

SEN, A. (2009), *The Idea of Justice* (Cambridge: Oxford University Press).

SWAN, K. (2012), "Republican Equality", *Social Theory and Practice*, 38: 432-454.

WEINSTOCK, D. y NADEAU, CH. (2004) (eds.), *Republicanism: History, Theory, and Practice*, (Londres: Routledge).

Recibido: 05-2013; aceptado: 12-2013

El concepto kantiano de analogía y el desarrollo histórico del pensamiento de Bohr

HERNÁN PRINGE

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Universidad de Buenos Aires
Universidad Diego Portales, Santiago, Chile*

28 |

| 29

Resumen: El principio de correspondencia y el punto de vista de la complementariedad constituyen los sucesivos ejes alrededor de los cuales gira la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. En este trabajo sostenemos que el concepto kantiano de analogía resulta un hilo conductor que permite comprender satisfactoriamente tal desarrollo histórico del pensamiento de Bohr. Mostraremos que el principio de correspondencia guía la búsqueda de analogías en la experiencia, mientras que desde el punto de vista de la complementariedad Bohr establece analogías simbólicas.

Palabras clave: analogía, símbolo, Kant, Bohr, correspondencia, complementariedad.

Kant's Concept of Analogy and the Historical Development of Bohr's Thought

Abstract: The principle of correspondence and, later, the viewpoint of complementarity are the axes around which

Bohr's interpretation of quantum theory rotates. In this paper we claim that the Kantian notion of analogy enables a satisfactory understanding of such historical development of Bohr's thought. We shall show that the principle of correspondence guides the search for analogies in experience, while from the viewpoint of complementarity Bohr establishes symbolic analogies.

Key-words: analogy, symbol, Kant, Bohr, correspondence, complementarity.

1. Introducción

Nos proponemos en este trabajo mostrar que el concepto kantiano de analogía resulta un hilo conductor para la comprensión del desarrollo histórico de la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. Para ello, comenzaremos considerando la noción de analogía tal como ésta se presenta en la filosofía de Kant. No será necesario realizar un estudio general de esta cuestión sino que nos bastará con atender a la distinción entre las analogías *en la experiencia* (2.1) y las analogías *simbólicas* (2.2). Luego, reconstruiremos la evolución de las ideas de Bohr en el período 1913-1927 a la luz de este análisis. Concretamente, vincularemos el principio de *correspondencia* con la búsqueda de analogías en la experiencia (3.1) y el punto de vista de la *complementariedad* con el establecimiento de analogías simbólicas (3.2).

2. Kant y el concepto de analogía

En su acepción más general, Kant entiende por analogía¹ no “una semejanza incompleta de dos cosas, sino una semejanza completa de dos relaciones entre cosas completamente desemejantes” (Kant, *Prolog. Ak.* 4: 357 ss.).² A partir de esta definición, debe diferenciarse el significado de las analogías en la *matemática*, de su significado en la *filosofía*:

En la filosofía las analogías significan algo muy diferente de lo que representan en la matemática. En ésta son fórmulas que enuncian la igualdad de dos relaciones de magnitud, y [son] siempre *constitutivas*, de manera que si son dados tres miembros de la proporción, con ello es dado también el cuarto, es decir, puede ser construido.³ Pero en la filosofía, la analogía no es igualdad de dos

relaciones *cuantitativas* sino [de dos relaciones] *cualitativas*, en la cual, a partir de tres miembros dados, sólo puedo conocer y dar *a priori* la *relación* con el cuarto, pero no *este* cuarto miembro *mismo*. (Kant, *KrV A* 179 / B 222)

A su vez, es posible distinguir bajo este significado estrictamente filosófico de la noción de analogía dos realizaciones particulares de dicho proceder analógico. En primer lugar, si el cuarto término de la relación es un objeto de experiencia posible, la analogía se verificará en el interior de la experiencia. Si, por el contrario, el cuarto término en cuestión *no* es un objeto de experiencia posible, la analogía será simbólica.

2.1 Analogías en la experiencia

La definición de “analogía” en sentido filosófico deja indeterminada la relación concreta que resulta idéntica entre dos pares de miembros de una proporción. Sin embargo, existen tres relaciones privilegiadas que Kant destaca por ser necesarias para la posibilidad de la experiencia. Dichas relaciones son la de sustancia-accidente, causa-efecto y acción recíproca. Según Kant, la distinción entre el curso subjetivo de las percepciones y el curso objetivo de la experiencia reside en la representación de los fenómenos espacio-temporales como enlazados entre sí según las relaciones recién mencionadas (*KrV B* 218 ss.).

