



# ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS DE BUENOS AIRES

Instituto de Estudios de Ciencia y Tecnología  
Ciclo Ciencia y Visión del Mundo

**Noventa años de “nueva” Mecánica  
Cuántica: 1928-2018**

*21 de noviembre, 2018*

***“1925-30 historia, personajes y contrastes”***

Académico Dr. FT Gratton

***“Metafísica de la Mecánica Cuántica: ¿De  
utilidad o un ejercicio intelectual estéril?”***

Académico Ing. Luis De Vedia

**La “nueva” Mecánica Cuántica  
(MC) de 1925 a 1930  
Noventa aniversario 1928 - 2018**

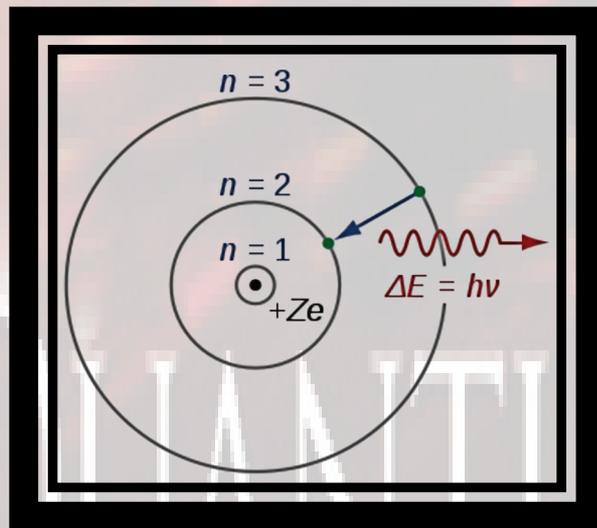
A graphic celebrating the 90th anniversary of Quantum Mechanics. The background is a vibrant red with a radial pattern of light rays emanating from the top right. In the foreground, there are several stacks of gold coins, some of which are slightly out of focus, creating a sense of depth and value. The text "90 YEARS OF QUANTUM MECHANICS" is prominently displayed in the center in a white, serif font with a subtle drop shadow.

**90 YEARS OF  
QUANTUM MECHANICS**

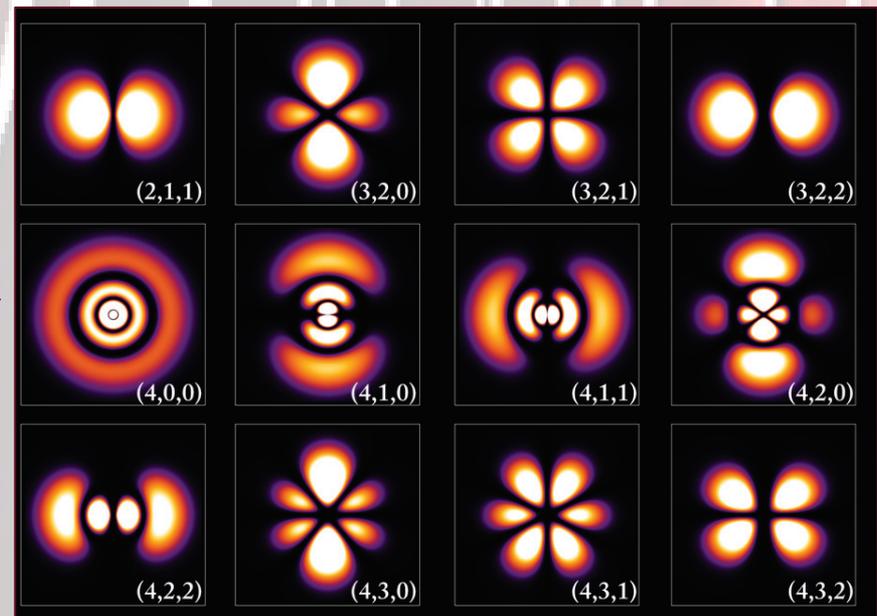
# Comienzo de una nueva física que dominará el siglo XX

**“1925-30 historia, personajes y contrastes”**

Académico Dr. FT Gratton



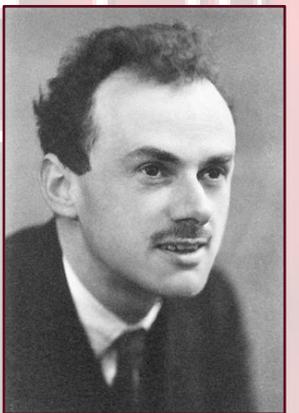
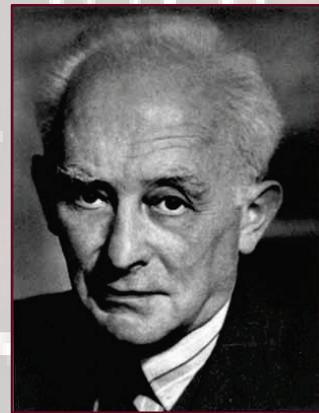
**El átomo de Bohr**  
1913 - La “vieja” MC



**El átomo de Schrödinger**  
1927 - La “nueva” MC

La **MC** pese a su complejidad matemática y las dificultades conceptuales de su interpretación, tuvo un éxito espectacular y dominó el desarrollo de la física del siglo XX.

Fue la base de la física atómica primero y la física nuclear después. Llevó al descubrimiento de la antimateria y afianzó desde 1950 la electrodinámica cuántica. Es una teoría fundamental de la física, tal como lo es la teoría de la relatividad.



**Actores principales, período 1925-1930.** De izquierda a derecha: *De Broglie* (dualidad onda-partícula), *Heisenberg* (operadores y principio de incerteza), *Schrödinger* (mecánica cuántica ondulatoria), *Pauli* (principio de exclusión), *Born* (interpretación probabilística y matrices), *Dirac* (mecánica cuántica relativística).

## 90 aniversario de la *MC* 1928 - 2018

Fue una teoría física “**nueva**” respecto de la “**vieja**” *MC* de *Planck, Einstein, Bohr y Sommerfeld* (ca. 1900-1920). Con dos formas: **matricial** (*Heisenberg, Born y Jordan*) y **ondulatoria** (*De Broglie, Schrödinger*), que se demostró eran equivalentes.

La **no-conmutatividad** de operadores (debida a *Heisenberg*) conduce al **Principio de Incerteza** (inversamente este principio genera la no-conmutatividad). El principio teórico (en una versión sencilla) afirma que cuanto más precisa es la medición de la posición de una partícula, menos precisa será la medición de su momento.

Pero fue la mecánica ondulatoria la que permitió el mayor progreso inicial, era más comprensible y facilitó cálculos y predicciones, en las primeras décadas de gran éxito de la *MC*.

Se omite por falta de tiempo la **Electrodinámica Cuántica**, la cuantificación del campo electromagnético. Tema de máxima importancia, que alcanzó madurez en las décadas de 1940-50.

## Mecánica Cuántica Matricial

Entre 1925 y 1926 *Heisenberg* desarrolló el primer formalismo matemático de una “nueva” MC. La idea central, que no abandonó nunca, era que sólo las magnitudes que son, en principio, observables pueden formar parte de la teoría y que todo intento de describir con imágenes lo que ocurre dentro del átomo debía ser evitado.

En física atómica los datos de observación se obtenían de la espectroscopía, por transiciones entre niveles atómicos. Por lo tanto *Heisenberg* tomó las “magnitudes de transición” como elementos básicos de la teoría. Después *Max Born* se percató que las magnitudes de transición obedecían las leyes del *cálculo de matrices*. Una rama del álgebra que entonces no era conocida entre los físicos, tan bien como hoy en día.

En una serie de célebres trabajos, alrededor de 1927, *Heisenberg*, *Born* y *Jordan* publicaron la versión **matricial** de la teoría cuántica.

## El trabajo de *Heisenberg* de 1927

ZS. f. Phys. (17) Heisenberg.

*Quinto me in  
Göttingen by Born.  
Linus Pauling*

### Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.

Von W. Heisenberg in Kopenhagen.

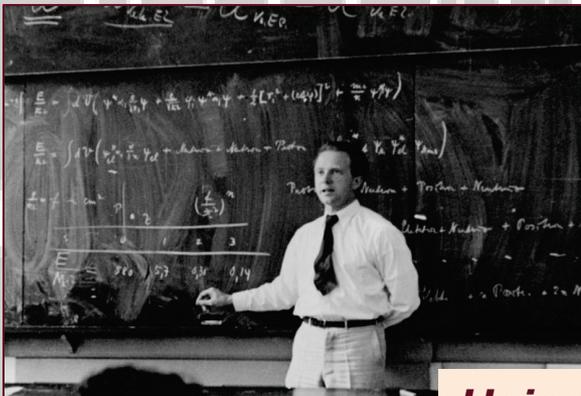
Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 23. März 1927.)

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitionen der Worte: Ort, Geschwindigkeit, Energie usw. (z. B. des Elektrons) aufgestellt, die auch in der Quantenmechanik Gültigkeit behalten, und es wird gezeigt, daß kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können (§ 1). Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in der Quantenmechanik. Ihre mathematische Formulierung gelingt mittels der Dirac-Jordanschen Theorie (§ 2). Von den so gewonnenen Grundsätzen ausgehend wird gezeigt, wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können (§ 3). Zur Erläuterung der Theorie werden einige besondere Gedankenexperimente diskutiert (§ 4).

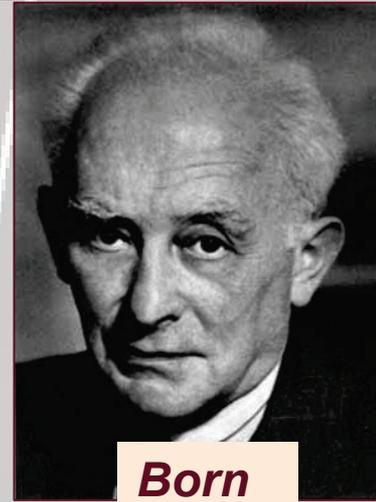
*Notar que el autor lo envía al Zeitschrift für Physik desde Copenhage; L. Pauling lo obtiene de Born, en Göttingen*

Formalmente, la mecánica matricial se mantiene cerca de la mecánica clásica. La noción central es que todas las cantidades físicas deben ser representadas por matrices *autoadjuntas* (que después se identificaron como *operadores* de un *espacio de Hilbert*). Se postula que las matrices **Q** y **P**, que representan la posición y el momento de una partícula, cumplen la regla de conmutación **QP - PQ = iħ** donde  $\hbar = h/2\pi$  (h es la constante de Planck y las letras en negrita representan matrices - o eventualmente operadores).

