



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado
Fisikako Gradua / Grado en Física

Bohr y su filosofía de la física: epistemología y complementariedad

Egilea/Autor/a:
Aitor Calvo Fernández

Zuzendaria/Director/a:
Juan María Aguirregabiria Aguirre

Agradecimientos

Quiero agradecer a Aitor Anduaga el trabajo dedicado a la dirección de este proyecto.

Índice

Introducción	1
1. Contexto histórico	4
1.1. Influencias filosóficas	4
1.2. La física cuántica hasta 1927	8
2. La versión de Como (1927-1928)	12
2.1. Complementariedad	12
2.2. Otros problemas de interpretación	15
3. Etapa de transición (1929-1935)	19
3.1. Una nueva complementariedad	19
3.2. El artículo EPR (1935)	21
3.2.1. El argumento de EPR	21
3.2.2. La respuesta de Bohr	22
4. Cambios posteriores a EPR (1936-1949)	25
4.1. Fenómenos, atomicidad y causalidad	25
4.2. Bohr como filósofo antirrealista.	27
4.3. La versión definitiva de la complementariedad	29
5. Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)	31
5.1. Objetividad, univocidad y lenguaje.	31
5.2. El experimento y el lenguaje clásico	33
Conclusiones	36

Introducción

Hoy en día hay sobradas razones para considerar la teoría cuántica como uno de los mayores éxitos de la física moderna. Después de unos primeros años dificultosos, inaugurados por el descubrimiento del cuanto de acción por Max Planck en 1900, la teoría física cuántica acumula éxitos y consigue describir una cantidad de fenómenos cada vez mayor. No obstante, también es una teoría que desafía a nuestra intuición, pues choca con las nociones más elementales de la física clásica. La validez del formalismo de la mecánica cuántica está fuera de toda duda, pero de este no se desprende inmediatamente una imagen de la realidad microscópica. Esto supone un problema serio, ya que el objetivo de la física es dar una descripción de la realidad, además de permitirnos manipularla. Profundizar en este tema es el motivo principal para hacer este trabajo.

Una de las primeras soluciones al problema presentado, y también la más dominante,¹ es la interpretación de Copenhague. Se asocian comúnmente a esta físicos como Max Born, Werner Heisenberg y Niels Bohr. Esta interpretación suele entenderse como sinónimo de indeterminismo, el principio de correspondencia de Bohr, la interpretación estadística de la función de onda de Born y la interpretación complementaria de Bohr de ciertos fenómenos atómicos.² Sin embargo, a día de hoy se dispone de suficiente información para saber que bajo este término se agrupan interpretaciones muy diferentes entre sí.³ A pesar de las divergencias entre los autores mencionados, está ampliamente aceptado que la perspectiva general que comparten tiene su origen en el trabajo de Bohr.⁴ Así, he centrado el trabajo en su solución al problema de la física cuántica y en su filosofía de la física.

El pensamiento de Bohr suele asociarse con el concepto de “complementariedad”, que puede tener tres sentidos diferentes e interrelacionados: puede tratarse de (i) un concepto filosófico general, (ii) un conjunto de instancias del anterior referentes a la física cuántica o (iii) una interpretación de los fenómenos cuánticos y de la mecánica cuántica.⁵ En este trabajo no hablaré del concepto filosófico general ni de sus aplicaciones a otros campos; utilizaré el término en referencia los sentidos (ii) y (iii). En los textos de Bohr no se distingue entre ellos, por lo que lo más probable es que él los entendiera como una unidad; en este trabajo seguiré su criterio. El concepto de complementariedad, aplicado a la física cuántica, puede resumirse brevemente de la siguiente manera: es la relación entre distintos aspectos de la física cuántica —fenómenos, situaciones experimentales o conceptos como posición y momento— que son mutuamente exclusivos, pero a la vez necesarios para explicar la experiencia. En un sentido más general, denota toda la interpretación que se forma alrededor del concepto presentado.

Aunque el planteamiento inicial fuera analizar la complementariedad, su

¹Cushing (1998), pp. 345-355.

²Faye (2014), párr. 3.

³Camilleri y Schlosshauer (2015), p. 74; Faye (2014), párr. 3; Henderson (2010), p. 1; Zinkernagel (2016), p. 9. Camilleri (2016), por ejemplo, muestra las diferencias entre las posturas de Bohr y Heisenberg; Henderson (2010) expone las diferencias entre las interpretaciones de Von Neumann, Heisenberg y Wheeler. Los cuatro físicos mencionados se relacionan normalmente con la interpretación de Copenhague.

⁴Cushing (1998), p. 306; Faye (2014), párr. 2; Jammer (1966), p. 351-352.

⁵Plotnitsky (2013), p. v.

estudio muestra enseguida las limitaciones del mismo. La complementariedad es parte de una perspectiva filosófica mucho más amplia, sin la cual carece de sentido. Esta se apoya en reflexiones sobre el papel de la ciencia y la base epistemológica de la física; exponer la manera en que Bohr entiende el formalismo de la mecánica cuántica requiere explicar estas últimas y también sus influencias filosóficas. El ámbito de este trabajo es, por lo tanto, la filosofía de la física enfocada al problema de la física cuántica. Siendo el problema de la interpretación un tema sobre el que sigue sin haber acuerdo, es crucial examinar las bases de las distintas opiniones que se han formado al respecto. Entre ellas, la de Bohr es una de las más destacadas, pues es la inspiración de muchos otros físicos. Además, clarificarla es especialmente importante, pues la complementariedad ha sido malinterpretada en varias ocasiones.⁶ El formalismo físico sobre el cual desarrollo el problema de la interpretación es el de la mecánica cuántica no relativista; así lo hace Bohr en la gran mayoría de los casos, y es como suele tratarse el tema habitualmente.⁷

El intento de clarificar la complementariedad y la filosofía de Bohr presenta dos problemas principales: (i) Bohr no es un filósofo profesional, y su modo de expresarse en los artículos es normalmente confuso y difícil de entender;⁸ (ii) la filosofía de Bohr experimenta una evolución importante a lo largo de su carrera, cambio que él y muchos autores no reconocen en sus escritos.⁹ Estos factores hacen que sea difícil leer a Bohr, y todavía hoy sigue habiendo discrepancias acerca de cómo entenderlo. Afortunadamente, cada vez se dispone de más documentos y estudios que ayudan a descartar ciertas perspectivas que se han planteado.¹⁰ Para evitar incurrir en errores que ya se han superado y cubrir el tema de una forma más amplia, he usado como fuente de información las investigaciones que se han hecho acerca de la filosofía de Bohr, además de sus propios escritos. De acuerdo con el planteamiento expuesto, el trabajo es principalmente una síntesis de lo que diversos autores han dicho hasta el momento acerca del tema. Para cada aspecto de la filosofía de Bohr he seleccionado las perspectivas que he creído adecuadas, tomando en cuenta los escritos de Bohr y contrastando las diversas fuentes entre sí.

Dada la naturaleza del tema, el trabajo está orientado hacia cuatro objetivos principales: (i) exponer la interpretación de la física cuántica que desarrolla Bohr; (ii) explorar las bases filosóficas que sirven de base a su interpretación; (iii) mostrar las características específicas que hacen que su filosofía e interpretación sean diferentes a la de otros físicos de Copenhague; (iv) poner de relieve el desarrollo histórico de la misma. Para responder a estos objetivos, presentaré el pensamiento de Bohr en perspectiva histórica. Así, el trabajo comenzará con una introducción al contexto en el que surge la complementariedad, en el que incluyo las influencias filosóficas relevantes y un resumen del desarrollo de la física cuántica desde 1900 hasta 1927. Las cuatro secciones

⁶Por ejemplo, por Heisenberg (Camilleri, 2007) y Pauli (Zinkernagel, 2016, pp. 12-14).

⁷Bohr también toma en cuenta la electrodinámica cuántica y la mecánica cuántica de campos, pero considera que estas teorías apoyan sus ideas (Plotnitsky, 2013, pp. 89-106).

⁸La mayoría de investigadores reconocen este problema. Ver, por ejemplo, las citas mencionadas en Cuffaro (2010, p. 309) o los comentarios de Howard (1994, p. 201) y Faye (1991, p. xx).

⁹Katsumori (2011), pp. 49-50.

¹⁰Bohr ha sido identificado como positivista, instrumentalista e incluso idealista. Con la información de la que se dispone y todo lo que se ha escrito acerca del tema, hay sobrados argumentos contra estas opiniones (Favrholdt, 1994, p. 84).

restantes corresponden cada una a una etapa: las primeras tres muestran las etapas en el desarrollo de la complementariedad, marcando los cambios que se dan entre ellas; en la última no ocurre ningún cambio significativo, pero cambia la orientación de los escritos de Bohr, cuyo contenido aprovecho para exponer algunos aspectos fundamentales de su filosofía.

1. Contexto histórico

El pensamiento de Bohr, aunque es novedoso en muchos aspectos, no deja por ello de depender en gran medida del contexto histórico en el que se desarrolla. Por ello, es necesario analizar este para entender la génesis de las ideas de Bohr. Al tratarse de un pensador que hace filosofía de la física y se centra en la física cuántica, los aspectos más importantes de este contexto son las influencias filosóficas que recibe y los primeros años del desarrollo de la física cuántica, en la que se halla involucrado. Aunque es verdad que otros factores también pueden ser relevantes, considero que los mencionados son los más adecuados a este trabajo y suficientes como marco para la complementariedad.

1.1. Influencias filosóficas

Generalmente, se ignoran las influencias filosóficas al tratar temas de física. Los físicos no suelen manifestar adhesión a ninguna escuela filosófica, lo cual hace difícil trazar las relaciones entre ambas disciplinas. No obstante, los científicos trabajan siempre sobre el sustrato filosófico de su época.¹¹ Esto es especialmente importante tratándose de un tema relacionado con la mecánica cuántica, que provoca una ruptura con los ideales clásicos de continuidad y determinismo que han predominado hasta entonces. Por eso es necesario el análisis de las corrientes de pensamiento que hayan podido influir sobre Bohr, más aún si se toma en cuenta en carácter filosófico de gran parte de su trabajo.

A pesar de su importancia, este es un tema acerca del cual las opiniones están muy divididas. La razón principal es que aunque sus inclinaciones filosóficas sean evidentes, no recibe a lo largo de su vida más educación formal en filosofía académica que la de su formación básica.¹² Hay que añadir a esto que en algunos casos Bohr mismo niega haberse inspirado en ciertas filosofías a la hora de desarrollar la suya.¹³ Sin embargo, hay que tener en cuenta que la influencia no tiene por qué ser admitida o consciente para ser efectiva. La similitud de las ideas y el contacto con ellas son razones suficientes para considerarlas posibles factores en la elaboración de la complementariedad.

En el caso de Bohr, la única influencia para la que se tiene suficiente evidencia es la del filósofo danés Harald Høffding.¹⁴ Las evidencias muestran que (i) hay encuentros e intercambios intelectuales entre ellos a lo largo de treinta años, (ii) Høffding enseña filosofía a Bohr, (iii) son amigos cercanos y (iv) discuten asuntos filosóficos regularmente durante muchos años.¹⁵ A continuación esbozaré los aspectos más generales y relevantes de las filosofías que llegaron a Bohr a través de Høffding. En cuanto a estas, la influencia es indirecta en todos los casos, y las ideas de los filósofos que voy a presentar llegan a Bohr casi exclusivamente a través de Høffding, por lo que es de esperar que sean adaptadas por este último.¹⁶ Señalaré también, en cada caso, los apartados del

¹¹Ver Cushing (1998).

¹²Bohr (1954/1958b), p. 57; Pais (1991), pp. 423-424.

¹³Pais (1991), pp. 423-424.

¹⁴Faye (1991) presenta razones suficientes para atribuir a Høffding la formación filosófica de Bohr.

¹⁵*Ibid.*, p. xxii.

¹⁶*Ibid.*, pp. xix, 35, 37, 40.

trabajo en que hablo de partes de la filosofía de Bohr que son afines a las ideas expuestas.

Søren Kierkegaard

Hay ciertos aspectos generales que son comunes a las filosofías de Høffding y de Søren Kierkegaard que pueden afectar a Bohr. Entre ellas se encuentra la idea de que el pensamiento nunca puede alcanzar una explicación totalizadora de la realidad. Esta se apoya en la observación de que el sujeto, como pensador, es también parte del sistema que pretende explicar. Así, los dos filósofos daneses opinan que el uno no puede concebirse a sí mismo como observador imparcial, y que la separación entre lo objetivo y lo subjetivo es siempre arbitraria. Por tanto, consideran que el pensamiento y la ciencia tienen un valor práctico, en oposición a lo que sostienen filosofías predominantes en Europa continental.¹⁷ En palabras de Høffding, “una concepción exhaustiva de la realidad no es algo que nos haya sido dado crear”.¹⁸

Es notable también la teoría de los “saltos” de Kierkegaard. Según esta, el pensamiento no se desarrolla de manera continua, sino a través de saltos que no están determinados por el estado anterior de las cosas. Aunque para Kierkegaard estos saltos solo se dan en el pensamiento, Høffding cree que estos podrían darse también en la naturaleza inanimada. Introduce así un elemento de discontinuidad e indeterminación en el mundo físico, en contraste con las nociones clásicas de continuidad y determinismo.¹⁹ En referencia a esto, Høffding añade: “Parece claro que si el salto ocurre entre dos estados o momentos, ningún ojo puede observarlo, y como por tanto no puede ser un fenómeno, su descripción deja de ser una descripción”.²⁰ Es probable que estas ideas, especialmente la existencia de discontinuidades esenciales e indeterminadas, sirvan de inspiración a Bohr a la hora de desarrollar su modelo del átomo y la complementariedad.²¹

Émile Boutroux y Charles Renouvier

Bohr asiste en sus años de universidad a los seminarios avanzados de filosofía de Høffding, cuyo contenido discute con el grupo Ekliptika. Este grupo se compone de estudiantes que se reúnen para discutir el contenido de las lecciones de Høffding y mantienen un contacto estrecho con él a lo largo de los años.²² Uno de los temas que abarca Høffding en los seminarios trata sobre los filósofos modernos, entre los cuales ocupan un lugar importante los franceses Émile Boutroux y Charles Bernard Renouvier.²³

¹⁷Jammer (1966), p. 172-174.

