



Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia  
Universidad El Bosque  
filciencia@unbosque.edu.co  
ISSN (Versión impresa): 0124-4620  
COLOMBIA

2003

E. González / J. Roldán

LA APROXIMACIÓN CAUSAL Y USUAL FRENTE AL PROBLEMA  
INTERPRETATIVO DE LA TEORÍA CUÁNTICA

*Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, año/vol. 4, número 8-9

Universidad El Bosque

Bogotá, Colombia

pp. 155-174



# La aproximación causal y usual frente al problema interpretativo de la Teoría Cuántica

---

*E. González<sup>1,2</sup> y J. Roldán<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Departamento de Física  
Universidad del Valle, Cali, Colombia*

*<sup>2</sup>Departamento de Física  
Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*

*E-mail: [egonzale@javeriana.edu.co](mailto:egonzale@javeriana.edu.co)  
[deroldan@tlesat.net.co](mailto:deroldan@tlesat.net.co)*

## **Resumen**

La aproximación causal de la teoría cuántica ha sido una importante propuesta alternativa para abordar el espinoso problema interpretativo que ha acompañado desde sus orígenes a la exitosa formulación cuántica. En los últimos años, esta aproximación ha cobrado una notoria relevancia en el estudio de problemas fundamentales derivados de los recientes avances en la teoría del caos cuántico, teleportación cuántica, teoría de la información, entre otros, aspecto que ha motivado un creciente interés desde diferentes áreas del conocimiento, hacia su utilización e indagación. En razón de sus notorias y ventajosas posibilidades, se hace pertinente un análisis comparativo con la interpretación usual -de mayor consenso y aceptación-, que permita identificar sus coincidencias y discrepancias, así como sus ventajas y limitaciones frente al papel que se deriva como componente de la teoría cuántica.

## **Palabras clave**

Teoría Bohmiana, interpretación usual, ontología cuántica.

## **Abstract**

The causal approach of the quantum theory has been an important proposal alternative to tackle the thorny interpretive problem that has accompanied from its origins to the successful quantum formulation. In recent years, this approach has taken a notorious relevance in the study of fundamental problems derived of the recent advances in the theory of the quantum chaos, quantum teleportation, theory of the information, among others, aspect that has motivated a growing interest from various areas of the knowledge, toward its use and inquiry. In reason of their notorious and advantageous possibilities, it becomes pertinent a comparative analysis with the usual interpretation -of bigger approval and acceptance- that allows to identify their coincidences and discrepancies, as well as their advantages and limitations in front of the paper that is derived as component of the quantum theory.

## **Key words**

Bohmian theory, usual interpretation quantum ontology.

## **Introducción**

Si se acepta que una teoría científica se encuentra básicamente conformada por un componente formal y uno interpretativo, se podría afirmar que la teoría cuántica en su componente formal, hasta la fecha, está exitosamente consolidada, algo que no puede decirse para el caso del componente interpretativo, el cual aún se encuentra en una etapa de permanente debate. Se han elaborado un gran número de interpretaciones diferentes de la teoría cuántica: la interpretación usual, la causal, la transaccional, de muchos mundos, de historias decoherentes, interpretación sin interpretación, informacional, entre otras, aproximaciones que han abierto un extenso y controversial panorama, enriquecido por sus contrastes y coincidencias que le dan fortaleza argumentativa a una teoría considerada como fundamental. Mientras que algunos estudiosos

de los fundamentos de la teoría cuántica argumentan a favor de una interpretación para la teoría cuántica [1], otros, por el contrario se circunscriben en una postura un tanto escéptica frente a la necesidad de dotar a la teoría cuántica de un programa interpretativo más allá de lo que propone la opción epistemológica Bohriana. C. Fuchs y A. Peres en un trabajo titulado *la teoría cuántica no necesita 'interpretación'* consideran “como elemento común de todas las ‘interpretaciones’ no estándares, el deseo por crear una nueva teoría con aspectos que corresponden a alguna realidad independiente de nuestros experimentos potenciales...Solamente dan la ilusión de una mejor comprensión. Contrario a esos deseos, la teoría cuántica no describe la realidad física. Lo que hace es proporcionar un algoritmo para computar probabilidades de eventos macroscópicos” [2]. Se argumenta que desde esta perspectiva, no se hace adecuado dotar a los estados cuánticos de una realidad física, la cual daría lugar a las conocidas paradojas cuánticas.

Aunque en una gran parte de la comunidad científica se adopta esta postura independientemente del interés que se tenga o no en el problema interpretativo, aceptar que la teoría cuántica es completa y no se favorece con la búsqueda de propuestas interpretativas, equivale a negar la posibilidad de su desarrollo y crecimiento.

K. Popper en la década de los ochenta hablaba de la existencia en la ciencia física de una crisis de comprensión, con una de las causas posibles para dicha crisis el considerar la mecánica cuántica una teoría acabada y completa, hecho que permite justificar lo innecesario de atender los problemas de origen conceptual o interpretativo. “Hay incluso un grupo de físicos, quizá sea el más numeroso. Lo forman los que han dado la espalda a esas discusiones [...] A este grupo pertenecen muchos de los físicos más jóvenes que han crecido en un momento de super-especialización y en la nueva tradición, que está desarrollándose actualmente, del culto a la estrechez y del desdén por la generación más vieja, formada por no especialistas[...]: una tradición que puede llevar fácilmente al fin de la ciencia y a su sustitución por la tecnología”<sup>[3]</sup>.

