

EL MODO COMPLEMENTARIO DE DESCRIPCION

Jairo Roldán Ch.
Profesor Departamento de Física

RESUMEN

El modo complementario de descripción o complementariedad fue propuesto por Bohr para dar solución a la llamada paradoja cuántica. Una de las críticas más fuertes que se han hecho a Bohr es no haber dado una definición precisa de la complementariedad. En el presente artículo se propone una tal definición y se muestra en qué sentido debe aceptarse la complementariedad como una solución de la paradoja cuántica.

ABSTRACT

Complementarity was proposed by Bohr as a solution to the so-called quantum paradox. Bohr was strongly criticized for not having done a precise definition of complementarity. In this article a precise definition of complementarity is given together with an explanation of the sense in which it can be considered as a solution to the quantum paradox.

INTRODUCCION

Si se quiere ubicar correctamente la idea de complementariedad en el contexto del pensamiento de Bohr es necesario tener en cuenta sus ideas acerca de la ciencia y el papel que en esta última juega el lenguaje común.

Según Bohr¹, la ciencia tiene como objetivo el ordenamiento y el aumento de la experiencia humana comunicable sin ambigüedad. Sólo cuando la experiencia puede comunicarse sin ambigüedad, sin referencia explícita a un observador individual, puede decirse que es objetiva. Un científico realista como Einstein aceptará la anterior caracterización de la ciencia en tanto que metodología a través de la cual se puede llegar a conocer la realidad en sí. Para Bohr, en cambio, la meta **exclusiva** de la ciencia es el conocimiento no de la naturaleza sino de aquello que podemos decir sobre la naturaleza. A pesar de que una primera mirada daría como conclusión que la tesis de Bohr se reduce finalmente a un puro positivismo, un análisis más profundo de todo el pensamiento de Bohr permite encontrar varios puntos de demarcación entre él y los positivistas².

Para Bohr la ciencia es entonces básicamente un asunto de comunicación, de allí la importancia que da al estudio cuidadoso de las condiciones que permiten el uso sin ambigüedad de los conceptos. Un lenguaje que pueda usarse sin ambigüedad es fundamental en la concepción bohriana de la ciencia.

¿Cuál es según Bohr ese lenguaje? Bohr sostiene que el **único** lenguaje que es susceptible de emplearse sin ambigüedad es el lenguaje común suficientemente refinado. Los elementos del lenguaje corriente necesarios, según él, para dar cuenta de toda experiencia física objetiva son: la **localización espacio-temporal** y la **causalidad** entendida como **determinismo**.

Hay que aclarar que Bohr acepta que el lenguaje común tal como se presenta está lleno de ambigüedades. Su tesis es que tal lenguaje puede llegar a usarse sin ambigüedad si se determinan sin equívoco las circunstancias que permiten el uso de cada concepto.

Su tesis del lenguaje común como el **único** que puede llegar a utilizarse sin ambigüedad; tesis que hemos denominado la **unicidad del lenguaje común**; ³confrontada con su análisis de las regularidades cuánticas, según el cual tales regularidades no pueden explicarse por medio del lenguaje común, da lugar a la llamada paradoja cuántica fundamental

No repetiremos aquí el conocido dilema de la dualidad onda-partícula que no puede explicarse por medio de la física clásica y que es uno de los hechos que llevan a Bohr a convencerse de la imposibilidad de explicar la existencia del quantum de acción h en base al lenguaje clásico. Más bien haremos mención de otro argumento presentado por Bohr acerca de la imposibilidad mencionada y que es la estabilidad misma de la materia.

Bohr observa que la estabilidad de un átomo es de un tipo totalmente diferente a la de un sistema clásico como el sistema solar puesto que, a pesar de que este último muestra un alto grado de armonía y estabilidad, nada impide que, en principio, su movimiento se altere total y permanentemente por la acción de una fuerza exterior apropiada. En cambio, para explicar las propiedades físicas y químicas de los elementos, se precisa una estabilidad de los átomos tal que el estado original del sistema se recupere completamente y por sí mismo después de la acción de una fuerza exterior.

Por otra parte, añade Bohr, es el quantum de acción h lo que finalmente explica la estabilidad de la materia, estabilidad sobre la cual se basa de manera esencial la descripción mecánica de todo fenómeno natural.

En conclusión, según Bohr, el quantum de acción es algo que no puede explicarse con el lenguaje clásico, y como ese lenguaje, que es sólo un refinamiento del lenguaje común, es el único que poseemos y que poseeremos siempre, debemos aceptar el quantum de acción como algo que ni se explica ni requiere explicación.

Una vez aceptada sin explicación la existencia de h , es necesario encontrar y analizar las consecuencias que se derivan de tal aceptación. Entre ellas están: el carácter de **totalidad** de los procesos atómicos y la **indivisibilidad** del objeto y el instrumento de observación.

Según Bohr, la existencia de h confiere a los procesos atómicos un carácter de totalidad que se manifiesta por el hecho de que toda subdivisión del fenómeno exigirá una modificación del dispositivo experimental, que producirá nuevos efectos y que será incompatible con la definición del fenómeno que se estudia. El conocido fenómeno de interferencia de electrones ilustra este carácter de totalidad: si un haz de electrones pasa por dos rendijas y llega luego a una pantalla, se obtienen las conocidas franjas de interferencia. Si queremos subdividir el fenómeno y conocer por cuál rendija pasa cada electrón y añadimos un dispositivo que nos permita saberlo, se destruyen entonces las figuras de interferencia. El nuevo aparataje experimental será incompatible con la definición del fenómeno de interferencia.