Consideremos más concretamente la relación causa-efecto. Entre los diversos modos en los que nuestro conocimiento empírico se desarrolla se cuenta el establecimiento de analogías del tipo “*C* es la causa de *D*, tal como *A* es la causa de *B*”, donde *A*, *B* y *D* son fenómenos dados y *C* es en principio desconocido. Es decir, dado un cierto fenómeno *D*, su causa *C* se busca mediante la suposición de que la relación causa-efecto entre *C* y *D* es idéntica a la ya conocida entre *A* y *B*. Este proceder es meramente *a posteriori* y, por lo tanto, también lo es la analogía así establecida. Analogías de este tipo no son estudiadas por la filosofía, sino que pertenecen al ámbito propio de la ciencia empírica. Sin embargo, la filosofía trascendental establece las *condiciones de posibilidad* de un proceder analógico empírico como el recién descrito. Para que la búsqueda de *C* no sea una tarea vana, debemos suponer que para todo fenómeno *D* existirá en general una causa *C*, aun cuando ésta permanezca por ahora desconocida. Pero, ¿cómo justificar dicha suposición? La filosofía de Kant lleva a cabo esta tarea demostrando que todo fenómeno tendrá necesariamente otro como causa, porque el tenerlo es condición de posibilidad de que dicho fenómeno sea en general un objeto de experiencia. El núcleo del argumento kantiano consiste en el ya indicado análisis de las condiciones sólo bajo las cuales el curso subjetivo de las percepciones puede ser distinguido del curso objetivo de la experiencia. Kant demuestra de este modo el *principio a priori* de las analogías *empíricas* recién discutidas, que no es otro que el principio de la sucesión según la ley de causalidad (*KrV B* 232 ss.).

A la base de una analogía empírica de la forma $C : D = A : B$ se encuentra entonces una analogía *a priori* de la forma $C : D = \text{Causa} : \text{Efecto}$, donde por Causa : Efecto

¹ Pieper realiza un análisis de la noción kantiana de analogía (véase Pieper 1996). Para la función del pensamiento analógico en la metafísica de Kant, véase Caimi 1989: 81 ss. Véase también Pringe 2007: 11 ss.

² Harald Høffding, quien tuvo una importancia particular en la historia intelectual de Bohr, utiliza la noción de analogía en un sentido similar al de Kant. Véase Høffding 1924: 1). Sobre el pensamiento de Høffding como mediador entre el de Bohr y el de Kant, véase Pringe 2007: 124 ss.

³ El texto es aquí corregido según la edición de la Academia. Sin tal corrección, se leería: “de manera que si son dados dos miembros de la proporción, con ello es dado también el tercero, es decir, puede ser construido”.

entendemos la relación de una causalidad en general en el espacio y el tiempo. Esta analogía *a priori* nos brinda una regla para encontrar el término desconocido *C*, en tanto señala la nota esencial que él debe poseer: *C* debe ser un suceso tal que contenga la condición de una regla, según la cual, siempre y necesariamente siga el suceso *D* (Kant, *KrV* B 238 ss.). Para el análisis que llevaremos a cabo en la segunda parte de este estudio (secciones 3.1 y 3.2), será importante tener presentes los siguientes dos puntos:

i) El principio de causalidad es condición de posibilidad de la distinción entre el curso *subjetivo* de la percepción y el curso *objetivo* de la experiencia.

ii) El principio de causalidad es condición de posibilidad del establecimiento de analogías empíricas del tipo recién discutido.

2.2 Analogías simbólicas

El símbolo es para Kant el modo de acceso a aquello que se encuentra más allá de los límites de la experiencia posible.⁴ Los objetos que pueden ser dados en la intuición son cognoscibles mediante conceptos a la base de los cuales se encuentran *esquemas*, es decir procedimientos de síntesis de los datos espacio-temporales intuidos, según la regla pensada en el concepto. Éste es el único tipo de conocimiento que puede, en sentido estricto, denominarse tal.⁵ Sin embargo, existe también otro uso posible de los conceptos, esta vez en el marco de un proceder analógico *simbólico*. Es éste un *modo de representación* (Kant, *KU* Ak. 5: 351) diferente que permite, mediante las herramientas propias del conocimiento de los objetos de experiencia posible, alcanzar el ámbito de aquello a lo que no le corresponde directamente una intuición.

El proceder analógico del simbolismo es llevado a cabo por la facultad de juzgar y tiene dos momentos. Primero, esta facultad aplica un cierto concepto a un objeto de la intuición sensible. Luego, ella aplica *la mera regla de la reflexión* sobre aquella intuición a un objeto totalmente distinto y fuera de los límites de la sensibilidad. Así el primer objeto se torna símbolo del segundo (Kant, *KU* Ak. 5: 352 ss.). Como primer momento del proceder analógico del simbolismo se encuentra entonces el proceder esquemático de la representación intuitiva directa. Mediante el segundo paso se alcanza lo no intuible a través de un acto de la reflexión.

Para Kant el simbolismo permite exponer *indirectamente* en la intuición las ideas de la razón, cuyos objetos (Dios, Alma, Mundo) se encuentran más allá de los

⁴ Para un estudio del conocimiento simbólico en la obra de Kant, véase Lamacchia 1973.