¹⁸Citado en (Jammer, 1966, p. 174). Sir Nevil Mott, después de visitar el Instituto Bohr en 1928, escribe lo siguiente en una carta: “... y entonces Bohr empezó a hablar de la filosofía de la teoría cuántica y cómo todo eso estaba estrechamente relacionado con la imposibilidad de que el hombre se conozca a sí mismo, y de que no pueda conocer el mundo exterior completamente porque él mismo forma parte de él” (citado en Favrholt, 1994, p. 90). Tanto en este pasaje como en lo expuesto en el apartado “Bohr como filósofo antirrealista” se expresan ideas análogas a las de Høffding-Kierkegaard.

¹⁹Jammer (1966), p. 174.

²⁰Citado en (Jammer, 1966, p. 174) Aquí puede verse un parecido claro con las ideas de la discontinuidad e individualidad, con su característica inaccesibilidad, que Bohr tanto utilizará. Ver sección “Fenómenos, atomicidad y causalidad”.

²¹Faye (1991), pp. 37-38.

²²*Ibid.*, p. 26.

²³*Ibid.*, p. 26.

Charles Bernard Renouvier es uno de los primeros filósofos modernos que se opone a la causalidad como factor regulador de la naturaleza. Partiendo de la negación del infinito como contradicción lógica y falsedad empírica, niega también la continuidad, pues esta consiste en un infinito de gradaciones. Como consecuencia de esto rechaza también la causalidad, pues dos eventos se relacionan causalmente por su conexión a través de eventos intermedios que forman una cadena continua.²⁴

Ideas similares son defendidas por Émile Boutroux. Él, al igual que Renouvier, defiende que la naturaleza es contingente. Parte de que la ciencia opera confinando al máximo posible los valores medidos, pero nunca basándose en datos obtenidos con error igual a cero. Argumenta que todos los resultados experimentales podrían ser interpretados de manera idéntica suponiendo que la realidad fuera indeterminada a un nivel que estuviera fuera de nuestras posibilidades de observación. Entonces, sostiene que la determinación que se le atribuye a la naturaleza es puramente hipotética.²⁵ Es común a los dos filósofos la divergencia con respecto a los ideales de continuidad y causalidad de la física clásica. Esto los convierte en precursores de la revolución conceptual que se daría más tarde como consecuencia de los descubrimientos en física cuántica, en la que Bohr estuvo involucrado.

William James

En el caso del psicólogo americano William James la influencia filosófica es evidente, aunque la relación de esta con la complementariedad es difícil de establecer. Bohr lee la obra *Principles of Psychology*, escrita por James, y le causa una impresión profunda. En la última entrevista, en la que responde a las preguntas de Aage Petersen y Thomas S. Kuhn, menciona en especial cómo lo marca el capítulo que describe la corriente de pensamiento.²⁶ Este —dice James— se divide entre “partes substantivas”, donde el pensamiento descansa, y “partes transitivas”, que van desde una parte substantiva a otra; alcanzar estas últimas es el objetivo del pensamiento. Lo peculiar de las partes transitivas es que no son analizables mediante introspección; si se detienen en cierto punto, son aniquiladas, mientras que si se deja que conduzcan a uno hasta la siguiente parte substantiva, esta las eclipsa.²⁷

La lectura del texto de James es muy temprana y se ha argumentado que es posible que marque incluso las primeras ideas de Bohr sobre la estructura del átomo, publicadas en 1913.²⁸ Pueden compararse las partes substantivas del pensamiento con los estados estacionarios del electrón y las partes transitivas con las transiciones entre estos. A pesar de la similitud de estas y otras ideas de James²⁹ con las de Bohr, la falta de datos acerca de la fecha en la que Bohr tiene contacto con él no permite relacionarlas entre sí con seguridad.³⁰ No obstante, no hay dudas acerca de la influencia general en el pensamiento de Bohr, especialmente en lo referente al concepto pragmático de verdad³¹ y sus

²⁴Jammer (1966), p. 167.

²⁵*Ibid.*, p. 168.

²⁶Faye (1991), p. 32.

²⁷Jammer (1966), p. 177.

²⁸*Ibid.*, p. 178.

²⁹*Ibid.*, p. 32.

³⁰Faye (1991), pp. 33-34.

³¹Jammer (1966), p. 176-177; Faye (1991). Puede ilustrarse este concepto mediante la máxima de James: “Debemos encontrar una teoría que funcione” (Jammer, 1966, p. 177).

reflexiones sobre la psicología, un tema que Bohr aborda en diversos artículos, sobre todo al final de su carrera.³²

Immanuel Kant

Las filosofías que he expuesto hasta ahora tienen ciertos factores comunes como el indeterminismo y la discontinuidad. Esto las pone en directa oposición al pensamiento clásico y las convierte en precursores de los cambios conceptuales que siguen a la física cuántica a mediados del siglo XX. El caso de Immanuel Kant es diferente, ya que su filosofía se relaciona en este ámbito casi exclusivamente con Bohr.³³ Al tratarse de una filosofía muy compleja que llega a Bohr a través de su contacto con Høffding y los seminarios de este último sobre la *Crítica de la Razón Pura*,³⁴ no es de esperar que la analogía entre los pensamientos de Bohr y Kant sea muy profunda. Sin embargo, hay puntos muy importantes en los que estas coinciden.³⁵

- (i) La convicción de que la construcción de una relación unívoca ente sujeto y objeto de conocimiento es necesaria para dar significados bien definidos a la descripción de los fenómenos.³⁶
- (ii) La distinción entre fenómenos y objetos. Para Bohr y Kant, los fenómenos son producto de nuestra interacción con los objetos que estudiamos. Por lo tanto, consideran que no podemos tomarlos como aportando información sobre los objetos en sí, es decir, sobre su naturaleza independiente a nuestra observación.³⁷
- (iii) La idea de que los conceptos clásicos como energía, momento, tiempo y posición son necesarios para describir la realidad.³⁸

Como se irá viendo a lo largo del trabajo, parte de las ideas que expondré tienen su contraparte análoga en las filosofías mencionadas. Aún así, su filosofía se desarrolla en el contexto de la investigación del mundo atómico, que requiere en el momento soluciones a problemas de naturaleza distinta a los que ocupan a los filósofos mencionados. Además, su formación filosófica no es tan completa como para suponerle un conocimiento profundo de los autores que he presentado. Así, aunque no puedan descartarse su influencia en el enfoque de Bohr y en los fundamentos de complementariedad, esto no implica su adhesión a ninguna de las filosofías expuestas.

³²Por ejemplo, Bohr (1928), p. 590; Bohr (1954/1958b), p. 77.

³³Apoyan esta relación, entre otros, Cuffaro (2010), p. 309; Faye (2014), pár. 10; Hooker (1994), pp. 155-156.

³⁴Faye (1991), p. 26.

³⁵*Ibid.*, p. xix.

³⁶Ver capítulo “Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)”.

³⁷Ver sección “Fenómenos y atomicidad”.

³⁸Ver capítulo “Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)”. La relación entre la necesidad de los conceptos clásicos en la descripción del mundo microscópico y la filosofía de Kant es más clara en el caso de Heisenberg, quien manifiesta una postura kantiana al respecto (Henderson, 2010, pp. 5-6). No hay que descartar, por tanto, la posibilidad de que las ideas de Kant influyan a Bohr también a través de Heisenberg, con quien mantiene un contacto cercano (Pais, 1991, pp. 287-289).

1.2. La física cuántica hasta 1927

La física cuántica, objeto principal del pensamiento de Bohr, comienza a desarrollarse en los primeros años del siglo XX. Aunque Bohr está involucrado en este proceso prácticamente desde sus comienzos, no ofrece una exposición de su pensamiento hasta 1927. Esto es comprensible si se tiene en cuenta que, además de las dificultades propias de la materia en cuestión, el primer periodo en el desarrollo de esta es especialmente complicado. En ese periodo se dan cambios muy importantes, lo cual hace difícil que se forme una opinión firme sobre el tema. Así, no es hasta la transición a la mecánica cuántica que hay suficiente base teórica para proponer una interpretación satisfactoria del formalismo y los fenómenos. El objetivo de esta sección es ofrecer una introducción al periodo de 1913 a 1927, así como mostrar el contexto histórico que acompaña a la primera presentación importante de las ideas de Bohr.

Los primeros años de la física cuántica están marcados por tres eventos importantes. El primero de ellos es el análisis de la irradiación de energía del cuerpo negro en términos de “elementos de energía” (posteriormente llamados “cuantos de energía”), llevado a cabo por Max Planck en 1900. Poco después, en 1905, Einstein publica el artículo en que cuantiza la radiación, lo cual conllevará el problema de la dualidad onda-partícula.³⁹ Por último, está la idea del modelo atómico presentada por Rutherford en 1911, que considera el átomo como compuesto de un pequeño núcleo de carga positiva alrededor del cual se mueven los electrones. Es siguiendo el hilo de esta última idea e intentando resolver los problemas que entraña la propuesta de Rutherford, que Bohr elabora su modelo atómico, expuesto por primera vez en la trilogía de artículos “On the Constitution of Atoms and Molecules” de 1913.⁴⁰

El modelo de Bohr introduce una limitación de la física clásica a la hora de dar cuenta de la estructura del átomo. Esta se ve limitada a la descripción del equilibrio dinámico de los estados estacionarios, y es incapaz de decir nada acerca de las transiciones entre los mismos. Sin embargo, hay todavía una relación entre el régimen cuántico y el clásico: se asume que en el límite de números cuánticos grandes (u órbitas electrónicas muy amplias) los resultados de la electrodinámica clásica y de la física cuántica coinciden. Este es el germen de lo que Bohr llamará “principio de correspondencia” en 1920, un principio que puede entenderse como la coincidencia asintótica de los resultados de la física cuántica y de la clásica en el dominio atómico.⁴¹ Este principio será uno de los fundamentos de su pensamiento posterior y una de las herramientas más importantes en el desarrollo de la mecánica cuántica.⁴² La correspondencia es tal que llevará a Bohr a considerar la nueva teoría como una generalización racional de la teoría ordinaria de la radiación, siendo esta relación entre ambas otra de las características de su pensamiento, como se verá más adelante.⁴³

Los artículos de 1913, que le valdrán a Bohr el premio Nobel de 1922,⁴⁴ traen una seria dificultad. Después de leer el manuscrito, Rutherford manifiesta

³⁹Trataré el problema de la dualidad onda-partícula más adelante.

⁴⁰Katsumori (2011), pp. 1-3.

⁴¹Esta es una de las formas de entenderlo, pero aún hay discusión sobre su significado exacto (Bokulich, 2014, párr. 2).

⁴²Bohr (1925), p. 848; Bokulich (2014), párrs. 1-3.

⁴³Katsumori (2011), pp. 3-4.

⁴⁴Pais (1991), p. 214.

a Bohr su preocupación por el problema de la causalidad, ya que en el nuevo modelo no hay ningún mecanismo que indique cuándo ocurren las transiciones electrónicas y adónde salta el electrón. En la misma línea, Einstein se pregunta en 1917 cómo decide el electrón hacia dónde moverse.⁴⁵ Estas reservas hacia las nuevas propuestas de la teoría, que revelan una adhesión al pensamiento clásico, son algo que Bohr está dispuesto a dejar de lado desde el principio, viendo el problema como una solución, como la apertura de un nuevo camino. Este camino consiste en describir los estados estacionarios mediante “símbolos” tomados de la mecánica clásica (relacionados con conceptos como el de las órbitas estacionarias) y abandonar la cuestión del mecanismo de transición entre unos y otros. Esta idea será de gran inspiración para la construcción de la mecánica de matrices de Heisenberg.⁴⁶

Como puede verse, la nueva situación en que se encuentra la física presenta problemas de naturaleza diferente a los que se habían dado anteriormente. Reflejo de ello son las reflexiones que incluye Bohr en sus artículos de 1913, donde puede verse que no se limita a lo que suele aparecer comúnmente en artículos sobre la materia. El corte filosófico de estos, ya presente en los borradores, lleva a una discusión previa a la publicación entre Bohr y Rutherford. En ella pueden contrastarse, por una parte, el espíritu filosófico del primero, muy influyente a la hora de marcar el camino que toma más tarde,⁴⁷ y la actitud del segundo, que estaba más inclinado a dejar de lado las cuestiones filosóficas y centrarse en desarrollar el formalismo. Este rasgo diferenciador, patente desde el principio, será una de las señas de identidad de Bohr de ahí en adelante.⁴⁸

Más tarde, en 1922, los experimentos a favor de la naturaleza corpuscular de la radiación llevados a cabo por Arthur H. Compton avivan otro de los debates característicos de la física cuántica: el de la dualidad onda-partícula. Bohr, al igual que la mayor parte de la comunidad científica anteriormente, no considera satisfactoria la hipótesis de los cuantos de luz, pues supone un problema a la hora de explicar fenómenos de interferencia y excluye la posibilidad de una descripción de la frecuencia ν . En respuesta a esta y otras nuevas dificultades, decide abandonar las representaciones espaciotemporales intuitivas,⁴⁹ sustituyendo su modelo orbital por un complicado mecanismo de campos virtuales. Esta nueva teoría se expone en el artículo conjunto de Bohr, Kramers y Slater (BKS) de 1924, y reduce las conservaciones de energía y momento a leyes estadísticas. No mucho después se demuestra que esto es incorrecto, pues el mismo año Bothe y Geiger presentan evidencias de la conservación exacta de ambas variables.⁵⁰ Sin embargo, la idea del fracaso de la descripción espaciotemporal clásica de la interacción entre materia y radiación seguiría presente en el pensamiento de Bohr, como sugieren ciertos comentarios suyos de 1925.⁵¹

El año 1925 se publica el artículo inaugural de la mecánica cuántica, escrito por Heisenberg. En él se presenta una nueva forma de tratar los sistemas físicos

⁴⁵ *Ibid.*, p. 153.

