



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Marília



**CULTURA
ACADÊMICA**
Editora

Acerca de la función regulativa del principio de correspondencia de Bohr

Hernán Pringe

Como citar: PRINGE, H. Acerca de la función regulativa del principio de correspondencia de Bohr. *In:* SANTOS, L. R.; LOUDEN, R. B.; MARQUES, U. R. A. (org.). **Kant e o A Priori**. Marília: Oficina Universitária; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017. p. 115-128.
DOI: <https://doi.org/10.36311/2020.978-85-7983-928-3.p115-128>



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

ACERCA DE LA FUNCIÓN REGULATIVA DEL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA DE BOHR

Hernán Pringe

En este trabajo me propongo analizar desde una perspectiva trascendental el rol que cumple el principio de correspondencia de Bohr. Sostendré que este principio es un principio regulativo en estricto sentido kantiano. En particular, intentaré mostrar que hasta la introducción del punto de vista de la complementariedad, el principio de correspondencia lleva a cabo la tarea propia de una máxima heurística con la que se busca exhibir directamente en la intuición conceptos de objetos físicos. Por el contrario, desde la perspectiva de la complementariedad, con el principio de correspondencia se intenta que ciertos conceptos de objetos físicos sean exhibidos indirectamente en la intuición, mediante analogías simbólicas. Esta lectura trascendental del pensamiento de Bohr nos permitirá explicar el desarrollo conceptual de su interpretación de la teoría cuántica desde 1913 hasta la conferencia de Como de 1927.

En la primera parte del trabajo, presentaré los presupuestos kantianos mínimos necesarios para mi argumentación posterior. En segundo lugar, consideraré la historia del principio de correspondencia, desde sus orígenes en 1913 hasta la teoría de Bohr-Kramers-Slater. Luego, discutiré la noción de complementariedad y su conexión con la cuestión del conocimiento simbólico en la teoría cuántica. Finalmente, analizaré el rol del principio de correspondencia en el marco de la complementariedad.

1.

El siguiente ejemplo será suficiente para introducir los elementos kantianos necesarios para nuestro análisis del pensamiento de Bohr (PRINGE, <https://doi.org/10.36311/2020.978-85-7983-928-3.p115-128>)

2007, p.19ss). Consideremos la analogía¹: “C es la causa de E, tal como A es la causa de B”, en donde A, B y E son eventos dados, pero C es desconocido. Siendo E dado, su causa C es buscada en la experiencia bajo la presuposición de que la relación causal entre C y E es en cierto sentido idéntica a la relación ya conocida entre A y B. Este procedimiento es empírico, por lo que la analogía así establecida será a posteriori. Sin embargo, la filosofía trascendental determina sus condiciones a priori de posibilidad. Éstas son de dos clases distintas.

En primer lugar, para que la búsqueda de la causa C tenga sentido, es necesario presuponer que todo evento E tiene en general una causa, incluso cuando ésta sea desconocida por el momento. Kant sostiene que todo evento debe tener una causa porque sólo de este modo puede ser representado como un acontecimiento objetivo, perteneciente al curso necesario de la experiencia y no meramente a la serie contingente de nuestras percepciones. Éste es el principio a priori de la sucesión temporal según la ley de causalidad. En palabras de Kant: “Todas las alteraciones suceden según la ley de la conexión de la causa y el efecto.” (B232).

La analogía empírica $C : E = A : B$ se basa en la analogía a priori $C : E = \text{Causa} : \text{Efecto}$. La analogía a priori guía nuestra búsqueda del término desconocido C al indicar la nota característica que dicho término debe poseer: C debe contener la condición de una regla según la cual siempre, necesariamente se sigue el efecto E (A193/B238 – 239).

