

El surgimiento de la complementariedad: Niels Bohr y la Conferencia de Como¹

Resumen: *El artículo discute el texto publicado de la conferencia de Niels Bohr ofrecida en el año 1927 donde analiza los desarrollos de la mecánica cuántica y sus implicaciones. Asimismo se discute como en esta conferencia es donde el físico danés presenta por primera vez su argumento para el marco conceptual de la complementariedad, marco necesario, según Bohr, para ordenar el conocimiento producido por la nueva física.*

Palabras claves: *Bohr. Heisenberg. Schrödinger. Complementariedad. Dualidad onda partícula. Mecánica cuántica.*

Abstract: *The article discusses the published text of the Niels Bohr's conference in 1927 where he analyzes the new developments of the quantum mechanics and its implications. The article discusses also the presentation for the first time of the framework of complementarity, a framework needed to order the knowledge emerging from the new physics.*

Key Words: *Bohr. Heisenberg. Schrödinger. Complementarity. Wave particle duality. Quantum mechanics.*

En el año de 1927 en la ciudad de Como, Italia, en el congreso dedicado al centenario de la muerte del físico italiano Alessandro Volta, el físico danés Niels Bohr ofrece la conferencia que marca el surgimiento de la idea de la complementariedad en la recientemente desarrollada teoría

cuántica. Asimismo en ella Bohr presenta los principios subyacentes en la descripción de los fenómenos atómicos así como los problemas que ellos presentan a la visión clásica de la naturaleza.

Desgraciadamente no se tiene el texto original de la conferencia dada por Bohr en Como; sólo se posee el texto publicado en 1928 en la revista *Nature* y una serie de borradores y manuscritos sin publicar, muchas de las ideas expuestas en estos textos constituyen la base de su exposición en la conferencia. El siguiente análisis del marco conceptual de la complementariedad se basa en el texto publicado en 1928 y en los borradores contenidos en el volumen sexto de las obras de Bohr.

De acuerdo con Bohr (1964:49) uno de los objetivos de conferencia en Como es:

“[defender] un punto de vista denominado adecuadamente **complementariedad** para abarcar los rasgos característicos de individualidad de los fenómenos cuánticos y aclarar al propio tiempo los aspectos particulares del problema de la observación en este campo de la experiencia.” [La negrita es del texto original]

En general, el argumento de la complementariedad se funda en tres elementos de índole empírico, a saber:

I. Tesis de la condición cuántica: plantea el cuanto de acción como un descubrimiento universal y elemental. Además éste imprime un carácter de indivisibilidad y totalidad a

los fenómenos que se extraña al marco clásico de la física. A este carácter de indivisibilidad Bohr lo llama “*el postulado cuántico*”. Este es un postulado que no se discute, se acepta sin más.

2. *Implicaciones del postulado cuántico*: el postulado cuántico implica una discontinuidad en los fenómenos de la naturaleza rompiéndose así la idea de continuidad de los procesos físicos. Además, toda observación implica una interacción incontrolable entre los sistemas físicos y el aparato de medición de ahí que sea imposible llevar a cabo de manera simultánea descripciones espacio-temporales y causales. Es así que el cuanto de acción conlleva un límite respecto del conocimiento de la naturaleza que está relacionado con la forma en que los individuos interactúan con los sistemas cuánticos. Lo anterior implica que se ha de renunciar a la coordinación causal de los procesos atómicos en el espacio y el tiempo y se ha de desarrollar un nuevo marco conceptual más amplio que de cabida a los fenómenos atómicos, y establezca los parámetros en los cuales se han de utilizar de manera inequívoca los conceptos. Se necesita una generalización del marco clásico que incorpore al cuanto de manera armoniosa; que provea una descripción completa de los fenómenos atómicos.
3. *La dualidad onda partícula*: esta es una evidencia empírica que se manifiesta en la existencia de dos formalismos consistentes empleados para describir y predecir fenómenos que son mutuamente excluyentes. Existe el problema, de acuerdo con Bohr, que ambos son necesarios para describir la totalidad de los fenómenos que comprenden a la radiación y a los sistemas atómicos.

Estos elementos son constantes en la argumentación de Bohr, ellos marcan el punto de partida para el establecimiento del nuevo marco conceptual. Implícito en estos elementos de la argumentación está la noción de realismo; el físico danés parte de la creencia de que los sistemas atómicos son objetos reales y son tales objetos los que la física atómica y la mecánica cuántica aspiran a describir. En este sentido, el realismo como tal nunca fue un problema para Bohr, lo

que se convertirá en problema para Bohr es la descripción espacio-temporal de tales sistemas.

Los elementos del argumento de la complementariedad se pueden esbozar, de manera más detallada, en la siguiente estructura:

1. Una *condición epistemológica-metodológica básica* que es el hecho de que todo conocimiento se da dentro de un marco conceptual determinado.
2. El *postulado cuántico* y sus implicaciones:
 - a. La discontinuidad en los fenómenos de la naturaleza.
 - b. El carácter individual, indivisible e incontrolable de la interacción entre el aparato de medición y el sistema físico medido.
 - c. La renuncia al uso simultáneo de imágenes espacio-temporales y el principio de causalidad en la descripción de los fenómenos
3. La *dualidad onda-partícula*.
4. Lo imprescindible de los conceptos clásicos en la descripción.