De hechos como el anterior se deduce que es imposible ahora mantener la separación estricta, que existe en la concepción mecánico-clásica de la naturaleza, entre el objeto observado y el instrumento de observación. Existe entonces una indivisibilidad entre ambos. Todo fenómeno cuántico depende del dispositivo experimental: Un arreglo adecuado para observar las franjas de interferencia no permite decidir por cuál rendija pasan los electrones y, recíprocamente, un dispositivo mediante el cual es posible observar por cuál rendija pasan los electrones impide la aparición de las franjas de interferencia. La

existencia de h no permite definir con precisión, en un fenómeno cuántico, la interacción entre el objeto y el aparato de observación.

Para Bohr, todo el lenguaje corriente se hace inadecuado para dar cuenta de las regularidades cuánticas. De hecho, aún la misma palabra objeto se hace ambigua si se la usa para explicar un fenómeno cuántico. Y, en general, toda atribución de cualidades físicas habituales a los objetos atómicos es ambigua. Se debe hablar ahora de la totalidad del fenómeno cuántico, incluido el instrumento de medida.

Ahora bien, si el lenguaje corriente es el único que permite la no-ambigüedad o sea la objetividad, y tal lenguaje se vuelve ambiguo si se lo usa para explicar las regularidades cuánticas, entonces: ¿Cómo podemos referirnos sin ambigüedad a un fenómeno cuántico?

Para resolver la paradoja anterior, Bohr propone una nueva manera de emplear el lenguaje común: el modo complementario de descripción o complementariedad.

El modo complementario de descripción es una nueva relación lógica entre los conceptos del lenguaje corriente. Bohr lo propone como un desarrollo racional del lenguaje común, como una manera de amplificar el marco conceptual de modo que sea posible expresar experiencias que están fuera del campo de validez del lenguaje corriente, sin que haya necesidad de abandonar este último.

EL MODO COMPLEMENTARIO DE DESCRIPCION

Una de las críticas más fuertes que se han hecho a Bohr es la de no haber dado en sus escritos una definición precisa de la complementariedad. El mismo Einstein confesaba que, a pesar de muchos esfuerzos, no había logrado llegar a una formulación precisa de ella⁴. Si se analizan los presupuestos filosóficos de Einstein, diametralmente opuestos a los de Bohr, se puede entender la situación anterior, puesto que sólo es posible comprender el modo complementario de descripción si se parte de los presupuestos básicos de Bohr. A esto se añade el hecho de que Bohr nunca expresó esos presupuestos de manera manifiestamente coherente ni completa en sus escritos.

Nosotros proponemos como una definición precisa de la complementariedad las siguientes proposiciones.

El uso de los conceptos

El uso de un concepto se define únicamente por medio de una experiencia concreta. Definir el uso de un concepto quiere decir preguntarse si es posible o no utilizarlo en la experiencia en cuestión.

Un haz de electrones que pasa por dos rendijas y que luego llega a una pantalla donde se forma un patrón de interferencia, es un ejemplo de una experiencia que define el uso de la palabra **onda**. Por el contrario, si se añade un dispositivo para conocer por donde pasa cada electrón, la experiencia permite el uso del concepto de **partícula**, pero no del de onda pues desaparece la interferencia.

Una experiencia para medir con **precisión** la posición de un **electrón** permite el uso de ese concepto de posición pero, como es imposible conocer con tal experiencia el momento, ella no permite el uso de este último concepto. De igual modo, una experiencia para medir con **precisión** el momento del **electron** permite el uso de ese concepto pero no del de posición. Si pudiéramos combinar en una sola experiencia los dispositivos para medir con **precisión** el momento y la posición del electrón, podríamos utilizar ambos conceptos a la vez.

Es el caso con una partícula clásica pues, en principio, es posible tener un mismo dispositivo experimental para medir a la vez, con precisión, su posición y su momento.

Conceptos mutuamente excluyentes

Dos conceptos son mutuamente excluyentes si no existe ninguna posibilidad de definir su uso por medio de una sola experiencia. No es posible combinar en una sola imagen conceptual dos conceptos mutuamente excluyentes.

Así, los conceptos de onda y partícula son mutuamente excluyentes. Igual lo son los de posición y momento **precisos** para un **electrón**; por ello no pueden combinarse en una sola imagen mental: la de trayectoria. En cambio, sí pueden combinarse cuando se trata de un objeto clásico.

Conceptos complementarios

Dos conceptos son complementarios si son mutuamente excluyentes pero ambos necesarios para agotar toda la información precisa sobre un objeto.

De nuevo, los conceptos de onda y de partícula, y los de posición y momento **precisos**, son conceptos complementarios respecto al **electrón**.

Experiencias o fenómenos complementarios

Experiencias o fenómenos complementarios son aquellos por medio de los cuales se definen los conceptos complementarios.

Variables complementarias

Son aquellas variables mediante las cuales se representan los conceptos complementarios.

Descripciones complementarias

Son descripciones hechas con conceptos complementarios.

El modo normal de descripción

Es la manera como se utiliza el lenguaje común en la vida ordinaria.

El modo complementario de descripción o complementariedad

Es la manera de utilizar el lenguaje corriente por medio de conceptos complementarios.

Hay que recalcar que lo que decide, en el modo complementario de descripción, si es posible o no de combinar dos conceptos en una sola imagen conceptual, son las experiencias por medio de las cuales uno define el uso de los conceptos en cuestión, y la existencia o no de la posibilidad de combinar en uno solo los dispositivos de medida correspondientes.

Todas las variables sometidas a una relación de incertidumbre corresponden a conceptos complementarios. En cambio hay conceptos complementarios, tales como los de onda y partícula, que no se manifiestan bajo la forma de relaciones de incertidumbre.