⁴⁶ Plotnitsky (2013), pp. 18-19.

⁴⁷ *Ibid.*, p. 23.

⁴⁸ *Ibid.*, pp. 18-19.

⁴⁹ Por ejemplo, la representación gráfica de la trayectoria de una partícula, que concuerda con nuestra experiencia cotidiana.

⁵⁰ Plotnitsky (2013), p. 22.

⁵¹ Ver citas en Plotnitsky (2013), p. 23.

inspirada en gran parte por las ideas de Bohr.⁵² Poco después Born, Heisenberg y Jordan completan su trabajo, “On Quantum Mechanics II”, en el que exponen por primera vez los fundamentos de la mecánica cuántica en su forma matricial.⁵³ Estos avances fueron incluidos en el artículo “Atomic Theory and Mechanics”,⁵⁴ que apareció en *Nature* a finales de año y puede considerarse el origen de la idea de la complementariedad.⁵⁵ Este escrito consiste en una reflexión de Bohr sobre el desarrollo de la mecánica cuántica, y en él pueden distinguirse dos partes principales: en la primera ofrece, junto con un resumen de la evolución de la teoría atómica, las ideas que ha elaborado hasta el momento acerca de su interpretación (la insuficiencia de los modelos clásicos, el carácter simbólico de sus representaciones, la dualidad onda-partícula, etc.); en la segunda, en cambio, trata con la mecánica cuántica recién formada y adelanta ciertas características de la descripción más elaborada que dará en Como en 1927. En vista de los éxitos de la nueva teoría, Bohr revisa la perspectiva que había tomado a partir de la anterior y se reafirma en sus ideas. Así, al mismo tiempo que recalca la necesidad de abandonar los modelos mecánicos en el espacio y en el tiempo, recuerda la necesidad de las herramientas clásicas a la hora de formular y aplicar el nuevo formalismo. Heisenberg, que utiliza las ecuaciones clásicas cambiando las variables,⁵⁶ obtiene resultados que muestran una perfecta concordancia con lo que se consigue usando el principio de correspondencia, llegando Bohr a afirmar que “el aparato completo de la mecánica cuántica puede considerarse como una formulación precisa de las tendencias representadas por el principio de correspondencia”. De esta manera, Bohr sostiene a la vez la importancia de lo clásico (implícita en el principio de correspondencia) y la necesidad de una teoría que nos permita llegar a donde la clásica no puede.⁵⁷

Los últimos cambios previos a 1927 ocurren siguiendo al trabajo de Erwin Schrödinger. El físico austriaco, inspirado por la idea de las ondas de materia propuesta por De Broglie en 1925, elabora en 1926 la mecánica de ondas y demuestra que su formalismo es equivalente al de Heisenberg. Además, sostiene que este es superior al otro, pues tiene la ventaja de manejar funciones continuas y visualizables. Bohr, que ve este avance de forma positiva, no comparte la predilección por el nuevo modelo. En contraste con el escepticismo hacia el concepto de cuantos de luz que mostraba en “Atomic Theory and Mechanics”,⁵⁸ ahora reconoce los modelos corpuscular (correspondiente al formalismo de Heisenberg) y ondulatorio (correspondiente al de Schrödinger) como representaciones cuya conveniencia puede variar dependiendo del caso.⁵⁹ La oposición entre Schrödinger, que ve en su teoría la posibilidad de recuperar los ideales clásicos, y Bohr, que no está dispuesto a ceder ante tales interpretaciones, se muestra clara en los debates que los dos mantienen en Copenhague ese mismo año. Estos intercambios serán extremadamente influyentes en la formación del concepto de complementariedad.⁶⁰ Después de este

⁵²Jammer (1966), pp. 196-198.

⁵³Para más detalles, ver Jammer (1966), pp. 196-219.

⁵⁴Bohr (1925).

⁵⁵Jammer (1966), p. 345.

⁵⁶Plotnitsky (2013), p. 23.

⁵⁷Bohr (1925), p. 852.

⁵⁸*Ibid.*, p. 846.

⁵⁹Katsumori (2011), pp. 7-8.

⁶⁰Bohr lo constata en una carta a Alfred Fowler de 1926 (De Gregorio, 2014, p. 73).

evento, Bohr se ve empujado a buscar una interpretación satisfactoria de la situación, partiendo para ello de la dualidad onda-partícula y la lógica interna del formalismo. Heisenberg, al contrario, ve más importante trabajar a partir del formalismo matemático y toma un camino diferente.⁶¹ Cada punto de partida llevará a resultados distintos —aunque relacionados entre sí— a cada científico: el primero, que se marchará a Noruega para meditar sobre la interpretación, desarrolla la complementariedad que luego expondrá en Como;⁶² el segundo obtiene las relaciones de incertidumbre, usando para ello la recién elaborada teoría de transformaciones de Paul Dirac y Pascual Jordan.⁶³

⁶¹Jammer (1966), p. 347.

⁶²*Ibid.*, p. 345.

⁶³Bohr (1928), p. 857; Pais (1991), pp. 298-300.

2. La versión de Como (1927-1928)

La primera exposición de la complementariedad es presentada por Bohr en la conferencia de Como de 1927, en el congreso en que se celebra el centenario de la muerte de Alessandro Volta. Al no haber ninguna transcripción completa de la conferencia, he basado el estudio de la versión de Como en el artículo que publica Bohr en 1928: “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”. Este escrito es tratado por el físico danés como la exposición de lo que ya ha presentado en la conferencia,⁶⁴ aunque se tiene constancia de que existen diferencias entre ambas.⁶⁵ Se ha propuesto que el factor principal que influye en la diferencia entre la versión de 1927 (Como) y 1928 (el artículo) son los intercambios entre Bohr y Einstein.⁶⁶ Sin embargo, siendo el artículo la única fuente fiable disponible, lo trataré como la primera versión de la complementariedad. Así, en esta sección seguiré el artículo mencionado, apoyando la descripción en interpretaciones que se han hecho del mismo.

2.1. Complementariedad

El artículo comienza exponiendo la situación particular en que se encuentra la física como consecuencia de su adaptación a la descripción del mundo microscópico:

- (i) La física clásica —afirma Bohr—, cuyo objetivo es la coordinación espaciotemporal causal de los procesos físicos, depende de la suposición de que una medición no altera el sistema observado de manera significativa. Así, cuando se mide la posición de una partícula se asume que el proceso no produce ningún cambio en ella. Esto es lo que nos permite hablar del objeto como algo independiente del instrumento de medición.⁶⁷
- (ii) De acuerdo con el postulado cuántico, prosigue Bohr, los procesos atómicos están caracterizados por una discontinuidad esencial, simbolizada por el cuanto de acción de Planck.⁶⁸ Esto implica que la medición de un sistema no puede considerarse como un proceso de mera observación, puesto que entre el instrumento y el sistema ocurre una interacción que ya no puede ser ignorada. Esta interacción es irreducible y también incontrolable, lo cual supone una diferencia con respecto a la práctica clásica.⁶⁹ La física clásica podrá aplicarse allá donde este efecto pueda ser despreciado, pero no en el dominio microscópico.
- (iii) Pese a ello, concluye, los conceptos clásicos siguen siendo necesarios para interpretar los experimentos. Nuestro conocimiento del mundo atómico

⁶⁴Bohr (1928), p. 580.

⁶⁵El estudio de De Gregorio (2014) muestra que la exposición de Como es concisa y que contiene solo ideas embrionarias que irá desarrollando hasta darles la forma que toman en el artículo de 1928.

⁶⁶Plotnitsky (2013), pp. 41-42, 59.

⁶⁷Bohr (1928), p. 580.

⁶⁸Dotson (2008), p. 610. Bohr relaciona el postulado cuántico con el descubrimiento del cuanto de acción por parte de Planck, llegando a hablar de él como “el postulado cuántico de Planck”. No obstante, este concepto es suyo y no del físico alemán (Plotnitsky, 2013, p. 46).

⁶⁹Katsumori (2011), p. 13.

se basa en experimentos de colisión, radiación, etc. Por lo tanto, Bohr afirma que las abstracciones de partículas materiales y radiación son necesarias para dar sentido a nuestra explicación de los experimentos.⁷⁰

Estos tres puntos, salvando algunos matices, son los pilares en que se apoyará la interpretación de Bohr durante toda su carrera. La situación paradójica que plantean es la que lleva a Bohr a desarrollar la complementariedad, que tomará formas distintas en las diferentes etapas de acuerdo con la radicalización de su base epistemológica. La versión Como se condensa en el siguiente argumento:

Por un lado, la definición del estado de un sistema físico, como es comúnmente entendido (es decir, en física clásica), exige la eliminación de toda perturbación externa. Pero en ese caso, de acuerdo con el postulado cuántico, cualquier observación será imposible y... los conceptos de espacio y tiempo pierden su sentido inmediato. Por otro lado, si permitimos cierta interacción con instrumentos de medición que no forman parte del sistema para hacer la observación posible, una descripción unívoca del estado del sistema es naturalmente imposible, y queda descartada la causalidad en el sentido ordinario de la palabra. La propia naturaleza de la teoría cuántica nos obliga a considerar la coordinación espaciotemporal y la demanda de causalidad, la unión de las cuales caracteriza a las teorías clásicas, como rasgos exclusivos pero *complementarios* de la descripción, simbolizando la idealización de la medición y la definición, respectivamente. (Bohr, 1928, p. 580)

Puede verse aquí cómo el postulado cuántico lleva a Bohr a descartar el uso de una descripción espaciotemporal causal de cualquier sistema. El problema que plantea es que la definición del estado de un sistema, que en física clásica es el conjunto de coordenadas (posición) y momentos, requiere que el sistema esté cerrado, ya que de estar abierto estaría recibiendo perturbaciones y no podríamos definir su estado. Teniendo el estado definido, las leyes de causalidad regirían la evolución de las coordenadas, con las que podría preverse el resultado de mediciones posteriores. Ahora bien, cualquier observación demanda “abrir” el sistema. Como ya no se puede ignorar el efecto de la medición, esto entraría en conflicto con la evolución causal de las coordenadas, que por otro lado presupone la posibilidad de medirlas.⁷¹ Así, Bohr considera ambos aspectos —coordinación y evolución causal— como incompatibles pero necesarios; dos rasgos *complementarios* de la descripción. Señala que el uso simultáneo de ambos es posible en física clásica debido a la magnitud despreciable del cuanto de acción en comparación con las acciones implicadas en nuestra percepción sensorial ordinaria.⁷²

⁷⁰Bohr (1928), pp. 580, 586. La necesidad de los conceptos clásicos es un punto central del pensamiento de Bohr. Aunque en sus primeras publicaciones no lo desarrolle extensamente, es uno de los pilares centrales de su pensamiento, y me ocuparé de él en la sección “Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)”.

⁷¹De aquí que los conceptos de espacio y tiempo pierdan su sentido inmediato en un sistema cerrado.

⁷²Jammer (1966), p. 351-352.

Este pasaje contiene la primera aparición del término “complementario”,⁷³ y contiene la esencia de lo que pasaría a conocerse como la “interpretación de Copenhague”. Sin embargo, esto último no hay que tomarlo muy estrictamente, ya que todavía hay discrepancias al interpretar lo que Bohr quería decir con “la coordinación espaciotemporal y la demanda de causalidad”. Acerca de esto se forman dos puntos de vista principales:

- Complementariedad circular: según esta perspectiva, la complementariedad relaciona el modo de descripción experimental (coordinación espaciotemporal) y el formal (mediante la ecuación de Schrödinger).⁷⁴ Esta es la interpretación que hicieron en los comienzos físicos como Heisenberg o Dirac.⁷⁵ Es una idea que se desprende de forma natural de la cita mencionada, pues en la última frase relaciona la coordinación espaciotemporal con la medición y la causalidad con la definición.
- Complementariedad paralela: es común presentar la complementariedad como la relación entre la aplicación de las coordenadas espaciotemporales y las leyes de conservación de energía y momento. Por lo tanto, serían los grupos de variables (t, \vec{x}) y (E, \vec{p}) los mutuamente complementarios; es lo que se conoce también como “complementariedad cinemático-dinámica”.⁷⁶ Esta visión es consistente con algunos fragmentos del artículo de 1928, en el que habla de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg como expresiones simbólicas de la complementariedad. Desde este punto de vista, lo que las relaciones ofrecen es un límite cuantitativo a la aplicación simultánea de variables que se relacionan por la complementariedad.⁷⁷ No obstante, en el artículo no se encuentra ninguna evidencia clara que favorezca a la complementariedad paralela. La primera de este tipo es de más tarde en el mismo año, donde dice que su argumento trata de “la naturaleza complementaria de la coordinación espaciotemporal y las leyes de conservación”.⁷⁸

La complementariedad paralela es la que más favorecen las evidencias que se han obtenido: tanto en el informe taquigráfico de la conferencia de Como⁷⁹ y una cita de Bohr de 1928, donde dice que su argumento trata de “la naturaleza complementaria de la coordinación espaciotemporal y las leyes de conservación”.⁸⁰ No obstante, no se puede descartar que las ideas de Bohr no estén aún bien definidas. Si esto fuera cierto, podría considerarse la versión de 1928 Bohr como una transición hacia lo que será la versión de 1929, en la que la complementariedad es definitivamente paralela. En cualquier caso, la exposición es bastante confusa en estos primeros años, lo cual lleva a que se formen interpretaciones muy diversas de la mecánica cuántica. Esta es una de las razo-

⁷³Jammer (1966), p. 351. “Complementariedad” aparece poco más adelante (Bohr, 1928, p. 580), aunque no se define concretamente el significado del término. Para ello hay que esperar hasta 1929.

