

# La aparición de la noción de complementariedad de Bohr y su extensión más allá de la Física

Josefa Castellà Cid, Universidad Autónoma de Madrid, España  
Karim J. Gherab Martín, Universidad CEU San Pablo, España

**Resumen:** Con la noción de complementariedad Bohr pretendía expresar el dualismo existente entre descripciones necesarias y excluyentes. Derivó dicha noción del postulado cuántico y la aplicó a la doble naturaleza de la luz y a la relación entre la descripción causal y la espacio-temporal. Pero Bohr no sólo aplicó la noción de complementariedad al dominio de la Física sino que la extendió a otros dominios, como la Psicología, la Biología y la Antropología.

**Palabras clave:** complementariedad, dualidad, postulado cuántico, onda, partícula

**Abstract:** With the notion of complementarity, Bohr tried to express the duality between concepts or statements that are different in meaning, mutually exclusive and together constitute a complete description of a phenomenon. Bohr derived this notion from the quantum postulate and applied it to the wave-particle duality and the space-temporal and causal descriptions. Moreover, he applied it to other subjects, different from Physics, such as Psychology, Biology, and Anthropology.

**Keywords:** Complementarity, Duality, Quantum Postulate, Wave, Particle

## Introducción

La noción de complementariedad es central en el pensamiento de Bohr y se encuentra omnipresente en sus escritos, a pesar de que en ellos no aparezca definida de forma explícita, clara y unívoca. Así, se comprende que Einstein manifestara: “¡a pesar del gran esfuerzo que he realizado, he sido incapaz de encontrar la exacta formulación del principio de complementariedad!” (Einstein, 1949: 647). Bohr pretendía, con la noción de complementariedad, expresar el dualismo que veía entre descripciones de fenómenos cuánticos que consideraba necesarias y, a la vez, excluyentes. La aplicación más conocida de dicha noción es la dualidad del modelo de onda y de corpúsculo que presentan la luz y las partículas elementales. Según Bohr, dependiendo del dispositivo experimental que se utilice, se observa el comportamiento ondulatorio o el corpuscular; así, en un experimento de doble rendija aparece el primero y en un experimento que muestre el efecto fotoeléctrico aparece el segundo. Ambas descripciones son complementarias, según Bohr.

El dualismo de las descripciones complementarias constituye también una de las tesis fundamentales de la interpretación de Copenhague, la interpretación considerada mayoritaria y dominante en la mecánica cuántica. Dicha interpretación no es una concepción unitaria, un sistema de enunciados determinado rigurosamente con precisión; pero contiene un núcleo conceptual esencial que claramente proviene de Bohr, puesto que la interpretación de Copenhague surgió en el espíritu del Instituto Bohr de dicha ciudad, alrededor de su fundador, en torno a sus enseñanzas y debates y fue aprobada por el mismo Bohr, que simboliza la figura paterna de la mecánica cuántica.

Sin embargo, Bohr no sólo aplicó la noción de complementariedad al difícil problema de compaginar el comportamiento ondulatorio y corpuscular de la luz y de la materia. También la aplicó al problema epistemológico de la causalidad y su propuesta constituye la aportación de Bohr a la controvertida cuestión de si se podía mantener en física cuántica el principio de causalidad, uno de los temas más debatidos (Forman, 1984) de la época en que nació la interpretación de la mecánica cuántica. Bohr y los creadores de la mecánica cuántica entendían el principio de causalidad en sentido determinista, según el cual conociendo el estado de un sistema —es decir, las coordenadas de posición y los momentos de sus partes— y las leyes que sobre él actúan, si dicho sistema no es afectado por perturbaciones externas, es posible predecir su evolución a través del tiempo. Entendido en este sentido, el principio de causalidad representaba la física clásica, que asumía el determinismo. Pero



descubrimientos como la desintegración radiactiva, en la cual sólo se podían establecer correlaciones estadísticas, llevaron a algunos físicos a renunciar a dicho principio. Uno de ellos fue Bohr.

La noción de complementariedad que Bohr creó está muy lejos de constituir una noción de contenido operacional, propia del lenguaje de la ciencia física. Es una noción cargada de connotaciones epistemológicas, construida para entender el mundo en general. Estudiaremos, en las páginas siguientes, cómo Bohr justificó su noción de complementariedad, cómo la aplicó al problema de la causalidad y cómo posteriormente la extendió más allá de la física, puesto que formaba parte de su propia concepción dialéctica de pensar y expresarse, y concluiremos ofreciendo una visión crítica de dicha noción.

