

# EL PAPEL DEL OBSERVADOR Y LA REALIDAD

Por Joaquín GONZÁLEZ ÁLVAREZ

## Resumen

Se presenta lo esencial de la llamada Interpretación de Copenhague sobre la Mecánica Cuántica, realizándose un análisis crítico de la misma. Son tenidos en cuenta los criterios sobre el contexto de personalidades como Einstein, Heisenberg, Wigner, Hawking y otros, tanto en contra como a favor de tan controvertida tesis.

A partir de que el físico danés Niels Bohr en 1927 emitiera sus criterios acerca del alcance epistemológico de la Mecánica Cuántica, la comunidad científica acuñó la denominación de Interpretación de Copenhague para el tema en cuestión.

Los seguidores junto con Bohr de la interpretación que nos ocupa, Heisenberg, Born, Dirac, von Neumann, sostenían y epígonos contemporáneos sostienen, que un ente cualquiera sólo adquiere realidad si es observado, esto es, la Interpretación de Copenhague estipula la necesidad de un observador, natural o instrumental, para que la realidad se materialice. En términos de la matemática de la Mecánica Cuántica, la existencia de un objeto o un hecho sólo se hace efectiva al ocurrir la reducción de la función de onda.



Niels Bohr



Werner Heisenberg



Max Born



Paul A. Dirac



Von Neumann

Al respecto Eugene Wigner ha comentado que "el objetivo de la Mecánica Cuántica no es describir cierta "realidad" cualquiera que sea lo que signifique, si no observaciones y correlaciones estadísticas entre éstas, lo cual no niega que exista un mundo fuera de nosotros cualquiera que sea lo que esto signifique. En nuestra opinión, esta postura de Wigner, que pudiéramos catalogar de positivismo moderado es aceptable como contrapartida al radicalismo de Copenhague. Creemos que lo sensato sería pensar que parece existir la realidad pero que de ésta sólo tenemos aparentes manifestaciones accesibles a observadores naturales o instrumentales. El desarrollo de la ciencia ha propiciado que la interpretación acertada de esas observaciones confirmen hechos previstos mediante el raciocinio y plasmados en hipótesis que posibilitan las investigaciones.

Pensamos que en la negación de la realidad por el positivismo extremo, sus adherentes más bien exponen ese argumento con intención un tanto infantil de llamar la atención o de lo que en términos periodísticos se presenta como afán

sensacionalista, cuando íntimamente piensan la realidad como vimos la piensa Wigner. No creemos que en la pregunta de Hawking: *¿la realidad? ¿qué cosa es eso?*, esté defendiendo en serio un cuasi-solipsismo.

Basadas en el papel del observador que otorgan los de Copenhagen, han surgido interesantes especulaciones como las del experimento ideal conocido como Gato de Schrödinger y la teoría de los Universos Paralelos de Hugh Everett. En el experimento ideado por Schrödinger, un gato es encerrado vivo en un recinto que no permite ver lo que dentro de él ocurre. Adentro se ha dispuesto un mecanismo que pasado un tiempo tiene 50% de activar la salida de un gas letal capaz de matar al gato (afortunadamente nunca se ha llevado a la práctica). De modo que pasado el tiempo necesario el gato tiene 50% de probabilidad tanto de estar vivo como de estar muerto y sólo se sabrá la realidad de su estado cuando se abra la caja, esto es, cuando ocurra la observación, la reducción de la función de onda. Mientras tanto dicen los seguidores de Bohr, el gato se encontrará en un estado de superposición vivo-muerto.

Según la Teoría de los Universos Paralelos de Everett, si se le refiere al experimento ideal antes descrito, al abrirse la caja y hacerse la observación inmediatamente ocurre una bifurcación de universos idénticos pero incomunicados entre si. En uno de ellos el observador ve al gato vivo y en otro un doble de él lo verá muerto.

