



# La filosofía trascendental y la interpretación de Bohr de la teoría cuántica

Hernán PRINCE



## RESUMEN

La filosofía trascendental de Kant distingue entre las condiciones de objetividad del conocimiento y las de la unidad sistemática de éste. En el presente artículo, intentaremos mostrar que esos dos momentos del conocimiento científico constituyen los ejes que articulan la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. Veremos que la exigencia de objetividad del conocimiento fundamentará el carácter clásico de la descripción de los fenómenos cuánticos, mientras que la demanda de unidad sistemática de dichos fenómenos fundamentará la objetividad de los objetos cuánticos.

PALABRAS-CLAVE • Kant. Bohr. Objetividad. Complementariedad.

## INTRODUCCIÓN

La filosofía trascendental de Kant cuestiona radicalmente el modo en el que debemos comprender la relación entre el conocimiento y su objeto, proponiendo una “revolución copernicana” en nuestra concepción de tal relación. Según esta nueva manera de entender el problema ya no será el objeto el que rija el conocimiento, es decir, el objeto dejará de constituir una pauta trascendente al conocimiento, a la que este último debería simplemente adecuarse. Por el contrario, se mostrará que es el conocimiento el que rige al objeto, en tanto aquellas condiciones que determinan el carácter objetivo del conocimiento son más bien condiciones inmanentes al conocimiento mismo (cf. KrV, B, p. xvi). Según la investigación trascendental, esas condiciones pueden ser establecidas *a priori* y, de tal modo, podrá conocerse *a priori* de las cosas aquello que nosotros, en tanto sujeto cognoscentes, ponemos en ellas (cf. KrV, B, p. xviii).

La inversión en el modo de pensar la correlación conocimiento-objeto implica, entonces, una nueva determinación de la estructura del conocimiento mismo, pues esa estructura no es otra que la constituida por las condiciones inmanentes recién señaladas. En ese sentido, la filosofía crítica distingue dos tipos de condiciones. Por un lado, se encuentran aquellas que expresan la exigencia de *objetividad* del cono-

cimiento, mientras que, por el otro lado, están las que reflejan la exigencia de su *unidad sistemática*.<sup>1</sup>

Intentaremos en este artículo mostrar que esos dos momentos trascendentales del conocimiento constituyen los ejes que articulan la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. Veremos que la exigencia de objetividad del conocimiento fundamentará el carácter clásico de la descripción de los *fenómenos* cuánticos, mientras que la demanda de unidad sistemática de dichos fenómenos fundamentará la objetividad de los *objetos* cuánticos.

Para cumplir nuestro propósito comenzaremos discutiendo la clave de bóveda de la interpretación de Bohr: el postulado cuántico. Luego, analizaremos desde una perspectiva trascendental las consecuencias que se siguen de dicho postulado. En primer lugar, estudiaremos si un objeto cuántico es o no un objeto de experiencia posible. Más tarde, consideraremos el problema de la objetividad de los resultados experimentales en el caso cuántico. Posteriormente, discutiremos la conexión entre el postulado cuántico y el punto de vista de la complementariedad. Con ello, tendremos todos los elementos para determinar el concepto de *fenómeno* cuántico. En este punto, consideraremos la diferencia entre fenómeno y *objeto* cuántico, estudiando la función trascendental de este último y el problema de su relación con la intuición. Finalmente, veremos cómo las dos exigencias trascendentales de objetividad y de unidad sistemática del conocimiento iluminan la distinción entre objetividad clásica y objetividad cuántica.

## I EL POSTULADO CUÁNTICO

La piedra basal de la interpretación bohriana de la teoría cuántica es el *postulado cuántico*. Este postulado “atribuye a todo proceso atómico una discontinuidad esencial, o más bien una individualidad, totalmente ajena a las teorías clásicas y simbolizada por el cuanto de acción de Planck” (Bohr, 1934, p. 53).

La afirmación de la discontinuidad de los procesos cuánticos no es sino la negación de la ley de continuidad de todo cambio. Según esa ley, la variación de los estados de una cosa se verifica de modo tal que la cosa al cambiar recorre todos los posibles estados comprendidos entre el inicial y el final. Dado que la validez de esa ley es rechazada, se

<sup>1</sup> Los principios constitutivos de la experiencia contienen las condiciones de la objetividad de la experiencia, en tanto que los principios regulativos de la experiencia contienen las condiciones de su unidad sistemática. Así sostiene Cassirer: “La fundamentación de la filosofía crítica no sólo incluye una determinación modificada de la relación del saber con el objeto, sino que a la vez contiene una nueva determinación conceptual del saber mismo. Los dos momentos esenciales del saber pueden ser resumidos en la exigencia de la objetividad del saber y en la exigencia de su unidad universal” (Cassirer, 2003 [1923], p. 236). Todas las citas de este artículo han sido traducidas por nosotros.

asume que habrá transiciones mínimas o discretas. Dichas transiciones tendrán un carácter individual, en tanto no podrán ser reducidas a otras más elementales. La discontinuidad de los procesos atómicos sostenida por el postulado cuántico permite establecer una notable conexión entre la argumentación de Bohr y la filosofía trascendental de Kant.