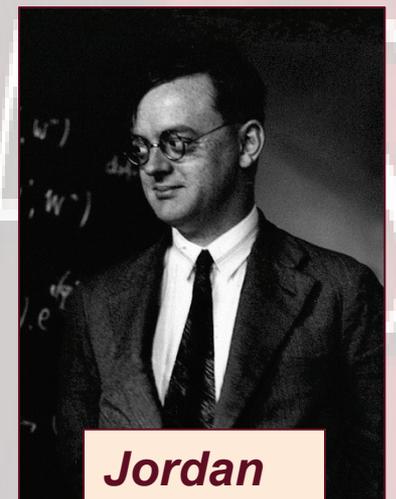
La nueva teoría obtuvo un importante éxito empírico con los datos espectroscópicos conocidos en ese tiempo.



**Heisenberg**



**Born**



**Jordan**

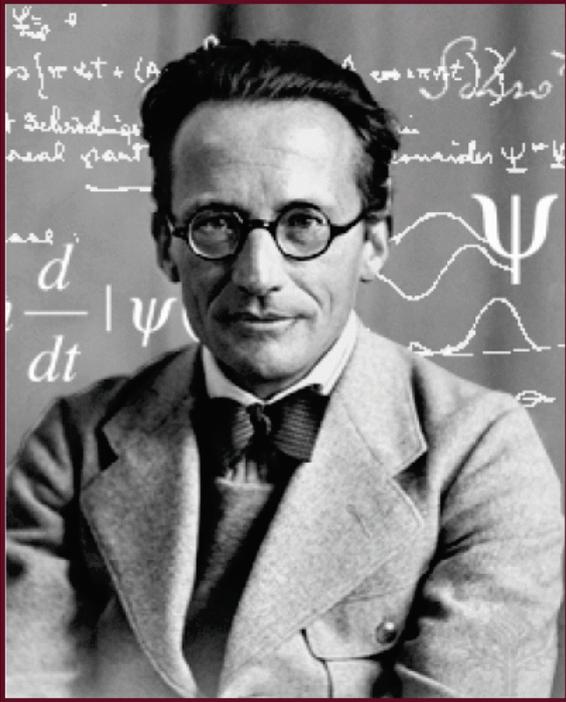
## Mecánica Cuántica Ondulatoria

Casi al mismo tiempo (fines de 1925) **Erwin Schrödinger** desarrolla otra teoría cuántica, que fue llamada mecánica ondulatoria y la publicó en 1926. *Schrödinger* (inspirado por la dualidad onda-partícula de *De Broglie*) imaginó que un electrón del átomo era semejante a una nube oscilante de carga eléctrica, que se movía continuamente en espacio y tiempo según una ecuación de ondas. La interpretación original, *i.e.*, el estado ontológico de la teoría, se modificó en los años siguientes.

Los autores de la teoría matricial quedaron desconcertados y comentaron con hostilidad la teoría ondulatoria, tan contraria a su tesis de “*no usar imágenes*”. Pero hacia 1927 la mecánica ondulatoria era considerada por casi todos los físicos, como la “*verdadera*” teoría cuántica. Según el historiador danés *Helge Kragh*, en 1927 la teoría ondulatoria dominaba la física atómica y no la mecánica de matrices de *Heisenberg*, *Born* y *Jordan*.

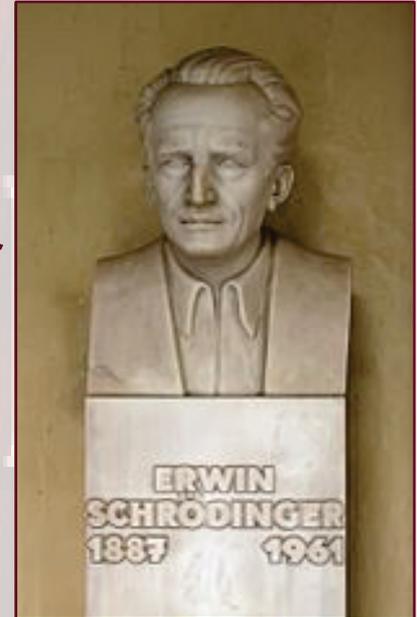
# 80 aniversario de la "nueva" MC

## Mecánica Cuántica Ondulatoria



$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + (E - V(x))\psi(x) = 0$$

La *ecuación de Schrödinger* de la mecánica cuántica ondulatoria es su legado más importante. Schrödinger es considerado el padre de la *MC* ondulatoria.



Universidad de Viena

Al poco tiempo, el mismo *Schrödinger* y otros demostraron la equivalencia de las formas, ondulatoria y matricial de la teoría cuántica.

En 1993 se fundó en Viena el *Erwin Schrödinger International Institute for Mathematical Physics*. Un gran cráter lunar en la faz opuesta de la Luna ha sido denominado *Schrödinger* en su honor.

## Un físico extraordinario: *Paul Adrien Maurice Dirac*

Al final de la década de 1920 *Paul Dirac* (físico suizo - inglés) hizo importantes progresos en la mecánica cuántica (tanto ondulatoria cuanto matricial).

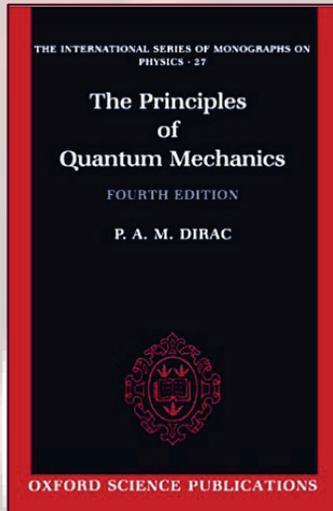
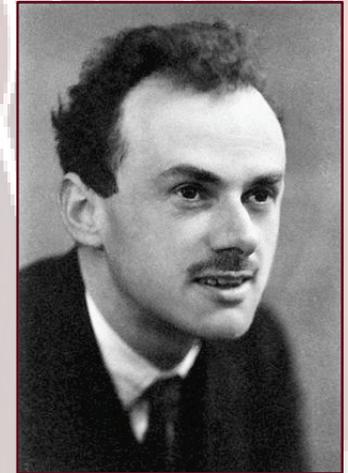
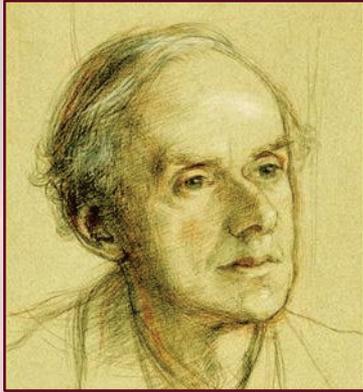
*Dirac* obtuvo la ecuación para la evolución temporal de los operadores de la mecánica cuántica.

*Dirac* derivó por primera vez la ecuación cuántica relativística de los electrones, la cual contiene automáticamente el *spin* y abrió el camino para el descubrimiento del *positrón* y la *antimateria*, durante la década de 1930.

En 1930 *Dirac* publicó *The Principles of Quantum Mechanics*, libro príncipe que ningún físico teórico puede ignorar, una piedra miliar en la historia de la ciencia.

La mecánica estadística de partículas con *spin* semi-entero se llama estadística de *Fermi–Dirac*, por la obra de ambos físicos.

En 1933 *Dirac* compartió con *Schrödinger* el premio Nobel “for the discovery of new productive forms of atomic theory”.



Placa conmemorativa de *Dirac* en la *Westminster Abbey*

## Ardientes discusiones sobre física cuántica, ca. 1930

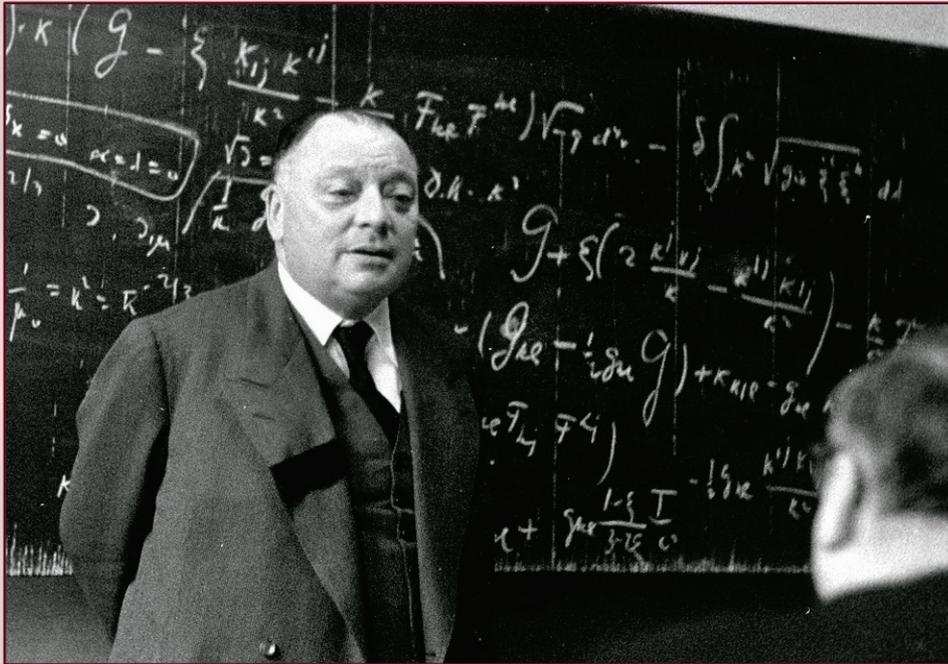


*Bohr y Einstein, arriba izquierda, con Fermi a la derecha; con Heisenberg abajo.*

# Solvay 1927 - Grandes de la “vieja” y de la “nueva” Cuántica



PLANCK - LORENTZ - EINSTEIN - BOHR - DE BROGLIE - DIRAC  
- BORN - SCHRÖDINGER - HEISEMBERG - PAULI - KRAMERS -  
COMPTON - BRILLOUIN - EHRENFEST y otros.



## **Wolfgang Pauli**

Su aporte fundamental a la MC: el Principio de Pauli

Medalla Lorentz 1931

Premio Nobel 1945

Medalla Max Planck 1958

### **Dichos de Pauli**

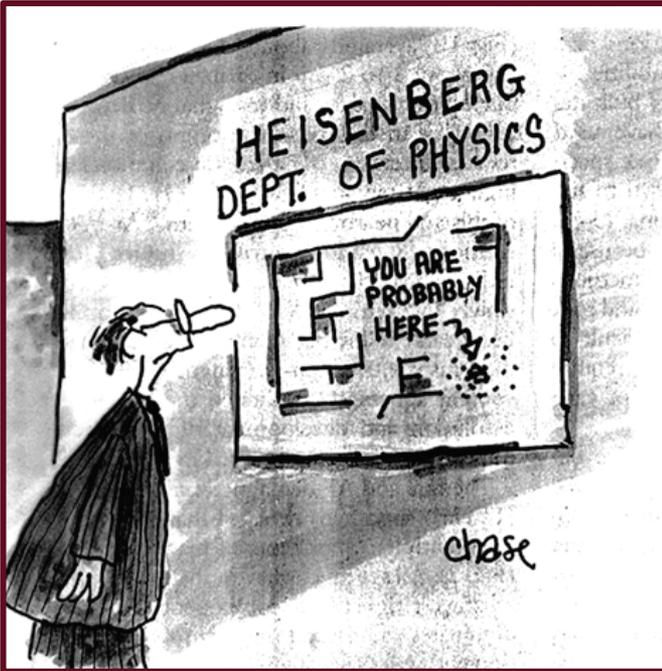
“No se debe nunca escribir más de lo necesario”.

