

Algunos aspectos de la Mecánica Cuántica

M.R.Guerra

Índice Temático

Ideas fundamentales de la Mecánica Cuántica

Parte I

Un esquema previo

Causalidad en la Filosofía

Causalidad en la Física Determinista

Causalidad en la Mecánica Cuántica

Incertidumbre

Parte II

Generalidades

“Realismo” y Mecánica Cuántica

Función de onda de un sistema

Ecuación de su evolución

¿Qué significado se le atribuye y qué información proporciona la “función de onda”?

El “principio de superposición de estados”

El problema de la “medida”

1. “Colapso” de la función de onda

2. Los “universos paralelos de Hugh Everett III”

El “azar” ¿es o no constitutivo de la realidad?

El “problema de la realidad”

Complementariedad

Incertidumbre

La “paradoja” Einstein- Podolsky- Rosen

El Teorema de John Bell

Bibliografía

*Ideas fundamentales de la Mecánica
Cuántica*

$$**H:** \psi = (j\hbar/2\pi) \cdot \partial\psi/\partial t$$

Parte I

Un esquema previo

Causalidad en la Filosofía

La idea de “causalidad” se remonta a Aristóteles:

1. *causa materialis*- (aquello de lo que está hecho algo)
2. *causa formalis*- (forma de lo que se ha confeccionado)
3. *causa finalis*- (finalidad que se persigue con lo creado)
4. *causa efficiens*- (aquello que es responsable de la creación)



El enunciado más común del Principio de Causalidad en la forma “todo lo que sucede presupone algo que opera como “causa”, se refiere a la “causa efficiens”, que se complementa con la afirmación: “causas iguales generan efectos iguales”



El aspecto relevante de una ley causal de una ley que no lo es, consiste en que la primera debe incluir la posibilidad de predicción en el futuro a partir del presente y del pasado.

Este encadenamiento de hechos se hereda de la estructura lógico-deductiva que presenta la matemática. Es en definitiva una extensión del terreno lógico al terreno fáctico.



Kant acepta la crítica de Hume sobre la validez del Principio de Causalidad, cuando expresa: “¿Cómo puede algo cambiar y cómo es posible que a un estado le suceda otro?...De esto no tenemos la menor noción *a priori*.”



Kant sostiene que como el Principio de causalidad no puede deducirse de los conceptos de “causa” y “efecto”, dado que no es una proposición *analítica a priori*, debe ser una proposición “sintética”.



Para el *empirismo tradicional*, una “proposición sintética” solamente se puede fundamentar por la experiencia.

Sin embargo, Kant sostiene que existen “juicios sintéticos necesarios” que se deben cumplir *a priori*. Estos juicios exigen para su validación una “aceptación trascendental”

De esta forma, la “Principio de Causalidad” se manifiesta como una condición de posibilidad de que se presenten en nuestra experiencia “cosas y hechos”.

Afirma: “El principio de la relación de causalidad en la sucesión de los fenómenos tiene, pues, también validez *anterior a todos los objetos de la experiencia...*, puesto que *él mismo* es el fundamento de que ellos sean *experimentables*”

Causalidad en la Física Determinista

La suposición básica es la que sigue: “los objetos macroscópicos se caracterizan en forma unívoca por la totalidad de sus propiedades medibles y como entes en el espacio y el tiempo, deben obedecer a la Ley de Causalidad”



En la Mecánica Clásica, se demuestra que la totalidad de las propiedades se pueden representar a partir de un par de “observables”: x (posición) y p (momentum).

Esto se debe a que el formalismo hamiltoniano establece para determinar las ecuaciones horarias del movimiento, el sistema de ecuaciones diferenciales:

$$dx/dt = \partial H/\partial p$$

$$dp/dt = - \partial H/\partial x$$

Estas relaciones, permiten determinar

$$x = x(t);$$

$$p = p(t)$$

Si elegimos las condiciones iniciales quedan *unívocamente* determinadas *las dos* funciones anteriores en cualquier instante futuro (Teorema de Émile Picard)



En algunas oportunidades se sostiene que la simple existencia de una ley es una manifestación clara de la existencia de “causalidad”. Si así fuera, la “causalidad” no tendría intervención explícita en la Física, sino que se hallaría incluida como una manifestación implícita en la teoría. *No es este el caso. ¿Por qué?*

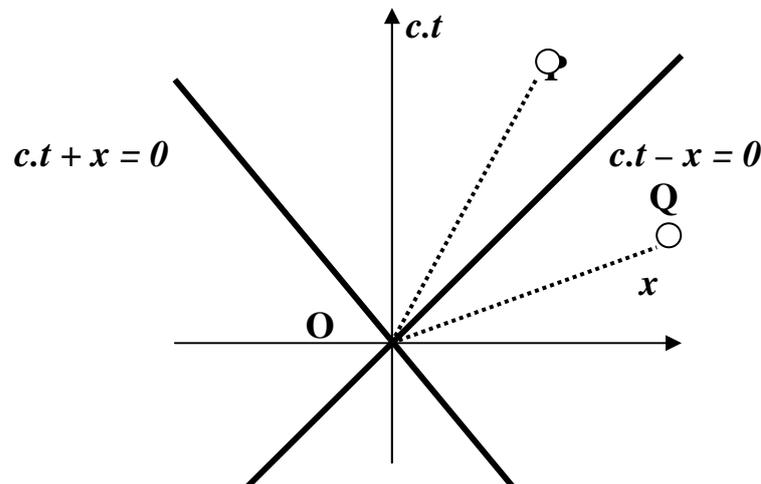


En primer lugar:

- a) Las leyes causales *deben* posibilitar el conocimiento del futuro a partir del presente y el pasado. Esto significa que las ecuaciones diferenciales deben responder a ciertas formas “adecuadas a lo que se desea describir”.
- b) *No todas* las soluciones de las ecuaciones diferenciales son aceptables para realizar la descripción de manera que el “Principio de Causalidad” debería realizar una elección adecuada.

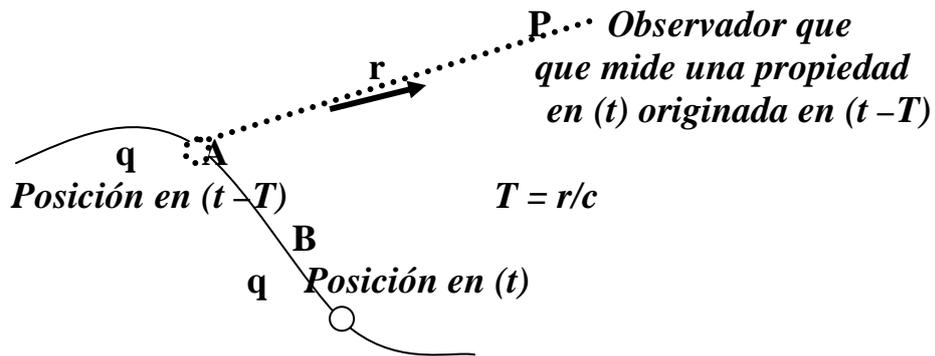


En la relatividad, la existencia de una velocidad límite no permite que exista “influencia causalidad” entre cualquier pareja de sucesos acaecidos en puntos diferentes del espacio tiempo. Solamente es posible una relación causal, entre puntos que tengan “separación temporal”

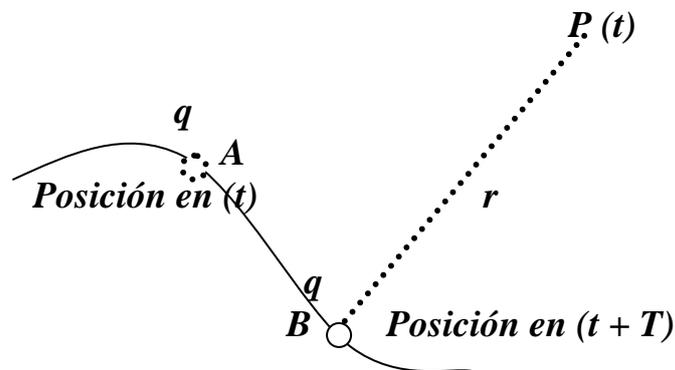


Los puntos como “P” son alcanzables desde O mediante señales de velocidad inferior a la velocidad de la luz. En consecuencia, un evento en P “puede” tener una relación causal con otro evento ocurrido (antes) en O. Diremos que O y P están “temporalmente separados”
Dos puntos como O y Q, exigen, si en ellos existen eventos conectados causalmente, la existencia de una señal de velocidad superior a la de la luz para relacionarlos causalmente. En consecuencia, O y Q, no pueden tener un vínculo causal entre sus eventos. Diremos que O y Q se hallan “espacialmente separados”

Las ecuaciones de las leyes asociadas a los campos relativistas (el campo electromagnético, por ejemplo), tienen soluciones “retardadas y adelantadas”, de manera que *no distinguen entre pasado y futuro*. Esto es consecuencia directa de la existencia de una “velocidad límite en la comunicación de información”



Suponemos una carga “ q ” que se mueve en una trayectoria. Cuando la carga alcanza la posición A en el instante $(t - T)$, parte una señal hacia P, que avanza con la velocidad de la luz durante el intervalo de tiempo $T = r/c$. Cuando la señal llega en “ t ” al punto P, se genera la propiedad allí. Sin embargo, cuando esto ocurre, la carga “ q ” ya no se halla en A, sino en B que describe su posición en el instante “ t ”. Esto obliga a escribir las propiedades en P, a partir de las “posiciones retardadas” de la carga “ q ”. Algo similar ocurre con las “señales adelantadas”, que también son soluciones compatibles con las ecuaciones (leyes) de la teoría electromagnética.



Las leyes indican que podemos interpretar los eventos electromagnéticos en P en el instante “ t ” atribuyéndolos a una posición retardada de la carga “ q ” (pasado) o a una posición adelantada de la carga “ q ” (futuro)

El concepto de “causalidad” debería exponerse en cualquier caso, como una **ley propia e independiente**, puesto que no sería posible describir los fenómenos en forma causal si el causalismo está implícito en las propias leyes.

Causalidad y Mecánica Cuántica

En general, las *propiedades objetivas de un sistema* (es decir, aquello que se conoce después del proceso de medida, ya que antes del mismo, no podemos hablar de “propiedades” que pre-existen a la propia medida) corresponden a determinado estado cuántico del mismo (simbólicamente esto se escribe “ $\Psi | >$ ”) en diferentes instantes. Este estado, considerado en diferentes instantes, determina las propiedades y define las modificaciones de los *accidentes de la misma sustancia*



Las condiciones para realizar medidas en el contexto cuántico, son fijadas por *las propias leyes* que elaboró la propia teoría. En cualquier sistema se tienen “propiedades objetivas” que cumplen *una ley de causalidad mecánico- cuántica*, que se establece de esta forma:

“si en cada instante “ t_0 ” se conocen todas las propiedades objetivas de un sistema, de ellas pueden calcularse plenamente las propiedades objetivas en cualquier otro instante $t > t_0$ ”.