⁷⁴Camilleri (2007), p. 515.

⁷⁵Plotnitsky (2013), p. 51.

⁷⁶Faye (1994), párr. 19.

⁷⁷Bohr (1928), p. 582.

⁷⁸Citado en Camilleri (2017, p. 516).

⁷⁹De Gregorio (2014), p. 75.

⁸⁰Citado en Camilleri (2017, p. 516).

nes por eso que resulta confuso hablar de una “interpretación de Copenhague”, tratándose de una época en que no hay ningún consenso al respecto.⁸¹

2.2. Otros problemas de interpretación

Apoyándose en la complementariedad, Bohr trata también otros temas importantes en el artículo: la dualidad onda-partícula, la relación entre la física cuántica y la física clásica, la interpretación de la mecánica cuántica (el formalismo) y, por último, el corte.

La dualidad onda-partícula

Bohr intenta resolver el problema de la dualidad onda-partícula, presente ya anteriormente. La solución es similar al caso anterior: al considerar la luz o la materia como ondas y partículas “no estamos tratando con representaciones contradictorias, sino complementarias de los fenómenos, que solo conjuntamente nos ofrecen una generalización racional del modo clásico de descripción”.⁸² Para Bohr, la radiación en espacio libre y las partículas materiales aisladas son abstracciones que hacemos a partir de las evidencias experimentales y son necesarias para entender estas últimas.⁸³

Desde el punto de vista de algunos físicos, la complementariedad onda-partícula es la principal para Bohr en esta época.⁸⁴ Aunque esto sea cuestionable, es cierto que tiene gran importancia en este primer periodo. Esto puede verse en la deducción de las relaciones de incertidumbre, que elabora considerando la naturaleza a la vez corpuscular y ondulatoria de los objetos cuánticos.⁸⁵ Sin embargo, tiene el problema de que ambos aspectos complementarios, onda y partícula, pueden darse en el mismo experimento.⁸⁶ Por lo tanto, no queda claro en qué manera son estos complementarios de la misma forma que la pareja de variables cinemático-dinámicas o la observación y la definición. Es por esto que más tarde Bohr abandonará esta complementariedad tácitamente, conservando solamente la cinemático-dinámica.⁸⁷

Relación entre física clásica y física cuántica

Como se ha podido ver, la teoría cuántica no es considerada como completamente independiente de la teoría clásica; al contrario, la primera es para Bohr una generalización racional de la segunda. Este aspecto de la física cuántica es especialmente manifiesto en sus orígenes, donde la relación formal entre ambas teorías se muestra explícitamente en el uso del principio de correspondencia. Este llevó a aplicar simbólicamente la teoría electromagnética al análisis del átomo, asociando los procesos de transición con armónicos que se deducían de la mecánica ordinaria.⁸⁸ Este carácter simbólico es patente también en la

⁸¹Camilleri (2007), p. 516.

⁸²Bohr (1928), p. 581.

⁸³*Ibid.*

⁸⁴Pais (1991), p. 314.

⁸⁵Bohr (1928), pp. 581-582.

⁸⁶En el experimento de la doble rendija, por ejemplo, el patrón de difracción corresponde al comportamiento ondulatorio y las marcas en la placa fotográfica al comportamiento corpuscular.

⁸⁷Faye (1994), párr. 19.

⁸⁸Ver Jammer (1966, pp. 109-118).

mecánica matricial de Heisenberg, donde se sustituyen las variables ordinarias de las ecuaciones por matrices u operadores.⁸⁹ En ambos casos tenemos un formalismo que surge de la adaptación de la física clásica al dominio microscópico mediante una aplicación simbólica de la primera.

El uso del término “simbólico” enfatiza el hecho de que los valores de las variables no se relacionan directamente con los valores medidos; en la teoría matricial, por ejemplo, las variables son matrices y las relaciones de conmutación contienen números imaginarios ($pq - qp = i\hbar$).⁹⁰ Todo esto apunta a que la nueva teoría hace un uso de las variables clásicas muy diferente al de la teoría anterior, lo cual lleva al problema de la interpretación del formalismo.

La interpretación del formalismo

La interpretación de la mecánica cuántica como simbólica es especialmente conflictiva en el caso de la función de onda de Schrödinger, y todavía hay debate sobre su interpretación exacta. Algunos atribuyen a la interpretación de Copenhague (y, por tanto, a Bohr) el punto de vista de que la función de onda es epistémica, es decir, que representa solamente nuestro conocimiento del sistema. Para los que opinan así, la evolución y el colapso de la misma representarían solo una actualización de la información que tenemos sobre este. Otros, entre los que destaca John von Neumann, ven el estado cuántico como ontológico, como reflejo de lo que hay, de la realidad. Para ellos, el colapso de la función de onda es un proceso real. Sin embargo, también se ha argumentado que la interpretación no es epistémica, puesto que el que sea simbólica significa que representa al sistema de alguna manera, no solo nuestro conocimiento.⁹¹ Por otro lado, tampoco nos permite visualizar la realidad tal y como es, debido a tres razones: es compleja, no es relativista, y el espacio de configuraciones en que se define tiene por lo general más dimensiones que las tres espaciales (esta última razón es la principal).⁹²

Este es un aspecto problemático del artículo, ya que no queda claro qué significa exactamente que ψ “represente simbólicamente” un sistema físico. No se habla de cuál es la naturaleza de aquello que representa ni tampoco de cómo lo representa. No es hasta más tarde que Bohr concreta su punto de vista.⁹³ Aún así, incluso en los artículos de las últimas etapas no da ninguna justificación del significado exacto del término “simbólico”. Como se verá más adelante, enfatiza frecuentemente el uso del formalismo como un instrumento de cálculo de probabilidades. Tomando esto en cuenta, es natural situarlo como defensor de la interpretación epistémica.

El “corte”

Relacionado con el tema anterior, merece también la atención el del “corte”. Bohr dice que “el concepto de observación es arbitrario en tanto depende de qué objetos son incluidos en el sistema que va a ser observado” y que “en última instancia toda observación puede... ser reducida a nuestras percepciones sensoriales”.⁹⁴ Dicho de otra forma, puede considerarse la evolución del estado

⁸⁹Ver Jammer (1966, pp. 196-220).

⁹⁰Bohr (1928), pp. 584-585.

⁹¹Zinkernagel (2016), p. 11.

⁹²Bohr (1928), p. 586; Zinkernagel (2016), p. 11.

⁹³Zinkernagel (2016), p. 11.

⁹⁴Bohr (1928), p. 580.

cuántico del sistema hasta el mismo momento en que el resultado de la medición marcada por el instrumento de observación es percibida por alguien. En ese caso, argumenta Von Neumann, hay que concluir que el colapso de la función de onda ocurre en la consciencia del observador humano.⁹⁵ Esta opinión suele asociarse a la “Interpretación de Copenhague”, y por tanto también a Bohr de manera indirecta. No obstante, la cita anterior de Bohr sigue de la siguiente manera: “La circunstancia ... de que al interpretar observaciones siempre se haya hecho uso de nociones teóricas implica que, para cada caso particular, es una cuestión de conveniencia en qué punto se introduce el concepto de observación, que involucra al cuanto de acción...”.⁹⁶ La cita deja claro que el “corte” no es nunca arbitrario, sino que está determinado por la necesidad de considerar el efecto del cuanto de acción.⁹⁷ Hay que considerar también que, como se ha visto, Bohr no tiene la misma perspectiva que von Neumann acerca del colapso de la función de onda, con lo que el problema es de naturaleza diferente para cada uno de ellos.

Las reacciones que producen estas ideas en su momento son diversas. En un principio, su conferencia de Como coge por sorpresa a físicos como Wigner o Rosenfeld, quienes son incapaces de apreciar la esencia de su contenido y permanecen indiferentes ante ella.⁹⁸ La revista *Nature*, por su parte, manifiesta su descontento con la renuncia de la empresa clásica.⁹⁹ Aún así, el artículo es muy influyente en la formación de una interpretación que muchos físicos apoyarían.¹⁰⁰ Contiene, además, elementos que serán de importancia central en el pensamiento de Bohr pese a los cambios que surgen en este. Ejemplo de esto son la necesidad de los conceptos clásicos y el papel central del postulado cuántico a la hora de limitar lo que podemos decir sobre el mundo microscópico.

Por otra parte, hay características específicas de esta versión que más tarde serán suprimidas o modificadas. Un ejemplo es la complementariedad onda-partícula. También está la ya discutida terminología utilizada, especialmente la referencia a una complementariedad entre la coordinación espaciotemporal y la demanda de causalidad. La coordinación espaciotemporal tiene una relación directa con la observación, puede llevarse a cabo mediante mediciones. La causalidad, sin embargo, es una propiedad del proceso tal y como ocurre, y no queda claro en qué manera accedemos a ella si partimos de que el comportamiento del sistema aislado es imposible de observar.¹⁰¹ Hay también otra cuestión que Bohr no tocará hasta alrededor de 1937: ¿cómo es posible atribuir propiedades físicas a los objetos, incluso si solo es en el momento de la medición, si estas solo son observadas en los instrumentos experimentales? Al fin y al cabo, es a través de las propiedades del instrumento en un momento determinado que inferimos las del objeto. No pudiendo considerar la medición como un proceso de “mera observación”, esta atribución no parece permisible,

⁹⁵Henderson (2010), pp. 3-4.

⁹⁶Bohr (1928), p. 580.

⁹⁷Profundizaré en esto más adelante, en la sección “El experimento y el lenguaje clásico”.

⁹⁸Jammer (1966), p. 354.

⁹⁹Pais (1991), p. 315.

¹⁰⁰Faye (2014), párr. 2.

¹⁰¹Plotnitsky (2013), p. 44. Esta terminología parece sugerir que el comportamiento independiente de los átomos es causal, y es la medición la que rompe con esto. Todavía quedarán residuos de esta idea en exposiciones de 1929, donde se hace referencia a una “ruptura de la cadena causal” (Plotnitsky, 2013, p. 60).

por lo menos no sin una justificación.¹⁰² La evolución de la filosofía de Bohr estará marcada en gran parte por la necesidad de resolver los problemas que presenta esta primera versión.

¹⁰²Plotnitsky (2013), p. 43.

3. Etapa de transición (1929-1935)

Siguiendo a las exposiciones de Como en 1927 y el artículo de 1928, Bohr ofrece en 1929 un nuevo planteamiento de su pensamiento y en especial de la complementariedad. La versión que corresponde a este periodo la expone principalmente en “The quantum of action and the description of nature”,¹⁰³ publicado en 1929, y en “Space-time continuity and atomic physics”, basado en una conferencia dada en Bristol en 1931.¹⁰⁴ El primero es un replanteamiento del artículo de 1928, siguiendo los intercambios con Einstein;¹⁰⁵ el segundo se centra en la exposición de sus ideas mediante el análisis del experimento de la doble rendija. Pese al interés de este último como exposición clara de las ideas de Bohr, esta sección se centrará en “The quantum of action and the description of nature”. La razón es que las ideas que incluye el segundo no van más allá de lo dicho en 1929, que representa el núcleo de lo que será su filosofía hasta después de 1935. Este último año se publica el artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, “Can quantum mechanical description of reality be considered complete?”. El evento supone un punto de inflexión en la filosofía de Bohr, por lo que dedicaré la segunda parte de esta sección a exponer la propuesta de los tres físicos y la respuesta de Bohr.

3.1. Una nueva complementariedad

Como ya he adelantado, uno de los cambios más importantes que surgen a raíz de las conversaciones con Einstein está relacionado con la idea de la causalidad. Mientras que la demanda de causalidad constituye anteriormente uno de los aspectos complementarios de la descripción, Bohr habla ahora de “la renuncia de la causalidad en la descripción mediante la mecánica cuántica”.¹⁰⁶ Estas afirmaciones, junto con otras, dejan ver cómo Bohr deja de considerar la causalidad como parte de la descripción de procesos físicos, incluso cuando estos no son perturbados. Puede verse aquí un paso adelante en el proceso de ruptura con los ideales clásicos, proceso que seguirá avanzando hasta la última etapa de la complementariedad.

Su nueva perspectiva está también marcada por la distinción entre objetos, que no se pueden observar, y fenómenos, definidos como los efectos de la interacción entre los objetos y los instrumentos de medición. La crucial es que solo son observables los fenómenos, en cuya formación juega un papel ineludible el cuanto de acción, cuyo efecto es incontrolable. Por lo tanto, Bohr opina que los objetos mismos no son observables,¹⁰⁷ aunque puedan asignárseles ciertas propiedades por los efectos que estas producen en los instrumentos de medición.¹⁰⁸

¹⁰³A falta de otra fuente más directa, se tomarán fragmentos de este artículo del libro de Katsumori (2011) y Plotnitsky (2013).

¹⁰⁴Plotnitsky (2013), p. 59.

¹⁰⁵Estas discusiones se basan principalmente en intentos de Einstein por demostrar la inconsistencia de la mecánica cuántica, a lo cual Bohr responde señalando las falacias contenidas en sus argumentos (Jammer, 1966, p. 359).

¹⁰⁶Citado en Plotnitsky (2013), p. 61.

¹⁰⁷Plotnitsky (2013), p. 63.

¹⁰⁸Esta distinción entre fenómenos y objetos no es aún la definitiva. La definición última de “fenómeno” la expondrá Bohr en 1938 en Varsovia (Pais, 1991, p. 432). Esta última noción del concepto corresponde, como se verá, a la epistemología radical que tomará Bohr después de EPR.

