

La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza

ANA RIOJA
(Universidad Complutense)

«*Contraria sunt complementa*»

Niels Bohr

A la tarea de racionalización de la naturaleza, en el contexto de las ciencias naturales, en modo alguno le son ajenas cuestiones de carácter epistemológico tales como las que se refieren a las condiciones de posibilidad de la objetividad. Muy al contrario, ciencia y epistemología están estrechamente relacionadas de manera que sus respectivos resultados no dejan de influirse mutuamente.

Esta tesis, que puede defenderse con carácter general, adquiere especial importancia a partir de la constitución de la teoría cuántica. La introducción del cuanto de acción de Planck y del postulado cuántico de Bohr va a plantear difíciles problemas, ya conocidos y debatidos por la filosofía moderna, pero nuevos en el campo de la ciencia experimental. Con la incorporación de los microfenómenos a la física, la experiencia se amplía a órdenes de cosas que nunca son directamente observables, no sólo a causa de su tamaño, sino sobre todo debido a la imposibilidad radical de acceder a ellos sin que interactúen de manera incontrolable con los instrumentos de observación. Todo proceso de observación conlleva así una fundamental interacción entre el objeto a observar y los medios de observación, que había de suscitar vivas discusiones entre la comunidad de físicos de la primera mitad de este siglo en una doble dirección: a) por un lado, con respecto a la posibilidad de seguir hablando de *realidad* física independiente de los sujetos y de sus operaciones; b) por otro, en relación al modo de preservar la *objetividad* en la descripción de una naturaleza sometida a interrogación mediante procedimientos físicos de observación y medida.

En las páginas que siguen me propongo atender únicamente a este segundo aspecto, omitiendo toda referencia a la debatida cuestión del realismo y su compatibilidad con la teoría cuántica. Me ceñiré pues a la vertiente epistemológica del tema, prescindiendo de sus implicaciones metafísicas. En concreto voy a mostrar las paradojas y dilemas surgidos como consecuencia de la aplicación de los conceptos clásicos a un mundo regido por el postulado cuántico, en el que no es posible reducir a cero la interac-

ción objeto-aparato y, por tanto, en el que no cabe seguir manteniendo el ideal clásico de descripción (epígrafes 1-4).

Posteriormente analizaré la solución al problema de la aplicabilidad de los conceptos físicos clásicos a los microfenómenos y, en definitiva, al problema de la objetividad, tal como entiendo que se ofrece desde la filosofía de la complementariedad de Niels Bohr (epígrafes 5-6).

Como telón de fondo de este artículo está el convencimiento, primero, de que las reflexiones de Bohr siguen siendo de interés en 1992, treinta años después de su muerte acaecida el 18 de noviembre de 1962, y, segundo, de que la problemática epistemológica suscitada por la teoría cuántica desborda el limitado ámbito en el que se plantea, para conectar con las grandes cuestiones ligadas a las condiciones que subyacen a todo conocimiento humano.

1. El ideal descriptivo clásico o la doctrina del espectador

En el ámbito de las ciencias de la naturaleza inanimada, y muy en particular en el ámbito de la mecánica, se configuró desde Galileo hasta Einstein un ideal descriptivo al que se ha dado en llamar «clásico», que habría de convertirse en el marco obligado en el cual se inscribiera toda descripción objetiva de la naturaleza. Consistía en la determinación del estado cinemático-dinámico de los sistemas físicos, o si se prefiere, en la especificación del modo de coordinación espacio-temporal junto con la variación de su momento y energía como consecuencia de la interacción de dichos sistemas entre sí. Considerando el conjunto de todos ellos como un sistema cerrado y aplicando un principio de conservación de ambas magnitudes dinámicas, era posible determinar la serie causal sucesiva de modificaciones de sus estados, de forma que la aplicación de la causalidad venía facilitada por los principios de conservación. Podemos pues hablar de descripción cinemático-dinámica, o también de descripción espacio-temporal causal, en tanto que propia del mecanicismo clásico.

La caracterización del conjunto de los sistemas físicos como sistema cerrado, o sea, como un sistema sin intercambio con nada externo, era absolutamente indispensable a este ideal explicativo, a fin de que la noción de *objeto observado* pudiera tener un sentido definido, perfectamente independiente del sujeto observador y de sus operaciones de observación y medida. Ahora bien toda observación de la naturaleza, y con más razón cuando se interponen aparatos de medida, supone una entrada y salida de energía, una interacción entre el objeto y el sujeto con sus medios de observación —entre los que al menos hay que mencionar la luz—, que puede llevar a poner en tela de juicio la noción de *sistema observado cerrado*, y con ello la fundamental *distinción entre sujeto y objeto*, así como el criterio mismo de *objetividad*. En efecto, la descripción objetiva y científica

del mundo exige dar cuenta de éste tal cual es, sin interferencia, intervención o perturbación por parte del sujeto que observa.

La importancia del tema es manifiesta, y, sin embargo, nunca se explicita en el contexto físico clásico. La razón de tal omisión, creo, puede justificarse así. Hasta el siglo XX el concepto de observación es considerado por los científicos como primitivo en el sentido de no estar en función de ningún otro, cuando en realidad depende estrechamente del uso que en mecánica se hace del par de conceptos continuo-discontinuo. Es bien sabido que la mecánica newtoniana es de corte atomista, lo que significa que hace un tratamiento discontinuo de la materia, concretamente basado en la idea de «punto-masa». Pero esta discontinuidad de la materia coexiste con un principio indiscutido, que no es otro que el de la continuidad de la naturaleza en sus operaciones. La sede o el asiento de las acciones de los cuerpos podrá ser discontinua o no (no hay unanimidad en la defensa del atomismo), pero la evolución misma de esas acciones y operaciones, la transmisión de unos estados a otros, se realiza siempre pasando por todos los estados de valores intermedios. Y, por supuesto, al no haber un valor mínimo (o de lo contrario abandonaríamos el presupuesto del continuo) es posible llegar a alcanzar un valor cero.

Esto último es precisamente lo que ocurre con el intercambio energético entre el objeto observado y el instrumento de observación. Si la perturbación originada por la observación se mide en términos de magnitudes continuas, puede al menos ser arbitrariamente reducida tanto como se quiera y, por tanto, puede ser despreciable. Lo importante no es si experimentalmente puede ser igualada a cero, sino si, conforme a los principios de la teoría, nada se opone a su reducción indefinida al no estipularse una cantidad mínima de acción o de energía. Esta noción de observación en sentido clásico, que permite obtener información del objeto tal cual es, constituye pues una idealización, por cuanto, siempre se altera el estado de los objetos observados, pero una idealización válida desde el momento en que la interacción con los aparatos de medida es perfectamente controlable, calculable y eliminable. Dado que hasta 1900 ni se conoce, ni tan siquiera se sospecha la posibilidad de una cantidad mínima de acción que se traduzca en cantidad mínima de interacción observacional, no es de extrañar que no se plantearan los problemas epistemológicos derivados de todo proceso de observación.

La física clásica en su conjunto es así una idealización en la que el estado del sistema observado puede ser descrito como un sistema aislado y ajeno a toda interferencia, o sea, como un verdadero sistema cerrado, en el que es posible determinar simultáneamente el valor de los pares de parámetros conjugados canónicamente, a los que corresponden propiedades que cambian continuamente en el tiempo. Se entiende que dichas propiedades lo son de un objeto real independiente, no accesible a la observación sino mediatamente a través de estas propiedades fenoménicas susceptibles de observación y medida. Pese a las críticas empiristas, la mecánica clásica

es *realista*; en consonancia con ello la noción de objetividad se asienta sobre una realidad más allá, independiente del sujeto y de su experiencia, que existe por sí misma, y cuya descripción constituye la meta de toda ciencia, siempre a partir del supuesto de la viabilidad de la más clásica concepción de la verdad como adecuación entre el entendimiento y la cosa. La ciencia natural aspira a dar cuenta del objeto tal cual es; en concreto la mecánica se refiere al comportamiento causalmente determinado de los cuerpos —reducidos a sus respectivos centros de gravedad— en el espacio y en el tiempo. Este objeto físico real se representa pues como un sistema cerrado, ajeno a toda interacción observacional, con propiedades bien definidas que se hallan en su totalidad representadas por los términos de la teoría.

Haciendo uso de una expresión de Margenau puede resumirse este ideal descriptivo clásico como la doctrina del espectador, en la que el sujeto se limita a contemplar y transcribir el espectáculo de cuanto acontece fuera e independientemente de él en el marco espacio-temporal. Con la aparición de la teoría cuántica asistiremos a la evolución de la *doctrina del espectador* a la *doctrina del actor-espectador*. La introducción del postulado cuántico supondrá la ruptura de la continuidad y la consiguiente privación de fundamento al concepto clásico de observación. Las consecuencias epistemológicas de tal modificación no pueden por menos de merecer un atento examen. Pero antes convendrá hacer un pequeño repaso al proceso histórico que conduce hasta este punto.