### La presentación de la noción de complementariedad

En Como, en 1927, Bohr presentó públicamente (Bohr, 1988: 97-132) su noción de complementariedad en una conferencia de marcado carácter epistemológico. Así, el mismo autor manifestaba: “deseo señalar que a lo largo de toda la exposición he querido sobre todo poner el acento en los aspectos puramente epistemológicos” (Bohr, 1988: 63) y con ésta pretendía principalmente: “demostrar que este aspecto de complementariedad es fundamental para una interpretación consistente de los métodos de la teoría cuántica” (Bohr, 1988: 60), es decir, Bohr quería mostrar que se pueden entender de forma coherente, sin contradicción, descripciones muy diferentes, basadas en experimentos excluyentes, de los fenómenos cuánticos.

El punto de partida de la argumentación de Bohr fue el postulado cuántico, que consideraba la esencia de la teoría cuántica. Sobre dicho postulado Bohr construyó la justificación de su noción de complementariedad. Según este postulado los intercambios de energía ocurren sólo a través de transferencias discretas de magnitud finita, múltiplos de  $h$ , el denominado “*quantum* de acción” o “constante de Planck”. En consecuencia, cuando se observa un objeto atómico a través de un dispositivo se produce un intercambio de energía entre el objeto y el instrumento que nunca puede ser nulo; además dicha interacción nunca es despreciable —como sí puede serlo en física clásica— debido al orden de las dimensiones del mundo cuántico. En palabras de Bohr: “el postulado cuántico implica que toda observación de los fenómenos atómicos lleva aparejada una interacción con el aparato de observación que no puede ser despreciada” (Bohr, 1988: 99). Por esta razón, diferentes dispositivos experimentales producen diferentes e incontrolables interacciones que generan diferentes descripciones del fenómeno cuántico que, por una parte, son incompatibles, pero, por otra parte, a la vez, son necesarias, ya que contribuyen a describir de forma completa dicho fenómeno.

El postulado cuántico, según Bohr, implica consecuencias epistemológicas trascendentales, puesto que lleva a renunciar a principios fundamentales sobre los cuales estaba construida la ciencia natural. Como la revolución copernicana, que apartó al hombre del centro del universo, el postulado cuántico le ofreció a Bohr la lección epistemológica de que la observación pura, sin perturbación significativa del objeto, no es posible y esta situación cambió radicalmente la actitud del hombre ante la naturaleza. Así, manifestaba Bohr, “por un lado, la definición del estado de un sistema, tal y como se entiende de ordinario, exige la eliminación de toda perturbación externa, lo que, según el postulado cuántico, excluye también toda posibilidad de observación y sobre todo hace que los conceptos de espacio y tiempo pierdan su sentido inmediato” (Bohr, 1988: 100) y, por otro lado, si no se puede definir el estado actual de un objeto tampoco se puede definir sus estados futuros y, en consecuencia, no se puede predecir su evolución en el tiempo, es decir, no se puede ofrecer su desarrollo causal.

Por estas razones, Bohr contemplaba el postulado cuántico,

desde el punto de vista clásico, como un elemento irracional que nos obliga inevitablemente a renunciar a una descripción causal en el espacio y el tiempo y que nos compele [...] a un modo de descripción complementaria, en el sentido de que en ella toda aplicación de los conceptos clásicos excluye el uso simultáneo de otros conceptos clásicos igualmente necesarios. (Bohr, 1988: 59)

En estas palabras vemos, en primer lugar, que Bohr calificaba el postulado cuántico de “irracional”, considerando que dicho postulado es el responsable de haber introducido la “irracionalidad” en la física y asumiendo como “racionales” los principios clásicos de objetividad, inteligibilidad y causalidad. Estas manifestaciones —expresadas con naturalidad, sin connotaciones nostálgicas—, a través de las cuales Bohr mostraba que aceptaba la renuncia a dichos principios, le acercaban a los valores de la *Lebensphilosophie*, la filosofía de la vida, de carácter anti-racionalista, que según Forman (Forman, 1984: 91) imperaba en el ambiente intelectual germanoparlante de la época. En este ambiente se veía la razón, a la manera cartesiana, sólo en su función analizadora y se la rechazaba como instrumento epistemológico fundamental para comprender la realidad.