El argumento de la conferencia de Como

Como se mencionó más arriba no existe un texto propiamente dicho de la conferencia dictada por Bohr en Como, sólo se tienen una serie de textos que contienen las ideas básicas de la conferencia y que están en los archivos personales de Bohr. Dichos textos se hallan en una carpeta titulada: “Como Lecture II (1927)” (NBCW6, 1985:57-80), los títulos de los textos que en ella se encuentran dejan entrever cuáles son las preocupaciones de Bohr: “*Los fundamentos filosóficos de la teoría cuántica*” y “*Los problemas fundamentales de la teoría cuántica*” además de un texto sin título.

Todas las ideas expuestas en dichos textos se entrelazan en una argumentación que parte de una afirmación ontológica, la existencia del cuanto de acción de Planck y a partir de esta afirmación Bohr presenta las consecuencias epistemológicas y metodológicas para la ciencia. Sus conclusiones son tan “desesperanzadoras”

que hace que los editores de la revista *Nature* (NBCW6, 1985:52) elaboren un texto introductorio al artículo de Bohr en el cual se deja ver un deseo implícito que lo que el físico danés presenta no se llegue a cumplir².

Elementos del argumento de la complementariedad

A. El postulado cuántico.

La base del argumento de Bohr es el descubrimiento del *cuanto de acción*, es este descubrimiento el que hace necesaria una revisión de las ideas epistemológicas y ontológicas presentes en el marco clásico. Así, Bohr se concentra en el análisis de las condiciones que hace posible el conocimiento de los sistemas físicos.

Junto con el cuanto de acción Bohr menciona el término "*postulado cuántico*" para hacer referencia al *carácter de individualidad y sobre todo de indivisibilidad de los procesos atómicos* que se dan debido a la existencia del cuanto de acción. En este sentido, refleja una imposición de la naturaleza sobre las formas ordinarias de la percepción. Por consiguiente, si el cuanto de acción rompe con la continuidad entonces, la noción de observación así como la del ideal descriptivo han de ser revisados.

El cuanto de acción de Planck es la base de la nueva mecánica cuántica, es además lo que la separa de la mecánica clásica: la primera logra mostrar las limitaciones de la segunda:

"La mecánica cuántica se caracteriza por el reconocimiento de una limitación esencial de las ideas físicas clásicas cuando se las aplica a los fenómenos atómicos. La situación que con ello se crea es de una naturaleza peculiar, puesto que nuestra interpretación de los datos experimentales se apoya de manera fundamental en los conceptos clásicos." (TADN, 1988:98)

Tal limitación surge del postulado cuántico, elemento de singular importancia para Bohr ya que es un hecho totalmente irracional, es decir, es inconsistente con el ideal clásico – i.e., el cuanto

rompe con la noción de continuidad y separabilidad- y por tanto incide en la posibilidad de construir imágenes espacio-temporales y causales en la ciencia.

En el párrafo arriba citado Bohr establece la conclusión a la que había llegado en 1924 después de saber las conclusiones del experimento Bothe-Geiger. Además establece la necesidad de mantener los conceptos clásicos ya que es a través de ellos que se describen las interacciones (i.e., las observaciones) de los sistemas físicos. Esta idea es evidente en uno de los borradores del texto de la conferencia de Como (este es un texto sin título se halla dentro de un fólter titulado "*Como Lecture II*" (NBCW6, 1986:61).

En él Bohr apunta que:

1. *Toda la información acerca de los átomos se halla expresada en conceptos clásicos.*
2. *Todos los conceptos están definidos a través de imágenes espacio-temporales.*

Estos dos puntos establecen la base para que Bohr diga más adelante que no se pueden abandonar los conceptos ordinarios, ya que son los conceptos de onda y partícula los que están relacionados con las manifestaciones fenoménicas de los sistemas cuánticos, ellos están conectados de manera inseparable con la capacidad de visualización. Además todos ellos suponen la continuidad, de ahí que cuando ésta desaparece los conceptos se tornan ambiguos.

Lo anterior se debe a que, según Bohr:

"...[el postulado cuántico] atribuye una discontinuidad, o mejor, una individualidad básica a todo proceso atómico, extraña por completo a las teorías clásicas y simbolizada por el cuanto de acción de Planck." (TADN, 1988:99)

Es en este sentido que los fenómenos en el ámbito atómico amplían la experiencia al orden de las cosas que *nunca* son observadas de manera directa. Para Bohr es necesaria la posibilidad de contrastar las teorías con la realidad, es ella la que da el veredicto final acerca de las ideas de los científicos. Aunque las teorías sean invenciones de los científicos siempre se necesita la comprobación de estas invenciones, caso contrario no se podría hablar de contenido real de ellas. Un

ejemplo de esta situación es el cuanto de acción que hace evidente la limitación de la teoría e imágenes de la física clásica.