LA COMPLEMENTARIDAD EN LA FISICA CLASICA

En la física clásica Bohr propone el empleo del modo complementario de descripción como solución al problema fundamental de la mecánica estadística, que puede formularse en la forma siguiente: ¿es posible conciliar los fenómenos irreversibles observados en el dominio macroscópico con las leyes dinámicas reversibles de la mecánica clásica?⁵

Para comprender mejor la dificultad conviene recordar brevemente la segunda ley de la termodinámica. Podemos formular esta ley de manera sencilla y general diciendo que existe una función de estado de un sistema dinámico complejo, que se llama la entropía y que está compuesta de dos partes: S_e y S_i . El primer término representa el flujo de entropía entre el sistema y el ambiente. Su signo es independiente del tiempo y no depende sino del sentido de los intercambios con el ambiente. El segundo término, por el contrario, es siempre positivo o

cero y no puede sino permanecer constante o crecer con el tiempo es decir:

$$\frac{d S_i}{dt} \geq 0$$

Una inversión del sentido de los intercambios con el ambiente no cambia su signo. Este término puede llamarse producción de entropía y es debido a los fenómenos irreversibles en el sistema.

En un sistema aislado, o sea uno que no intercambia nada con el ambiente, el flujo de entropía S_e es nulo y la entropía se reduce a S_i .

Se puede formular la segunda ley de la termodinámica con la siguiente proposición: En un sistema aislado la entropía crece hasta un máximo $\Delta S \geq 0$, correspondiendo la igualdad a la situación de equilibrio.

El problema consiste entonces en encontrar el significado dinámico de la irreversibilidad expresado en la segunda ley de la termodinámica. La interpretación dinámica más sencilla sería exigir la existencia de una variable dinámica con las características propias de la entropía, en particular la propiedad de la variación monótona con el tiempo.

Sin embargo, existe un teorema de "imposibilidad" de Poincaré que afirma que no puede existir ninguna función de las coordenadas y de los momentos de las partículas que componen el sistema, que tenga un signo definido y que crezca de manera monótona hacia un máximo por medio de una evolución Hamiltoniana.

El teorema de Poincaré implica que es necesario emplear, además de los conceptos mecánicos, otros conceptos a fin de encontrar una explicación a la irreversibilidad termodinámica. La mecánica estadística ordinaria recurre a los conceptos de probabilidad.

En la mecánica estadística, el estado de un sistema dinámico compuesto de N partículas se representa por un punto en un espacio abstracto de $6N$ dimensiones que se llama el espacio de fases. Las coordenadas de este punto son por una parte las $3N$ coordenadas de espacio y por otra parte las $3N$ coordenadas de momento de las partículas del sistema. La evolución temporal del sistema se describe entonces por una trayectoria en el espacio de fases.

En la práctica es imposible conocer las condiciones iniciales del sistema, es decir las $6N$ coordenadas, sin embargo, podemos representar el sistema por una nube de puntos que serían aquellos que correspondan a los diferentes estados dinámicos compatibles con la información que tenemos acerca del sistema. La densidad de esta nube en cada punto del espacio se puede simbolizar por una función continua ρ , cuyo valor en un punto será la probabilidad de encontrar el

sistema alrededor del punto en cuestión. p evoluciona con el tiempo bajo el efecto de un operador L que contiene la dinámica del sistema.

El formalismo que se obtiene permite derivar las leyes de la termodinámica. Es evidente que para un físico clásico, que cree en la existencia de una realidad física independiente o en sí, la explicación dada por la mecánica estadística no es aceptable pues aceptarla equivaldría a afirmar que la irreversibilidad no sería más que una expresión de nuestra ignorancia. El crecimiento de la entropía no representaría al sistema sino únicamente nuestro conocimiento de este último. Aquello que crecería constantemente sería nuestra ignorancia del estado del sistema. Tal como lo afirma Prigogine: la combustión que tiene lugar en un horno sería el fruto del aumento de nuestra ignorancia.

Podemos preguntarnos cuáles serían las objeciones de Bohr quien, como lo dijimos, sostiene que la meta de la ciencia es únicamente el estudio de lo que podemos afirmar de la naturaleza. Un pasaje escrito por Heisenberg⁶ muestra la opinión de Bohr acerca de la interpretación subjetiva de la irreversibilidad. Heisenberg se pregunta si en la interpretación dada por la mecánica estadística es posible considerar la temperatura de una taza de té como una propiedad objetiva. Podemos interpretar el argumento de Bohr de esta manera: Heisenberg podría tener razón cuando afirma que según la interpretación ordinaria de la mecánica estadística clásica, la temperatura sería una propiedad subjetiva, es decir dependiente del observador particular. Sin embargo, es un hecho que la temperatura es una propiedad intersubjetiva, es decir la misma para todos los observadores. En conclusión es necesario encontrar una interpretación para la irreversibilidad, diferente a la que da la mecánica estadística ordinaria.

La solución de Bohr

Bohr propone una complementariedad entre los conceptos mecánicos y los conceptos termodinámicos. La esencia del argumento de Bohr es que las experiencias para definir los conceptos mecánicos son mutuamente excluyentes con las experiencias para definir los conceptos termodinámicos. Para explicar su razonamiento vamos a considerar dos experiencias:

Experiencia A:

Diseñada para hacer una descripción mecánica detallada de un sistema compuesto por un gran número de partículas. Para lograrlo es necesario medir las interacciones y determinar las posiciones y velocidades de cada partícula en un instante inicial dado. A continuación el sistema se debe aislar del ambiente. De esta manera podemos conocer en cada instante el movimiento detallado de cada una de las partículas en juego.

Experiencia B:

Diseñada para conocer la temperatura del sistema. En este caso el sistema debe interactuar con el termómetro hasta que se obtenga el equilibrio térmico. Una vez que se obtiene el equilibrio podemos leer la temperatura en el termómetro.

Es claro que no podemos llevar a cabo las dos experiencias al mismo tiempo: en la primera el sistema debe permanecer aislado y en la segunda, por el contrario, debe intercambiar energía con el termómetro. Esto quiere decir que los conceptos mecánicos y el concepto de temperatura son mutuamente excluyentes. Dado que los conceptos en cuestión son todos necesarios para agotar la información posible sobre el sistema, la conclusión es que ellos son complementarios.

Es posible argumentar igualmente que esta complementariedad está sugerida por el formalismo mismo de la mecánica estadística⁷.