En segundo lugar, la analogía $C : E = A : B$ presupone que la ley causal particular entre A y B no es válida sólo en tal caso, sino que se verifica también respecto de otros fenómenos. Esta no es una presuposición trivial, porque podría suceder que las leyes que relacionaran distintos pares de causas y efectos no tuvieran la menor relación entre sí. En este sentido, Kant sostiene:

La multiplicidad y diversidad de las leyes empíricas podría ser tan grande que podría ser posible para nosotros conectar hasta cierto punto percepciones según leyes empíricas descubiertas en ciertas ocasiones en una experiencia, pero nunca llevar estas leyes empíricas mismas a la unidad bajo un principio común. (AA XX, 209).²

Si la multiplicidad y la diversidad de las leyes empíricas fuera tal que ellas constituyeran un mero “agregado caótico,” (AA XX, 209) no sería posible encontrar relación alguna entre tales leyes y la analogía $C : E = A : B$ no se podría establecer. Por lo tanto, para que tal analogía pueda ser efectuada, debemos

asumir que las leyes causales particulares pueden ser llevadas bajo leyes más generales. Esta presuposición lógica o metodológica, que versa sobre las leyes empíricas, depende a su vez de una presuposición trascendental que concierne más bien a la naturaleza (AA XX, 215). La presuposición de que la naturaleza se estructura como un sistema empírico mediante la afinidad de leyes particulares bajo leyes más generales es lo que Kant denomina “el principio trascendental de la facultad de juzgar.”(AA XX, 209).

De este modo, según la doctrina de Kant, dos tipos diferentes de principios fundamentan la analogía considerada. Por un lado, el principio de causalidad, que se deriva del correspondiente concepto puro del entendimiento y, por el otro, el principio de sistematicidad de la naturaleza, que es asumido por la facultad de juzgar reflexionante. Por medio del primero de los principios, los eventos son constituidos como alteraciones objetivas. Por el contrario, el segundo principio más bien regula la subsunción de estos conocimientos objetivos bajo leyes empíricas de generalidad cada vez mayor. En el primer caso, la facultad de juzgar determina a priori la multiplicidad espaciotemporal de los eventos C y E según el principio de causalidad, de modo que la causa C es representada como siendo objetivamente previa a E y no sólo como un elemento anterior en la serie subjetiva de las percepciones. En el segundo caso, la facultad de juzgar reflexiona acerca de la multiplicidad empírica de eventos con el propósito de encontrar la ley empírica bajo la que se encuentran y, a su vez, para subordinar esta ley bajo otras más generales.

En la próxima sección, siguiendo el pensamiento de Bohr entre 1913 y 1924, estudiaremos cómo estos principios constitutivos y regulativos llevan a cabo su tarea en la teoría cuántica. En particular, veremos cómo el principio de correspondencia cumple el rol de máxima para la reflexión cuando se establecen analogías empíricas como la recién discutida. En este período Bohr busca establecer analogías que conecten la relación clásica entre movimiento electrónico y radiación con la correspondiente relación cuántica. Según la electrodinámica clásica, el movimiento acelerado de un electrón que orbita causa un campo de radiación. Pero, precisamente por ello, la teoría parece no ser capaz de brindarnos un modelo de un átomo estable. Por lo tanto, Bohr busca una ley cuántica análoga a la clásica, de modo que el movimiento electrónico en el interior de átomos estables pueda también ser representado como causa del espectro de radiación, en un sentido que debe ser todavía determinado. El problema

que Bohr encuentra es que las analogías así planteadas resultan meramente formales, porque una conexión causal entre movimiento electrónico y radiación no puede ser exhibida en el espacio y el tiempo. Esto determinará un giro en el pensamiento de Bohr que lo llevará a la introducción de la complementariedad.

2.

El principio de correspondencia afirma el requerimiento metodológico de buscar analogías entre la teoría cuántica y la física clásica (PRINGE, 2007, p. 49ss): “Se hace un intento de elucidar los problemas mediante un principio general que postula una correspondencia formal entre las concepciones fundamentalmente diferentes de la electrodinámica clásica y aquellas de la teoría cuántica.” (BOHR, 1922, p. 2).

Esto significa que se debe “trazar la analogía entre la teoría cuántica y la teoría ordinaria de la radiación tan estrechamente como sea posible.” (BOHR, 1918/1922, p. 70).