⁵ Es necesario resaltar aquí que lo esquemático no es pictórico, es decir que el concepto esquematizado no es en sentido alguno una *copia* del objeto referido. Además el concepto, en tanto pensamiento de la unidad de la síntesis de la multiplicidad representada en el objeto, no es una representación *arbitraria*, como tampoco lo será el símbolo. Sólo el *signo* es arbitrario. Véase Caimi 1989: 79 ss.

límites de nuestra intuición. El problema del conocimiento de Dios tiene en este contexto una importancia particular:

Si yo digo que necesitamos concebir el mundo como si fuese la obra de un entendimiento y una voluntad superiores, no digo en realidad, más que: como se relaciona un reloj, un barco o un regimiento con un relojero, un ingeniero o un comandante, así se relaciona el mundo de los sentidos (o lo que constituye los fundamentos de este conjunto de fenómenos), con lo desconocido [Dios] que yo, por tanto, no conozco, sin duda, según lo que es en sí mismo, sino según lo que es para mí, a saber, en relación al mundo del cual soy una parte. (Kant, *Pro* Ak. 4: 357)

Por ejemplo, del mismo modo que se relaciona la felicidad de los niños = a, con el amor de los padres = b, se relaciona la salud del género humano = c, con lo desconocido en Dios = x, a lo cual llamamos amor; no como si éste tuviese la menor semejanza con alguna inclinación humana, sino porque, sus relaciones con el mundo, las podemos establecer como semejantes a las que mantienen las cosas del mundo entre sí. Pero el concepto de relación es aquí una mera categoría, a saber, el concepto de causa, que nada tiene que ver con la sensibilidad. (Kant, *Pro* Ak. 4: 357 n)

Las figuras del relojero, del ingeniero, del comandante y del padre se presentan así como símbolos de Dios. El procedimiento mediante el cual la simbolización se lleva a cabo es el que describimos más arriba. En primer lugar, un concepto empírico, como por ejemplo el de “padre”, se aplica a una intuición sensible. En segunda instancia se aísla la mera representación de la relación de causalidad del amor del padre respecto de la felicidad de los hijos y se la piensa como la que el amor de Dios mantiene respecto de la salud del género humano.

Las analogías simbólicas que en estos pasajes se establecen son entonces: Reloj : Relojero = Barco : Ingeniero = Regimiento : Comandante = Mundo sensible : Dios, o bien, Felicidad de los hijos : Amor del padre = Salud del género humano : Amor de Dios. A la base de las mismas se encuentra una analogía de la forma Dios : Mundo sensible = Amor de Dios : Salud del género humano = Causa : Efecto. En tanto Dios no es un objeto intuible, esta causalidad es el mero concepto puro del entendimiento, sin referencia alguna a la sensibilidad.

Como todo procedimiento analógico, el simbolismo se basa en la igualdad de relaciones entre miembros de una proporción. Es también ésta una igualdad meramente cualitativa, ya que el cuarto miembro desconocido de la proporción (en este caso Dios) no puede ser representado mediante el simbolismo. Sólo es posible representarse la *relación* de dicho cuarto miembro con un tercero (el mundo sensible, la salud del género humano) dado en la intuición. De tal modo, lo simbolizado no sólo no puede ser conocido como es en sí sino que lo que se le adscribe mediante símbolos es siempre una mera relación con algo presente en la sensibilidad.

Para la discusión posterior debemos tener particularmente presentes los siguientes puntos:

i) El simbolismo es para Kant el modo de acceso a lo que se encuentra más allá de la experiencia posible.

ii) Mediante símbolos sólo se representan relaciones del objeto simbolizado con lo dado en la intuición.

3. La evolución del pensamiento de Bohr

El principio de correspondencia y el punto de vista de la complementariedad constituyen los ejes alrededor de los cuales se articula la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. La introducción de la complementariedad en 1927 resulta un momento de continuidad y a la vez de ruptura respecto del período guiado por el principio de correspondencia. En este sentido, mostraremos ahora, en primer lugar, que ambos momentos del desarrollo histórico del pensamiento de Bohr son ante todo sucesivas realizaciones de un mismo proceder analógico. En segundo lugar, veremos, sin embargo, que el principio de correspondencia guía un proceder analógico cuyo fin es establecer analogías *en la experiencia*, mientras que el principio de complementariedad guía un proceder analógico que busca analogías *simbólicas*.

3.1 El principio de correspondencia

El principio de correspondencia afirma el requerimiento metodológico de buscar analogías entre la teoría cuántica y la física clásica (véase Pringe 2007: 49 ss.):

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:V)⁶

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: 4).

Bohr utiliza por primera vez los términos “correspondencia” y “principio de correspondencia” en 1920, pero sostiene que el “primer germen” de tal principio se encuentra ya en su investigación de 1913 (Bohr 1922:V).⁷ El desarrollo del pensamiento de Bohr entre 1913 y 1925 se encuentra regido por este principio y signado por los intentos de establecer el vínculo cuántico entre espectro de radiación y movimiento electrónico. En la historia de dicho período pueden distinguirse cinco estadios principales (Darrigol 1992: 81 ss.). En primer término, Bohr considera movimientos periódicos

que obedecen las leyes de la mecánica clásica (1913-1916). Luego, movimientos *multi*periódicos que también obedecen dichas leyes (1917). Más tarde, desarrollos perturbativos en términos de movimientos *multi*periódicos clásicos de sistemas no necesariamente *multi*periódicos (1918-1922). En cuarto lugar, movimientos *multi*periódicos que *no* satisfacen las leyes de la mecánica clásica (1922-1925), para, finalmente, abandonar la noción de órbitas electrónicas definidas en la primavera de 1925.