Esta “ley de causalidad mecánico- cuántica se verifica para *objetos cuánticos*” y tiene un carácter *a priori* del mismo y no permite determinar mediante algún procedimiento aspectos del sistema que *no sean objetivos*

El fundamento de este enunciado es la llamada “*ecuación de Schrödinger*”, que describe la evolución determinista de la función de onda, mientras no se realiza ninguna medida sobre el sistema.



Si consideramos los objetos de la Física Clásica y los objetos de la Mecánica Cuántica, existen:

- a) Para la primera clase, existe una “ley de causalidad” establecida por el sistema de ecuaciones de Hamilton;
- b) Para la segunda clase, tenemos una “ley de causalidad” aplicable a la ecuación de Schrödinger y que *solamente* permite conocer “propiedades objetivas”;



Pero un sistema presenta también “*propiedades no objetivas*” que provienen del mismo estado cuántico que define las propiedades objetivas. En general, todas las propiedades que se relacionan mediante

relaciones de incertidumbre, forman parejas (llamadas “complementarias”) tales que si una es objetiva la restante no lo es.



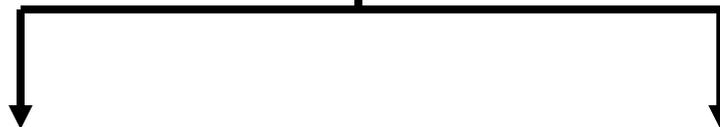
Cuando se dispone de una propiedad conocida “*a*”, asociada a una magnitud A, al medir otra magnitud B complementaria, se generan cambios en todas las probabilidades de manera que también la que correspondía a una magnitud *objetivada* (es decir: medida con precisión alta), se modifica. Este desconocimiento parcial, involucra una nueva probabilidad, de manera que: después de comprobar que se presenta la propiedad B, la probabilidad de encontrar la propiedad A, viene dada por:

$$W_B(A) = |\langle A | B \rangle|^2 < 1$$



En general, lo anterior es consecuencia de una “cadena” conceptual que podemos resumir así:

1) Los entes cuánticos (cuantones) tiene atributos similares, inseparables y excluyentes de las “partículas clásicas” y las “ondas clásicas”



2) Principio (de Broglie) de “dualidad onda- corpúsculo”
(**Complementariedad** de Bohr)

3) Desigualdades de Heisenberg
(**Incetidumbre**)

Acerca del “principio de complementariedad” establecido por Bohr en 1927, ya realizamos durante el desarrollo de la última Jornada del año 2009 un análisis de sus aspectos fundamentales.

Para esta Jornada nos parece más adecuado precisar algunos puntos acerca del concepto cuántico de “incertidumbre”. Se trata de un concepto esencial en la teoría cuántica y uno de sus “sellos distintivos” respecto de las teorías restantes.

Incertidumbre

La palabra “incertidumbre” tiene diferentes significados, y el mismo depende del contexto en el cual se la aplica¹.

a) En un contexto ***psicológico***:

La palabra se puede traducir por “falta de seguridad”, principalmente respecto al presente y al futuro (no se sabe “***qué va a pasar***”).

Epistémicamente es lo opuesto a “certeza”.

Con este significado, la “incertidumbre” puede provenir de razones ***subjetivas u objetivas***.

En el primer caso, la falta de información, ignorancia o limitaciones en el plano cognitivo, conforman un conjunto de obstáculos que impiden reconocer los “aspectos de la realidad”.

Esta “realidad” sin embargo, puede tener una estructura ***objetiva*** tal, que nos ***impida alcanzar la certeza***. Las “causas” del impedimento, pueden hallarse en:

1) ***porque la realidad se halla indeterminada;***

2) ***porque no está regida por leyes;***

3) ***porque en último caso, las leyes que conocemos no determinan o abarcan completamente los diferentes aspectos de los fenómenos observados.***

* Podría ocurrir, que existieran “leyes deterministas y causales” que gobernarán la realidad y que sin embargo, nuestra ignorancia se hallara en poder establecer las ***condiciones iniciales de un proceso natural***.

- Podría ocurrir también que la naturaleza estuviera regida por leyes, pero que estas fueran exclusivamente de tipo estadístico o probable y que ***no permitieran conocer eventos individuales con certeza sino en forma probable***.

- ***En este caso, dispondríamos de valores “medios” concretos asociados a conjuntos de eventos y valores probables asociados a individualidades. Aceptar esta posición, implica renunciar a la “causalidad estricta” de los eventos individuales y aceptar una “regularidad colectiva”.***

“Incertidumbre” es una palabra que en el contexto psicológico y social se considera o describe “algo negativo”, que se debe “eliminar porque genera angustia” ya que implica “algo inesperado y sospecha de inestabilidad”.

¹ El Diccionario de la Lengua Española (Edición 1970), establece: “Incertidumbre.f. Falta de certidumbre; duda, perplejidad”. Por su parte, la palabra “certidumbre” se introduce así: “Certidumbre.f. 1. Certeza; 2. Seguro: obligación de cumplir alguna cosa”.

Sin embargo, el concepto de “seguridad” no se considera siempre como “positivo”. Puede ser una razón que opere en contra de la “necesidad de crear”², o de “tomar decisiones”. Sin que se desconozca que en épocas pasadas, la Religión, la Filosofía y la Ciencia conocida misma, generaban ámbitos de seguridad que en los tiempos actuales parecen haber desaparecido.

Aparece en “reemplazo”, el “fantasma del *falibilismo*”:

- a) podemos “equivocarnos en *cualquier* momento”;
- b) o lo que es peor, “podemos estar *siempre* equivocados”. En estos casos, los “sistemas filosóficos” pasan a ser estructuras a las que podemos *adherir*, pero *no* confiar en que proporcionen de “todas las respuestas confiables que exigimos”.

Cabe preguntar:

1. ¿Cuál es el impedimento concreto para que alcancemos la certeza?
2. ¿Qué (si es que existe algo) nos autoriza a suponer que la certeza no es alcanzable?
3. ¿Se trata de una “imposibilidad lógica” o de una “imposibilidad fáctica”?
4. Lo que se plantea en la pregunta 3. ¿se puede resolver solamente a partir de “argumentos filosóficos” y ajustándonos a una concepción “apriorística” prescindente de las conclusiones de las “ciencias empíricas” o es necesario realizar una investigación sobre la “realidad”?
5. Si elegimos por el camino de tener en cuenta las “ciencias empíricas” y las teorías que las sustentan, ¿no ocurrirá que lo que consideramos “lógico y necesario”, dejen de serlo?

Un conjunto de respuestas posibles a estas preguntas, se dieron en el primer tercio del siglo XX, por la llamada “Escuela de Copenhague” y con su epistemología acerca del significado y alcance de la Mecánica Cuántica.

El concepto cuántico de “incertidumbre” se puede interpretar de dos formas:

1. **Subjetivamente**, en cuyo caso el contenido de la “incertidumbre” describe la intervención y modificaciones ineludibles que introducen los observadores al conocer a un sistema;

² Esto se observa generalmente durante las amenazas de guerra o durante el desarrollo de las mismas, donde se aceleran los procesos científicos en diversas áreas. Esto mismo ocurre, cuando las sociedades se enfrentan a grandes epidemias o conflictos que amenazan la vida.

2. **Objetivamente**, en cuyo caso el contenido de la “incertidumbre” describe un aspecto inherente a la “naturaleza misma de la realidad”.

De cualquier manera, lo anterior no agota el problema, puesto que es necesario entender *qué significan y qué debemos entender por las “relaciones de incertidumbre”*.

La escuela de Copenhague es radical: no existen “objetos observados”, “observadores” e “instrumentos” que sean *entidades independientes entre sí*. Con ello se desconoce el problema filosófico tradicional de la separación “objeto- sujeto”.

La nueva visión nos habla de un “no diferenciamiento” entre los tres elementos anteriores, para formar un solo conjunto inseparable. Al mismo tiempo, el “sistema cuántico” no tiene un estado definido (o definible), *hasta que se le mide y en este momento, “la propiedad o respuesta que logramos al ser observada adquiere realidad”*.

La posición extrema de esta concepción establece: si *no* hay observación, *no* hay “propiedad”. Se trata de una postura “subjetivista” o “idealista”, puesto que la “realidad es de *cada* observador y depende de él”³.

La palabra “indeterminista”, que también se utiliza en este punto por algunos autores, debido a que lo que ocurre en el nivel atómico, *se asume que se puede extrapolar a niveles de complejidad mayor*. En particular, si así fuera, debe reflejarse la “conducta atómica” en nuestra escala y en consecuencia *no* existe *certidumbre* alguna acerca de lo que ocurre u ocurrirá.

Sin embargo, la postura “indeterminista” anterior, no es la única existente. Para algunos intérpretes de la Teoría, el “*indeterminismo y la incertidumbre*” *coexisten con el determinismo y la certeza*.

Es necesario realizar algunas aclaraciones:

1. Sin entrar en detalles técnicos, es necesario establecer que las relaciones de Heisenberg se refieren a “cosas cuánticamente precisas” y no se aplican, por extrapolación, a “cualquier contexto”. No menciona que haya “incertidumbre” o “indeterminación” en “cualquier cosa”;
2. Si existe una relación de incertidumbre entre dos “variables complementarias”, las mismas *ni prohíben ni impiden que midamos*

³ “El Hombre es la medida de todas las cosas” (Protágoras); “Acerca de los dioses no puedo saber si existen o no, ni tampoco cuál es su forma, porque hay muchos impedimentos para saberlo con seguridad: lo oscuro del asunto y lo breve de la vida humana (“Gorgias”). Esta postura de la Escuela de Copenhague ha sido criticada por A. Einstein y K.R.Popper en varios escritos.

- las dos magnitudes, sino que el “afinamiento en la medida de una de ellas, desmejora la precisión en la restante”.* En cualquier caso, disponemos de dos respuestas afines a cada magnitud.
3. Las relaciones se refieren al estado actual o futuro del sistema, y afirman: los valores *anteriores* a la medida de las variables complementarias (datos que podemos tener de antemano con cualquier precisión), *no pueden ser utilizados para conocer el presente y el futuro del sistema.*
 4. La “indeterminación” no implica “falta de legalidad o regularidad”.
 5. El valor pequeño *a nuestra escala*, de la constante de Planck, se traduce en nuestro nivel en que es posible realizar predicciones muy aceptables, presentando un “mundo cuasi- determinista”. Este la razón fundamental por la cual el mundo cuántico *no parece reflejarse* en nuestro nivel macroscópico.
 6. El concepto de “observador” que está implícito en las relaciones de Heisenberg, se refiere a cualquier dispositivo de registro y *no necesariamente* e un “individuo humano”.
 7. Si como establece la Escuela de Copenhague, el observador “perturba” al sistema en el proceso de medida, se acepta una versión especial del “principio de causalidad” y “cierto grado de determinismo”.
 8. De hecho, las Ciencias Sociales, en un contexto diferente, reconocen desde *antes* de la creación de la Mecánica Cuántica, que el “observador perturba al sistema (social en este caso)”. La interacción se realiza por parte de un observador que dispone de antemano de un conjunto estructurado de conceptos que aplica y sirven de guía en la investigación.
 9. Las relaciones de incertidumbre, no plantean un mundo completamente azaroso o caóticamente desordenado. Indican la existencia de un mundo donde existe una *limitación a las certidumbres y donde las incertidumbres se dan solamente “bajo ciertas condiciones operativas”.* La Mecánica Cuántica *no* promueve un mundo gobernado por el “indeterminismo absoluto o la “incertidumbre completa”.
 10. La interpretación de la Mecánica Cuántica realizada por la Escuela de Copenhague, es precisamente eso: una interpretación y en modo alguna, “la única existente”. Hay interpretaciones “objetivistas y realistas” de la misma teoría (Popper, Reichenbach, Bunge,...).