También cree que el escepticismo que algunos manifiestan con respecto a su existencia va demasiado lejos; según él, las evidencias experimentales ofrecen pruebas suficientes del efecto de átomos individuales.¹⁰⁹ Como los experimentos son siempre del tipo radiación o colisión, Bohr repite desde esta nueva perspectiva que los fenómenos que se manifiestan en ellos son clásicos,¹¹⁰ y al describirlos hay que usar conceptos también clásicos.¹¹¹

Bohr encuentra un problema principal a la hora de describir estos fenómenos. La aplicación de los métodos simbólicos relacionados con los conceptos clásicos depende enteramente de la situación experimental que se plantee: en el caso de la detección de una partícula, se tomarán en cuenta las probabilidades relacionadas con la posición; si se quiere calcular el efecto de una colisión, se calcularán las probabilidades relacionadas con el momento. Sin embargo, no pueden utilizarse ambas para obtener valores exactos de las observaciones, ya que una medición de una variable de un par conjugado hace que perdamos parte de (o toda la) información que teníamos de su pareja. Así, como consecuencia del efecto del cuanto de acción, tenemos que cada disposición experimental nos permite aplicar una de las descripciones complementarias entre sí:¹¹² en este caso, la descripción espaciotemporal o las leyes de conservación de energía y momento.¹¹³ En contraste con la versión anterior, aquí el énfasis está en la influencia del cuanto de acción a la hora de limitar el uso simultáneo de disposiciones experimentales diferentes para analizar un mismo objeto.¹¹⁴ El nuevo planteamiento del problema, con el experimento como factor central, marca la tendencia que seguirá Bohr en los desarrollos subsiguientes de la complementariedad. Esto se ve claramente en el enfoque de la conferencia de 1931, centrada en el experimento de la doble rendija.

Además de presentar la complementariedad de manera diferente, en 1929 Bohr también ofrece una definición del término: este denota “la relación de mutua exclusión característica de la teoría cuántica con relación a la aplicación de varios conceptos e ideas clásicas”.¹¹⁵ También habla de complementariedad expresando que “cualquier aplicación de los conceptos clásicos impide el uso simultáneo de otros conceptos clásicos que en otra circunstancia son igualmente necesarios para la elucidación de los fenómenos”.¹¹⁶ Puede verse cómo hace referencia explícita a los dos aspectos del concepto: complementación y exclusión mutua.¹¹⁷

¹⁰⁹Plotnitsky (2013), p. 63.

¹¹⁰Fenómenos clásicos que son consecuencia de interacciones cuánticas entre objetos e instrumentos de observación (Plotnitsky, 2013, p. 67).

¹¹¹Plotnitsky (2013), pp. 62-63.

¹¹²En el artículo que se está tratando, Bohr sustituye “complementariedad” por “reciprocidad”. Más tarde reconoce el error y para 1931 vuelve al uso de “complementariedad” (Plotnitsky, 2013, p. 61). Al tratarse de un detalle irrelevante, se seguirá usando el término “complementariedad”.

¹¹³Bohr (1929), citado en (Plotnitsky, 2013, p. 68).

¹¹⁴Para un desarrollo extenso de la exclusividad mutua de disposiciones experimentales diseñadas para medir variables complementarias, ver Bohr (1949/1954).

¹¹⁵Citado en Katsumori (2011, p. 17).

¹¹⁶Citado en Katsumori (2011, p. 18).

¹¹⁷Katsumori (2011), p. 18.

3.2. El artículo EPR (1935)

El siguiente evento importante en el desarrollo de la filosofía de Bohr es la publicación del artículo “Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?” en 1935. Este es elaborado por Albert Einstein, Borís Podolski y Nathan Rosen, de ahí que se conozca simplemente como el “artículo EPR”.¹¹⁸ Su principal objetivo es demostrar la incompletitud de la mecánica cuántica.¹¹⁹ Pese a no recibir mucha atención en su momento, el artículo fue motivo de intensos debates a raíz de los artículos publicados por John Bell en 1960.¹²⁰ Además, es especialmente importante en el desarrollo del pensamiento de Bohr, pues la necesidad de responder al argumento presentado por EPR le empujó a desarrollar su filosofía.¹²¹ Aparte de eso, es útil también porque ofrece la oportunidad de ver las ideas de Bohr en contraste con una perspectiva muy diferente a la suya. A continuación expondré el argumento presentado en el artículo y la respuesta de Bohr.

3.2.1. El argumento de EPR

Como punto de partida para la argumentación, EPR consideran que los conceptos de una teoría física tienen que corresponder con la realidad objetiva. Así, plantean su condición de completitud: “todos los elementos de la realidad física tienen que tener su contraparte en la teoría física”.¹²² A continuación, ofrecen un criterio suficiente de realidad: “si podemos predecir con certeza (i.e. probabilidad igual a uno) el valor de una cantidad física sin perturbar de ninguna manera el sistema, entonces existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física”.¹²³ Se considera que este criterio está de acuerdo con las ideas de realidad de la física clásica tanto como de la cuántica.¹²⁴ Ambos supuestos son mantenidos por Einstein durante las discusiones que seguirán a la publicación del artículo.¹²⁵

Apoyándose en las hipótesis mencionadas, comienzan a exponer el argumento. Observan que teniendo dos variables inconmutables, es imposible conocer el valor de una con precisión sin perder toda la información relativa a la otra. Basándose en los criterios anteriores deducen que “(1) la descripción de la realidad dada por la mecánica cuántica es incompleta o (2) cuando los operadores correspondientes a dos cantidades físicas no conmutan, las dos cantidades no pueden tener realidad simultánea”.¹²⁶

A partir de este punto, plantean una reducción al absurdo: suponen que (1) no se cumple, es decir, que la mecánica cuántica sí ofrece una descripción completa de la realidad. Si lo anterior es cierto, el estado cuántico de un sistema contiene toda la información posible sobre este. Consideran entonces

¹¹⁸Como abreviación, se usará “artículo EPR” como sustituto de “Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?”, y “EPR” para hacer referencia a los autores “Einstein, Podolski y Rosen”.

¹¹⁹Plotnitsky (2013), p. 107.

¹²⁰*Ibid.*

¹²¹Katsumori (2011), p. 27.

¹²²Einstein, Podolski y Rosen (1935), p. 777.

¹²³*Ibid.*, p. 777.

¹²⁴*Ibid.*, p. 778.

¹²⁵Katsumori (2011), p. 114.

¹²⁶Einstein *et al.* (1935), p. 778.

dos sistemas, I y II, que son separados después de haber interactuado durante un tiempo. Una vez estos están separados, se pueden medir la posición o el momento del sistema I.¹²⁷ Si se mide la posición, la función de onda colapsa en una autofunción de esta, de manera que la posición del sistema II queda completamente determinada, siendo su valor el autovalor correspondiente. En cambio, si se mide el momento, es el momento del sistema II el que queda determinado. Por lo tanto, los estados cuánticos del sistema II correspondientes al resultado de las dos mediciones son diferentes entre sí. Aquí entra en juego la demanda de localidad:¹²⁸ una medición en el sistema I no puede afectar instantáneamente al sistema II, por lo que descartan cualquier interacción entre ambos. Concluyen que, como no ha habido interacción de ningún tipo, al sistema II no debería afectarle el que se midiera la posición o el momento sobre el I. Por lo tanto, “*es posible asignar dos funciones de onda diferentes [una autofunción de momento en un caso y de posición en el otro] a la misma realidad (el segundo sistema tras la interacción con el primero)*”.¹²⁹

El argumento ha llegado al punto de demostrar que si (1) se cumple, entonces podemos asociar autofunciones de momento y de posición al mismo sistema. Aplicando ahora el criterio de realidad, a cada uno de ellos le correspondería una realidad diferente, ya que el estar en una autofunción implica que el único valor posible del operador correspondiente es el autovalor asociado. Esto equivale a negar la opción (2), con lo que se llega a que la negación de (1) implica la negación de (2), la única alternativa restante. De aquí se concluye que la descripción de la realidad dada por funciones de onda no es completa, ya que se ha llegado al absurdo de descartar las dos únicas opciones.¹³⁰

Desde el punto de vista de EPR, la teoría cuántica es correcta en la medida en que nos permite hacer predicciones con certeza acerca de ciertas variables físicas. Además, como consecuencia de esto y del criterio de realidad, opinan que nos permite afirmar la existencia de estas variables como elementos de realidad. El defecto que tiene, según los autores del artículo, es que no puede predecir el valor de todos los elementos de realidad al mismo tiempo, por lo que consideran la teoría como incompleta.¹³¹

3.2.2. La respuesta de Bohr

En palabras de Bohr, el argumento de EPR es “notable por su lucidez y por su carácter aparentemente incontestable”.¹³² Aún así, opina que la argumentación presentada no hace justicia a la nueva situación en la que se encuentra

¹²⁷Es importante notar que, tanto en el argumento de EPR como en el de Bohr, se supone que las mediciones de una sola variable se pueden llevar a cabo con un grado de precisión ilimitado. Las mediciones que se consideran están idealizadas de manera que dan valores sin error (Plotnitsky, 2013, pp. 114-115).

¹²⁸La localidad, tomada de la teoría de la relatividad, se refiere aquí a la exigencia de que ningún efecto se propague más rápido que la velocidad de la luz. La demanda de localidad es la demanda del acuerdo entre la teoría cuántica y la relatividad especial (Plotnitsky, 2013, p. 110). Este punto es común a EPR como a Bohr, aunque pueda argumentarse que en la prolongación de la discusión Einstein malinterpreta al físico danés como sosteniendo lo contrario (Plotnitsky, 2013, p. 111).

¹²⁹Einstein *et al.* (1935), p. 779.

¹³⁰*Ibid.*

¹³¹Plotnitsky (2013), p. 115.

¹³²Citado en (Plotnitsky, 2013, p. 114).

la física al tratar el dominio atómico.¹³³ Dice que aunque la nueva teoría no cumpla la expectativas de ofrecer una descripción completa al estilo clásico, “aparecería *dentro de su ámbito* como una descripción completamente racional de los fenómenos físicos”.¹³⁴ La caracterización de este “nuevo ámbito” es lo que marca el argumento de la respuesta, basado en la complementariedad y la epistemología de 1929.¹³⁵

El objetivo principal del ataque de Bohr es el uso del concepto de “realidad física” que hacen los autores del artículo anterior. Ellos mismos afirman que “los elementos de la realidad física no pueden ser determinados por consideraciones filosóficas *a priori*, sino que han de encontrarse recurriendo a los resultados de experimentos y mediciones”.¹³⁶ Sin embargo, Bohr opina que consideran el problema sin tomar en cuenta que su misma naturaleza podría excluir la posibilidad de ser tratado de manera análoga a lo que haya podido verse en física clásica. Más aún, defiende que la paradoja expuesta por EPR “revela solamente lo inadecuado de la perspectiva común de la filosofía natural para dar una explicación racional de los fenómenos físicos del tipo que concierne a la mecánica cuántica”.¹³⁷

Para Bohr, la cuestión importante en este caso es cómo puede aplicarse el concepto de posición o el de momento de una manera unívoca. En el caso del artículo de EPR, la situación se plantea como una elección entre obtener información sobre una variable u otra, sin considerar las implicaciones de la elección. No obstante, Bohr no opina que se trate de una decisión arbitraria, sino que depende esencialmente de la disposición experimental que se esté utilizando. Sostiene que el único caso en que podemos darle sentido a una afirmación como “el sistema I tiene un momento p ” es cuando esta propiedad física se manifiesta en el experimento. No considera suficiente, como se hace en el artículo EPR, argumentar partiendo de que podría haberse medido. Esto —prosigue Bohr— puede hacerse en física clásica solo porque el papel del instrumento de medición es despreciable. Subraya la diferencia principal de la física cuántica: la interacción entre instrumento y sistema no es despreciable ni controlable, por lo que hay que considerar su influencia en las posibilidades de medición y también definición de variables.¹³⁸

En este caso, el momento y la posición son dos variables que no pueden medirse simultáneamente, y cualquier medición de una nos fuerza a descartar la información que teníamos de la otra.¹³⁹ Siendo así, las mediciones que se plantean en EPR son mutuamente exclusivas.¹⁴⁰ De aquí Bohr infiere que en la “libre elección” de la medición¹⁴¹ planteada en el artículo EPR nos encontramos

¹³³Bohr (1935), p. 696.

¹³⁴*Ibid.*

¹³⁵Plotnitsky (2013), p. 72.

¹³⁶Einstein *et al.* (1935), p. 777.

¹³⁷Bohr (1935), p. 697.

¹³⁸*Ibid.*, p. 699.

¹³⁹Bohr plantea un ejemplo para ilustrar el caso en el mismo artículo (Bohr, 1935, pp. 697-699).

¹⁴⁰Bohr (1935), p. 699.

¹⁴¹Esta se refiera a la posibilidad de medir, una vez hayan sido separados los dos sistemas, tanto el momento como la posición del primero. Podría argumentarse que la imposibilidad de medir momento y posición simultáneamente se salva preparando dos pares EPR (este es el nombre que se da al conjunto de sistemas I y II) idénticos. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que en la preparación de un sistema se dan las mismas limitaciones que

ante una “*discriminación entre diferentes procedimientos experimentales que permiten el uso unívoco de conceptos clásicos complementarios*”.¹⁴² Teniendo esto en cuenta, concluye que hay una ambigüedad en el uso del criterio de realidad cuando se refiere a predecir una variable “sin perturbar el sistema”.

Bohr está de acuerdo con EPR en que al realizar una medición sobre el sistema I no se está ejerciendo ninguna perturbación mecánica sobre el sistema II.¹⁴³ Aún así, no coincide con la conclusión que Einstein y sus colaboradores deducen de ello. Según él, la cuestión trata de “*una influencia en las condiciones mismas que definen los tipos de predicción posibles en lo que respecta al comportamiento futuro del sistema*”.¹⁴⁴ Para Bohr, el uso unívoco del formalismo es el que se da dentro de una situación experimental clásicamente descrita, en la que las reglas estadísticas permiten predecir el resultado de la observación de una magnitud dada.¹⁴⁵ Como esta situación no nos permite definir la magnitud conjugada, sostiene que no podemos achacarle al formalismo el ser incompleto por no incluirla en la descripción. De ahí que la mecánica cuántica sea completa en su ámbito.¹⁴⁶

La discusión que se desarrolla alrededor del artículo EPR enfrenta a Bohr con una postura marcadamente realista. El físico realista defiende que las teorías de la física reflejan la realidad,¹⁴⁷ y esta hipótesis es el punto de apoyo del argumento que presentan Einstein, Podolski y Rosen. El enfrentamiento con este punto de vista es crucial en el desarrollo del pensamiento de Bohr, ya que lo obliga a clarificar su epistemología. Esto incluirá, como podrá verse, definir el concepto de fenómeno y plantear una interpretación de la física cuántica que podría clasificarse como antirrealista.

en la medición de una variable. Consecuencia de ello es que, por lo general, dos sistemas igualmente preparados se comportan de manera diferente (Plotnitsky, 2013, p. 123).