Según Kant, la ley de continuidad expresa la forma de todo cambio en general. Dicha ley resulta consecuencia de la aplicación *a priori* de la categoría de causalidad y, así, adquiere el carácter de condición de la distinción entre la serie subjetiva de nuestras percepciones y la serie objetiva de la experiencia. Consideremos brevemente el análisis de Kant de dicha ley. Sea el cambio en el estado del objeto el surgimiento de una realidad cuya magnitud es  $a$ . Dado que ni en el tiempo ni en lo real en el tiempo existen partes mínimas, la realidad sufre una transición continua desde su magnitud inicial = 0 hasta su valor final =  $a$ . Pero esa transición debe poseer una causa para ser representada como una transición *objetiva*. Tal causa debe entonces generar lo real durante el tiempo de la transición y no súbitamente. Así, no sólo la forma y la materia de la intuición son continuas sino que la misma acción de la causalidad debe ser continua también. Esta característica necesaria de la causalidad se expresa mediante la ley de su continuidad, según la cual “toda alteración es posible sólo mediante una acción continua de la causalidad” (KrV, A, p. 208, B, p. 254). La distinción entre la serie subjetiva de las percepciones y la serie objetiva de la experiencia solamente puede ser alcanzada bajo la presuposición de la aplicación al múltiple sensible de la categoría de causalidad y, consiguientemente, de la validez de la ley de su continuidad. Por lo tanto, de acuerdo con la doctrina de Kant, si la ley de continuidad de la causalidad no valiera, entonces la secuencia contingente de nuestras percepciones no podría distinguirse del curso necesario de la experiencia.

Por su parte, Bohr *niega* la continuidad de la causalidad en los procesos cuánticos y *postula* que un sistema atómico pasa de un estado inicial a otro final sin recorrer los estados intermedios, como, por ejemplo, cuando un electrón sufre transiciones entre estados discretos de energía. En particular, en el caso de una medición, dicho proceso físico involucrará una interacción discontinua entre el sistema a medir y el aparato de medición. Lo destacable de la argumentación bohriana es la afirmación de que, precisamente debido a esa discontinuidad, en una medición resultará imposible distinguir el sistema cuántico del instrumento de observación utilizado.

Ahora bien, el postulado cuántico implica que toda observación de fenómenos atómicos entrañará una interacción con el instrumento de observación de la que uno no se podrá desentender. Así, una realidad independiente en sentido físico ordinario no podrá atribuirse ni a los fenómenos ni a los instrumentos de observación (Bohr, 1934, p. 54).

De este modo, vemos que la interpretación de Bohr de la teoría cuántica respeta la restricción crítica que acabamos de señalar. Dado que la ley de continuidad de la causalidad no es válida en un proceso de medición, entonces no es posible en esa situación distinguir entre la serie *contingente* de los datos empíricos y la serie *necesaria* de los estados del sistema medido.<sup>2</sup>

## 2 EL OBJETO CUÁNTICO COMO OBJETO DE EXPERIENCIA POSIBLE

Consideremos ahora la primera de las consecuencias del postulado cuántico. En física clásica, la continuidad causal de la interacción entre sistema y aparato de medición permite establecer el estado del sistema aislado, pues, gracias a la continuidad causal, es posible determinar el efecto del instrumento de medición sobre el sistema medido, para luego, sustrayendo tal efecto, calcular el estado del sistema más allá de su interacción con el instrumento de medición. Por el contrario, con la adopción del postulado cuántico, ese cálculo no puede ya llevarse a cabo.

Ahora bien, por un lado, la determinación del estado del sistema aislado es necesaria para la aplicación de los teoremas de conservación, expresión física concreta de la ley de causalidad. Por el otro, la representación espacio-temporal del sistema sólo es posible mediante datos empíricos obtenidos como resultado de una medición. En ese sentido, Bohr sostiene:

por un lado, la definición del estado de un sistema físico, tal como se entiende usualmente, demanda la eliminación de toda perturbación externa. Pero, en ese caso, según el postulado cuántico, toda observación será imposible y, sobre todo, los conceptos de espacio y tiempo pierden su sentido inmediato. Por otro lado, si con el fin de posibilitar la observación permitimos ciertas interacciones con instrumentos de medición adecuados, no pertenecientes al sistema, naturalmente ya no es posible una definición no ambigua del estado del sistema, y no podrá haber causalidad, en el sentido ordinario de la palabra (Bohr, 1934, p. 54).

<sup>2</sup> Probablemente haya sido el filósofo danés Harald Høffding, maestro y amigo íntimo de Bohr, quien le transmitió a su discípulo la tesis de la necesidad transcendental de la continuidad de la causalidad. En su *Historia de la filosofía moderna*, Høffding afirma “la ley de continuidad (que comprende a la vez la ley de continuidad de la extensión y de los grados, y la ley de relación de causalidad de todos los fenómenos) es valedera para todos los fenómenos, pues formula las condiciones por las que podríamos tener una experiencia real (diferente de la fantasía)” (1907, v. 2, p. 62). Respecto del rol específico de la continuidad en la filosofía de Høffding, cf. 1911, p. 170 ss., 1924, p. 196 ss. Acerca de la influencia de Høffding sobre Bohr, cf. Faye, 1991; Favrhøld, 1992; Pringe, 2007, p. 124-39.

