

# Los misterios del mundo cuántico

J. Rubén Morones Ibarra

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UANL

morones@fcf.uanl.mx

*Quien no se sienta impresionado por la mecánica cuántica es que no la ha entendido.*

Niels Bohr.<sup>1</sup>

## RESUMEN

*La mecánica cuántica es una teoría que describe el comportamiento de los sistemas a escala atómica y subatómica. La concordancia entre la teoría y el experimento es excelente para una amplia variedad de fenómenos, lo cual hace de ella una teoría confiable. No obstante el impresionante éxito de la teoría, muchos físicos creen que sus fundamentos teóricos y sus bases conceptuales deben ser reinterpretados, pues conduce a resultados que salen fuera de la comprensión humana. Por tal motivo la consideran como una teoría incompleta.*



## PALABRAS CLAVE

Mecánica cuántica, paradoja EPR, gato de Schrodinger, no-localidad.

## ABSTRACT

*Quantum mechanics is a theory for describing systems in the atomic and subatomic scale. The excellent concordance between the theory and the experimental facts in a very wide range of phenomena makes it a very reliable theory. Nevertheless the impressive success of the theory, many physicists believe that the theoretical foundations and the conceptual basis of quantum mechanics should be reinterpreted, since some results of the theory are beyond the human understanding. This is the reason why some physicists consider it as an incomplete theory.*

## KEYWORDS

Quantum mechanics, EPR paradox, Schrodinger's cat, non-locality.

## INTRODUCCIÓN

Al final del siglo XIX, en el año 1890, William Thomson, después conocido como Lord Kelvin, el físico más notable de esa época en Inglaterra, declaró en una conferencia que la física había logrado desentrañar todos los misterios del mundo material y que solo dos “pequeñas nubes” permanecían pendientes de resolver por los físicos. Lord Kelvin invitaba a los estudiantes graduados en física a que buscaran otros campos del conocimiento ya que en la física no quedaba prácticamente nada por hacer.<sup>2</sup> Los pequeños problemas pendientes por resolver en la física a los que se refería Lord Kelvin, eran el resultado negativo de los experimentos de Michelson y Morley para detectar el éter luminífero y el problema de la radiación de cuerpo negro al que se le conoció con el nombre de Catástrofe

del Ultravioleta. Este último problema consistía fundamentalmente en que al calcular la cantidad de radiación que emite un cuerpo caliente, los resultados teóricos conducían a valores infinitos para la energía total de radiación, resultado por supuesto inadmisibles para cualquier teoría física.

Estos dos problemas que parecían pequeños para muchos físicos, condujeron a las dos grandes revoluciones en la física del siglo veinte: La teoría de la relatividad y la mecánica cuántica (M.C.), las cuales se originaron en el experimento de Michelson y Morley y en el problema de la radiación del cuerpo negro, respectivamente.

En el desarrollo de la física, cuando los instrumentos de medición alcanzaron una precisión tal que permitieron hacer observaciones al nivel atómico, se encontró que la descripción de los fenómenos de acuerdo con las leyes de la física que se usaban en el año 1900 y que hoy conocemos como física clásica, conducía a resultados que no concordaban con los experimentos, o que arrojaban resultados absurdos. Esta situación llevó a la creación de una nueva teoría para explicar los fenómenos del mundo atómico. Esta teoría, conocida hoy como mecánica cuántica (M.C.) fue desarrollada entre los años 1924 y 1927 por Erwin Schrodinger, Werner Heisenberg, Paul M. Dirac y otros.

A diferencia de las teorías clásicas como la mecánica o el electromagnetismo, donde en principio se puede predecir con precisión absoluta cual será el resultado de la medición de una cantidad física, en la mecánica cuántica esto no sucede. La capacidad



Werner Heisenberg (1901-1976), físico austriaco creador de la mecánica cuántica matricial.

de predicción es una de las características de una teoría clásica; poder predecir donde caerá un objeto que se lanza al aire, cuánto tiempo tardará en caer al suelo y cuál será su trayectoria, por ejemplo, son aspectos que hacen confiable y le dan valor a una teoría sobre la dinámica de una partícula en el campo gravitacional de la Tierra. Una teoría con esta particularidad, se dice que es determinista, y significa que si se conocen las condiciones iniciales de un sistema, podemos predecir cómo evolucionará éste en el futuro.

