondulatoria* o *mecánica cuántica*.

Así, la analogía formal que se trazó entre las ecuaciones de onda clásicas y la ecuación de estado cuántica (ecuación de Schrödinger) para el tratamiento de partículas materiales (entendidas entonces como corpúsculos), propició la interpretación de sus fenómenos en términos de óptica clásica. En un principio, de hecho, se llegó a intentar convertir la analogía de formal en ontológica. Schrödinger, por ejemplo, interpretaba sus funciones de onda como descripción de una distribución continua de electricidad en el espacio, esto es, les otorgaba un significado electromagnético. En esta interpretación, como lo expresa Born (1936, p.82): "Schrödinger attempted to interpret corpuscles, and particularly electrons, as *wave packets*". Esto es, identifica partículas con *paquetes de onda*: un conjunto de ondas monocromáticas superpuestas y concentradas en una región del espacio. Comenta Heisenberg (Salam-Heisenberg-Dirac 1990, p.151):

Ustedes saben que Schrödinger durante un tiempo creyó que podía usar la mecánica de las ondas con las mismas clases de conceptos empleados en la teoría de Maxwell. Suponía que las ondas de materia eran ondas tridimensionales en el espacio y el tiempo, como las ondas electromagnéticas, y en consecuencia el valor propio de una energía era realmente el valor propio de una vibración y no una energía.

De este modo, se comenzó a buscar la interferencia, la superposición y la difracción en todos los fenómenos de partículas. La analogía realizó una labor importante: ofrecer una terminología teórica y ciertas ecuaciones con las que poder tratar en un primer momento los nuevos fenómenos de las partículas elementales y elaborar una teoría física sobre ellos. Sin embargo, Born "acabó" con la parte ontológica de la analogía ofreciendo una interpretación matemática de la función de onda cuántica:

Although his formulae [Schrödinger's wave function] are entirely correct, his interpretation cannot be maintained, since on the one hand, [...] the wave packets must in course of time become dissipated, and on the other hand the description of the interaction of two electrons as a collision of

two wave packets in ordinary three-dimensional space lands us in grave difficulties.

Así pues, Born propuso⁹ una interpretación estadística: entender la función de onda como la densidad de probabilidad de encontrar una partícula en una región del espacio. Nada físicamente ondulatorio podía ser predicado de las partículas materiales.

Es curioso, pero puede ser, como señala Bunge (1978, p. 132), que "sin la analogía [con las ondas materiales] la mecánica ondulatoria no habría nacido y la llamada difracción de la materia no habría contado como confirmación empírica decisiva de la misma".

El postulado de la complementariedad de modelos excluyentes

Los modelos clásicos ondulatorio (huygesiano) y corpuscular (newtoniano) funcionaban, pues, de forma *conjunta* (aunque no simultánea) tanto para la materia como para la radiación. La forma de dar cuenta de este hecho dentro de la mecánica cuántica era introduciendo un postulado que permitiese combinar dos modelos teóricos clásicamente contrarios para el tratamiento de las propiedades de cualquier microobjeto. Heisenberg (1972, p.100) relata la preocupación que tenía Bohr a este respecto:

Bohr había desarrollado ampliamente sus propios pensamientos e intentado [...] hacer del dualismo entre imagen de ondas e imagen de partículas la base de la interpretación [de la mecánica cuántica]. En el centro de sus reflexiones estaba el concepto de complementariedad.

Según la idea de Bohr, lo excluyente e incompatible en la mecánica clásica (en el macromundo) es complementario en la mecánica cuántica (en el micromundo) y "sólo por la yuxtaposición de ambos aspectos opuestos [ondulatorio y corpuscular] se agota totalmente el contenido intuitivo del fenómeno" (*Ídem*).

Pero la yuxtaposición de ambos aspectos no era sólo teórica, sino también experimental, pues para determinar las propiedades ondulatorias o corpusculares de cada microobjeto, se necesitan montajes experimentales diferentes, para que se manifieste un aspecto de la dualidad o el otro. Eisberg y Resnik (1986, pp. 88-89) ofrecen la versión física de este hecho:

Los modelos corpuscular y ondulatorio son complementarios; si una medida prueba el carácter ondulatorio de la radiación o la materia,

⁹ Ver "The Statistical Interpretation of Wave Mechanics" de Born (1936, pp.130-135).

entonces es imposible probar la naturaleza corpuscular en el mismo experimento y viceversa. El modelo que se utilice lo determina la naturaleza del experimento.

Si el modelo determina la naturaleza del experimento, entonces es la teoría, a la que pertenece el modelo, la que determina el experimento. Si, además, se advierte que,

Es importante notar que, en una medición dada, se debe aplicar un solo modelo, ya que no se puede utilizar ambos modelos bajo las mismas circunstancias. (Ídem, p.88)

Se debe entender que las “circunstancias” de la medición dada, están diseñadas únicamente para *uno* de los modelos, con lo cual, las condiciones iniciales del experimento, por sí mismas, *no permiten detectar dos modelos*. Con lo cual, indiscutiblemente, *sólo la teoría decide lo que podemos medir*.