Así, si se asume el postulado cuántico, se debe abandonar toda pretensión de alcanzar una representación espacio-temporal y a la vez causal de un objeto sometido a dicho postulado. Es decir, si un objeto se encuentra dentro del dominio de validez del postulado, no será posible – como sí lo es en física clásica – sintetizar el conjunto de datos contingentes de una medición, según el concepto de causa, como el efecto de dicho objeto, representando a este último en el espacio y en el tiempo de modo tal que sus estados se modifican causalmente.

En términos trascendentales, la situación que enfrentamos en una medición cuántica es la siguiente. Por un lado, aquello que Bohr denomina condiciones de “observación” de un sistema cuántico no son sino las condiciones bajo las cuales es dada la multiplicidad que debería ser sintetizada según el concepto de un objeto cuántico. Por el otro lado, las condiciones de la “definición” del estado del sistema aislado son las condiciones de aplicación del concepto de un objeto cuántico, es decir, las condiciones bajo las cuales nos podemos representar al objeto como la causa espacio-temporal de los datos experimentales. Pero, como acabamos de ver, si se asume el postulado cuántico, las condiciones de observación de un sistema son incompatibles con las condiciones de la definición de su estado. Por lo tanto, el concepto de un objeto cuántico no puede referirse directamente a la intuición, como el pensamiento de la unidad de la síntesis de una multiplicidad espacio-temporal, pues las condiciones de aplicación del concepto son incompatibles con las condiciones del darse de la multiplicidad empírica a la que dicho concepto debería aplicarse. En otras palabras, según los criterios de la filosofía trascendental, *un objeto cuántico no es un objeto de experiencia posible*, pues para serlo el objeto debería satisfacer tanto las condiciones sólo bajo las cuales puede ser dado como aquellas sólo bajo las cuales puede ser pensado. Pero, como acabamos de ver, esas condiciones, que corresponden a las que Bohr llama de “observación” y de “definición” respectivamente, se excluyen mutuamente.

### 3 LA OBJETIVIDAD DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

La determinación trascendental meramente negativa de la objetividad cuántica, según la cual un objeto cuántico no es un objeto de experiencia posible, nos enfrenta inmediatamente al problema de la objetividad de los datos experimentales. En efecto, si los objetos cuánticos no son objetos de experiencia posible, ¿cómo es que los resultados de experimentos cuánticos adquieren validez objetiva y son así distinguidos de meras ilusiones subjetivas? Respecto de tal problema, Bohr afirma:

es esencial recordar que toda información inequívoca acerca de objetos atómicos se deriva de las marcas permanentes dejadas sobre los cuerpos que definen las condiciones experimentales (...). La descripción de los fenómenos atómicos tiene, en cuanto a esto, un carácter perfectamente objetivo, en el sentido de que no se hace referencia explícita a ningún observador individual (Bohr, 1963, p. 3).

La exigencia de objetividad de los datos empíricos que garantizan la referencia física del formalismo matemático de la teoría no vale sólo para la física cuántica, sino que tal objetividad es requerida en el caso de cualquier teoría física. Por lo tanto, la exigencia también está presente en la física clásica. Bohr subraya ese punto al sostener que “el problema de la observación en física cuántica no difiere de ningún modo del enfoque de la física clásica” (Bohr, 1963, p. 3).

En consonancia con las tesis centrales de la filosofía trascendental, Bohr sostiene que dicha objetividad se alcanza sólo si los datos espacio-temporales son subsumidos bajo el concepto de causalidad.

No debe olvidarse que el concepto de causalidad subyace a toda interpretación de cada resultado experimental, y que, incluso en la coordinación de la experiencia, uno no puede nunca habérselas con rupturas bien delimitadas en la cadena causal (Bohr, 1937 [1998], p. 87).

Por lo tanto, según Bohr, la síntesis de los datos espacio-temporales de acuerdo con el principio de causalidad es una condición necesaria para que dichos datos adquieran validez objetiva. Esa condición rige tanto en física cuántica como en física clásica, pues en ambos casos se exige la objetividad de los resultados observacionales. Así, “hablando estrictamente, la idea de observación pertenece al tipo de descripción causal [y] espacio-temporal” (Bohr, 1934, p. 67).

Ahora bien, como hemos visto, en el caso cuántico, no es posible satisfacer simultáneamente las exigencias de coordinación espacio-temporal y conexión causal. El postulado cuántico implica que ambas condiciones necesarias se excluyen mutuamente. Por el contrario, en el caso clásico, los dos requisitos son cumplidos a la vez. Así, Bohr sostiene que

la naturaleza misma de la teoría cuántica nos fuerza a considerar la coordinación espacio-temporal y la demanda de causalidad, cuya unión caracteriza a las teorías clásicas, como rasgos distintivos de la descripción, complementarios pero excluyentes (Bohr, 1934, p. 54-5).