¹⁴²Bohr (1935), p. 699.

¹⁴³Probablemente, la razón por la que EPR plantean en este experimento es que la ausencia de interacción mecánica entre los sistemas parece permitir ignorar el rol de los instrumentos (Plotnitsky, 2013, p. 118).

¹⁴⁴Bohr (1935), p. 700.

¹⁴⁵*Ibid.*, p. 701.

¹⁴⁶En cuanto al aspecto formal, la interpretación de Bohr aquí descrita es compatible con los teoremas de Bell y de Kochen-Specker enunciados en la década de los 60 (Plotnitsky, 2013, p. 113).

¹⁴⁷Favrholdt (1994), p. 84; Faye (1994), p. 99). Esta definición del realismo no es compartida por todos los autores. Henry Folse (1994, p. 119), por ejemplo, presenta otra distinción entre realismo y antirrealismo. La que uso aquí y expandiré más tarde es la mencionada, pues sirve mejor para diferenciar las posturas de Bohr y otros físicos como Einstein. Los aspectos realistas del artículo EPR corresponden a las premisas del razonamiento expuesto.

4. Cambios posteriores a EPR (1936-1949)

La última etapa en el desarrollo de la complementariedad comienza después de la discusión expuesta en el capítulo anterior. El primer artículo que publica Bohr en este periodo es “Complementarity and Causality”, de 1937. Sin embargo, puede tomarse como fecha de comienzo 1936, que es cuando Einstein publica “Physics and Reality”, artículo que trata sobre el mismo tema que el de EPR y al que Bohr hará referencia más tarde.¹⁴⁸ La fecha del final del desarrollo no está clara; en lo que hay acuerdo es en que la exposición de la complementariedad presentada en “Discussions with Einstein” de 1949 es la mejor y la más completa.¹⁴⁹ A partir de ese año, el tema más recurrente en sus artículos es la objetividad, que plantea de una manera más clara y extensa. No obstante, el tema no supone un cambio sustancial en la complementariedad, por lo que presentaré aquí la forma definitiva de esta.¹⁵⁰

Lo más destacado de esta versión es la radicalización de la epistemología de Bohr, marcada por la definición de “fenómeno”. Ya se ha visto en otro apartado cómo la distinción entre objeto y fenómeno empieza a verse desde 1929, pero esta no llega a definirse claramente. Aunque el primer paso hacia la caracterización completa de los fenómenos se da en 1937, es en “The Causality Problem in Atomic Physics” (1938) cuando se expone por primera vez el nuevo concepto junto con una de sus propiedades esenciales, la “atomicidad”.¹⁵¹ Es de destacar también el énfasis en la causalidad, que es otro de los temas que ocupan a Bohr en esta época.

4.1. Fenómenos, atomicidad y causalidad

La palabra “fenómeno”, en el lenguaje ordinario, se refiere simplemente a “lo que se nos manifiesta”. Ignorando el papel de la observación en esta manifestación, es común identificar “lo que se nos manifiesta” con “lo que hay”. Así, la medición de un atributo físico puede considerarse como indicador de la posesión del atributo por el objeto estudiado.¹⁵² Lo crucial en física cuántica, como consecuencia de no poder ignorar el cuanto de acción, es para Bohr la “*imposibilidad de la separación entre el comportamiento de los objetos atómicos y la interacción con los instrumentos de medición que sirven para definir las condiciones en que fenómenos se manifiestan*”.¹⁵³ Por lo tanto, considera ambiguo atribuir propiedades físicas a los objetos, puesto que estas nunca se ven en ausencia de la interacción con los instrumentos.¹⁵⁴ Para eliminar esta ambigüedad, Bohr define el nuevo concepto de fenómeno como referido exclusivamente a “las observaciones obtenidas en situaciones específicas, incluyendo

¹⁴⁸Plotnitsky (2013), p. 137.

¹⁴⁹Pais (1991), p. 428; Plotnitsky (2013), p. 137.

¹⁵⁰Katsumori (2011, p. 83) sostiene que hay un cambio significativo a partir de 1950, pero este puede tomarse como implícito en las exposiciones anteriores. Las aclaraciones de esta última etapa servirán para fundamentar mejor la opinión de Bohr acerca de la necesidad de los conceptos clásicos; me ocuparé de esto en el siguiente capítulo.

¹⁵¹Pais (1991), p. 432; Plotnitsky (2013), pp. 137-138.

¹⁵²Por ejemplo, una marca en una placa fotográfica como indicadora de la posesión de esa posición por un electrón en un momento dado.

¹⁵³Bohr (1949/1958a), p. 40.

¹⁵⁴*Ibid.*

una descripción de toda la disposición experimental”.¹⁵⁵ Así, reconoce explícitamente el papel de los instrumentos en la constitución de los fenómenos y se evitan problemas como los planteados por EPR. Los fenómenos se definen entonces como una “correlación” entre instrumento y objeto; a este aspecto Bohr lo llamará más tarde “wholeness”, en referencia a la inseparabilidad entre ambos.¹⁵⁶ Los “objetos en sí” y los procesos físicos que subyacen a los fenómenos, al ser completamente inaccesibles a nosotros, son para Bohr inconcebibles e imposibles de visualizar.¹⁵⁷

Una propiedad importante que atribuye Bohr a los fenómenos cuánticos es la “atomicidad”, que se refiere a su indivisibilidad. Es precisamente esta propiedad la que más claramente expresa la necesidad de la complementariedad, entendida ahora de una manera diferente:

... la individualidad de los efectos cuánticos típicos encuentra su expresión apropiada en la circunstancia de que cualquier intento de subdividir los fenómenos demandará un cambio en la disposición experimental, introduciendo nuevas posibilidades de interacción entre objetos e instrumentos de medición que en principio no pueden ser controladas. Como consecuencia, las evidencias obtenidas en condiciones experimentales diferentes no pueden ser comprendidas en una sola descripción, sino que tienen que ser consideradas *complementarias* en el sentido de que solo la totalidad de los fenómenos agota la información posible sobre los objetos.¹⁵⁸

Ahora la complementariedad fundamental es la que existe entre fenómenos que aparecen bajo circunstancias mutuamente exclusivas. Desde este punto de vista, cada tipo de fenómeno nos aporta un tipo de información sobre el sistema que solo puede combinarse con otras respetando las limitaciones impuestas por las relaciones de *indeterminación*¹⁵⁹ de Heisenberg. Para Bohr, estas relaciones se aplican ahora a los fenómenos, es decir, a lo registrado, a los resultados de las observaciones.¹⁶⁰

Mediante esta concepción de los fenómenos como elementos atómicos puede verse la razón por la que Bohr abandona la complementariedad onda-partícula. El comportamiento de onda o de partícula corresponde a un conjunto de fenómenos,¹⁶¹ a los que se asocian distribuciones probabilísticas. Estas pueden compararse con ondas en caso de que se den interferencias o a partículas si estas no se dan. Sin embargo, cada uno de estos fenómenos es “cerrado” y sobre

¹⁵⁵ *Ibid.*, p. 64.

¹⁵⁶ Plotnitsky (2013), p. 145.

¹⁵⁷ *Ibid.*, p. 141-142.

¹⁵⁸ Bohr (1949/1958a), p. 40.

¹⁵⁹ El cambio de “incertidumbre” a “indeterminación”, que vemos en (Bohr, 1949, p. 39) y en el resto del artículo, es consistente con la imposibilidad de atribuir cualidades a los objetos. No puede hablarse de incertidumbre, pues en ningún caso podrían conocerse las variables que aparecen en las relaciones.

¹⁶⁰ Plotnitsky (2013), pp. 143-144.

¹⁶¹ En el experimento de la doble rendija, por ejemplo, se habla de comportamiento ondulatorio cuando las dos rendijas están abiertas, y de compartamiento de partícula cuando solo una de ellas lo está. No obstante, los fenómenos individuales (puntos en la placa fotográfica) son iguales en los dos casos, y considerándolos por separado no podría saberse a qué disposición corresponden.

el proceso del que emerge no puede decirse nada.¹⁶² El formalismo no aporta información sobre este último; lo que nos da son predicciones estadísticas acerca de los fenómenos.¹⁶³

Como puede notarse, la epistemología que desarrolla Bohr después de EPR es mucho más radical que la anterior. De acuerdo con esta, fenómenos y objetos pertenecen a dos dominios diferentes; podemos acceder al primero, pero no al segundo. Como consecuencia de esto, la atribución de cualquier propiedad a un objeto tanto antes, después, como durante la medición se vuelve ambigua. Además, la consideración de la indivisibilidad de los fenómenos lleva a Bohr a replantear la complementariedad. En esta última versión, esta se refiere a grupos de fenómenos que se manifiestan en condiciones experimentales incompatibles, siendo todos ellos necesarios para agotar la información disponible acerca de los objetos microscópicos. Asimismo, cualquier referencia a objetos o partículas elementales se justifica únicamente por la posibilidad de agrupar conjuntos de fenómenos con propiedades similares.

En esta etapa destaca también en el énfasis en la causalidad. Bohr argumenta que esta idea, central en física clásica, no puede aplicarse al dominio atómico. La razón es que la situación epistemológica presentada impide hablar del comportamiento autónomo de los objetos, condición necesaria para que pueda darse la causalidad en la descripción.¹⁶⁴ Esto nos impide unir los conceptos clásicos en una sola descripción causal, como ocurre en las teorías de Newton y Maxwell. La necesidad de caracterizar la nueva relación entre los conceptos es lo que lleva a Bohr a formular la complementariedad, que considera “una generalización racional de la idea de la causalidad”,¹⁶⁵ en otras palabras, una adaptación del ideal clásico a la situación que se da en la descripción del mundo microscópico.

4.2. Bohr como filósofo antirrealista.

Con estos últimos cambios, la epistemología de Bohr toma su forma más radical, situándolo en el polo opuesto a Einstein. Como mencionaba al final del capítulo anterior, la filosofía de este último se caracteriza por su realismo, es decir, la convicción de que las teorías físicas correctas describen la realidad tal y como es. La visión de Bohr aquí presentada no es compatible con esta idea: si los fenómenos que estudia la ciencia son cerrados, no se puede obtener

¹⁶²Plotnitsky (2013), p. 140.

¹⁶³En el texto, Bohr dice que “la interpretación física apropiada del formalismo simbólico de la mecánica cuántica equivale *solo* a predicciones, de carácter estadístico o determinado, correspondientes a fenómenos individuales que aparecen bajo condiciones definidas mediante conceptos clásicos” (Bohr, 1949/1958a, p. 64). Aunque haga referencia a un formalismo simbólico, esta cita apoya la interpretación de Bohr como defensor de la interpretación epistémica de la función de onda. Este tipo de pasajes hacen difícil situar a Bohr en una postura concreta al respecto, como ya decía en el capítulo dedicado a la versión de Como.

¹⁶⁴Plotnitsky (2013), pp. 151-152) llega a afirmar que, para Bohr, la causalidad no se pierde solo en los fenómenos, sino también en los “objetos en sí”. Esto sería consecuencia de la completa inaccesibilidad de estos, que imposibilita incluso su concepción; de ser causales podrían pensarse, al menos parcialmente. Aunque el argumento pueda ser válido, no se da ninguna referencia que muestre que Bohr haya sostenido esto. De sus escritos de 1938 y 1949 solo se puede concluir que la causalidad se pierde en nuestra toda descripción unívoca de los procesos microscópicos.

¹⁶⁵Bohr (1949/1958a), p. 41

de estos ninguna información sobre el comportamiento independiente de los objetos. Así, las teorías que se desarrollen no podrán ser reflejo de una realidad independiente.

Esta postura sitúa a Bohr como opuesto a muchos físicos en el debate sobre el realismo. Pueden distinguirse los distintos puntos de vista al respecto de la siguiente manera:¹⁶⁶

- (i) Los realistas asumen que (1) existe un mundo independiente de nuestra mente; (2) nuestra noción de “verdad” es un concepto no epistémico, es decir, que una afirmación sea cierta no depende de nuestra capacidad de establecer si lo es o no.
- (ii) Los antirrealistas sostienen que (1) la verdad sí es un concepto epistémico; algunos defienden que (2a) no hay un mundo independiente de la mente (antirrealismo subjetivo), mientras que otros mantienen que (2b) sí que existe un mundo independiente de la mente (antirrealismo objetivo).