En interpretaciones alternativas como la de D. Bohm, se abren espacios de discusión de gran importancia a nivel de habilitar y fortalecer ciertos aspectos que desconocen un camino final para la teoría cuántica y plantean la posibilidad de acercar el conocimiento a niveles aún más profundos de los establecidos por la interpretación estándar, y este tipo de concepción, tal como lo expresa Bell, “debería ser expuesta a todos los estudiantes, pues ello estimula la flexibilidad y precisión de pensamiento”[4].

## **La interpretación usual y causal de la teoría cuántica**

La interpretación de la teoría cuántica ha sido contextualizada desde una gran diversidad de puntos de vista, los cuales por su gran complejidad resulta problemático circunscribirlos en una escuela de pensamiento rigurosamente definida<sup>1</sup>. Así, el grupo de Copenhague-Gotinga, entre los cuales se identifica a Bohr, Born, Heisenberg, Dirac, Pauli, Neumann entre otros, fundamentan la que se ha denominado frecuentemente la interpretación ortodoxa o de Copenhague, la cual si se evalúa desde sus trabajos originales, resulta problemático cristalizarlos en una línea de pensamiento coherentemente definida que identifique dicha escuela con los aspectos fundamentales defendidos por sus exponentes, sin que esto haga manifiesta la inexistencia de puntos comunes que convergen a una postura global. Una generalización en el intento de construir una línea de pensamiento única a partir de los trabajos de un grupo identificado como exponente de una escuela implicaría que los elementos conceptuales capaces de dar luz sobre el significado de la formulación de la teoría han sido definidos en forma coherente y completa, algo que parece ser no ocurre en el caso considerado. Así, por ejemplo, en el caso de von Neumann cuyo trabajo *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932) que fue considerado como un fuerte respaldo a la escuela de

---

<sup>1</sup> Como lo anota M. Ferrero [5], más que hablar de la interpretación de Copenhague, sería conveniente hacer referencia de la interpretación de Bohr, la de von Neumann, etc.

Copenhague, presenta grandes divergencias que se apartan de la postura Bohriana en lo referente al significado de la tarea experimental en la teoría cuántica.

En este documento, se hará referencia a la interpretación usual circunscrita fundamentalmente dentro de la línea argumentativa defendida por Bohr, el cual a finales de la década de los años veinte, consolida una de las líneas de pensamiento que mayor influencia y aceptación ha tenido hasta nuestros días. La idea de complementariedad junto con las relaciones de incertidumbre de Heisenberg y la interpretación probabilística de la función de onda de Born, hacen parte de los elementos fundamentales sobre los cuales se establece el paradigma de interpretación estándar de la teoría cuántica.

En la línea de pensamiento de Bohr, la teoría cuántica no se debe ocupar de objetos atómicos, sino de fenómenos, a los cuales va dirigido el formalismo. Para Bohr, el *fenómeno* -como una totalidad que comprende el sistema cuántico observado y el aparato clásico de medida- es toda aquella información comunicable sin ambigüedad. Así, un fenómeno no es onda y partícula simultáneamente, es onda o partícula, aspectos que no pueden ser reunidos simultáneamente en el contexto de la causalidad clásica sino en el de la complementariedad. Los experimentos hacen referencia a los fenómenos y no a los objetos atómicos, siendo la mecánica cuántica una teoría completa de dichos fenómenos a los que deben corresponder todos los conceptos físicos. El fenómeno como abstracción y nivel último al que se tiene acceso, puede circuncribirse dentro de la racionalidad de la mecánica clásica siempre y cuando se pueda fundamentar en la causalidad, o dentro del contexto cuántico de la complementariedad que lo excluye de cualquier posibilidad interpretativa propia de la comprensión e interpretación clásica. De otra parte, se intenta eliminar, con la concepción de complementariedad, el problema contradictorio que surge cuando se plantea en una sola imagen los resultados que se obtienen sobre los objetos atómicos con montajes experimentales distintos (los resultados contradictorios entre sí que aparecen cuando los experimentos son realizados con aparatos diferentes, p. ej. la dualidad onda partícula).

Como refinamiento del lenguaje común aparecen las matemáticas, las cuales proporcionan solamente un conocimiento estadístico del fenómeno cuántico y no reflejan ningún tipo de realidad independiente del observador o del proceso de medida. No es posible hablar del objeto en sí mismo, que *es* o *está* haciendo. Así, las propiedades del objeto (por ejemplo, la posición y el momento) no se les puede asignar ningún tipo de significado físico más allá de los límites impuestos por las relaciones de indeterminación. De esto se puede inferir “que la mecánica cuántica puede decir poco o nada acerca de la realidad en sí misma. En términos filosóficos, ésta no proporciona lo que podría ser denominada una ontología para un sistema cuántico” [6]. Se prioriza sobre la tarea de como obtener el conocimiento, lo que permite, como lo subraya Bohm y Hiley, considerar dentro de este contexto Bohriano a la teoría cuántica orientada hacia una *epistemología* más que a una ontología. “Bohr encontró una solución inteligente al apoyarse en al coherencia del formalismo matemático y construir desde ahí una interpretación física de la teoría cuántica. Pero se equivocó al pensar que había resuelto las dificultades. Los problemas planteados, entre otros por EPR y por Schrödinger ponen de manifiesto que la táctica de Bohr de evitar todo compromiso ontológico y preocuparse sólo de analizar las condiciones para incrementar el conocimiento no tuvo el éxito deseado; él mismo quedó atrapado en los inevitables compromisos ontológicos que constriñen toda gnoseología” [7].