En la mecánica cuántica no se puede predecir el resultado de la medición de una cantidad física, solo se puede hablar de la probabilidad de obtener un determinado valor, lo cual hace que la M.C. sea una teoría no determinista. Esta característica molestó a muchos físicos en los inicios de la teoría; entre estos físicos estaba Einstein, quien expresó su desacuerdo con la mecánica cuántica en una frase que se ha hecho famosa: “Dios no juega a los dados”.<sup>3</sup> Einstein era un partidario ferviente del principio de causalidad, y como consecuencia, del determinismo, y no aceptaba el concepto de probabilidad como fundamento válido para una teoría. Como dato curioso o irónico de la historia, tenemos que Einstein, quien había revolucionado la física con sus teorías relativistas, la especial y la general, y quien había dicho que “el sentido común es el conjunto de prejuicios que se forman en el individuo antes de los dieciocho años”, ahora él mostraba esta postura al rechazar la mecánica cuántica, una teoría revolucionaria que rompía con el prejuicio del determinismo.

La M.C. introdujo conceptos completamente novedosos en la física. El principio de incertidumbre de Heisenberg, que niega el determinismo, condujo a una nueva visión de la realidad. La manera como la naturaleza se comporta a la escala atómica choca totalmente con los esquemas mentales que nos forjamos basados en la física clásica. Sin embargo, dado el éxito de la teoría para explicar los fenómenos observados y la concordancia de sus predicciones cuantitativas con los resultados experimentales, la teoría recibió la aceptación de una gran cantidad de físicos. No obstante este éxito, la interpretación filosófica de la mecánica cuántica estuvo y está todavía sujeta a apasionadas discusiones entre los físicos y filósofos.

## LAS TEORÍAS CLÁSICAS

Según el punto de vista clásico, toda teoría científica debe ser objetiva, causal, determinista, local y completa. La objetividad significa que la naturaleza es independiente de nuestra conciencia, es decir, es independiente de nuestra percepción y los resultados de una observación o medición no dependen del observador.

El principio de causalidad exige que dadas ciertas circunstancias deben producirse siempre los mismos efectos o resultados. La idea de una teoría causal es que a una causa determinada le corresponde un efecto único. En cuanto al determinismo, como ya se mencionó, significa que dadas las condiciones iniciales y las leyes de movimiento, contenidas en la teoría, es posible determinar el estado del sistema en cualquier tiempo futuro.

La localidad de una teoría establece que un suceso físico no puede afectar a otro suceso con el que no esté conectado causalmente.<sup>4</sup> Una conexión causal, significa que un efecto provocado en un lugar solo puede afectar a un sistema después de que la señal ha llegado hasta él, siguiendo las restricciones que impone la relatividad especial. Un golpe sobre una mesa aquí en la Tierra, no puede afectar a un sistema en la luna antes de un segundo, que es lo que tarda un rayo de luz en viajar de la Tierra a la luna.

Una teoría satisface el postulado de completez si a cada variable definida en la teoría le corresponde una cantidad física en un sistema que se puede medir con precisión absoluta. Esto significa que a cada variable de la teoría le corresponde un elemento de realidad, cuyo valor podemos determinar sin perturbar al sistema.

## LA MECÁNICA CUÁNTICA

El mundo de los átomos tiene un comportamiento completamente diferente al mundo macroscópico. Ahí suceden cosas raras, diríamos, pero con la expresión “cosas raras” lo que queremos decir es simplemente que estas cosas no encajan con nuestras ideas preconcebidas, determinadas por la información que obtenemos del mundo a través de nuestros sentidos y de los aparatos de medición. Estas ideas establecidas en nuestra mente impiden que comprendamos los fenómenos del mundo atómico, donde ocurren cosas que nunca habíamos visto antes

y que difícilmente hubiéramos podido imaginar.

Los físicos y filósofos pensaron durante mucho tiempo que el principio de causalidad, debería ser parte esencial de toda ciencia, pues se espera que siempre que se tengan las mismas condiciones deben ocurrir los mismos fenómenos. Sin embargo, el principio de causalidad no tiene validez a escala atómica, ya que a una misma causa pueden seguir diferentes efectos, cada uno con cierta probabilidad de ocurrir. Tampoco el determinismo es una característica de la teoría cuántica, pues en el nivel atómico solo se pueden hacer predicciones probabilísticas. En el decaimiento de un núcleo radiactivo solo se puede hablar de la probabilidad de que en el próximo minuto decaiga emitiendo una partícula, pero no se puede asegurar nada. Aún usando dos núcleos idénticos, en idénticas circunstancias uno puede decaer en la siguiente hora y el otro no.

La objetividad, la localidad, la causalidad, el determinismo y la completez de los que se habla en las teorías clásicas, están totalmente en duda al nivel atómico y subatómico, como se verá en el desarrollo de este artículo. La imagen de la realidad cuántica es muy distinta a aquella que nos proporcionan nuestros sentidos y el sentido común. El conocimiento de los sistemas a escala atómica solo se puede lograr en forma abstracta, a través de expresiones matemáticas y no tenemos por qué tratar de ajustar su comportamiento a nuestras concepciones usuales, las cuales tienen su origen en la observación de objetos o sistemas de una escala muy diferente, la escala macroscópica o humana.