Es muy significativo constatar que Bohr, con sus ideas sobre la solución del problema fundamental de la mecánica estadística, puede de cierta manera considerarse como precursor de los trabajos de Misra y Prigogine en ese dominio.

Misra⁸ ha mostrado que para ciertos sistemas dinámicos es posible resolver la dificultad que presenta el teorema de imposibilidad de Poincaré. Con este propósito, Misra considera objetos más generales que las funciones en el espacio de fases para construir una cantidad que crezca de manera monótona con el tiempo y que pueda desempeñar el papel de la entropía. Existe en efecto una formulación de la mecánica clásica en la cual los estados de un sistema no se representan por un espacio de fases sino por un espacio matemático similar a aquel que representa los estados de un sistema cuántico, y las variables dinámicas no son funciones en el antiguo espacio de fases sino operadores en el nuevo espacio.

Misra encuentra que para ciertos sistemas, que muestran un grado conveniente de inestabilidad dinámica, es posible encontrar un operador M por medio del cual se puede construir una cantidad que posee las propiedades características de la entropía. Este operador, sin embargo, no conmuta con todos los operadores que representan variables dinámicas. Ello significa que existen sistemas clásicos en los cuales la determinación simultánea de la entropía y de ciertas de las variables dinámicas está sometida a relaciones de incertidumbre que provienen de la no-conmutatividad mencionada. Esos sistemas poseen entonces variables complementarias.

El concepto de entropía no puede definirse, entonces, por medio de experiencias que permiten una definición completa del estado de esos sistemas puesto que una definición tal exige la determinación de todas

las variables dinámicas y hay algunas de estas variables que no pueden determinarse simultáneamente con la entropía. Recíprocamente una experiencia que define la entropía no permite la definición de todas las variables dinámicas, es decir del estado dinámico de esos sistemas. La descripción dinámica y la descripción termodinámica son complementarias para esos sistemas.

Vemos entonces que los resultados de las investigaciones mas recientes en el campo de la termodinámica, parecen confirmar las intuiciones de Bohr respecto a la explicación de la irreversibilidad.

EXTENSION DE LA COMPLEMENTARIDAD A LOS CUERPOS MACROSCOPICOS

Según las tesis de Bohr, lo que decide si un objeto puede o no describirse por medio de la física clásica no es su naturaleza macroscópica sino las acciones físicas en relación con el objeto. (Hay que aclarar que por acción física nos referimos a la cantidad física llamada acción que tiene unidades de energía x tiempo). Esto quiere decir que en el límite donde la acción en juego en un fenómeno es grande con respecto al quantum de acción h , es posible hacer una descripción causal en el sentido clásico o, en otros términos, es posible emplear el modo normal de descripción. Se concluye que la frontera entre las teorías clásica y cuántica, o sea entre el modo normal y el modo complementario de descripción, no coincide con aquella que separa lo microscópico y lo macroscópico.

Una secuencia lógica del hecho anterior es que el modo de descripción que debemos emplear para referirnos a un cuerpo macroscópico estará determinado por la acción en juego, es decir por la experiencia en la cual interviene el cuerpo. Si en ciertas circunstancias experimentales la acción en juego con respecto al cuerpo es mucho más grande que h , el cuerpo será descrito con el modo normal. Si en otras circunstancias experimentales la acción en juego con respecto al cuerpo es, por el contrario, del orden de h , el cuerpo tendrá que ser descrito con el modo complementario. Así, por ejemplo, si el cuerpo se emplea en una experiencia cuántica como parte del aparato de medida, debe describirse con el modo normal. Lo mismo vale para las experiencias clásicas y para las circunstancias de la vida ordinaria, donde las acciones en juego en nuestra interacción con los cuerpos macroscópicos son mucho más grandes que h . Sin embargo, si el cuerpo macroscópico se emplea en una experiencia cuántica y si la acción en juego con respecto a él es del orden de h , el cuerpo debe considerarse como parte del objeto cuántico y describirse con el modo complementario.

Las experiencias en las cuales un cuerpo macroscópico se describe en el modo normal son mutuamente excluyentes con aquellas donde el cuerpo se describe con el modo complementario. Los dos modos de descripción son, sin embargo, necesarios para agotar toda la información posible sobre el cuerpo. Se trata entonces de una extensión de la complementariedad a los objetos macroscópicos.

Debemos precisar, por una parte, que Bohr mismo no se ha referido explícitamente en sus ensayos a tal extensión de la complementariedad a los objetos macroscópicos; pero, como acabamos de verlo, ella surge de sus ideas de una manera lógica. Por otra parte, cuando Bohr presenta ejemplos físicos para ilustrar el carácter de totalidad de los fenómenos, se refiere varias veces a un diafragma que en una experiencia hace parte del instrumento de medida y en otra hace parte del objeto cuántico. Esta aplicación de la complementariedad a los objetos macroscópicos tiene enormes implicaciones para el concepto de realidad física de Bohr⁹.

LA COMPLEMENTARIEDAD EN DOMINIOS DIFERENTES A LA FÍSICA

La complementariedad se propone como una utilización del lenguaje corriente que permite hablar sin ambigüedad de experiencias cuya descripción no puede hacerse en el lenguaje corriente normal de manera exenta de ambigüedad. Las experiencias en cuestión son las experiencias cuánticas.

Dado que se tiene un nuevo modo de descripción es natural explorar la posibilidad de extenderlo a dominios en los cuales uno encuentra una similitud epistemológica con el dominio cuántico, es decir donde hay experiencias que no pueden describirse sin ambigüedad en el lenguaje corriente normal. Es natural entonces que Bohr intente utilizar su nuevo modo de descripción en todas las situaciones que presentan un carácter contradictorio o paradójico. Si poseemos una nueva herramienta conceptual debemos ensayarla en todos dominios donde la herramienta ordinaria no funciona.

