

INTRODUCCION AL PROBLEMA DE LOS FUNDAMENTOS DE LA MECANICA CUANTICA

Angelo Baracca, Departamento de Física, Universidad de Florencia

LA FORMULACION "ORTODOXA" Y SUS OPOSITORES

La formulación "ortodoxa" de la mecánica cuántica -llamada también la "interpretación de Copenhague"- marcó una ruptura profunda con respecto a las concepciones físicas tradicionales y al modo de concebir el mundo. Ya con la llamada "vieja teoría cuántica" (o sea los nuevos conceptos introducidos en la primera década de este siglo por Planck, Einstein, Nernst y otros) se había producido una primera superación radical del enfoque mecanicista y reduccionista que había dominado en la física del siglo precedente¹. Pero aquellos mismos conceptos y enfoque tan novedosos fueron a su vez literalmente trastornados por los fundadores de la formulación ortodoxa de la teoría (Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, Jordan, Dirac y otros): en tal medida que muchos de los originarios "fundadores" se convirtieron en opositores de la mecánica cuántica. Es importante subrayar que esta oposición no sostenía que la teoría sea *equivocada*, sino que ella no puede ser la descripción *completa* y definitiva de los fenómenos atómicos y sub-atómicos: Einstein, de Broglie, Schrödinger criticaban el enfoque de base de la mecánica cuántica, sus elecciones *a priori*, sus implicaciones subjetivas. La característica basilar de la forma de pensar de estos físicos era el requisito de una *descripción espacio-temporal* de los procesos físicos, aunque ella ya no fuese de tipo mecanicista "clásico".

Al contrario Bohr afirmaba explícitamente lo contrario, por ejemplo:

...no se requiere ninguna descripción precisa del comportamiento espacio-temporal de los procesos². [1927]

Estamos aquí tan lejos de una descripción causal, que incluso se podría

decir que un átomo en un estado estacionario tiene la posibilidad de elegir libremente entre varias transiciones posibles a otros estados estacionarios³. [1929]

En Heisenberg se encuentran afirmaciones aún más subjetivistas:

...lo que observamos no es la naturaleza en sí, sino la naturaleza sometida a nuestro modo de interrogarla. [1958].

Dirac pone como premisa en su tratado de mecánica cuántica la necesidad de renunciar a los conceptos intuitivos de nuestra experiencia directa en el espacio y en el tiempo:

La tradición clásica consideraba el universo como una asociación de entidades observables en movimiento según leyes definidas de fuerzas, de modo de formarse un *modelo mental en el espacio y en el tiempo*...

Las leyes fundamentales gobiernan un substrato de que *no podemos formarnos un modelo mental* sin introducir inexactitudes. [Cursivas mías]

La reacción de Einstein en contra de estas tendencias e interpretaciones llega a ser sarcástica en una carta a Max Born de 1924:

La idea de que un electrón liberado por un rayo de luz pueda escoger a *su antojo* el instante y la dirección del vuelo me resulta intolerable. Si así resultara, finalmente preferiría haber sido zapatero, o incluso empleado de casino, antes que un físico⁴. [Cursiva mía]

Por otro lado, Oskar Klein recuerda que Bohr "no podía resignarse al concepto Einsteiniano del cuanto

¹ Véase por ejemplo mi escrito: A. Baracca, *Las raíces de la revolución científica del siglo XX*, Facultad de Física, Universidad de La Habana, 1998.

² N. Bohr, ed. Ital. *Teoria dell' Atomo e Conoscenza Umana*, Torino, 1961, p. 337.

³ N. Bohr, *ibidem*.

⁴ Véase por ejemplo mi escrito: A. Baracca, *Las raíces de la revolución científica del siglo XX*, Facultad de Física, Universidad de La Habana, 1998.

de luz^v (cabe recordar que la prevención general ante este concepto permaneció muy radicada aún mucho después de la confirmación de las leyes del efecto fotoeléctrico por Millikan en 1916: contra lo que ingenuamente pudiera pensarse, el trabajo y los resultados de Planck del año 1900 fueron más aceptados^{vi}).