## EL PROBLEMA DE LA MEDICIÓN

El proceso de realizar una medición sobre un sistema u objeto macroscópico no ocasiona ninguna alteración del estado del sistema. Supongamos que queremos medir la posición de una bola de billar, lo que hacemos es interaccionar de alguna manera con ella, arrojándole luz, por ejemplo, y la luz reflejada nos dirá donde está localizada la bola. Todo tipo de medición requiere una interacción entre el sistema que deseamos medir y el equipo que registra los valores de la medición. En el caso de objetos macroscópicos estas mediciones no afectan para nada al sistema. Medir la longitud de un objeto con una regla aparentemente no ocasiona ninguna perturbación al objeto que se mida. Algo

muy diferente ocurre si tratamos de medir la posición de un electrón. Para localizarlo le arrojamos luz, y como ésta se comporta como partícula, al chocar los fotones con el electrón perturban su estado de manera perceptible, transfiriéndole una cantidad de movimiento apreciable. Notamos entonces que a la escala cuántica el proceso de medir cambia la realidad, entendida ésta como el estado del sistema sin observar.

La objetividad que se supone en el mundo macroscópico se destruye en la M.C. debido a que el sujeto que realiza la observación de un sistema cuántico provoca modificaciones en el sistema comparables a los valores que mediría de las cantidades físicas de interés. Esto nos lleva a que el mundo comprensible y objetivo no existe en la escala de los átomos. Para sistemas cuánticos, se concluye que no es posible observar la realidad sin modificarla, en este sentido la M.C. no es una teoría objetiva.

Una teoría que satisface los requisitos de objetividad y localidad se dice que es una teoría realista local.<sup>5</sup> En 1964 el físico inglés John Bell publicó un trabajo, donde propone un criterio que puede ser aplicado mediante un diseño experimental, para determinar si una teoría es objetiva y local. Este criterio, introducido a través de unas desigualdades que llevan ahora el nombre de desigualdades de Bell, ha sido aplicado en varios experimentos dando como resultado que la mecánica cuántica no es una teoría realista local.<sup>6</sup>

En M.C. el estado de un sistema está determinado por una función a la que se le conoce como

función de onda. De acuerdo con la M.C., toda la información física del sistema puede ser obtenida a partir de esta función de onda, sin embargo a las variables dinámicas del sistema no se les asigna valores definidos sino que solamente pueden ser determinados probabilísticamente; no se puede predecir con certeza ningún resultado, solo se pueden obtener promedios de las cantidades físicas medibles. Esta falta de certeza es lo que molestó a algunos físicos quienes, como Einstein, siempre la juzgaron como una teoría incompleta.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que las características de la M.C. no llevan a la conclusión de que en el mundo macroscópico puedan tener lugar fenómenos de los que llaman paranormales, como la telepatía o la percepción extrasensorial. Aun cuando la M.C. ha revelado que los sistemas a escala atómica violan causalidad o localidad, a escala macroscópica estos principios siguen teniendo validez. La violación de la objetividad no debe utilizarse para concluir la validez de fenómenos que no han sido observados. La M.C. es una teoría científica y como tal pretende explicar el comportamiento de la naturaleza, donde el experimento es el que decide la validez o invalidez de la teoría. La experimentación exige la preparación de sistemas que puedan estudiarse reproduciendo el fenómeno una y otra vez. Una teoría científica no incorpora fenómenos que no pueden observarse en forma sistemática, y en el caso de fenómenos que ocurran aquí en la tierra, estos deben ser reproducibles. Cualquier cosa que no satisface esto no es objeto de un estudio científico.



P. A. M. Dirac, físico inglés que contribuyó al desarrollo de la mecánica cuántica.

## ¿QUÉ SIGNIFICA ENTENDER?

El significado de entender o comprender algo desempeña un papel importante en M.C.; no comprender algo significa que no podemos conectarlo con la información que tenemos o con los conocimientos que poseemos. Cuando lo que debemos aceptar como nuevo, choca con ideas preconcebidas o con nuestras estructuras de pensamiento, entonces lo rechazamos. Debemos admitir que la naturaleza a escalas de longitud muy pequeñas, no tiene por que seguir los mismos patrones de comportamiento que obedece a escala macroscópica. Si reconocemos esto, y que el mundo macroscópico no es otra cosa que la manifestación del comportamiento promedio de

cantidades muy grandes de átomos, entenderemos que la mecánica cuántica es una teoría que no tiene por que cumplir con los requisitos de objetividad, localidad, causalidad, determinismo y completez, que se les exige a las teorías clásicas.