Parte II

Generalidades

Los conocimientos elaborados por la Física en los tiempos que se extienden desde los presocráticos (V y IV A.C) hasta el primer tercio del siglo XX, se fundamentaron en una concepción determinista, causal y realista. Esta forma de concebir el mundo, incidió en las diversas formas de conocimiento. Las epistemologías clásicas elaboradas, cultivaron esta forma de entender el mundo, hasta que David Hume, con su postura escéptica, puso en duda ideas que se presentaban como intuitivas y obvias. El determinismo y el Principio de causalidad, operaron durante todo ese largo período, como recursos organizativos del conocimiento. Establecieron claramente, la posibilidad de prever en forma unívoca los sucesos naturales. Epistemológicamente, el futuro de un fenómeno evolutivo, se hallaba contenido en las condiciones del presente.

En el mundo de nuestra escala de medidas, la aceptación de estas ideas, permitió importantes avances teóricos y la elaboración de tecnologías que modificaron sustancialmente la vida individual de los hombres y de las sociedades que integraban⁴.

Esta visión de un mundo “ordenado y ordenable” a partir de principios estructurales de la realidad, tuvieron su incidencia en *todas* las manifestaciones humanas.

La *sociología* inicia en el siglo XIX un camino que pretende ser similar al de la Física⁵; muchos filósofos (como Thomas Hobbes) tratan de encontrar “leyes deterministas y causales”, para explicar la evolución de los grupos sociales.

Los *economistas* (como Adam Smith)⁶ elaboraron leyes generales, basadas en las expectativas y ambiciones observadas en los individuos que aplicadas a los grupos sociales indicaban cómo lograr “el progreso económico”;...

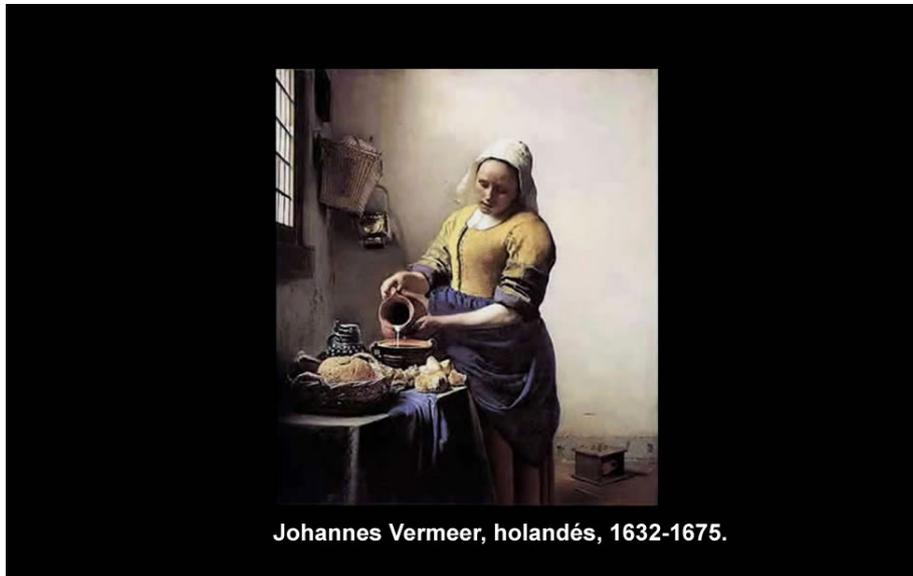
Los *artistas figurativos clásicos* por su parte, representaron e interpretaron el mundo con el criterio general que estableciera Protágoras: “el hombre es la medida de todas las cosas”. En el arte pictórico clásico, el análisis de un

⁴ Los casos más claros que reflejan estas opiniones son el surgimiento de la Mecánica de Newton (que nos permitió tener una visión diferente del sistema planetario, e *hipotéticamente* del universo); la Termodinámica (que dio origen al gran movimiento industrial del siglo XVIII); el Electromagnetismo (del siglo XIX, que modificó las comunicaciones y la generación y distribución de energía en todo el mundo).

⁵ Este es el caso del sistema elaborados por Auguste Comte, precursor de una “*física social*”, que el futuro demostró no era correcta.

⁶ Las directivas generales sobre el logro de la estabilidad económica, surgían de la extrapolación de los deseos individuales (incluida la “rapacidad de sus integrantes”) a los colectivos. Una consideración sobre las partes a la cual se le asignaba un carácter más universal.

sector parcial de una pintura, no presenta particularidades técnicas diferentes a cualquier otro sector. Asimismo, la consideración de un conjunto limitado de sectores *separados* de la representación, permite en muchos casos comprender el conjunto.



Un ejemplo típico del arte clásico. El orden y el equilibrio cromático indican una "estructura ordenada" donde lo principal y lo accesorio, coexisten. La consideración de fragmentos de la obra, indican pistas sobre el "todo"



Esta obra de Vassily Kandinsky, indica un criterio diferente. La consideración de una parte del grabado, no permite intuir el resto. Solamente la consideración estética del "todo" genera una impresión en el observador

El arte moderno, se orienta por un camino diferente. La consideración del “todo”, es lo que genera en el observador la impresión de “agrado” o “desagrado”. El equilibrio y la distribución cromática, forman la expresión del conjunto que trata de expresar el autor. En el arte clásico, las formas son parte esencial de lo expresado, y lo esencial coexiste con elementos complementarios de importancia menor. En las composiciones modernas, el cromatismo y la *interrelación entre las partes*, son esenciales para la comprensión del conjunto.

La validez asumida del determinismo y el causalismo, se complementaron con un principio fundamental: el concepto de *separabilidad de las partes de un sistema*. Cuando un elemento o parte de un sistema, se separa del todo, Einstein consideraba, que disponía de “realidad”.

La posibilidad de separar una parte del resto de un sistema se basa en la suposición de que la *delimitación y separación* de la parte no modifica las leyes del sistema. La base conceptual que permite la separación de la parte del todo, consiste en asumir que *siempre es posible* sustituir lo que resta del todo, por “acciones adecuadas”. En este proceso, el “principio de interacción”, juega un rol fundamental.

La Mecánica Cuántica, cambiará esta visión en forma radical, estableciendo sin duda alguna la existencia de sistemas de “alta correlación”, donde la separación no es posible. Las “partes” de un sistema *no separable*, no disponen en consecuencia de “realidad” en el sentido einsteniano y no tiene sentido una comprensión por separado. La propia palabra “parte”, pierde significación.

“Realismo” y Mecánica Cuántica

La teoría cuántica y los experimentos que derivan de ella, ni *apoyan* ni *refutan* en forma decisiva el realismo. La posición tradicional de la Escuela de Copenhague, sugiere que el realismo *ha perdido vigencia*. Sin embargo, el análisis crítico de los documentos y opiniones vertidas por Bohr, revelan en éste, un marcado perfil kantiano, muy distante del “instrumentalismo” que sostuvo Heisenberg en los primeros años de la teoría. No obstante, la Teoría Cuántica admite otras interpretaciones diferentes de la dada por Copenhague. Entre las de mayor relevancia señalamos la que realizara el físico inglés David Bohm.

Es importante establecer este punto: la discrepancia existente entre los físicos teóricos acerca de la Mecánica Cuántica, no se refiere *al formalismo matemático que la sustenta*, sino a su significado como teoría.

A fines del siglo XIX, la ciencia planteó un intenso debate sobre la existencia de los “átomos”. Una discusión que se prolonga en pleno siglo

XX, al constituirse en un concepto rechazado por las corrientes epistemológicas de orientación “sensualista”. Una de las posiciones que rechazaban el concepto de “átomo”, fue la mantenida por Ernst Mach. Sin embargo, esta polémica no sería significativa frente a la que se avecinaba en el primer cuarto del siglo XX, cuando surge la Mecánica Cuántica. Se plantea de este modo, una discusión profunda que conduce a nuevos enfoques, más radicales que todo lo conocido con anterioridad.

Cuando surge la Mecánica Cuántica, se vuelven a plantear problemas epistemológicos que se suponían superados y bien establecidos. Las teorías pre-cuánticas (teoría Electromagnética de Maxwell, Relatividad Especial y General,...) habían acumulado enormes éxitos, basándose en argumentos epistemológicos que progresivamente adquirieron gran prestigio entre filósofos y científicos.

La Mecánica Cuántica, reinstala la discusión sobre aspectos metafísicos que pueden tener significado en la interpretación de la teoría. Los conceptos metafísicos, habían perdido importancia, debido a la casi generalizada adhesión que tuvo el positivismo y el criterio demarcatorio del experimento, en el primer tercio del siglo XX. Sin embargo, a pesar de su apariencia positivista, entre los constructores de la teoría abrigaba pensamientos y posiciones muy diferentes (*instrumentalistas* como Heisenberg, y pensadores con *ribetes metafísicos*, como Einstein, Schrödinger o el propio Bohr).

Esta situación es la que conduce a la crisis de interpretación de la teoría y en particular a la polémica entre Einstein y Bohr acerca de la “completitud” de la misma.

Para algunos analistas, esta discusión sobre la interpretación de la teoría cuántica que tuviera lugar entre los años 1925 y 1935, es la re-edición de la que tuviera lugar en el siglo XVIII entre Leibniz y Newton en el terreno de la física clásica.

Sin embargo, la discusión que ocupara esencialmente la década anteriormente indicada, no tuvo una conclusión definitiva. Por el contrario. En los últimos 40 años, ha recrudecido el problema y se han planteado nuevos argumentos en uno y otro sentido. Los teóricos no se mostraron satisfechos con los argumentos positivistas y “sintieron la necesidad de explorar ontologías en un retorno al campo metafísico”⁷.

⁷ Cabe recordar en este lugar algunas opiniones de Niels Bohr establecidas en su obra “El cuanto de acción y descripción de la naturaleza” (1929): “Sabemos...que las dudas ...respecto a la realidad de los átomos eran exageradas gracias al desarrollo del arte de la experimentación...Con todo, ha sido el reconocimiento mismo de la divisibilidad limitada de los procesos físicos, simbolizada por el cuanto de acción, lo que ha justificado las dudas...relativas al alcance de nuestras formas ordinarias de intuición cuando se las aplica a los fenómenos atómicos. Ahora bien, puesto que en la observación de esos fenómenos no podemos despreciar la interacción entre el objeto y el instrumento de medida, de nuevo pasan a primer plano las cuestiones que se refieren a las posibilidades de observación. Así, nos enfrentamos aquí, bajo una nueva luz, al problema de la objetividad de los fenómenos que ha suscitado siempre tanto interés en las discusiones filosóficas.