De este modo, la exigencia de objetividad de los datos empíricos sobre los que el formalismo de la teoría cuántica basa su referencia física no puede ser satisfecha por la teoría cuántica misma. Así, no es la teoría cuántica, mediante sus conceptos y sus leyes, la que cumple con la requerida representación espacio-temporal y causal de los datos experimentales. Más bien, de acuerdo con la distinción recién señalada entre el caso cuántico y el caso clásico, dicha representación se verifica sólo cuando los datos son subsumidos bajo leyes y conceptos de la física *clásica*. Por lo tanto, Bohr afirma que

por más lejos que los fenómenos trasciendan la esfera de la explicación de la física clásica, el reporte de toda evidencia debe ser expresado en términos clásicos (Bohr, 1949, p. 39).

En otras palabras, por un lado, enfrentamos la necesidad de objetivar los datos empíricos obtenidos mediante nuestras observaciones, pues de otro modo ellos no constituirían verdaderos resultados experimentales, sino meros reportes de nuestras percepciones contingentes.<sup>3</sup> Esa tarea trascendental de objetivación se verifica con la aplicación de los principios del entendimiento (en particular, el de causalidad) a la multiplicidad espacio-temporal empírica. Pero, a la vez, el postulado cuántico implica la imposibilidad de que la tarea trascendental resulte compatible con el uso de conceptos de objetos cuánticos. Según la filosofía trascendental, la objetivación de los datos experimentales requiere necesariamente la representación de tales datos como efecto de alguna cierta causa espacio-temporal. De tal modo, dicha objetivación solamente puede ser alcanzada mediante el uso de conceptos cuya aplicación sea a la vez compatible tanto con las exigencias de causalidad como con las de espacio-temporalidad. Sin embargo, tal como hemos visto, en el dominio de validez del postulado cuántico las condiciones de aplicación del principio de causalidad excluyen la posibilidad de una representación espacio-temporal. Por lo tanto, la objetivación de los datos experimentales nos presenta una exigencia que los conceptos de objetos cuánticos no pueden cumplir y que sólo es satisfecha por conceptos de objetos *clásicos*.

Los datos empíricos son finalmente representados como resultados experimentales cuando la serie subjetiva de las percepciones es distinguida de la serie objetiva de la experiencia. En ese sentido, Bohr afirma que “la distinción entre sujeto y objeto es necesaria para una descripción no ambigua” (1958, p. 101). Una descripción inequívoca de un experimento sólo es posible si desaparece toda ambigüedad de los datos, asociada a su dependencia de la subjetividad perceptora, y se alcanzan mediciones ob-

<sup>3</sup> En términos kantianos, esos reportes serían simples juicios de percepción y no alcanzarían el carácter de juicios de experiencia.

jetivas, que no contienen “referencia explícita a ningún observador individual” (1963, p. 3). Pero, como acabamos de ver, la distinción exige el uso de conceptos clásicos. Sólo así “podemos contarles a otros qué hemos hecho y qué hemos aprendido” en un experimento. Por lo tanto, “el reporte del arreglo experimental y de los resultados de las observaciones debe ser expresado en un lenguaje no ambiguo, con la aplicación adecuada de la terminología de la física clásica” (Bohr, 1949, p. 39).

Las observaciones descritas en términos clásicos serán denominadas por Bohr *fenómenos* cuánticos. El formalismo matemático de la teoría cuántica basará su referencia física en dichos fenómenos. Más adelante veremos cómo dicha referencia se alcanza efectivamente. Pero, para ello, debemos antes discutir otra consecuencia del postulado cuántico. Ella es el carácter *contextual* y, más precisamente, *complementario* de los fenómenos cuánticos.

#### 4 LA CONTEXTUALIDAD DE LOS FENÓMENOS CUÁNTICOS Y SU CARÁCTER COMPLEMENTARIO

La contextualidad de los fenómenos cuánticos consiste en que dichas descripciones clásicas poseen una validez objetiva que no trasciende la situación experimental concreta en la que ellas se verifican. Al respecto, Bohr sostiene que

como una manera de expresión más apropiada recomiendo el uso de la palabra *fenómeno* exclusivamente para hacer referencia a las observaciones obtenidas en circunstancias especificadas, incluyendo un informe de todo el arreglo experimental (Bohr, 1949, p. 64).

En efecto, si bien cada fenómeno cuántico resulta una descripción espacio-temporal y causal, la multiplicidad de dichos fenómenos no puede ser unificada en una única imagen espacio-temporal y causal. Por el contrario, representaciones incompatibles (como, por ejemplo, imágenes de ondas e imágenes de partículas) parecen ser necesarias para una interpretación adecuada de los datos experimentales. En ese sentido, Bohr declara que

ilustraciones muy sorprendentes son proporcionadas por los conocidos dilemas concernientes a las propiedades tanto de la radiación electromagnética como de las partículas materiales, evidenciadas por las circunstancias de que en ambos casos imágenes opuestas, como ondas y partículas, parecen igualmente indispensables para el reporte completo de la evidencia experimental (Bohr, 1956, p. 87).