Tomando en cuenta las ideas que expone Bohr en 1949, se le puede clasificar como antirrealista objetivo. No es antirrealista subjetivo porque en ningún momento pone en duda la existencia de las partículas atómicas, lo cual supondría un escepticismo que ya pone en duda en 1929.¹⁶⁷ Esta clasificación sitúa la interpretación de la física cuántica de Bohr en oposición a las de otros físicos, que incluyen elementos claramente realistas. Como ejemplo de estas últimas pueden citarse, además de la de Einstein: la alternativa realista y determinista de Bohm, basada en una reformulación del formalismo de Schrödinger con variables ocultas,¹⁶⁸ y la teoría de la observación de John Von Neumann, más tarde desarrollada por Fritz London y Edmond Bauer.¹⁶⁹

La discusión del debate sobre el realismo aclara también otro aspecto importante de su filosofía: el rechazo de lo que se conoce como “God’s-Eye View”.¹⁷⁰ Esta última noción puede identificarse con la “inteligencia externa” planteada por Pierre Simon Laplace en 1820. Laplace plantea una “inteligencia universal” capaz de conocer los momentos y posiciones de todas las partículas del universo, con lo que podría calcular el estado del universo en cualquier momento, pasado o futuro. Este experimento mental es, para Bohr, un error. Si el ente omnisciente que se plantea es parte del Universo, tiene el problema de que no puede calcular sus propios estados; en cambio, si no es parte del Universo, surge la pregunta de cómo obtiene la información sin interactuar con él. Bohr critica la noción de este ente, conocido también como “último sujeto”, en el siguiente pasaje:¹⁷¹

Aparte del hecho de que semejante [inteligencia externa] no sería capaz de comunicarse con nosotros y aparte del problema de cómo un observador como ese sería capaz de mantenerse informado

¹⁶⁶El criterio expuesto es el de Faye (1994), pp. 97-98.

¹⁶⁷Aunque la complementariedad expuesta en esta última etapa sea consistente con una filosofía antirrealista objetiva, esto no significa que Bohr se reconociera a sí mismo como tal en ningún momento. He situado la postura de Bohr en el debate sobre el realismo para aclarar las diferencias más importantes entre él y otros físicos.

¹⁶⁸Goldstein (2016), párrs. 31-32. Ver también Faye (1994), p. 111-112; Cushing (1998), pp. 334-337.

¹⁶⁹Henderson (2010), pp. 2, 4.

¹⁷⁰Favrholdt (1994), p. 77.

¹⁷¹*Ibid.*, pp. 89-90.

sin interferir con el curso de los fenómenos (muy problemático), debemos sostener que por ciencia —especialmente como nos lo ha enseñado la física— entendemos la posibilidad de recolectar observaciones humanas y nuestras posibilidades de ordenarlas.¹⁷²

Aquí puede verse el error que comete Laplace según Bohr. A lo largo de su carrera, menciona repetidamente que "... somos espectadores y actores en el gran drama de la existencia".¹⁷³ Sostiene, como consecuencia de ello, que no tiene sentido comparar nuestro conocimiento con uno que se obtenga "desde fuera"; cuando se habla de conocimiento hay que tomar en cuenta la posición epistemológica desde la que este se obtiene. Esto está estrechamente relacionado con el concepto de fenómeno que presenta en 1938: si los fenómenos son producto de una interacción que no se puede analizar, el conocimiento que obtenemos depende de nuestra condición de "actores" tanto como la de "espectadores".

Las consecuencias epistemológicas del análisis de la observación científica de Bohr lo llevan a replantear y limitar el papel de la física. Su enfoque epistemológico puede reflejarse mediante la cita siguiente: "Es incorrecto pensar que la tarea de la física es descubrir cómo *es* la naturaleza. A la física le concierne lo que podemos *decir* sobre la naturaleza".¹⁷⁴ Así, Bohr aparta las cuestiones ontológicas del ámbito de la física y le da a esta un papel más pragmático.¹⁷⁵

4.3. La versión definitiva de la complementariedad

En el artículo de 1949 Bohr expone su pensamiento y las discusiones con Einstein en retrospectiva, a la luz de su última filosofía. Sin embargo, no reconoce en ningún momento que haya habido transformaciones en su pensamiento, lo cual esconde todo el desarrollo histórico que he expuesto. Tomando en cuenta los cambios que ha experimentado su filosofía hasta este punto, se puede resumir la última versión de esta en los siguientes puntos:

- (i) Los conceptos clásicos son necesarios para la comunicación de los resultados experimentales y la descripción de los fenómenos cuánticos.¹⁷⁶
- (ii) El descubrimiento empírico del cuanto de acción requiere una revisión del uso de los conceptos clásicos, ya que estos no pueden aplicarse simultáneamente. Su aplicación no es problemática en la región en que la magnitud del cuanto de acción es despreciable; en el dominio atómico, no obstante, la atribución de propiedades físicas a objetos independientemente de los instrumentos está mal definida. La situación exige limitar el uso de los conceptos clásicos para aplicarlos solo a los fenómenos, entendidos como resultado de la interacción irreducible e incontrolable entre objeto e instrumento.

¹⁷²Bohr (1957), citado en Favrholt (1994, p. 89).

¹⁷³Citado en Plotnitsky (2013, p. 162).

¹⁷⁴Petersen (1963), p. 12. La cuestión de qué es lo que podemos decir y cómo podemos decirlo según Bohr la elaboro en el capítulo "Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)".

¹⁷⁵Pragmático en el sentido expresado por William James.

¹⁷⁶Reconstruiré el argumento en que se apoya esta afirmación en el capítulo que corresponde a la etapa siguiente: "Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)".

- (iii) Pese a la inaccesibilidad de los objetos, estos tienen que ser reales. Los átomos no son construcciones heurísticas ni lógicas, sino la causa necesaria de los efectos que se observan en los instrumentos de medición.
- (iv) Objeto e instrumento tienen que estar separados en la descripción. El primero lo describe la mecánica cuántica y el segundo lo describe la clásica. La separación entre ambos, sin embargo, no es tan sencilla como la distinción entre lo macroscópico y lo microscópico; son solo las partes del instrumento que sirven para definir las variables a medir las que son definidas clásicamente.¹⁷⁷
- (v) El formalismo de la mecánica cuántica no ofrece una descripción pictórica de los procesos, y la función de onda no representa ninguna realidad. Esta última es de carácter simbólico, y sirve para predecir resultados de mediciones de variables como momento o posición.
- (vi) La adscripción de variables físicas a objetos cuánticos tiene que apoyarse en el contexto experimental en que se dan los fenómenos, que provee las condiciones para su definición y aplicación. Estos fenómenos son complementarios, puesto que sus manifestaciones dependen de disposiciones experimentales mutuamente exclusivas, pero solo su conjunto agota toda la información disponible sobre el objeto.¹⁷⁸

¹⁷⁷Ver sección “El experimento y el lenguaje clásico”.

¹⁷⁸Faye (2014), párrs. 21-22.

5. Última etapa: objetividad y conceptos clásicos (1954-1962)

A partir del año 1949 no hay ningún cambio significativo en la filosofía de Bohr. El interés de este periodo está en el énfasis que Bohr pone en la objetividad en sus publicaciones de 1954 en adelante.¹⁷⁹ Aunque este es un tema que ya estaba presente en periodos anteriores y su elaboración no cambia aquí sustancialmente, su exposición se vuelve más extensa y completa, reflejando así su relevancia para la complementariedad. Esto es natural, ya que la tesis de Bohr sobre la objetividad es la base lógica de su filosofía.¹⁸⁰

Como mostraré en esta sección, la objetividad es la base de lo que se conoce como la doctrina de los conceptos clásicos de Bohr, pilar fundamental de la complementariedad. Pese a la insistencia de Bohr en la necesidad de los conceptos clásicos para interpretar los fenómenos, este es uno de los aspectos más problemáticos de su filosofía y una de las razones por la que esta es comúnmente malinterpretada.¹⁸¹ El ejemplo que mejor ilustra la reacción que producen los argumentos de Bohr en parte de la comunidad científica se encuentra en la carta que le escribe Schrödinger en 1935:

Tiene que haber una razón clara y definida por la que declares repetidamente que uno *debe* interpretar las observaciones clásicamente, que esto yace en su esencia... Tiene que ser parte de tus convicciones más profundas, y no puedo entender en qué lo fundamentas.¹⁸²

El problema de Schrödinger está comprensible, puesto que de la lectura de los textos de Bohr no se desprende claramente una razón en contra del uso de un nuevo marco conceptual. Uno puede preguntarse, como hace Schrödinger, si no sería posible encontrar una nueva forma de entender los fenómenos cuánticos que no tenga las limitaciones que tienen los conceptos clásicos en la complementariedad. Para entender la postura de Bohr hay que relacionar la doctrina de los conceptos clásicos con la objetividad, y esa es la razón por la que he incluido la primera en esta etapa. A continuación utilizaré los textos de Bohr de esta última etapa para desarrollar su tesis sobre la objetividad y reconstruir el argumento que lleva a la necesidad de los conceptos clásicos.

5.1. Objetividad, univocidad y lenguaje.

La importancia de la objetividad para Bohr va más allá de su papel en la complementariedad. Afirma, por ejemplo, que "... lo característico de las llamadas ciencias exactas es, en general, el intento de conseguir la unicidad evitando toda referencia al sujeto perceptor".¹⁸³ Esto quiere decir que tienen que ser objetivas, pues la objetividad consiste para Bohr en ausencia de referencia al sujeto perceptor.¹⁸⁴ Cómo conseguir esta objetividad es la primera

¹⁷⁹Plotnitsky (2013), p. 167.

¹⁸⁰Howard (1994), p. 204

¹⁸¹Camilleri and Schlosshauer (2015, p. 75).

¹⁸²Citado en Howard (1994, p. 201).

¹⁸³Citado en Favrholt (1994, p. 79).

¹⁸⁴Bohr (1958d), p. 3.

preocupación filosófica que ocupa a Bohr, antes incluso que cualquier consideración sobre la física.¹⁸⁵

Para la mayoría de los físicos contemporáneos a Bohr, la base de la objetividad es la independencia mutua entre el científico y su objeto de investigación. Un representante notable de esta opinión es Planck, quien opina que este es un requisito necesario para librar a una ciencia de cualquier referencia a individuos particulares. Para ello, no solo exige que el mundo externo exista independientemente de si se observa o no, sino también que exista en la manera en que se observa y como algo independiente a nosotros. Esta independencia metafísica tiene como condición necesaria el *principio de separabilidad*,¹⁸⁶ formulado por Einstein. Este principio afirma que todos los sistemas físicos separados en espacio y tiempo tienen un estado físico intrínseco que puede definirse de forma separada al del resto de sistemas. Es evidente que si no se cumple esta condición, la independencia metafísica en el sentido más amplio tampoco se cumplirá.¹⁸⁷

Para Bohr, la independencia física que propone Einstein no está justificada. Opina que el descubrimiento del cuanto de acción revela una cualidad de “wholeness” en los procesos atómicos, es decir, la imposibilidad de concebir cada una de las partes del fenómeno de manera separada.¹⁸⁸ Así, nuestra descripción de la realidad nunca podría coincidir con la de un mundo externo independiente a nosotros y que existe en la manera en que lo concebimos, pues el “wholeness” implica que hay que incluir los instrumentos de medición en la descripción física.¹⁸⁹ La alternativa de Bohr se condensa en el siguiente pasaje de 1954:

Todo científico... está constantemente enfrentado con el problema de la descripción objetiva de la experiencia, *con lo que queremos decir comunicación unívoca*. Nuestro instrumento básico es, por supuesto, el lenguaje sencillo que sirve a las necesidades de la vida práctica y el trato social.¹⁹⁰

Bohr define aquí la objetividad como univocidad, es decir, la ausencia de ambigüedad. Considera objetiva, por tanto, la comunicación que tenga un significado acerca del cual toda la comunidad pueda coincidir. Esta es una objetividad que podría llamarse sociológica, en contraposición a la objetividad metafísica.¹⁹¹ A continuación menciona que para asegurarla basta con utilizar el lenguaje común. En la mayoría de los escritos no aclara el porqué, pero en un pasaje de 1939 hace referencia a “la asunción, inherente en las convenciones ordinarias del lenguaje, de que es posible separar el comportamiento de los objetos del medio de observación”.¹⁹² La separación de la que habla no es, sin

¹⁸⁵Pais (1991, p. 422).

¹⁸⁶Howard (1994), p. 206.

¹⁸⁷*Ibid.*, pp. 204-206.

¹⁸⁸Bohr (1958d), p. 2.

¹⁸⁹Bohr (1958a), pp. 3-4.

¹⁹⁰Bohr (1954/1958b), p. 67.

¹⁹¹Howard (1994), 205.

¹⁹²Bohr (1939), p. 279. En el mismo pasaje dice que esta asunción está completamente justificada por la experiencia cotidiana. Esto nos ayuda a entender la afirmación anterior: en el lenguaje del día a día, hacemos referencia a nuestro entorno sin referirnos a nuestra experiencia subjetiva, y esto nos permite orientarnos en este sin problemas. La información que transmitimos en esas situaciones es objetiva en el sentido que usa Bohr.

embargo, la misma a la que se refieren Planck y Einstein; la separación de Bohr es epistemológica, un requisito de la comunicación y el conocimiento.

Bohr considera que la base provista por el lenguaje común es necesaria, aunque señala que “lo principal es darse cuenta de que todo conocimiento se presenta dentro de un marco conceptual adaptado a la experiencia anterior y que ese marco puede resultar demasiado estrecho para comprender nuevas experiencias”.¹⁹³ No obstante, opina que el refinamiento de terminología exigido por las nuevas evidencias experimentales no permite ir más allá de la base del lenguaje común, que está adaptada a nuestra orientación en el entorno y a trazar relaciones de causa-efecto.¹⁹⁴ De acuerdo con lo anterior, el conocimiento objetivo tendrá que depender de las categorías mediante las cuales comprendemos nuestra experiencia cotidiana (posición, duración, causa-efecto...) adaptadas a la práctica científica.¹⁹⁵

5.2. El experimento y el lenguaje clásico

En el caso concreto de la investigación del mundo microscópico, Bohr plantea el problema de la siguiente manera: por un lado, los fenómenos atómicos individuales que se estudian emergen de la interacción entre los instrumentos y los objetos, por lo que no se pueden separar físicamente; por otro, el conocimiento objetivo requiere que se ambos puedan separarse.¹⁹⁶ Por lo tanto, en el caso de estos experimentos debe considerarse qué tipo de conocimiento se puede obtener de los objetos. Su conclusión, de acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior, es la siguiente:

En este respecto debemos, por un lado, darnos cuenta de que el objetivo de todo experimento físico —obtener conocimiento en condiciones reproducibles y comunicables— no nos deja más opción que usar conceptos cotidianos, finalmente refinados por la terminología de la física clásica, no solo en todas las explicaciones de la construcción y manipulación de los instrumentos de medición, sino también en la descripción de los resultados experimentales.¹⁹⁷

Como queda claro en este pasaje, el problema más importante para Bohr es la epistemología del experimento.¹⁹⁸ Puesto que este es el único acceso que se tiene al mundo microscópico, es natural que Bohr lo tome como tema central. Su conclusión es que la situación que se da en física cuántica obliga a usar lo que podría denominarse lenguaje clásico como adaptación del lenguaje común, añadiendo a este último los conceptos de la física clásica. Para aclarar cómo y por qué, resulta útil usar la distinción de Peter Kroes entre una descripción funcional y una descripción estructural del experimento: la descripción estructural trata el instrumento como un sistema físico, y la descripción funcional lo trata como un artefacto tecnológico con un objetivo concreto —en este caso, medir una variable—. La segunda descripción hace uso también de la primera.