La complementariedad en la biología

Al aplicar la idea de la complementariedad a la biología, Bohr propone una solución original al dilema que existe entre los mecanicistas o reduccionistas, que quieren reducir todos los fenómenos de la vida a las leyes de la física y los vitalistas o finalistas, que no creen en la posibilidad de esa reducción.

No profundizaremos aquí acerca de las posiciones reduccionistas y finalistas, ni entraremos en una discusión acerca de la validez de las consideraciones propiamente biológicas de Bohr. Lo que nos interesa

es ver si el sentido en el cual Bohr propone emplear el modo complementario de descripción en la biología es el mismo en el cual lo emplea en la física cuántica. De modo más general, lo que queremos determinar es si el uso propuesto corresponde o no a la definición precisa de la complementariedad que hemos presentado antes.

Bohr hace las observaciones siguientes:

- a) Cualquier dispositivo experimental que permita estudiar el comportamiento de los átomos que componen un organismo vivo, con los mismos métodos usados en la física atómica, excluye la posibilidad de mantener vivo el organismo. Uno mata un animal, por ejemplo, si pretende proseguir el estudio de sus órganos hasta el punto de determinar el papel de los átomos individuales en las funciones vitales. En toda experiencia con seres vivos subsiste entonces una incertidumbre sobre las condiciones físicas a las cuales están sujetos.
- b) El intercambio incesante de materia, inseparablemente ligado a la vida, implica la imposibilidad de considerar el organismo como un sistema bien definido de partículas materiales, tal como los sistemas que uno considera para dar cuenta de las propiedades físicas de la materia.
- c) Tenemos necesidad por lo tanto de conceptos que trasciendan el alcance de la física y la química y se refieran directamente a la integridad del organismo. Entre tales conceptos Bohr menciona, por ejemplo, la noción de finalidad.
- d) Sin embargo, toda experiencia en biología se lleva a cabo con aparatos que están sometidos a las leyes de la física. Para dar cuenta de la experiencia deben emplearse entonces los conceptos de la física; no podemos dejar de lado los conceptos físicos para hablar de una experiencia en biología.

Con base en las observaciones anteriores, Bohr propone considerar como complementarias las leyes de la naturaleza constituidas por las regularidades biológicas, y las leyes que gobiernan las propiedades de los cuerpos inanimados. Es decir que las condiciones de observación necesarias para estudiar las regularidades biológicas, tales como la auto-conservación y la reproducción de los individuos, se excluirían mutuamente con las condiciones necesarias para todo

análisis físico. Sin embargo los dos tipos de información serían igualmente necesarios para entender la vida.

Bohr propone incluso una analogía entre la vida y el quantum de acción, y afirma que, así como este último aparece en la descripción de los fenómenos atómicos como un elemento para el cual ni es posible ni se requiere una explicación, así también el concepto de vida es un concepto elemental en biología.

Bohr propone igualmente extensiones de la complementariedad a la psicología, a la ética, a la lingüística y a la sociología. En este artículo no discutiremos esas propuestas de Bohr.

LA COMPLEMENTARIDAD Y EL CONCEPTO DE REALIDAD DE BOHR

Por qué razón y bajo qué presupuestos la complementariedad resuelve las paradojas cuánticas se ve¹⁰ más claramente al estudiar el concepto de realidad para Bohr. A pesar de lo que un primer análisis sugiere, la complementariedad, dentro del contexto del pensamiento de Bohr, no debe considerarse como algo puramente lingüístico, sino que hace referencia a una realidad externa a nosotros pero no independiente de nosotros.

En coherencia con sus ideas acerca del empleo sin ambigüedad del lenguaje, Bohr sostiene que la "realidad física" es una expresión que debemos aprender a utilizar sin ambigüedad.

En su respuesta¹¹ a las objeciones de Einstein, manifestadas por éste en su famoso artículo de 1935¹², Bohr explica la manera como, a su juicio, debe emplearse la palabra "realidad" de manera consistente y sin ambigüedad.

En su artículo, Einstein había propuesto como criterio suficiente para aceptar que una cantidad física corresponde a un elemento de la realidad física, el hecho de poder predecir con certeza el valor de tal cantidad sin perturbar en modo alguno el sistema al cual se refiere la cantidad en cuestión.

Bohr sostiene, en cambio, que para hablar de realidad física de un fenómeno es necesario tener en cuenta las condiciones que definen los tipos posibles de predicciones relativas al comportamiento futuro del sistema; y añade:

Como esas condiciones constituyen un elemento inherente en la descripción de todo fenómeno al cual se pueda asignar proplamente el término de 'realidad física', vemos que la argumentación de los autores mencionados no justifica su conclusión de que la descripción de la mecánica cuántica es esencialmente incompleta".¹³

El criterio de realidad de Bohr puede entonces formularse así:

Todo fenómeno al que se pueda asignar sin ambigüedad la expresión de realidad física, debe contener, como elemento inherente, las condiciones que definen los tipos de predicciones que es posible hacer acerca del comportamiento futuro del sistema en cuestión. O sea: para hablar de realidad física de un fenómeno es inevitable tomar en cuenta todo el arreglo experimental. Si se acepta el criterio de realidad de Bohr, hay que concluir que para referirse a un electrón, el uso de la palabra "objeto" y de todas aquellas palabras que se refieren a las propiedades de un objeto clásico, no es más que una convención, ya que sería incómodo, por ejemplo, escribir un artículo científico refiriéndose en cada momento al aparataje experimental.

Profundicemos un poco más en este aspecto: Hemos dicho que, según las tesis de Bohr, la existencia del quantum de acción implica que no es posible asignar a un electrón las propiedades físicas habituales de un objeto clásico, el cual se considera como independiente del sujeto que lo observa y con propiedades que le pertenecen exclusivamente. Un fenómeno cuántico, según Bohr, es un **todo** que no puede dividirse y por ello se debe cada vez especificar esa **totalidad** incluido el aparataje experimental. En el caso de un fenómeno cuántico, hablar del "objeto" y atribuirle propiedades independientes, no es más, entonces, que una convención cómoda.