Es decir, con el postulado cuántico se amplía el campo del saber, ya que nos muestra situaciones nuevas que se presentan problemáticas. (APHK, 1964:105) Además, el cuanto de acción hace imposible la aplicación del ideal de objetividad de la física clásica:

“...el postulado cuántico implica que toda observación de los fenómenos atómicos lleva aparejada una interacción con el aparato de observación que no puede ser despreciada. Por consiguiente, no puede adscribirse una realidad independiente en el sentido físico ordinario ni a los fenómenos ni a los instrumentos de observación, después de todo, el concepto de observación es arbitrario en la medida en la que depende de qué objetos se incluyan en el sistema a observar.” (TADN, 1988:99)

Esta es la *lección epistemológica* que la revolución cuántica ha traído: mostrar que la física clásica ha utilizado el supuesto de la continuidad y la objetividad - entendida como separación entre el sujeto y la realidad observada -, para justificar que la observación no afecta lo observado o, que si existe un efecto, éste puede ser controlado. Es debido a la presencia del cuanto de acción de Planck y su efecto en la observación, que no se puede seguir manteniendo los ideales de continuidad y objetividad. Por consiguiente, no se puede adscribir una realidad independiente en sentido físico ordinario ni a los fenómenos ni a los instrumentos de observación.

Por expresiones como la anterior Bohr ha sido llamado *antirrealista*. La tesis esencial de Bohr en estas tres citas anteriores es que el cuanto de acción de Planck es un fenómeno ajeno a la teoría clásica, que introduce un elemento de discontinuidad e individualidad en todos los fenómenos atómicos totalmente extraño a la física clásica que es a la vez “irracional”. Bohr utiliza este término para referirse a algo que es totalmente ajeno y distinto a la intuición existente en la física clásica.

De nuevo, este elemento “irracional” elimina la continuidad necesaria para las descripciones

espacio temporales, por consiguiente, conlleva la *“renuncia a la coordinación causal de los procesos atómicos en el espacio y el tiempo.”* (TADN, 1988:99)

Por consiguiente, existe la imposibilidad de una descripción de las observaciones acorde al ideal clásico y esto es debido a que *“la definición misma del marco espacio temporal implica el despreñar la interacción entre el objeto y los instrumentos de medida”* (NBCW6, 1986:399), y como se sabe el postulado cuántico hace imposible tal supuesto.

Lo que plantea Bohr está lejos de ser antirrealismo. La mayoría de los realistas estarán de acuerdo, en mayor o menor grado, en afirmar que las teorías científicas buscan describir los fenómenos observados como las consecuencias empíricas del comportamiento de objetos reales, es decir los fenómenos son el resultado de propiedades de objetos que son independientes de los sujetos y esenciales al objeto. Esta creencia se basa en dos cosas: primero, en el hecho de que todos los individuos perciben los mismos fenómenos y en este sentido se puede hablar, ingenuamente si se quiere, de una realidad objetiva y separada del sujeto que no depende del observador; segundo, en el éxito de las teorías clásicas en construir y describir los fenómenos de manera satisfactoria.

Como ya se mencionó, la objetividad de la descripción en estas condiciones expresa el cómo se obtiene la observación (i.e., la existencia de la separación entre sujeto y objeto) y el principio epistemológico - metodológico que sustenta tal afirmación a saber: la creencia de que los sistemas físicos son sistemas cerrados, es decir: sistemas sin intercambio con elementos externos. Este supuesto facilita la creencia de la observación del objeto sin afectarlo.

Así, las propiedades esenciales del objeto que producen el fenómeno observado son las mismas propiedades fenoménicas que sirven para describir el estado del sistema junto con la noción de sistema cerrado y el principio de conservación de energía. Tales descripciones se llevan a cabo mediante imágenes espacio-temporales o causales.

De acuerdo con Bohr tales supuestos no se pueden mantener en el ámbito atómico debido al

postulado cuántico y a la interacción que supone toda observación a nivel atómico:

“Puesto que en la observación de los fenómenos no podemos despreciar la interacción entre el objeto y el instrumento de medida, de nuevo pasan primer plano las cuestiones que se refieren a las posibilidades observación. Así, nos enfrentamos aquí, bajo una nueva luz, al problema de la objetividad de los fenómenos, que tanto interés ha suscitado en discusiones filosóficas.” (TADN. 1985:134)

En el momento que se da la interacción incontrolable entre el objeto y el aparato de medición no se pueden aplicar las ideas clásicas, es decir, los sistemas atómicos no pueden ser descritos en los mismos términos que los objetos de la física clásica y esto se debe a que toda observación significa una interacción. Es decir, la individualidad surgida del postulado cuántico *“expresa el descubrimiento empírico de que el supuesto de la descripción clásica no se puede mantener”* (Folse, 1985:110) ya que como se dijo más arriba, el postulado cuántico implica una interacción entre el aparato de medición y el objeto medido.

Es importante hacer notar que implícito en esta posición está la creencia en la existencia de una realidad externa y que es con la que el aparato de medición interactúa. Dicha interacción surge del hecho de que *“la magnitud finita del cuanto de acción impide hacer una distinción neta entre el fenómeno [i.e., el objeto] y el instrumento de observación”* (TADN. 1985:60).

Bohr defiende la idea de que es debido al carácter de “individualidad” y “totalidad” de la interacción que le imprime el cuanto de acción a cada medición lo que hace imposible la definición del estado del sistema en sentido clásico. Es decir, no se le puede adjudicar el status de realidad independiente a los fenómenos ya que el conocimiento de esta realidad se obtiene de la interacción entre el sistema físico y el aparato de medición: lo que se observa es la interacción entre ambos. Es el cuanto de acción, un hecho de la naturaleza, el que hace imposible otorgar el estatus de realidad en el sentido clásico a los

sistemas atómicos observados, no se puede hablar de un “estado clásico del sistema”.