A pesar del consenso y postura de versión oficial que adoptó la que ha sido denominada interpretación de Copenhague, según algunos autores producto del orden en el cual los eventos históricos responsables de la creación y desarrollo de la teoría cuántica tuvieron lugar –contingencia histórica- [8], Einstein, Schrödinger y de Broglie entre otros, se distancian de esta línea de pensamiento y orientan esfuerzos para darle a los fenómenos cuánticos una imagen con preferencia “realista” y más clara a nivel conceptual. Los trabajos de Einstein y de Broglie no pudieron sin embargo superar las dificultades que aparecieron al hacer frente a la construcción de una interpretación alternativa. Alentado por algunas de las discusiones sostenidas con Einstein, D. Bohm emprende la

búsqueda de un modelo causal de la mecánica cuántica, el cual presenta en 1952 en términos de una teoría de variables ocultas [9], trabajo que conserva elementos esenciales de la teoría original de doble solución de Broglie<sup>2</sup>, motivo por el cual se suele denominar a la aproximación causal la interpretación de Broglie-Bohm.

En el trabajo de 1952 de Bohm, se parte del hecho de que la interpretación usual es autoconsistente; sin embargo, una de sus suposiciones *fuertes* que establece, por una parte, que el estado físico de un sistema individual se encuentra definido por una función de onda, la cual ofrece la más completa descripción posible del sistema individual, y por otra, que dicha función de onda proporciona solamente probabilidades de resultados experimentales sin que sea posible concebir la existencia de variables o elementos dinámicos definidos que permitan determinar el comportamiento real del sistema y no simplemente su comportamiento probable, ha marcado en gran medida el carácter de una teoría que Bohr defendía como completa<sup>3</sup> y como último nivel al que tenemos acceso, condenándose

---

<sup>2</sup> En el prólogo del libro de Bohm, *Causalidad y azar en la física moderna* de deBroglie escribe: "hace bastante tiempo, en un artículo publicado en el *Journal de Physique*, de mayo de 1927, presenté una interpretación causal de la mecánica ondulatoria a la que denominé «teoría de la doble solución»; pero, luego la abandoné desilusionado por las críticas que este intento motivó. En sus artículos de 1952, el profesor Bohm tomó algunas de esas ideas y, comentándolas y ampliándolas en forma por demás interesante, logró desarrollar importantes argumentos en favor de una reinterpretación causal de la física cuántica" [10].

<sup>3</sup> Uno de los aspectos relevantes que motivaron el conocido debate entre Bohr y Einstein [11] fue precisamente el problema del carácter completo o incompleto de la mecánica cuántica. En el trabajo realizado por Einstein, Podolsky and Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* [12] se intenta demostrar que: o la función de onda no proporciona una descripción completa de la realidad física, o bien, en las situaciones físicas dadas por las funciones de onda que describen una partícula con una cantidad de movimiento determinada pero con una posición desconocida o aquella que describe una posición fija pero una cantidad de movimiento desconocida, la cantidad de movimiento y la posición no pueden tener realidad simultánea. Pero se argumenta que la posición y cantidad de movimiento son cantidades reales, por lo tanto se defiende la primera posición: la realidad dada por la función de onda no es completa. Bohr en respuesta con un trabajo que lleva el mismo nombre [13], supone que el formalismo mecánico cuántico no puede adaptarse a un punto de vista filosófico como el de Einstein, en donde se adopta el punto de vista ordinario de la filosofía natural la cual resulta inadecuado para proporcionar una explicación racional de fenómenos físicos del tipo que interesa considerar en mecánica cuántica. La noción de complementariedad, que aparece como un nuevo aspecto en la filosofía de la naturaleza y que obliga a realizar una revisión cuidadosa de nuestra actitud frente a la realidad del mundo físico es la que permite contar con una interpretación adecuada del formalismo cuántico.

al fracaso cualquier intento por alcanzar un nivel más profundo de la realidad (mundo subcuántico). La teoría cuántica desde esta perspectiva resulta ser todo lo completa que una teoría pueda llegar a ser. En este punto que ha resultado ser uno de los ejes centrales del debate en torno a la teoría cuántica, surge una profunda división con la concepción que Bohm cristaliza en su trabajo de 1952.

Aunque la interpretación usual ha mostrado su consistencia, no se excluye la posibilidad para una interpretación igualmente consistente, la cual podría proporcionar nuevos elementos o parámetros (variables ocultas)<sup>4</sup> que permitirían una descripción causal y continua de todos los procesos<sup>5</sup>. Un aspecto notable en la postura de Bohm frente al problema de la naturaleza del fenómeno cuántico y a su esfuerzo por dotar a la teoría cuántica de una “interpretación racional”, corresponde al significado que se le otorga al carácter esencialmente estadístico de la teoría cuántica, en donde usualmente se asume que las leyes estadísticas poseen un carácter de irreductibilidad a una descripción más detallada. En la teoría de Bohm, las probabilidades son consideradas -así como en la mecánica estadística clásica-, simplemente como una necesidad de índole práctica y no como consecuencia de una indeterminación de las propiedades de la materia a nivel cuántico. Las variables ocultas se introducen para darle una caracterización al espacio de los micro-estados, en los cuales es posible definir funciones de variable real para darle representación a las propiedades de los “objetos cuánticos” al igual que en la mecánica clásica, por lo tanto, las expresiones y resultados estadísticos se explican por una falta de

---

<sup>4</sup> Como lo indica Bohm, desde el punto de vista de la física macroscópica, las coordenadas y momentos de átomos individuales son variables ocultas, las cuales en sistemas a gran escala se manifiestan simplemente como promedios estadísticos. Tal vez los promedios cuánticos, son en forma similar, una simple manifestación de variables ocultas, las cuales no han sido detectadas directamente.