En contrapartida al experimento del Gato de Schroedinger, Einstein se valió de otro para rebatirlo. Alegó que si estamos ante dos cajas cerradas en una de las cuales (no sabemos cual) hay una bola, antes de abrirlas se tiene un 50% de probabilidad de que esté digamos, en la primera, al abrirla sabremos la certeza. Pero la realidad todo el tiempo es que había una bola en una de ellas. Lo incompleto de la Mecánica Cuántica se presenta cuando nos habla del estado de superposición está- no está en una de las cajas.

La Interpretación de Copenhagen es una aplicación radical del positivismo al modo de Ernst Mach. Recordar la tenaz oposición de Mach y sus fanáticos seguidores a la teoría molecular de Boltzmann, repitiendo insidiosamente por quien había visto una molécula. Tal saña opositora por parte de los positivistas, condujeron a Boltzman, en pleno estado depresivo a quitarse la vida. Poco después su tesis molecular fue comprobada al estudiarse el movimiento browniano.

El positivismo radical de Mach y de sus seguidores al no aceptar la realidad de lo que no se percibe, impidió o al menos atrasó, el desarrollo de teorías como la molecular de Boltzmann. En vez de adoptar un positivismo como el que declara Stephen Hawking en nuestros días basado en no detenerse a negar la realidad si no en sustentar hipótesis con la cuales poder establecer regularidades y correlaciones que permitan investigaciones exista o no esa realidad, Qué hubiera pasado si ante el descubrimiento teórico de la condición ondulatoria de toda partícula con una longitud de onda  $\lambda=h/mv$ , por Louis de Broglie, al no ser detectadas en partículas de gran masa, hubieran negado la realidad de tal hecho. Einstein quien alguna vez atendió las opiniones de Mach, en definitiva no se avino con la filosofía positivista y por ende con la Interpretación de Copenhage. En una ocasión refiriéndose a lo que el llamó escepticismo de Mach, expresó que si bien algunas veces es útil para rechazar conceptos superfluos, el escepticismo no aporta mucha ayuda a la construcción de nuevas teorías.

Sobre el enfrentamiento del autor de las Teorías de la Relatividad a la Interpretación de Copenhagen volveremos más adelante.

Una adhesión un tanto exagerada al positivismo la observamos en algunos aspectos de la teoría de las cuerdas cuando en ésta se argumenta, que las rugosidades que se presentan en el "tejido" del espacio-tiempo debido por efecto de las fluctuaciones cuánticas no previstas en la Teoría General de la Relatividad, pueden ser ignoradas por las cuerdas ya que éstas, por sus dimensiones, no detectan las rugosidades de dimensiones sub-planckianas. Esto es, que coincidiendo con los de Copenhagen, si no se observa un objeto, éste no existe.

Uno de los mas consecuentes seguidores de Bohr en la defensa de la tesis central de la Interpretación de Copenhagen lo fue sin duda Werner Heisenberg, autor del fundamental para la Mecánica Cuántica, Principio de Indeterminación, según el cual no es posible a la vez determinar la posición y el momentum de una partícula. De manera que siguiendo el criterio de Copenhagen, posición y momentum de una partícula no poseen realidad a la vez. De ninguna manera el Principio de Indeterminación es una muestra del radicalismo positivista; hasta ahora mantiene su vigencia y credibilidad. Mas, en lo que sí no hay consenso es en tomarlo para argumentar la no existencia de la realidad.

Lo que si es innegable es el duro golpe que el Principio de Heisenberg propinó al estricto causalismo de la física clásica, hecho que nunca aceptó Einstein. "Dios no juega los dados" dijo, y en otra ocasión refiriéndose a cuando Heisenberg propuso en Gottingen su principio de incertidumbre, expresó: "Heisenberg puso un gran huevo cuántico, en Gottigen se lo creyeron, yo no".

Ante aseveraciones como la de Heisenberg al decir que nadie ha observado a un electrón orbitando al núcleo atómico, agregando que ninguna buena teoría puede basarse en lo no observable, Einstein respondió: ¿Usted seriamente cree que no puede aparecer una magnitud no observable en una teoría?