2. El postulado cuántico

A lo largo del siglo XIX la explicación atomista de la materia fue ganando terreno debido a la evolución de la química heredera de Dalton y al desarrollo de teorías físicas como la teoría cinética de los gases o la termodinámica. Con la excepción de positivistas ilustres entre los que destaca Mach, la idea de átomo entró en un periodo de consolidación, pero también de grandes interrogantes en torno a la relación entre radiación electromagnética y estructura de la materia. Según la teoría de Maxwell, la radiación consistía en la propagación de campos electromagnéticos a partir de la oscilación de cargas eléctricas, sin que se diera ninguna indicación acerca de qué eran o dónde estaban esas cargas. En otros términos, la radiación era emitida y absorbida por la materia, a partir de la cual se propaga en forma de ondas conforme a las ecuaciones de Maxwell, pero se desconocía cómo la materia la emitía o la absorbía. Lo que sí parecía claro era la imposibilidad de justificar que los átomos emitieran luz si éstos se entendían como meras partículas sólidas puntuales, sin carga eléctrica.

En 1890 Lorentz planteó la presencia de las cargas eléctricas mínimas de Helmholtz —a las que Stoney había denominado «electrones»— *en el interior* de los átomos, de modo que fuera la oscilación de esas cargas, la

responsable de los fenómenos de emisión de luz. El problema estribaba entonces en determinar cómo se distribuyen y cómo se mueven dentro del átomo, lo que implicaba que éste iba a dejar de ser una partícula sólida indivisible para pasar a tener estructura. La tarea pendiente consistía en diseñar un *modelo de átomo* que diera razón de esta estructura.

J. J. Thomson fue quien formuló, en los años finales del siglo XIX y primeros del siglo XX, un primer modelo de átomo en el que los electrones eran considerados como partículas sub-atómicas de carga eléctrica negativa, y no como cargas eléctricas elementales, pero en el que se desconocía la noción de núcleo atómico. En 1911 Rutherford, antiguo colaborador de Thomson en Cambridge, postula un nuevo modelo en el que se combinan las ideas de electrones de carga negativa, núcleo atómico de carga positiva y espacio vacío. Se trata del famoso modelo planetario en el que los electrones giran en torno al núcleo a través de un vacío intermedio, como los planetas giran en torno al sol. Pero mientras que la teoría clásica da cuenta de la relativa estabilidad que manifiesta el sistema solar, el modelo de átomo de Rutherford es absolutamente inestable. En efecto, de acuerdo con la teoría de Maxwell toda carga eléctrica con movimiento acelerado debe emitir radiación electromagnética a partir de la conversión de energía cinética. Puesto que los electrones giran aceleradamente en torno al núcleo emitirán luz, pero también se desplazarán en órbitas cada vez menores hasta desplomarse sobre dicho núcleo en un tiempo brevísimo (10^{-9} seg.). En definitiva, conforme a las ideas de que se dispone en la segunda década del siglo XX, los mismos principios que permiten explicar la relación entre átomos y radiación, son responsables de la autodestrucción de los átomos.

Estando así las cosas entra en escena un joven investigador de 28 años, que había trabajado primero con Thomson en Cambridge y después con Rutherford en Manchester, Niels Bohr. Su propuesta será tan sorprendente como revolucionaria: hacer uso del cuanto de acción de Planck como elemento estabilizador del átomo. En 1913 expondrá su modelo cuántico del átomo que se basa en dos postulados.

1) Un sistema atómico posee un número finito de estados posibles, los estados estacionarios, en los cuales un electrón en un átomo gira en órbitas determinadas sin emitir ni absorber energía radiante (lo que contraviene claramente la teoría clásica). Dichos estados estacionarios corresponden a una serie discreta de valores de energía y en ellos el sistema es estable.

2) Un sistema atómico emite o absorbe energía discontinuamente cuando pasa de unos estados estacionarios a otros, o también, utilizando las imágenes mecánicas clásicas, cuando salta de una órbita a otra («saltos cuánticos» o «quantum jumps», según la expresión habitualmente utilizada). El valor energético de la radiación absorbida o emitida es igual a la diferencia entre los estados inicial y final, diferencia que es proporcional a la frecuencia de la radiación, tal como estableció Planck ($E_2 - E_1 = h f$). Así pues, la energía radiante y, por tanto, también la energía cinética del elec-

trón sólo pueden presentar ciertos valores discretos, o en otros términos, la energía está cuantizada.

Bohr retoma pues la hipótesis que Planck formuló en 1900 para explicar la radiación del cuerpo negro. Denominará *postulado cuántico* al carácter indivisible de los procesos atómicos, consecuencia de la aplicación del cuanto de acción a los estados del átomo. Lo que aquí interesa destacar es que si el átomo sólo puede existir en estados discretos, los estados estacionarios, no estando permitidos por el postulado cuántico los valores intermedios, entonces los cambios de estado no pueden tener lugar de modo continuo, como se suponía clásicamente, sino discontinuo. *Los sistemas físicos cambian de estado discontinuamente*. Toda interacción o intercambio energético ha de tener valores que correspondan a la cantidad mínima de energía exigida por el cuanto de acción o a múltiplos enteros de tal cantidad. Pero justamente, lo que permitía hablar del comportamiento autónomo de los objetos en el espacio y en el tiempo, ignorando por completo las condiciones de observación, era la posibilidad de reducir la interacción entre los objetos y los aparatos de medida hasta el infinito. *Con la ruptura de la continuidad, la noción de observación ha de ser revisada*.

El propio Bohr explicita con toda claridad la cuestión en el congreso de Como de 1927: «Nuestra descripción usual de los fenómenos físicos se basa por entero en la idea de que los fenómenos pueden ser observados sin perturbarlos de forma apreciable (...). Ahora bien, el postulado cuántico implica que toda observación de los fenómenos atómicos lleva aparejada una interacción con el aparato de observación que no puede ser despreciada. Por consiguiente, no puede adscribirse una realidad independiente en el sentido físico ordinario ni a los fenómenos ni a los instrumentos de observación»¹.

Y en un escrito dos años posterior afirma: «Puesto que en la observación de los fenómenos no podemos despreciar la interacción entre el objeto y el instrumento de medida, de nuevo pasan a primer plano las cuestiones que se refieren a las posibilidades de observación. Así, nos enfrentamos aquí, bajo una nueva luz, al problema de la objetividad de los fenómenos, que tanto interés ha suscitado en las discusiones filosóficas»².

En definitiva lo que está en juego es el *tipo de objetividad* que puede obtenerse de los objetos atómicos, y en último término, la *posibilidad de mantener el ideal descriptivo clásico* en cuanto explicación causal de los fenómenos en el espacio y en el tiempo.

1. BOHR, N.: «El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica», 1927, en: *TADN*, p. 99.

2. BOHR, N.: «El cuanto de acción y la descripción de la Naturaleza», 1929, en: *TADN*, p. 134.

3. Espacio-tiempo y causalidad o la incompatibilidad de lo clásicamente compatible

Más de diez años después de sus hipótesis sobre el átomo, Bohr hará públicas sus reflexiones epistemológicas, ligadas a la irrupción del postulado cuántico, a través de conferencias y artículos que se prolongan desde mediados de los años veinte hasta su muerte en 1962. Por desgracia su proyecto de escribir una obra sistemática sobre epistemología no llegó a hacerse realidad, según dijo en alguna ocasión, por falta de tiempo. Pero con todo disponemos de páginas más que suficientes para conocer sus puntos de vista al respecto.

Pese a las modificaciones o matizaciones que, como es lógico, se van introduciendo durante casi cuatro décadas, Bohr mantuvo una tesis básica a lo largo de toda su vida: «el postulado fundamental de la indivisibilidad del cuanto de acción es en sí mismo y desde el punto de vista clásico un elemento irracional que nos obliga inevitablemente a *renunciar a una descripción causal en el espacio y en el tiempo*»³.

El postulado cuántico exige prescindir del ideal descriptivo clásico en el que es posible determinar con precisión ilimitada, tanto la localización espacio-temporal de los sistemas físicos como su estado dinámico a partir de los principios de conservación. Pues tal posibilidad de descripción está ligada a la infinita divisibilidad del curso de los fenómenos en el marco espacio-temporal y al encadenamiento de los hechos en una sucesión ininterrumpida de causas y efectos. Sólo así cabe considerar como carente de influjo la interacción con los objetos que entraña todo proceso de percepción, y puede aspirarse a una descripción de los mismos con independencia de las condiciones de observación. Sin embargo, tras la introducción del postulado cuántico, toda observación ha de suponer necesariamente una forma de actuación sobre lo observado. Este es el caso de los estados estacionarios en el átomo, que van a resultar por principio inobservables, puesto que al enviar luz de una cierta frecuencia sobre él, se provoca una transición o cambio de estado con una probabilidad que es proporcional a la intensidad de la radiación utilizada. Luego, el acto mismo de observar anula la existencia del estado que se pretendía observar. Se trata de un fenómeno que no puede describirse en los términos convencionales clásicos.