Schrödinger expresó puntos de vista semejantes, con consideraciones generales interesantes sobre las finalidades culturales de la ciencia:

El punto de vista de Bohr, según el cual una descripción espacio-temporal es imposible, lo rechazo *al límite*. La física no consiste solo en investigación atómica, la ciencia no solo en física y la vida no solo en ciencia. El objetivo de la investigación atómica es la integración de las respectivas *experiencias* en el pensamiento común. Este pensamiento común se desenvuelve en el espacio y en el tiempo en cuanto a que se refiere al mundo externo. Si no se logra la integración en el espacio y en el tiempo, entonces no se obtuvo el objetivo y uno no sabe qué objetivo se ha conseguido.^{vii} [1926]

En efecto, Schrödinger formuló su ecuación como una teoría puramente ondulatoria, que debía tratar los aspectos ondulatorios de la materia en el espacio y en el tiempo, en términos continuos:

En este artículo quisiera mostrar en primer lugar en el caso más simple del átomo de hidrógeno, que la usual regla de cuantización puede ser remplazada por otra condición, en la que no se mencionan más "enteros". La propiedad integral sigue en cambio en el mismo modo natural en que el número de nudos de una cuerda vibrante tiene que ser entero. La nueva interpretación

puede ser generalizada y, yo creo, centra mucho más en profundidad en la verdadera naturaleza de las reglas de cuantización.^{viii}

El nunca aceptó la interpretación y la utilización que la mecánica cuántica ortodoxa hizo de su ecuación^{ix}.

Mi opinión es que en efecto se operó una elección básica en la "formulación ortodoxa", de la mecánica cuántica^x; la de limitar la estructura y la tarea de la teoría física a *correlar hechos experimentales, resultados de mediciones*, incluso renunciando a preguntarse lo que pasa en el sistema entre una medida y la siguiente, o sea renunciando a describir su evolución espacio-temporal. Bohr lo ha expresado a menudo de forma muy clara:

El *objeto* de nuestra descripción de la naturaleza no es tanto discernir la *esencia real* de los fenómenos como *buscar y encontrar*, hasta tan lejos como sea posible, relaciones entre los variados aspectos de nuestra experiencia.^{xi} [1963: cursivas mías]

Una base probabilística para esta correlación apareció como una estructura mucho más flexible, eficaz, operativa en comparación con la búsqueda de una descripción de la evolución en términos espacio-temporales.

Sin embargo, tanto Schrödinger como (y sobre todo) Einstein no se limitaron a una crítica ideológica de la formulación ortodoxa, y buscaron situaciones físicas que llevasen a conclusiones paradoxales, de forma tal de demostrar el carácter incompleto de la tratación cuántica y la necesidad de completar dicha tratación con otros elementos que la volviesen en una descripción en términos de evolución espacio-temporal: es conocida la paradoja del "gato de Schrödinger"^{xii}, mientras que Einstein en el mismo

^v En S. Rozental (Ed.), *Niels Bohr*, Amsterdam, North-Holland, 1967, p. 77.

^{vi} Véase, por ejemplo, L. Navarro Verguillas, *Einstein Profeta y Hereje*, Tusquets, Barcelona, 1990, pp. 111-113.

^{vii} Citado por K. von Meyenn, in AA. VV., *El Siglo de la Física*, (Edición de L. Navarro Verguillas); Tusquets, Barcelona, 1992, p. 233.

^{viii} E. Schrödinger, *Ann. Phys.*, 79, 361, 489 y 734 [Traducción al Inglés en G. Ludwig, *Wave Mechanics*, Pergamon Press, 1968]: en términos intuitivos esto se ve razonando en términos de estacionariedad de la onda asociada de Broglie para una partícula en un volumen finito, o en el estado fundamental de átomo de hidrógeno.