Más precisamente, en la teoría cuántica se llevan a cabo tres presuposiciones mediante el principio de correspondencia. La primera es la afinidad entre las leyes clásicas y las leyes cuánticas. En vista de tal afinidad, el conocimiento de las leyes clásicas puede brindar claves para el descubrimiento de las leyes cuánticas. La segunda presuposición es que las leyes cuánticas son generalizaciones racionales de las leyes clásicas. Finalmente, según el principio de correspondencia las leyes clásicas pueden ser recuperadas en cierto límite. Debe haber un tránsito gradual entre las teorías clásica y cuántica, que haga posible una generalización de la física clásica en el ámbito atómico y que al mismo tiempo garantice la convergencia de las leyes cuánticas a las leyes clásicas cuando el cuanto de acción tiende a cero. Así el principio de correspondencia expresa las demandas de los principios kantianos del uso hipotético de la razón (A657/B685) o de las máximas de la facultad de juzgar (AA V, 182): los principios de continuidad, homogeneidad y especificación. En suma, la presuposición central de Bohr es que, más allá de sus diferencias intrínsecas, las teorías clásica y cuántica pueden ser reunidas en un sistema.

De acuerdo con el principio de correspondencia, entre 1913 y 1923 Bohr asume que la relación cuántica entre el espectro de radiación y el movimiento electrónico dentro del átomo es en cierto sentido y dentro de

ciertos límites idéntica a la relación que establece la electrodinámica clásica. En particular, las siguientes relaciones son consideradas idénticas en el límite de bajas frecuencias: i) las relaciones clásica y cuántica entre las frecuencias ópticas y mecánicas. (BOHR, 1913, p. 172ss) ii) la relación cuántica entre las probabilidades de transición entre estados estacionarios y las amplitudes de la expansión de Fourier de los desplazamientos de las partículas en esos estados, y la relación clásica entre las intensidades de radiación y las amplitudes de la expansión de Fourier de los desplazamientos de las partículas en sistemas multiperiodicos (BOHR, 1918/1922, p. 97 – 98). iii) la relación cuántica entre la polarización de la radiación emitida en la transición entre estados estacionarios y las amplitudes de la expansión de Fourier de los desplazamientos de las partículas en esos estados, y la relación clásica entre la polarización de la radiación y las amplitudes de la expansión de Fourier de los desplazamientos de las partículas en sistemas multiperiodicos (BOHR, 1918/1922, p. 97 – 98).

Sin embargo, estas analogías permanecen como analogías puramente formales porque con ellas no se establece ninguna representación espaciotemporal y a la vez causal del proceso cuántico que conecta movimiento electrónico y radiación. Por ejemplo, la relación cuántica entre frecuencias ópticas y mecánicas corresponde en el límite de bajas frecuencias a la relación clásica. Pero esta última relación se basa en un mecanismo espaciotemporal y causal de la radiación. Por el contrario, esto no se verifica el caso cuántico. Además:

En el estado presente no poseemos ninguna manera de describir en detalle el proceso de transición directa entre dos estados estacionarios acompañada por emisión o absorción de radiación y no podemos estar seguros de antemano de que tal descripción será posible por medio de leyes consistentes con la aplicación del principio de conservación de la energía. (BOHR, 1921, p.372).

El análogo cuántico de las órbitas clásicas puede ser exhibido en la intuición mediante la imagen de un estado estacionario. Pero su relación con la radiación se aleja constantemente del modelo clásico. Mientras que la electrodinámica clásica establece que la frecuencia de emisión de un electrón que orbita es igual a su frecuencia de movimiento, esta relación simple se abandona ya en 1913. En el caso de sistemas multiperiodicos, el movimiento electrónico fundamenta sólo la *probabilidad* de radiación, tal como Bohr sostiene en 1918.

La principal dificultad para determinar el mecanismo de la radiación es la tensión entre los aspectos de continuidad y discontinuidad de la cuestión. Si bien la imagen de los estados estacionarios nos brinda una representación continua del movimiento electrónico, las transiciones entre estos estados son, empero, discontinuas. Una nueva arista del problema aparece en 1924 con la teoría de Bohr-Kramer-Slater (BKS, 1924). Esta teoría implica que si se asume una conexión espaciotemporal continua entre el movimiento de los electrones en estado estacionario y la radiación, de modo de que esto dé cuenta de las leyes estadísticas de las transiciones, entonces no será posible afirmar una relación causal entre movimiento electrónico y radiación en procesos individuales.