Por otra parte, en las anteriores palabras de Bohr vemos también que éste consideraba el postulado cuántico como el responsable de la inevitable renuncia al ideal de descripción de la física clásica, que permite la unión de la descripción causal de los fenómenos con la descripción espacio-temporal, y obliga a aceptar sólo dichas descripciones como complementarias, es decir, necesarias pero mutuamente excluyentes. Si realizamos una descripción espacio-temporal no podemos disponer de una descripción causal y viceversa. Bohr justificaba la complementariedad de la descripción causal y la descripción espacio-temporal basándose en las relaciones de indeterminación de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x = \Delta y \Delta p_y = \Delta z \Delta p_z = \Delta E \Delta t = h$$

según las cuales una determinación más precisa de las coordenadas espacio-temporales,  $x, y, z, t$  va acompañada de una indeterminación en la energía  $E$  y el momento  $p_x, p_y, p_z$ , esto es, conocer exactamente la situación espacial de un objeto impide conocer exactamente su momento y conocer exactamente su situación temporal impide conocer su energía. Y, según Bohr, la descripción causal, es decir, la evolución del sistema a través del tiempo, está asociada al conocimiento de la energía y el momento.

Bohr aplicó esta concepción al controvertido problema de la doble naturaleza de la luz. La teoría electromagnética describe adecuadamente la propagación de la luz en el espacio y el tiempo; pero para expresar la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento en la interacción entre materia y radiación —y éste es el aspecto causal de los fenómenos ópticos según Bohr—, como se muestra en el efecto fotoeléctrico y en el efecto Compton, hay que recurrir a la teoría corpuscular del fotón de Einstein. Es decir, si se desea estudiar las leyes de propagación de la luz en el espacio y el tiempo, hay que limitarse a consideraciones estadísticas, no causales, y si se desea aplicar el principio de causalidad “a los fenómenos luminosos individuales caracterizados por el cuanto de acción” (Bohr, 1988: 101) entonces hay que renunciar a la descripción espacio-temporal. Estas dos perspectivas complementarias constituyen dos tentativas diferentes de interpretar la evidencia experimental.

## **La noción de la complementariedad más allá de la física**

### ***Extensión de la noción de complementariedad***

En posteriores trabajos, Bohr aplicó la noción de complementariedad a otros campos diferentes de la física atómica, a la psicología, a la biología, a la antropología... Creía que esta noción que le había sido útil para interpretar los fenómenos atómicos le ayudaría a entender otros fenómenos naturales, humanos y sociales. La lección epistemológica extraída de la teoría cuántica podía extenderse a otros dominios del saber porque, para Bohr, el conocimiento es unitario. Así, la expresión “La unidad del conocimiento” aparece como título de dos de sus artículos y como tema al que se refiere en muchos otros. “El fundamento para esta 'unidad' de las ciencias se basa en el hecho que todas se refieren a la descripción objetiva de los fenómenos que se observan en la experiencia humana” (Citado en Folse, 1985: 170). Por consiguiente, ya que todas las ciencias comparten el problema de la observación, todas (Holton, 1982: 162) pueden beneficiarse de la aplicación de los conceptos creados para entender la observación en teoría cuántica, que ha permitido superar el supuesto clásico según el cual la descripción objetiva presenta propiedades poseídas por el objeto, independiente-

mente de su interacción con el instrumento de medida. Así, psicólogos, antropólogos, biólogos y periodistas son algunos de los colectivos que se encuentran a menudo con situaciones en las que cuando los sujetos estudiados saben que son observados alteran su conducta. Por consiguiente, a estos observadores se les plantea la cuestión: ¿qué es lo que observamos?

Así, en 1929, Bohr decía al terminar su conferencia ofrecida en honor a Planck:

Mi propósito ha sido, ante todo, hacerles partícipes de nuestro entusiasmo por las perspectivas que el descubrimiento de Planck ha abierto a todos los campos de las ciencias. Mi deseo ha sido, además, insistir, tanto como sea posible, en lo profundamente que han sido sacudidos por los nuevos conocimientos los fundamentos del edificio conceptual sobre los que descansa la representación clásica de la física e incluso todo nuestro modo habitual de pensar. (Bohr, 1988: 141)

Con estas palabras Bohr recuerda las consecuencias epistemológicas del postulado cuántico, puesto que en determinadas situaciones, que dependen de las dimensiones de las acciones<sup>1</sup>, no puede despreciarse la interacción objeto-instrumento, de la misma manera que la teoría de la relatividad nos recuerda que en determinadas situaciones, que dependen del movimiento del sujeto, no puede despreciarse la velocidad a la que éste se mueve. Bohr reiteró en sus escritos la analogía entre la revolución conceptual que para el ser humano habían significado la teoría de la relatividad y la teoría cuántica.