^{ix} Véase el artículo de P. Forman y V.V. Raman, "Why was it Schrödinger who developed de Broglie's ideas", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, 291, 1969. En el año 1952 Schrödinger publicó un artículo con el título muy significativo: "Are there quantum jumps?". Heisenberg recuerda una anécdota divertida: en 1926 Bohr invitó a Schrödinger en Copenhague con la finalidad de convencerlo, con "discusiones infinitamente laboriosas" durante las cuales Schrödinger, que había caído enfermo, exclamó desesperado "Si no se puede prescindir de estos malditos saltos cuánticos, lamento de haberme aún ocupado de la teoría cuántica" [W. Heisenberg, in L. Rosenfeld y V. Weisskopf (Editors), *Niels Bohr*, Pergamon Press, 1955, p. 14; S. Rozental (Editors), *Niels Bohr*, North-Holland, 1967, p. 103]

^x En efecto varios estudios han subrayado el influjo de corrientes de pensamiento irracionalistas y subjetivistas (Heidegger, Kirkegaard) sobre los físicos que formularon la mecánica cuántica: P. Forman: "Weimar culture, causality and quantum theory 1918-1927: adaptation by German physicists to a hostile intellectual environment", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 3, 1, 1971 [Traducción al Español: *Cultura en Weimar, Causalidad y Teoría Cuántica, 1918-1927: Adaptación de los Físicos y Matemáticos Alemanes a un entorno Intelectual Hostil*, Alianza Editorial, Madrid, 1984]; L. Rosenfeld, *Osiris*, 2, 149, 1963; M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, 1966, pp. 166-180.

^{xi} Citado por F. Rohrlch, "Las interacciones ciencia-sociedad a la luz de la mecánica cuántica y de su interpretación", En *El Siglo de la Física*, op. cit., p. 135.

^{xii} E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* 28, 807, 823 y 844 (1935), traducido al Inglés en J.A. Wheeler y W. Zurek, *Quantum Theory of Measurement*, Princeton University Press, 1983.

año 1935 formuló la "paradoja EPR", o sea de Einstein, Podolsky y Rosen^{xiii}. Einstein además propuso la idea de que existan "variables ocultas", cuya introducción completaría la tratación de la mecánica cuántica, eliminando así los aspectos insatisfacentes y recuperando una descripción física causal.

También es conocida la dificultad relacionada con el proceso de medición, o sea con el postulado de la así dicha "reducción" o "colapso de la función de onda"; o sea, si se mide una observable A de un sistema y se encuentra el valor a_i , el sistema debe encontrarse en el estado $|a_i\rangle$ del operador A. El problema surge si se intenta describir el proceso de medición mismo - o sea la interacción del sistema con el aparato de medición - con el formalismo de la mecánica cuántica: no se obtiene, en efecto, el colapso de la función de onda en el estado $|a_i\rangle$.

En este escrito intentaré enfocar la naturaleza común de estos problemas, en su base formal, y discutir la peculiaridad de la mecánica cuántica, su intrínseco carácter *non local*, que hace de ella una teoría irreductible a un enfoque clásico. Sobre estos problemas ya la literatura es inmensa, y nos limitaremos a delinear algunos aspectos principales^{xiv}.

La paradoja del "gato de Schrödinger"

Empezaremos por la forma en que Schrödinger expresó su crítica a la formulación ortodoxa, porque es la más sugestiva (aún si está sujeta a fáciles objeciones) y hace entender de forma intuitiva cuál es el problema fundamental. El objetivo de Schrödinger es hacer una *reducción ad absurdo* con la mecánica cuántica.

El experimento teórico considera en un cuarto cerrado un gato en presencia de un núcleo radioactivo: si el núcleo decae, la partícula que emite dispara un dispositivo que abre una cápsula que contiene veneno y mata instantáneamente al gato. Suponemos que al gato se le pueda asociar un "estado", o sea de "gato vivo" o de "gato muerto": el estado del gato está correlado con el estado del núcleo inestable. Pero la emisión de la partícula sigue unas leyes probabilísticas: durante un cierto intervalo de tiempo hay una probabilidad determinada de que el núcleo haya decaído, y entonces el núcleo se encuentra en una superposición lineal de estados de "núcleo íntegro" y de "núcleo decaído", con coeficientes cuyo módulo al cuadrado corresponden a las respectivas probabilidades. Por lo tanto, el gato también se encontrará en una superposición de estados de "gato vivo" y de "gato muerto"

$$|\Psi_{\text{Gato}}\rangle = C_v|\Psi_{\text{vivo}}\rangle + C_m|\Psi_{\text{muerto}}\rangle \quad (1)$$

Es sólo cuando el observador abre el cuarto y observa el gato, este "precipita" en el estado de "gato vivo" o *bien* en el de "gato muerto": es como si el observador matara el gato, al observarlo! Schrödinger criticaba al mismo tiempo el carácter de la correlación que la mecánica cuántica establece, y el papel del observador en hacer una medida.