“*This theory is worthless, it is not even wrong*”.

“La teoría no vale nada, ni siquiera es errónea”.



# Popularidad y bromas sobre el Principio de Incerteza de Heisenberg



### The Uncertainty Principle

A diagram showing a central orange circle representing a particle. A horizontal double-headed arrow labeled  $\Delta x$  indicates its position uncertainty. A vertical double-headed arrow labeled  $\Delta p$  indicates its momentum uncertainty. To the right, the Heisenberg Uncertainty Principle equation is written:  $\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$ .

- impossible to know exactly:
- where something is
- how fast it is going

A reproduction of Pieter Bruegel the Elder's painting "Adam and Eve in the Garden of Eden".

*Atom and Ev*

Atoms,  
Energy,  
and  
the Heisenberg  
Uncertainty Principle

A small empty rectangular box.A black and white portrait of Werner Heisenberg.

No officer, I don't know how fast I was going. But I know exactly where I am.

-Werner Heisenberg at traffic stop

A postage stamp from Germany featuring a portrait of Werner Heisenberg. The stamp includes the value "300", the equation  $\Delta p \cdot \Delta q \sim h$ , the text "Heisenbergsche Unschärferelation", the price "1,53 €", and the name "Werner Heisenberg Physiker 1901 - 1976". The word "Deutschland" is written vertically on the right side.

Einstein no creía que la física cuántica fuese una teoría completa. Aunque exitosa, la veía como una etapa provisoria.

En 1935, junto con Podolsky y Rosen, publicó el “*EPR paper*”, una célebre crítica. Einstein mostró que la *MC* era una teoría “no-local”. Permitía extrañas acciones instantáneas a distancia, “*spooky actions at a distance*”.

## Einstein y Bohr ca.1930



Dos gigantes de la física, vecinos en visión del mundo, pero antagónicos en su concepción de la *MC*. Bohr era el inspirador de la denominada “*Copenhagen interpretation*” de la *MC*.

El “*EPR paradox*” no fue respondido satisfactoriamente por Bohr y su escuela.

## Schrödinger: otro crítico de la versión corriente de la *MC*

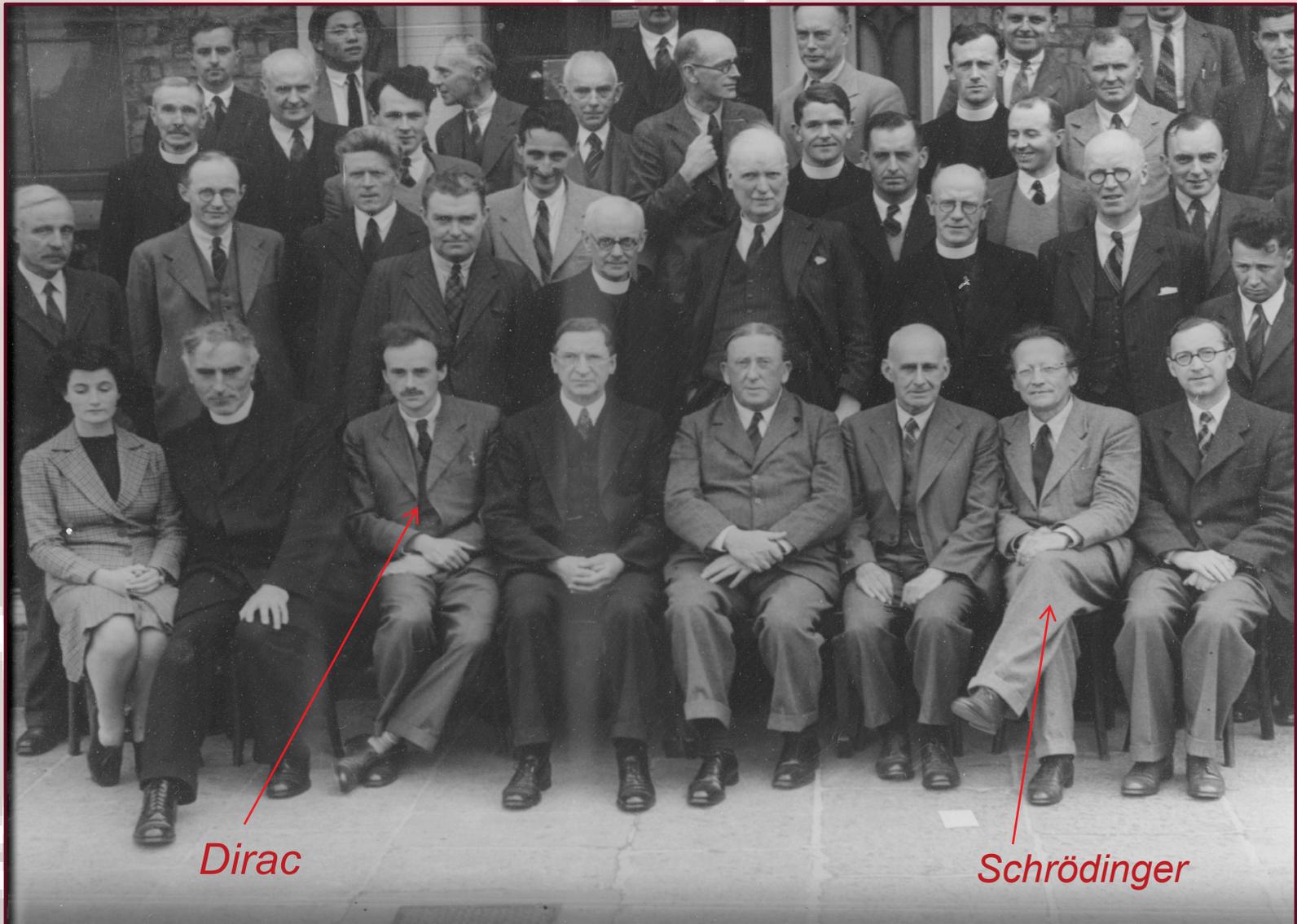


Lanzó la paradoja del “*Gato de Schrödinger*” como desafío a la interpretación corriente de la mecánica cuántica. Acuñó el término “*entanglement*”, o *entrelazamiento*. Abrió camino a la gran renovación iniciada por *John Bell* (1964 a 1987) con la revelación de la “*no-localidad*” de la *MC* a fines del siglo XX.



Retrato del billete de 1000-Schilling Austriaco en 1983-97; el segundo mayor valor emitido.

## En plena II Guerra Mundial



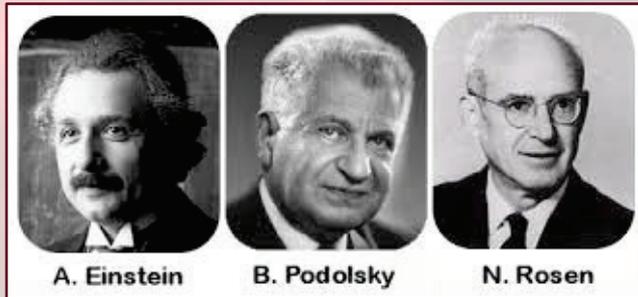
*Dirac*

*Schrödinger*

*Dublin 1942 - algunos grandes de la Cuántica*

La gran sorpresa de la II parte del siglo XX  
**Revelación de la *no-localidad*** de la física cuántica.  
(década de 1960 a década de 1980)

Escépticos y precursores



**EPR:** el gran desafío

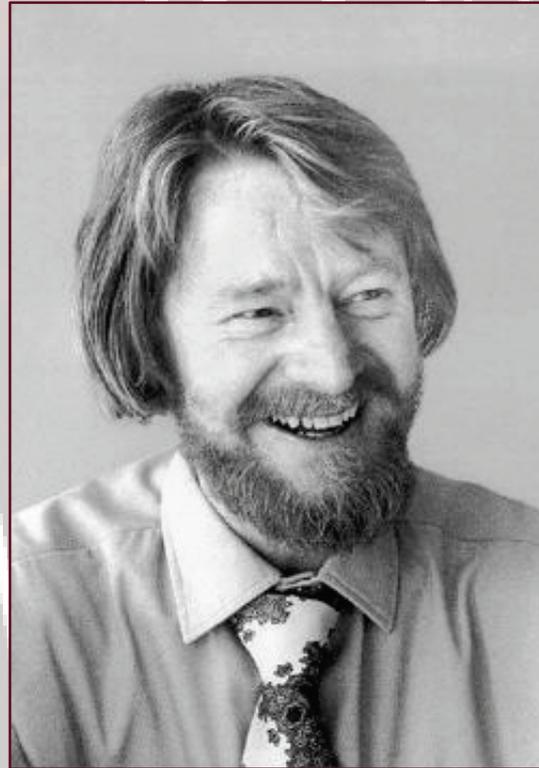


**Schrödinger** :  
autor de la  
“palabreja” y su  
famoso “gato”



**David Bohm**:  
otro heterodoxo

**El audaz explorador  
de la nueva ruta**



**John Bell**

Primero entre varios  
competidores  
“*Experimentum  
Crucis*” 1982



**Alain Aspect**:  
entrelazamiento  
cuántico .

**Entanglement**

Para cerrar la disertación, vuelvo a *Dirac*, el físico preciso, prolífico, genial y ... lacónico



Quantum mechanics has explained  
all of chemistry and most of physics.

— *Paul Dirac* —

$$\left( \beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$$

La ecuación de la *MC* relativista de *Dirac*

Era de pocas palabras, un taciturno: en Cambridge sus colegas definieron una unidad, “*el dirac*”, ¡Equivalía a una palabra por hora!