A la luz de la distinción de estos sucesivos estadios en el desarrollo de las investigaciones de Bohr, será suficiente para nuestros propósitos referirnos brevemente, en primer lugar, a su estudio de la estructura del átomo de hidrógeno en la trilogía de 1913 (véase Bohr 1913), luego a su consideración de sistemas *multi*periódicos (véase Bohr 1918-22) y finalmente a la teoría BKS (véase Bohr, Kramers y Slater 1924).

En la teoría del átomo de hidrógeno de 1913, la frecuencia de emisión resulta la asociada a la diferencia de energía entre dos estados estacionarios, donde, a su vez, la energía de cada uno de los estados estacionarios está relacionada con la frecuencia de movimiento del electrón en dicho estado. La teoría postula que los electrones en estado estacionario están en movimiento, pero no emiten radiación, lo que permite la estabilidad del átomo, pero al precio de impedir la aplicación irrestricta de las leyes de la electrodinámica clásica a estos estados. Para el límite de frecuencias bajas, se establece empero que la frecuencia óptica tiende a la frecuencia de movimiento calculada según la mecánica clásica. Este límite es la expresión *cuantitativa* del “primer germen” del principio de correspondencia. Pero el contenido de dicho principio no se reduce a tal expresión, ya que la correspondencia posee también un aspecto *cuantitativo* que trasciende la mera afirmación de la convergencia de las frecuencias ópticas y mecánicas para números cuánticos grandes. Dicha convergencia resulta más bien la *condición necesaria* del establecimiento *en general* de una relación *cuántica* entre frecuencia de radiación y movimiento electrónico, ya que la no recuperación de la relación clásica en el límite implicaría que la teoría propuesta no estaría llevando a cabo lo que se pretende de ella: no vincularía radiación y movimiento.⁸

En el caso de los sistemas *multi*periódicos se supone además la existencia de una relación entre la electrodinámica clásica y la teoría cuántica respecto de las intensidades emitidas. Esta relación permitirá subsanar la incapacidad de la teoría cuántica para dar cuenta de las intensidades y los estados de polarización de las líneas espectrales, debilidad que hace de la teoría cuántica una teoría incompleta en comparación con la información total que sobre dichas líneas brinda la física clásica. La probabilidad cuántica de decaimiento de un estado m a uno $m-k$ se asume así proporcional al coeficiente $|C_k|^2$ del desarrollo de Fourier del momento dipolar calculado clásicamente. De tal modo, aquí también el movimiento de los electrones fundamenta, aun cuando lo haga de modo probabilístico, la existencia de la radiación, ya que para el caso en el que C_k se anula, la transición se encuentra prohibida.

⁶ Las traducciones de los textos de Bohr son nuestras.

⁷ Véase Bohr, *BCW* 3: 21.

⁸ Recordemos que la teoría clásica establece que la frecuencia de emisión de un electrón orbitando es igual a su frecuencia de movimiento.

Por su parte, la teoría BKS intenta armonizar la imagen *continua* del campo electromagnético con las *discontinuas* transiciones cuánticas, mediante la introducción de un campo virtual de radiación asociado a cada átomo.⁹ La teoría asume que cada átomo en estado estacionario se comunica “de manera continua con otros átomos mediante un mecanismo espacio-temporal que es virtualmente equivalente al campo de radiación que según la teoría clásica sería originado por osciladores armónicos virtuales que se correspondieran con las diversas transiciones posibles a otros estados estacionarios” (Bohr, Kramers y Slater 1924: 790).

Es decir, a cada transición posible del átomo en estado estacionario se le asocia un oscilador armónico virtual de frecuencia igual a la de dicha transición, tal que genera un campo electromagnético mediante el cual interactúa con los otros osciladores virtuales asociados a las otras transiciones posibles. La ocurrencia de una transición depende tanto del estado del átomo en cuestión como del estado de los otros átomos con los que el primero se encuentra en interacción mediante el campo virtual. Sin embargo, la transición en un átomo *no* depende de la ocurrencia de una transición en otros átomos. Por medio del campo virtual asociado a una transición *posible* de cierto átomo, éste puede inducir una transición en otro átomo, pero luego el primero puede 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. Así, la teoría abandona “todo intento de conectar causalmente la transición en distintos átomos, y especialmente [la teoría abandona] una aplicación directa de los principios de conservación de la energía y el momento” (Bohr, Kramers y Slater 1924: 791).

A la luz de la noción de analogía discutida en la primera parte de este trabajo podemos caracterizar el proceder guiado por el principio de correspondencia entre 1913 y 1925 del siguiente modo. Según la física clásica, el movimiento B_k del electrón en el átomo determinaría un espectro de radiación S_k tal como una causa determina su efecto, es decir $B_k : S_k = \text{Causa} : \text{Efecto}$. Ahora bien, mientras que el espectro clásico de radiación S_k es un espectro *continuo*, el espectro S_q verificado experimentalmente es *discreto*. Dado tal espectro S_q y según el principio de correspondencia, la teoría cuántica debería determinar el movimiento electrónico B_q de modo tal que la analogía $B_q : S_q = B_k : S_k$ resultara satisfecha.