Una objeción obvia al razonamiento de Schrödinger es naturalmente el hecho de que él asigna al gato un "estado" cuántico: por lo menos el gato, en tanto que es un sistema microscópico, no es en un "estado puro" y no puede ser descrito por una función de onda, sino que se ha de describir en términos de una mezcla de estados, en el sentido de la mecánica estadística, o sea una "matriz densidad". Pero veremos que tampoco por esta vía es fácil salir de la dificultad.

La naturaleza de la correlación entre dos sistemas cuánticos

De todos modos es fácil traducir la situación del gato y el núcleo inestable para dos sistemas macroscópicos: esta situación pondrá de manifiesto la naturaleza de la dificultad.

Consideremos entonces un sistema de dos cuerpos microscópicos preparado de forma tal que los estados de los dos cuerpos sean correlados. Por ejemplo, consideremos una partícula de espín 0 que decae en dos partículas de espín $\frac{1}{2}$, tal como dos electrones, o un electrón y un positrón (un caso concreto es el positronio, otro es un mesón π^0 que decae en dos fotones, quienes tienen sólo dos estados de polarización). Las dos partículas, aunque se alejen, antes de interactuar con otros sistemas, permanecen correlados de forma tal que sus espines tienen que estar orientados en direcciones opuestas: este estado del sistema de las dos partículas es bien conocido en mecánica cuántica, y es el "estado de singlete"

$$|\Psi_0\rangle = 1/\sqrt{2} \{ |u_+\rangle|v_-\rangle - |u_-\rangle|v_+\rangle \} \quad (2)$$

Hay una primera cosa que subrayar en esta expresión: *a ninguna de las dos partículas se le puede asignar un estado*: en efecto, es fácil darse cuenta que el estado (2) del sistema compuesto no se puede expresar en forma de un producto de dos estados de las dos partículas $\{a_+|u_+\rangle + a_-|u_-\rangle\} \{b_+|v_+\rangle + b_-|v_-\rangle\}$. El ejemplo del gato expresaba de forma absurda esta propiedad.

^{xiii} A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, *Phys Rev.* 47, 477 (1935).

^{xiv} Una referencia muy interesante, de que recomendamos la lectura, es el volumen colectivo, editado por L. Navarro Verguillas, que hemos citado en la nota 7, *El Siglo de la Física*, Barcelona, Tusquets, 1992: principalmente los artículos de S. Bergia, F. Rohrllich y K. von Meyenn.

Suponemos ahora que las dos partículas correladas en el estado (2) se alejen mucho la una de la otra. Ninguna de las dos se encuentra en un estado definido: entonces no podemos decir cuál será el valor de la proyección del espín de cada partícula en una dirección cualquiera. La situación se más bien parecida a la del gato: si hacemos una medida de la proyección del espín de cada partícula, encontraremos el 50 % de valores de espín hacia arriba, y el 50 % hacia abajo. Sin embargo, si medimos el espín de una de las dos partículas, también el espín de la otra resultará determinado, *sin que hayamos interactuado en ninguna forma con ella*. ¡Es como si una señal se haya propagado instantáneamente - o sea con velocidad infinita - de una partícula a la otra, llevando la información del valor de su espín!

La crítica de Einstein, Podolsky y Rosen

En la base de este ejemplo se puede entender también la esencia de la crítica de Einstein, Podolsky y Rosen. Los autores se preguntaban si la descripción del mundo que ofrece la mecánica cuántica se puede considerar *completa*. El significado atribuido al término "completo" se especificaba en la frase: "Todo elemento de la realidad física debe tener una contrapartida en la teoría física". Por el término "elemento de la realidad física" los autores proponen una definición con valor operativo:

Si podemos predecir con certeza (o sea con probabilidad igual a 1) el valor de una magnitud física, sin perturbar un sistema en absoluto, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa magnitud física.