La Mecánica Cuántica, **no** cuestiona la **existencia** de determinadas entidades teóricas por no ser directamente observables. En este aspecto, es diferente a la base de discusión sobre la “existencia de los átomos”.

La discusión se centra ahora en otro punto: “¿*qué debemos entender por la realidad misma cuando se involucran en el problema los elementos microfísicas?*”.

La respuesta a esta pregunta, condujo a una conclusión sorprendente: *la realidad de ciertos procesos es problemática si queremos ajustarla a los “patrones comunes” que aplicamos para entender la palabra “realidad”*. La “realidad” en el sentido clásico, se transforma en un modo excesivamente **tosco**, para describir los hechos”.

La teoría propone una modificación sustancial desde el punto de vista filosófico, y en particular en los aspectos **ontológicos que deben colocarse en la base de las ecuaciones de la teoría**.

Función de onda de un sistema Ecuación de su evolución

La teoría parte de un concepto primario: todo sistema físico, se puede asociar a una función adecuada, generalmente compleja y denominada “**función de onda**” (que convencionalmente se indica como: $\psi = \psi(\mathbf{r}_i, t)$ y es dependiente de las coordenadas espaciales y del tiempo).

Esta función, “encierra toda la información física requerida, sobre el sistema”. Se trata de una función que evoluciona en forma **determinista** en el tiempo de acuerdo con lo previsto por la ecuación de Schrödinger.

Esta ecuación:

a) Para una “entidad cuántica puntual de masa **m**” se escribe:

$$\nabla^2 \psi + (8\pi^2 m/h^2) \cdot (E - U) \cdot \psi = j \cdot (h/2\pi) \cdot (\partial\psi/\partial t)$$

b) Para un sistema acoplado de “n” elementos cuánticos, la ecuación de Schrödinger propone para la amplitud “**c_k**” de la probabilidad asociada a la función de onda correspondiente al elemento genérico “**k**”, la forma:

$$j \cdot (h/2\pi) \cdot (dc_k/dt) = \sum_j^n H_{jk} \cdot c_{jk}$$

“**H_{jk}**” son los llamados elementos de la matriz hamiltoniana⁸

¿Qué significado se le atribuye y qué información proporciona la “función de onda”?

El formalismo plantea un problema de interpretación. ¿Qué representa la función de onda? ¿Se refiere a algún aspecto “vibratorio” interno al

⁸ Los elementos “**H_{ik}**” deben hallarse **en cada caso particular**, mediante consideraciones individuales (simetrías, dependencia débil o fuerte de algunas interacciones, ...) en **cada sistema que se analiza**.

sistema?⁹ ¿Es una “onda en el sentido clásico” que atribuimos a esta palabra? Independientemente, la función de onda, en general es una función **compleja**, dependiente de la posición “ \mathbf{r}_i ” ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) de las partes del sistema y del tiempo:

$$\psi = \psi(\mathbf{r}_i, t) = u(\mathbf{r}_i, t) + j \cdot v(\mathbf{r}_i, t)$$

“ u ” y “ v ”, funciones reales

La oscuridad en el significado de la función de onda, deriva de la aceptación de la dualidad “onda- corpúsculo” que establece el Principio de Complementariedad”.

La interpretación del significado que podemos atribuir a la función de onda “ ψ ” es diversa. Alfred Landé¹⁰ indica varias interpretaciones existentes, entre las que señalamos la siguiente lista parcial:

- 1- La función de onda **representa** “algo real” del sistema físico (por ejemplo: un campo físico, un conjunto de propiedades objetivas del sistema). Esta es la opinión sostenida fundamentalmente por Albert Einstein, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, David Bohm, John Bell y Roger Penrose.
- 2- **No representa** nada “real”. Se trata solamente de un “instrumento matemático” que permite determinar probabilidades de obtener ciertos resultados (medidas) afines a un sistema físico determinado. Esta es la interpretación ortodoxa de Bohr y de la Escuela de Copenhague. Es la que acepta mayoritariamente;
- 3- **Solamente describe** nuestro conocimiento sobre un sistema físico en cada instante. Esta interpretación es sostenida fundamentalmente por Max Born y Werner Heisenberg y en ocasiones ha resultado adecuada para Schrödinger;
- 4- **No representa una realidad actual**, sino que describe el “conjunto de potencialidades” del sistema y que podrían ser actualizadas de acuerdo con las condiciones experimentales. Esta interpretación fue sostenida por Heisenberg en forma más tardía a su declarado “instrumentalismo inicial”;
- 5- **Es una descripción** general de un **conjunto** de sistemas físicos en condiciones similares. La función de onda, en este caso, no es una descripción cuantitativa asociada a **un** sistema en particular, sino

⁹ En sus primeros trabajos, Schrödinger sostuvo que la función de onda se refería a un aspecto interno y “vibratorio” y asociada a una “distribución continua de electricidad en el espacio ocupado por cada átomo”. Lo que denominamos “partícula”, desde el punto de vista cuántico se asocia a una superposición de funciones armónicas, que recibe el nombre de “paquete de ondas”. Este “paquete”, para mantener la “concentración espacial” de una partícula (entendida en el sentido clásico), **no** debe ser expansivo en el tiempo. Sin embargo, el formalismo establece que esta condición no se cumple y que a medida que el tiempo transcurre, los que inicialmente se presenta como un ente concentrado en una región espacial pequeña, se expande, pierde definición y en consecuencia modifica su “estabilidad”.

¹⁰ “Nuevos fundamentos de la Mecánica Cuántica”- Alfred Landé- Ed. Tecnos (Colección “Estructura y Función”)-(1965)- Véase también “El Enigma Cuántico”- M. R. Guerra- Ed. Grupomagro (2010).

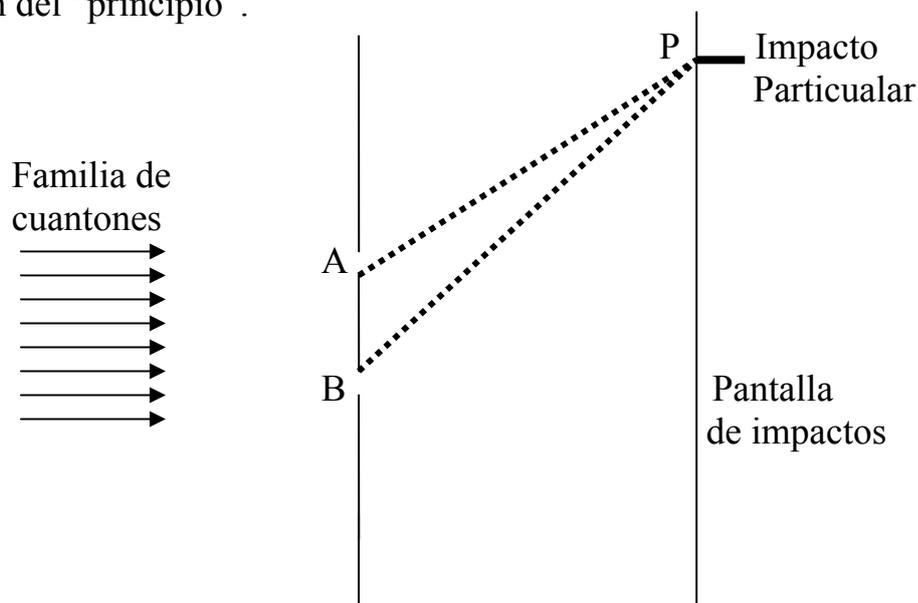
que representa una pluralidad de sistemas análogos. Esta interpretación es sostenida por aquellos que adhieren a la “interpretación estadística” de la Mecánica Cuántica. Entre ellos tenemos a Einstein, Popper, Landé y Ballentine entre otros.

La función de onda de un sistema, introduce un cambio sustancial en el concepto de “observable”. En la Física Clásica, los “observables” son las magnitudes que medimos con determinados procedimientos específicos. La “masa”, la “energía”, “el momentum lineal”,... son observables de un sistema.

La Mecánica Cuántica, modifica esta visión de “observables independientes”. Los “observables” son en este caso, un conjunto de valores obtenidos a partir de determinadas operaciones algebraicas¹¹ aplicadas a un único ente del sistema: la función de onda. De esta entidad, derivan *todos* los observables de un sistema, asociados a determinadas probabilidades.

El “principio de superposición de estados”

El llamado “principio de superposición de estados” es uno de los elementos específicos y característicos de la Mecánica Cuántica y que no coincide con el principio que se designa con el mismo nombre en la Física Clásica. El fenómeno de difracción de cuantones por dos rendijas A y B de dimensiones similares a la longitud de onda de de Broglie, describe la aplicación del “principio”.



Los “cuantones” que inciden desde la izquierda sobre las rendijas A y B, definen en la pantalla de la derecha una población de impactos. Si

¹¹ Estas operaciones derivan de la aplicación de determinados *operadores* asociados a cada observable, que generalmente originan una integral en todo el espacio de definición del sistema.

preguntamos por el cuantón particular que incidió en P y cuál ha sido el camino que siguió, no es posible responder con un criterio clásico que se traduzca en una trayectoria determinada.

Los cuantones que provienen desde la izquierda, en condiciones “físicamente semejantes”, llegan a las rendijas A y B. Posteriormente, en la pantalla ubicada a la derecha, tenemos una región más o menos precisa, que denominamos “impacto en P”. El cuantón que llegó a P (un punto genérico de la pantalla), puede haber recorrido el camino AP o el camino BP, sin que podamos “determinar concretamente” cual de ellos es el “recorrido real”. Sí podemos definir probabilidades de alcanzar el punto P. Para ello, tenemos dos estados cuánticos posibles: a) llegar a P desde A; b) llegar a P desde B.

Cada una de estas situaciones se asocia a una función de onda que describe el fenómeno “pasar por A” o “pasar por B”. Las designamos como ψ_{AP} y ψ_{BP} . La función de onda del *proceso cuántico* que experimentan los cuantones que proviene *desde la izquierda e inciden en P*, (es decir, el *estado del sistema en P*) se describe como la superposición (combinación lineal) construida a partir de coeficientes de probabilidad “ c_A ” y “ c_B ”:

$$\psi_P = c_A \cdot \psi_{AP} + c_B \cdot \psi_{BP}$$

Normalmente, la notación utilizada es, siguiendo el formalismo inventado por Dirac (se les nombra “ket”, como “fractura” de la palabra inglesa “bracket”):

$$|\psi_P\rangle$$

El álgebra de estos símbolos, expresa que:

$$|\psi_P\rangle = c_A \cdot |\psi_{AP}\rangle + c_B \cdot |\psi_{BP}\rangle$$

La función de onda ψ_P , define una cantidad: $|\psi_P|^2$, denominada “*densidad de probabilidad de impactos*” expandida en la pantalla. Es una condición común, exigir que la función de onda, por similitud con la teoría de la probabilidad y las diferentes funciones de distribución, esté *normalizada a la unidad*.