## PARTÍCULAS Y ONDAS

Los conceptos de partícula y onda los entendemos como entes diferentes y es así como se manejan en la física clásica. A una partícula se le asocia una cantidad de materia en una región pequeña del espacio, donde pequeño quiere decir que posee dimensiones mucho menores que las dimensiones del sistema que estamos considerando. Por ejemplo, un átomo es una partícula cuando se considera que forma parte de un gas dentro de un volumen de un decímetro cúbico, pero un átomo no puede considerarse una partícula cuando estamos estudiando sus estados de energía. Similarmente la Luna, la Tierra o el Sol pueden considerarse como partículas a escalas mayores que el tamaño del sistema solar. En cuanto al concepto de onda, estamos familiarizados con él por las ondas en el agua, o en un resorte o en una cuerda. Una onda se extiende por una región del espacio y no se le asocia una posición definida. Cuando usamos el concepto de partícula en un sistema físico, ésta se considera como un punto y una onda tiene una descripción matemática más abstracta, la de una función que satisface una ecuación conocida precisamente como ecuación de onda.

Dicho lo anterior nos encontramos con que partícula y onda son cosas diferentes. Sin embargo en el mundo cuántico resulta que la distinción entre onda y partícula desaparece, teniendo los objetos del mundo cuántico, como los átomos, los electrones, los núcleos atómicos, etc. un comportamiento dual, el de onda y partícula a la vez; este es uno de los enigmas del comportamiento cuántico.

## HECHOS EXPERIMENTALES

Richard Feynman, uno de los más distinguidos físicos teóricos del siglo XX ha dicho que todos los misterios de la mecánica cuántica pueden ser exhibidos en el experimento de la doble rendija.<sup>7</sup> Los orígenes de este experimento se remontan al año de 1801, cuando el físico inglés Thomas Young lo realizó, logrando probar el comportamiento

ondulatorio de la luz. El experimento, que se muestra en la figura 1, consiste en hacer pasar luz a través de una pantalla que contiene dos orificios pequeños. El patrón de difracción producido en la pantalla, se debe a efectos de interferencia de las ondas. Este fenómeno solo puede ser producido por ondas y fue esta la primera prueba concluyente de la naturaleza ondulatoria de la luz.<sup>8</sup> Por otra parte, en el año de 1905, en otro tipo de experimentos, se llega a la conclusión de que la luz exhibe también un comportamiento de corpúsculo, a estos corpúsculos de luz se les llama fotones.

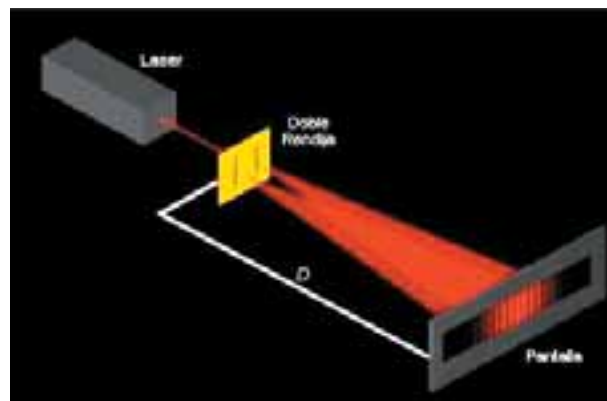


Fig. 1. Experimento de Young de la doble rendija.

El carácter corpuscular de la luz ha sido probado en múltiples experimentos, lo que demuestra el comportamiento dual, de onda y partícula de la luz. Supongamos que queremos estudiar el comportamiento corpuscular de la luz en el experimento de la doble rendija. Para conseguir esto disminuimos la intensidad de la luz a valores de, por ejemplo, un fotón cada cinco segundos. Si hacemos el experimento con una sola rendija, tapando la rendija derecha, por ejemplo, lo que se observa es una línea iluminada como se muestra en la figura 2. Si tapamos ahora la rendija izquierda, los fotones pasaran por la rendija derecha, la cual está abierta, y lo que se observa es la figura 3, que corresponde a una línea semejante a la de la figura 2 pero desplazada a la derecha, ya que los fotones pasan por la rendija derecha.