«La definición del estado de un sistema —afirma Bohr— 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. Si, por otro lado, y con objeto de hacer posible la observación, admitimos la eventuali-

3. BOHR, N.: *TADN*, Introducción, 1929, p. 59. (El subrayado no figura en el original).

dad de interacciones con los instrumentos de medida apropiados que no pertenecen al sistema, se hace imposible por la naturaleza misma de las cosas, definir de manera inequívoca el estado del sistema y en consecuencia no puede ser cuestión de la causalidad en el sentido ordinario de la palabra. *Es preciso pues considerar una modificación radical de la relación entre la descripción en el espacio y en el tiempo y el principio de causalidad, que simbolizan respectivamente las posibilidades ideales de observación y de definición, y cuya unión es característica de las teorías clásicas*⁴.

Sin el presupuesto de la continuidad de los cambios de estado no se puede seguir manteniendo la posibilidad de combinar la descripción según las coordenadas espacio-temporales junto con los teoremas dinámicos de conservación, responsables de la aplicación de la causalidad. *Espacio-tiempo y causalidad, perfectamente compatibles en el planteamiento clásico, ahora son excluyentes.*

Dos factores dan razón de esta sorprendente y nueva incompatibilidad:

1) Debido a la indivisible interacción entre el objeto y el aparato de medida no es posible obtener información de la localización espacio-temporal sin destruir las condiciones experimentales que permiten obtener información del estado dinámico, y viceversa.

2) La interacción entre el objeto y el aparato es, por principio, indeterminable.

En relación con el primer punto Bohr insistirá en que, para medir con precisión la *localización en el espacio* de un objeto, debe conocerse con igual precisión la del aparato de medida, pero ello exige que dicho aparato esté rígidamente unido a la estructura que define el marco de referencia espacial. Ahora bien, esta condición es incompatible con la de la medida del *momento* exacto, para cuya determinación es preciso que el momento anterior del aparato de medida sea conocido y que la modificación de su momento debido a la interacción con el objeto sea mensurable; pero para esto último es necesario que el aparato de medida *no* esté rígidamente unido a la estructura que define el marco de referencia espacial, lo que hace perder la medida de la posición. En definitiva la medida de la posición no permite la medida del momento y la medida del momento no permite la medida de la posición. Las condiciones experimentales requeridas para la medida simultánea exacta de la localización espacial y del estado dinámico del sistema, establecido éste último en términos de momento o cantidad de movimiento, son mutuamente excluyentes. Y lo mismo podría decirse de la medida del tiempo y de la energía.

Con respecto al segundo punto cabría argumentar acerca de la posibilidad de determinar la modificación del momento producida por la medida de la posición midiendo el momento del objeto antes y después de la inte-

4. BOHR, N.: «El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica», 1927, en: *TADN*, p. 100. (El subrayado no figura en el original).

racción con el aparato y aplicando el principio de conservación de esta magnitud, de modo que el valor de la perturbación fuera el valor de la diferencia entre uno y otro. Sin embargo, en tal caso el aparato dejaría de cumplir su función como tal, que consiste en medir la posición exacta del objeto, para convertirse él mismo en objeto cuyo momento se trata de determinar supuestamente en el mismo tiempo en que se pretende medir la posición. Por las razones anteriormente expuestas, si se mide el momento, no puede medirse la posición, con lo cual efectivamente el aparato dejaría de ser un aparato de medida de la posición para pasar a ser él mismo un objeto cuyo momento se busca conocer. La conclusión es pues que «la perturbación causada por la medida no puede ser jamás determinada»⁵, cosa que no sucedía en la física clásica y que lleva al límite los problemas epistemológicos derivados del nuevo concepto de observación.

En resumen, el descubrimiento del cuanto de acción no permite alcanzar el ideal clásico según el cual el objeto observado se define con independencia del sistema de referencia del observador. Surgen así cuestiones muy familiares a la tradición filosófica, pero desconocidas en física. La noción de sistema observado cerrado ya no puede mantenerse; toda observación comporta una ineludible interacción que convierte al objeto en un sistema abierto, indisolublemente ligado al aparato de medida. Ello impide establecer una rígida distinción entre lo que se observa, el fenómeno, y los medios con los que se observa, puesto que lo que el fenómeno sea depende de las condiciones en que es observado. El postulado cuántico parece habernos enfrentando ante la existencia de un límite impuesto por la naturaleza misma a la posibilidad de hablar de los fenómenos en tanto que existiendo objetivamente. Habrá así que dar respuesta a interrogantes tales como qué se entiende por descripción objetiva de la naturaleza (puesto que parece cerrado al acceso a lo real tal cual es), qué aplicabilidad tienen los conceptos de espacio, tiempo y causa, qué estatuto de realidad tienen las propiedades no observadas de los sistemas, etc.

Nos hallamos, en definitiva, ante una sorprendente incompatibilidad sin precedente en el pensamiento clásico entre descripción espacio-temporal y definición causal. El efecto de los instrumentos de medida sobre el objeto a investigar ocasiona una exclusión mutua de dos tipos de información necesarios para conocer el sistema. Pero las sorpresas no acaban aquí, porque si en microfísica se hace experimentalmente incompatible lo

5. BOHR, N.: *TADN*, Introducción, 1929, p. 60. Ver también: «El cuanto de acción y la descripción de la Naturaleza», 1929, en: *TADN*, p. 138; «La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la Naturaleza», 1929, en: *TADN*, p. 152; «Casuality and Complementarity», *Philosophy of Science*, 4, 1937, pp. 291-292; «Biología y Física Atómica», 1937, en: *FACH*, p. 24. En la exposición de esta cuestión me ha servido de orientación la obra de D. MURDOCH: *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1987, pp. 84-87.

lógicamente compatible, por otro lado van a resultar experimentalmente compatibles conceptos que lógicamente no lo son. Expondré a continuación este punto para pasar después a analizar la propuesta epistemológica de Bohr, que se presenta como alternativa al ideal descriptivo clásico en un intento de resolver las paradojas suscitadas por la nueva teoría.

4. La dualidad onda-corpúsculo o la compatibilidad de lo clásicamente incompatible

El siglo XIX había hecho de la luz un fenómeno decididamente ondulatorio. Los estudios sobre difracción e interferencia de Young y Fresnel, los experimentos de Foucault y Fizeau para determinar su velocidad, la teoría electromagnética de Maxwell, todo parecía confirmar la vieja hipótesis que enfrentó a Huygens con Newton, de modo que a finales de siglo los físicos pensaban haber resuelto de una vez por todas el problema de la naturaleza de la luz.

Sin embargo, fenómenos ligados no a la propagación de la radiación en el espacio sino a la interacción entre radiación y materia, iban a proporcionar algunas novedades desconcertantes. El «efecto fotoeléctrico», observado ya en los últimos años del siglo pasado por Hertz y Hallwachs y estudiado por Lenard en los comienzos del siglo XX, no podía en modo alguno ser explicado en términos ondulatorios. En 1905 Einstein propone que la luz interacciona con la materia, en concreto con los electrones, en forma de cuantos haciendo así uso de la hipótesis formulada cinco años antes por Planck para resolver un problema distinto, el de la radiación del cuerpo negro, y a la que éste último consideraba como un simple artificio de cálculo. La noción de «cuantos de luz» o «fotones» —de acuerdo con la denominación que les dará Lewis— supondrá reintroducir la discontinuidad en la naturaleza de la luz, pero —y esto hay que subrayarlo— sin abandonar por ello el modelo ondulatorio, imprescindible para dar cuenta de los fenómenos de difracción e interferencia. El resultado parece ser la necesidad de compatibilizar dos imágenes incompatibles, la onda y el corpúsculo.

A lo largo de los años siguientes, los hechos experimentales no harían sino confirmar la hipótesis de los cuantos de luz. Es el caso de las experiencias de Millikan (1916) y, sobre todo, del experimento de Compton (1923), el llamado «efecto Compton».

Pese a esto, Bohr no aceptó en principio la sugerencia de Einstein, de modo que rechazó la explicación del efecto Compton en términos de los cuantos de luz. Por el contrario buscó una solución distinta que implicaba el abandono del principio estricto de conservación de la energía, pasando a interpretarlo en sentido estadístico, solución que publicó junto con otros

dos físicos, Kramer y Slater, en 1924⁶. Cuando cinco meses más tarde W. Bothe y H. Geiger demostraron fehacientemente que la energía se conserva en las interacciones atómicas individuales, Bohr tuvo que abandonar la hipótesis defendida en el mencionado artículo, pero no está claro que ello implicara su inmediata aceptación de la realidad de los fotones. Si nos atenemos a sus palabras escritas en 1925 hay que concluir que los considera como lo que Murdoch llama un «modelo formal» y no como un «modelo real», en el sentido de que no proporcionan una representación verdadera de los fenómenos de interacción entre radiación y materia⁷:

«Einstein demostró que ciertos aspectos esenciales de la interacción entre luz y materia podían interpretarse más fácilmente si se admitiese que la luz se propaga por cuantos separados y no por ondas extendidas, y que estos cuantos de luz o “fotones” contienen la energía hf concentrada en una pequeña región del espacio, siendo f la frecuencia de la luz considerada. El carácter formal de este punto de vista es inconcuso si se observa que tanto la definición como la medida de la frecuencia de la luz se basan exclusivamente en las ideas de la teoría ondulatoria» [la medida de la frecuencia del fotón se obtiene a partir de la siguiente ecuación: $f = \frac{c}{\lambda}$, en donde f es la frecuencia, c la velocidad de la luz y λ la longitud de onda de la luz en cuestión]⁸.