En este caso, si denominamos “ Ω ” al dominio de integración que representa todo el espacio asociado al sistema, se debe cumplir la condición¹², denominada de “cuadrado integrable”¹³:

¹² Hay otras condiciones analíticas que se exigen a la función de onda, que no mencionaremos en este escrito. Generalmente, la superposición se confecciona con las llamadas “autofunciones del sistema”, que se deducen de la ecuación de Schrödinger. El contenido de este “principio”, tiene consecuencias extraordinarias. Una de ellas es que se presente la famosa “paradoja del gato de Schrödinger”.

¹³ La forma de confeccionar la función de onda, es más precisa que lo que hemos expresado. Generalmente, la función se expresa como una combinación lineal de las llamadas autofunciones que derivan de la ecuación de onda, que tienen una importante propiedad: son funciones ortogonales. Esto significa que si ψ_i y ψ_j , son dos autofunciones del sistema y “ Ω ” es el dominio de integración, se cumple:

$$\int_{\Omega} \psi_i \cdot \psi_j \, d\Omega = \delta_{ij} ; \delta_{ij} = 0 \text{ si } i \neq j ; \delta_{ii} = 1 \text{ si } i = j \text{ (símbolo de Kronecker)}$$

$$\int_{\text{Todo el espacio}} \Psi_P \cdot \Psi_P^* d\Omega = 1$$

El problema de la “medida”

1. “Colapso” de la función de onda

La teoría presenta en este punto una concepción nueva. Se presenta aquí el concepto de “colapso de función de onda” o como Heisenberg lo denomina “reducción del paquete de ondas”. La idea es esta: mientras **no** se realiza ninguna medida en el sistema, este evoluciona en forma determinista como establece la ecuación de Schrödinger.

Cuando se realiza esta proceso, el sistema evoluciona como **una superposición de todos los estados posibles que puede alcanzar**. Si disponemos de electrones, estos pueden alcanzar, en cualquier dirección espacial, spines (+1/2) o (-1/2). Mientras no realizamos ninguna medida del spin, el sistema evoluciona asociado a una función de onda que se logra como superposición de dos funciones de onda ($\psi_{+1/2}$, $\psi_{-1/2}$) asociadas a su vez a cada spin posible (el estado del sistema es un estado “mezcla” de dos estados)¹⁴. Si medimos, el sistema entra en interacción con un instrumento y el sistema “**colapsa**” en **una y solamente una**, de las funciones de la superposición¹⁵. Para John von Neumann, el “proceso de medición” implica la introducción de una “discontinuidad instantánea” en la función de onda, que no está regido por la ecuación de Schrödinger.

El “**colapso elegido**” no está definido en forma determinista por las condiciones anteriores. Disponemos de un espectro (discontinuo o continuo) de posibles “colapsos”. Todos ellos están incluidos en la función de onda que se logra por superposición; el sumando en el cual colapsa se asocia a cierta probabilidad. En este sentido, la teoría se revela como “indeterminista”.

Lo anterior, es una descripción, pero no responde a las preguntas que siguen: ¿por qué se produce este “salto instantáneo de la función de onda”? ¿es una modificación que afecta solamente a nuestro posible conocimiento del sistema, o se trata de una modificación real que se introduce cuando en el sistema es medido?

Las respuestas a estas preguntas son diferentes. Los miembros de la Escuela de Copenhague fueron los primeros en ensayar una respuesta a las

¹⁴ La función de onda de un sistema “ ψ ” se obtiene, mientras el mismo no interacciona con un instrumento de medida, en la forma: $\psi = \alpha \cdot \psi_{+1/2} + \beta \cdot \psi_{-1/2}$.

¹⁵ Generalmente, la superposición se construye como ya expresamos, con las correspondientes autofunciones del sistema. De manera que el “colapso”, para un sistema que tienen un número finito de autofunciones, se produce en una de ellas.

preguntas anteriores, aunque no se tratara aún de una “doctrina epistemológica rigurosamente elaborada”. Más aún: entre los propios miembros de la Escuela de Copenhague, se pueden encontrar opiniones con “matices diversos”.

Se presenta aquí de un “denominador común de opiniones” con una variedad de puntos de vista que no tienen, por esa misma razón, una posición filosófica específica (esto es lo que explica que Heisenberg fuera en un comienzo *instrumentalista* y al mismo tiempo, Bohr sostuviera una posición que con connotaciones metafísicas, aunque *no* lograra explicar con absoluta claridad sus opiniones). En el mismo cuadro, se halla la posición de John von Neumann, que aunque generalmente se le considera no muy diferente a Heisenberg, introduce una idea nueva (no compartida por Bohr) en el proceso de medida: *la conciencia del observador en el acto de medida*¹⁶.

Un aspecto muy interesante de la posición de Copenhague es la confluencia de elementos *epistemológicos* y aspectos *ontológicos*, aunque estos últimos se les trató de disminuir en su peso teórico dado el ambiente marcadamente positivista del momento en el cual surge la teoría. En muchos pasajes de los escritos de Bohr, Heisenberg y von Neumann se evidencia una retórica *marcadamente idealista*, aunque los cultores de la teoría, no fueran idealistas ortodoxos.

Bohr sostiene en este contexto, que el *lenguaje clásico* (es decir: el lenguaje de la física clásica) con el cual la física newtoniana describió el mundo, es *imprescindible e insoslayable*, para efectuar la descripción de los fenómenos cuánticos. Sin embargo, esto que ocurre con el lenguaje, no ocurre con los conceptos que analiza y propone la Mecánica Cuántica, que son esencialmente diferentes a los que se designan con el mismo nombre en el contexto clásico¹⁷.

Cuando nos referimos al “momentum” de una partícula clásica, este atributo es una “propiedad” que tiene significado independientemente de que midamos o no; *cuánticamente*, la situación es diferente, puesto que el “momentum” es la consecuencia de un colapso de la función de onda con un instrumento y nada autoriza a suponer que dicha entidad *pre-existe al acto de medición*. Por este motivo, la Mecánica Cuántica no habla de “*propiedades o atributos*” sino de “*procesos e interacciones*”.

¹⁶ El problema de la intervención de la conciencia del observador, que seguimos indicándolo como una parte de un sistema que *no* tiene partes, ha sido profundamente estudiado y expuesto por el Premio Nobel Eugene Wigner. Aunque no es posible en este lugar realizar una exposición de esta importante visión de la Mecánica Cuántica y de la teoría de la medida, recomendamos sin embargo una lectura introductoria sobre el punto, contenida en “El Cántico de la Cuántica” (“¿Existe el Mundo?”- S. Ortolí/J.P. Pharabod-Ed. Gedisa.

¹⁷ Hay una diferencia esencial entre el planteo clásico y la Mecánica Cuántica. Los concepto cuánticos adquieren “realidad” *cuando se mide*, pero no ocurre lo mismo *antes* de la interacción; clásicamente, los conceptos tienen significado independientemente de que efectuemos o no medidas.

Esta situación “se parece” (aunque no es igual) a la postura tradicional acerca de que las propiedades secundarias (colores, sabores,...) no existen a menos que exista un observador que realice la percepción.

Aunque esta posición sea admitida, se parte de la idea que las propiedades existen en las cosas, independientemente de que existan observaciones o no, y que las mismas “provocan” algún tipo de reacción *neuroquímica del observador*.

La posición de Bohr es *diferente* a la del Obispo Berkeley, para quien la realidad se halla en nuestro mundo interno. Bohr admite que no hay nada objetivo que se pueda atribuir a un sistema *si no se mide*. El objeto por sí mismo no ofrece el fenómeno completo. Este es la consecuencia de la *interacción con el instrumento y el observador*.

De este modo, la Mecánica Cuántica no se refiere directamente sobre la *realidad*, sino sobre los fenómenos y sobre el posible conocimiento que de los mismos, podemos adquirir.

No se trata de un intento sobre de develar la *esencia misma de los fenómenos*, sino las posibles relaciones existentes entre los diferentes aspectos de nuestra experiencia.

2. Los “universos paralelos de Hugh Everett III”

La solución de interpretar la medida como un “colapso de la función de onda”, que elige un valor de respuesta y descarta los restantes, no es la única salida posible.

Adoptar la solución del “colapso”, explica razonablemente la univocidad de la respuesta que se logra en cada medida, pero no aclara “cuál es el destino de los valores posibles *no seleccionados*”.

En 1957, y bajo el título “Relative State Formulation of Quantum Mechanics”, publicado el Volumen 29 de la “Reviews of Modern Physics”, el físico Hugh Everett III, planteó una “posibilidad fantástica”, que era la reiteración o reedición de una muy antigua pregunta que planteara el filósofo San Alberto Magno en el medioevo: “¿existen muchos mundos, o hay un solo mundo?”

El trabajo de Everett, se denominó posteriormente por el físico Bryce DeWitt, como “La interpretación de los muchos mundos de la Mecánica Cuántica”. El argumento de Everett, no es solamente una pregunta, sino un desarrollo alternativo del problema del “colapso” de la función de onda. Esto no es todo.

Jorge Luis Borges, se sumergió en el mundo de la física, y particularmente en los conflictos “azar/determinismo”, “conjuntos infinitos”, “geometría fractal”,... en su famoso escrito “La lotería en Babilonia”.

En 1942 ideó, en un cuento titulado “El Jardín de los Mundos que se Ramifican”¹⁸, la posibilidad de “mundos paralelos”. En este relato, Borges afirma, refiriéndose al personaje Ts’ui Pen:

“En todas las ficciones, cada vez que un hombre se enfrenta con diversas alternativas, opta por una y elimina las otras; en la del casi inextricable Ts’ui Pen, opta *simultáneamente por todas*. Crea así, diversos porvenires, diversos tiempos, que también proliferan y se bifurcan”.

Everett sostiene que a medida que el universo evoluciona, y “produce eventos” se bifurca continuamente en dos universos paralelos: uno donde el evento ocurre y otro donde el evento no ocurre. ¿Qué significa esto? Imaginemos un átomo del cual comprobamos que emite un cuantón. Lo que comprobamos es que el fenómeno se dio en “nuestro universo” (al que pertenece, nuestro Laboratorio).

Sin embargo, la función de onda del sistema, que se “expresó” dando ese resultado, disponía también de una probabilidad donde la emisión *no* se realizaba. Everett sostiene que esa alternativa, que es cuánticamente correcta, debe darse en otro universo, no conectado con el nuestro y que tiene tanta “realidad” como lo que comprobamos en el laboratorio. De hecho, existe una demostración matemática que revela la compatibilidad de la teoría o conjetura de Everett con la teoría cuántica conocida.