Lo sorprendente ahora es que si dejamos abiertas las dos rendijas y realizamos el experimento, entonces no observamos lo que se muestra en la figura 4, que es lo que esperaríamos, sino el patrón de difracción de la figura 1. Esto indica que puntos



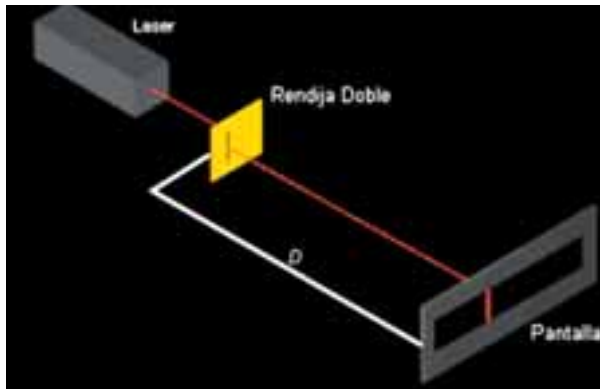


Fig. 2. Resultado del experimento de Young con una sola rendija. Se ha tapado la rendija derecha en el experimento de la figura 1.

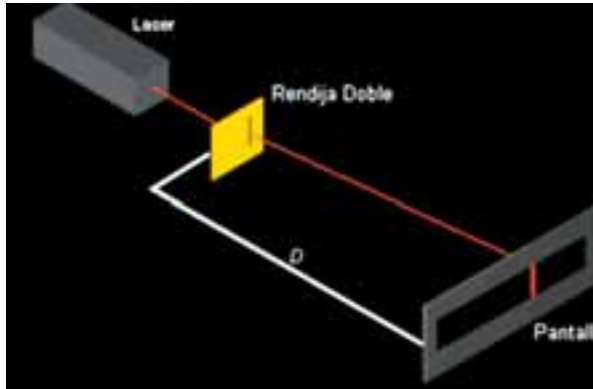


Fig. 3. Resultado del experimento de Young con una sola rendija. Se ha tapado la rendija izquierda en el experimento de la figura 1.

que estaban iluminados en el experimento de una sola rendija, aparecen ahora oscuros y viceversa. Este resultado es verdaderamente asombroso, parece decir que el fotón “sabe” si están abiertas las dos rendijas o una sola. Lo que ocurre realmente es que una interpretación del fenómeno basada en el concepto clásico de trayectoria para una partícula no nos permite entender este fenómeno que es producto de un comportamiento ondulatorio de las partículas, es decir es un fenómeno de interferencia. Lo que se esperaría observar en un experimento con partículas es que al realizar el experimento con las dos rendijas abiertas, en la pantalla se registre la suma de las partículas que pasan por una rendija más las partículas que pasan por la otra. Sin embargo, el resultado observado es completamente distinto y por lo tanto desconcertante. La forma de explicar el efecto de interferencia es que el fotón pasa por las dos rendijas al mismo tiempo; Feynman, describe

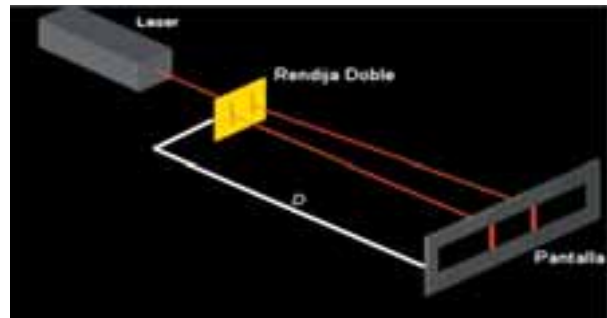


Fig. 4. Resultado que se esperaría si la luz se comportara como partículas que no interfieren.

esto diciendo que “el electrón (o el fotón en este caso) hace lo que quiere”.<sup>9</sup>

Existe algo más sobre este mismo experimento que causa asombro. Si queremos saber por donde pasa cada fotón y colocamos detectores en cada orificio, el patrón de difracción desaparece y lo que se observa es el comportamiento corpuscular de los fotones. En otras palabras, cuando observamos al fotón se comporta como partícula y cuando no lo observamos se comporta como onda, causando el fenómeno de interferencia. La conclusión es nuevamente que la observación modifica la realidad. Una descripción excelente de estos fenómenos se encuentra en el libro de Richard Feynman.<sup>7</sup>

Si el experimento de la doble rendija lo realizamos usando electrones, obtenemos exactamente el mismo resultado que cuando usamos fotones.

## LA PARADOJA EPR

Entre los físicos que se oponían a la interpretación de Copenhague, la cual se explica más adelante, estaban Einstein y uno de los creadores de la mecánica cuántica, Erwin Schrodinger. Existen dos famosos ejemplos, propuestos por estos científicos, para mostrar lo absurdo que puede resultar creer en la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. El problema propuesto por Einstein se conoce como La Paradoja EPR, debido a que fueron Einstein, Podolsky y Rosen, quienes la plantearon. El otro problema se conoce como El Gato de Schrodinger, situación planteada por Schrodinger con el mismo propósito que la paradoja EPR. Ambos problemas han quedado como ejemplo de experimentos pensados que han puesto en duda a la completitud de la mecánica cuántica.