Lo que sí es claro es que el afianzamiento de la causalidad mediante el uso de principios de conservación le llevó a poner seriamente en duda la posibilidad de una descripción espacio-temporal de la radiación y, en general, de una descripción clásica mediante conceptos que sean visualizables⁹. En la primavera de 1925 Bohr y Heisenberg discuten esta cuestión. Este último se muestra partidario de abandonar todo intento de descripción espacio-temporal; de hecho en su mecánica de matrices de ese mismo año proporciona un formalismo matemático lógicamente consistente capaz de predecir los resultados observables de las interacciones entre sistemas atómicos y radiación sin ninguna referencia a representaciones intuitivas. Así, para Heisenberg basta el formalismo matemático que ha de aplicarse únicamente a propiedades observables de los fenómenos. Para Bohr, en cambio, la física ha de incluir, no sólo el formalismo matemático, sino su interpretación dentro de un marco conceptual. No hay descripción de la naturaleza sin interpretación física de los parámetros matemáticos. Pero ello exige el uso de conceptos cuyo significado y cuya aplicación a los fenómenos sean claros e inequívocos, cosa que parece haberse perdido en el caso de los conceptos físicos fundamentales dentro del contexto de la

6. BOHR, N.; KRAMER, H. A., y SLATER, J. C.: «The Quantum Theory of Radiation», *Philosophical Magazine*, 47, 1924, p. 785.

7. MURDOCH, D.: *op. cit.*, p. 20. Es interesante consultar los dos primeros capítulos de esta obra dedicados precisamente a la dualidad onda-corpúsculo.

8. BOHR, N.: «La teoría atómica y la mecánica», 1925, en: *TACH*, p. 76.

9. *Ibid.*, pp. 80-81.

teoría cuántica. Se impone una reflexión epistemológica, que Bohr inicia en este tiempo y ya no abandona, acerca de la significación, uso e integración de los conceptos en un nuevo marco descriptivo. La necesidad, no de prescindir, pero sí de limitar la validez de aplicación de las representaciones clásicas será uno de los resultados, y no el menos importante, de su investigación. De esto me ocuparé en el epígrafe siguiente.

La gravedad del dilema que planteaba la dualidad onda-corpúsculo con respecto a la luz no haría sino agudizarse con su extensión a la materia por obra de De Broglie en su tesis doctoral de 1925. Los estados cuánticos estables del electrón en el átomo de Bohr son interpretados en términos de ondas estacionarias, estando regidos unos y otras por números enteros. En concreto el físico francés supone la existencia de corpúsculos acompañados de ondas, cuya longitud de onda se calcula mediante la ecuación establecida por Einstein para determinar el impulso de un fotón:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

siendo p su impulso, λ su longitud de onda, y h la constante de

Planck. Puesto que longitud de onda e impulso (producto de la masa por la velocidad) están en proporción inversa, cuanto mayores sean los cuerpos, menor será su longitud de onda. Ello explica que a nivel mesofísico las ondas de materia no jueguen ningún papel. En cambio, a nivel microfísico, si las ondas de los electrones son algo más que un artificio matemático, debería poder detectarse la difracción de los electrones, lo que probaría el comportamiento ondulatorio de un corpúsculo material. Davisson y Germer serán los físicos que proporcionen tal prueba experimental.

El problema de la naturaleza dual de la luz y de la materia no puede ya ignorarse, exigiendo siquiera un pronunciamiento al respecto. Tras haberse mostrado muy reacio al comienzo, Bohr pasa a hacer del tema el centro de sus reflexiones. En una entrevista concedida a Kuhn en 1963, Heisenberg se refiere a las tribulaciones del físico danés en esta época en los términos siguientes:

«Estas paradojas estaban hasta tal punto en el centro de su mente que no podía imaginar que alguien fuera capaz de encontrar una respuesta a ellas, ni siquiera disponiendo del más refinado esquema matemático del mundo (...). Nadie podía dar una respuesta a la cuestión de «si el electrón es una onda o una partícula, y cómo se comporta en función de que yo haga esto o aquello». Las paradojas se fueron así haciendo cada vez más acentuadas...»¹⁰.

En resumen, el uso de los conceptos clásicos, tales como onda o partícula, nos enfrentan ante un dilema que, si bien por un lado ha de considerarse como la exacta expresión de la evidencia experimental, por otro pone

10. *Archive for the History of Quantum Physics*, Heisenberg interview, Tape 52a, pp. 12-13. Citado por FOLSE, H. J.: *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity*. Amsterdam, North-Holland Publ. 1985, p. 85.

en cuestión la aplicabilidad a la naturaleza del principio mismo de contradicción. Bohr señala en diversas ocasiones que la oposición esencial existente entre los conceptos clásicos y los ámbitos en los que interviene el cuanto de acción aparece ya con claridad en las dos ecuaciones que constituyen el fundamento común de la teoría de los fotones y de la teoría ondulatoria de la materia, aquéllas que miden la energía y el impulso de los sistemas: $E = h f$ y $p = \frac{h}{\lambda}$. En ellas la energía (E) y el impulso o cantidad de movimiento (p), que son magnitudes que se refieren a las partículas, se definen por magnitudes que únicamente tienen sentido en una representación ondulatoria tales como frecuencia (f) y longitud de onda (λ), siendo la constante de Planck (h) la que pone en relación unas con otras¹¹.

Ante esta situación al menos dos opciones parecen posibles: una, mantenida en un comienzo por Heisenberg, consiste en renunciar por completo a la utilización de los conceptos clásicos para la descripción de los fenómenos físicos; otra, defendida por Bohr, insiste en mantener estos conceptos clásicos por considerarlos absolutamente indispensables para describir y comunicar la experiencia, pero a base de revisar profundamente el modo como se usan y se aplican a los sistemas. El resultado de tal revisión será la creación del marco filosófico de la complementariedad.

5. Complementariedad y contradicción

A partir de 1925, año en el que los fotones de Einstein cobran nueva fuerza tras el fracaso de la hipótesis de Bohr, Kramer y Slater y en el que De Broglie postula las ondas de materia, Bohr ha ido aceptando gradualmente la dualidad onda-corpúsculo, no sin disgusto por parte de Heisenberg. La verdad es que desconocemos cómo evoluciona su pensamiento entre 1925 y 1927; lo que sí sabemos es que en enero de 1927 se producen tensas discusiones entre los dos físicos acerca del modo de interpretar el formalismo matemático recién creado por Schrödinger y por el propio Heisenberg independientemente. En febrero Bohr decide marcharse a Noruega para esquiar y descansar, mientras Heisenberg, nada descontento de poder pensar a solas, se queda en Copenhague. Cuando Bohr regresa de Noruega, uno y otro tienen importantes resultados que comunicarse: Heisenberg las relaciones de indeterminación, Bohr la idea de la complementariedad. Tras el malestar de éste último por entender que aquél no ha tomado la dualidad onda-corpúsculo como punto de partida, y gracias a la mediación de O. Klein, ambos se pondrán de acuerdo en considerar las relaciones de

11. BOHR, N.: «El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica», 1927, en: *TADN*, p. 103; «Philosophical Aspects of Atomic Theory». From the Bohr Manuscripts, 26-5-1930, en: *Essays and Papers*, pp. 135-136.

indeterminación como expresión de las relaciones generales de complementariedad¹².

Meses más tarde, concretamente en septiembre de 1927, Bohr da a conocer públicamente por primera vez sus ideas sobre la complementariedad en una conferencia de carácter eminentemente epistemológico pronunciada en el Congreso Internacional de Física, que tuvo lugar en Como (Italia) para conmemorar el centenario de la muerte de Volta, ante un auditorio compuesto por los principales físicos de la época, a excepción de Ehrenfest, Einstein y Schrödinger¹³. Un mes después tiene ocasión de volver a exponer sus puntos de vista epistemológicos en el famoso V Congreso Solvay de Bruselas, esta vez estando presentes los tres físicos mencionados; se inicia así el debate con Einstein que sólo finalizará con la muerte de éste¹⁴.