...one of the fundamental features of nature [is] that **fundamental physical laws are described in terms of a mathematical theory of great beauty** ... Why is nature constructed along these lines? ... our present knowledge ... show[s] that nature is so constructed. We simply have to accept it. One could...[perhaps] say [...] that God is a mathematician of a very high order, and He used **very advanced mathematics** in constructing the universe... **Paul Dirac dixit, 1963.**



Botticelli - *Venere e Marte* - National Gallery, London

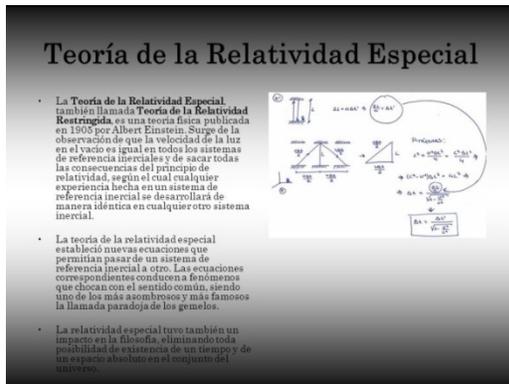
## ***Bibliografía mínima***

- APS News, Physics History February 1927: *Heisenberg's Uncertainty Principle*
- Bricmont J, <http://arxiv.org/abs/1703.00294v1>, 2017
- Cohen-Tannoudji C. *et al*, *Quantum Mechanics*, John Wiley, NY, 1977
- Gamow G., *Thirty years that Shook Physics*, Dover, NY, rep.1985.
- Gilder L., *The Age of Entanglement*, Vintage, NY, 2009
- Heisenberg W., *Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover, NY, rep.1949
- Hermann A., *The Genesis of Quantum Theory (1899-1913)*, MIT 1971
- Jammer M., *Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill,1966
- Kragh H., *The Early Phase of Wave Mechanics, 1926-1928*, Hosta, Aarhus Un. Denmark, 2000
- Kragh H., *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge UP, 1990
- Moore W., *A life of Erwin Schrödinger*, Cambridge UP, 1994
- Pais A., *Subtle is the Lord, The Science and Life of A. Einstein*, Oxford UP, 1982
- Pais A., *Inward Bound, Matter and Forces in the Physical World*, Oxford UP, 1986
- Pauli W., *Writings on Physics and Philosophy*, Springer, 1994.
- Przibram, K., *Letters on Wave Mechanics*, Philosophical Library, NY, 1967
- Segrè E., *Personaggi e Scoperte della Fisica Contemporanea*, Mondadori, 2001
- Wheeler J.A., *Geons, Black Holes and Quantum Foam*, Norton, NY, 2000

# METAFISICA DE LA MECANICA CUANTICA: ¿De utilidad o un ejercicio intelectual estéril?

Luis A. de Vedia<sup>1</sup>

El electromagnetismo fue el desafío del siglo XIX a la espacio-temporalidad local. Este desafío fue salvado por la introducción de la idea de campo. Además, a principios del siglo XX la teoría de la relatividad proveyó un poderoso argumento para interpretar que las interacciones electromagnéticas obedecían dicha localidad. Fue entonces que la Mecánica Cuántica (MC) también apareció en escena planteando un desafío enteramente nuevo a la localidad. Resulta notable que aun ahora, con el siglo XXI ya bien iniciado, tanto filósofos como científicos continúan luchando con este mismo desafío.



Como es bien sabido, la MC fue desarrollada inicialmente en los años '20 del siglo pasado por Werner Heisenberg, físico alemán, Erwin Schrödinger, austriaco y por Max Born, también físico alemán. Esta nueva teoría brindó las primeras explicaciones exitosas de la naturaleza de los enlaces químicos, de la tabla periódica de los elementos y del espectro del hidrógeno entre

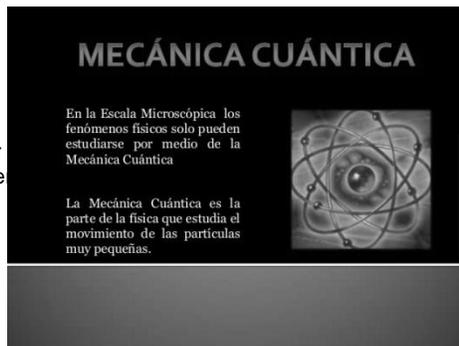
otras cuestiones como el decaimiento radiactivo del núcleo atómico. Desde entonces, la MC ha venido siendo utilizada para explicar fenómenos que van desde el comportamiento de semiconductores, superconductores, hasta lo que ocurre con las estrellas enanas blancas, para mencionar sólo algunos campos de la física y la tecnología.



Werner Heisenberg



Max Born



Erwin Schrödinger

Seguramente, el más importante "spin off" de esta teoría fue el desarrollo de la Electrodinámica Cuántica (QED) en los años posteriores a la segunda guerra mundial, gracias al genio de Pauli, Bethe, Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson y otros.

Esta es sin duda nuestra teoría más precisa en términos de concordancia de sus predicciones con los resultados experimentales y proveyó el molde para el

<sup>1</sup> Miembro Titular de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y de la Academia Nacional de Ingeniería.

desarrollo de la Teoría Cuántica de Campos (TCC) que a través del modelo estándar nos brinda la explicación de todas las interacciones entre partículas elementales.

De manera que la aplicación de los principios de la MC para efectuar predicciones sobre el comportamiento de los microsistemas (y de algunos macrosistemas) nos provee resultados que concuerdan con una precisión asombrosa con el comportamiento observado de tales sistemas. En este sentido, nada parece más alejado de la metafísica que una construcción matemática cuyo formalismo nos lleva a resultados concretos y precisos. De manera que si sólo estamos interesados en predecir el comportamiento de los sistemas, cualquier consideración metafísica parece resultar innecesaria. Pero, ¿es esto efectivamente así? ¿Nos limitaremos a predecir el comportamiento de un sistema o queremos también entenderlo, es decir llegar a saber por qué ocurre lo que ocurre? Paradójicamente, es en este último aspecto, donde la MC presenta hoy quizás más dificultades conceptuales y de interpretación que cuando fue concebida.

El concepto de medición yace en la base del formalismo de la MC. Esto puede parecer una afirmación intuitivamente obvia para cualquier estructura teórica con pretensiones de predecir el resultado de observaciones experimentales. Sin embargo, en Mecánica Clásica (MCL) por ejemplo, que es una teoría del comportamiento de los objetos cuando estos están expuestos a fuerzas de distinto tipo, la medición no tiene otro rol que el pasivo de registrar tal comportamiento. Por el contrario, en MC la medición toma un significado mucho más profundo.

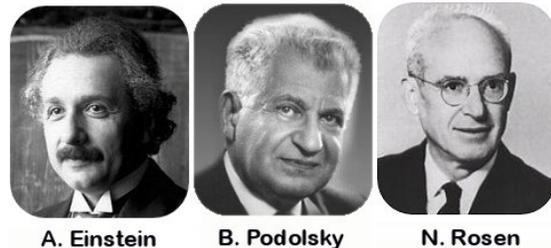
En su debate con Heisenberg sobre la interpretación del Principio de Incertidumbre, Bohr argumentaba que el empleo de conceptos clásicos diametralmente opuestos, como onda y partícula, nos impiden conocer que es lo que realmente está ocurriendo en un sistema cuántico ( $q$ -sistema) hasta tanto el sistema sea expuesto a alguna forma de instrumento de medición. En efecto, si decidimos conocer la posición de las partículas en un dado instante, debemos recurrir a un instrumento diseñado para revelar esas posiciones. Si por el contrario deseamos poner de manifiesto efectos de interferencia, el instrumento deberá estar diseñado para ello. En ambos casos los instrumentos operan en un mundo macroscópico y obedecen las leyes de la física clásica. Ambos revelan realidades diferentes, es decir el acto de observación determina la realidad.

Aquí es donde el concepto de realidad comienza a tornarse resbaladizo. Efectivamente, si nos remitimos a la interpretación ortodoxa, es decir a la interpretación de Copenhagen de la MC, debemos aceptar que esta teoría es *anti-realista* en el sentido que las entidades que postula sólo cobran existencia real una vez que *intervenimos* un  $q$ -sistema mediante un *acto de medición*. Es así que si queremos determinar la posición de un electrón en una dada región del espacio, para la interpretación ortodoxa, el electrón se materializa, es decir cobra existencia

en una dada posición *sólo después* de haberlo detectado mediante algún instrumento adecuado de medición en esa posición. Ante esto surge inmediatamente la pregunta: ¿dónde se encontraba el electrón hasta el instante en que se efectúa su detección? La respuesta según la interpretación de Copenhagen es que el electrón como tal no tenía existencia real, o más bien no tenía sentido plantearse la idea de su existencia real, y se encontraba en cambio como una suerte de entidad abstracta en una especie de “limbo” distribuido probabilísticamente en el espacio, estando el estado de esta entidad abstracta y su evolución hasta el instante de la intervención, dados por la ecuación de Schrödinger. En otras palabras, el electrón sólo asoma a la realidad cuando se efectúa una observación que lo pone de manifiesto.

Einstein fue siempre escéptico respecto de tal interpretación, afirmando que si bien el Ppio. de Incertidumbre impide el conocimiento simultáneo de variables conjugadas, ello no implica que dichas variables no tengan en todo momento un valor perfectamente definido. De acuerdo a este criterio, la MC sería una teoría *incompleta* ya que no puede manejar todos los elementos de la realidad y que hay aspectos de los sistemas cuánticos, a los que no tenemos acceso por el Ppio. de Incertidumbre pero que tienen existencia real. De hecho, muchos de los problemas conceptuales de la MC desaparecerían si se pudiese demostrar que las predicciones de la teoría están en realidad determinadas por propiedades que por alguna razón, no pueden ser observadas directamente, esto es por variables ocultas. Sin embargo, existen experimentos en los cuales las predicciones de la MC no pueden coincidir con los de una teoría de variables ocultas.

Einstein con sus colaboradores de Princeton, Boris Podolsky y Nathan Rosen, presentaron un trabajo en el año 1935 en el que argumentaban que la interpretación de Copenhagen era incorrecta y que en realidad había algún mecanismo subyacente que sólo daba la apariencia de incertidumbre e impredecibilidad a nivel cuántico.



Un punto estrechamente relacionado con esto es la naturaleza probabilística de la MC. Al respecto, Max Born declaraba que la MC es intrínsecamente una teoría probabilística en su naturaleza y sólo nos puede proveer información respecto de las probabilidades de resultados de mediciones y no certezas. Por esto resulta esencial interpretar la naturaleza de las probabilidades en MC.

Para ilustrar esto consideremos un  $q$ -sistema descrito por un vector de estado  $|\psi\rangle$  sobre el cual el resultado de una dada medición tiene dos posibilidades. Un tal ejemplo podría ser la determinación de la dirección del spin de un electrón en algún sistema de referencia de laboratorio. Hay dos posibles resultados: spin “up”

o spin “down”. Si hiciésemos mediciones repetidas sobre un haz de electrones preparados de la misma manera, entonces encontraríamos experimentalmente que la mitad de las mediciones tienen como resultado spin “up” y la otra mitad spin “down”. Lo mismo que si arrojáramos una moneda un número suficiente de veces o fuésemos sacando de una bolsa monedas idénticas, el resultado convergiría a un 50% de caras y un 50% de cecas. Pero ahí termina la analogía y las probabilidades en ambas experiencias son esencialmente diferentes.