Hay otra cosa, sin embargo, diferente a la comodidad, que justifica usar, con las debidas reservas, la palabra objeto al referirse a un fenómeno cuántico, y es la siguiente: Según Bohr, en cada experiencia debemos hacer una diferencia esencial entre el instrumento, el cual se describe por el lenguaje corriente en su modo normal de descripción, y el resto del fenómeno, que podemos llamar "objeto" el cual no se puede describir con el modo normal de descripción sino que debe describirse con el modo complementario de descripción.

En toda experiencia es entonces posible identificar el instrumento y el "objeto", pero la frontera entre ambos cambia con cada experiencia. Podemos entonces utilizar la palabra "objeto" pero sin atribuirle un sentido ontológico, o sea sin referirla a una realidad independiente. Es decir, el lenguaje debe utilizarse, según se concluye de las tesis de Bohr, sin el contenido ontológico clásico, que considera los objetos como independientes y con propiedades que les pertenecen exclusivamente.

Ahora bien, pensemos de nuevo en el caso de un haz de electrones sometido a dos experiencias complementarias que permiten definir los conceptos complementarios de onda y partícula. Hemos dicho que los dos conceptos son necesarios para agotar toda la información posible sobre el mismo "objeto": un haz de electrones. ¿Podemos decir en-

tonces que el "objeto" tiene al menos una propiedad independiente del instrumento y que se trata de su existencia misma?

Bohr mismo ni formuló, ni dió respuesta a esta pregunta en sus escritos. No obstante, es posible responderla de manera coherente con sus ideas. Para ello debemos salir del marco de la mecánica cuántica no relativística y recordar algunos resultados de la teoría cuántica de campos¹⁴. En la electrodinámica cuántica, la intensidad de los campos eléctrico y magnético y el número de fotones son operadores que en general no conmutan. En consecuencia, el campo electromagnético y el número de fotones son variables complementarias: Una experiencia que permite precisar el número de fotones es mutuamente excluyente con una que permite medir con precisión el valor del campo electromagnético. No podemos entonces hablar sin ambigüedad del número de fotones, sin hacer referencia a una experiencia física concreta.

Igual sucede con el campo "protónico": un arreglo adecuado para medir la distribución espacial de la carga implica una creación incontrollable de pares electrón - protón. La distribución espacial de la carga y el número de partículas en juego son variables complementarias.

En los ejemplos considerados no podemos hablar del número de partículas existentes en el fenómeno sin tener en cuenta el dispositivo experimental total. Y esa situación es general: En la teoría cuántica de los campos la partícula no es más que una manifestación de los campos cuánticos, los cuales son operadores, variables físicas del mismo tipo que p o q en la mecánica cuántica no relativística. O sea que las partículas y los campos serán propiedades de aquello que describen los vectores de estado, que son una generalización de la función de onda de la cuántica no relativística. Ahora bien, para Bohr, en coherencia con su consideración de las Matemáticas sólo como un refinamiento del lenguaje común, la función de onda no tiene una realidad física, e igual se puede entonces decir del vector de estado de la teoría de campos.

En conclusión, podemos decir que, según las tesis de Bohr, todas las propiedades de un objeto cuántico, incluida su existencia, son propiedades dependientes.

INTERIOR DEL FENOMENO CUANTICO. OBJETO CUANTICO

Como una mejor manera de hablar nosotros proponemos las siguientes expresiones y definiciones:

Fenómeno Cuántico

Es una totalidad indivisible. No puede dividirse en un sentido **clásico** lo que es el objeto y lo que es el instrumento puesto que no puede definirse con precisión una **interacción** entre ellos.

Interior del fenómeno

Es aquello de la totalidad indivisible que no puede describirse con el modo normal de descripción. **Está estructurado según el patrón de la complementariedad.** Debe describirse con el modo complementario de descripción. Se manifiesta en el instrumento por medio de un efecto irreversible de amplificación.

Instrumento

Es aquello de la totalidad indivisible donde se manifiesta el interior del fenómeno. Debe describirse con el modo normal de descripción.

La frontera entre el instrumento y el interior del fenómeno cuántico

Al ir de una experiencia A a una experiencia B **complementaria de A**, aquello que se consideraba interior y aquello que se consideraba instrumento cambian. Se puede afirmar que **la frontera entre ellos cambia; que la frontera es móvil.** Pero no se trata de una frontera en el sentido clásico pues para ello se necesitaría que uno pudiera conocer con precisión el objeto y la interacción entre este y el instrumento.

Objeto Cuántico

Es aquello del interior del fenómeno cuántico que permanece invariante en las experiencias complementarias. Para poder afirmar que las experiencias complementarias se refieren **al mismo objeto y que agotan toda la información posible sobre él**, es necesario que algo del interior no cambie al moverse la frontera. Ese algo es lo que proponemos llamar objeto cuántico.

El objeto cuántico no tiene una existencia independiente o en sí. Son las condiciones experimentales las que lo definen: al ir de una experiencia A a otra experiencia B complementaria de A y mover la frontera entre interior e instrumento, hay que cambiar ciertas condiciones experimentales. Sin embargo no se cambian todas, **algunas permanecen constantes para poder afirmar que se tiene el mismo objeto cuántico.** Si todas las condiciones experimentales se cambian, todo cambia: el objeto, el interior y el instrumento.