Al existir este elemento de individualidad, de discontinuidad en cada interacción (i.e., la medición, la observación) la causalidad en sentido ordinario (i.e., la física clásica) y las descripciones espacio-temporales no se pueden mantener. Esto se debe a que *“en la teoría cuántica cada observación introduce un elemento por completo nuevo e incontrolable, como consecuencia de la imposibilidad de despreciar la interacción con el instrumento de medida.”* (TADN: 1985:112) La descripción clásica se hace imposible ya que:

“...la posibilidad de descripción está ligada a la infinita divisibilidad del curso de los fenómenos en el marco espacio-temporal y al encadenamiento de los hechos en una sucesión ininterrumpida de causas y efectos.” (Rioja, 1997:263)

De esta manera, es el cuanto de acción el que rompe con la continuidad de los fenómenos. Además, el cuanto de acción implica la imposibilidad de tener simultáneamente una descripción causal del fenómeno atómico y su descripción espacio-temporal, asimismo elimina cualquier posibilidad de aplicar inequívocamente los conceptos clásicos:

“...the unambiguous application of such fundamental concepts as space and time is essentially limited on account of the finite interaction between the object and the measuring tools, which as a consequence of the existence of the elementary quantum, is involved in any measurement.” (NBCW6, 1985:399)

Se tiene así que, junto a la complementariedad presente en la dualidad onda-partícula, existe la complementariedad formada por las descripciones espacio-temporales y la causalidad:

“Es preciso, pues, considerar una modificación radical de la relación entre la descripción en el espacio y en el tiempo y el principio de causalidad, que simbolizan respectivamente las posibilidades ideales de observación y de definición, y cuya unión

es característica de las teorías clásicas: a partir de la esencia misma de la teoría cuántica debemos contentarnos con concebirlas como aspectos complementarios, pero que se excluyen mutuamente, de nuestra representación de los resultados experimentales.” (TADN. 1985:100)

En este texto Bohr establece por primera vez, de manera implícita, las características generales de la complementariedad. Así, dos conceptos o proposiciones son complementarios si estos son diferentes en significado o predicen diferentes propiedades; si juntos constituyen una descripción o representación completa y sobre todo, sin son, mutuamente excluyentes o incompatibles, ya sea en sentido lógico o empírico (Murdoch, 1987: 60).

Las ideas anteriores van surgiendo en el pensamiento de Bohr en diferentes etapas y son indispensables en la caracterización de la complementariedad. Según Murdoch sintetiza los elementos experimentales y teóricos que guían a Bohr hacia la complementariedad: la necesidad de una descripción completa de los fenómenos es decir, una representación exhaustiva de la realidad (i.e., que abarque las manifestaciones fenoménicas de onda y de partícula) y, la necesidad de asegurar la consistencia en la interpretación de la teoría cuántica:

“...the notions of mutual exclusiveness and joint completion are equally necessary, indeed complementarity, ingredients in the meaning of Bohr’s conception. In the genesis of the conception the notion of joint completion came first (in the acceptance of wave-particle duality); the notion of mutual exclusiveness came later (in the acceptance of the uncertainty principle.” (1987:61)

Junto con la necesidad de hacer justicia a las descripciones en términos ondulatorios y corpusculares, a la renuncia a la descripción en términos de espacio-tiempo y causalidad, Bohr pone énfasis en el uso de los conceptos clásicos y el hecho de que se ha de seguir usando el lenguaje clásico en las descripciones de los sistemas cuánticos.

La complementariedad y las relaciones de incertidumbre

En Como Bohr presenta la complementariedad como el marco conceptual que explica las relaciones encontradas por Heisenberg y de cómo ambos son consecuencia del postulado cuántico. Además las relaciones de incertidumbre son la expresión matemática del hecho de que en la mecánica cuántica es imposible mantener el ideal clásico de descripción además del límite de la aplicación de los conceptos clásicos. Para Bohr (NBCW6, 1985:399) las relaciones de incertidumbre definen: “*the latitude in the application of classical concepts, necessary for the comprehension of the fundamental laws of the atomic stability which are beyond the reach of these concepts.*”

En el tercer apartado del texto de la conferencia Bohr se aboca a discutir las relaciones de incertidumbre y plantea cómo la complementariedad resuelve la naturaleza un tanto paradójica de ellas. Ha de tenerse claro que, como lo plantea Henry Folse (1985:127), Bohr en ningún momento pretende que la complementariedad es una mera explicación de las relaciones de incertidumbre.

Es decir, las relaciones de incertidumbre no reflejan nuestra ausencia de conocimiento⁴ sino el hecho de que, siguiendo a Henry Folse (1985:137)

“...the uncertainty principle reflects theoretically the physical fact that given the quantum postulate, the conditions necessary for unambiguously defining the classical mechanical state of the system as isolated from interaction preclude the physical conditions necessary for giving empirical content to the descriptive concepts in terms of which the state of that system must be defined.”