¿A qué contexto se refiere esta definición? Al contexto en que se supone que un oponente opine que cierta magnitud atribuible a un sistema físico no tenga un valor definido antes de la medición (y nuestra discusión precedente aclara que a esto se refiere): entonces a esa magnitud no le correspondería a un elemento de realidad física. A este oponente le dicen los autores: ¿pero qué dirías al respecto si, sin perturbar el sistema físico, yo pudiera prever con exactitud el valor de esta magnitud? Este conocimiento previo y cierto nos hace pensar en la magnitud como un elemento de realidad.

El núcleo del artículo radicaba en un experimento conceptual que no era muy distinto conceptualmente de lo que hemos discutido en el párrafo precedente, Ecuación (2) [esta formulación se debe a D. Bohm en

1951]. Ahora bien, con medir el espín de una de las dos partículas, podemos predecir con certeza el espín de la otra, sin perturbarla físicamente de ninguna forma cuando estén suficientemente separadas. Entonces este debía ser un elemento de la realidad física aún antes que se hiciera la medición sobre la otra partícula (tal como el gato debe estar "vivo" o "muerto" antes que observemos si el núcleo se ha desintegrado); la mecánica cuántica no reproduce esta conclusión y por lo tanto da una descripción incompleta de la realidad. EPR empujaban más allá el razonamiento: si se mide la proyección del espín de la primera partícula en la dirección z podemos predecir con certeza el espín de la segunda: por otro lado, efectuando una medición de la proyección del espín de la primera partícula en la dirección x se puede predecir con certeza el de la segunda. Las dos observaciones pueden tener lugar sin perturbar el segundo sistema, a las dos proyecciones del espín se le pueden hacer corresponder, por tanto, elementos de realidad física: pero en la teoría los operadores mecánico-cuánticos que corresponden a la proyección del espín en dos direcciones distintas no conmutan y las variables asociadas no pueden tener, al mismo tiempo, un valor definido.

Bohr replicó inmediatamente al artículo de EPR, en la misma revista, con un trabajo que llevaba el mismo título. La réplica de Bohr se basaba en el principio de complementariedad de la mecánica cuántica: la discusión entre Bohr y Einstein se parece a un diálogo entre sordos. Según Bohr "un criterio de realidad como el propuesto por los autores contiene - por muy cautelosa que pueda parecer su formulación - una ambigüedad esencial cuando se aplica a los problemas efectivos de los que aquí nos ocupamos". La ambigüedad consistiría en que, según el principio de complementariedad, medidas de observables incompatibles (que no conmutan) presuponen la predisposición de aparatos diferentes (complementarios). Por ejemplo, para medir una proyección del espín de la primera partícula se ha de permitir una iteración esencialmente incontrolable con un soporte, de esta manera se nos cierra cualquier posibilidad futura de aplicar la ley de conservación del momento angular al sistema de las dos partículas y por ello se pierde la única base de que disponíamos para hacer una predicción concerniente al espín de la segunda partícula. Se puede decir que en el formalismo de la mecánica cuántica Bohr tiene razón: pero es propiamente este formalismo que Einstein rechazaba, o mejor dicho, que consideraba incompleto^{xv}.

^{xv} Para darse cuenta de las posiciones de Einstein y de Bohr y de cómo se había desarrollado la discusión entre ellos antes del año 1935 se recomienda la lectura de sus artículos en el volumen colectivo editado por P.A. Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court, Illinois, 1949 (la autobiografía de Einstein, incluida en este volumen, ha sido traducida al castellano: *Notas Autobiográficas*, Alianza, Madrid, 1984). En particular la contribución de Bohr reconstruye el desarrollo de las discusiones con Einstein. En particular, él cuenta una anécdota divertida. En una Conferencia, Solov y Einstein habían presentado un experimento conceptual con el que se podía determinar con exactitud la energía y el instante en que un fotón es emitido, sobre la base de la relación masa-energía, pesando la caja de la que el fotón sale. Bohr pensó en el experimento en la noche y se dió cuenta de que ¡Einstein no había tenido en cuenta ... la relatividad general! Si se toma en cuenta que la balanza baja en el campo gravitacional, la relación de incertidumbre de Heisenberg se recupera.