### Psicología

Bohr concluyó su conferencia en Como con estas palabras: “Confío, no obstante, que la idea de complementariedad sea adecuada para caracterizar la situación, que mantiene una profunda analogía con la dificultad general de formación de los conceptos humanos, dificultad que es inherente a la distinción entre sujeto y objeto” (Bohr, 1988: 132). Estas frases pudieron parecer crípticas la primera vez<sup>2</sup>, pero, posteriormente, en las siguientes exposiciones de Bohr, cuando éste las reiteró, aparecieron más claras, puesto que mostró con mayor transparencia la relación que mantenían con el postulado cuántico. Así, en teoría cuántica no se puede despreciar el intercambio de energía que se da entre objeto e instrumento de medida, porque, por dicho postulado, este intercambio nunca puede ser nulo, sino que siempre es un múltiplo de  $h$ . Por consiguiente, se ha de tener en cuenta que el objeto y el instrumento forman una unidad indivisible. Y aplicando estas consideraciones al campo más amplio del conocimiento humano, Bohr llegó a una visión holística de la relación entre objeto y sujeto. Así, se dice (Citado en Holton, 1982: 156) que uno de sus aforismos preferidos era el verso de Schiller: “*Nur die Fülle führt zur Klarheit*”, es decir, “Sólo la totalidad conduce a la claridad”.

Fue en la conferencia que Bohr pronunció en 1929 cuando se introdujo en el campo de la psicología, dominio al cual también se refirió posteriormente en muchos de sus trabajos. El siguiente fragmento de dicha conferencia constituye una clara exposición (Folse, 1985: 179) de la concepción que tenía el autor sobre nuestra actividad mental:

Para describir nuestra actividad mental es necesario que un contenido objetivamente dado sea puesto en presencia de un sujeto observador, mientras que, por otro lado, y según está ya implícito en esa misma afirmación, no es posible establecer una separación precisa entre sujeto y objeto, dado que el sujeto observador pertenece a nuestro contenido mental. De ahí se sigue que el significado relativo de cada concepto, o mejor dicho de cada palabra, no depende sólo de nuestra arbitraria elección del punto de vista sino que, además, debemos estar preparados, en general para aceptar el hecho de que la elucidación completa de un único y mismo objeto puede exigir la adopción de puntos de vista que desafián una única descripción [...]

<sup>1</sup> En física se define la acción como la magnitud que expresa el producto de la energía implicada en un proceso por el tiempo que dura dicho proceso.

<sup>2</sup> Esta es la impresión que producen cuando se leen los escritos de Bohr en orden cronológico. Con el paso del tiempo Bohr mostró más seguridad y transparencia en la expresión de sus ideas.

La necesidad de recurrir a este modo de descripción complementario, o recíproco, resulta quizás más familiar para nosotros en los problemas psicológicos. (Bohr, 1988: 137)

Bohr en sus trabajos utilizaba a menudo analogías —que el mismo Bohr reconocía a veces que eran “más o menos apropiadas”— (Bohr, 1988: 140) e imágenes que se alejaban del campo de la física; su objetivo era ilustrar sus tesis, que eran nuevas para gran parte del público. Por esta razón, en la conferencia de 1929, presentó ejemplos de experiencias subjetivas:

Cuando se considera esta situación, que nos obliga a renunciar a la necesidad de las representaciones intuitivas que impregnan todo nuestro lenguaje, es muy instructivo constatar que ya en las experiencias psicológicas elementales nos encontramos aspectos fundamentales tanto del modo de razonamiento relativista como del recíproco. La relatividad de nuestra percepción del conocimiento, que se hace familiar ya de niños al viajar en tren o en barco, corresponde, en este orden de ideas, a las experiencias cotidianas relativas al carácter recíproco de la percepción por el tacto. A estos efectos nos bastará recordar aquí la sensación, a menudo citada por los psicólogos, que se experimenta al intentar orientarse en una habitación oscura sirviéndose de un bastón. Cuando cogemos el bastón haciendo muy poca fuerza, éste se presenta al sentido del tacto como un objeto, pero cuando lo apretamos con fuerza perdemos la sensación de que es un cuerpo extraño y la impresión táctil se traslada de inmediato al punto en el cual el bastón toca al cuerpo que nosotros queremos examinar. (Bohr, 1988: 139)

Con esta imagen, Bohr pretendía mostrar la unidad que constituyen el objeto y el sujeto, pues no se puede trazar de forma inequívoca la línea que los separa. Un hombre utiliza un bastón para encontrar su camino en una habitación oscura. El hombre y el bastón pueden considerarse que constituyen una unidad. La línea que separa objeto y sujeto no está exactamente definida, puesto que, por una parte, la línea divisoria está al final del bastón si el hombre lo sostiene con firmeza pero, por otra parte, si no lo sujeta con fuerza, el bastón parece ser un objeto que la mano examina.