Por esto Bohr (TADN, 1988: 112-113) cree que las relaciones de incertidumbre traducen

“...con claridad el carácter complementario de la descripción cuántica de los fenómenos atómicos, carácter que aparece como una consecuencia inevitable del antagonismo que existe entre el postulado cuántico y la distinción - inherente a la idea misma de

observación - entre objeto e instrumento de medida.”

Además, son las relaciones de incertidumbre (i.e., la imposibilidad de observar la naturaleza ondulatoria y corpuscular al mismo tiempo) las que evitan que el formalismo, e incluso la naturaleza, caigan en contradicción.

Por consiguiente, siguiendo a Bohr (TADN, 1988:152), las relaciones de incertidumbre establecen el límite de aplicabilidad de los conceptos clásicos en la descripción de los fenómenos atómicos:

“...la indeterminación fundamental a la que nos enfrentamos aquí puede ser considerada como la expresión directa de la limitación absoluta que afecta al uso de las representaciones intuitivas en la descripción de los fenómenos atómicos, una limitación que se había presentado bajo la apariencia de un dilema en la cuestión de la naturaleza de la luz y de la materia.”³

Tal limitación no es solo una cuestión teórica, es decir producto del formalismo, sino que es producto de un hecho de la naturaleza que queda expresado en el postulado cuántico.

Así, las tales relaciones expresan de manera teórica el hecho de que, tomando en cuenta el postulado cuántico, las condiciones necesarias para la definición inequívoca del estado del sistema físico en sentido clásico -i.e., como cerrado y separado de cualquier interacción- no se pueden dar y por consiguiente, no puede otorgárseles contenido empírico en el sentido clásico a los conceptos empleados en la descripción del sistema físico. Tal hecho se debe a que cada observación implica una interacción entre el sistema físico y el aparato de medición.

El hecho de que la definición del estado de un sistema cuántico -en sentido clásico- requiere de la eliminación de toda perturbación externa plantea un problema en la mecánica cuántica, esto se debe a que el postulado cuántico “*excluye también toda posibilidad de observación y sobre todo hace que los conceptos de espacio y tiempo pierdan sentido inmediato.*” (TADN, 1988:100)

Por consiguiente, Bohr propone que se debe considerar el modificar de manera radical la relación entre las descripciones espacio-temporales y las causales. Estas descripciones son ahora descripciones complementarias ya que debido al postulado cuántico su aplicación simultánea para la definición del estado del sistema se hace imposible. Esta situación hace evidente el hecho de que dichos modos funcionan, en la mecánica cuántica, como descripciones complementarias. Por consiguiente, dice Bohr: “*debemos desarrollar una «teoría de la complementariedad», cuya consistencia sólo puede ser juzgada confrontando las posibilidades de definición y las posibilidades de observación.*” (Ibídem.)

Esta decisión hacia la complementariedad se impone si se toma en cuenta “la controvertida cuestión de la naturaleza de la luz y de las partículas materiales elementales.” (TADN, 1988:100-101) Ambas interpretaciones de los fenómenos surgen como la expresión exacta de la evidencia experimental y no se trata de contradicciones sino más bien de “*descripciones complementarias de los fenómenos que sólo juntas constituyen una generalización natural del modo de descripción clásico.*” (TADN, 1988:102)

Tales descripciones son, como ya se ha dicho, “abstracciones”:

“...tanto la radiación en el vacío como las partículas materiales aisladas no son más que abstracciones, dado que, según el postulado cuántico, sus propiedades sólo pueden ser definidas y observadas a través de su interacción con otros sistemas. Sin embargo, esas abstracciones son indispensables, como veremos, para expresar el contenido de la experiencia, de forma que se adapte a nuestra representación espacio-temporal.” (Ibídem)

En la presentación de Bohr existe un elemento que se presta para confusión y de hecho muchos de los oyentes en Como se confundieron cuando Bohr habla de la observación como interacción. La mayoría de los oyentes y algunos filósofos posteriormente, creyeron que lo que Bohr estaba planteando era que la observación perturbaba el estado del sistema. De ser así, las relaciones de incertidumbre son, entonces, el

resultado de tal perturbación y por consiguiente, el estado del sistema es incognoscible. A esta interpretación contribuye el hecho de que para 1927 Bohr mantiene la noción clásica de fenómeno, es decir, el objeto real separado del aparato de observación.

Si se toman estos elementos entonces, lo que parece decir Bohr es que, si la observación del objeto real implica la interacción del aparato de medición con éste entonces, las manifestaciones fenoménicas observadas no son a cabalidad las del objeto real sino que son el producto de la interacción. De ahí que no se pueda adscribir una realidad, *strictu sensu*, a los fenómenos que se observan.

Lo anterior, a su vez, implica aceptar el supuesto de que las condiciones y parámetros necesarios para definir el estado clásico del sistema hacen referencia a propiedades poseídas por objetos reales e independientes. Si esto es así entonces, lo que parece proponer Bohr es que los sistemas atómicos existen en estados mecánicos clásicos definidos y por consiguiente, cada medición los perturba. Es debido a tal perturbación que se hace empíricamente imposible el determinar de manera precisas dicho estados. Así, lo que él denomina "*limitación de los conceptos clásicos*" se reduciría a una limitación en la capacidad de conocer los estados clásicos en que se hallan los sistemas físicos.