Efectivamente, en la moneda que arrojamos, la propiedad dual de caras y cecas es obviamente inherente a la moneda antes, durante y después de ser ésta arrojada. En el caso de la medición de los vectores spin, podríamos asumir que como en la moneda, cada átomo está presente antes de la medición con su spin “up” o con su spin “down”, y en un haz de partículas preparadas en forma idéntica, es razonable entonces predecir que encontraríamos igual cantidad de átomos en cada uno de los dos estados. De este modo, la medición simplemente nos permitiría saber cuál es ese estado para cada partícula. Sin embargo, y esto es lo importante, esto no es así.



En primer lugar, en su interpretación habitual, la probabilidad en MC no le asigna ningún significado al resultado de mediciones hechas sobre partículas individuales, sino que el concepto de probabilidad se aplica a la distribución de resultados de mediciones repetidas sobre una colección de partículas idénticamente preparadas. Pero sobre todo, si asumimos que las partículas tienen la propiedad que medimos antes de efectuar la medición, esto nos lleva a conclusiones que están en franco conflicto con los resultados experimentales.

El vuelco conceptual se produce por el trabajo del físico irlandés John Bell del CERN<sup>(2)</sup> en 1964 dando

origen a la “*desigualdad de Bell*” que habilita por primera vez la posibilidad de emplear una metodología experimental para dirimir el dilema. Efectivamente, Bell se dio cuenta que aunque no es posible medir el spin de una partícula sobre más de una dirección, de tener la

## Bell's Theorem



John Stewart Bell  
1928 - 1990

No physical theory of local hidden variables can ever reproduce all of the predictions of quantum mechanics.

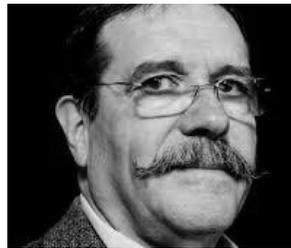
partícula un spin definido sobre todas las direcciones, hay consecuencias confirmables experimentalmente. Una consecuencia del Teorema de Bell es que si Einstein y sus colaboradores estaban en lo cierto, en el sentido que si bien el Ppio.

<sup>2</sup> CERN: Centro Europeo para Investigaciones Nucleares, cercano a Ginebra, Suiza.

de Incertidumbre impide el conocimiento simultáneo de variables conjugadas, ello no implica que dichas variables no tengan en todo momento un valor perfectamente definido, dos detectores separados espacialmente midiendo en direcciones seleccionadas independientemente al azar el spin de partículas inicialmente correlacionadas, deberían coincidir en sus resultados más del 50% de las veces.

En el momento en que Bell obtuvo este resultado, la tecnología no estaba aún disponible para confirmarlo. La experiencia crucial fue la realizada por Aspect y su equipo en Francia en 1980.

En un tal experimento, dos detectores se colocaron a una distancia de 13 m uno de otro con un contenedor de átomos energéticos de calcio en el punto medio entre ambos detectores. Al pasar a un estado de menor energía, un átomo de calcio emite dos fotones en direcciones opuestas con sus spins correlacionados.

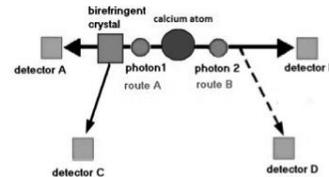


### The experiments of Alain Aspect

In 1982, Alain Aspect, with the collaboration of the researchers J. Dalibard and G. Roger of the Optic Institute of the University of Paris, demonstrated the existence of the entanglement, thus confirming the hypothesis of "non-locality" of the quantum theory.

The figure shows a simplified scheme of the equipment used by Aspect and his collaborators during the experiments.

An excited atom of calcium, at the center of the figure, produces a pair of entangled photons that move along opposite paths "A and B":



De modo que en este experimento, si los detectores están ajustados en la misma dirección, los spins de ambos fotones producirán el mismo resultado (ambos spin "up" o ambos spin "down"). Asumamos que mediante los dos detectores podemos medir en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , el spin de los fotones inicialmente correlacionados.

Sabemos que si la medición  $S_{z1}$  da como resultado spin "up" o spin "down", la medición  $S_{z2}$  dará el mismo resultado spin "up" o spin "down" y análogamente con las mediciones  $S_{x1}$  y  $S_{y1}$  con relación a las mediciones  $S_{x2}$  y  $S_{y2}$ .

Ahora bien, según Einstein y sus colaboradores, cada par de fotones lleva consigo el mismo "programa" escrito en términos de variables ocultas, que determina el valor de cada medición según los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Supongamos que este programa determina que los resultados de las mediciones de los detectores según estos ejes sean respectivamente: spin "up", spin "up", spin "down". De manera que las combinaciones que arrojarán resultados coincidentes serán  $(S_{x1}, S_{x2})$ ,  $(S_{y1}, S_{y2})$ ,  $(S_{z1}, S_{z2})$ ,  $(S_{x1}, S_{y2})$ ,  $(S_{y1}, S_{x2})$ , es decir son cinco combinaciones en total. Las combinaciones de direcciones posibles son en cambio  $xx$ ,  $xy$ ,  $xz$ ,  $yx$ ,  $yy$ ,  $yz$ ,  $zx$ ,  $zy$ ,  $zz$ , es decir nueve en total.

Dado que cinco es más que la mitad de nueve, la validez de la teoría de variables ocultas implicaría que en un número suficientemente grande de mediciones hechas sobre los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  independientemente al azar mediante cada detector, tendríamos que encontrar coincidencias en los pares de mediciones más del 50% de las veces lo que no se verifica experimentalmente.

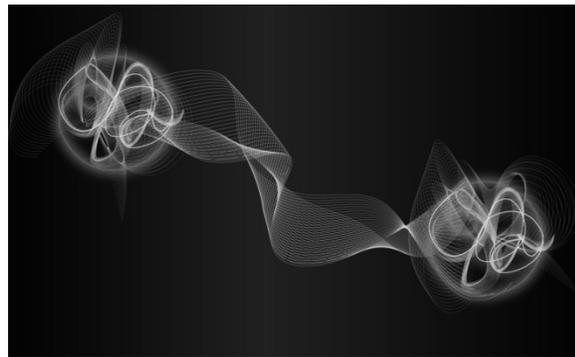
Si bien en este análisis hemos considerado el “programa” particular spin “up”, spin “up”, spin “down” para las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , respectivamente, cualquier otro programa arrojaría las mismas conclusiones y lo mismo cabe consignar si en lugar de considerar mediciones según tres direcciones definidas, se hubiesen considerado direcciones cualesquiera.

La refutación experimental de la teoría de variables ocultas nos lleva a la antiintuitiva conclusión que en los fenómenos cuánticos, parece no cumplirse la localidad espacial y se pone de manifiesto una suerte de acción a distancia.

Además, la inexistencia de variables ocultas introduce un indeterminismo esencial en lo que hace al resultado de las mediciones de variables dinámicas en general.

Esto significa que la probabilidad del resultado de una medición subsiguiente de cualquier otra componente del spin de la segunda partícula, habrá cambiado como consecuencia de la primera medición, *aun estando las partículas separadas espacialmente por una distancia arbitraria y sin aparente interacción entre ellas*. Por esta razón es que decimos que la MC es una teoría *no-local*, o bien que las partículas *no son separables*.

La manifestación de la no-localidad de los sistemas cuánticos la tenemos cuando consideramos, como ya hemos visto más arriba, un sistema constituido por dos partículas de algún modo correlacionadas (por ejemplo por tener spin total nulo, o algo similar). En este caso la función de onda del sistema  $\psi(x_1, x_2, t)$



dependerá de las posiciones  $x_1$ ,  $x_2$  de ambas partículas y del tiempo  $t$ . El “objeto” representado por esta función de onda es ciertamente peculiar dado que la probabilidad de hallar una de las partículas en una dada posición depende de la posición de la otra partícula por muy alejada que se encuentre, lo que nos vuelve a sugerir una extraña acción instantánea a distancia entre ambas partículas (lo que en la literatura anglo-sajona suele llamarse “*spooky action at a distance*”, algo así como “*acción a distancia fantasmal*”).

Ya hemos mencionado que esta extraña acción a distancia, que no sólo es extraña sino que violaría uno de los dos postulados fundamentales de la relatividad especial que establece a la velocidad de la luz en el vacío como un

límite imposible de superar por cualquier entidad física, puede ser eliminada o al menos atenuada si consideramos que hasta el momento en que se efectúa la primer medición, el sistema no está constituido por dos partículas independientes sino por dos entidades correlacionadas de algún modo.

De hecho, la forma matemática  $\psi(x_1, x_2, t)$  de la función de onda del sistema nos está diciendo que el sistema queda descrito en cada instante por una distribución de probabilidades que es función de ambas variables  $x_1$  y  $x_2$ . Quizás la dificultad para asignarle existencia real a esta entidad, proviene de nuestra experiencia cotidiana que atribuye a los eventos que vemos que suceden en el mundo una localización espacio-temporal, ya que aún aquellos acontecimientos que se extienden en el tiempo y en el espacio, siempre pueden ser reducidos a una cadena causal, en la que cada eslabón causa-efecto tiene contigüidad espacio-temporal con el siguiente. Sin embargo, la realidad puede ser mucho más extraña a nuestra intuición que lo que suponemos, lo que nos llevaría a aceptar que un sistema cuántico puede representar una totalidad aunque exista en forma deslocalizada espacial y temporalmente. De acuerdo con esta idea, la perturbación que sufre una de las partículas en el momento en que se hace una medición sobre la otra, no implica la transmisión de una señal superlumínica sino que es una modificación del estado del sistema, que hasta ese instante es una totalidad, ya que no puede hablarse de “partes” del sistema.