El problema de la medida

Podemos ahora discutir brevemente el problema de la medida, porque la sustancia no es muy distinta de lo que venimos a discutir.

En primer lugar definimos la propiedad de un sistema que sirva como aparato de medida de una magnitud microscópica S de un sistema atómico, descrita por un operador S que tenga un sistema de autovalores s_i y de autofunciones $|s_i\rangle$

$$S |s_i\rangle = s_i |s_i\rangle \quad (3)$$

El aparato es un sistema físico A que debe tener estados $|A_i\rangle$, correspondientes a algo como la posición de un índice sobre una escala de valores, en correspondencia biunívoca con los valores posibles s_i de la observable microscópica: o sea, si el aparato se encuentra inicialmente en un estado general $|A_0\rangle$ e interacciona con el sistema atómico que tenga exactamente el valor s_k de la observable S , por efecto de la interacción del proceso de medida el estado de A debe reducirse a $|A_k\rangle$. O sea

$$|A_0\rangle |s_k\rangle \text{ medida } |A_k\rangle |s_k\rangle \quad (4)$$

El problema surge cuando el sistema atómico, en lugar de encontrarse en un estado definido por un valor de la observable S , se encuentra en una superposición de estados (un paquete)

$$\sum_k c_k |s_k\rangle \quad (5)$$

En este caso el proceso de medida debe dar como resultado final uno de los posibles valores s_h con probabilidad $|c_h|^2$. Pero, siendo la ecuación de Schrödinger lineal, de la definición (4) sigue que

$$|A_0\rangle \sum_k c_k |s_k\rangle \text{ medida } \sum_k c_k |s_k\rangle |A_k\rangle \quad (6)$$

¡En esta expresión no se ha producido el colapso de la función de onda! En efecto sabemos de la (2), que es un caso particular, que *en el estado (6) del sistema Aparato+Sistema atómico, ¡no el uno ni el otro se encuentran en un estado cuántico definido!* Otra forma de verlo es recordar que sabemos que un sistema que se encuentra en un estado cuántico definido, aún si no sabemos cuál, y solo conocemos las probabilidades de $|c_k|^2$ con que se presenta cada estado, se representa a través de un operador densidad

$$\hat{P}_I = \sum_k |c_k|^2 |A_k\rangle |s_k\rangle \langle s_k| \langle A_k| \quad (7)$$

En cambio, si calculamos el operador densidad que corresponde a la situación física representada

por (6) (que es un estado puro para el sistema total $A + S$), obtenemos

$$\begin{aligned} \hat{P}_{II} &= \sum_k |c_k|^2 |A_k\rangle |s_k\rangle \langle s_k| \langle A_k| + \sum_k \sum_{k'} c_k^* c_{k'} |A_k\rangle |s_k\rangle \langle s_{k'}| \langle A_{k'}| \\ &= \hat{P}_I + \sum_k \sum_{k'} c_k^* c_{k'} |A_k\rangle |s_k\rangle \langle s_{k'}| \langle A_{k'}| \quad (8) \end{aligned}$$

El primer término correspondería a la reducción del estado correspondiente al resultado de la medición: pero aparece el segundo "término de interferencia", que hace la diferencia, o sea significa que el colapso no se ha producido, en cuanto a los términos de interferencia estos son entre estados correspondientes a distintos valores propios de la observable microscópica^{xvi}. Queda claro que esto es consecuencia de que lo que se superpone linealmente son las amplitudes de probabilidad y no la probabilidad, y de que la evolución temporal determinada por la ecuación de Schrödinger es lineal: esta, como se ve, es la base de todos los problemas que estamos analizando.