En el Congreso de Como, Bohr introduce los términos «complementario» o «complementariedad» en expresiones como «aspectos complementarios», «teoría de la complementariedad» o «descripciones complementarias» (en escritos posteriores utilizará otras expresiones diversas) para referirse tanto a la descripción causal en el espacio-tiempo como a la dualidad onda-corpúsculo, y ya no abandonará esta filosofía de la complementariedad a lo largo de sus más de 40 años de vida física e intelectual. Es verdad que nunca ofrece una definición de la complementariedad propiamente tal, pero sí diferentes caracterizaciones que permiten determinar cuáles son sus rasgos fundamentales.

Lo primero que hay que decir es que la complementariedad supone la combinación de dos o más elementos entre los que se da *relación de exclusión*, bien en sentido lógico, bien en sentido empírico. Los aspectos complementarios «representan aspectos de los fenómenos que se excluyen mutuamente, pero que son ambos necesarios para una descripción completa»¹⁵. Aquí no se trata de integrar diferentes puntos de vista, a modo de los diferentes ángulos desde los que se puede observar una estatua, pues las diferentes visiones de una estatua no son sólo complementarias sino com-

12. Ver: BLAEDEL, N.: *Harmony and Unity. The Life of Niels Bohr*. Madison, Wisconsin, Science Tech Publ. 1988, p. 116.

13. Esta conferencia, revisada, tras aparecer publicada en las revistas *Nature* y *Die Naturwissenschaften*, se integra en *TADN* con el título «El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica».

14. Las actas del Congreso de Bruselas no recogen la intervención de Bohr, pero disponemos de la narración retrospectiva que él mismo hizo de sus discusiones con Einstein en un artículo que escribió en 1949 titulado «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», como contribución a la obra *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, editada por P. A. Schilpp, Evanston, III: The Library of Living Philosophers, 1949, vol. 1.º, pp. 199-241. Posteriormente se incluyó en la obra *FACH*.

15. BOHR, N.: «H. Høffding's View on Physics and Psychology». From the Bohr Manuscripts, August, 1932, en: *Essays and Papers*, p. 201.

patibles, mientras que los estados de los sistemas cuánticos son incompatibles¹⁶. La complementariedad de la que aquí se trata, y en ello estriba su novedad, es la que se da entre elementos excluyentes o incompatibles.

Resulta así que la opción epistemológica de Bohr a partir de 1927 se decanta en favor de no tratar de eliminar la contradicción, reduciendo uno de los dos aspectos en litigio al otro. Conversaciones con Schrödinger en septiembre de 1926 en Copenhague, en las que éste buscaba el restablecimiento de la representación clásica de los sistemas en términos ondulatorios y, por tanto, desde la sola continuidad, le han convencido de la imposibilidad de que ninguno de los dos conceptos se diluya en favor del otro. No es posible prescindir ni de la noción de onda ni de la noción de corpúsculo. El conflicto lógico que representa servirse de tal representación dual no puede resolverse al modo aristotélico, o sea, por vía de eliminación de una de ellas y su simplificación a una imagen única¹⁷. Por el contrario, la posibilidad de agotar la información acerca de los sistemas físicos exige poder integrar resultados obtenidos en condiciones experimentales diferentes, que «no pueden incluirse en una imagen única, sino que han de considerarse *complementarias* en el sentido de que sólo la totalidad de los fenómenos agota la información posible sobre los objetos»¹⁸.

«Nur die Fülle führt zur Klarheit», reza el aforismo de Schiller que Bohr hace suyo. La claridad se alcanza desde la totalidad, pero por definición la totalidad no deja nada fuera; esto quiere decir que ha de abarcar lo lógicamente compatible y lo lógicamente incompatible. En este sentido es en el que dirá que *lo contradictorio es complementario*¹⁹. Una información

16. ROHRLICH, F.: *From Paradox to Reality*. Cambridge, Cambridge University Press, 1981, pp. 164-166.

17. Rosenfeld cuenta la siguiente anécdota: al preguntar al físico Yakawa si los científicos japoneses tenían la misma dificultad que sus colegas occidentales para asimilar la idea de complementariedad, éste le contestó: «No, la argumentación de Bohr siempre nos ha parecido casi evidente. En Japón no hemos sido corrompidos por Aristóteles». Rosenfeld caracteriza la contribución de Bohr a la filosofía como el redescubrimiento del proceso dialéctico de conocimiento, tanto tiempo oscurecido por el desarrollo unilateral de la epistemología sobre las bases de la lógica aristotélica y del idealismo platónico. ROSENFELD, L.: «Niels Bohr's contribution to Epistemology», *Physics Today*, 16, 1963, p. 47.

18. BOHR, N.: «Discussion with Einstein...», en: P. A. Schilpp (ed.): *Albert-Einstein: Philosopher-Scientist*, p. 210. Ver también: «La física y el problema de la vida», 1957, en: *FACH*, p. 24. «Conferencia en memoria de Rutherford», 1961, en: *Ensayos 1958-1962*, p. 44.

19. «Contraria sunt complementa» es el lema que Bohr hizo grabar en su escudo de armas, junto con el símbolo del Yin y del Yang, con motivo de la concesión de la Orden Danesa del Elefante en 1947 (distinción reservada normalmente para miembros de familias reales y presidentes de estados extranjeros). Ver: COURANT, R.: «Fifty Years of Friendship», en: S. ROZENTAL: *Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues*, Amsterdam, North-Holland Publ. Co. 1967, pp. 305. HOLTON, G.: «Los orígenes

completa y exhaustiva obliga a armonizar elementos que desbordan el marco del espacio lógico leibniziano. Sin llegar a ser un pensamiento dialéctico, puesto que aquí no hay propiamente un momento de síntesis, a lo que sí se está renunciando es a un criterio cartesiano de claridad que hace residir ésta en lo simple. La claridad ha de buscarse en lo complejo, pero ello no se obtiene por mera adición de lo simple sino por combinación de lo complejo.

Ahora bien, llegados a este punto pudiera parecer que la solución que Bohr ofrece es meramente nominal. Puesto que no se ve la forma de disolver las paradojas, se pasa a afirmar pura y llanamente que lo contradictorio es complementario, como si la magia de las palabras pudiera alterar los principios mismos de la lógica. En mi opinión, sin embargo, la objeción no sería pertinente pues entiendo que la validez del principio de contradicción no es puesta en entredicho. Muy al contrario, la filosofía de la complementariedad pretende ser un marco para la descripción y comprensión de fenómenos aparentemente paradójicos. Pero para que tal pretensión tenga sentido, ha de ir unida a afirmaciones importantes, tanto desde el punto de vista ontológico, como epistemológico. Mucho se ha escrito acerca de la noción de realidad que resulta compatible con esta nueva filosofía. Mi intención en las páginas que siguen no es analizar la vertiente metafísica de la cuestión, sino la meramente epistemológica. En concreto voy a referirme al *uso de los conceptos* en la teoría cuántica atendiendo a tres puntos que considero fundamentales:

1) *Aplicabilidad a los microfenómenos de los conceptos físicos clásicos*, adaptados en principio únicamente a los fenómenos de la experiencia ordinaria mesofísica.

2) *Limitación teórica y absoluta* de la aplicabilidad de los mencionados conceptos físicos clásicos, cuando se trata de describir fenómenos regidos por el cuanto de acción de Planck.

3) *Uso analógico* de los conceptos descriptivos clásicos en cuanto que, al aplicarse a objetos cuánticos, dejan de ser la representación visual («picture») de propiedades poseídas por objetos independientes de la observación, para convertirse en meros símbolos de las relaciones entre lo observado y los medios de observación.

Todo ello conducirá a su vez a la modificación de la noción de *objetividad*, de la que me ocuparé en el epígrafe siguiente.

Comencemos por el *punto primero*. En numerosísimas ocasiones Bohr insitirá en que es una característica irrenunciable del conocimiento científico la posibilidad de un *uso inequívoco* de los conceptos. «Inequívoco» (unambiguous) es aquello «bien definido», mientras que «equivoco» o

«ambiguo» («ambiguous») es aquello «mal definido»²⁰. Hablar del uso inequívoco de los conceptos se refiere a su aplicabilidad bien definida a los fenómenos. En la teoría clásica conceptos como espacio, tiempo, onda, partícula se emplean sin equivocidad en la medida en que su aplicación a los fenómenos mesofísicos de la experiencia ordinaria está bien definida. Pero no ocurre lo mismo en la teoría cuántica, como muestra el hecho de que no pueda decidirse sin ambigüedad si la luz y la materia son de naturaleza continua o discontinua. La razón de ello estriba en su interacción con los instrumentos de observación, pero como a su vez esta interacción es consecuencia del cuanto de acción, resulta que la posibilidad de un uso inequívoco de los conceptos fundamentales clásicos está determinada por la medida en que podamos prescindir, en la interpretación de los fenómenos, del elemento extraño a las teorías clásicas y simbolizado por el cuanto de acción²¹. En el orden de magnitudes medias el cuanto de acción es enteramente despreciable, pero en el ámbito de los microfenómenos es imprescindible. Luego, no cabe en principio una aplicación bien definida de los conceptos clásicos a los sistemas físicos cuánticos. No es de extrañar que surjan paradojas en su descripción, consecuencia de la equivocidad con que se usan los conceptos; para eliminar tal equivocidad sería preciso poder garantizar «que el comportamiento de los cuerpos a investigar es independiente de la presencia de los aparatos de medida»²², cosa que no es posible.