Un ejemplo nos permite aclarar las anteriores expresiones y definiciones. Consideremos las siguientes dos experiencias complementarias: en la experiencia que llamaremos A, un haz de electrones, cuyo momento inicial se conoce con precisión, incide sobre un diafragma

rígidamente fijo. En el diafragma hay una rendija de anchura d . La experiencia nos permite conocer la posición de un electrón en el plano del diafragma con precisión dentro de d . No podemos, sin embargo, conocer el momento del electrón pues como el diafragma está rígidamente fijo, no podemos determinar el intercambio de momento entre él y el electrón. Para determinar tal intercambio, diseñamos otra experiencia, que llamaremos B, en la cual el diafragma ya no está fijo. Podemos ahora conocer el momento del electrón; sin embargo, de acuerdo con las relaciones de Heisenberg no puede ahora conocerse con precisión la posición del electrón, pues es necesario considerar el diafragma como sometido a las relaciones de incertidumbre.

En la experiencia A, el objeto cuántico es el haz de electrones. El instrumento incluye: **el diafragma**, el aparato para producir el haz y otros aparatos relevantes. El interior **no incluye el diafragma**. En la experiencia B, el objeto cuántico es también el haz de electrones. El instrumento **no incluye ahora el diafragma**. El interior **incluye ahora el diafragma**.

¿Cómo debe considerarse la existencia de los cuerpos macroscópicos? Al igual que sucede con la pregunta acerca de la existencia de un objeto cuántico, en ninguna parte de los escritos de Bohr pueden encontrarse ni la formulación ni la respuesta a la cuestión de la existencia de los cuerpos macroscópicos. Sin embargo, a partir de sus diferentes tesis, es posible dar una respuesta coherente con su pensamiento.

En primer lugar hay que anotar que si Bohr concibiera los elementos del mundo macroscópico como poseyendo una realidad independiente, se enfrentaría, según la conclusión a que llegamos en la sección anterior acerca de la existencia de un objeto cuántico, a muchos problemas, de los cuales el más evidente es que finalmente un cuerpo macroscópico se concibe como formado por cuerpos microscópicos, y sería difícil sostener que un objeto tiene propiedades independientes mientras que sus componentes no.

Ahora bien, según Bohr, lo que decide si un objeto debe tratarse o no como cuántico, o, según nuestra terminología, debe considerarse o no como interior de un fenómeno cuántico, no es su naturaleza macroscópica sino las acciones físicas puestas en juego en relación al objeto.

Si las circunstancias son tales que las acciones físicas en juego con relación a un objeto son mucho mayores que h , el objeto se puede describir por el lenguaje ordinario en su modo normal de descripción y podemos referirnos a él atribuyéndole la idea ordinaria de realidad física, es decir: en sí o independiente. Es el caso con los instrumentos de medida o con los objetos macroscópicos en las circunstancias de la vida ordinaria. Si, por el contrario, las acciones en juego

con relación a un objeto son del orden de h , el objeto debe considerarse como interior de un fenómeno cuántico aun si es **macroscópico**.

Es el caso, discutido por Bohr¹⁵ de un diafragma macroscópico que es considerado en unas circunstancias como objeto clásico y en otras como interior de un fenómeno cuántico según sea la acción en juego respecto a él.

Ahora bien, en determinadas circunstancias el objeto macroscópico debe considerarse como interior de un fenómeno cuántico, eso significa que en tales circunstancias debe considerarse como desprovisto de propiedades en sí, incluida su existencia. O sea: en ciertas circunstancias un objeto macroscópico puede describirse como teniendo propiedades en sí, y en otras como teniendo propiedades dependientes, incluida su existencia. En otras palabras, su existencia en sí dependería de las circunstancias o más precisamente de las acciones puestas en juego con relación a él.

Es claro entonces que sus propiedades y su existencia, no son entonces independientes, puesto que dependen de las acciones físicas en juego.

La conclusión ineludible de nuestro análisis es entonces la siguiente: **Según las tesis de Bohr, ningún objeto físico tiene propiedades independientes o en sí, incluida su existencia.**

La conclusión anterior genera de inmediato preguntas como las siguientes:

¿Los objetos que miramos en la sala continúan existiendo si abandonamos la sala?

¿Si todos los habitantes de París dejan la ciudad, continuará ella existiendo?

¿Existía la estrella antes de que su luz llegara a los ojos del primer hombre que la observó?

Para ser coherente con las tesis de Bohr, tal como las interpretamos en este trabajo, habría que contestar que las preguntas anteriores no tienen sentido puesto que no se define ninguna situación experimental que permita responderlas.

Parece que no existe ningún escrito de Bohr que permita decir cuál hubiera sido la respuesta de Bohr a tales preguntas. Y parece que Bohr siempre rehusó hablar de las cuestiones que, como las anteriores, son de tipo ontológico.

Existe, sin embargo, una cita donde puede uno encontrar la razón de este rechazo implícito de Bohr a todo tipo de ontología.

"Ya que se habla a menudo en la literatura filosófica de diferentes niveles de objetividad, de subjetividad o aún de realidad, podemos

señalar aquí que la noción de un sujeto último -al igual que los conceptos de realismo e idealismo- no tienen lugar en una descripción objetiva tal como la hemos definido"¹⁶.

A nuestro juicio, la cita entera debe entenderse en el sentido de que para hablar de ontología y de conceptos como los de realismo e idealismo, es necesario tener una frontera fija entre el sujeto y el objeto, o sea, es necesario definir un sujeto o un objeto últimos. Dado que en un fenómeno cuántico, según Bohr, no hay un sujeto último puesto que la frontera entre sujeto y objeto es cambiante, se concluye que ninguna ontología tiene lugar en un fenómeno cuántico.

LA COMPLEMENTARIDAD COMO SOLUCION A LA PARADOJA CUANTICA

La tesis de Bohr según la cual ninguna ontología tiene lugar en un fenómeno cuántico no debe entenderse en el sentido de una adherencia al **enfoque puramente lingüístico**, que consiste en sostener que la ciencia no es más que un discurso hecho por los hombres y cuya meta es finalmente ellos mismos y los otros hombres.