El principio de correspondencia expresa entonces la exigencia metodológica de buscar analogías entre la teoría cuántica y la física clásica, en particular en lo que se refiere a radiación y movimiento (véase Falkenburg 1998). Estas analogías deberían permitir la descripción del comportamiento electrónico a partir de la relación cuántica entre radiación y movimiento. Por un lado, a partir del espectro atómico se determinarían los movimientos permitidos y por el otro, ciertas características del espectro permitirían establecer propiedades de las órbitas electrónicas.¹⁰

Las exigencias del principio de correspondencia se realizan de distinta manera en cada uno de los tres momentos del desarrollo del pensamiento de Bohr aquí analizados. En los dos primeros, la existencia de una relación entre radiación y movimiento se supone, pero el mecanismo de dicha relación no se determina. Por el contrario, con la teoría BKS se pretende especificar el mecanismo espacio-temporal que subyace a la radiación. En las tres instancias, el análogo cuántico del movimiento clásico es considerado como directamente representable en la intuición mediante la imagen de los estados estacionarios. Sin embargo, su relación con la radiación se aleja cada vez más de los modelos clásicos: a partir de la consideración de la problemática de las intensidades y polarizaciones de la radiación el movimiento electrónico fundamenta el espectro de radiación sólo de modo probabilístico, mientras que la teoría BKS supone osciladores virtuales que *ni siquiera* satisfacen las leyes de Maxwell (Darrigol 1992: 257).

Esta primera etapa del pensamiento de Bohr se encuentra así caracterizada por la constante búsqueda no meramente de analogías entre las teorías clásica y cuántica, sino en particular de analogías en las que el cuarto término de la relación¹¹ se concibe siempre como *representable* en la intuición espacio-temporal.¹² Sin embargo, un aspecto crucial del problema aparece en 1924 con la teoría BKS. Según ella, si se asume una conexión espacio-temporal continua entre el movimiento de los electrones en estado estacionario y la radiación, de suerte 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.

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, como una causa con su efecto, con el contenido empírico provisto por la radiación y permanece entonces como una representación puramente formal: posee sólo el significado matemático de las ecuaciones clásicas de movimiento:

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 y Slater 1924: 785)

En este momento, el punto central de la interpretación de Bohr de la teoría cuántica 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

⁹ Jammer 1966: 181 ss. Véase también Petruccioli 1993: 111 ss.

¹⁰ Darrigol (1992: 151) sostiene que el principio de correspondencia tiene así un uso deductivo y otro inductivo.

¹¹ En este caso el movimiento electrónico.

¹² Aun cuando la teoría no provea (todavía) la representación efectiva.

que la representación espacio-temporal 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 espacio-temporal 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 Geiger¹³, Bohr siguió sosteniendo la incompatibilidad entre una descripción espacio-temporal continua de los fenómenos ópticos y una conexión causal en procesos de transición individuales. Si los resultados experimentales nos obligan a aceptar esta última conexión (los principios de conservación se satisfacen en transiciones individuales), entonces, Bohr afirma, no es posible alcanzar una descripción espacio-temporal continua de los fenómenos ópticos (*BCW* 5: 204-205). En tal situación, según Bohr, “debemos recurrir a analogías simbólicas en un grado mayor que antes” (*BCW* 5: 85).¹⁴ El fracaso de la teoría BKS determinará así el tránsito a un nuevo momento del desarrollo de las ideas de Bohr, al que nos referiremos a continuación.

3.2 El punto de vista de la complementariedad

Al abandonar la teoría BKS, Bohr no deja de lado meramente una cierta descripción del mecanismo por el cual el movimiento atómico produce la radiación, sino más bien profundiza el cuestionamiento acerca de la posibilidad de una *descripción espacio-temporal y a la vez causal* de los procesos atómicos (véase Pringe 2007: 75 ss.).

Entre 1925 y 1926 el desarrollo de la teoría presenta dos hitos fundamentales. Por un lado, Heisenberg, Born y Jordan construyen una mecánica de magnitudes observables de estructura semejante a la mecánica clásica. Ella presenta como características principales el énfasis en la *discontinuidad* de los procesos cuánticos y la noción subyacente de *partícula*. Por otro lado, simultáneamente, Schrödinger establece,

partiendo de presupuestos conceptuales radicalmente distintos, una teoría que subraya el elemento de *continuidad* de los procesos cuánticos mediante la utilización de la noción de onda como idea fundamental. El mismo Schrödinger prueba, además, la identidad formal de su teoría con la de Heisenberg demostrando la posibilidad de traducir un formalismo en los términos del otro.

A los ojos de Bohr, la cuestión que se plantea es, entonces, la de compatibilizar los presupuestos en principio contradictorios de dos realizaciones equivalentes de la teoría: continuidad y discontinuidad; onda y partícula. Su solución se orientará a establecer los *dominios de validez* de dichos presupuestos mediante el *punto de vista de la complementariedad*.