Si esta especulación, no contradictoria con ninguna ley física, ocurre, deben existir *infinitos universos*, originados en una dualidad similar a la que plantea la alternativa “*emite/no emite*” en nuestro ejemplo¹⁹.

El “azar” ¿es o no constitutivo de la realidad?

Tenemos en la teoría un problema de mayor alcance y profundidad. Se refiere al significado “ontológico” o “gnoseológico” que puede tener el “azar”. La Mecánica Cuántica, habla y calcula con extraordinaria precisión diversas situaciones físicas basándose en la “teoría matemática del azar”: la probabilidad. Este hecho, ¿es razón suficiente para asumir que el mundo está “estructuralmente regido por el azar”? Si el mundo

¹⁸ El físico argentino Alberto Rojo, de la Universidad de Michigan ha elaborado un interesante escrito sobre este paralelo entre las ideas de Borges y el mundo de la Teoría Cuántica.

¹⁹ Cada vez que se da un evento, la función de onda del sistema encierra la probabilidad no nula de que dicho evento no ocurra. En estos dos casos, la función de onda se desdobra con respuestas no “conectadas” de eventos que se dan (según Everett) en dos universos paralelos, compatibles con la teoría, aunque no existan posibilidades reales de transferimos de un universo al otro. De hecho, los “universos de Everett” están mutuamente separados y aislados. Cada “universo, “ignora a los restantes”. La teoría de Everett, sin embargo, no ha contado con la aprobación de los teóricos en su mayoría, que la considera algo propio de lo “fantástico”. En realidad, si aplicamos la “navaja de Occam”, la elección del camino más sencillo para realizar nuestras interpretaciones, implica rechazar la conjetura de Everett, aunque *no podamos demostrar su inexistencia*.

refleja lo que es nuestro conocimiento, y todo lo demás es metafísica pura, entonces deberíamos admitir que el “azar” es antológicamente válido y no un simple procedimiento de conocimiento transitorio.

Aclaremos este punto. La Mecánica Estadística clásica, que logra notables interpretaciones acerca del comportamiento termodinámico de la naturaleza, utiliza el concepto de “azar” y aplica leyes de probabilidad asociadas a distribuciones diversas. Sin embargo, en este caso, la razón no es que se suponga que el “azar” responde a la naturaleza “ontológica” del mundo, sino que es un *recurso de análisis* (extraordinariamente eficaz) para describir las grandes poblaciones y para las cuales es imposible plantear un análisis individual, “integrante a integrante” de la población²⁰.

De este modo, la utilización del azar y de la Teoría de la Probabilidad, no responde a que consideremos al “azar como un elemento estructural de la realidad”. Se trata de *un recurso*, que nos habilita a examinar físicamente un problema de gran complejidad, derivado de la gran cantidad de elementos poblacionales. De alguna manera, el “azar” cubre un margen de “ignorancia” que tenemos sobre los detalles individuales del sistema.

Para la Mecánica Cuántica, en opinión de los miembros de la Escuela de Copenhague, la situación es *radicalmente diferente*. El “azar” está ligado a la naturaleza “ontológica” de la realidad (es decir, al “ser de la realidad”). Entonces, en este caso, el “azar” no representa “ningún margen de ignorancia”, sino la “realidad misma” y lo que conocemos, es *“todo lo que podemos conocer”*.

Veamos con un ejemplo, la diferencia entre las dos posiciones anteriores. Para ello, podemos examinar un sencillo y conocido fenómeno aleatorio a nuestra escala: el lanzamiento de una moneda al aire.

Si lanzamos la moneda y al caer la misma se ubica debajo de la mesa *sin que podamos verla*, ignoraremos si cayó “cara o cruz”. Si asociamos una probabilidad a cada situación posible (y las condiciones del lanzamiento no “inclinan” la respuesta en ningún sentido), tenemos 50% para la opción “cara” y 50% para la opción “cruz”. Más aún, independientemente de que observemos o no, la moneda se halla en uno de los dos estados y *solamente en uno de ellos*.

²⁰ Imagine un mol de gas. En esta muestra disponemos de un orden de 10^{23} elementos en interacción. Si describimos el movimiento de este sistema en el espacio tridimensional, debemos introducir ese mismo orden de coordenadas para el análisis dinámico. Ningún procesador de datos, sería capaz de afrontar tal sistema de ecuaciones diferenciales que describiera esa compleja dinámica. De manera que la introducción de “colectivos” y valores medios, estadísticamente calculados, permiten obtener respuestas acordes a las medidas con valores medios que realizan nuestros instrumentos.

Para saber cuál de las dos circunstancias ha ocurrido, debemos “mirar debajo de la mesa”, en la seguridad de que ocurrió una u otra cosa (descartamos que haya caído de “canto”).

Las probabilidades anteriores, **cuantifican nuestro desconocimiento sobre lo ocurrido, antes de mirar.**

Si ahora miramos, la moneda presenta una de las dos opciones, en cuyo caso nuestro “desconocimiento” se transforma en certeza y ello constituye un cambio **discontinuo** en nuestra información. Sin embargo, la observación que realizamos, solamente describe **algo que ya había ocurrido, independientemente de que miráramos o no.**

Supongamos ahora una situación “similar” pero en el terreno cuántico. La moneda del ejemplo anterior, se transforma ahora (por ejemplo) en un átomo, que puede adoptar **dos estados cuánticos** posibles: “**spin arriba (up)**” y “**spin abajo (down)**”, que sustituyen a “estados macroscópicos **cara o cruz**”.

Imaginemos que el átomo se encuentra confinado en una caja cerrada, que describe la posibilidad de “no ver” qué ocurre (antes la moneda caía “bajo la mesa”). El sistema tiene asociada una función de onda, cuya probabilidad es del 50% para que el mismo se halle en “estado **up**” o “estado **down**”.

Si ahora abrimos la caja (equivalente a “mirar debajo de la mesa”), nos encontraremos con el átomo en uno de los dos estados y de la probabilidad 50% de cada opción, pasaremos discontinuamente al conocimiento certero con probabilidad “100%” de que el estado es, por ejemplo “**up**”.

Sin embargo, si repetimos el experimento muchas veces, comprobaremos que los resultados “**up**” y “**down**” se verifican aproximadamente 50% de las veces para cada opción. Hasta este punto, nada de visto con la moneda macroscópica es diferente a lo observado con el átomo.

La **diferencia** se presenta, cuando la Mecánica Cuántica sostiene que el estado del átomo, cuando **no** es observado, se logra mediante una superposición de **los dos estados posibles** y en consecuencia el estado es “**up/down**”.

Es decir: **se halla en los dos estados simultáneamente.**

Por este motivo, si no hay observación del sistema, **carece de sentido** afirmar que “el átomo se halla en estado **up** o **down**”, puesto que estos estados pierden su significado²¹.

²¹ En esencia, este es el contenido de “la paradoja del gato Schrödinger”, que se origina precisamente en la aplicación del principio de superposición. La solución a esta “paradoja”, no es, ni sencilla ni única. Es probable, que las mejores respuestas a la misma, provengan de la consideración de los llamados “**fenómenos de decoherencia**” originados en la “pérdida” de la superposición por la interacción inevitable del sistema con su ambiente y los procesos no reversibles que se experimentan. No obstante, el “mantenimiento por largo plazo de un “aislamiento razonable” es una condición de extremada

Una vez que el átomo *es observado*, se presenta solamente *una y solamente una* de las opciones. Este proceso discontinuo, es lo que la Escuela de Copenhague denomina “colapso” o “reducción del paquete de ondas”. Para Everett y la opción de los “universos paralelos”, el “colapso no ocurre” y la función de onda, al medir, desdobra al universo actual en dos. En cada uno de ellos, permanece la probabilidad del 50% para cada estado. Hay un universo donde el átomo se halla con su “spin *up*” y otro universo, desconectado del anterior, donde el átomo se halla con su “spin *down*”.

El “problema de la realidad” Complementariedad

Los creadores de la Mecánica Cuántica *no niegan* la existencia de una “realidad” independiente del sujeto cognoscente. En este punto se presenta un aspecto fundamental de la teoría:

- 1) Si la Mecánica Cuántica, es solamente un procedimiento elaborado y altamente preciso de efectuar cálculos, como opinan los “instrumentalistas”, entonces es incapaz de ofrecernos ninguna tesis sobre la estructura de la realidad. Tampoco nos puede dilucidar el problema de si la realidad es o no dependiente del observador;
- 2) Si en cambio, la teoría es “algo más” que un “procedimiento elaborado y preciso sobre cómo efectuar cálculos, entonces es posible que la misma tenga la posibilidad de ofrecernos alternativas sobre la realidad y en consecuencia deben ser “alternativas verdaderas”.
- 3) Heisenberg, examinó el concepto de “realidad” y le asignó tres significados o categorías, diferentes:
 - a) El *realismo metafísico*, según el cual las cosas extensas y el mundo, existen;
 - b) El *realismo práctico*, según el cual se establece que existen afirmaciones que podemos realizar y *objetivar*;
 - c) El *realismo dogmático*, que establece que las afirmaciones que realizamos sobre el mundo material, independientemente de su naturaleza, pueden objetivarse.

importancia con aplicaciones tecnológicas de gran resonancia en un futuro próximo (la “computación cuántica entre ellas”). Para Bohr, que es anterior a estas especulaciones basadas en la decoherencia, la pérdida de la superposición en los sistemas macroscópicos se origina en que tienen diferente “status ontológico”: el ser de los cuantones, *emerge de la medida*; el ser de los objetos macroscópicos es *inherente a ellos por su propia existencia sensible y primaria*. Los primeros solamente se conocen, midiendo; los segundos se pueden conocer, aunque *no* midamos.

Heisenberg²² rechaza el “realismo metafísico” por considerarlo “ingenuo”. Sin embargo, no cree que se le pueda *sustituir* o *descartar* mediante una *tesis positivista*. La razón de este rechazo estriba en que **no acepta** que las percepciones puedan definir los estadios últimos de la realidad.

Asimismo, rechaza el “realismo dogmático”. Considera que esta clase de “realismo”, era un ***pilar de la Física newtoniana*** (y en cierta medida también lo reconoce en las posiciones de Einstein) y que la Mecánica Cuántica ha atacado fuertemente.

En consecuencia, solamente adhiere al llamado “realismo práctico”. En esta clase de “realismo”, Heisenberg ubica los Principio de Complementariedad de Bohr y la interpretación de Born, sobre el carácter de “densidad estadística” de la norma cuadrática función de onda.

Es importante establecer, que la ***densidad de probabilidad*** definida por $|\psi(x)|^2$ no tiene “realidad objetiva”, sino que representa un resultado asociado a una medida concreta. Por este motivo, el valor obtenido no significa que el observador, si mide, encuentre ***necesariamente*** al “cuantón” en la abscisa “x”.