La opinión de Einstein de que el carácter indeterminista de la Mecánica Cuántica no se aviene con lo que se ha pensado tradicionalmente de lo que es científico, la sostuvo hasta su fallecimiento con la esperanza de lo que algunos hubiéramos deseado: que surgiera un elemento teórico el cual mostrara la reafirmación del determinismo, que apareciera un detalle que nadie había tomado en cuenta que mostrara que la causalidad clásica permanecía incólume. Que ocurriera algo que una vez nos diera la idea de una especie de fábula en la cual alguien en un jardín observó que en el suelo se movían una hojitas sin aparente causa. El observador creyó ver algo inusitado, cuando en ese momento alguien llegó con los espejuelos que había olvidado. Se los puso y vio la explicación, que sin espejuelos no podía: una pequeñísimas hormiguitas cargaban la hojas en su movimiento. No somos pocos a los que nos alegraría la aparición en el ámbito cuántico de unos espejuelos como los de la fábula.

En su activa oposición a la Mecánica Cuántica, Einstein con la colaboración de Boris Podolsky y Nathan Rosen, publicaron en la tercera década del pasado siglo XX, un artículo en el que describían un experimento con el cual se proponían poner de manifiesto que la teoría en cuestión era incompleta. En el experimento dos partículas previamente en contacto a las cuales la Mecánica Cuántica les exige tener espines opuestos, en un momento dado se separan y llegan a puntos muy alejados entre si. Un observador al detectar la dirección del espin de una de la partículas, sabe inmediatamente dicha dirección en la otra sin afectarla para nada. De semejante manera, dicen los autores del experimento, que por las iniciales de sus apellidos es llamado EPR. por medidas en una partícula se puede medir la posición Q en la lejana y análogamente por medidas en la primera determinar el momentum P en la segunda, sin afectarla en ninguna de las dos ocasiones con ningún dispositivo de medición. De modo que, dicen los del EPR, tanto Q como P pueden considerarse elementos de la realidad, en contradicción con la Interpretación de Copenhagen

aplicada a lo que estipula el Principio de Indeterminación. Desde los albores de la Mecánica Cuántica el sabio alemán discrepó de sus principios, la identidad de partículas alejadas no la aceptó alegando que la no coincidencia en el espacio suprimía la identidad. En esto parece coincidir con el filósofo alemán Leibniz con su principio de indiscernibilidad.

No obstante el peso crítico del EPR, y del debate que suscitó, de éste resultó vencedora la Mecánica Cuántica aunque sin acabar de convencer con los argumentos de positivismo radical de Copenhagen. El principal argumento contra la condición de localidad exigida por los de EPR, lo esgrimió Bohr aduciendo que en el experimento en cuestión no se presenta violación de la insuperabilidad de la velocidad de la luz, ya que las dos partículas al haber estado en contacto quedan "intrincadas" en un todo indivisible representado por la función de onda con lo cual no hay ninguna transmisión de señal prohibida por la teoría einsteniana. Ante lo no muy convincente del argumento, han surgido hipótesis como la de las variables ocultas para tratar de explicar el "mecanismo" del estado "intrincado" surgido por el previo contacto entre las partículas.



**A. Einstein**



**B. Podolsky**



**N. Rosen**

La Paradoja EPR ha suscitado y sigue suscitando controversias. A partir de 1964 el físico irlandés John Bell dio a conocer al respecto sus teoremas con la llamada desigualdad de Bell. Con ésta se demuestra que una serie de teorías que pretenden completar la Mecánica Cuántica, las llamadas teorías locales de variables ocultas (variables clásicas mediante las cuales se pretende aplicar a la Mecánica Cuántica los cánones clásicos) son incompatibles con la teoría cuántica. En consecuencia, no es posible comprender la realidad cuántica de manera netamente clásica.