Esta perspectiva hace su aparición en la famosa conferencia de Como, en septiembre de 1927. Allí Bohr comienza su análisis presentado el problema epistemológico al que nos enfrenta la teoría cuántica:

La teoría cuántica se caracteriza por el reconocimiento de una limitación fundamental de las ideas de la física clásica cuando éstas se aplican a los fenómenos atómicos. La situación que así resulta es peculiar, porque nuestra interpretación del material experimental depende esencialmente de los conceptos clásicos. (Bohr 1934: 53)

Por un lado, el desarrollo de la teoría cuántica nos presenta un ámbito de la naturaleza en el cual los conceptos de la física clásica pierden su aplicabilidad. Recordemos que el propio pensamiento de Bohr hasta 1925, guiado por el principio de correspondencia, se caracterizó por el intento de utilizar hasta donde fuera posible representaciones espacio-temporales de los procesos físicos tal como lo hace la física clásica. Pero los fracasos a los que ya nos hemos referido mostraron los límites del campo de aplicación de tales imágenes.¹⁵

Por otro lado, sobre todo luego de las discusiones con Schrödinger en Copenhague en 1926, Bohr afianzó su idea de que los conceptos clásicos no pueden ser meramente dejados de lado y reemplazados por otros más adecuados a los nuevos desarrollos, ya que ellos resultan imprescindibles para la comprensión de lo que se entiende en general por *experimento* (véase Chevalley 1991: 65 ss.):

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: 39)

¹⁵ No sólo el fracaso de la teoría BKS es relevante aquí, sino también el del modelo de átomo de Helio en 1923. Al respecto, véase Darrigol 1992: 209.

El problema que se plantea, entonces, es el de cómo hacer frente simultáneamente a la exigencia del uso de conceptos clásicos y a la existencia de límites en su campo de aplicación.

La aparición en general de límites en el ámbito de validez de los conceptos clásicos encuentra su fundamento en el llamado postulado cuántico, que “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: 53).

La afirmación de la discontinuidad de los fenómenos cuánticos no es sino la negación de la ley de continuidad de todo cambio, que sostiene que una cosa al cambiar pasa por todos los estados comprendidos entre el estado inicial y el final. Esta ley de continuidad expresa la forma de todo cambio en general y, en tanto resulta de la aplicación *a priori* de la categoría de causalidad, es una condición necesaria de la distinción entre el curso subjetivo de nuestras percepciones y el curso objetivo de la experiencia.¹⁶ Así Kant afirma que “toda alteración es posible sólo mediante una acción continua de la causalidad” (*KrV* A 208 / B 254). La distinción entre sujeto y objeto puede verificarse sólo bajo la presuposición de la aplicación de la categoría de causalidad y con ella de la validez de la ley de continuidad.

Ahora bien, Bohr *niega* una continuidad tal en los fenómenos cuánticos y *postula* que los mismos pasan de un estado a otro sin pasar por los estados intermedios, como, por ejemplo, cuando un electrón varía su estado entre estados posibles discretos de energía. En particular, en el caso de una medición, dicho proceso físico involucra una interacción incontrolable por *discontinua* entre el sistema medido y el aparato de medición.

Pero, Bohr sostiene a la vez la imposibilidad de distinguir en un proceso tal el fenómeno cuántico mismo del instrumento de medición:

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: 54)

La discontinuidad de los procesos cuánticos, en particular la discontinuidad de un proceso de medición, implica que el dato obtenido en tal proceso no puede ser referido al objeto cuántico en el modo en el que lo sería en el caso clásico.

En efecto, en física clásica la continuidad causal de la interacción entre sistema y aparato de medición permite calcular el estado del sistema *más allá de dicha interacción*. En otras palabras, mediante una medición clásica se puede establecer el estado de un sistema aislado. Por el contrario, la adopción del postulado cuántico

¹⁶ Høffding (1908: 56) presenta a la ley de continuidad de la causalidad como condición de posibilidad de la experiencia. Véase Murdoch 1987: 73.

implica que la interacción entre sistema y aparato de medición no satisface la ley de continuidad de la causalidad, siendo entonces imposible determinar el estado del sistema independientemente de su interacción con el aparato de medición.

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. Así, si se asume el postulado cuántico se debe abandonar toda pretensión de una representación *a la vez* espacio-temporal y causal de un objeto cuántico. Es decir, no es posible, como en física clásica, sintetizar el conjunto de datos contingentes de una medición, según el concepto de causa, como el efecto de un objeto representable en el espacio y el tiempo tal que sus estados se modifican causalmente. En pocas palabras, un objeto cuántico no es un objeto de experiencia posible, en el sentido de la doctrina de Kant.

El problema de la referencia empírica de la teoría se ataca mediante la oposición entre los *conceptos* clásicos y los métodos *simbólicos* de la mecánica cuántica. Bohr se refiere al simbolismo de la mecánica cuántica no sólo para atender al formalismo matemático de la teoría, sino especialmente para dar cuenta del rol que los términos descriptivos desempeñan en ella (Höner 1987: 153-160). En este sentido, la diferencia fundamental entre el concepto clásico y el símbolo cuántico es la posibilidad o no de representar directamente su contenido en la intuición. Los conceptos clásicos pueden ser exhibidos directamente en una imagen espacio-temporal, mientras que los símbolos cuánticos, no (véase Chevalley 1991: 549 ss.).¹⁷

Por otro lado, dado que sólo mediante los conceptos clásicos es posible interpretar los datos de la experiencia, el simbolismo cuántico no apunta a la introducción de nuevos conceptos de origen estrictamente cuántico, sino sólo a un *uso peculiar* de los conceptos clásicos. A continuación veremos que este uso se verifica de acuerdo con la estructura general de las analogías simbólicas discutida en 2.2.