<sup>5</sup> Bohm en uno de sus escritos [14], haciendo referencia a la causalidad en los procesos naturales, considera como explicación de algún fenómeno, la demostración de que este fenómeno necesariamente se deriva de otros fenómenos, aspecto que nos permite *comprender* en una forma racional el desarrollo de los procesos que se presentan en la naturaleza. Este ideal de explicar para comprender en términos causales, seguramente motivó el esfuerzo de desarrollar una interpretación causal de la mecánica cuántica en contra de una postura , que aunque se fundamentaba en consideraciones en principio muy difíciles de aceptar, resultaban como consecuencia necesaria de hechos experimentales que derivaban en una teoría fructífera y consistente.

completitud de la mecánica cuántica. Con esta postura, Bohm acepta que la teoría cuántica en su etapa presente de desarrollo, no es lo suficientemente completa como para poder tratar los movimientos de los sistemas mecánico-cuánticos individuales desde un nivel de racionalidad como el deseado por Einstein.

## **Causalidad e incertidumbre**

El principio de incertidumbre aparece como eje central en torno al cual se desarrolla la interpretación usual de la mecánica cuántica. Se considera a la función de onda un ente representativo de la más completa información posible del estado cuántico que proporciona únicamente probabilidades de los resultados experimentales. En el proceso de medida, se encuentra que el instrumento utilizado para tal fin, interactúa con el sistema observado por medio de cuantos indivisibles que producen una perturbación irreductible de algunas de las propiedades del sistema. Bohr ha sugerido, que el proceso de transferencia de un cuanto elemental desde el sistema observado al aparato de medida resulta *inherentemente* impredecible, incontrolable y no sujeto a análisis racional alguno; sin la aceptación del cuanto elemental de acción, no se hace posible entender la experiencia ordinaria, pero visto desde la experiencia ordinaria éste resulta *irracional*: “el postulado fundamental de indivisibilidad del cuanto de acción es en sí mismo y desde un punto de vista clásico un elemento irracional que nos obliga inevitablemente a renunciar a una descripción causal en el espacio y en el tiempo y que nos compele, en razón de la conexión entre los fenómenos y su observación, a un modo de descripción *complementaria*, en el sentido de que en ella toda aplicación de los conceptos clásicos excluye el uso simultáneo de otros conceptos clásicos igualmente necesarios en otras circunstancias para la elucidación de los fenómenos” [15].

El principio de incertidumbre exige así la renuncia a la causalidad, que de acuerdo a Bohm, es válida únicamente si se supone para el principio una validez absoluta y definitiva, pero esto constituiría “una limitación arbitraria de las teorías científicas, puesto que no

deriva de la teoría cuántica como tal, sino más bien de la suposición de la validez ilimitada de algunas de las características, suposición que jamás podrá ser sometida a prueba experimental<sup>6</sup> [16]. Se presenta así una profunda división entre la posición adoptada por Bohm con respecto a la interpretación defendida por Bohr en lo que respecta a la causalidad en los fenómenos cuánticos.

En la interpretación alternativa propuesta por Bohm, el principio de incertidumbre no es considerado como una limitación *inherente* de la precisión con la cual puede concebirse en forma precisa y simultánea la posición y el momento, sino por el contrario una *limitación práctica* de la precisión con la cual esas cantidades pueden ser medidas simultáneamente. En su propuesta de si existe un nivel subcuántico más profundo, en donde tendrían lugar movimientos continuos y determinados causalmente, capaces de conducir a las leyes de la mecánica cuántica como una aproximación válida en el dominio atómico, el principio de incertidumbre no tendría ninguna ingerencia acerca de la precisión de las posibles medidas que pudiesen realizarse. Sugiere incluso que en este nivel mas profundo “un cuanto podría ser dividido y en principio, predicho y controlado, en función de las nuevas clases de factores causales existentes en este nivel” [17].

Se hace patente la necesidad dentro del pensamiento de Bohm de abandonar la suposición de que el principio de incertidumbre presenta validez absoluta y definitiva, abriéndose con esto la posibilidad de introducir una interpretación de la teoría cuántica en términos de variables ocultas<sup>7</sup>, la cual puede proporcionar un marco conceptual más amplio y producir los mismos resultados obtenidos

---

<sup>6</sup> Cabe anotar que en la actualidad se están realizando pruebas experimentales orientadas a confrontar con la experiencia los aspectos fundamentales de la teoría cuántica (p. ej. Grupo del Prof. A. Zeilinger, en el Instituto para Física Experimental –Universidad de Viena-).