La paradoja EPR, cuya consecuencia ha sido considerada por muchos físicos como la más extraña de la M.C.,<sup>10</sup> conduce a la transmisión de señales a velocidades mayores que la de la luz. Este resultado es contrario a la relatividad y además viola el principio de causalidad y la hipótesis de localidad. Esto significa que se pueden determinar los valores de una cantidad física conociendo los valores de otra cantidad en otro punto del espacio, que no se conecta con el primero mediante una relación causal; ¡un resultado evidentemente inaceptable para una teoría científica!

La paradoja EPR plantea el experimento pensado del decaimiento de una partícula en otras dos, cada una de espín  $\frac{1}{2}$ . Si inicialmente el momento angular orbital es cero, entonces, debido a la conservación del espín, las dos partículas en las que decae deben tener espines opuestos, que designaremos como  $\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$ , correspondiendo a los estados  $| \frac{1}{2} \rangle$  y  $| -\frac{1}{2} \rangle$ , respectivamente. Puesto que las partículas, producto del decaimiento, se moverán en direcciones opuestas por la conservación del momento lineal, entonces se irán separando al transcurrir el tiempo. El estado del espín de cada una de las partículas no lo sabemos y según la mecánica cuántica, el estado general  $|\Psi\rangle$  de cada partícula, es una combinación lineal de ambos estados, así que  $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} | \frac{1}{2} \rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} | -\frac{1}{2} \rangle$ . Supongamos que después de que las partículas estén a una distancia de miles o millones de kilómetros una de la otra, realizamos la medición del espín en una de ellas, y obtenemos, por ejemplo, el valor  $\frac{1}{2}$  entonces inmediatamente la otra tomará el valor  $-\frac{1}{2}$ . Es como si la segunda partícula se enterara inmediatamente del resultado de la medición sobre la primera, sin que haya transcurrido el tiempo necesario para que le llegue una señal desde la primera partícula.

Experimentos basados en la paradoja EPR se han llevado a cabo en varias partes del mundo verificándose que efectivamente la M.C. es una teoría no-local. Los experimentos han sido realizados con fotones y se ha encontrado que sin que haya la posibilidad de que la información sobre el resultado de la medición en uno de los fotones se transmita al otro fotón, este último se comporta como si

“supiera” que se ha realizado una medición sobre el primero y conociera también los resultados de ésta. Este es uno de los enigmas de la M.C., donde la determinación del estado de uno de los fotones (o electrones), determina el estado del otro sin que exista una relación causal.

El propósito de la paradoja EPR era probar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta pues no puede explicar este fenómeno, y según nuestra intuición y nuestra lógica, debe existir algo que haga que ambas partículas tengan la información sobre sus espines, antes de realizar el experimento, cosa que la MC no tiene contemplada en su estructura.

## EL GATO DE SCHRODINGER

En términos muy sencillos podemos plantear este experimento de la siguiente forma: dentro de una caja cerrada y dentro de la cual no podemos ver, se colocan un gato inicialmente vivo y un núcleo radiactivo, el cual, al emitir la radiación, activará un mecanismo que permitirá que se libere un gas venenoso que matará al gato. Si queremos plantear matemáticamente el estado del gato en un tiempo posterior, entonces debemos escribir una combinación de estado de gato vivo y estado de gato muerto. Este es un ejemplo de lo extraño de la teoría cuántica. Considerando la absurda situación de gato vivo y gato muerto de este problema, un físico de prestigio, Robert Wald, dijo “si usted cree realmente en la mecánica cuántica, entonces no debe tomarla demasiado en serio”.<sup>11</sup>

La paradoja muestra una característica general de la mecánica cuántica, que indica que mientras no observemos al sistema, todos los estados son posibles y que solo cuando realizamos una medición, el sistema se colapsa o se realiza en un estado determinado, en este caso vemos al gato vivo o muerto, pero solo después de que abrimos la caja para realizar la observación. ¡Antes de abrir la caja el gato está vivo y muerto a la vez, o ni uno ni otro!. Esta característica de la mecánica cuántica es lo que la hace una teoría que viola objetividad, causalidad y determinismo.