Recordemos brevemente dicha estructura. Ella consta de dos momentos. En primer término, el momento esquemático de la subsunción de un conjunto de datos empíricos bajo un concepto. En segundo lugar, el momento estrictamente simbólico de la trasposición de la mera regla de la reflexión sobre esos datos a un objeto no representable en la intuición. Consideremos a modo de ejemplo el efecto Compton.¹⁸ Para su interpretación, los datos experimentales son, en primer

¹⁷ Chevalley resalta el desplazamiento de la noción de conocimiento esquemático a simbólico en la historia del pensamiento alemán a partir de Goethe, pero no subraya que, en sentido kantiano, el simbolismo depende del conocimiento esquemático. El análisis de Chevalley brinda la impresión de que se puede simplemente abandonar el conocimiento esquemático en favor del simbólico, cuando en realidad sólo se puede alcanzar el conocimiento simbólico a partir del esquemático (véase Chevalley 1994).

¹⁸ Compton estudia “que pasaría si cada cuanto de energía de rayos x estuviera concentrado en una única partícula y actuara como una unidad sobre un único electrón”. Véase Jammer 1966: 161.

término, subsumidos bajo el concepto clásico de partícula, mediante lo cual se posibilita la aplicación de las leyes de conservación de energía y momento. Dichas leyes se aplican a una colisión fotón-electrón del mismo modo en que lo hacen para una colisión entre partículas clásicas representables en el espacio y el tiempo. En segunda instancia, se transporta al fotón, en tanto objeto *irrepresentable* en la intuición espacio-temporal, la *mera relación* de una partícula clásica con esos datos, y se afirma que, respecto de un arreglo experimental como el utilizado, el fotón se comporta *como si fuera* una partícula clásica.

El carácter *simbólico* de la referencia a objetos en mecánica cuántica constituye así la primera etapa de la solución del problema de cómo hacer frente simultáneamente a la exigencia del uso de conceptos clásicos y a la existencia de límites en su campo de aplicación. Los conceptos clásicos son aplicados según esquemas dentro de los límites de dicho campo, para luego utilizar la imagen así obtenida como símbolo de lo no representable en la intuición. Pero la determinación del modo en el que, en mecánica cuántica, las representaciones se refieren a objetos no se agota en su carácter simbólico. Es necesario considerar también el carácter *complementario* de dicha referencia.

Este carácter se basa en que la consideración de la *totalidad* de los resultados experimentales asociados a un objeto cuántico requiere la utilización de arreglos experimentales *incompatibles* entre sí. De tal modo, la referencia simbólica asociada a un cierto arreglo experimental será *complementaria* respecto de otra asociada a un arreglo incompatible con el primero.

42 | En nuestro ejemplo, dado que las expresiones de la energía y del momento del fotón contienen magnitudes propias de la mecánica ondulatoria¹⁹, el arreglo experimental respecto del cual la luz manifiesta un carácter corpuscular debe ser *complementado* por uno respecto del cual la luz manifieste su carácter ondulatorio. En este caso, los datos experimentales serán, en primer término, subsumidos bajo el concepto de *onda*, y se aplicarán las leyes de propagación de las mismas que explicarán, por ejemplo, fenómenos de interferencia. Luego, la *mera relación de los datos con una onda* será transportada al objeto cuántico.

En tanto ciertos datos experimentales pueden ser dados sólo bajo condiciones que resultan incompatibles con las asociadas a otros datos, pero *todos* los datos en cuestión son necesarios para agotar la evidencia experimental, el punto de vista de la complementariedad brinda unidad al uso simbólico de conceptos clásicos en la teoría cuántica.

4. Conclusiones

Desde la trilogía de 1913 hasta los trabajos sobre sistemas multiperiódicos, la interpretación de Bohr de la teoría cuántica propone un proceder

¹⁹ La energía E es: $E = h \nu$ y su momento p es: $p = \lambda/h$, donde ν es la frecuencia de la radiación incidente, λ su longitud de onda y h la constante de Planck.

análogo cuyo fin es, en su formulación más abstracta, el de establecer semejanzas entre relaciones. En el período signado por el principio de correspondencia, Bohr intenta establecer analogías entre la física clásica y la teoría cuántica con el propósito de vincular los datos observacionales provistos por los espectros de radiación con imágenes espacio-temporales del subyacente movimiento electrónico. Así, tales analogías serán buscadas bajo la presuposición de que el movimiento electrónico es representable en la intuición mediante la imagen de un estado estacionario. Según la teoría BKS, sin embargo, una descripción espacio-temporal continua de los fenómenos ópticos resulta incompatible con una conexión causal en procesos de transición individuales. A pesar del fracaso de esta teoría, Bohr no renuncia a tal incompatibilidad y propone una nueva interpretación de la teoría atómica a la luz de la noción de complementariedad. Desde este nuevo punto de vista, el problema de la incompatibilidad entre las demandas de representación espacio-temporal y conexión causal se transforma en una consecuencia del postulado básico de la teoría: el postulado cuántico.²⁰ Ahora, los objetos cuánticos participan de analogías, pero éstas son de carácter simbólico. Ellas permiten que los conceptos de objetos cuánticos sean exhibidos indirectamente en la intuición mediante imágenes clásicas. El primer momento de tal exhibición es la subsunción de los datos experimentales bajo conceptos clásicos, según esquemas. Con ello, los resultados experimentales adquieren validez objetiva. El segundo momento del simbolismo es la representación de las imágenes clásicas así obtenidas como símbolos del objeto cuántico. De este modo, se cumple un doble propósito. Por un lado, los conceptos de los objetos cuánticos adquieren indirectamente referencia a un contenido empírico. Pero, por otro lado, las imágenes clásicas asociadas a arreglos experimentales complementarios dejan de constituir un mero agregado de conocimientos y obtienen finalmente unidad sistemática.