<sup>7</sup> En la propuesta de 1952, Bohm establece que en el proceso de medida no se pueden hacer inferencias precisas sobre la posición de una partícula al igual que para el momento; así, los valores precisos de la posición y del momento deben ser considerados como «ocultos» ya que no es posible en el presente tener esa información. Se insiste sin embargo, que estas variables ocultas son conexiones con propiedades reales de la materia y determinan el resultado real de cada medida individual. En el libro último de Bohm, *The Undivided Universe* [6], se subraya el hecho de que el término de variables ocultas utilizado en el artículo de 1952 resulta restrictivo, ya que las variables no son realmente ocultas. El punto es que las propiedades de una partícula no pueden ser observadas con completa precisión.

por la interpretación usual. En la línea de argumentación que Bohm establece, se orienta la crítica al carácter definitivo y a todo nivel de desarrollo de la teoría cuántica -aún en un posible nivel subcuántico- del principio de incertidumbre; con esto, la forma de la teoría cuántica actual adquiere el carácter de teoría completa capaz de proporcionar la única información posible de los sistemas cuánticos a partir de las mediciones que se pueden o puedan llevar a cabo. Si se adopta la mencionada conjetura, cualquier teoría de variables ocultas pierde por completo legitimidad en la ciencia física al quedar totalmente excluida su contrastación con la experiencia -no serían físicamente observables-, y su hipotética existencia no modificaría en absoluto la estructura actual de la teoría ya que dichas variables caerían en el rango de incertidumbre que las hace totalmente irrelevantes y las convierte en simples artificios de carácter metafísico.

## Complementariedad

El principio de complementariedad introducido por Bohr, establece que un observador convive en un mundo macroscópico en donde el lenguaje clásico que utiliza para hacer referencia a dicho mundo utiliza conceptos de naturaleza causal y descripciones en el espacio-tiempo; sin embargo, este tipo de apreciación no tiene por qué extenderse a todo el mundo físico, en particular a los fenómenos atómicos. Existe una relación complementaria entre la coordinación espacio-temporal y la causalidad, así como entre las entidades onda-partícula ya que no pueden ser utilizadas en forma simultánea. Se supone a la onda y el corpúsculo como dos lados distintos de la misma realidad, aunque estos dos aspectos antagónicos no se presentan nunca en forma simultánea en un mismo fenómeno<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> En la concepción de Bohr basada en la idea de la complementariedad, lo fundamental es comprender que tanto los experimentos como las observaciones no hacen referencia a objetos, sino a los fenómenos. El hecho de que un objeto se comporta algunas veces como partícula y otras como onda puede parecer ambiguo, ya que se piensa en objetos con propiedades (de ondas o partículas); sin embargo, a lo que se está accediendo es a los fenómenos (no a los objetos) y un fenómeno no puede ser simultáneamente onda y corpúsculo, o es onda o es corpúsculo. Estos dos aspectos no pueden considerarse desde el punto de vista clásico de la causalidad, sino por el contrario desde el cuántico de la complementariedad. Bohr establece que los fenómenos que tienen lugar en el contexto clásico pueden ser explicados en forma racional, mientras que los que tienen lugar en el dominio atómico están sometidos a una irracionalidad si se describen desde el punto de vista clásico.

Muy lejos de ser contradictorios, los aspectos ondulario y corpuscular resultan *complementarios* entre sí.

La mecánica cuántica no se ocupa, de acuerdo a Bohr, de las propiedades de los objetos atómicos -el objeto no tiene propiedad alguna cuando no es observado-, sino de las relaciones entre los fenómenos que son observables. La complementariedad sugiere la imposibilidad de contar con un solo concepto que represente en forma precisa todos los aspectos comprometidos con el comportamiento de un sistema individual.

Bohm admite que un punto de vista como el expuesto por Bohr, “nos lleva a renunciar a nuestra práctica, hasta ahora fructuosa, de pensar en un sistema individual como un todo unificado y definible con precisión, cuyos aspectos totales son, en cierto sentido, accesibles de manera simultánea e inequívoca a nuestro punto de vista conceptual. Dicho sistema de conceptos, que a veces es llamado «modelo», no necesita estar limitado a imágenes, sino que también puede incluir conceptos matemáticos por ejemplo, siempre que se suponga que éstos ofrecen una representación precisa de los objetos descritos. Sin embargo la representación usual exige que renunciemos hasta a los modelos matemáticos” [9].

Para Bohm, con el principio de complementariedad que establece la necesidad del uso de parejas complementarias de conceptos definidos de manera imprecisa, se defiende la naturaleza irracional para las propiedades básicas de la materia en función de modelos conceptuales capaces de proporcionar una correspondencia (de representación) con los objetos que están siendo descritos. “Así la limitación en nuestros conceptos, implícita en el principio de complementariedad, es considerada como absoluta y definitiva”. Esto por supuesto produce un distanciamiento significativo con la interpretación usual.

Resulta pertinente hacer notar el hecho de que la renuncia a la causalidad, continuidad y ‘realidad’ de los objetos cuánticos individuales no provienen de los resultados experimentales o de la formulación de la teoría cuántica, sino de las imposiciones de

carácter absoluto y definitivo a ciertas suposiciones que conforman los principios ya discutidos anteriormente.

## Una ontología para la teoría cuántica

D. Bohm y Hiley presentan a principios de la década de los noventa un trabajo [6] que recoge, con algunas precisiones, la propuesta causal de la teoría cuántica<sup>9</sup>, con un título que hace explícita referencia a una interpretación ontológica de la teoría cuántica, denominación que prefiere utilizar uno de los autores (Hiley). Si la mecánica cuántica puede decir algo acerca de la realidad en si misma, se hace pertinente una ontología, la cual se materializa al nivel de lo que Bell denominaba los *beables* [4] –nivel de realidad de las entidades cuánticas, lo que *son y hacen* dichas entidades-, y un nivel epistemológico que corresponde a los *observables*, nivel al que está restringida la interpretación usual.