Lo anterior se debe complementar con un comentario acerca de la “complementariedad”. Para Bohr, que introdujera este Principio en 1927, la “realidad” se compone inseparablemente de dos descripciones contradictorias entre sí, pero de las cuales no es posible prescindir: los atributos de los cuantones a presentarse como “partículas clásicas” o a presentarse como “ondas clásicas”. Estas manifestaciones excluyentes, se puede evidenciar mediante operaciones físicas específicas sobre el sistema. En ningún caso existe un experimento donde las dos formas clásicas se presenten a la vez. Sin embargo, la consideración de un “cuantón” como “partícula” o como “onda, ***por separado***, no contienen toda la física del sistema. La complementariedad, es para Bohr (aunque Einstein siempre la rechazara), una aspecto esencial de la realidad.

Cabe preguntar: ¿Cuándo y bajo qué circunstancia, una teoría **T** cualquiera, debe incluir a un “Principio de Complementariedad”? La respuesta a esta pregunta, consta de cuatro partes:

- a) La teoría **T**, admite al menos dos descripciones A y B de su objeto de estudio (en la Mecánica Cuántica, existen estas descripciones con los nombres “partícula” y “onda”);
- b) Las descripciones A y B se refieren *al mismo universo* al cual se refieren (en el caso de la Mecánica Cuántica, es en principio, el mundo de la microfísica);

²² “Physics and Philosophy” (The Revolution in Modern Science)- Editado por “Allen & Unwin” (Londres- 1959)

- c) Si consideramos A o B, *por separado y con prescindencia del restante*, no logramos la descripción completa y exhaustiva del sistema;
- d) A y B, son descripciones independientes y excluyentes. En consecuencia, no existe una descripción que incluya A y B sin introducir contradicciones lógicas.

Incertidumbre

El “Principio de Indeterminación”, se refleja cuantitativamente en las llamadas “relaciones de incertidumbre” y que Heisenberg estableciera en febrero de 1927. Este principio, es ***específico*** de la Mecánica Cuántica y podemos establecer con él una frontera que separa a esta teoría de las restantes construcciones (física newtoniana, relatividad), que podemos afirmar son “de características clásicas”²³.

Las relaciones de incertidumbre, son la consecuencia directa de un teorema aplicado al álgebra de los operadores que gobiernan las operaciones que se realizan con la teoría. Se refiere en esencia, a la ***imposibilidad de una medida con errores cuadráticos arbitrariamente pequeños y en forma simultánea de parejas de variables del sistema denominadas “conjugadas”***²⁴. En un lenguaje más llano, las relaciones establecen que si “disminuimos la varianza asociada a una de las variables conjugadas, inevitablemente es necesario “expandir” la varianza de la restante variable conjugada, si pretendemos medir las dos variables *en forma simultánea*.

El límite que se impone a los errores cuadráticos, está definido por la constante de Planck ($h = 6.602 \times 10^{-34}$ J.s).

En un comienzo, la explicación de Heisenberg, de las relaciones de incertidumbre, se orientó a fundamentarlas a partir de la ***“supuesta perturbación que el instrumento de medida introduce sobre el sistema, en forma incontrolable, por parte del observador”***²⁵.

²³ Las relaciones de incertidumbre, son la consecuencia de un teorema general que Heisenberg demostró para los operadores cuánticos. No son la consecuencia de un análisis elemental como el que generalmente se plantea en los textos. La demostración rigurosa de la proposición, que ***no*** incluimos en este escrito, el lector puede encontrarla, en “Introducción a la Mecánica Cuántica”- M.R.Guerra- Libro editado por “Librería Renart”- (Universidad Católica del Uruguay).

²⁴ Los “errores” a los que se refiere el principio de incertidumbre y su traducción cuantitativa, que son las llamadas “relaciones de incertidumbre” ***no son en consecuencia los errores experimentales que se introducen en las respuestas y lecturas de los resultados de las mediciones***. Los “errores cuadráticos” corresponden a cuantías asociadas a muestra estadísticas de medidas. Las varianzas de estas medidas, se pueden disminuir, aumentando el número de medidas de cada muestra. Sin embargo, si las muestras corresponden a “variables conjugadas”, las varianzas asociadas a las variables que estamos considerando conocer, no pueden achicarse arbitrariamente en una medida ***simultánea de las dos variables***.

²⁵ Esta es la forma en la cual generalmente e refieren e interpretan las relaciones de incertidumbre, la mayoría de los textos. Sin embargo, la interpretación no es correcta (aunque se presenta en forma “inteligible”). En la Física Clásica, las perturbaciones se suponen que pueden ser disminuidas por debajo de cualquier límite. Para ello, es necesario elaborar un diseño del instrumental adecuado, de manera que

Sin embargo, esta manera de proponer el concepto, es inadecuada. En primer lugar, la palabra “perturbación” implica la existencia previa de aquello que se perturba (“propiedad”). La teoría expresa sin embargo, que el “*acto de medir*” responde a una operación, que provoca como una emergencia, el comportamiento probabilístico de la función de onda (“un colapso”). Este “colapso”, *se expresa en la medida y nada* autoriza a suponer que lo medido, existía *antes* de medir.

En consecuencia, la *propia* teoría niega, la posibilidad de “perturbar algo que *no* está definido y desconocemos de antemano”. Posteriormente, Heisenberg *abandonó* la “*tesis perturbacionista*”, al comprobar que ella resultaba inconsistente con el resto de la teoría.

¿Qué representa la “indeterminación” en un sistema? ¿Es una “característica del sistema? La respuesta a estas preguntas, están dadas por la teoría: la indeterminación *no* es una característica del sistema, sino una limitación propia de nuestra “capacidad de conocimiento” sobre el propio sistema. Esta forma de ver el “experimento mental de Heisenberg del microscopio”, es una forma más razonable de comprenderlo, sin apelar al concepto inconsistente de “perturbación”.

Este aspecto del problema, es de gran importancia. Si efectivamente, la medida se pudiera interpretar como una perturbación, y hallamos un ejemplo *donde realizamos una medida “sin perturbar”*, nos ubicamos directamente en la contradicción que impone la paradoja de Einstein-Podolsky- Rosen. En este caso, la Mecánica Cuántica, *no sería* una “teoría completa” a partir de los criterios compatibles con la Relatividad.

En definitiva: para la teoría cuántica, y concretamente para Bohr, los conceptos que se aplican en la operación de medida, *no* se refieren a una realidad exterior (que no se niega que *exista*), sino al resultado de la conjunción interactiva entre dos *sistemas físicos no independientes e inseparables*: el sistema propiamente dicho que medimos y el instrumento. Heisenberg abandonó posteriormente su “posición cerradamente perturbacionista”.

Sin embargo, no descartó completamente el carácter “instrumentalista de la teoría”, con lo cual, abolió el “realismo de la Mecánica Cuántica” y el determinismo estricto de la Física Clásica.

nos permita abordar a la cifra significativa que deseemos. Para que esto se cumpla, la dificultad es exclusivamente tecnológica. La situación cuántica es *absolutamente diferente*. La limitación que imponen las relaciones de incertidumbre, no son tecnológicas, sino inherentes a la medida misma y a la naturaleza dual de la materia. Independientemente de lo anterior, el “relato” que habitualmente se introduce en los textos, sobre la dispersión generada por la colisión entre “un fotón y un electrón” observada mediante un microscopio de determinado poder separador, es incorrecta e inconsistente, puesto que todo el razonamiento proclama el “carácter corpuscular de los elemento intervinientes”, lo cual es inconsistente con el Principio de Complementariedad.

Lo anterior se refuerza considerablemente con la opinión de John von Neumann, que interpreta a la teoría desde un *idealismo subjetivo*, al incorporar la “*conciencia del observador*” al conjunto inicialmente formado por el sistema y el instrumento²⁶. La introducción de la “conciencia del observador” introduce una modificación conceptual de importancia.

Cuando se realiza una medida, la teoría cuántica “tradicional” establece que el resultado es la consecuencia del “colapso” o “reducción de la función de onda o vector de estado”, en el instrumento de medida, que “selecciona” del espectro de probabilidades una de ellas.

La introducción de la “conciencia del observador”, modifica esta visión del problema. El “colapso” de la función de onda se realiza en la *propia conciencia del observador y no en el instrumento de medida*.

La “paradoja” Einstein- Podolsky- Rosen El Teorema de John Bell

Hay una pregunta que podemos plantear: ¿es posible restablecer el determinismo en la teoría cuántica, introduciendo “variables ocultas adecuadas”? Para Bohr, esta propuesta no tiene significad. La Escuela de Copenhague, sostiene que la Mecánica Cuántica es *una teoría completa*, lo que significa que la función de onda encierra *toda* la información necesaria para caracterizar al sistema. Afirmar lo anterior, equivale a establecer que la función de onda *no* necesita complementarse con “variables ocultas” de manera que se restablezca el determinismo en el sentido clásico. Esta opinión, está de acuerdo con lo sostenido por von Neumann, que mencionáramos anteriormente.

Sin embargo, estas posturas no fueron compartidas por Einstein. Considerar a la naturaleza como asiento de un “azar constitutivo”; considerar que Mecánica Cuántica elaborada (probabilista, no causal y no determinista) era una *teoría definitiva*, le resultaba inadmisibles. Aspiraba a la confección de una “nueva Mecánica Cuántica”, causal, determinista y donde el azar no fuera constitutivo de la naturaleza, sino a lo sumo un recurso explicativo.

²⁶ “Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica”- John von Neumann- [Ed. John Wiley and Sons, NY-(1932)], es una obra de gran importancia en la fundamentación axiomática de la teoría. En esta obra, von Neumann introduce la interpretación de la “función de onda” como un vector definido en un espacio de dimensión infinita, conocido como “espacio de Hilbert”. Esta formalización de la teoría, demuestra que la teoría así axiomatizada es totalmente equivalente a los formalismos de Heisenberg y Schrödinger. Asimismo, von Neumann ensaya una demostración de la “completitud” de la Mecánica Cuántica, demostrando que la teoría no debe incluir “variables ocultas” complementarias para describir toda la fenomenología.

Para dar fundamento a esta opinión, Einstein, Podolsky y Rosen, diseñaron un argumento (un *experimento mental*), en el cual intentaban mostrar la no completitud de la Mecánica Cuántica elaborada.

El argumento se inicia estableciendo un *criterio* para definir el concepto de “*completitud de una teoría*”. En el propio artículo redactado por Einstein, Podolsky y Rosen en abril de 1935, se aclara este punto.

Se afirma: “una teoría es *completa* si *todo elemento de la realidad física ha de tener alguna contrapartida en la teoría física considerada*”. La definición, origina una pregunta obvia: ¿qué debemos entender por “*elemento de realidad física*”? Este es el punto esencial del argumento EPR.

Para Einstein, el significado de la frase anterior éste: *si es posible predecir con certeza (es decir, con probabilidad 1) el valor de una cantidad física de un sistema, sin perturbarlo de ninguna manera, existe un elemento de realidad física en esa cantidad*”.