BIBLIOGRAFÍA

BOHR, N. (BCW), *Collected Works*, editado por L. Rosenfeld, J. Rud Nielsen, E. Rüdinger, F. Aaserud (Amsterdam-New York: North-Holland-American Elsevier, 1972).

BOHR, N. (1913), "On the Constitution of Atoms and Molecules I", *Philosophical Magazine*, 26: 1-15.

BOHR, N. (1918-22), "On the Quantum Theory of Line-Spectra", *Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Skrifter Naturvidenskabelig og matematisk afdeling*, series 8, IV, 1: 1-118.

BOHR, N. (1922), *The Theory of Spectra and Atomic Constitution* (Cambridge: Cambridge University Press).

²⁰ Una modificación tal habría podido ser sugerida, quizá, incluso por el propio Goethe: "The greatest art in theoretical and practical life consists in changing the problem into a postulate; that way one succeeds" (citado en Cassirer 1923: 371).

BOHR, N., KRAMERS, H. A. y SLATER, J. C. (1924), "The Quantum Theory of Radiation", *Philosophical Magazine*, 47: 785-802.

BOHR, N. (1934), *Atomic Theory and the Description of Nature* (Cambridge: Cambridge University Press).

BOHR, N. (1949), "Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics", en Bohr (1958: 32-66).

BOHR, N. (1958), *Atomic Physics and Human Knowledge* (New York: Wiley & Sons).

BOTHE, W. y GEIGER, H. (1925), "Über das Wesen des Comptoneffekts; ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung", *Zeitschrift für Physik*, 32: 639-663.

CAIMI, M. (1989), *La metafísica de Kant* (Buenos Aires: Eudeba).

CASSIRER, E. (1923), *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity* (Chicago and London: Open Court).

COMPTON, A. H. (1923), "A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements", *Physical Review*, 21: 483-502.

CHEVALLEY, C. (1991), "Introduction" y "Glossaire", en Bohr, N., *Physique atomique et connaissance humaine* (Paris: Gallimard, 1991).

CHEVALLEY, C. (1994), "Niels Bohr's Words and the Atlantis of Kantianism", en Faye y Folse (1994: 33-55).

DARRIGOL, O. (1992), *From c-numbers to q-numbers* (Berkeley: University of California Press).

FALKENBURG, B. (1998), "Bohr's Principles of Unifying Quantum Disunities", *Philosophia naturalis*, 35: 95-120.

FAYE, J. y FOLSE, H. (1994) (eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (Dordrecht: Kluwer).

HÖFFDING, H. (1908), *A History of Modern Philosophy* (London: Macmillan).

HÖFFDING, H. (1924), *Der Begriff der Analogie* (Leipzig: O. R. Reisland).

HONNER, J. (1987), *The Description of Nature. Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics* (Oxford: Clarendon Press).

JAMMER, M. (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (New York: McGraw-Hill).

KANT, I. (AK.), *Gesammelte Schriften*, Königlich Preussischen (Deutschen) Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1902.

KANT, I. (1783), *Prolegómenos a toda metafísica del futuro*, trad. J. Besteiro (México: Porrúa, 1973).

KANT, I. (1787), *Crítica de la razón pura*, estudio preliminar, traducción y notas de Mario Caimi, índices de Esteban Amador, Mariela Paolucci y Marcos Thisted (Buenos Aires: Colihue, 2007).

LAMACCHIA, A. (1973), "La 'cognitio symbolica': Un problema de la hermenéutica kantiana", *Cuadernos de Filosofía*, XI, 20: 371-411.

MURDOCH, D. (1987), *Niels Bohr's Philosophy of Physics* (Cambridge: Cambridge University Press).

PETRUCCIOLI, S. (1993), *Atoms, Metaphors and Paradoxes: Niels Bohr and the Construction of a New Physics* (Cambridge: Cambridge University Press).

PIEPER, A. (1996), "Kant und die Methode der Analogie", en Schönrich y Kato (1996: 92-112).

PRINGE, H. (2007), *Critique of the Quantum Power of Judgement. A Transcendental Foundation of Quantum Objectivity* (Berlin-New York: de Gruyter).

SCHÖNRICH, G. y KATO, Y. (1996) (eds.), *Kant in der Diskussion der Moderne* (Frankfurt am Main: Suhrkamp).

Recibido: 01-2014; aceptado: 04-2014