Veamos una idea sobre en que consiste la desigualdad de Bell. Consideraremos las orientaciones del espín, admitiendo la existencia de variables ocultas, no tomándolas en una sola dirección sino sus proyecciones en tres direcciones  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , las cuales no tienen que ser ortogonales. Consideremos la ejecución del experimento EPR fijándonos sólo en la partícula no afectada por medición directa. Llamemos  $P_{ab}$  a la probabilidad de ocurrencia de la correlación de espín  $+$  en  $a$  y  $-$  en  $b$ . Si llamamos  $\Theta_{ab}$  al ángulo entre las direcciones  $a$  y  $b$ , en vez de  $P_{ab}$  pondremos  $P(\Theta_{ab})$ . Igual criterio seguiremos para las correlaciones de espines en  $a$  y  $c$  y  $b$  y  $c$ . Con estas notaciones la desigualdad de Bell se escribe así:

$$P(\Theta_{ab}) + P(\Theta_{bc}) \geq P(\Theta_{ac})$$

La Mecánica Cuántica muestra que para cualquier  $\Theta$ , se cumple que  $P(\Theta) = \frac{1}{2} \text{seno}^2 \Theta/2$ . Si puesta esta igualdad en la desigualdad de Bell, ésta se cumpliera, las teorías sustentadas en variables ocultas mostrarían su validez, pero para una amplia gama de valores de  $\Theta$  no se cumple, por tanto la desigualdad de Bell de esa

manera muestra lo que pudiéramos llamar el triunfo de la Mecánica Cuántica al menos en esta batalla.

El aporte de Bell, al comprobarse la violación de la desigualdad, conjugado con las experiencias del físico francés Alain Aspect, indica que hay que apartarse, para algunos con tristeza que compartimos, de las condiciones que Einstein exigía de localidad y sensatez a cualquier teoría. A partir de las experiencias Bell-Aspect, se sugiere que nuestra racionalidad ha estado limitada por un prejuicio de universo mecánico (pero digerible, decimos nosotros), el cual ha concebido que los atributos cuánticos como la orientación del espín, son propiedades que se otorgan por separado a cada partícula que habiendo estado unidas se alejan, sino que es una propiedad compartida u holística para una nueva clase de objetos y que esa propiedad compartida permite la correlación a la que se refiere el experimento EPR.

El físico norteamericano David Bohm ha intervenido significativamente en el debate alrededor del experimento EPR, con argumentos basados en su teoría de la totalidad cuya tesis central se aviene con la explicación de Copenhagen de la no separabilidad de las partículas EPR.

Como explica en su libro "Wholeness and the Implicate Order", su principal argumento se traduce en considerar la naturaleza de la realidad como un todo coherente, nunca estático o completo pero en un interminable e infragmentable proceso de movimiento y desenvolvimiento. En el caso de las partículas en el experimento EPR, las partículas en todo momento permanecen perteneciendo sin fragmentación alguna al todo representado por una misma infragmentable función de onda. Bohm considera que ambas partículas en todo momento son distintas proyecciones del todo constituido por su unión desde el inicio del experimento.

Este físico y también filósofo norteamericano, propone en el citado libro una modelación muy ingeniosa del experimento que nos ocupa y del cual hacemos la siguiente versión que consideramos más didáctica.

El sistema de las dos partículas unidas (según Bohm un todo infragmentable) lo representa una tablilla en una de cuyas caras se dibuja una flecha y en la otra cara otra flecha en dirección opuesta. Una cámara de televisión (cámara A) tomará vistas de una cara de la tablilla y la transmitirá por canal ATV. Otra cámara (cámara B) tomará vistas de la otra cara y las transmitirá por otro canal, el BTV el cual no tiene ninguna conexión con el primero.. Un monitor captará las señales A y otro las B. El A observa una proyección del sistema( no una partícula separada) y el B otra proyección en el mismo instante no obstante estar muy distantes y sin ninguna conexión entre si. La simulación EPR se va así obteniendo. Se seguirá obteniendo si se gira 180 grados mirando la cara A, se habrá invertido la flecha en la proyección A, y en correspondencia inmediatamente se invertirá en B, sin que haya paso de señal alguna de una a otra.