En la versión ontológica de la mecánica cuántica, a las partículas descritas por sus posiciones, se les considera como entidades reales dotadas de propiedades igualmente reales. Además, a la onda  $\psi$  descrita por la ecuación de Schrödinger se la considera una entidad tan objetiva como lo son los campos electromagnéticos en la teoría de Maxwell, “aunque su acción sobre las partículas es bastante original. Nadie es capaz de entender esta teoría hasta que esté dispuesto a considerar a  $\psi$  como un campo real y objetivo y no sencillamente como una «amplitud de probabilidad». Incluso aunque se propague no en el espacio tridimensional sino en uno 3N-dimensional” [4]. Dentro de una línea de desarrollo que se ha denominado Mecánica Bohmiana, en donde al potencial cuántico se lo considera como un elemento innecesario<sup>10</sup>, es la pareja {fun-

---

<sup>9</sup> El libro *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory* fue publicado después de la muerte de D. Bohm ocurrida en 1992.

<sup>10</sup> La denominada *versión minimalista* considera que no se debe someter la teoría a la participación de una fuerza de naturaleza cuántica para dar cuenta de las diferencias con los resultados soportados clásicamente. Se considera, que aún en ausencia de fuerzas clásicas, y sin la participación del potencial cuántico, la partícula describe trayectorias que no son las esperadas clásicamente. En esta interpretación, solamente los objetos reales son las partículas y solamente las propiedades reales son las posiciones; la función de onda codifica la dinámica que obedecen esas partículas sin que su naturaleza tenga el realismo como lo sugiere Bohm. Desde este punto de vista se ha cristalizado la denominada Mecánica Bohmiana.

ción de onda, posición} la responsable de definir el estado del sistema, y no a la simple función de onda como lo considera la interpretación usual.

Un aspecto muy interesante es el significado que Bohm le otorga a la función de onda [18]. Dentro del contexto del potencial cuántico, una partícula, como el electrón, se considera en movimiento bajo la acción de su propia energía mientras que la forma del campo cuántico  $\psi$  orienta dicha energía. Bohm introduce así el concepto de *información activa*, definido en términos de la información<sup>11</sup> necesaria para determinar el movimiento del electrón, lo que corresponde a una entidad con muy poca energía que permite dirigir la energía (mucho mayor) de la partícula. Dentro de este contexto, la información activa corresponde a una entidad física transportada por el campo cuántico, que no empuja a la partícula mecánicamente sino que simplemente da forma *-informa-* al movimiento, el cual se produce debido a la energía propia de la partícula. El potencial cuántico transporta información del ambiente en que la partícula se encuentra. Este tipo de proceso que se da entre la onda y la respuesta de la partícula, le sugiere a Bohm la necesidad de considerar la posibilidad de la existencia de una estructura compleja interna de las partículas que de cuenta del efecto descrito. De otra parte, mientras que los potenciales clásicos responsables del comportamiento dinámico de una partícula la «conducen» a lo largo de la trayectoria, el potencial cuántico «organiza» la forma de las trayectorias en términos de las condiciones experimentales.

Si se abordan dentro del contexto causal aquellas situaciones paradójicas que califican como «irracional» al fenómeno cuántico, resulta muy significativo el papel que juega esta interpretación en la construcción de un modelo explicativo comprensible y carente de ambigüedad. A manera de ilustración se va a considerar

---

<sup>11</sup> El origen etimológico de la palabra información hace referencia a la acción de *formar* o *dar cierto orden* a alguna cosa. Se trata de un proceso objetivo que resulta de una dinámica condicionada en forma irreductible por el ambiente. En este caso se hace referencia a procesos libres de connotaciones humanas. Es en este sentido que Bohm y Hiley elaboran su propuesta.

uno de los experimentos mentales que por excelencia ha sido utilizado para hacer explícita la problemática interpretativa de la teoría cuántica. Se trata del experimento de doble rendija<sup>12</sup>. En dicho experimento se dispone de un cañón de electrones dirigido hacia una pared dotada de dos agujeros por los cuales se espera, pasen los electrones para ser observados en una pantalla ubicada detrás de la pared. Si los dos agujeros se dejan abiertos se obtiene como resultado un patrón de interferencia característico de una entidad ondulatoria, aunque cada uno de los electrones se registre puntualmente en la pantalla. A la pregunta si cada uno de los electrones pasó por una u otra de las rendijas, no se hace posible elaborar una respuesta concluyente, ya que la distribución que conforman los electrones en la pantalla es propia de una entidad que atraviesa simultáneamente las dos rendija, esto es, una onda. La probabilidad de incidencia sobre la pantalla no corresponde a la suma de probabilidades para el caso de cada uno de los agujeros abiertos por separado. Si se dispone de un mecanismo para detectar el paso de los electrones por el agujero, se desvanece la interferencia. Surge con esta situación una serie de dificultades frente al ideal de explicación del fenómeno, que como Feynman manifestaba “resulta imposible solucionar... así *es* realmente la naturaleza”.

En física clásica, cada partícula tiene propiedades bien definidas y sus movimientos se describen a través de trayectorias completamente determinadas. En la interpretación usual de la mecánica cuántica, no se hace posible definir completamente las propiedades de las partículas individuales, y por lo tanto no se puede hacer uso del concepto clásico de trayectoria.