En realidad el trato que hemos dado del aparato de medida es inadecuado. Este aparato suele ser un sistema microscópico y, como hemos discutido a propósito del "gato de Schrödinger", él debería describirse correctamente con una matriz densidad, en lugar de la expresión (4): pero sería fácil mostrar que tampoco en esta forma el problema se soluciona, y que la reducción del paquete no se realiza.

Von Neumann, en su famoso libro "Mathematical Foundations of Quantum Mechanics" de 1932, declara que hay dos formas completamente distintas de evolución temporal del estado de un sistema cuántico: una consiste en la evolución según la ecuación de Schrödinger, la otra es una evolución discontinua que, como hemos dicho, se conoce vulgarmente como "colapso de la función de onda" y que solo ocurre en el proceso de medida.

Hubo también interpretaciones subjetivistas, que han insistido más en el papel del observador, cuya toma de conciencia del resultado de la medida determina el "colapso"^{xvii}.

Por otro lado, se han desarrollado teorías en que hay un desacoplamiento entre el estado del aparato macroscópico y el estado del sistema microscópico, determinado por la interacción con el entorno. Tanto S como A están constantemente en contacto con características del entorno que normalmente se

^{xvi} Tal vez en la literatura se ha llamado a la (7) *mezcla propia*, y a la (8) *mezcla impropia*.

^{xvii} Para más detalles véase el volumen colectivo ya citado, *El Siglo de la Física*.

ignoran y cuya influencia, aun en el caso de que fueran pequeñas, podría explicar el colapso^{xviii}.

Las "variables ocultas"

Einstein pensaba poder completar la descripción de la mecánica cuántica con la introducción de "variables ocultas", que completarían la teoría cuántica y recuperarían una descripción determinista en el espacio y en el tiempo, de forma parecida al papel que los átomos juegan en la mecánica estadística.

La historia de las teorías de variables ocultas es muy larga y compleja: discutiremos aquí sólo los aspectos esenciales.

Von Neumann, en el cuarto capítulo del citado tratado de 1932, utilizando instrumentos formales, llegó a lo que es denominado el "teorema de Von Neumann", o sea a la conclusión de que "el presente sistema de la mecánica cuántica tendría que ser - desde un punto de vista objetivo- falso, para que fuera posible una descripción de los procesos elementales distinta de la estadística", o sea que "es lógicamente imposible completar el formalismo de la mecánica cuántica de forma que desemboque en una descripción determinista de los procesos físicos".

Sin embargo, más tarde se comprobó que la demostración de Von Neumann no eliminaba cualquier tipo de teoría de variables ocultas. Las contribuciones más importantes en este sentido las dieron David Bohm y John Bell.

En el año 1952 Bohm propuso un modo concreto de "completar" la mecánica cuántica en términos de variables ocultas, que se identificaban con las coordenadas de posición inicial de las partículas, y que pueden completar la descripción de los estados dada en términos de la función de onda, y desembocar en una evolución temporal determinista del sistema^{xix}. La teoría de Bohm predice lo mismo que puede predecir la mecánica cuántica, por lo que desde el punto de vista empírico, no es objetable. Lo que la distingue de la mecánica cuántica es la interpretación y algunos rasgos conceptuales acerca de los que existe una literatura bastante extensa: se han dado muchos argumentos a favor y en contra.

De todas formas, ella constituía una formulación que contradecía concretamente el teorema de Von Neumann.

En la década de los sesenta Bell dio algunas contribuciones fundamentales para aclarar el problema. En 1966 él logró construir un modelo de variables ocultas explícito para el problema de las dos partículas de espín $\frac{1}{2}$, que hemos discutido. Al mismo tiempo él aclaró que el teorema de Von Neumann se basaba sobre un postulado arbitrario, cuya validez era ya de por sí una peculiaridad de la mecánica cuántica.

La estructura no local de la mecánica cuántica

En 1964 Bell había obtenido otro resultado fundamental al demostrar que ninguna teoría *local* de variables ocultas podía reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica en experimentos de tipo EPR (como las dos partículas de espín $\frac{1}{2}$. *El acento se habría que situar en el adjetivo "local"*: se trata en concreto, en un marco realista, de excluir la posibilidad de que la predeterminación del resultado de una medida de un subsistema sea consecuencia de la propagación de una señal no física (es decir super-luminal) emitida por el otro. Bell hacía resaltar así el *carácter no local de la mecánica cuántica*. Bohm había logrado construir una teoría de variables ocultas *equivalente* a la mecánica cuántica acerca del porqué su teoría era *no local*.