Puestas así las cosas hay que plantearse las dos opciones mencionadas al final del epígrafe anterior: o bien prescindir de los conceptos clásicos y tratar de sustituirlos por otros nuevos, o bien mantener la aplicabilidad de esos conceptos clásicos a los microfenómenos. Pero en este último caso ha de estipularse la forma de garantizar su uso inequívoco en una teoría no clásica como es la teoría cuántica.

Bohr se pronuncia decididamente en favor del mantenimiento de los conceptos clásicos. «Es preciso reconocer que, *por más que los fenómenos [cuánticos] trasciendan el ámbito de explicación de la física clásica, la descripción de toda evidencia debe expresarse en términos clásicos*. La razón es simplemente que con la palabra «experimento» nos referimos a una situación en la que podemos decir a otros lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido, y que así la descripción del dispositivo experimental y de los resultados de las observaciones debe expresarse en un lenguaje inequívoco, aplicando adecuadamente la terminología de la física clásica»²³.

20. Murdoch señala que «unambiguous» es el término inglés que corresponde al término danés «entydig», que literalmente quiere decir «significar una cosa inequívocamente». MURDOCH, D.: *op. cit.*, 45.

21. BOHR, N.: *TADN*, Introducción, 1929, p. 64.

22. BOHR, N.: «Space-Time Coordination and Conservation Principles». From the Bohr Manuscripts, 16-11-1930, 20-2-1931, en: *Essays and Papers*, p. 151.

23. BOHR, N.: «Discussion with Einstein...». En: P. A. Schilpp (ed.): *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, p. 209. Ver también: «Física y culturas humanas», 1938, en: *FACH*,

Son las exigencias de la *comunicación* las que llevan al físico danés a tomar partido por los conceptos clásicos pese a los problemas que ha suscitado su uso cuando se aplican a los fenómenos cuánticos. La física es una ciencia experimental y, como tal, es parte fundamental de ella la posibilidad, tanto de diseñar experimentos, como de comprobar sus resultados y hacerlos comunicables. Y el supuesto que Bohr maneja es que los criterios de construcción de aparatos, los registros experimentales de aparatos macroscópicos, los modos de comprobación de los resultados y su divulgación entre la comunidad científica han de expresarse en términos clásicos. Weizsäcker resume la situación así: la física clásica es sustituida por la física cuántica; pero la física cuántica se verifica mediante los experimentos; y los experimentos se describen en términos clásicos²⁴. Luego, según esto, la física cuántica precisa de los términos clásicos.

La verdad es que se trata de una tesis discutible, aunque desde luego no descabellada. Pero hay que dejar claro que no puede asimilarse a posiciones de corte kantiano, como hacen Murdoch o Hooker, por ejemplo²⁵. Entre el papel que juegan los conceptos del lenguaje ordinario en Bohr y el que desempeñan las categorías en la filosofía de Kant hay una gran diferencia, pues aquí no se defiende el carácter necesario de los conceptos a priori en orden a la constitución de la experiencia sino la imposibilidad de prescindir de ciertos conceptos para *comunicar* la experiencia. Es cierto que Bohr emplea la denominación de origen kantiano «formas de intuición» para referirse a esos conceptos clásicos, pero la expresión está utilizada de forma no rigurosa al abarcar tanto el espacio y el tiempo como la causa. La confusión entre intuiciones y conceptos muestra la no pertinencia de establecer toda comparación que vaya más allá de la coincidencia en los nombres (por otro lado parece que esta expresión está tomada de su profesor de filosofía Höffding y no del propio Kant, al que muy probablemente nunca leyó).

A mi entender, lo que está en juego en el planteamiento de Bohr es si la física es algo más que un lenguaje formal no interpretado, si ha de proporcionar algún tipo de representación acerca del comportamiento de los sistemas físicos, en definitiva, si ha de establecerse un puente entre el esquema formal matemático y la descripción de la naturaleza. Sólo si las res-

p. 32; «Causality and Complementarity», *Philosophy of Science*, 4, 1937, p. 293; «Hitchcock Lectures». From the Raymond Birge Collection. Lecture 6, 24-3-1937. *Essays and Papers*, p. 342; «Conferencia en memoria de Rutherford», 1961, en: *Ensayos 1958-1962*, p. 73.

24. WEIZSÄCKER, C. F. von: «Niels Bohr and Complementarity: the place of the classical language», en: T. Bastin (ed.): *Quantum Theory and Beyond*. Cambridge Univ. Press, 1971, p. 26.

25. HOOKER, Cl. A.: «The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein versus Bohr», en: R. G. COLODNY: *Paradigms and Paradoxes*, Pittsburgh, University of Pittsburgh, 1972, pp. 134-135; MURDOCH, D.: *op. cit.*, pp. 229-230.

puestas a estos interrogantes son afirmativas, entonces los conceptos clásicos cumplen una función indispensable a fin de poder representar (lo que no quiere decir visualizar) y transmitir los acontecimientos físicos que se revelan en los resultados de observaciones y experimentos. Esta concepción de la ciencia es defendible y deseable si se pretende, no sólo predecir sino describir, pero no es ni necesaria ni la única posible. En consecuencia creo que el uso de los conceptos clásicos es meramente conveniente, pero no estrictamente necesario, debiendo relativizarse el sentido de los numerosos textos en los que Bohr afirma esta necesidad.

Ahora bien, poco hemos ganado con el empleo de los conceptos clásicos a fin de poder dar cuenta de los resultados experimentales, si éstos son usados con tal ambigüedad que no sirven para proporcionar una descripción inequívoca de los fenómenos y suscitan desconcertantes paradojas. Esto es lo que sucede cuando se aplican a un ámbito de experiencia en el que no es posible desprestigiar la interacción entre los objetos a observar y los instrumentos de observación, lo cual nos conduce al segundo punto: *la limitación teórica* y no meramente práctica *del ámbito de aplicación de los conceptos clásicos*, cuando se introduce el cuanto de acción.

Dado el carácter empírico del hallazgo del cuanto de acción, el análisis de la aplicabilidad de los conceptos es igualmente empírico y exige el examen de las condiciones experimentales para determinar qué descripción clásica del experimento puede hacerse en cada caso. Según se ha visto, la utilización de aparatos de medida para determinar la localización espacio-temporal no permite definir el estado dinámico del sistema y viceversa; asimismo, resultados experimentales distintos exigen una interpretación corpuscular en unos casos y ondulatorios en otros del mismo objeto. Ahora se nos dice que esos aspectos incompatibles son complementarios. En mecánica clásica, todos los observables son compatibles y, por tanto, una descripción completa es aquella que determina todos los observables con precisión de modo que da cuenta simultáneamente de todas las propiedades físicas. Pero en mecánica cuántica una descripción completa así entendida incurriría en contradicción. Con absoluta precisión y sin límite alguno en la medición sólo cabe definir un sistema físico cuántico en base a todos los observables compatibles, pero sólo a ellos²⁶. Sin embargo, los observables incompatibles son los complementarios y, en consecuencia, también ellos son necesarios para una descripción completa del sistema. Pues bien, esta descripción completa en términos complementarios únicamente podrá llevarse a cabo, y esto es lo fundamental, si se establece un *límite a la posibilidad de medida exacta de observables incompatibles*. Los conceptos clásicos sólo pueden mantenerse si se limita su aplicabilidad simultánea a un mismo sistema físico. Descripciones clásicas mutuamente excluyentes no pueden darse a la vez con igual grado de precisión. Será la

26. ROHRLICH, F.: *op. cit.*, p. 146.

propia situación experimental con la inherente interacción objeto-aparato, la que determine la pertinencia de una u otra.