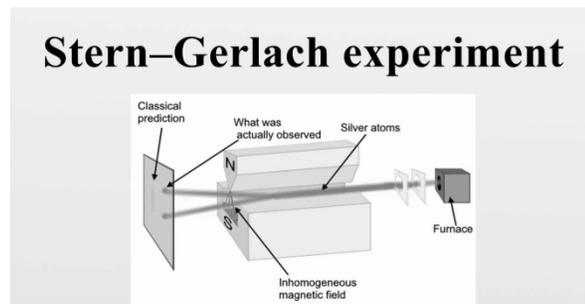
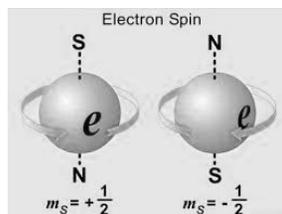
Este carácter *no local* de la MC ya se había puesto de manifiesto en la experiencia de difracción de electrones por rendijas, donde el espectro de difracción se produce aun cuando los electrones entren al dispositivo de a uno. Esto significa que el electrón de alguna manera “*passa*” por ambas rendijas lo que impide considerarlo como una partícula localizada. Esta no localización de la partícula queda interpretada en alguna medida por el aspecto ondulatorio asociado al electrón. Con relación a esto, es importante recordar que este aspecto ondulatorio desaparece en el momento en que se hace una detección de la posición del electrón, por ejemplo a la salida de una de las rendijas.

Esta simple experiencia, pone de manifiesto el llamado *problema de la medición* en MC y al cual nos hemos referido en relación a la determinación del spin de una partícula, pero

que podemos volver a describir de la siguiente manera:

Asumamos tener un  $q$ -

sistema como puede serlo un electrón que hemos preparado de forma tal que conocemos su spin inicial, es decir para  $t = 0$ , por haberlo hecho pasar por un



aparato de Stern-Gerlach (SG) y por haber emergido el electrón del canal correspondiente, digamos, a spin “up”.

Esto significa que si hiciésemos inmediatamente una nueva medición del spin en la misma dirección, obtendríamos el mismo resultado. Ahora bien, la función de onda del electrón cuando sale del aparato de SG es tal que el operador spin tiene un autovector con un autovalor en la dirección de medición del valor de spin medido, en este caso spin “up”. A partir del instante en que se hace la medición del spin ( $t = 0$ ), la evolución del estado del electrón en su subsiguiente interacción con eventuales campos eléctricos y magnéticos queda totalmente determinada por la evolución de su función de onda según la ecuación de Schrödinger. Esta evolución, totalmente determinista, se mantiene hasta que se efectúa una nueva medición.

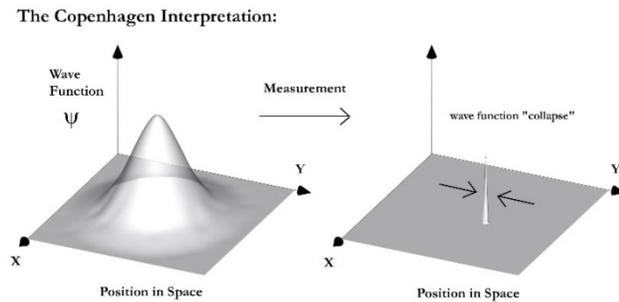
El resultado de esta nueva medición no puede en general predecirse en forma exacta y todo lo que podemos inferir del conocimiento de la función de onda utilizando el operador correspondiente a la dirección seleccionada para efectuar la nueva medición, es la probabilidad de que el resultado sea spin “up” o spin “down”. Dicho de otra manera, la medición de una variable dinámica “*destruye*” la información que se tenía del estado del  $q$ -sistema a través de la evolución temporal determinista de su función de onda y se “*salta*” a un nuevo estado correspondiente al autovector del operador de la variable dinámica en consideración. Este “salto” desde una evolución temporal perfectamente determinista a un estado definido pero de resultado aleatorio cuando se efectúa una medición, es lo que se conoce como “*reducción*” o “*colapso*” de la función de onda.

Es importante destacar aquí que, a diferencia de lo que es habitual en las distintas posiciones filosóficas respecto de la realidad, las variables dinámicas en MC se denominan *observables* aunque las mismas son sólo determinables a partir de instrumentos de medición, lo que las calificaría, de acuerdo con aquellas posiciones, como inobservables.

Un punto a destacar sobre la interpretación probabilística de los resultados de una medición en MC, es que a diferencia de la interpretación habitual sobre la probabilidad de obtención de un dado resultado como podría serlo la extracción al azar de un número de la lotería en la que las bolillas con los distintos números tienen existencia real antes de la extracción, en un  $q$ -sistema, hasta el momento de efectuar la medición, la variable dinámica a medir no tiene un valor definido que sólo adquiere al producirse la reducción de la función de onda por el acto de medición.

Por esta razón hemos dicho más arriba que los  $q$ -sistemas se encuentran según la MC en una suerte de limbo probabilístico, del cual sólo emergen cuando se efectúa el acto de medición.

La pregunta que surge con relación al fenómeno de reducción de onda es en qué etapa del proceso de medición dicha reducción se produce. Puede argumentarse que la reducción se produce en el momento en que el experimentador obtiene la información del valor del observable a través de la lectura de algún instrumento de medición cuyo funcionamiento es descrito en términos clásicos. Pero la frontera entre la evolución determinista del sistema según la ecuación de Schrödinger y el estado correspondiente a un valor definido del observable medido es móvil y podría ubicarse en cualquier punto entre el  $q$ -sistema y el observador.



En efecto, la interacción entre el  $q$ -sistema y al menos una parte del instrumento de medición puede describirse en términos cuánticos por lo que no queda claro en qué punto de todo el proceso de medición se produce el colapso o reducción de la función de onda dando lugar a un resultado definido para la variable medida.

Si todos los sistema físicos, aún los clásicos como los son los instrumentos de medición, más allá de las dificultades matemáticas, pueden ser descritos con el formalismo cuántico, y la MC asegura que esto es efectivamente así, ¿cómo puede haber lugar para instrumentos cuyas mediciones corresponden a estados descritos en términos clásicos?

La respuesta dada por Bohr en el marco de la interpretación de Copenhagen es que la “medición” debe interpretarse como una noción “*primitiva*”. Es decir un  $q$ -sistema interactuando con el mundo exterior al mismo puede ser medido pero no entrar en interacción dinámica con el exterior (instrumento de medición). La teoría es así sólo un instrumento cuyo fin es proveer correlaciones entre el estado de un  $q$ -sistema y un proceso (de medición) que prepara al sistema en un dado estado cuántico para la medición posterior del observable.

Sin embargo, esta posición es discutible habida cuenta de resultados que muestran que la probabilidad de obtener un dado valor de un observable en un  $q$ -sistema  $A$  mediante un instrumento de medición complejo  $B + C$ , es la misma que considerando el sistema  $A + B$  y efectuando la medición con el instrumento  $C$ . En otras palabras, la separación ineliminable de naturaleza metafísica que según Bohr hay entre el  $q$ -sistema y el instrumento clásico de medición queda sin resolver. En efecto, la interacción entre el  $q$ -sistema y al menos una parte del instrumento de medición puede describirse en términos cuánticos por lo que no queda claro en qué punto de todo el proceso de medición se produce el colapso o reducción de la función de onda dando lugar a un resultado definido para la variable medida.

Estas dificultades han llevado a algunos científicos, en particular a E.Wigner, a sugerir que el colapso de la función de onda se produce sólo cuando una mente consciente toma conocimiento del valor del observable medido. No es de sorprender que esta posición de una metafísica dualista de un mundo físico por un lado y mentes conscientes por el otro tenga pocos adherentes. Sin embargo, el colapso de la función de onda causado por la intervención de una mente consciente queda sin explicación y fuera de la competencia de la física. Una alternativa más promisoria es la caracterización del proceso de medición como una clase particular de interacción física en la que participa un microsistema (el  $q$ -sistema) y un sistema macroscópico (el instrumento de medición). De este modo, un aspecto microscópico del sistema que es medido se correlaciona con aspectos macroscópicos del sistema de medición de una manera que revela el valor de la microentidad.

Por ejemplo, en una operación en la que se detecta por cual rendija pasa un electrón, esta detección puede ser efectuada por un dispositivo que amplifica el efecto del pasaje de la partícula por el detector, por ejemplo por un amplificador en cascada que multiplica el número de partículas cargadas que terminan revelando la presencia de la microentidad inicial mediante un voltaje macroscópico producido por una gran cantidad de partículas cargadas actuando concertadamente. De manera análoga, en un aparato SG, las partículas con diferente spin son separadas espacialmente por distancias macroscópicas por el campo magnético inhomogéneo del dispositivo y luego son detectadas en el haz superior o inferior por un dispositivo como el descrito anteriormente.

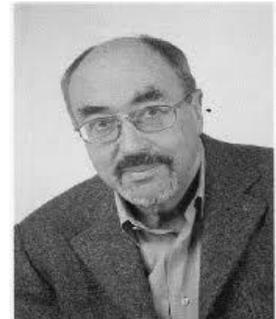
Tengamos en cuenta que hay dos características en el proceso de medición: la primera es que el estado del aparato de medición implica siempre un gran número de partículas y es caracterizable en escala macroscópica. La segunda es que el estado final del aparato es macroscópicamente discernible, es decir no se trata de un estado de superposición sino de un estado "*puro*" perfectamente correlacionado con los estados cuánticos del sistema que está siendo medido.

Los adherentes a esta interpretación del proceso de medición aceptan de todos modos que la interacción entre el micro  $q$ -sistema y el instrumento de medición obedece a las leyes de la MC. Esto implica que si el microsistema a medir se encuentra en un estado de superposición, por ejemplo spin "up" con spin "down" el sistema constituido por el microsistema y el aparato de medición también debe encontrarse en un estado de superposición spin "up" más el instrumento indicando spin "up" y spin "down" más el instrumento indicando spin "down".