En un experimento realizado en 1996 por un grupo de físicos de Estados Unidos, se consiguió atrapar mediante una trampa de láseres a un ión de berilio logrando que dos estados diferentes se



Erwin Schrodinger, (1887-1961), físico austriaco que desarrolló una formulación de la mecánica cuántica que lleva su nombre.

encontraran en posiciones distintas, separados una distancia de alrededor de 80 nanómetros. Esto indica que consiguieron que una propiedad cuántica que es el estado del átomo, se relacionara con una propiedad macroscópica, la posición del mismo. El resultado experimental fue asombroso, era como si el átomo se encontrara en ambas posiciones al mismo tiempo, es decir, en una superposición de estados, lo mismo que el problema del gato de Schrodinger.<sup>12</sup>

## EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

La M.C. impone restricciones a la precisión con la que se pueden medir simultáneamente ciertas parejas de cantidades físicas. Estas parejas se conocen en mecánica cuántica como variables complementarias, o variables canónicamente conjugadas y satisfacen una relación de incertidumbre o desigualdad de Heisenberg. Ejemplo de un par de variables complementarias son la posición y la velocidad. El determinismo de la física clásica que nos dice que si sabemos la posición y la velocidad de una partícula podemos conocer su trayectoria futura, no tiene validez en la teoría cuántica puesto que no podemos conocer la posición y la velocidad simultáneamente. De hecho, en la física cuántica el concepto de trayectoria de una partícula carece de sentido.

La razón por la cual la mecánica cuántica se interpreta en términos de probabilidades se debe precisamente al principio de incertidumbre de Heisenberg. Cuando se efectúan mediciones de una cantidad física en un sistema, lo que se hace es

realizar muchas mediciones sobre un conjunto de partículas que se encuentran en el mismo estado. Estas mediciones darán un conjunto de valores para los cuales podemos calcular la desviación estándar. El principio de incertidumbre establece que para el caso de dos variables complementarias como la posición y el momento lineal, el producto de estas desviaciones estándar siempre será mayor que un valor mínimo diferente de cero. Decimos entonces que hay un límite a la precisión con la que se pueden calcular un par de variables complementarias simultáneamente y solo podemos establecer sus valores probables.

Como ejemplo de aplicación del principio de incertidumbre tomemos el caso de un electrón en el estado de momento angular orbital  $L=0$  (electrón  $s$ ) en un átomo. Este electrón caería al núcleo atómico debido a la atracción eléctrica que el núcleo ejerce sobre él. La razón por la que no cae es que al concentrarse el electrón en una región tan pequeña como el núcleo, su velocidad se incrementaría a valores muy grandes, por el principio de incertidumbre y esta velocidad haría que el electrón se escapara del núcleo. Cuando se descubrió el núcleo atómico, se pensó que había electrones dentro de él, pero un modelo de núcleo atómico con electrones conduce a dificultades con el experimento. El problema de la estructura del núcleo se resolvió con el descubrimiento del neutrón y la aplicación del principio de incertidumbre vino a reforzar la observación experimental de que dentro del núcleo atómico no hay electrones.

Otro aspecto extraño del mundo cuántico es que ahí el tiempo no tiene dirección privilegiada, es decir, podemos tomar el tiempo en una dirección o en otra y los procesos son indistinguibles, ya que las expresiones de la mecánica cuántica que permiten calcular cantidades físicas, son invariantes ante el cambio de  $t$  por  $-t$ , siendo  $t$  el tiempo. De hecho esto se cumple también para todas las leyes fundamentales de la física. La flecha del tiempo aparece cuando consideramos sistemas de muchas partículas fuera del equilibrio, entonces el sistema evoluciona hacia estados de equilibrio los cuales son más probables, es aquí donde se origina el concepto de la dirección del tiempo. El envejecimiento no es otra cosa que el aumento de la entropía, la evolución de los sistemas macroscópicos hacia estados cuya probabilidad de



ocurrencia es mayor que la de los estados presentes. Pero en el mundo de las partículas fundamentales no ocurre esto, las partículas inestables, como los núcleos atómicos, por ejemplo, no envejecen. La probabilidad de que decaiga un núcleo radiactivo en el próximo segundo no depende de cuándo fue creado o formado este núcleo. Un núcleo que se formó hace millones de años tiene la misma probabilidad de decaer que uno idéntico que se acaba de formar en el laboratorio. En este sentido su comportamiento es muy diferente a las formas de vida superiores, como los animales o los seres humanos; una persona de 80 años tiene una probabilidad mayor de morir que un niño de diez años, por ejemplo.

## INTERPRETACIONES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

En el análisis de los fundamentos de la teoría cuántica que es el estudio de los problemas filosóficos a los que la teoría da origen, se plantean las siguientes cuestiones:

- a) ¿Es la mecánica cuántica una teoría incompleta?,
- b) ¿Es la indeterminación una característica de la naturaleza que nos impide realizar mediciones precisas? o,
- c) ¿Es sólo una falla en los aparatos de medición lo que limita la precisión del conocimiento del mundo?.