Sin embargo, esta interpretación queda desechada una vez que se observa que Bohr está defendiendo el hecho de que a los sistemas físicos y a los aparatos de observación "*no se les puede adscribir una realidad en sentido clásico*". Es decir, los sistemas físicos no existen en estados clásicos y no se pueden definir los objetos mediante estados mecánicos clásicos ya que no se puede describir la observación como si el objeto y el aparato de medición tienen una realidad independiente –i.e., están separados– en el "*sentido físico ordinario*" –en términos de ondas y partículas–; de hecho el cuanto de acción y la mecánica cuántica hacen tal acción imposible (Folse, 1987: 111). Además, hablar de una "perturbación" –o incluso creación de propiedades mediante la observación– no tiene sentido lógico dentro de la argumentación de Bohr, ya que esto implicaría que el sistema físico se halla en un estado que

puede ser descrito como algo independiente de la observación. Hay que recalcar que esta afirmación en Bohr no implica que la realidad como tal no exista sino que el conocimiento de los procesos atómicos mediante los experimentos es limitado.

La conferencia de Bohr en Italia caracteriza su forma de enfrentar los problemas en la mecánica cuántica: análisis de las situaciones mediante el establecimiento de la dicotomía existente, es decir poniendo el énfasis en el conflicto conceptual (Holton, 1978:135). Una vez hecho el análisis pasa a la solución –la síntesis– en el marco conceptual de la complementariedad. Así, su exposición hace énfasis en el aspecto metodológico necesario para obtener una interpretación coherente de la mecánica cuántica. Por su carácter "cualitativo" y metodológico cualitativo, diferente de los enfoques algebraicos, la presentación de Bohr no causó gran impresión en los asistentes a la conferencia de Como, será durante la segunda presentación de estas ideas en la V Conferencia Solvay en Bruselas donde críticas más directas aparecen, sobre todo las propuestas por Einstein.

Hasta aquí queda establecido los elementos que conforman el argumento de la complementariedad propuesto por Bohr en Como. Implícita en este argumento está la idea de que no se puede abandonar los conceptos clásicos para la descripción de los resultados experimentales y esto se debe a que estamos obligados a utilizar el lenguaje clásico para la descripción no sólo del montaje experimental sino también para comunicar a otros nuestros resultados. Además, los conceptos clásicos son indispensables para la interpretación de los datos experimentales y aún así, son sujetos a limitaciones en su uso en la teoría cuántica (Murdoch, 1987:59).

¿Qué es la complementariedad? I Parte (Como)⁵

La complementariedad es un marco conceptual que se presenta como solución a las paradojas que se dan en la mecánica cuántica cuando a ésta se le aplica el ideal descriptivo de la física clásica. Surge de la necesidad de dar cuenta de los

fenómenos físicos una vez aceptado el postulado cuántico (i.e., el cuanto de acción de Planck) ya que éste:

“...impone a cada proceso atómico individual un elemento de discontinuidad extraño por completo a los principios fundamentales de la física clásica, según la cual todas las acciones deben variar de manera continua.” (TADN, 1988:54)

Esta discontinuidad introducida por el postulado cuántico en los fenómenos hace que los físicos se vean confrontados con el problema de que cada observación describe un evento particular donde sólo un aspecto del fenómeno se puede investigar. Además de esto, se preguntan cómo seguir hablando de la realidad en términos de la física clásica cuando se ve que en el proceso de observación de los fenómenos atómicos se da una interacción incontrolable⁶. Es decir, cada vez que se quiere medir la posición de un electrón se le envía un haz de luz, este haz de luz está compuesto por fotones que interactúan con electrón (i.e., se da un colisión entre ellos) dándose un intercambio de cantidad de movimiento, tal interacción no es controlable por los aparatos de medición. En este sentido dice Bohr (TADN, 1988:55):

“...nos enfrentamos a leyes físicas que caen fuera del dominio de nuestra experiencia ordinaria y que presentan dificultades a nuestras formas usuales de intuición.”

Las formas usuales de la intuición⁷ a que hace referencia Bohr son la causalidad y las descripciones espacio-temporales. El cuanto de acción evidencia una limitación en tales formas de analizar y ordenar la experiencia ya que rompe con la continuidad y causalidad de los fenómenos propuesta por la física clásica.

El carácter de individualidad hace imposible hablar de una realidad independiente del sujeto, consecuentemente también se da un problema al interpretar la idea de objetividad y esto es debido a que “*la magnitud finita del cuanto de acción impide hacer una distinción neta entre*

el fenómeno y el instrumento de observación” (TADN, 1988:60).

Por consiguiente, la interacción incontrolable presente en toda observación cuántica pone en jaque el ideal clásico de descripción objetiva de la naturaleza que supone la separación entre el objeto y el sujeto. Tal ideal de descripción se basa en la unión del principio de causalidad, el principio de conservación más la idea de sistema cerrado. Al permitir proponer que los sistemas físicos son “sistemas cerrados” es decir, sistemas aislados y por ende sin ninguna interacción externa se tiene la base epistemológica y metodológica para defender la idea de objetividad de las observaciones.