En la teoría de Bohm, se mantiene el concepto de trayectoria, y sin embargo, como se puede demostrar, se obtienen los resultados de interferencia cuántica en el experimento que se está considerando sin que el tratamiento sea estrictamente clásico ya que el potencial cuántico lo separa de una formulación netamente clásica.

---

<sup>12</sup> Este experimento mental del cual se consideraba muy improbable su realización, fue llevado al plano de experiencia concreta en el año de 1989 [19].

Desde el punto de vista del pensamiento de Bohr, los conceptos de onda y partícula resultan mutuamente excluyentes pero complementarios para agotar la información sobre el sistema, por lo tanto, la situación experimental determinará el contexto en el cual tiene sentido hablar de onda o partícula. En el experimento de dos rendijas, en el contexto de las rendijas abiertas sin dispositivos que detecten el paso de la partícula, el fenómeno de interferencia ocurre debido al comportamiento ondulatorio sin que el concepto de partícula tenga sentido y mucho menos el de trayectoria. Cuando se coloca un detector en una de las rendijas, el contexto experimental ha cambiado (se ha preparado un experimento que detecta partículas) y se hace posible dentro de ese contexto hablar de partícula y por lo tanto el patrón de interferencia no aparece. El concepto de trayectoria no tiene significado debido a la necesidad de contar con el contexto experimental necesario para determinar la correspondiente probabilidad de presencia. Ya que en el tránsito de la partícula hacia la pantalla no se cuenta con el contexto experimental (medida), no tiene sentido saber que ocurrió en esa región.

Desde el punto de vista de Bohm, se retiene la noción de partícula puntual siguiendo una trayectoria bien definida la cual pasa por una u otra de las rendijas. Si se ha determinado el punto de llegada de la partícula, se puede inferir sobre los estados pasados de la partícula, esto es, se hace posible saber cual fue la trayectoria que la llevó a tal punto sin tener que recurrir a la observación directa del sistema. Se trata de una interpretación causal determinista, que establece una existencia objetiva del sistema bajo estudio. Así, desde esta postura, se retiene el concepto de trayectoria y al mismo tiempo se cuenta con el fenómeno de interferencia. No aparece la excluyencia entre onda y partícula ya que incluso estas dos entidades existen simultáneamente: *onda y partícula*.

¿Qué determina entonces la aparición de una distribución de franjas de interferencia en la pantalla? La respuesta podría ser enfocada así: En la teoría de Bohm, se admite la existencia de un campo objetivo que se representa por medio de la función de onda  $\psi$ , que puede ser considerado como una entidad física que a través

del potencial cuántico actúa sobre la partícula como información activa (*rasgo primario*), que guía el movimiento de las partículas -el significado estadístico de la función de onda puede ser considerado como una *propiedad secundaria*-. El potencial cuántico proporciona así las condiciones para que bajo la disposición del sistema, se presente la distribución de interferencia que se presenta en el experimento de dos rendijas.

Ahora, ¿qué ocurre si se coloca un detector en una de las rendijas? El potencial cuántico deberá modificarse notoriamente ya que dicho potencial viene determinado por todos los elementos que conforman el sistema bajo estudio (rendijas, pantalla, detectores, etc.,) sin que se pueda hacer un análisis del estado por partes separadas; se hace necesario otorgarle legalidad al estado cuántico como un *todo* (expresado a través del potencial cuántico el cual depende en forma irreductible de las propiedades del aparato y de la partícula). Al modificarse el potencial por la presencia del medidor, el patrón de interferencia se desvanece (nueva distribución de trayectorias). Esta postura tiene una semejanza aparente con el pensamiento de Bohr en el sentido de “la imposibilidad de subdividir el fenómeno cuántico”. En la línea de Bohm se justifica la presencia del potencial como una clara expresión de la mencionada inseparabilidad, la cual puede ser mantenida sin necesidad de renunciar a la idea de partícula con trayectorias bien definidas<sup>13</sup>.

En la búsqueda de coincidencias entre la interpretación usual y la interpretación causal de Bohm, aparece dentro de un criterio de aproximación holística el concepto de *totalidad indivisible*, que en el pensamiento de Bohr aparece entre el objeto de investigación y el instrumento de medida. Bohm defiende en forma semejante lo inadecuado que resulta una descripción aislada de las partes que conforman el sistema (objeto de estudio e instrumento), aunque lo holístico en la teoría de Bohm aparece a nivel de la naturaleza no-local del mundo cuántico. El potencial cuántico (entidad no-

---

<sup>13</sup> Recientemente se realizó en Italia un experimento que fue presentado como una prueba en contra de la existencia de trayectorias Bohmianas [20]. Sin embargo, con una interpretación cuidadosa de los resultados obtenidos, se hace posible probar que se sostiene la validez de trayectorias cuánticas Bohmianas [21].

local), que deriva del campo y la cual depende del estado del sistema, permite “reunir” a todos los entes participantes en una *totalidad* que no puede ser descrita en términos de las partes por si solas. Aunque dichas partes poseen propiedades independientes definidas, es a través del potencial cuántico que reciben una especie de “información activa” que permite que las relaciones de partículas no sean funciones preasignadas de la distancia sino que ellas varíen de acuerdo al estado cuántico del sistema como un todo. Así, en aras de una interpretación causal, una justificación de la mencionada totalidad se diferencia notablemente del contexto en el cual Bohr desarrolla su línea de pensamiento (imposibilidad de asignar propiedades independientes a los entes cuánticos).