Observaciones similares a ésta siguieron apareciendo en los trabajos de Bohr. Decía: “Es significativo que [...] en otros campos del conocimiento estemos enfrentados a situaciones que nos recuerdan la existente en física cuántica [...]. No tratamos aquí de analogías más o menos vagas, sino de claros ejemplos de relaciones lógicas que encontramos en campos más extensos, en contextos diferentes” (Citado en Holton, 1982: 140). Así pues, en los otros dominios hay muchos fenómenos que se pueden entender con las nociones de la física cuántica.

Uno de los ejemplos más frecuentes de la aplicación de las relaciones de complementariedad en psicología es la dicotomía que tradicionalmente se ha visto entre el libre albedrío y la causalidad; pues, por una parte, nos sentimos libres al tomar nuestras decisiones y, por otra, nos creemos capaces de intentar realizar un análisis causal de ellas. Pero, ante este análisis causal, Bohr nos recuerda que hay que tener en cuenta que, según los descubrimientos de la teoría cuántica, “no es posible establecer con detalle el curso causal de los procesos atómicos ni intentar adquirir un conocimiento cualquiera de tales procesos sin ocasionar una interferencia fundamentalmente incontrolable de su curso” (Bohr, 1988: 140).

Otro ejemplo de complementariedad es la dicotomía que se ha establecido entre pensamiento y sentimiento, dos nociones que Bohr considera igualmente indispensables para describir la diversidad de nuestra vida psíquica, que “pertenecen a dos situaciones mutuamente excluyentes caracterizadas por un diferente trazado de la línea de separación entre sujeto y objeto” (Bohr, 1948: 318); pensamiento y sentimiento se refieren, pues, a experiencias distintas, que no pueden darse simultáneamente porque cada una de ellas hace una diferente distinción “entre el contenido de la conciencia y el telón de fondo que en términos vagos llamamos el yo” (Bohr, 1967: 144).

La vida mental está llena de ejemplos de nociones complementarias que los grandes pensadores de las diferentes culturas —de la antigua Grecia, de la India, de China, etc.— a través de la historia han recogido: razón e instinto, contemplación y volición, pragmatismo y misticismo, compasión y justicia. Respecto a esta última dicotomía es significativa la conversación que Bohr mantuvo con J. S. Bruner que éste refiere así:

Bohr me dijo que se había dado cuenta de la profundidad psicológica del concepto de complementariedad cuando uno de sus hijos había hecho algo que no se podía pasar por alto y que él no se sentía capacitado para castigar apropiadamente: “¡No se puede conocer a alguien a la luz de la justicia y a la luz del amor al mismo tiempo!” [...] También habló de la manera en que la introspección, como acto, disipaba la misma emoción que uno trataba de describir. (Holton, 1982: 156)

Es decir, para Bohr la estricta rigidez de la aplicación de la ley justa impide la benevolencia y el perdón del amor. Y este conflicto entre compasión y justicia es, según Bohr, destacado por la antigua filosofía oriental “cuando nos exhorta a no olvidar jamás, cuando buscamos la armonía en la vida humana, que sobre el escenario de la existencia, somos a la vez actores y espectadores” (Bohr, 1967: 100).

Como vemos, Bohr, para enfatizar el carácter universal de la relación de complementariedad, busca paradojas y se recrea explotando las sutilezas que hay en ellas, analiza las posiciones antitéticas y no se preocupa por encontrar una síntesis que las reúna. La psicología le proporciona múltiples ejemplos.