En la teoría BKS, un átomo en estado estacionario es concebido como si fuera un sistema clásico de partículas cargadas que oscilan a las frecuencias de transición permitidas en ese estado. Estos son los llamados osciladores "virtuales." La analogía tiene un rango de validez muy estrecho, pues estos osciladores no obedecen las leyes de Maxwell (DARRIGOL, 1992, p. 257). Sin embargo, con ella es posible brindar una descripción espaciotemporal de la interacción entre radiación y materia. La restricción del uso de la categoría de causalidad respecto del movimiento electrónico y la radiación corresponde en el modelo de osciladores virtuales a la violación de los principios de conservación en transiciones individuales que suceden en átomos distantes. Por medio de un campo virtual un átomo puede inducir cierta transición en otro átomo, pero luego sufrir una transición distinta, por lo que, en tal caso, ni el momento ni la energía se conservarían. Los principios de conservación serían satisfechos sólo de manera estadística.³ Así, al asumir que la relación entre el movimiento electrónico en estados estacionarios y la radiación tiene un carácter continuo en el espacio y el tiempo, y aún en ausencia de toda otra determinación de esta relación, el modelo de los osciladores virtuales impide una explicación causal de la radiación producida en transiciones individuales.

Pero una conexión causal entre movimiento electrónico y radiación es, en términos kantianos, una condición necesaria para su unificación en la experiencia. Por esta razón, la representación del movimiento electrónico no puede ser enlazada con el contenido empírico provisto por la radiación y permanece como una representación puramente formal: posee sólo el significado matemático de las ecuaciones clásicas de movimiento. Así, Bohr, Kramers y Slater sostienen:

En el estado actual de la ciencia no parece posible evitar el carácter formal de la teoría cuántica, que es mostrado por el hecho de que la interpretación de los fenómenos atómicos no involucra una descripción del mecanismo de los procesos discontinuos que en la teoría cuántica de los espectros [de radiación] son designados como transiciones entre estados estacionarios del átomo. (BOHR; KRAMERS; SLATER, 1924, p. 101).

En este momento de su interpretación de la teoría cuántica, el punto central de Bohr es que las analogías establecidas según el principio de correspondencia no sólo son *sino que sólo pueden* ser meramente formales, en tanto la teoría BKS implica que la representación espaciotemporal del mecanismo de radiación impide toda descripción causal de los procesos individuales. La radiación no puede ser representada como efecto del movimiento electrónico y por lo tanto los electrones en estado estacionario no pueden ser constituidos como objetos de experiencia posible en sentido kantiano. En otras palabras, la representación del movimiento electrónico en estados estacionarios carece del contenido empírico asociado al espectro de radiación y resulta meramente formal. La experiencia de electrones en estado estacionario, es decir su representación espaciotemporal y causal, no es posible.

A pesar de que la teoría fue abandonada porque algunas de sus predicciones fueron refutadas por los experimentos de Bothe y Geiger (1925), Bohr siguió sosteniendo la incompatibilidad entre una descripción espaciotemporal continua de los fenómenos ópticos y una conexión causal en procesos de transición individuales. Si los resultados experimentales nos obligan a aceptar esta conexión (los principios de conservación se satisfacen en transiciones individuales) entonces, Bohr afirma, no es posible alcanzar una descripción espaciotemporal continua de los fenómenos ópticos (BCW 5, 204 – 205).

El desarrollo posterior del pensamiento de Bohr se orienta a reconsiderar cómo puede el formalismo de la teoría cuántica adquirir referencia objetiva, dada la incompatibilidad entre una descripción espaciotemporal y una descripción causal de los fenómenos. En tal situación, y en concordancia con una concepción kantiana del problema, Bohr afirma la necesidad de considerar analogías simbólicas para darle al formalismo de la teoría cuántica una interpretación apropiada: “Siento que debemos recurrir a analogías simbólicas en un grado mayor que antes. Últimamente me he estado devanando los sesos tratando de imaginarme tales analogías.” (BCW 5, 85).

3.