## Conclusiones

La interpretación de la mecánica cuántica desarrollada por D. Bohm podría decirse que está soportada por una intención de mejorar en lo posible la comprensión de los fenómenos cuánticos, recuperando para la mecánica cuántica el programa causal, que permite al igual que en mecánica clásica, contar con procesos individuales con una historia espacio-temporal definida, en donde se puede a partir de la suposición de existencia de un nivel subcuántico evitar la imposibilidad de una explicación más allá de lo que la interpretación usual considera inexplicable. Se trata de una propuesta que abre el camino hacia una nueva “pedagogía cuántica” que Bohm circunscribe en lo que denomina «un nuevo modelo conceptual», fundamentado en nociones tales como la de partícula con trayectoria bien definida y con mayor número de propiedades que las que pueden ser descritas según los observables de la teoría cuántica. Así, un electrón  $\psi$  (afirmación objetiva fuerte) posición, momento, un campo y fluctuaciones a nivel subcuántico, aspectos de realidad que combinados determinan su comportamiento temporal. Esta postura se distancia considerablemente de la interpretación usual que considera a la función de onda como una simple herramienta de naturaleza matemática.

La interpretación causal permite modificaciones en la formulación matemática las cuales no pueden ser descritas en términos de la interpretación usual. Estas modificaciones pueden ser insignificantes a nivel del dominio atómico en el cual la concepción usual ha resultado exitosa, pero de crucial importancia para energías muy altas y distancias muy cortas, del orden de  $10^{-13} \text{ cm}$ , para las cuales la teoría actual aún no ha proporcionado una extensión satisfactoria<sup>14</sup>, hecho que justifica un intento de proporcionar una interpretación alternativa que permita esclarecer y estudiar los fenómenos a esta escala. Además, la estructura lógica que presenta la teoría permite, en principio, que pueda ser modificada de modo tal que los elementos que de allí pueden surgir -como resultado de los detalles que imponen las variables ocultas-, abrirían un nuevo dominio de resultados experimentales no predichos por la teoría cuántica usual. Bohm defiende el carácter del progreso de la ciencia por aproximaciones sucesivas, donde la mecánica cuántica corriente corresponde a una teoría válida para ciertos dominios de aproximación; ésta, sin embargo, debe estar contenida como caso límite de teorías aún más generales válidas para un dominio aún más «profundo» de conocimiento.

En la interpretación causal de la mecánica cuántica se proyecta una novedosa e interesante significación para la función de onda que no puede ser ignorada dentro de la creciente necesidad de favorecer el progreso de la ciencia física a través de lo que Bohm considera “ un dialogo creativo, en el que puedan coexistir diferentes puntos de vista con igual intensidad... Una vez que se ha establecido este dialogo, resulta posible ir mas allá y examinar los puntos clave de similitud y diferencia dentro los diferentes enfoques. Así, sería posible crear metáforas creativas. Para eso se necesita que los diferentes puntos de vista estén presentes en la mente de manera activa...”[22].

---

<sup>14</sup> Un caso que podría mencionarse, corresponde a las serias dificultades que surgen en la teoría relativista del campo cuántico con las divergencias obtenidas al calcular los efectos de interacción entre ciertas partículas y campos, en donde los procesos de renormalización no resultan del todo satisfactorios (ej. interacción mesónica).

---

## REFERENCIAS

---

- L. Marchildon, *Why should we Interpret Quantum Mechanics?* Preprint (2004).
- C. Fuchs and A. Peres, *Physics Today*, March 70(2000).
- K. Popper, *Teoría Cuántica y el Cisma de la Física*, Madrid, Tecnos, 1985.
- J. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, 1987.
- Del prologo de M. Ferrero a N. Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial, Madrid, 1988, p.38.
- D. Bohm and B. J. Hiley, *The Undivided Universe*, Routledge, London, 1993.
- M. Ferrero, *Op. Cit.* p.45.
- J. Cushing, *QUANTUM MECHANICS, Historial contingency and the Copenhaguen hegemony*, The University of Chicago Press, Chicago, 1994.
- D. Bohm , *Phys. Rev.* **85**,166(1952).
- Del prólogo de L. de Broglie al libro: D. Bohm, *Causalidad y azar en la física moderna*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1959.
- A. Whitaker, *Einstein, Bohr and the Quantum Dilema*, Cambridge University Press, UK, 1996.
- A. Einstein , B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777(1935).
- N. Bohr, *Phys. Rev.* **48**, 696(1935).
- D. Bohm, *Causalidad y azar en la física moderna*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1959.
- N. Bohr en *Albert Einstein philosopher and scientist*, Ed. P. A. Schilpp, Open Court, Evanston, 1949. p.206.
- Bohm (1959), *Op. Cit.* p. 128.
- D. Bohm, *Wholeness and the Implicate Order*, Routledge and Kegan Paul, London, 1980.
- E. González, J. Roldán, *El significado de la función de onda dentro del contexto de la interpretación causal de la teoría cuántica*, Preprint (2003).
- A. Tonomura, et al, *Am. J. Phys.* **52**, 117(1989).
- G. Brida, et al, *J. Phys. B: At.Mol.Phys.*,**35**, 4751(2002).
- E. González, *Teoría Bohmiana y el problema del caos cuántico*, Tesis Ph.D. (2005).
- D. Bohm, et al, *Ciencia Orden y Creatividad*, Kairos, Barcelona (1987).