La experiencia nos enfrenta así con una multiplicidad de fenómenos que parece no poder ser unificada en una única imagen espacio-temporal y causal. Para dar cuenta de tal hecho empírico, podría sugerirse que la imposibilidad de alcanzar una única imagen espacio-temporal y causal se deba simplemente al hecho de que las imágenes que proponemos para tal función unificadora no son las adecuadas. Si bien, por ejemplo, ni la imagen de una onda ni la de una partícula resultan aptas para cumplir dicha tarea, quizá haya otras, por el momento desconocidas, que sí lo sean. De hecho, esa posición fue sostenida por Schrödinger y defendida en famosas discusiones con Bohr en Copenhague (cf. Pringe, 2007, p. 79 ss.). Desde tal perspectiva, sería necesario buscar nuevos conceptos que nos permitieran obtener una única imagen espacio-temporal y causal de los fenómenos cuánticos. Sin embargo, Bohr rechaza esta solución, argumentado que la sola aceptación del postulado cuántico implica la necesidad de considerar más de un tipo de imagen para la interpretación de los datos experimentales.

De hecho, la individualidad de los típicos efectos cuánticos encuentra su expresión apropiada en la circunstancia de que todo intento de subdividir los fenómenos demandará un cambio en el arreglo experimental, introduciendo nuevas posibilidades de interacción entre objetos y aparatos de medición, que en principio no pueden ser controladas. *Consecuentemente* la evidencia obtenida bajo diferentes condiciones experimentales no puede ser abarcada en una única imagen (Bohr, 1949, p. 40, énfasis mía).

Dado el postulado cuántico, tal como hemos visto, será necesario describir los fenómenos cuánticos en términos clásicos. Mediante esa descripción se dará cuenta de los resultados de la medición de una cierta magnitud física, obtenidos gracias a la utilización de un determinado arreglo experimental. Ahora bien, si deseáramos “subdividir” el fenómeno cuántico, es decir, si intentáramos determinar aquello que la discontinuidad postulada nos impide establecer, deberíamos modificar nuestro arreglo experimental. Pero, en tal caso, introduciríamos nuevas interacciones discontinuas posibles y, con ello, nuevos aspectos de individualidad de *otro* fenómeno cuántico. Por lo tanto, la descripción clásica asociada al primer arreglo experimental no podrá ser utilizada en el caso del segundo arreglo, y los datos obtenidos bajo esas diferentes condiciones experimentales no podrán ser comprendidos en una única imagen. Así, Bohr sostiene en una carta a Schrödinger, con fecha de 2/dic/1926,

al respecto es interesante ver cómo el concepto de onda o de partícula se presenta como el más apropiado, según el punto en la descripción en el que la suposición de las discontinuidades aparece explícitamente. En mi opinión, esto se entiende

fácilmente, pues la definición de todo concepto o más bien de toda palabra presupone la continuidad de los fenómenos y, por lo tanto, se vuelve ambigua tan pronto como esta presuposición no puede sostenerse (BCW, v. 6, p. 14).

Si en nuestra descripción utilizamos un determinado concepto (por ejemplo, el concepto de partícula), podremos hacerlo hasta que un cambio en el arreglo experimental introduzca una discontinuidad. En ese caso, las condiciones bajo las cuales podemos aplicar dicho concepto dejarán de verificarse, pues la distinción entre la serie contingente de los datos empíricos y la serie necesaria de los estados del objeto no podrá ya establecerse. En tal situación, deberemos considerar para la descripción del experimento un concepto distinto (por ejemplo, el concepto de onda), de modo a alcanzar una descripción en la que la discontinuidad desaparezca y las condiciones de aplicación de los conceptos sean restablecidas.

Así, el postulado cuántico implica, por un lado, que debemos describir los fenómenos cuánticos en términos clásicos y, por el otro, que requeriremos para ello más de un tipo de descripción. A estas descripciones contextuales, asociadas a distintos arreglos experimentales, que se excluyen entre sí, pero que a la vez son todas necesarias para una interpretación exhaustiva de los datos experimentales, Bohr las califica como descripciones *complementarias*.

La evidencia obtenida bajo diferentes condiciones experimentales no puede ser abarcada en una única imagen, sino que debe ser considerada como *complementaria*, en el sentido de que sólo la totalidad de los fenómenos agota la información posible acerca de los objetos (Bohr, 1949, p. 40).

En síntesis, la adopción del postulado cuántico conlleva, según Bohr, la representación de fenómenos cuánticos, cuya validez objetiva estará garantizada por el hecho de que dichos fenómenos serán descriptos en términos clásicos. De esa manera, la interpretación de Bohr de la teoría cuántica respeta los requisitos trascendentales exigidos para la objetivación de aquellos datos empíricos que proveerán al formalismo matemático de referencia física. Tales datos serán representados de modo tal que las exigencias de espacio-temporalidad y causalidad sean ambas satisfechas. Sin embargo, con esa noción bohriana de fenómeno cuántico, la respuesta a la cuestión de la validez objetiva de los resultados experimentales inaugura un nuevo problema. En efecto, los fenómenos cuánticos son contextuales, dado que su validez objetiva se encuentra restringida a un determinado tipo de arreglo experimental y son complementarios, en tanto se excluyen entre sí pero, a la vez, todos ellos son necesarios para dar cuenta de la evidencia experimental. Nos encontramos entonces frente a una multiplicidad de fe-

nómenos, cuyo carácter objetivo se encuentra establecido, pero que no por ello adquieren *unidad sistemática*. El problema de una unidad tal será el que consideraremos a continuación.