La solución de Bohr al problema de la referencia objetiva de la teoría cuántica se basa en la consideración de analogías simbólicas según el punto de vista de la complementariedad (PRINGE, 2007), p. 75ss). La posición de Bohr puede ser reconstruida del siguiente modo. La referencia objetiva de la teoría se alcanza cuando el formalismo matemático adquiere contenido empírico. Pero los datos empíricos son recibidos en el espacio y en el tiempo. Específicamente, en un experimento estos datos tienen que ser constituidos como conocimientos objetivos para que puedan valer como resultados empíricos y sean así más que meras ilusiones de validez puramente subjetiva: “La descripción de los fenómenos atómicos tiene un carácter perfectamente objetivo en el sentido de que no se hace ninguna referencia explícita a un observador individual.” (BOHR, 1958b, p. 3).

Para obtener este carácter objetivo, según Bohr, los fenómenos atómicos deben ser subsumidos bajo la categoría de causalidad:

No debe olvidarse que el concepto de causalidad se encuentra a la base de la interpretación de cada resultado experimental, y que incluso en la coordinación de la experiencia uno no puede nunca, en la naturaleza de las cosas, habérselas con rupturas bien definidas en la cadena causal. (BOHR, 1937, p. 87).

Según Bohr, debemos aplicar conceptos clásicos de modo de alcanzar una descripción espaciotemporal y causal de los resultados experimentales,⁴ pues sólo estos conceptos satisfacen simultáneamente las demandas de espaciotemporalidad y causalidad necesarias para la objetividad de la descripción:

Sin importar cuánto trasciendan los fenómenos el ámbito de la explicación de la física clásica, el reporte de toda la evidencia debe ser expresado en términos clásicos. El argumento es simplemente que con la palabra “experimento” nos referimos a una situación en la que podemos contarles a otros qué hemos hecho y qué hemos aprendido y que, por lo tanto, el reporte del arreglo experimental y de los resultados de las observaciones debe ser expresado en lenguaje inequívoco, con una aplicación adecuada de la terminología de la física clásica. (BOHR, 1949, p. 39).

En este punto se presenta la cuestión fundamental: no hay una imagen espaciotemporal y causal que por sí sola pueda abarcar la totalidad de los

diferentes fenómenos asociados a un sistema atómico. Más bien, la interpretación del conjunto de los datos experimentales exige la utilización de diversas imágenes incompatibles entre sí, como, por ejemplo, las de partículas y ondas:

Los conocidos dilemas respecto de las propiedades de la radiación electromagnética y de los corpúsculos materiales ofrecen ilustraciones muy impactantes, evidenciadas por las circunstancias de que en ambos casos imágenes opuestas como ondas y partículas resultan igualmente indispensables para el reporte completo de la evidencia experimental. (BOHR, 1956, p.167).

En tanto imágenes diversas son necesarias para una interpretación exhaustiva de los datos empíricos, pero tales imágenes se excluyen unas a otras, ellas son denominadas *complementarias*:

La evidencia obtenida bajo diferentes condiciones experimentales no puede ser abarcada en una sola 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).

Las imágenes clásicas que introducimos para describir los resultados experimentales obtenidos con distintos arreglos deben ser usadas como símbolos del objeto cuántico. De este modo, el objeto cuántico es representado comportándose en ciertos contextos experimentales como si fuera una partícula y en otros como si fuera una onda: “Simbolizamos [el objeto cuántico] mediante las abstracciones de partículas aisladas y radiación.” (BOHR, 1927, p. 69).

Este carácter simbólico de la referencia objetiva impide las afirmaciones injustificadas que haríamos si sostuviéramos que el objeto es efectivamente una partícula o una onda, porque en ningún caso el objeto posee todas las propiedades de asociadas a la imagen correspondiente. En este sentido, Heisenberg (1930, p. 7) señala:

Ambas imágenes (la de particular y la de onda) sólo pueden pretender un derecho como analogías que algunas veces se aplican y otras no. En efecto, por ejemplo, está probado experimentalmente que los electrones se comportan como partículas en ciertos experimentos, pero no se ha mostrado que los electrones posean todos los atributos de la imagen corpuscular. Lo mismo vale *mutatis mutandi* para la imagen de onda.