En este punto van a confluir dos trabajos elaborados independientemente: la complementariedad de Bohr y las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Tras dos meses de discusiones, el primero convence al segundo para que considere sus relaciones de indeterminación como la concreción cuantitativa del planteamiento más general de la complementariedad. En efecto, pueden considerarse (aunque no sea éste el camino que ha llevado a Heisenberg a su formulación) como la expresión matemática que define el ámbito al que se aplican nociones complementarias de modo simultáneo. Como dirá Jammer²⁷, contienen el precio que hay que pagar por la aplicación a la descripción de los fenómenos físicos de pares de conceptos que son excluyentes, e incluso contradictorios. Pero también son la confirmación en términos cuantitativos de que es posible evitar la contradicción. La esencia del principio de Heisenberg consiste precisamente en que ninguna situación física puede exhibir simultánea y rigurosamente aspectos complementarios de los fenómenos que son compatibles en física clásica, pero mutuamente incompatibles en física cuántica. La contradicción se evita si y sólo si el uso de los términos clásicos está limitado de modo que nunca sea posible alcanzar el modo clásico de descripción completa. Las relaciones de Heisenberg son pues la expresión matemática de los *límites de la observabilidad* que hay que admitir, tras el descubrimiento del cuanto de acción, a fin de asegurar la compatibilidad entre conceptos clásicos lógicos o experimentalmente incompatibles. Concretamente esta limitación se traduce en la indeterminación que afecta a la medida de magnitudes mecánicas canónicamente conjugadas. Como manifestación de esta incompatibilidad existente entre observables cuánticos, los operadores que los representan (p y q) no conmutan. Ello conduce a las desigualdades de Heisenberg, en las que el producto de las indeterminaciones con las que es posible medir simultáneamente p y q , no puede ser menor que el cuanto de acción de Planck.

Lo principal aquí es destacar que la limitación en la medida de las magnitudes canónicamente conjugadas no es cuestión del tipo de experimentos en el que se lleven a cabo las operaciones de medida, de modo que pudiera diseñarse alguno en el que fuera posible superar dicha limitación, sino que se trata de un *límite absoluto* impuesto por la naturaleza misma²⁸.

27. JAMMER, M.: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York, Tomas Publishers, 1989, 2.ª ed., p. 363; JAMMER, M.: *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York, John Wiley and Sons, 1974, p. 101.

28. BOHR, N.: «Space-Time Coordination and Conservation Principles», en: *Essays and Papers*, p. 149; ver también: «El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza», 1929, en: *TADN*, pp. 135-136; «La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza», 1929, en: *TADN*, p. 152.

El uso de conceptos clásicos para describir y comunicar de forma inequívoca el resultado de montajes experimentales mutuamente excluyentes lleva a esta restricción teórica a la validez de su aplicación. La contradicción se diluye en la complementariedad, pero a costa de establecer límites teóricos insuperables en la descripción de la naturaleza, límites que por cierto no han surgido de ningún análisis de nuestra facultad de conocimiento sino del modo como los diferentes elementos de la realidad natural interactúan unos con otros.

Ahora bien, la existencia de estas restricciones en la aplicabilidad de los conceptos clásicos a los acontecimientos cuánticos plantea el tipo de relaciones que aquéllos y éstos mantienen entre sí. Puesto que es posible utilizar conceptos lógicos o experimentalmente incompatibles para referirse a un mismo sistema cuántico, no pueden entenderse como representaciones visuales («pictures») de propiedades poseídas por objetos reales independientes, so pena de trasladar a las cosas mismas la contradicción tan laboriosamente evitada a nivel de su descripción. Abordamos así el *tercer punto* referente al uso analógico de los conceptos clásicos en la nueva física.

La teoría clásica se sirve de conceptos tales como posición, momento, tiempo, energía que corresponden directamente a propiedades de entidades substanciales, con valor definido antes, durante y después de la medida. El supuesto presente en este modo de explicación es que esos conceptos son representaciones de propiedades imaginadas, que nos permiten visualizar el comportamiento autónomo de los objetos poseedores de tales propiedades fenoménicas. Sin embargo, el modo complementario de descripción no permite tal supuesto. No es posible visualizar los sistemas atómicos como poseyendo unas veces valor definido la posición y otras el momento, unas veces el tiempo y otras la energía; o también unas veces siendo ondas y otras partículas. Los conceptos no son representaciones del mundo sino meras *abstracciones* o *símbolos* con los cuales describir no visualmente acontecimientos. Pero tales acontecimientos no pueden apprehenderse al margen de nuestros medios de observación. Puesto que es irreductible la interacción entre el sistema a observar y los aparatos, toda referencia al mundo supone esta interacción, con lo cual mediatiza cuanto podamos llegar a saber de él. De ahí la modificación que ha de sufrir el concepto de *fenómeno*: ahora se referirá no sólo a los efectos observados sino a las propias condiciones en que se observan, incluyendo el dispositivo experimental²⁹.

Así pues, los conceptos se refieren a fenómenos, y puesto que esta referencia no puede hacerse independientemente de las condiciones de observación, su uso es meramente analógico por relación al modo como

29. BOHR, N.: «Discussion with Einstein...», en: P. A. Schilpp (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, p. 238; «Unidad del Conocimiento», 1954, en: *FACH*, p. 90.

en la física clásica se utilizan para hablar de propiedades de objetos independientes³⁰. En resumen, la naturaleza del micromundo se describe con conceptos del macromundo, pero esa descripción exige la renuncia a toda representación en términos de *objetos con propiedades*, tan familiar, no sólo a la física precuántica sino a la experiencia ordinaria. Nos hallamos en una situación en la que, por una lado, precisamos de los conceptos habituales para dar cuenta del acontecer físico tal como se manifiesta en los resultados de los experimentos, y en la que, por otro lado, ello suscita desconcertantes paradojas consecuencia de su aplicación a objetos reales independientes. Para evitar dichas paradojas han de limitarse al resultado de la interacción observador-observado, lo cual se traduce en un doble precio a pagar por ello: a) imposibilidad de una descripción completa al estilo clásico, de modo que puedan determinarse simultáneamente con precisión todos los observables del sistema; b) imposibilidad asimismo de representarnos el mundo en términos de entidades substanciales soporte de propiedades fenoménicas susceptibles de ser aprehendidas mediante procesos de observación y medida, lo cual nos impide tener un conocimiento mediato (a través de estas propiedades fenoménicas) de la realidad natural tal como es en sí. Seguiremos hablando de objetos localizados en el espacio y en el tiempo, en un estado dinámico definido por su cantidad de movimiento o su energía, pero ello constituirá una forma de hablar meramente analógica por relación al mundo clásico, porque ya no estamos en condiciones ni de referirnos a objetos propiamente tales, o sea independientes del sujeto y de sus operaciones, ni de atribuirles propiedades al margen de las circunstancias en que son observados y medidos.

No cabe duda que todo ello ha de originar polémicas en torno a como deba entenderse la noción de *realidad* (polémicas que no me he propuesto abordar en este artículo), así como el replanteamiento de otra noción estrechamente ligada a ella, la de *objetividad*. En el marco clásico la condición necesaria de la descripción objetiva de la naturaleza era justamente la posibilidad de representar las propiedades de objetos reales independientes de toda interacción con el observador. Ahora, sin embargo, al no poderse definir la objetividad por referencia a esa hipotética realidad, será necesario una profunda revisión de la cuestión.

6. La doctrina del actor-espectador

El pensamiento físico clásico ha estado presidido por un ideal descriptivo que, en el epígrafe primero, he caracterizado como la «doctrina del espectador». Y en este sentido es clásica toda la física en la que no interviene el cuanto de acción, de modo que abarca también la teoría de la relatividad.

30. Ver HONNER, J.: *The Description of Nature. Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics*. Oxford. Clarendon Press, 1987, pp. 153-160; FOLSE, H.: *op. cit.*, pp. 154-161.

dad. El supuesto fundamental en el que se basaba este ideal descriptivo era la posibilidad de observar los sistemas físicos sin interferr con ellos, lo que daba sentido a la noción de existencia independiente de los objetos a observar, con un comportamiento autónomo en el espacio y en el tiempo.

En este contexto la descripción objetiva de la naturaleza no podía significar sino la descripción de las propiedades de los objetos tal como son. Desde luego, no han faltado críticas filosóficas como las de Hume o Kant que, desde distintos puntos de vista, pusieran de manifiesto las dificultades de tal planteamiento; pero también es cierto que tales críticas no modificaron los supuestos epistemológicos y ontológicos de corte realista en los que se basaba la mecánica clásica. Considero que hay que esperar al siglo XX para que una empresa filosófica como la de Kant adquiera todo su sentido en relación con la ciencia natural, y sin que ello quiera decir que la epistemología de la física de este siglo sea «kantiana» en la acepción escolástica del término.

El hecho es que el postulado cuántico ha comprometido seriamente la posibilidad de atribuir *realidad independiente* tanto al fenómeno a observar como a los propios instrumentos de observación al ligarlos indivisiblemente de modo tal, que la sola pretensión de controlar ese vínculo produce un fenómeno nuevo, tan inseparable como el anterior de las condiciones en que es aprehendido.

«En realidad —nos dice Bohr al respecto— ha sido el descubrimiento del cuanto de acción el que nos ha enseñado que la física clásica tiene un rango de validez limitado, enfrentándonos a la vez a una situación sin precedentes en la física al plantear bajo una nueva forma el viejo *problema filosófico de la existencia objetiva de los fenómenos con independencia de nuestras observaciones* (...). El límite que la naturaleza misma nos ha impuesto respecto a la posibilidad de hablar de los fenómenos como algo que existe objetivamente encuentra su expresión en la formulación de la mecánica cuántica»³¹.