## 5 LA UNIDAD SISTEMÁTICA DE LOS FENÓMENOS CUÁNTICOS Y LA *objetividad* CUÁNTICA

La clave para la solución del problema de la unidad sistemática de los fenómenos cuánticos se encuentra contenida en la cita que acabamos de considerar. En ella, Bohr distingue los *objetos* cuánticos de los *fenómenos* cuánticos, que no son sino descripciones clásicas cuya totalidad agota la información posible acerca de los primeros. La unidad sistemática de los fenómenos cuánticos será alcanzada cuando ellos sean subsumidos bajo el concepto de un objeto cuántico. Consideremos entonces el modo en el que esta subsunción se verifica. El concepto de un cierto objeto o sistema cuántico contiene la representación de su estado y, con ella, la información acerca de las probabilidades de los distintos resultados de las mediciones posibles que pueden efectuarse sobre el sistema. De este modo, los múltiples fenómenos cuánticos se unifican a través de una ley probabilística. Dado un cierto fenómeno cuántico, la representación del estado del objeto cuántico establece la *probabilidad* de todos y cada uno de los fenómenos del objeto. Así, la multiplicidad de los fenómenos resulta sintetizada mediante el concepto del objeto y subsumida bajo él. Esta síntesis permite entonces llevar a cabo predicciones tales que, dado un cierto fenómeno, las probabilidades de los diversos resultados de posibles mediciones son calculadas a partir de la llamada “función de onda” del sistema.

El concepto de un objeto cuántico lleva a cabo así una tarea trascendental análoga a la del concepto de organismo, tal como este último concepto es entendido por Kant.<sup>4</sup> Ambos conceptos cumplen una función *regulativa* en la experiencia, que la filosofía trascendental distingue claramente de una tarea *constitutiva*. Esto significa que ni el concepto de organismo ni el de objeto cuántico determina datos empíricos como fenómenos objetivos, sino que más bien cada uno de ellos sintetiza fenómenos, cuya validez objetiva ya se encuentra garantizada, en una unidad de orden superior. Según la filosofía trascendental de Kant, la objetividad de los organismos, en tanto objetos naturales determinados, resulta fundada en la legalidad empírica de los diversos mecanismos físicos que explican la generación y el funcionamiento de sus partes. Por el

<sup>4</sup> Para un análisis detallado de esta cuestión, véase Pringe, 2007, p. 164 ss. Para una discusión de los vínculos entre filosofía de la física y filosofía de la biología en Niels Bohr, Pringe, 2007, p. 189 ss.

contrario, la unidad sistemática de dichas partes sólo se alcanza mediante la representación del organismo como fin. En el caso de los objetos cuánticos, las partes cuya unidad debe ser establecida ya no son, como en un organismo, sus partes componentes, sino más bien sus partes complementarias, es decir, los fenómenos cuánticos mismos. Dichos fenómenos adquieren validez objetiva gracias a la aplicación de conceptos clásicos para su descripción, pero su unidad sistemática sólo es alcanzada cuando ellos son subsumidos bajo el concepto de un objeto cuántico.

## 6 LA EXHIBICIÓN INTUITIVA DEL CONCEPTO DE UN OBJETO CUÁNTICO

Un nuevo aspecto de la interpretación de Bohr se presenta todavía porque, mediante esa subsunción, el objeto cuántico no es exhibido directamente en la intuición. Para subrayar este punto, Bohr señala el carácter simbólico del formalismo de la teoría. La imposibilidad de exhibir el concepto de un objeto cuántico directamente en la intuición ya ha sido discutida en la sección 2 de este trabajo, donde se mostró que, según los criterios de la filosofía trascendental, un objeto cuántico no es un objeto de experiencia posible. Veremos ahora que, ante la imposibilidad de una exhibición *directa*, el concepto de un objeto cuántico será exhibido en la intuición *indirectamente*.

La exhibición indirecta en la intuición es para Bohr una exhibición *simbólica*. De tal modo, Bohr contrapone los conceptos clásicos a los símbolos cuánticos con un doble propósito. Por un lado, Bohr subraya así la imposibilidad de exhibir los conceptos de los objetos cuánticos directamente en la intuición. Por el otro lado, afirma que dichos conceptos serán exhibidos indirectamente, mediante el uso de conceptos clásicos. Más precisamente, las descripciones complementarias serán representadas como *símbolos* del objeto cuántico (cf. Pringe, 2008). Así, un objeto cuántico se comportará en ciertas circunstancias *como si* fuera, por ejemplo, una partícula y, en ciertas otras, como si fuera una onda. En este sentido, Bohr afirma que “simbolizamos [a los objetos] mediante las abstracciones de partículas aisladas y de radiación” (Bohr, 1934, p. 69).

La piedra de toque de dicho simbolismo serán las relaciones de incertidumbre establecidas por Heisenberg. Al respecto, Bohr sostiene que

la indeterminación fundamental que enfrentamos aquí puede (...) ser considerada como una expresión directa de la absoluta limitación de la aplicabilidad, en la descripción de fenómenos atómicos, de concepciones que pueden ser visualizadas; una limitación que aparece en el aparente dilema que se presenta en la cuestión de la naturaleza de la luz y de la materia (Bohr, 1934, p. 114).