Las condiciones establecidas anteriormente, son condición suficiente para atribuir “realidad física” a una magnitud, aunque no se considera una definición del concepto. La idea refleja un aspecto *intuitivo*: si es posible determinar una cantidad asociada a una magnitud de un sistema, sin perturbar a éste, parece “natural” afirmar que ello es así porque el sistema asigna ese valor a la magnitud considerada.

El argumento asume dos condiciones complementarias:

- 1) Una de ellas es el llamado “principio de localidad”. Supongamos dos sistemas A y B, que han *interaccionado en el pasado* y que posteriormente, se han separado, hasta que la interacción se haya vuelto despreciable (teóricamente ha cesado). En este caso, ninguna modificación comprobada en A se puede atribuir a un cambio producido B y recíprocamente;
- 2) Se establece con carácter general, que las predicciones estadísticas de la teoría tienen confirmación empírica, lo que las reviste de “*validez*”.

La aceptación del “principio de localidad”, niega la posibilidad de que existan “modificaciones instantáneas en A originadas en las medidas realizadas en B”.

Este conjunto de suposiciones, son suficientes según Einstein, para revelar que la Mecánica Cuántica *no* es completa. Concretamente, esta interpretación de la Mecánica Cuántica en forma “realista y local”, se expresa mediante el argumento que sigue:

- a) Supongamos que dos partículas A y B, han interactuado en el intervalo de tiempo definido por los instantes $t = 0$ y $t = T$.

Imaginemos que para $t > T$, la interacción *cesa*. Imaginemos que el sistema tiene durante la interacción, un momentum lineal *total nulo*.

- b) Imaginemos que conocemos las condiciones físicas antes de $t = 0$. En este caso, la ecuación de Schrödinger, permite determinar las condiciones en *cualquier* instante posterior, debido a tratarse de una ecuación que describe la evolución en forma determinista. Podemos determinar las condiciones, *inclusive en $t > T$* .

Supongamos que en un instante en el cual *ha cesado la interacción*, y mediante un instrumento adecuado, medimos el momentum de A. En ese caso, podemos determinar el momentum de B. Por otro lado, en el mismo instante, si conocemos la posición de A, podemos determinar la posición de B. En este caso, es posible determinar simultáneamente la posición y el momentum de B, sin perturbar esta partícula. En consecuencia, tanto la posición como el momentum de B, deben tener “realidad”. Sin embargo, la determinación simultánea del momentum y la posición, implican una violación de la relación de incertidumbre posición- momentum, que es un aspecto inherente a la teoría. Como esta circunstancia no está prevista en el formalismo de la Mecánica Cuántica, debemos concluir que la teoría es incompleta (hay situaciones, como la que propone el argumento), que *no* están contemplados.

La *respuesta de Bohr* al argumento EPR, se dio a conocer en junio de 1935, afirmando que el mismo no era correcta, puesto que cualquier medida (como la que se plantea sobre la partícula B), no es una medida que pueda excluir a la parte A.

La medida, *se realiza sobre el sistema formado por A y B*. Para Bohr, el hecho de que la interacción entre A y B haya cesado, no es relevante en el problema de las medidas sobre A y B. Medir “algo en A” no implica que prescindamos de B, que *sigue formando parte del mismo sistema* que al principio, *aunque haya* un aspecto que no está presente: la interacción inicial.

La respuesta de Bohr, *no* era contundente y solamente formaba parte de una polémica, que permitía argumentos en un sentido y otro. La respuesta definitiva a la controversia sería el teorema descubierto por John T. Bell en 1964, donde se discuten a fondo los conceptos de “realidad” y “localidad”, desde una visión más precisa que las consideraciones realizadas por Einstein y Bohr.

El teorema de Bell, tiene un campo de aplicación que *no* se restringe a los sistemas microfísicas. Además, no es *solamente un argumento lógicamente desprendido de la estructura de la teoría*, sino que además establece directivas que pueden ser aplicadas en *experimentos* concretos.

En efecto: el teorema expresa a partir de determinadas desigualdades, un criterio de contrastación *empírica* entre la interpretación de Copenhague

y la interpretación “realista- local” que realiza Einstein, para quien la teoría no podía en modo alguno, escapar a estas condiciones.

Para Einstein, *todos los sistemas, al ajustarse a los principios de “realidad y localidad”, nunca violan esas desigualdades.*

La interpretación de Copenhague, propone que la Mecánica Cuántica en determinadas circunstancias las desigualdades de Bell, *podían ser violadas*, con lo cual el sistema fracturado en dos partes A y B (como propone Einstein en su “paradoja”) *pierde el carácter local*. Como consecuencia, se establece entre ellas una correlación que *no exige* que la modificación realizada en A implique una transferencia de información que modifique B. La correlación es simultánea en el tiempo, de manera que al no transferirse información, *no se viola* el 2º. Principio de la Relatividad Especial²⁷.

En otros términos: a partir de la hipótesis de “localidad” y de la existencia de “variables ocultas”, Bell predijo la existencia de situaciones *empíricamente comprobables* y que eran incompatibles con la versión de la Mecánica Cuántica ajustada a los principios de “realidad y localidad” como criterio único. Bell descubre que *si la Mecánica Cuántica es correcta*, existe “realismo- no local” y al mismo tiempo, que no es posible construir una teoría dotada de “*variables ocultas*” *necesariamente locales*.

La existencia de “variables ocultas” no es en sí misma una hipótesis inaceptable. Pueden existir, pero si se da este extremo, el realismo de la teoría no puede exigir que al mismo tiempo se cumpla el “principio de localidad”. La consecuencia de esta conclusión es fundamental: un instrumento que opere sobre A, puede originar una modificación instantánea en B, sin importar lo remoto del lugar donde B se halle. Bell reconoce que es el “principio de localidad” lo que plantea la dificultad.

De manera que se plantea la necesidad de elaborar experimentos que revelen la existencia de correlaciones no locales entre dos parte de un sistema que inicialmente interaccionando.

Esto culmina con el famoso experimento de Alain Aspect, Georges Dalibard y Gerard Roger, que son la culminación de alta precisión de una gran cantidad de experimentos confirmatorios en el mismo sentido, realizados duran los 20 años anteriores.

El experimento revela la existencia de sistemas que violan las desigualdades de Bell y que como consecuencia, toda predicción basada en “localidad” y “variables ocultas”, es fallida, con lo cual el “realismo

²⁷ Este es un aspecto clave de la teoría. Si no se transfiere información, no hay velocidad de grupo que transmita algo de un lugar a otro. Si esto ocurriera, la Relatividad sostiene que el comportamiento exige la existencia de una velocidad límite. En el caso de la no localidad, no es necesario respetar este principio, puesto que la correlación no exige “transferencia de información”.

einsteniano se vuelve insostenible” y por el contrario, la posición de Copenhague, sale del conflicto fortalecida.

Finalmente: mientras no se realiza ninguna operación de medida sobre un sistema, la función de onda evoluciona de acuerdo a lo previsto por la ecuación de Schrödinger, sin que se adopten valores concretos para las diferentes magnitudes. Esta ecuación se aplica al sistema “como un todo”, de manera que no llama la atención de que al medir sobre la parte A, se tenga presente una correlación con B, aunque la interacción se haya desvanecido.

Solamente cuando medimos (es decir: operamos sobre el sistema), obtenemos una respuesta, pero el sistema “*sigue siendo aún un todo*” y como consecuencia la respuesta se refiere *a la parte A y al “todo”*. Por ello, medir en A, es algo que tiene correlación con lo que ocurre con B y *no podemos separar* las partes del sistema, como pretende el planteo de la paradoja EPR.

Heisenberg, utilizando un lenguaje de perfil aristotélico, expresaba lo anterior así: cuando medimos “algo” en A, se manifiestan todas las *potencialidades* del sistema total, lo que no excluye entonces a B.

El problema de la “localidad” o “no localidad” pierde en definitiva relevancia, puesto que *no existe “influencia alguna transmitida entre A y B”*. El sistema es un “todo” no analizable por partes y en consecuencia es “*un sistema no separable*”.

Con el teorema de las desigualdades de Bell, queda zanjada la discusión, que pasa de ser un problema de opiniones a una conclusión lógico-experimental, que no reconoce dudas al respecto. Sin embargo, epistemológicamente, la solución es una “victoria a lo Pirro”, puesto que se plantea una renuncia al “realismo independiente” que no se sustituye en el “espíritu científico” solamente afirmando la validez pragmática de la teoría. El propio Bell, siempre adhirió con “entusiasmo” a la construcción de una Mecánica Cuántica “realista”, de manera que estimuló las corrientes de fundamentación de la teoría, a partir de “variables ocultas no- locales”, como es la estructura teórica confeccionada por David Bohm. Se trata en definitiva, una teoría que genera el descrédito de las corrientes positivistas.

Se tienen así, corrientes que promueven el resurgimiento de un “realismo atenuado” (no tan estricto como el propuesto por la paradoja EPR) y renunciar en forma completa al “principio de localidad”²⁸. La

²⁸ Los intentos recíprocos: renunciar al realismo y reavivar el principio de localidad, no parecen conducir a grandes avances, por lo cual este camino aparentemente se ha abandonado. No obstante, es importante señalar, que existen para la Mecánica Cuántica, otras “soluciones posibles”. Entre ellas, mencionamos: a) la solución de los “universos múltiples de Everett”, que preconizan *el no colapso de la función de onda en la operación de medida* y el desdoblamiento en cada operación del universo actual; b) la solución de Bunge. Que atribuye a los “cuantones”, propiedades difusas o borrosas distribuidas y por el hecho que define como “pertenencia al sistema conjunto”, independientemente de su lejanía; c) la concepción de

no localidad se acepta que es una característica física fundamental del Universo.

No obstante, el problema filosófico que plantea el “realismo”, **no** se resuelve solamente considerando la Mecánica Cuántica, que no solamente no lo refuta, sino que sobrevive en teorías alternativas.

Bibliografía

1. *“The Principles of Quantum Mechanics”- Paul A. M. Dirac- 4a. Edición de Oxford at the Clarendon Press (1958)*
2. *“Wholeness and the Implicate Order”- David Bohm- Ed Routledge and Kegan Paul, (Routledge Classics), 2002*
3. *“El impacto filosófico de la física moderna”- Ed. Tecnos, Colección “Estructura y Función” (1973)*
4. *“Introducción a la Mecánica Cuántica”- M. R. Guerra- Ed. Renart (Universidad Católica del Uruguay)*
5. *“El Enigma Cuántico” (¿Un límite al conocimiento?)- M. R. Guerra- Ed. Grupo Magro (2010)*
6. *“La Historia del Arte”- Ernst Gombrich- Phaidon Press Limited (2007)*
7. *“El Cántico de la Cuántica”- S. Ortoli y J.P. Pharabod- 3ª. Edición de Gedisa S.A.*
8. *“El Camino de la Realidad”- Roger Penrose- Ed. Debate*
9. *“Beyond the Quantum”- M. Talbot- Penguin (1968)- Existe versión en español realizada por Gedisa S.A. en el año 2008, bajo el título: “Más allá de la teoría Cuántica”.*