Estas analogías simbólicas, basadas en imágenes clásicas mediante las cuales describimos los experimentos, proveen de contenido empírico a los conceptos de objetos cuánticos y así de referencia física al formalismo matemático de la teoría: “Continúa siendo la aplicación de estos conceptos clásicos lo único que hace posible relacionar el simbolismo de la teoría cuántica con los datos de la experiencia.”(BOHR, 1929, p. 16).

Además, precisamente mediante estas analogías, aquellas descripciones clásicas incompatibles adquieren *unidad sistemática*. Cuando afirmamos que un objeto cuántico se comporta en ciertos contextos experimentales como si fuera una onda y en otras como si fuera una particular, nos representamos los correspondientes fenómenos contextuales como fenómenos del objeto cuántico. De esta manera, ellos resultan conectados y subsumidos bajo un concepto. Esta representación del objeto cuántico, sin embargo, sólo permite la unidad sistemática entre los fenómenos y no participa de la constitución de ellos como conocimientos objetivos. Tal constitución es más bien el resultado de la aplicación de conceptos clásicos.

CONCLUSIONES

Consideremos una vez más la analogía con la que comenzamos nuestra discusión: “C es la causa de E, así como A es la causa de B.” Entre 1913 y 1923 Bohr intenta establecer analogías de este tipo con el propósito de determinar la relación cuántica entre movimiento electrónico y radiación sobre la base del conocimiento de las leyes clásicas. En términos kantianos, el principio de correspondencia juega en esta etapa el rol de una máxima regulativa de nuestra reflexión sobre la naturaleza. Sin embargo, las analogías así obtenidas resultan puramente formales, porque el mecanismo de la radiación no puede ser exhibido en el espacio y el tiempo según leyes causales. Así, el movimiento electrónico no es determinado como causa de la radiación.

Por su parte, según la teoría BKS de 1924 es imposible obtener una descripción espaciotemporal continua del modo en el que el movimiento electrónico fundamenta las probabilidades de transición, que sea compatible con una relación causal entre movimiento y radiación en procesos individuales. A pesar del fracaso de esta teoría, sin embargo, Bohr no rechaza la incompatibilidad entre conexiones causales y descripciones espaciotemporales. Más bien, Bohr

entiende que el movimiento electrónico no puede ser constituido como la causa de la radiación porque esto requeriría una representación causal y espaciotemporal del mecanismo de la radiación. Movimiento electrónico y radiación no pueden ser exhibidos directamente en la intuición en una sola imagen.

La imposibilidad de exhibir objetos y procesos cuánticos directamente en la intuición lleva a Bohr a introducir en 1927 la noción de complementariedad. En este nuevo marco, las analogías del tipo “C es la causa de E, así como A es la causa de B” no pierden su rol central. Más bien, ellas son usadas ahora para exhibir tales objetos y procesos *indirectamente* en la intuición. Estas analogías poseen ahora un carácter simbólico en sentido kantiano. Específicamente, la relación entre un objeto cuántico y los datos empíricos es representada en términos de una de las imágenes complementarias mediante las cuales se interpretan los resultados experimentales. Así, el objeto cuántico es pensado como causa de sus fenómenos complementarios, pero no se determina ninguna representación espaciotemporal de tal relación causal.

En esta situación el principio de correspondencia retiene su función trascendental como regla que guía la aplicación de conceptos clásicos a fenómenos atómicos, pero ahora con el fin de obtener símbolos de los objetos cuánticos. Estos símbolos son usados como imágenes complementarias que, agotando la información empírica posible sobre los objetos cuánticos, le dan referencia física al formalismo matemático de la teoría. Así Heisenberg (1930, p. 78) sostiene:

En su formulación más general, el principio de correspondencia de Bohr afirma que existe una analogía cualitativa, que puede ser desarrollada en detalle, entre la teoría cuántica y la teoría clásica perteneciente a la imagen respectiva utilizada. Esta analogía no sirve sólo como guía para el descubrimiento de leyes formales; su valor particular reside en que ella lleva a cabo al mismo tiempo la interpretación física de las leyes descubiertas.