Las relaciones de incertidumbre establecen *cuantitativamente* los límites del uso justificado de las descripciones en términos de onda y de partícula. Es decir, dichas relaciones nos brindan el criterio necesario para la aplicación de conceptos clásicos en la interpretación de los datos experimentales y, así, de la representación de fenómenos complementarios como símbolos del objeto cuántico.

*El rol propio* de las relaciones de incertidumbre consiste en *asegurar cuantitativamente la compatibilidad lógica* de las leyes aparentemente contradictorias que aparecen cuando usamos dos arreglos experimentales diferentes (Bohr, 1937, p. 293).

Las relaciones de incertidumbre guían el uso de descripciones clásicas complementarias para la simbolización de objetos cuánticos (cf. Bense, 1938, p. 60). Así, Heisenberg afirma que

para la visualización [de procesos atómicos] (...) nos debemos conformar con dos analogías incompletas – la imagen ondulatoria y la imagen corpuscular. La aplicación simultánea de ambas imágenes es, por lo tanto, el criterio natural para determinar cuán lejos puede llevarse la analogía y constituye un punto de partida obvio para la crítica de los conceptos que se han incorporado en las teorías atómicas, dado que, desde ya, una deducción acrítica de las consecuencias de ambas [analogías] llevará a contradicciones. De este modo, uno obtiene las limitaciones del concepto de partícula considerando el concepto de onda. Como Bohr ha mostrado, esta es la base de una derivación muy simple de las relaciones de incertidumbre entre posición y momento de una partícula. De la misma manera uno puede derivar las limitaciones del concepto de onda mediante una comparación con el concepto de partícula (Heisenberg, 1949, p. 11).<sup>5</sup>

Quizá sea Pauli quien, con una pregunta, mejor resuma la problemática del uso de fenómenos complementarios, descritos en términos clásicos, para la exhibición de objetos cuánticos en la intuición. En efecto, “¿si [el átomo] no fuera un símbolo, cómo podría ser ‘tanto onda como partícula’?” (Pauli *apud* Laurikainen, 1988, p. 193).

<sup>5</sup> Un extenso análisis del dualismo onda-partícula en el marco de experimentos recientes en óptica cuántica puede hallarse en Falkenburg (2007).

## 7 OBJETIVIDAD CLÁSICA Y OBJETIVIDAD CUÁNTICA

Finalmente, consideraremos la interpretación de Bohr concentrándonos en la determinación del concepto de objetividad cuántica, con el fin de establecer su peculiaridad frente a la objetividad clásica. Para ello, será necesario primero introducir la distinción entre la *validez* objetiva y la *realidad* objetiva de un concepto.<sup>6</sup>

Entenderemos por validez objetiva de un concepto el carácter *necesario* de la síntesis representada por el concepto, en contraposición con aquellas conexiones que sólo pueden ser referidas al estado del sujeto. En este sentido, la síntesis pensada mediante un concepto objetivamente válido se distinguirá de una mera asociación contingente de representaciones. A su vez, esta síntesis podrá ser tal que, gracias a la misma, una multiplicidad sensible alcance referencia objetiva o tal que conocimientos ya objetivos adquieran unidad sistemática. Llamaremos al primer tipo de validez objetiva, validez *constitutiva* y, al segundo tipo, validez *regulativa*.

Por el contrario, la *realidad* objetiva de un concepto consiste en su referencia a un contenido empírico. Un concepto que posee realidad objetiva se diferencia, por lo tanto, de un concepto vacío o meramente formal. Un concepto puede recibir realidad objetiva o bien *directamente*, mediante un *esquema*, o bien *indirectamente*, mediante un *símbolo*.

La objetividad cuántica debe ser distinguida de la objetividad clásica tanto en los que respecta a la cuestión de la validez objetiva como de la realidad objetiva del concepto de objeto. En primer lugar, la validez objetiva del concepto de un objeto clásico consiste en su función sintética de un múltiple empírico, gracias a la cual la representación intuitiva *de un objeto* es constituida. Por el contrario, la validez objetiva del concepto de un objeto cuántico se basa más bien en su tarea regulativa de proveer unidad sistemática a los fenómenos complementarios (cuya objetividad es garantizada por el uso de conceptos clásicos para la interpretación de los resultados experimentales).

En segundo lugar, el concepto de un objeto clásico adquiere realidad objetiva cuando una multiplicidad empírica dada es subsumida bajo el concepto gracias a la mediación de un esquema. Así, el concepto es exhibido directamente en la intuición. Por el contrario, tal como hemos visto, como consecuencia del postulado cuántico, las condiciones bajo las cuales es dada la multiplicidad empírica que debería ser sintetizada por el concepto del objeto cuántico son incompatibles con aquellas bajo las cuales el concepto puede ser aplicado. Por lo tanto, una exhibición directa de tal concepto en la intuición no es posible. El concepto de un objeto cuántico adquiere realidad objetiva

<sup>6</sup> Debemos aclarar que esta distinción entre validez objetiva y realidad objetiva no se corresponde exactamente con el modo en el que Kant hace uso de esas nociones (cf. Zöller, 1984).

más bien mediante una exhibición indirecta en la intuición, llevada a cabo a través de analogías simbólicas.