### ***Biología***

El padre de Bohr, Christian Bohr, profesor de fisiología en la universidad de Copenhague, había introducido a su hijo adolescente en uno de los debates filosóficos más importantes de fines del siglo XIX, el de las diferencias entre los méritos de las teorías vitalistas y los de las teorías mecanicistas de los seres vivos. Años después, en 1932, Niels Bohr pronunció una conferencia (Bohr, 1967) en la sesión inaugural del Congreso Internacional de Fototerapia y, después de mostrar cómo la relación de complementariedad ayuda a entender la doble naturaleza de la luz, pasó a apuntar la aplicación de dicha relación al dominio de la biología, recogiendo de esta forma el enfoque que le había transmitido su padre que, ante el materialismo mecanicista de principios del siglo XX, fue un vigoroso partidario del punto de vista teleológico en el estudio de la fisiología. Christian Bohr argumentaba que, sin conocer la función de un órgano, no se puede conocer la estructura y los procesos fisiológicos que se dan en él.

Estos dos puntos de vista, según Niels Bohr, habían sido presentados en el pasado como radicalmente opuestos entre sí. Y por esta razón se había considerado que o no había espacio para ambos en la ciencia o uno de ellos había de prevalecer sobre el otro. Mas Bohr mostraba una solución al conflicto: considerar los dos aspectos no como contradictorios sino como complementarios. Así pues, manifestaba: “en relación con esto, es necesario reconocer que las actitudes llamadas mecanicista y finalista no son puntos de vista contradictorios, sino que presentan una relación de complementariedad ligada a nuestra posición de observadores de la Naturaleza” (Bohr, 1967: 113). De esta manera se podían incluir ambos enfoques en las ciencias de la vida.

A pesar de que, según Bohr, no se puede otorgar al punto de vista vitalista una expresión precisa porque no se puede definir exactamente qué es la vida y la existencia de la vida ha de considerarse un hecho elemental, es evidente que los órganos de un ser vivo no sólo mantienen una estructura que puede ser descrita por una cadena de causas mecánicas estudiadas por la física y la química, sino que, además, la “integridad y adaptabilidad” que caracterizan un organismo vivo requieren, para “una descripción de las funciones internas de un organismo y de sus reacciones ante los estímulos externos” (Bohr, 1967: 142) la noción de causa final, extraña a la física y la química.

### ***Antropología***

Bohr también aplicó la noción de complementariedad al campo de la antropología. Así, en la conferencia que lleva por título “Las ciencias físicas y las culturas humanas” (Bohr, 1967: 58) pronunciada en un Congreso de Antropología y Ciencias Etnológicas realizado en 1938, Bohr manifestaba que las “radicales diferencias” que muestran las diversas sociedades humanas impiden su comparación; pero “la relación de complementariedad es una manera de enfrentarse a esta situación”. Así, las diversas comunidades humanas presentan rasgos tan diferentes que parecen opuestos entre sí

pero que son, en realidad, aspectos complementarios del mismo ser humano, aspectos que surgen de manera diferente según sean las circunstancias en las que se encuentre dicho ser humano.

Como vemos, con la noción de complementariedad Bohr relacionaba diferentes áreas del conocimiento en un amplio contexto humanístico. Había escrito casi dos docenas de artículos sobre el tema de la unidad del conocimiento. Y en 1933 había dicho a J. Rud Nielsen: “Creo que mis conclusiones tienen grandes aplicaciones fuera del campo de la física [...] Me gustaría escribir un libro que pudiese ser usado como texto. Demostraría que es posible llegar a todos los resultados importantes con muy pocas matemáticas” (Citado en Holton, 1982: 162).

### **Pensamiento dialéctico**

El modo complementario de descripción se muestra en la forma dialéctica de pensar y expresarse que tenía Bohr. Así, Rosenfeld, que trabajó muchos años con él, manifestaba: “las inclinaciones [de Bohr] eran esencialmente dialécticas en lugar de reflexivas [...] Necesitaba el estímulo de alguna clase de diálogo para poner en marcha su pensamiento”. Rosenfeld también recogió una frase que decía Bohr al respecto: “Cada frase mía no debe ser entendida como una afirmación, sino como una pregunta” (Holton, 1982: 155). Es en el diálogo donde surgen las diferentes posiciones, incluso antitéticas, que muestran los diferentes, incluso opuestos, aspectos de la realidad. Respecto a la noción esencialmente dialéctica de verdad de Bohr, Hans, su hijo, explicaba que su padre distinguía entre dos clases de verdad: las trivialidades, en las que lo opuesto es absurdo y las verdades profundas, que se reconocen porque lo opuesto también es una verdad profunda (Holton, 1982: 156)