En nuestra opinión la tesis de Bohr es mucho más sutil que eso. En efecto, Bohr afirma que la meta de la ciencia es la descripción de nuestra experiencia sobre la naturaleza, sobre lo que podemos decir sobre la naturaleza. Bohr no afirma entonces que se trate de describir exclusivamente nuestras propias impresiones intersubjetivas o que se trate de un discurso exclusivamente sobre nosotros mismos. Por una parte, el discurso científico es sobre nosotros mismos en la medida en que se refiere a **nuestro conocimiento** pero, de otra parte, no es sobre nosotros mismos en la medida en que se refiere a nuestro conocimiento de la **naturaleza**.

En varios de sus ensayos¹⁷, Bohr se refiere a nuestra posición como observadores de esa naturaleza de la que nosotros mismos hacemos parte.

Encontramos aquí una aparente contradicción entre esta referencia de Bohr a la naturaleza y el rechazo de toda ontología que pueda sustentar los fenómenos cuánticos. Para resolver la contradicción debemos hacer referencia a los dos tipos de objetividad identificados por d'Espagnat¹⁸: La objetividad fuerte y la objetividad débil.

Objetividad fuerte: Un enunciado será objetivo si no contiene ninguna referencia, ni siquiera implícita, a la colectividad de los observadores. Este tipo de objetividad se refiere a la realidad en sí: Serán objetivas aquellas afirmaciones que se refieren a tal realidad.

Objetividad débil: o intersubjetividad: Un enunciado puede hacer referencia al observador **en general** y ser objetivo siempre y cuando sea considerado como verdadero para no importa qué observador. El criterio de objetividad débil es el acuerdo intersubjetivo entre aquellos que comunican.

La contradicción mencionada se puede resolver si consideramos, por una parte, que el rechazo a buscar una ontología que pueda estar de acuerdo con los fenómenos cuánticos, significa para Bohr simplemente que una descripción con base en la objetividad fuerte no puede llevarse a cabo en el dominio cuántico, y, por otra parte, que el uso de la palabra "naturaleza" es hecho por Bohr para referirse a la realidad exterior a nosotros, la cual si bien no es independiente de nosotros, está sin embargo fuera de nosotros. A nuestro juicio, aquello de lo que hablamos en una descripción cuántica no es para Bohr exclusivamente nuestras propias experiencias; existe, en un sentido débil del verbo, una realidad a la que hacemos referencia con nuestro lenguaje.

Las consideraciones anteriores se pueden reforzar por el hecho de que para Bohr un fenómeno cuántico se "cierra" o se "clausura" por medio de un efecto irreversible de amplificación, que no exige que una conciencia esté o no presente para registrar esa manifestación del "objeto" cuántico. El observador es necesario para definir el aspecto del fenómeno que se va a manifestar, y ese observador no tiene derecho a afirmar de qué aspecto del fenómeno se trata en tanto él no haya hecho los arreglos experimentales del caso; pero una vez que el dispositivo experimental está definido, la presencia del observador ya no es necesaria para tener el fenómeno.

Creemos que las reflexiones precedentes absuelven a Bohr de todo tipo de puro subjetivismo o de idealismo.

Si se admite que para Bohr existe una naturaleza exterior a nosotros, más sin embargo dependiente de nosotros, se puede decir entonces que para él esa naturaleza está estructurada según el patrón de la complementariedad, es decir que los diferentes aspectos de la naturaleza son en general aspectos complementarios. Es claro entonces en qué sentido, a nuestro juicio, debe entenderse la complementariedad como una solución a la paradoja cuántica y por qué no se trata de un mero acuerdo lingüístico.

CONCLUSIONES

Dado que no disponemos de una interpretación realista del formalismo cuántico que esté exenta de problemas conceptuales, ni de

una teoría construida sobre una base realista, o sea fundada sobre la objetividad fuerte, que tenga todo el poder de predicción de la mecánica cuántica y que no pueda ser considerada, desde el punto de vista epistemológico, como una inmunización exitosa, debemos aceptar que el modo complementario de descripción constituye un marco conceptual adecuado para hablar de la experiencia cuántica de una manera exenta de ambigüedad.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos al Profesor Bernard d'Espagnat por las valiosas discusiones que llevamos a cabo acerca de la interpretación de las ideas de Niels Bohr.

REFERENCIAS

1. Ver por ejemplo sus tres colecciones de ensayos: Bohr, N. Atomic Theory and the Description of Nature (Cambridge University press, 1934); Physique Atomique et Connaissance Humaine (Gauthier-Villars, 1957) y Essays 1968-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge (Interscience Publishers, 1963).
2. Ver por ejemplo: Chevalley, C. Mécanique Quantique et Positivisme 1925-1939 (Mémoire), d'Espagnat, B. Une Incertaine Réalité, Chap. 1 (Gauthier - Villars, 1985) y la Ref. (1).
3. Roldán, J. Langage, Réalité et Mécanique Quantique, These, Paris, 1989.
4. Einstein, A. Philosopher - Scientist (P.A. Schipp, Ed. Open Court, 1968).
5. Ver por ejemplo: Mathieu, G. Dinámica, termodinámica e irreversibilidad, en esta misma Revista.
6. Helsenberg, W; La partie et le tout (Albin - Michel, Paris, 1972, p.149).
7. Ref. (3).
8. Misra IB; Proc. Natl. Acad. Sci. USA 75, 1627 - 1631 (1978).
9. Ref. (3).
10. Ref. (3).
11. Bohr, N. Phys. Rev. 48, 696 - 702 (1935).
12. Einstein, A. Podolsky, B. y Rosen, N. Phys. Rev. 47, 777 - 780 (1935).
13. Ref. (6).
14. Ver por ejemplo: Heitler, W. The quantum Theory of Radiation (Dover Publications, Inc, New York, 1984).
15. Bohr, N. Physique Atomique et Connaissance Humaine, p. 68 (Gauthier-Villars, 1987).
16. Ref. (15) p. 119.
17. Ref. (15) p. ix
18. d'Espagnat, B. Une Incertaine Réalité (Gauthier-villars, 1985).