El estado de un sistema cerrado se describe mediante variables (propiedades) dinámicas y cinemáticas (i.e., la coordinación espacio-temporal, la cantidad de movimiento y la energía). Asimismo, la noción de “sistema cerrado” facilita la aplicación de un principio de conservación a las cantidades dinámicas y cinemáticas haciendo posible de esta manera la descripción de la evolución del sistema en el tiempo; en este sentido la aplicación del principio de conservación hace posible también la aplicación de la causalidad (Rioja, 1992:258). En este sentido la objetividad de la experiencia se ve garantizada por la idea de sistema cerrado i.e., la observación libre de interacción. Sin embargo el postulado cuántico hace que tales ideales deban ser abandonados:

“...nos hemos visto forzados a abandonar, paso a paso, la descripción causal del comportamiento individual de los átomos del espacio y el tiempo y a considerar que la naturaleza elige libremente entre distintas posibilidades a las que solo cabe aplicar consideraciones probabilísticas.” (TADN, 1988:55)

El abandono del ideal descriptivo es producto del postulado cuántico y en este sentido el postulado cuántico deviene un elemento revolucionario al romper con la idea de la continuidad, base de la descripción clásica. Es la revolución cuántica la que hace imposible obviar la necesidad de una revisión crítica de los supuestos conceptuales sobre los que se basa la descripción científica de

la naturaleza. Tal necesidad de revisión surge en el momento en que se aplican los principios de la descripción clásica a los fenómenos cuánticos, fenómenos donde impera la discontinuidad.

Junto al postulado cuántico se halla el problema de la dualidad onda-partícula⁸, es decir, la necesidad de utilizar las imágenes opuestas de onda y partícula para describir una gran cantidad de fenómenos que se observan en la interacción entre la materia y la radiación:

“...debemos elegir entre dos conceptos mutuamente contradictorios de la propagación de la luz: la idea de ondas luminosas y la noción corpuscular de los fotones, cada una de las cuales expresan a su manera ciertos aspectos fundamentales de la experiencia”. (TADN, 1988:147)

Dicha situación evidencia de igual manera una limitación en el uso de imágenes mecánicas en la descripción de los fenómenos así como su carácter abstracto (i.e., son idealizaciones). Si se supone la realidad de ambas imágenes entonces, la descripción los fenómenos como hechos reales genera una contradicción fundamental en la naturaleza, se estaría violando, en cierta forma, el principio de identidad. En el pensamiento de Bohr es fundamental el hecho de que ambas imágenes son necesarias para la descripción completa del fenómeno y que ellas son irreducibles la una a la otra. La irreductibilidad surge del hecho de que cada una de las propiedades, ya sean onda o partícula, se manifiestan en situaciones diferentes y excluyentes. El reducir una imagen a la otra implicaría, desde el punto de vista de Bohr, que se tiene una imagen incompleta de la naturaleza. Así:

“...complementariedad no significa, en modo alguno, una renuncia arbitraria a un análisis detallado de los fenómenos atómicos, sino que, por el contrario, es la expresión de una síntesis racional de toda la experiencia acumulada en este campo...” (APHK, 1964:24)

Otro elemento importante en la argumentación de Bohr es la imposibilidad de abandonar los conceptos clásicos (i.e., el lenguaje clásico) para

la descripción. Esto se debe a que la comunicación de los resultados de los experimentos, que son marcas macroscópicas en los instrumentos, se expresa en el lenguaje clásico. La descripción del aparato de medición en términos del lenguaje clásico es condición necesaria para la comunicación inequívoca y objetiva de la experiencia. La importancia de dichos conceptos reside en su capacidad de producir visualizaciones de los fenómenos que se experimentan, están conectados de forma esencial con la capacidad de los seres humanos de visualizar las experiencias.

Bohr también llama a la complementariedad una “*generalización racional*”⁹ del marco clásico, es decir, es una consecuencia racional de la aparición del cuanto dentro del marco clásico, una derivación a partir del cuanto:

“...he tried to present complementarily as the rational consequence of combining the non-classical ‘quantum postulate’, made inescapable by atomic physics with the older conceptual framework of classical physics.” (Folse, 1985:11)

Es decir, en vista de que la complementariedad se deriva de su antecesor el marco clásico, se le puede ver como una generalización racional del ideal clásico de la causalidad:

“... it appears as a new framework derived from the empirical demand to accept the quantum postulate’ and yet make atomic physics consistent with the continued use of the classical concepts to describe those phenomena through which we confirm this theoretical account of the structure and behavior of atomic systems.” (Ibídem)

Como ya se mencionó el término “generalización racional” hace referencia al hecho de que la complementariedad, el nuevo marco conceptual, se deriva del marco conceptual anterior.

Conclusión

En Como Bohr no solo presenta los avances de la nueva mecánica cuántica sino que expone los problemas surgidos en la descripción de los

fenómenos una vez que se acepta como hecho empírico, y no solo como un punto de vista heurístico, el cuanto de acción de Planck.

La complementariedad se puede interpretar como una consecuencia lógica -una derivación- del introducir el cuanto de acción en la mecánica clásica, es decir, es una consecuencia de la combinación del postulado cuántico y el marco conceptual clásico. Así, el término “generalización racional” hace referencia al hecho de que la complementariedad, el nuevo marco conceptual, se deriva del marco conceptual anterior.

De igual manera la complementariedad es la ampliación necesaria del marco clásico para la comprensión armoniosa de fenómenos aparentemente contradictorios y que es consecuencia del introducir el cuanto de acción en el marco de la mecánica clásica. Es este último elemento la que hace que la complementariedad se un marco conceptual nuevo ya que implica el rompimiento con elementos fundamentales del marco clásico y la redefinición del uso y alcance de las imágenes descriptivas en la mecánica clásica.