La noción de complementariedad forma parte de una concepción general dialéctica que permanece en la historia del pensamiento. En la historia del pensamiento humano se encuentran muchos enunciados de complementariedad. Así hay un testimonio de Filón, del siglo I, que dice: “Lo que resulta de dos contrarios es uno; y si lo uno se divide se destacan los contrarios ¿No es éste el principio con el que, por cuanto justamente afirman los griegos, su grande y celeberrimo Heráclito encabezaba su filosofía, el principio que la resume toda y del cual se vanagloriaba como de un nuevo descubrimiento?” (Abbagnano, 1978: 19). Y es que para Heráclito, del siglo VI a. C., los opuestos son complementarios porque juntos forman una unidad; son tan interdependientes que forman la cara y la cruz de la misma moneda. Uno no se puede comprender sin el otro, ya que constituyen diferentes manifestaciones de la misma realidad. Por eso este filósofo presocrático afirmaba: “Lo mismo es vida y muerte, velar y dormir, juventud y vejez; aquellas cosas se cambian en éstas y éstas en aquéllas” (Kirk, Raven y Schofield, 2008). “Dios es día-noche, invierno-verano, guerra-paz, hartura-hambre, cambia como el fuego al que, cuando se mezcla con perfumes, se denomina de acuerdo con la fragancia de cada uno de ellos” (Kirk, Raven y Schofield, 2008). De este punto de vista surge la filosofía dialéctica, según la cual la estructura de la realidad es contradictoria.

Podemos encontrar muchos otros casos de complementariedad en la historia de la filosofía; por ejemplo, cuando Zenón, en el siglo V a.C., estudiaba la flecha que se mueve veía en ella dos aspectos contradictorios: el estado de movimiento que aparece ante nuestros ojos y el estado de reposo en el que, en cada momento infinitesimal, podemos pensar que se encuentra la flecha. Y en la Edad Media la doctrina de la doble verdad atribuida a Averroes enunciaba que dos explicaciones diferentes del mismo tema, la religiosa y la filosófica, pueden ser ambas verdaderas, a pesar de que su conjunción constituya una flagrante contradicción, por ejemplo, la creación del mundo realizada por Dios, según la Biblia, y la eternidad del mundo mantenida por Aristóteles.

### **Visión crítica**

Se le ha criticado (Jammer, 1974: 94) a Bohr que haya limitado la relación de complementariedad sólo a dos propiedades, que no la haya ampliado a tres o más. ¿Por qué para dar una descripción hay que ofrecer únicamente dos aspectos complementarios? ¿No se pueden apreciar mayor número de aspectos, que también sean excluyentes y necesarios a la vez?

Realmente en los ensayos de Bohr se encuentran casi siempre los conceptos complementarios presentados en pares. El par más frecuente es el del aspecto ondulatorio y corpuscular de la luz, pero

el primero que presentó fue, como hemos visto, el de la descripción espacio-temporal y la descripción causal. Pero en su conferencia titulada “Las ciencias físicas y las culturas humanas” que Bohr concluía extendiendo, como hemos visto, la noción de complementariedad, a las diferencias culturales, ampliaba la posibilidad de encontrar un mayor número de aspectos complementarios:

La información referida al comportamiento de un objeto atómico [...] puede caracterizarse como complementaria de cualquier información sobre el mismo objeto obtenida por otros medios experimentales que excluyan el cumplimiento de las primeras condiciones. [...] Sólo teniendo en cuenta la relación de complementariedad entre las diferentes experiencias. [...]

No se ha de renunciar al análisis detallado de la riqueza casi avasalladora de nuestra experiencia, que se incrementa continuamente en el mundo de los átomos. (Bohr, 1967: 53)

A continuación, Bohr muestra cómo la relación de complementariedad abarcará tantos aspectos de la realidad que será tan útil para explicar el mundo como la relación de causalidad lo ha sido para la física clásica: “Nuestros medios de clasificación y de comprensión no caben dentro de la estructura de la descripción causal, que es adecuada sólo cuando el comportamiento de los objetos es independiente de los medios de observación” (Bohr, 1967: 54)

Y, consciente que parte del público pensaba que la relación de complementariedad no es una noción propia del pensamiento científico, sino que más bien es una noción intuitiva, esto es, ininteligible para la razón analítica, Bohr añadía, como en otras ocasiones en las que también había respondido a la crítica de misticismo: “Lejos de contener algún tipo de misticismo contrario al espíritu de la ciencia, el punto de vista de la complementariedad constituye en realidad una generalización coherente del ideal de causalidad” (Bohr, 1967: 54)

Así, como vemos, según Bohr, la noción de causalidad quedaba integrada dentro de la noción más amplia de complementariedad.