REFERENCIAS

BCW. BOHR'S Collected Works. Edited by L. Rosenfeld et al. North-Holland, Amsterdam; New York: American Elsevier, 1972.

BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. In: *BCW. BOHR'S Collected Works*. Edited by L. Rosenfeld et al. North-Holland, Amsterdam; New York: American Elsevier, 1972. v. 2, p. 161 – 233. (Original, 1913).

_____. On the quantum theory of line spectra. In: *BCW. BOHR'S Collected Works*. Edited by L. Rosenfeld et al. North-Holland, Amsterdam; New York: American Elsevier, 1972. v. 3, p. 67 – 184. (Original 1918-1922).

_____. On the application of quantum theory to atomic problems. In: *BCW. BOHR'S Collected Works*. Edited by L. Rosenfeld et al. North-Holland, Amsterdam; New York: American Elsevier, 1972. v. 3, p. 364 – 380. (Original, 1921).

_____. *The theory of spectra and atomic constitution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1922.

_____. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. In: _____. *Atomic theory and the description of nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1934. p. 52 – 91. (Original, 1927).

_____. Introductory survey. In: _____. *Atomic theory and the description of nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1934. p. 1 – 24. (Original, 1929).

_____. *Atomic theory and the description of nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1934.

_____. Causality and complementarity. In: _____. *Causality and complementarity: the philosophical writings of Niels Bohr*. Edited by J. Faye and H. Folse. Connecticut: Ox Bow, 1998. v. 4, p. 83-91. (Original, 1937).

_____. Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In: _____. *Atomic physics and human knowledge*. New York: Wiley, 1958. p. 32 – 66. (Original, 1949).

_____. Mathematics and natural philosophy. In: _____. *Causality and complementarity: the philosophical writings of Niels Bohr*. Edited by J. Faye and H. Folse. Connecticut: Ox Bow, 1998. V. 4, p. 164-169. (Original, 1956).

_____. *Atomic physics and human knowledge*. New York: Wiley, 1958.

_____. Quantum physics and philosophy: causality and complementarity. In: _____. *Essays 1958 – 1962 on atomic physics and human knowledge*. London: Wiley, 1963. p. 1 – 7. (Original, 1958).

_____. *Essays 1958 – 1962 on atomic physics and human knowledge*. London: Wiley, 1963.

_____. *Causality and complementarity: the philosophical writings of Niels Bohr*. Edited by J. Faye and H. Folse. Connecticut: Ox Bow, 1998. V. 4.

_____.; KRAMERS, H.; SLATER, J. The quantum theory of radiation. In: *BCW. BOHR'S Collected Works*. Edited by L. Rosenfeld et al. North-Holland, Amsterdam; New York: American Elsevier, 1972. V. 5, p. 99 – 118.

BOTHE, W.; GEIGER, H. Über das Wesen des Comptoneffekts: ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung. *Zeitschrift für Physik*, v. 32, n. 1, p. 639 – 663, 1925.

DARRIGOL, O. *From C-numbers to Q-numbers: the classical analogy in the history of quantum theory*. Berkeley: University of California Press, 1992.

HEISENBERG, W. *Physikalische prinzipien der quantentheorie*. Leipzig: Hirzel, 1930.

KANTS gesammelte Schriften (AA), Königlichen Preußischen. (Deutschen) Berlin: Akademie der Wissenschaften, 1902.

PETRUCCIOLI, S. *Atoms, metaphors and paradoxes: Niels Bohr and the construction of a new physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

PRINGE, H. *Critique of the quantum power of judgment: a transcendental foundation of quantum objectivity*. Berlin: De Gruyter, 2007.

NOTAS / NOTES

- ¹ Según Kant, una analogía “no significa, como se entiende ordinariamente la palabra, una semejanza imperfecta entre dos cosas, sino una semejanza perfecta de dos relaciones entre cosas completamente desemejantes.”(AA IV, 357 – 358).
- ² Véase también (AA V, 183).
- ³ Sobre la teoría BKS, véase también Petruccioli (1993, p. 111ss).
- ⁴ “Estrictamente hablando, la idea de observación pertenece al modo de descripción causal y espacio temporal.”(BOHR, 1927, p. 67).