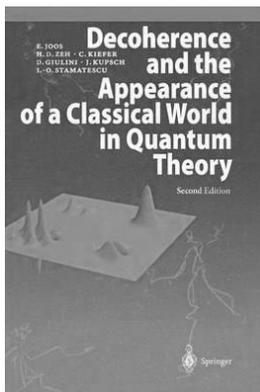
En efecto, si efectuamos una medición del spin de un electrón (no es necesario detenerse a considerar los detalles de aparato de medición), el instrumento de medición arrojará sólo uno de los dos resultados, "up" o "down", pero como ambos resultados son posibles con una cierta probabilidad, la linealidad de la ecuación de Schrödinger nos dice que el nuevo estado del sistema constituido por el electrón y

el aparato de medición debe ser  $|\psi\rangle = \alpha|+, up\rangle + \beta|-, down\rangle$ . Pero aquí no hemos logrado hacer aún una medición ya que seguimos teniendo en la descripción del sistema una superposición lineal que incluye ambos estados posibles finales del aparato de medición y no contamos con un único resultado que es lo que constituiría una auténtica medición. Obviamente, para que haya medición, en algún punto del proceso tiene que producirse la reducción de la función de onda para pasar de una superposición a un estado único que en nuestro caso sería  $|\psi\rangle = |+, up\rangle$  o bien  $|\psi\rangle = |-, down\rangle$ . Observemos que si a la salida del aparato de medición se sitúa un observador, la linealidad de la ecuación de Schrödinger nos conduciría a que el nuevo estado del sistema constituido por el electrón, aparato de medición y observador consciente se encontraría representado por  $|\psi\rangle = \alpha|+, up, Yo^+\rangle + \beta|-, down, Yo^-\rangle$ , donde  $Yo^+$  y  $Yo^-$ , representan los dos estados posibles de consciencia del observador que se anoticia del resultado correspondiente, por lo que de no mediar la reducción de la función de onda, estaríamos aún sin haber logrado una medición. Como ya hemos mencionado, existe una línea de pensamiento que propone que es precisamente la intervención de una mente consciente en el proceso de medición lo que provoca el colapso de la función de onda

Lo que ocurre es que dado que el aparato de medición es macroscópico, está constituido por una enorme cantidad de partículas por lo que la caracterización de su estado requiere una mayor cantidad aún de grados de libertad. Los efectos de interferencia entre el microsistema y el instrumento no desaparecen pero se disipan en el proceso de amplificación del que sólo emerge un valor de la variable dinámica medida, en este caso spin “up” o spin “down”, que es el que se toma como valor de la medición. Este fenómeno por el cual aquellas componentes del vector de onda del conjunto  $q$ -sistema/aparato de medición que se encuentran en superposición se destruyen rápidamente, se denomina *decoherencia* y es el responsable que no observemos normalmente fenómenos de interferencia a nivel macroscópico. H. Dieter Zeh fue autor en 1970 de un trabajo seminal sobre decoherencia en mecánica cuántica



**H. Dieter Zeh** (1932 – 2018). Profesor de física teórica en la Universidad de Heilderberg, Alemania.

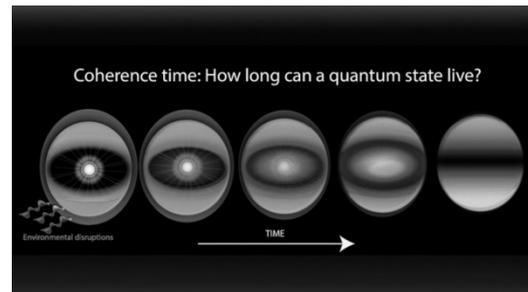


que ha sido desde entonces desarrollado por numerosos investigadores.

Según esta interpretación, el colapso de la función de onda debe interpretarse como el resultado de la compleja interacción entre microsistema y aparato de medición (más el medio exterior) que hace que el efecto de superposición entre ambos sea en la práctica indetectable quedando sólo detectables los estados macroscópicos posibles del aparato de medición. Este desacople de las componentes del vector

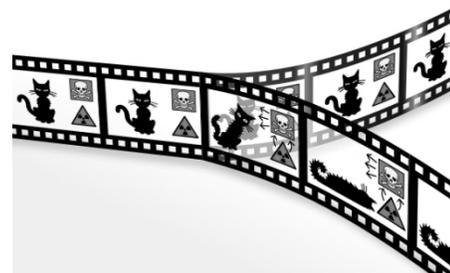
de onda que se encuentran en superposición es el resultado del acoplamiento del vector de onda a los innumerables estados del aparato de medición y su ambiente. La coherencia o superposición de estados que representa un vector de estado es una condición extremadamente lábil. Basta la interacción del vector de onda con algunos pocos fotones o átomos para que rápidamente se produzca la decoherencia o desfasaje de sus componentes en superposición y el sistema cuántico adquiera una característica clásica. Es de destacar que este proceso de proyección del vector de onda en un autoestado dado no es instantáneo como lo postula la MC ortodoxa, sino que es un proceso físico que requiere cierto tiempo para completarse.

La teoría de la decoherencia se ha incorporado ya a la corriente principal de investigación en física y nos dice que la transición entre un objeto cuántico deslocalizado y un objeto clásico localizado puede relacionarse con un *factor de decoherencia*  $e^{-t/\tau}$ , donde  $\tau$  es el *tiempo de decoherencia*. Este tiempo de



decoherencia está relacionado con el tamaño del objeto bajo estudio y al número de partículas interactuantes en su ambiente. Cuanto más pequeño sea  $\tau$ , más breve será el tiempo que requerirá el vector de estado para eliminar sus componentes en superposición y tornarse, junto con el aparato de medición y su ambiente, en un objeto clásico. Es así que hay cálculos que permiten estimar que una molécula de unos  $10^{-6}$  cm de radio, moviéndose en el aire, tiene un tiempo de decoherencia aproximado de  $10^{-30}$  s. Eliminando el aire, es decir en un vacío de laboratorio, la misma molécula tendría un tiempo de decoherencia de unos  $10^{-17}$  s. En el espacio intergaláctico, en el que la molécula interactuaría sólo con la radiación de fondo, el tiempo de decoherencia aumentaría a unos  $10^{12}$  s, lo que significa que la molécula podría permanecer en un estado deslocalizado por poco menos de 32000 años<sup>3</sup>! En contraste, una partícula de polvo se manifestará como un objeto clásico aún cuando la interacción con el ambiente se mantenga baja.

De manera que según esta interpretación, el colapso de la función de onda debe interpretarse como el resultado de la compleja interacción entre microsistema y aparato de medición que hace que el efecto de superposición entre ambos sea en la práctica indetectable.



La teoría de la decoherencia permite explicar

<sup>3</sup> Estas estimaciones corresponden a Ommnes, R., 1994, "The interpretation of Quantum Mechanics", Princeton University Press, Princeton, NJ. y son citados por Baggott, J. (13).

porque el *gato de Schrödinger*<sup>4</sup> está vivo o muerto y no parcialmente vivo y parcialmente muerto. Sin embargo no elimina otro de los aspectos de la MC que conspiran contra una interpretación realista de la misma.

La localización espacio- temporal de las relaciones causales y el determinismo son dos atributos clásicos que siempre se ha considerado debe exhibir cualquier fenómeno para que pueda ser considerado real. En la interpretación ortodoxa de la MC, los aspectos que conspiran contra la adopción de una posición realista para la teoría y para las entidades que postula, son fundamentalmente la no localidad de los fenómenos cuánticos y el colapso o reducción de la función de onda que da origen a un indeterminismo irreductible al efectuarse una medición. Esto último es así excepto en el caso particular en que el sistema haya sido preparado previamente en un autoestado de la variable dinámica a medir (por ejemplo haciendo una medición previa), en cuyo caso, si el sistema evoluciona en forma aislada, es decir sin interactuar con otros sistemas, se tiene la certeza que el resultado de una nueva medición sobre la misma variable, arrojará el mismo resultado que la medición anterior y corresponderá al autovalor del autoestado en que el microsistema se encuentra. De todos modos, en general los sistemas no se encontrarán en el autoestado del operador correspondiente a la variable dinámica que se desea medir.

Algunas de las dificultades asociadas con la naturaleza indeterminista no local de la MC pueden ser reducidas mediante la interpretación tradicional (de Copenhagen) complementada con la interpretación recién expuesta. En efecto, ambas enfatizan el rol de los instrumentos de medición como una parte integral de cualquier experimento con un  $q$ -sistema. Desde este punto de vista, el resultado de una medición, por ejemplo de un componente del spin de una partícula de un sistema de dos partículas correlacionadas, debe verse como una propiedad no sólo de la partícula sino de todo el sistema incluyendo al otro miembro del par correlacionado y a los dos conjuntos de aparatos de medición, de modo que las subsiguientes correlaciones deben interpretarse como correlaciones entre las propiedades de las partículas *más* los aparatos orientados adecuadamente y no como propiedades de las partículas exclusivamente.

De este modo, hasta que la primera medición es hecha no se consideraría al sistema como constituido por dos partículas separadas y por lo tanto es razonable esperar que luego de esta primera medición las propiedades de todo el sistema se hayan modificado. No es necesario pensar en las partículas como influenciándose mutuamente de manera no local dado que no tienen existencia independiente con anterioridad al momento de la primera medición.

Observemos que esta interpretación reduce el problema de la no localidad pero no el del indeterminismo, ya que si bien no hace necesario recurrir a argumentos

---

<sup>4</sup> Una conocida y muy frecuentemente citada aparente paradoja concebida por E.Schrödinger. Ver por ejemplo Gribbin, J. (10).

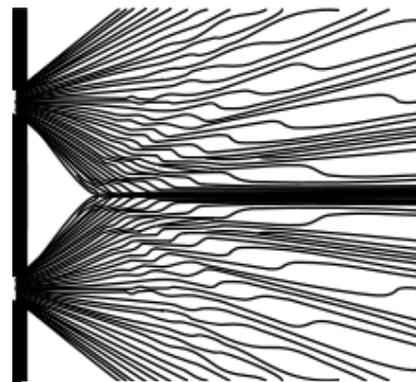
metafísicos como puede serlo el rol atribuido a la intervención de una mente consciente, desde el punto de vista práctico la reducción de la función de onda con sus resultados aleatorios sigue vigente. Una ventaja de la interpretación anterior, es que hace innecesaria la separación metafísica entre microsistema e instrumento de medición que postula la interpretación de Copenhagen ya que todo el proceso de medición se explica como resultado de la interacción física entre aquellos.

De todos modos, como ya lo hemos mencionado, la interpretación anterior, combinada con la teoría de la decoherencia, si bien permite prescindir o al menor reducir la necesidad de una acción a distancia y explicar el colapso de la función de onda, no elimina el carácter probabilístico de las predicciones de la teoría. Las comprobaciones experimentales del Teorema de Bell realizadas hasta hoy, parecen demostrar con razonable contundencia la imposibilidad de una MC local de variables ocultas, lo que no impide concebir una teoría no-local de variables ocultas.

Se han desarrollado varias ideas sobre este aspecto, pero sólo nos referiremos a las dos que más aceptación han generado (quizás sería más apropiado decir que son las que menos rechazo han producido en la comunidad de los físicos). Por ser de variables ocultas, ambas teorías son “realistas”, es decir no ponen en duda la existencia objetiva de las entidades que postulan. Estas teorías son: la de *de Broglie-Bohm* y la de *mundos múltiples de Everett*.

La teoría de de Broglie-Bohm reconoce como antecedente la idea de *onda piloto* propuesta por Louis de Broglie en 1926. Esta idea consistía en asumir que las entidades cuánticas, como los electrones, fotones, etc., son efectivamente partículas *reales* que se mueven en un campo *real* de fuerzas. Este campo de fuerzas tiene sin embargo el mismo significado estadístico que la ecuación de onda de Schrödinger y conduce a la misma interpretación probabilística. Esto significa que las partículas seguirían una trayectoria *definida* por este campo de fuerzas u onda piloto que guía a las partículas por el camino más probable que es aquél en el cual la amplitud de la onda piloto sea mayor. De este modo, la probabilidad de hallar la partícula en un lugar, sigue siendo proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda piloto en ese punto como ocurre en la MC ortodoxa, pero ahora la partícula es real y se encuentra localizada en todo momento.