Hemos visto que Bohr justificaba el fallo de la descripción causal en el mundo atómico por el postulado cuántico, argumentando que no se puede hablar de comportamiento autónomo de un objeto atómico, puesto que el estado de éste siempre depende, de forma no rigurosamente controlable, de los instrumentos de observación. Ya que no es posible conocer el comportamiento independiente de un objeto, no se puede atribuir ninguna causa necesaria a dicha conducta, según el ideal clásico de explicación aceptado en todos los dominios del conocimiento. Por esta razón, según Bohr, resulta más adecuada la relación de complementariedad, que ofrece los diferentes aspectos en que aparecen los fenómenos bajo diferentes condiciones, es decir, en diferentes interacciones con diferentes instrumentos. Así, el *abstract* del artículo “Sobre las nociones de causalidad y complementariedad” resume el punto de vista del autor al respecto:

[este artículo] da [...] el fallo del principio de causalidad al enfrentarse con los fenómenos atómicos. Se enfatiza en el hecho de que la individualidad de los procesos cuánticos excluye una separación entre un comportamiento de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medida que definen las condiciones bajo las cuales los fenómenos aparecen. Esta circunstancia nos fuerza a reconocer una nueva relación, convenientemente llamada complementariedad, entre la evidencia empírica obtenida bajo diferentes condiciones experimentales. (Bohr, 1948)

## Conclusión

La noción de complementariedad, que, como hemos visto, Bohr derivó del postulado cuántico, cumplió principalmente una función heurística, ya que ayudó a interpretar los dos tipos de experimentos, los que mostraban la naturaleza ondulatoria y los que mostraban la naturaleza corpuscular de la luz y de las partículas materiales elementales, y contribuyó a paliar la inquietud de los físicos —especialmente de los seguidores de la interpretación de Copenhague— ante el problema de cohe-

---

<sup>3</sup> Hemos subrayado los términos que muestran cómo Bohr ampliaba los fenómenos complementarios a más de dos.



rencia lógica que creaba la evidencia empírica. Entonces la noción de complementariedad significó un recurso mental útil para mantener, sin interpretación realista, unos modelos de visualización clásicos. Pero dicha noción no llevaba a descubrir nuevas leyes teóricas que permitieran realizar predicciones precisas y contrastables, que es lo que constituye el principal objetivo de la ciencia física, y fue posiblemente por esta razón por la cual Einstein manifestó que no llegó a comprender el significado de la complementariedad.

Finalmente, de la misma manera que las raíces de la noción de complementariedad se encuentran en el amplio contexto humanístico de su creador, es decir, no sólo en sus investigaciones de física sino también en sus reflexiones sobre problemas filosóficos y psicológicos y en las controversias entre escuelas rivales de biología, la función de la noción de complementariedad que puede mantenerse en nuestros días es la de constituir un marco conceptual universal con el que entender el mundo, la sociedad y el ser humano, bajo sus múltiples y diferentes, incluso opuestas, facetas. Es la visión heracliteana y dialéctica de la complementariedad.

## REFERENCIAS

- Abbagnano, N. (1978). *Historia de la Filosofía*. Barcelona, España: Montaner y Simón.
- Bohr, N. (1948). On the notions of causality and complementarity. *Dialectica*, 2(3).
- (1967). *Física atòmica i coneixement humà*. Barcelona, España: Edicions 62.
- (1988). *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Einstein, A. (1949) *Reply to Criticisms*. *Albert Einstein: philosopher-scientist*. En Paul Schilpp (Ed.) *Illinois: The Library of Living Philosophers, VII*.
- Folse, H. J. (1985). *The philosophy of Niels Bohr*. Amsterdam, Países Bajos: North-Holland Physics Publishing.
- Forman, P. (1984). *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Holton, G. (1982). *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Kirk, G. S., Raven, J. E. y Schofield, M. (2008). *Los filósofos presocráticos*. Madrid, España: Gredos.

## SOBRE LOS AUTORES

**Josefa Castellà Cid:** Licenciada en Filosofía y en Ciencias Físicas. Doctoranda en Filosofía de la Ciencia.

**Karim J. Gherab Martín:** Profesor en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Comunicación de la Universidad CEU San Pablo. Es físico teórico y doctor en filosofía de la ciencia por la Universidad Autónoma de Madrid.