¹⁹³Bohr (1954/1958b), p. 67.

¹⁹⁴Bohr (1958d), p. 1.

¹⁹⁵Faye (2014), párrs. 21-22.

¹⁹⁶Bohr (1939), p. 269.

¹⁹⁷*Ibid.*

¹⁹⁸Camilleri y Schlosshauer (2015), p. 80.

Lo que es importante es notar que la descripción estructural de la realidad física depende implícitamente de la descripción funcional de una parte del resto del mundo.¹⁹⁹

La observación más importante de Bohr es que, si se quiere usar un instrumento para obtener información acerca de un objeto —es decir, funcionalmente—, tiene que ser descrito de manera clásica. Para entender el porqué, hay que tener en cuenta que, para Bohr, la información respectiva a un experimento que puede ser unívocamente comunicada corresponde al fenómeno, a lo registrado en el aparato.²⁰⁰ Para que lo registrado pueda entenderse como aportando información sobre el objeto, hay que diferenciar ambos, y esto requiere el uso de un lenguaje adecuado. En este caso, se trata del lenguaje clásico —y, por lo tanto, los conceptos clásicos—, que no es más que un refinamiento del lenguaje común, adaptado para describir lo físico con mayor exactitud.²⁰¹ Esta diferenciación no implica que se consideren como entidades separadas, es una “distinción *lógica* entre aparatos de medición y objetos atómicos”.²⁰² La interpretación clásica del resultado, por su parte, presupone la descripción clásica del instrumento, pues el registro solo puede entenderse en relación al sistema de referencia ofrecido por el instrumento en su conjunto.²⁰³

Esta separación cuántico-clásico no implica que todo el instrumento tenga que ser descrito clásicamente. Es un error común en las lecturas de Bohr el hacer esta interpretación, conocida como “coincidence interpretation”. Esta tiene un problema principal: introduce un dualismo en el experimento, lo cual lleva a la pregunta de cómo interactúan las dos partes, que son descritas por teorías diferentes.²⁰⁴ Bohr insiste que los conceptos clásicos tienen que ser usados a ambos lados del experimento (instrumento y objeto), puesto que “una medición no puede significar nada más que la comparación unívoca de alguna propiedad del objeto investigado con una propiedad correspondiente de otro sistema, que sirve de instrumento de medición”.²⁰⁵ Así, mientras que la descripción funcional del instrumento requiere el uso de teorías dinámicas clásicas, la descripción estructural del objeto solo puede ser una descripción clásica parcial.²⁰⁶

Resumiendo, la reconstrucción lógica del argumento de Bohr puede reducirse a los siguientes puntos:

1. La interpretación de una teoría física tiene que estar basada en la práctica experimental. Esta, a su vez, depende de una práctica precientífica de descripción, que establece la norma para el uso del instrumento experimental de medición.
2. Esta práctica precientífica es una adaptación de nuestra experiencia cotidiana, que se comprende en términos de categorías generales como

¹⁹⁹Camilleri y Schlosshauer (2015), p. 76.

²⁰⁰Bohr (1958c), pp. 169-170. Ya se ha visto cómo elabora Bohr este punto en la etapa posterior a EPR.

²⁰¹Bohr (1939), p. 269.

²⁰²Bohr (1958d), p. 6.

²⁰³Bohr (1958c), pp. 169-170. Es cierto que el instrumento siempre puede tomarse como sistema y ser descrito mediante la mecánica cuántica; no obstante, analizar un experimento de esta manera excluiría el uso funcional del instrumento, pues se estaría incluyendo en lo estudiado (Camilleri, 2007, p. 76).

²⁰⁴Howard (1994), p. 211.

²⁰⁵Bohr (1939, p. 19), citado en Camilleri, and Schlosshauer (2015, p. 77).

²⁰⁶Camilleri y Schlosshauer (2015), p. 77.

posición, duración o causa-efecto, que son ahora parte de nuestro lenguaje. El conocimiento objetivo depende del uso de esas categorías, y cualquier ciencia natural tiene que utilizarlas si quiere ser objetiva.

3. Estas categorías se especifican mediante los conceptos clásicos. Estos son necesarios para la descripción funcional del experimento y para la comunicación de los resultados experimentales y la descripción de los fenómenos cuánticos.²⁰⁷

Esta es, en suma, la doctrina de los conceptos clásicos de Bohr. Incluye, por un lado, el uso de los conceptos cinemático-dinámicos: energía y momento, tiempo y posición. Por otro, implica usar también el concepto de causalidad. Si quiere considerarse el conocimiento empírico como concerniente a un objeto, debe asumirse que los resultados experimentales son en parte causados por la actividad de un objeto independiente. Esta causalidad, necesaria para separar el instrumento y el objeto, es implícita a cualquier observación.²⁰⁸ Sin embargo, no hay que olvidar que este requisito es puramente epistemológico, ya que “[la imposibilidad de separar físicamente instrumento y objeto] implica que ningún resultado concerniente a un fenómeno que quede fuera del alcance de la física clásica puede ser interpretado como aportando información sobre las propiedades independientes del objeto”.²⁰⁹ La necesidad de usar los conceptos clásicos no supone ninguna contradicción con la descripción del mundo mediante la mecánica cuántica ni entra en conflicto con la postura antirrealista de Bohr.

²⁰⁷Faye (2014), párrs. 21-22

²⁰⁸Camilleri, and Schlosshauer (2015), p. 77; Cuffaro (2010), p. 313.

²⁰⁹Bohr (1939), p. 269.

Conclusiones

Este trabajo muestra la evolución de la complementariedad y la filosofía de Bohr, además de destacar los factores más importantes que influyen en ella. Resulta imposible entender la génesis de las ideas de Bohr si no se tienen en cuenta factores como la influencia de Høffding en su formación filosófica. De este contacto proviene su interés sobre temas como el debate sobre el realismo y sus nociones generales sobre varias corrientes filosóficas, que suponen una base imprescindible para la formación de su filosofía. Cabe destacar también el impacto de los intercambios que siguen a la publicación del artículo EPR. Como ha podido verse, hay razones suficientes para pensar que es el reto planteado por Einstein obliga a Bohr a cambiar la formulación de la complementariedad e incluso los fundamentos de su filosofía.

Otra cosa que queda clara después de estudiar a Bohr es que su postura no puede englobarse justamente dentro del término “interpretación de Copenhague”. Profundizar en los argumentos de Bohr pone de manifiesto la dimensión filosófica que hay detrás de los aspectos más superficiales de su interpretación. Esta tiene pilares centrales, como la doctrina de los conceptos clásicos o la tesis sobre la objetividad, que le otorgan un carácter específico que otras posturas no comparten. Si se quiere entender y superar lo que se conoce como “interpretación ortodoxa”, hay que analizar por separado la filosofía de cada uno de los físicos que se relacionan con ella, así como la relación entre ellos.

Esto demuestra la importancia del estudio de las bases filosóficas de las distintas interpretaciones de la física cuántica, pues solo desde este enfoque pueden apreciarse adecuadamente las diferencias entre ellas y sus fundamentos. Un ejemplo claro es el debate que mantienen Bohr y Einstein, que se trata de un enfrentamiento filosófico más que una discusión sobre aspectos concretos de la física. Además, es un tema que está directamente relacionado con la forma en que entendemos las teorías que describen la naturaleza, por lo que es tan relevante para el físico como para el filósofo. Sería un error trivializar el problema de la interpretación o apartarlo completamente del ámbito de la física.

Por último, es importante comentar las posibilidades de profundizar en este tema y expandirlo. Es cierto que se trata del trabajo de un físico y no sería correcto ni útil clasificarlo dentro de corrientes de pensamiento pasadas o actuales. Aún así, creo que sería útil indagar más profundamente en sus fundamentos filosóficos. Esto no solo ayudaría a entenderlo mejor, sino también a relacionarlo con otros autores y evitar errores a la hora de interpretarlo. Dada la dificultad en formar una visión coherente del pensamiento de Bohr, otra vía de mejora podría abrirse si se encontraran más documentos que den testimonio del mismo. De la misma forma que la revisión de sus cartas ha servido para aclarar algunas de sus opiniones,²¹⁰ nuevas fuentes podrían añadir información valiosa a la discusión. Para terminar, hay que considerar también la posibilidad de que descubrimientos futuros en la física u otros campos posibiliten nuevas formas de interpretación, lo cual podría exigir expandir, adaptar o descartar las ideas de Bohr.

²¹⁰Ver, por ejemplo, Camilleri (2007, p. 516.)

Referencias

- [1] Bohr, N. (1925, December). Atomic Theory and Mechanics. *Supplement to Nature*, 116, 845-852.
- [2] Bohr, N. (1928, Abril). The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Supplement to Nature*, 121, 580-590.
- [3] Bohr, N. (1935, Octubre). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?. *Physical Review*, 47, 696-702.
- [4] Bohr, N (1939). Natural Philosophy and Human Cultures. *Nature*, 143, 268-272.
- [5] Bohr, N (1938, Julio). Causality and complementarity. *Philosophy of Science*, 4, 289-298.
- [6] Bohr, N. (1958a). Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. En Bohr, N. (Ed.), *Atomic Physics and Human Knowledge* (pp. 32-82). New York: John Wiley & Sons, Inc. (Artículo original publicado en 1949)
- [7] Bohr, N. (1958b). Unity of Knowledge. En Bohr, N. (Ed.), *Atomic Physics and Human Knowledge* (pp. 67-82). New York: John Wiley & Sons, Inc. (Artículo original publicado en 1954)
- [8] Bohr, N. (1958c). On Atoms and Human Knowledge. *Daedalus*, 87, 164-175.
- [9] Bohr, N. (1958d). Quantum physics and Philosophy: Causality and Complementarity. En Bohr, N. (Ed.), *Atomic Physics and Human Knowledge* (pp. 1-7).
- [10] Bokulich, A. (2014). Bohr's Correspondence Principle. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Recuperado de <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/bohr-correspondence/>
- [11] Camilleri, K. (2007). Bohr, Heisenberg and the divergent views of complementarity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38, 514-528.
- [12] Camilleri, K., and Schlosshauer, M. (2015). Niels Bohr as philosopher of experiment: Does decoherence theory challenge Bohr's doctrine of classical concepts?. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 49, 73-83.
- [13] Cuffaro, M. (2010). The Kantian framework of complementarity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, 309-317.
- [14] Cushing, J. T. (1994). *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press.
- [15] Cushing, J. T. (1998). *Philosophical Concepts in Physics: The Historical Relation Between Philosophy and Scientific Theories*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

- [16] De Gregorio, A. (2014). Bohr's way to defining complementarity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 45, 72-82.
- [17] Dotson, A.C. (2008). Refocusing Bohr's quantum postulate. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39, 610-619.
- [18] Einstein, A., Podolski, B. Y., and Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?. *Physical Review*, 49, 777-780.
- [19] Favrholt, D (1994). Niels Bohr and Realism. En J. Faye, and H. J. Folse (Eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 77-96). Dordrecht, Boston: Kluwer.
- [20] Faye, J. (1991). *Niels Bohr: His Heritage and Legacy. An Anti-Realist View of Quantum Mechanics*. Dordrecht, Netherland: Kluwer Academic Publishers.
- [21] Faye, J. (1994). Non-Locality or Non-Separability?. En J. Faye, and H. J. Folse (Eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 97-118). Dordrecht, Boston: Kluwer.
- [22] Faye, J. (2014). Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Recuperado de <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/>
- [23] Faye, J. (1994). Bohr's Framework of Complementarity and the Realism Debate. En J. Faye, and H. J. Folse (Eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 119-139). Dordrecht, Boston: Kluwer.
- [24] Goldstein, S. (2016). Bohmian Mechanics. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Recuperado de <http://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/qm-bohm/>
- [25] Henderson, J. R. (2010). Classes of Copenhagen interpretations: Mechanisms of collapse as typologically determinative. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, 1-8.
- [26] Hooker, C. A. (1994). Bohr and the Crisis of Empirical Intelligibility: An Essay on the Depth of Bohr's Thought and Our Philosophical Ignorance. En J. Faye, and H. J. Folse (Eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 201-229). Dordrecht, Boston: Kluwer.
- [27] Howard, D. (1994). What Makes a Classical Concept Classical?. En J. Faye, and H. J. Folse (Eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 201-229). Dordrecht, Boston: Kluwer.
- [28] Jammer, M. (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- [29] Katsumori, M. (2011). *Niels Bohr's Complementarity: Its Structure, History and Intersections with Hermeneutics and Deconstruction*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer.

- [30] Pais, A. (1991). *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford: Clarendon Press.
- [31] Petersen, A. (1963). The Philosophy of Niels Bohr. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 19 (7), 8-14.
- [32] Plotnitsky, A. (2013). *Niels Bohr and Complementarity: An Introduction*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer.
- [33] Rohlf, M. (2016). Immanuel Kant. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Recuperado de <http://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/kant/>
- [34] Zinkernagel, H. (2016). Niels Bohr on the wave function and the classical/quantum divide. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 53, 9-19.