Así, el marco conceptual de la complementariedad implica, de acuerdo a Bohr, una contribución a la clarificación filosófica de los supuestos subyacentes tanto al conocimiento humano en general como al científico.

La complementariedad, en tanto que marco conceptual, supone descripciones complementarias es decir, descripciones en las que “*toda aplicación de los conceptos clásicos excluye el uso simultáneo de otros conceptos clásicos igualmente necesarios en otras circunstancias para la elucidación de los fenómenos*” (TADN, 1988:59) y “*sirve para simbolizar la limitación fundamental con que se tropieza en física atómica de la existencia objetiva de los fenómenos independiente de los medios de observación.*” (APHK, 1964:10) Los conceptos a los que se hace referencia son los de onda y de partícula que, a pesar de que “representan” manifestaciones diferentes y contrarias son necesarios para una *descripción exhaustiva* de los fenómenos, ambos *explican características igualmente importantes de los fenómenos luminosos* (APHK, 1964:7).

Así, la complementariedad provee una síntesis de los fenómenos atómicos y en la medida que supone principios descriptivos diferentes a

los del marco clásico la complementariedad es un nuevo marco conceptual que busca la descripción objetiva y la síntesis armoniosa de los fenómenos observados a nivel atómico.

Notas

1. Se utilizan las versiones en español de las colecciones de ensayos de Niels Bohr. Las obras utilizadas son: Teoría atómica y descripción de la naturaleza. Madrid: Alianza, 1988, (TADN). Física atómica y conocimiento humano. Madrid: Aguilar, 1964 (APHK) y Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano. Madrid: Aguilar, 1970 (Ensayos). De igual manera se utiliza los textos contenidos en el volumen sexto de los escritos de Niels Bohr: Kalckar, Jørgen (Editor) Niels Bohr Collected Works. Foundations of Quantum Physics (1926-1932). Vol. VI, Ámsterdam: North-Holland, 1985 (NBCW6)
2. Al respecto de este prefacio Pauli envía una carta a Bohr donde le dice que nunca se había reído tanto como cuando leyó los comentarios ridículos del editor de la revista. Véase: Kalckar, Jørgen (Editor) Niels Bohr Collected Works. Foundations of Quantum Physics (1926-1932). Vol. VI, Ámsterdam: North-Holland, 1985, p. 53.
3. Recuérdese que para Bohr las representaciones intuitivas son las imágenes de onda y partícula así como las descripciones espacio-temporales y causales. De acuerdo con Bohr, “*la causalidad puede ser considerada como la forma de intuición por la cual coordinamos nuestras percepciones sensoriales.*”. Véase TADN, p. 154.
4. Esto es lo que se ha dado en llamar la interpretación epistémica de las relaciones de incertidumbre. Esta interpretación surge de la idea de que las relaciones de incertidumbre son consecuencia del hecho de que el formalismo cuántico se desarrolló para describir no las propiedades del sistema físico sino aquello que podemos conocer de la naturaleza a partir de los fenómenos observados. Véase: Henry Folse, op.cit. pp. 134-137.
5. En un segundo artículo se analizará el desarrollo posterior a la Conferencia de Como del marco conceptual de la complementariedad.
6. Entre los problemas también está el hecho de que la repetición de un experimento con un mismo montaje puede tener resultados diferentes. Además, montajes experimentales diferentes

proporcionan imágenes contradictorias (i.e., la dualidad onda-partícula).

7. Por “*formas usuales de intuición*” Bohr entiende aquellos parámetros usados en la descripción clásica (i.e., la continuidad y la causalidad). Tales formas de intuición son idealizaciones necesarias en la física clásica para poder describir un sistema físico como sistema aislado. Sin embargo, el postulado cuántico revela elementos que son contrarios a ellas, es decir, que toda observación es una interacción entre dos sistemas. Por “*idealizaciones*” se entiende toda aquella situación donde, en aras de la simplicidad, no se toman en cuenta todas las posibles variables que componen un determinado sistema físico (v.gr., la ley de los gases ideales).
8. Recuérdese que para inicios de 1927 Bohr ha aceptado completamente la idea del fotón de Einstein.
9. Los nombres de “punto de vista general” y “generalización racional” son empleados indistintamente por Bohr en los primeros años entre 1927 y 1930.

Bibliografía

- Bohr, Niels (1988) *Teoría atómica y descripción de la naturaleza*. Madrid: Alianza.
- Bohr, Niels (1964) *Física atómica y conocimiento humano*. Madrid: Aguilar.
- Folse, Henry (1985) *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity*. Ámsterdan: North-Holland
- Holton Gerald. (1978) *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid: Alianza.
- Kalckar, Jørgen (Editor) (1985) *Niels Bohr Collected Works. Foundations of Quantum Physics (1926-1932)*. Vol. VI, Ámsterdam: North-Holland, 1985
- Murdoch, Dugald (1987) *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. New York: Cambridge University Press.
- Rioja, Ana. (1992) *La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza*. En: *Revista de Filosofía*, 3^a. Época, Vol. V, No. 8, España: Editorial Complutense.