Hay entre los científicos dos posturas filosóficas fundamentales para juzgar a la teoría cuántica. Una de ellas es la realista,<sup>13</sup> la cual asegura que la naturaleza es objetiva y que los objetos están ahí independientemente de que sean o no observados, que un átomo radiactivo decae emitiendo partículas sin importar si lo observamos o no, o que si medimos una cantidad física, como por ejemplo la posición de una partícula, encontraremos a la partícula donde está, porque ya estaba ahí antes de realizar la medición. Esta interpretación plantea que la mecánica cuántica, a pesar de ser una teoría exitosa desde el punto de vista operacional ya que predice cuantitativamente lo que se observa experimentalmente, es una teoría incompleta, a la que le falta introducir variables dinámicas nuevas, que los físicos llaman variables ocultas, que son las cantidades que permitirán

comprender los fenómenos cuánticos.<sup>14</sup> En este sentido la indeterminación de las cantidades físicas no es algo intrínseco de la naturaleza sino una muestra de nuestra ignorancia sobre los sistemas cuánticos.

La otra interpretación es conocida como ortodoxa o de Copenhague; esencialmente sostiene que las variables de un sistema cuántico no tienen valores determinados antes de medirlos, que es el proceso de medición lo que fuerza al sistema a definirse por un valor de la variable que estamos midiendo. Según la interpretación de Copenhague, la mecánica cuántica es una teoría intrínsecamente probabilística.

Lo esencial de la indeterminación cuántica no significa que no podamos saber cuál es el estado de un sistema antes de medirlo o de interactuar con él, sino que significa que el concepto de una partícula o un sistema en un estado determinado antes de medirlo, no tiene sentido en mecánica cuántica.<sup>15</sup> Solo tiene significado la descripción del sistema como una superposición de todos los estados posibles, compatibles con las condiciones del sistema. Por ejemplo, el estado de espín de un electrón está dado por una superposición de los estados  $\left|\frac{1}{2}\right\rangle$  y  $\left|-\frac{1}{2}\right\rangle$ , o en el caso del gato de Schrodinger, el estado de gato vivo y muerto. De manera similar, cuando decimos que no podemos determinar dónde se encuentra el electrón antes de realizar la medición, significa que puede estar en cualquier parte del universo, con probabilidades diferentes para cada región, por



Max Born, (1882-1970) físico alemán que dio la interpretación probabilística a la función de onda.

supuesto. Si encerramos al electrón en una caja, existe la probabilidad de encontrarlo en cualquier parte dentro de ella, con una cierta distribución de probabilidad. Si después de realizar una medición de la posición de un electrón lo localizamos en un determinado lugar, podemos hacer la pregunta, ¿dónde estaba el electrón antes de localizarlo?. La respuesta según la M.C. es que no tenía posición precisa, su comportamiento ondulatorio hacía que estuviera “esparcido” en todo el espacio.

La mecánica cuántica conduce a resultados más allá de la comprensión humana, sin embargo, a pesar de la complejidad de la teoría cuántica y de los conflictos filosóficos sobre sus fundamentos, los resultados de sus aplicaciones son una indiscutible prueba de su validez y de su utilidad. Los fenómenos cuánticos son una realidad en nuestro mundo macroscópico, el magnetismo de los materiales es una propiedad relacionada con el espín del electrón, que es un fenómeno estrictamente cuántico; el color de los materiales se origina en los niveles de energía cuantizados de los electrones en los átomos. Por otra parte las aplicaciones del conocimiento del comportamiento cuántico, son la base de la tecnología moderna; el transistor, los chips, los láseres, equipos de resonancia magnética nuclear, los materiales superconductores, etc. Son solo algunos ejemplos del impacto de la mecánica cuántica en la sociedad.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Kaku, M., Beyond Einstein, 1995.
2. Kafatos, Menas and Nadeau, Robert, The Conscious Universe, 1990.
3. Einstein, A. y Born, M., Correspondencia 1916-1955, 1973.
4. Nadeau, Robert and Kafatos, Meneas, The Non-Local Universe, 2001.
5. Mandl, F., Quantum Mechanics, John Wiley and Sons, 1997.
6. Rae, Alastair, I. M. , Quantum Mechanics, 2002.
7. Feynman, R. Lectures on Physics, Vol. III, 1965.
8. Halliday, D., Resnick, R. y Krane, Física Vol. II, 1999.
9. Ryder, Lewis, Quantum Field Theory, 2000.
10. Silverman, Mark P., More than one Mystery, 1994.
11. Penrose, Roger, The Large, the Small and the Human Mind, 2000.
12. Artús, Pau y Crehuet, Ramon, Mecánica Cuántica, 2001.
13. Baggot, Jim, The Meaning of Quantum theory, 1993.
14. Griffiths, D. Introduction to Quantum Mechanics, Prentice hall, 1995.
15. Greene, Brian, The Elegant Universe, 1999.