Efectivamente se trata de un problema viejo en filosofía y nuevo en física. Existen límites con respecto al conocimiento de la naturaleza, algo que no está presente en la ciencia de la época de Kant, pero esos límites no derivan del modo como los sujetos conocen sino del tipo de relaciones que mantienen los objetos cuánticos entre sí. El postulado cuántico es un postulado empírico que se nos ha impuesto en la investigación de los microfenómenos, y no un principio lógico; por tanto, carece de necesidad (es claro que los cambios de estado podrían producirse de modo continuo). Y, sin embargo, es ineludible en el horizonte científico del siglo XX. Por ello las consecuencias epistemológicas que de él derivan son de la máxima importancia, no sólo para la física, que pasa por ser la ciencia mejor construida, sino para el conocimiento científico en general.

31. BOHR, N.: «La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza», 1929, en: *TADN*, p. 153. (El subrayado no figura en el original).

Concretamente es imprescindible analizar a qué puede denominarse *descripción objetiva de la naturaleza* en el contexto de la nueva física, si la naturaleza, en tanto que conjunto de fenómenos, no puede definirse con independencia del sujeto observador. Ya no es posible la vieja aspiración de correspondencia entre los conceptos físicos y los objetos reales independientes.

En relación con este tema Bohr va a hacer una propuesta que merece tomarse en consideración: la objetividad se define como «comunicación sin ambigüedad»³². La física es objetiva si proporciona información inequívoca, lo que a su vez exige el uso de conceptos bien definidos. Y puesto que la filosofía de la complementariedad delimita el ámbito en el que los conceptos clásicos pueden estar bien definidos, esta filosofía se presenta como el *marco conceptual teórico* en el que es posible obtener descripciones objetivas tras la introducción del postulado cuántico³³.

El supuesto que Bohr está poniendo en juego es que todo conocimiento se presenta en un marco conceptual entendiendo por tal «la representación lógica no ambigua de relaciones entre hechos de experiencia»³⁴. Ello implica que para establecer el uso inequívoco de los conceptos hay que atender no sólo ni fundamentalmente al ámbito de los fenómenos —ahora restringido— al que se aplican, sino al tipo de relaciones lógicas que unen a esos conceptos entre sí y que permiten una experiencia ordenada. Puede hablarse así de una investigación acerca de las condiciones de posibilidad del conocimiento empírico, o mejor, acerca de las condiciones de posibilidad de la comunicación inequívoca. Hay quien ha hablado incluso de una «filosofía trascendental de Bohr»³⁵, lo cual es excesivo si se tiene en cuenta que no se trata de un único marco formal universal y necesario, sino de un marco siempre revisable en función de la progresiva inclusión de nuevos fenómenos en el ámbito de la ciencia. Pese a que su elaboración sea obra del científico, es la naturaleza la que en cierto modo determina el más adecuado, pudiendo llegar a obligar a la modificación de otro anterior bien establecido. Esto es justamente lo que ha sucedido con la incorporación de los microfenómenos, que ha llevado a la *generalización del marco conceptual clásico* en el nuevo marco de la complementariedad³⁶.

Así pues la objetividad se ha definido como comunicación sin ambigüedad, en base al uso de conceptos bien definidos. Lo que hace de la ciencia algo más que la narración subjetiva de experiencias es el carácter comunicable y comprensible de su contenido sin equivocidad por todo sujeto.

32. BOHR, N.: «Unidad del Conocimiento», 1954, en: *FACH*, p. 83.

33. Este es el enfoque que preside la sugerente obra de H. J. FOLSE, ya citada. Ver especialmente el capítulo 1.º.

34. BOHR, N.: «Unidad del Conocimiento», 1954, en: *FACH*, p. 84.

35. HONNER, J.: *op. cit.*, cap. 3.º.

36. BOHR, N.: «El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica», 1927, en: *TADN*, p. 102; «Biología y Física atómica», 1937, en: *FACH*, p. 20.

Una observación es objetiva cuando coincide con las condiciones de posibilidad de la comunicación inequívoca, condiciones que vienen dadas por el marco formal en el que se estipulan las relaciones que vinculan a los términos entre sí. Esas condiciones hacen, por tanto, referencia a los sujetos y a sus herramientas lingüísticas, y no a los objetos independientes de toda interacción con ellos.

La objetividad y la validez universal se definen desde el lenguaje. Nada más elocuente al respecto que las palabras que Aage Petersen, antiguo colaborador de Bohr en Copenhague, pone en boca de éste: «Es equivocado pensar que la tarea de la física es hallar *cómo es la naturaleza*. La física se refiere a lo que *podemos decir acerca de la naturaleza*»³⁷. O sea, lo que interesa no es la naturaleza, sino lo que podemos llegar a formular sobre ella, y esto exige atender a las condiciones de quien se interroga, indivisiblemente unidas a las del objeto por el que se interroga.

En definitiva el desarrollo de la física a partir de 1900 ha supuesto una verdadera conmoción en el orden epistemológico, parcialmente semejante a la revolución copernicana que Kant pensaba estar llevando a cabo en la metafísica al suponer que no es nuestro conocimiento el que debe regirse por los objetos sino los objetos los que deben conformarse a nuestro conocimiento. Por supuesto, con ello renunciaba a dar cuenta de las cosas en sí, pero al mismo tiempo fundaba el conocimiento objetivo del mundo fenoménico. También ahora se renuncia a explicar el comportamiento independiente de los sistemas físicos en el espacio y en el tiempo, ante la radical imposibilidad de prescindir del proceso mismo de observación. La física no se refiere a un mundo en sí sino a un mundo observado, o sea a un mundo que no puede ser caracterizado al margen de los sujetos observadores. El antiguo ideal del espectador que contempla la naturaleza sin interferir en ella ya no es viable; al contemplarla en cierto modo se contempla a sí mismo, puesto que en lo visto han de incluirse las condiciones mismas del acto de ver. Bohr lo expresa con estas poéticas palabras:

«La nueva situación que se presenta en la física nos recuerda la antigua verdad [de Buda y Lao-Tsé] de que en el drama de la existencia somos a la vez actores y espectadores»³⁸.

El científico es espectador y actor. Lo que he denominado «la doctrina del actor-espectador», tomando prestadas las anteriores palabras de Bohr, ha sustituido a la doctrina clásica del espectador. Toda ciencia es obra humana, y como tal el hombre siempre deja en ella su impronta. Pero esto no significa subjetivizar el conocimiento sino sólo «humanizar» en cierto

37. PETERSEN, A.: «The Philosophy of Niels Bohr», en: A. P. French, P. J. Kennedy (eds.): *Niels Bohr, A Centenary Volume*. Cambridge Mass., Harvard University Press, 1985, p. 305.

38. BOHR, N.: «La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la Naturaleza», 1929, en: *TADN*, p. 156.

sentido los criterios de objetividad. La filosofía de la complementariedad constituye un intento en esta dirección, bien es verdad que forzado por las circunstancias empíricas. En todo caso constituye una expresión más, no la única, de una profunda verdad: no hay ciencia del objeto que pueda desentenderse del sujeto. La virtud de la física cuántica, desde el punto de vista epistemológico, es haber puesto de manifiesto que a esta conclusión puede accederse, no sólo desde la reflexión especulativa, sino desde la propia evidencia experimental.

Obras de N. Bohr citadas con abreviaturas

Atomic Theory and the Description of Nature

Cambridge, Cambridge University Press, 1934.

Citada en la edición castellana: *La Teoría Atómica y la Descripción de la Naturaleza*. Editada por M. Ferrero Melgar. Madrid, Alianza Editorial, 1988 (abreviatura: TADN).

Atomic Physics and Human Knowledge

New York, John Wiley and Sons, 1958.

Citada en la edición castellana: *Física Atómica y Conocimiento Humano*. Traducción de A. Yusta. Madrid, Aguilar 1964 (abreviatura: FACH).

Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge

New York, John Wiley and Sons, 1963.

Citada en la edición castellana: *Nuevos Ensayos sobre Física Atómica y Conocimiento Humano (1958-1962)*. Traducción de C. Rodríguez. Madrid, Aguilar 1970 (abreviatura: *Ensayos 1958-1962*).

Essays and Papers. En el caso de esta obra hay que señalar que se trata de una recopilación de material de Bohr sobre cuestiones epistemológicas hecho por J. T. SANDERS (New York, 1987), que está simplemente escrito a máquina y que no ha sido publicado. Abarca desde escritos terminados y publicados a simples borradores manuscritos, que en parte se encuentran en las obras completas de Bohr (*Collected Works*, ed. by L. Rosenfeld, Amsterdam, North-Holland Pu. Co. 1972, 7 vols.) o en forma de microfilm en el archivo creado por Kuhn, que incluye la colección de manuscritos de Bohr (*Bohr Manuscript Collection*, in the microfilm archive *Sources for the History of Quantum Physics*, T. S. Kuhn et al. (eds.), 1967).