La categoría proyección es fundamental en la teoría de Bohm. Es lo que vemos como "separado" cuando según Bohm es sólo la imagen proyectada de la totalidad "real".

La modelación descrita da una idea bastante aproximada no sólo del experimento EPR sino de la esencia de la Teoría de la Totalidad de David Bohm, de su criterio de pensar las cosas sin que medie fragmentación alguna ni siquiera entre lo observado y el observador.

Algunos ven en esto último cierta afiliación del físico norteamericano con la Interpretación de Copenhagen. Sin embargo nos parece advertir la no negación de la realidad en sus conclusiones. Esto último lo advertimos al no negar la realidad de

lo no observado, como se evidencia al no negarle realidad a las variables que se mantienen en un nivel subcuántico como son las llamadas variables ocultas, aunque no se hayan detectado experimentalmente.

Según Bohm éstas actúan en un nivel subcuántico cuando al ser sometida a observación o medida directa con un dispositivo, una partícula EPR, durante un tiempo que permita el equilibrio entre partícula y dispositivo, se propicia cierta correlación entre sus parámetros que se mantendrá durante la separación.

No obstante el conjunto de aspectos de la teoría de la Mecánica Cuántica que quedan sin aclarar y sobre los que indiscutiblemente se necesita continuar reflexionando, investigando, es indudable que constituye un paradigma del pensamiento científico y que ateniéndonos al criterio mas arriba expuesto de que resulta sensato pensar que existe una realidad fuera de nosotros aunque se nos escape a la verificación como verdad definitiva, lo cierto es que como formidable hipótesis de trabajo cumple a plenitud su cometido de permitirnos ahondar en el conocimiento humano y por ende ayudarnos a crecer espiritual y materialmente.

La Mecánica Cuántica que irrumpió en el escenario científico en los primeros años del pasado siglo XX. Ya antes se puede hablar de Física Cuántica que surge en 1900 con los estudios de Max Planck sobre la radiación del cuerpo negro. La curva empírica de la distribución energética de dicha radiación en función de la frecuencia o de la longitud de onda necesitaba de una expresión matemática. Después de los intentos de Rayleigh-Jeans, Wien y otros, Planck logró una fórmula que implicaba el que la radiación se producía no continuamente si no a saltos de elementos que fueron llamados cuantos de energía  $E = hv$  donde aparece la constante  $h$  de Planck que caracterizará las ecuaciones de la teoría Cuántica.

Paradójicamente, Albert Einstein le dio fundamental impulso a la teoría de los cuantos a los cuales, refiriéndolos a la luz se les llamó fotones.

Curiosamente por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico, emisión de electrones por incidencia en una superficie metálica de fotones de alta frecuencia (y por tanto alta energía), ganó el Premio Nobel, el cual nunca le fue otorgado por su obras cumbres: las Teorías de la Relatividad. Sin embargo Einstein se opuso a gran parte del basamento teórico de una disciplina de la cual fue uno de sus precursores: la Mecánica Cuántica.

La Mecánica Cuántica junto con las teorías de Einstein constituyen los pilares sobre los cuales se asienta la Física Moderna.

Y con todas las objeciones que le hacemos a la Interpretación de Copenhagen, constituye hasta ahora el sustento teórico de la monumental Mecánica Cuántica.

### **Bibliografía**

David Bohm. Wholeness and the Implicate Order.  
Joaquín González y Rafael Avila. La Ciencia que Emerge con el Siglo.  
Brian Greene. The Elegant Universe.  
Stephen Hawking y Roger Penrose. The Nature of Space and Time.  
Walter Isaacson. Einstein.  
Sam Treiman. The Odd Quantum.