Resulta pues, argumenta Bohr (1970, p.7), que mientras en física clásica “todas las características de un objeto dado se pueden investigar en principio mediante un único montaje experimental” y los datos obtenidos “pueden combinarse en una imagen consistente de la conducta del objeto investigado”, en física cuántica “los datos de los objetos atómicos obtenidos con diversos montajes experimentales exhiben una nueva clase de relación complementaria”. Además, esta evidencia experimental “parece contradictoria cuando se intentan combinar los datos en una sola imagen” y, sin embargo, dicha evidencia “agota todo el conocimiento concebible referente al objeto” (*Íbidem*). Es decir, los datos experimentales, aún contradictorios en su sentido teórico, se deben considerar como complementarios para obtener una descripción completa del fenómeno cuántico.

Bohr se equivoca o, por lo menos, no parece percatarse de que los datos *no muestran una nueva clase de relación*; solamente reflejan las características de la propia teoría que ha diseñado el experimento; el dualismo y la complementariedad *están en la propia teoría cuántica*, como condiciones teóricas iniciales, traídas desde la dualidad de entidades (materia y radiación) y modelos (ondulatorio y corpuscular) de la teoría clásica.

En su respuesta al experimento mental EPR¹⁰ (A.Einstein, B.Podolsky, N.Rosen 1935, pp.777-780), Bohr (1935, p. 223) saca la conclusión de que:

A general view point conveniently termed “complementarity” [is] from which quantum mechanics within its scope would appear as a completely rational description of a physical phenomena.

¿Se puede ofrecer una descripción “completamente racional” del mundo subatómico fundamentándola en términos teóricos de una teoría física (la clásica) propia del macromundo, cuando los datos experimentales demuestran que esos términos no son aplicables en su significado pleno?

Conclusiones

Al principio de complementariedad subyace la misma restricción que poseen los modelos ondulatorio y corpuscular en mecánica clásica, a saber: son incompatibles de forma simultánea, no son sintetizables, son antitéticos. La única diferencia entre las dimensiones clásica y cuántica de la naturaleza es que en la clásica uno solo de estos modelos es suficiente para describir y manejar un fenómeno dado; mientras que, en la dimensión cuántica de la realidad, ambos modelos deben ser aplicados *sucesivamente* – no *simultáneamente* – al mismo fenómeno para poder agotar toda la información que podemos obtener del mismo en vistas a su manejo predictivamente exitoso. En este sentido, el término de “complementariedad” no deja de ser acertado, pues, los dos modelos clásicos se complementan o, dicho de otra forma, ofrecen informaciones complementarias por ser, precisamente, excluyentes (como las dos caras de una moneda). No obstante, cabría preguntarse si esa *forzada* imposición – desde el ámbito teórico de la mecánica clásica – de complementariedad de modelos, sobre la dimensión subatómica de la realidad, es la que más se acerca a su estructura o, en cambio, es un instrumento a modo de los epiciclos, ecuanes y deferentes ptolemáicos: un modelo teórico predictivamente exitoso, que imponía *forzadamente* el movimiento circular para la explicación de cualquier movimiento de cuerpos celestes, sin ser éste así.

¹⁰ En EPR se plantea la siguiente cuestión: ¿se puede considerar completa la descripción de la realidad dada por la función de onda en la mecánica cuántica? La completitud de una teoría consiste, para los autores, en que cada elemento de la teoría debe tener una contraparte en la realidad física. Solamente si se puede predecir con absoluta certeza (probabilidad igual a 1) el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de la realidad que le corresponde. La función de onda mecano-cuántica no puede realizar semejantes predicciones.

Referencias

- Bohr, N. (1935). Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review* 48.
- (1970). *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*. Madrid: Ed. Aguilar.
- Bunge, M. (1978) *Filosofía de la física*, Ariel, Barcelona.
- Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *The Physical Review* 47, May 15.
- Eisberg, R.; Resnick, R. (1986) *Física Cuántica*. México: Ed. Limusa.
- Heisenberg, W. (1972). *Diálogos sobre física atómica*. Madrid: BAC.
- (1930). The Physical Principles of the Quantum Theory. *Z.f. Phys.* 33, (925).
- Projorov, A.M. (1995-1996). *Diccionario Enciclopédico de Física*. Moscú-Madrid: Ed. MIR, Rubiños-1860.
- (coord.) (1998). *Enciclopedia de Física*. Moscú: Gran Enciclopedia Rusa.
- Rivadulla, A. (2004). *Éxito, razón y cambio en física*. Madrid: Ed. Trotta.
- (2003). *Revoluciones en Física*. Madrid: Ed. Trotta.
- (ed.) (2002). Hipótesis y verdad en ciencia. *Philosophica Complutensis* 19.
- Salam, Heisenberg, Dirac (1990). *La unificación de las fuerzas fundamentales*. Barcelona: Gedisa.