En la experiencia de difracción de electrones por rendijas, la onda piloto es la que se difracta y produce el fenómeno de interferencia dando



Trayectoria de un electrón pasando por un aparato de dos rendijas, calculadas usando el potencial cuántico. Obsérvese la presencia alternada de zonas de mayor densidad de trayectorias.

origen a un patrón de zonas alternadas de alta y baja amplitud. El electrón es guiado por este campo y por lo tanto tiene una mayor probabilidad de finalizar en una región donde el campo de fuerzas tiene mayor amplitud, por lo que el arribo de muchos electrones irá formando el conocido espectro de difracción, por ejemplo sobre una placa fotográfica. Obsérvese que a diferencia de la interpretación de Bohr, según la cual los electrones se comportan como ondas o como partículas, en el esquema de de Broglie los electrones son *siempre* partículas localizadas acompañando un campo de fuerza que es *siempre* una onda. De manera que esta teoría es efectivamente de variables ocultas, en la que la variable oculta no es la onda piloto sino las *posiciones* de la partícula que son las que se mantienen ocultas. Obsérvese que la teoría de la onda piloto reintroduce el concepto de causalidad, ya que las partículas siguen en todo momento una trayectoria clásica determinada por un campo de fuerza pero no prescinde de la no localidad ni de la acción a distancia cuando el sistema está constituido por dos o más partículas correlacionadas.

La modificación que hacia 1952 Bohm le hace a la teoría de la onda piloto de de Broglie implica la reinterpretación de la ecuación de onda de Schrödinger como representando un campo de existencia real objetiva y su reformulación en una forma parecida a la ecuación fundamental de la dinámica newtoniana. Esta ecuación de movimiento depende no sólo del potencial clásico sino que introduce un segundo potencial denominado *potencial cuántico*. Para ilustrar un poco esta idea, mencionemos que el potencial cuántico adopta la forma

$$U = \frac{1}{2m} \operatorname{Re} \left\{ \frac{p^2 \psi}{\psi} - mv^2 \right\} \quad \text{donde Re denota la parte real de la expresión compleja}$$

entre paréntesis y  $p$  es el operador cuántico cantidad de movimiento que actúa en la expresión anterior sobre la función de onda  $\psi$ . La ecuación del movimiento en

la teoría de de Broglie-Bohm, queda entonces  $m \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial x}$ , donde  $V$  es el

potencial escalar usual y  $v$  la velocidad de la partícula. Vemos aquí que cuando el potencial cuántico se anula, la ecuación anterior se reduce a la 2ª. Ley de Newton. Este potencial cuántico es el responsable de la introducción de efectos cuánticos en una descripción que de otra manera es clásica y puede ejercer efectos en regiones en las que el potencial clásico desaparece (o se mantiene constante). De este modo, una partícula que se mueve en una región en que el potencial clásico es nulo o constante puede no seguir una trayectoria rectilínea como lo dicta la mecánica clásica, lo que permite explicar por ejemplo, en el marco de esta teoría, el movimiento de los electrones en la experiencia de difracción por rendijas, como se muestra en la figura de la derecha.

De manera que la posición y la trayectoria de las partículas se encuentran en todo momento perfectamente definidas y en la teoría de de Broglie-Bohm no es en principio necesario recurrir a conceptos probabilísticos. En esta teoría, las

partículas tienen una posición y momento perfectamente definido, sin embargo, dado que en general las condiciones iniciales no son totalmente conocidas, es necesario recurrir a las probabilidades como un recurso práctico en forma análoga a su uso en mecánica estadística. Al tener las partículas una posición y trayectoria perfectamente determinadas, el acto de medición sólo pone de manifiesto esa posición o esa trayectoria y no tiene la connotación protagónica que le asigna la MC ortodoxa. No obstante su determinismo, la teoría de de Broglie-Bohm no genera conflicto con el Ppio. de Incertidumbre de Heisenberg sino que modifica su interpretación. Efectivamente, de acuerdo con esa teoría, si bien la posición y el momento de la partícula se encuentran definidos, el acto de medición sobre una de las variables (por ejemplo la posición) tiene un impacto sobre la función de onda y por lo tanto sobre el potencial cuántico que afecta entonces a la otra variable (en tal caso el momento), lo que está en línea con el Ppio. de Incertidumbre. De manera que la teoría de de Broglie-Bohm nos provee una interpretación realista determinista pero manteniendo la no localidad de los fenómenos cuánticos. Hay sin embargo, diversas objeciones que se pueden levantar en contra de esta teoría. Una de ellas, es que la onda guía puede ejercer una fuerte influencia sobre el movimiento de las partículas a través del potencial cuántico, pero no hay una reacción recíproca de la partícula sobre la onda lo que viola los principios de la mecánica clásica en virtud de su tercer postulado. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la teoría fue elaborada para demostrar que puede existir una interpretación causal, no necesariamente clásica de los fenómenos cuánticos. Actualmente, la teoría de de Broglie-Bohm retiene un número pequeño de seguidores en la comunidad de los físicos y los filósofos, pero se encuentra claramente fuera de la corriente principal de la investigación en física.

Una alternativa un tanto esotérica que prescinde de la reducción de la función de onda en el proceso de medición, es la propuesta por H. Everett y J. Wheeler que implica una nueva metafísica del mundo. Esta teoría no local pero determinista de los procesos cuánticos que ha merecido cierta atención por parte de la comunidad de físicos, es la de "mundos múltiples". Esta teoría se origina en un trabajo de Everett en 1957, aunque la denominación de "mundos múltiples" llega más tarde. La interpretación anterior, combinada con la teoría de la decoherencia, si bien permite prescindir o al menos reducir la necesidad de una acción a distancia y explicar el colapso de la función de onda, no elimina el carácter probabilístico de las predicciones de la teoría. Hemos visto que las comprobaciones experimentales del Teorema de Bell realizadas hasta hoy, parecen demostrar con razonable contundencia la imposibilidad de una MC local de variables ocultas, lo que no impide concebir una teoría no-local de variables ocultas.

En las interpretaciones vistas anteriormente, la parte de la función de onda que no corresponde al resultado de una medición es descartada. Efectivamente, por

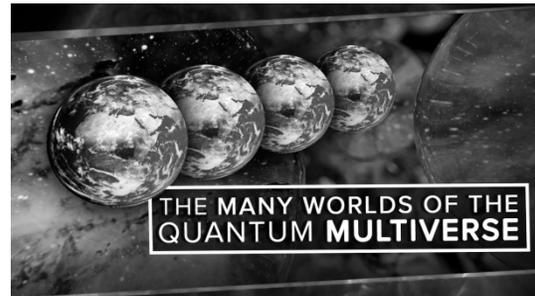
ejemplo en una medición del spin la partícula entra a un aparato SG en una superposición “up” y “down”.

Si emerge, digamos “up” que es lo que pasa con la componente de la función de onda correspondiente al estado “down”? Simplemente desaparece en la medición. Lo que Everet y Wheeler sugieren es que ambos componentes de la función de onda continúan existiendo.

Y aquí la parte metafísica de esta interpretación, la parte que desaparece por no corresponder la resultado de nuestra medición continúa existiendo en algún otro de la multiplicidad de mundos que corresponden a los posibles resultados de la medición.

En otras palabras, si nuestro aparato de SG nos informa que el spin de la partícula es “up” habrá una bifurcación en el mundo en el momento de la medición de manera que en el otro mundo, al que no tenemos acceso, la partícula emergerá con spin “down”.

De aquí que esta interpretación es conocida como de *mundos múltiples*. De manera que en esta visión, los estados en superposición de un sistema dan origen a tantos mundos como estados superpuestos haya. El colapso de la función de onda obedecería entonces a que sólo podemos acceder como observadores a uno de esos mundos.



Indudablemente, la hipótesis de mundos múltiples ha sido sujeta a numerosas críticas y al escepticismo de muchos científicos, pero aún hoy existen adherentes a esta posición que intentan mejorarla.

Como reflexión final podemos decir que si bien la metafísica no interviene (ni debe intervenir) en el conocimiento y la descripción de nuestro universo físico, ha prestado sin embargo algún servicio en la elaboración de dicho conocimiento y en su interpretación. Richard Feynman, sin duda uno de los físicos más talentosos de su generación, se reconocía poco amigo de las consideraciones filosóficas en la ciencia. Sin embargo paradójicamente, su obra está teñida por tales consideraciones. En otras palabras, al menos para ciertas áreas del conocimiento, el discurrir metafísico no parece ser un ejercicio intelectual completamente estéril.

## Referencias

1. Klimovsky, G., 1994 *“Las Desventuras del Conocimiento Científico: Una introducción a la epistemología”* A-Z Editora, Buenos Aires.
2. Feynman, R.P., 1965, *“The Character of Physical Law”* Penguin Books, U.K.
3. D’Espagnat, B., 1990, *“Reality and the Physicist: Knowledge, duration and the quantum world”*. Cambridge University Press.
4. Maxwell, G., 1998, *“Empiricism and Scientific Realism”*, *Philosophy of Science*, Curd. M. & Cover, J.A. Eds., W.W.Norton & Company, London.

5. Maxwell, G., 1998, "*The Ontological Status of Theoretical Entities*", *Philosophy of Science*, Curd. M. & Cover, J.A. Eds., W.W.Norton & Company, London.
6. Von Neumann, J., 1955, "*Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*" Princeton University Press, Princeton, N.J.
7. Dirac, P.A.M., 1958, "*The Principles of Quantum Mechanics*", 4th. Ed., Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford.
8. A.Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen,N, 1935, "*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*" *Physical Review*, v.47, pp.777-780.
9. Greene, B.R., 2005, "*The fabric of the cosmos*" 8<sup>a</sup> Ed., Knopf Press, USA,.
10. Gribbin, J., 1994, "*In search of Schrödinger cat*" Bantam Books, USA.
11. J.S.Bell, J.S., 1964, *Physics*, v.1, p.195.
12. Sklar, L., 1992, "*Philosophy of physics*" Dimensions of Philosophy Series, Oxford University Press, U.K.
13. Baggot, J., 2004, "*Beyond measure: modern physics, philosophy and the meaning of Quantum Theory*" Oxford University Press, U.K.
14. Zeh, H.D., 1970, "*Foundations of Physics*" 1, pp.79-76.
15. Feynman, R.P., 1985, "*QED: The Strange Theory of Light and Matter*" Princeton University Press, Princeton, N.J.
16. <http://www.sciencemag.org/content/332/6034/1170.figures-only> - Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer.
17. Everett, h., 1957, "*Rev. Mod. Phys.*" 29,, 454.
18. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Splittings-1.png>