Vemos así cómo la interpretación de Bohr de la teoría cuántica se articula mediante la distinción trascendental entre el modo en el que los datos empíricos son representados como resultados experimentales objetivos y el modo en el que la multiplicidad de tales resultados es más tarde unificada. En el primer caso, se verifica una tarea constitutiva llevada a cabo por conceptos clásicos. En dicha tarea, esos conceptos son exhibidos esquemáticamente en la intuición. En el segundo caso, el concepto de un objeto cuántico cumple una función regulativa, garantizando una unidad sistemática entre los fenómenos complementarios, que han sido constituidos por conceptos clásicos. Esos fenómenos, a su vez, le brindan al concepto del objeto cuántico realidad objetiva, porque son representados como símbolos de dicho objeto y, así, lo exhiben indirectamente en la intuición.☞

*Hernán PRINCE*

Profesor de la Universidad de Buenos Aires.  
Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones  
Científicas y Técnicas, Argentina.  
*hprince@gmail.com*

#### ABSTRACT

Kant's transcendental philosophy makes a distinction between the conditions of objectivity of knowledge and those of its systematic unity. In this article we aim to show that these two moments of scientific knowledge articulate Bohr's interpretation of quantum theory. We shall see that the demand of objectivity of knowledge grounds the classical character of the description of quantum phenomena, while the demand of their systematic unity grounds the objectivity of quantum objects.

KEYWORDS • Kant. Bohr. Objectivity. Complementarity.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENSE, M. *Quantenmechanik und Daseinsrelativität*, Welsel-Druck, Köln-Kalk, 1938.  
BOHR, N. *Atomic theory and the description of nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1934.  
\_\_\_\_\_. Causality and Complementarity. *Philosophy of Science*, 4, p. 289-98, 1937. In: \_\_\_\_\_. Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In: \_\_\_\_\_. *Atomic physics and human knowledge*. New York: John Wiley & Sons, 1958. p. 32-66).  
\_\_\_\_\_. Mathematics and natural philosophy. *Scientific Monthly*, 82, p. 85-8, 1956.

- \_\_\_\_\_. *Atomic physics and human knowledge*. New York: John Wiley & Sons, 1958.
- \_\_\_\_\_. *Essays 1958 – 1962 on atomic physics and human knowledge*. London: Wiley, 1963.
- \_\_\_\_\_. *Causality and complementarity*. IN: FAYE, J. & FOLSE, H. (Ed.). *The philosophical writings of Niels Bohr*. Connecticut: Woodbridge, 1998 [1937]. v. 4, p. 83-91.
- CASSIRER, E. Die Kantischen Elemente in Wilhelm von Humboldts Sprachphilosophie. In: ORTH, E. (Ed.). *Geist und Leben*. Reclam, Leipzig, 2003 [1923]. p. 236-73.
- FALKENBURG, B. *Particle metaphysics*. New York: Springer, 2007.
- FAVRHOLDT, D. *Niels Bohr's philosophical background*. *Historisk-filosofiske Meddeleser*, 63. Copenhagen: The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, 1992.
- FAYE, J. *Niels Bohr: his heritage and legacy. An anti-realist view of quantum mechanics*. Dordrecht: Kluwer, 1991.
- FAYE, J. & FOLSE, H. (Ed.). *Causality and Complementarity. The philosophical writings of Niels Bohr*. Connecticut: Woodbridge, 1998. v. 4.
- HEISENBERG, W. *The physical principles of the quantum theory*. Mineola: Dover, 1949.
- HØFFDING, H. *Historia de la filosofía moderna*. Madrid: Jorro, 1907. 2 v.
- \_\_\_\_\_. *Der Menschliche Gedanke*. Leipzig: Reisland, 1911.
- \_\_\_\_\_. *La relativité philosophique*, Paris: Alcan, 1924.
- KANT, I: *Crítica de la razón pura*. Estudio preliminar, traducción y notas M. Caimi. Buenos Aires: Colihue, 2007. (KrV).
- LAURIKAINEN, K. *Beyond the atom. The philosophical thought of Wolfgang Pauli*. Berlin: Springer, 1988.
- ORTH, E. (Ed.). *Geist und Leben*. Reclam, Leipzig, 2003.
- PRINGE, H. *Critique of the quantum power of judgment. A transcendental foundation of quantum objectivity*. Berlin/New York: de Gruyter, 2007.
- \_\_\_\_\_. Kant and Bohr on symbolic knowledge in quantum theory. In: ROHDEN, V. et al (Ed.). *Akten des X. Internationalen Kant-Kongresses*. Berlin: de Gruyter, 2008. p. 757-67.
- ROHDEN, V. et al. (Ed.). *Akten des X. Internationalen Kant-Kongresses*. Berlin: de Gruyter, 2008.
- ROSENFELD, L. et al. (Ed.). *Bohr's collected works*. Amsterdam/New York: North-Holland/American Elsevier, 1972. v. 6. (BCW).
- ZÖLLER, G. *Theoretische Gegenstandbeziehung bei Kant*, de Gruyter, Berlin, 1984.