Con este enfoque Bell lograba también por primera vez encontrar una diferencia experimental entre la mecánica cuántica y una teoría *local* de variables ocultas. Una teoría realista necesitaría que el valor $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$ del espín de un subsistema a lo largo de una dirección cualquiera nazca, ya determinado, al salir la partícula de la fuente, y entonces dependa de si una variable oculta cae en uno u otro de los dos subdominios de variabilidad; lo mismo vale para el otro subsistema. El requisito de la *localidad* se expresa por la necesidad de que resultados de mediciones efectuadas en el primer subsistema no dependan de la segunda dirección (y viceversa). De ello se deduce una expresión explícita para el valor medio de los productos de los espines a lo largo de direcciones dadas. Bell demostraba así que existe

^{xviii} Véase por ejemplo una actualización reciente de este punto de vista en S. Haroche, "Entanglement, decoherence and the classical/quantum boundary", *Physics Today*, July 1998. En este trabajo se discuten los experimentos que se están llevando a cabo para detectar concretamente el proceso de decoplamiento de los dos subsistemas: además se está investigando en sistemas "mesoscópicos" (es decir al límite entre el microscópico y el macroscópico) para averiguar en qué escala de dimensión del aparato de medida empezará a actuar el proceso de decoplamiento.

^{xix} En términos más técnicos, Bohm descompone sencillamente la función de onda en dos partes, el módulo R y la fase S . La ecuación de Schrödinger da lugar a un sistema de dos ecuaciones para estas cantidades reales. La interpretación clásica es que R^2 es la probabilidad (como en la mecánica cuántica), y S es la fase y satisface una ecuación de Hamilton-Jacobi modificada. El gradiente de S multiplicado por $\hbar/2\pi$ puede interpretarse como el momento de la partícula, mv . Bohm demuestra entonces que esta partícula obedece a una ecuación del movimiento de tipo newtoniano, en la que la fuerza viene dada por el gradiente cambiado de signo del potencial V que aparece en la ecuación de Schrödinger, más un nuevo potencial, U , conocido como "potencial cuántico", multiplicado por \hbar^2 . Si se conocen las *posiciones iniciales* de las partículas, que juegan el papel de *variables ocultas*, se tiene una evolución temporal causal.

una combinación de tres de estos valores medios, correspondientes a pares de direcciones a y b , a y c y b y c , que debe satisfacer una desigualdad que la mecánica cuántica viola: es el célebre *teorema de Bell*. Cabe subrayar el hecho que la diferencia entre una teoría local y la mecánica cuántica puede observarse sólo si se miden propiedades relativas a *correlaciones entre los dos subsistemas*: observaciones relativas a un solo subsistema no pueden discriminar entre las dos situaciones.

Bell entonces concluía que es posible construir teorías de variables (*no locales*) que reproducen los resultados habituales de la mecánica cuántica (refutación del teorema de Von Neumann), que se puede distinguir experimentalmente entre mecánica cuántica y teorías de variables ocultas *locales*, y (fundamental) que experimentos al respecto aún no se habían efectuado.

Varios experimentos han sido efectuados en las décadas de los setenta y de los ochenta, y han proporcionado, en su mayoría, resultados acordes con la mecánica cuántica (se han presentado dos excepciones: pero en uno de los casos, una repetición del experimento a cargo de otro grupo dio resultados acordes con la mecánica cuántica, en el otro caso los resultados no han sido publicados). Las reacciones han sido múltiples^{xx}. En general los heterodoxos continúan siendo heterodoxos: varios niegan el carácter conclusivo de los experimentos (algunos entre ellos se apuntan a las hipótesis adicionales que son siempre necesarias para someter el teorema de Bell a un control experimental, y demuestran que, si se prescinde de ellas, se pueden construir modelos realistas locales que expliquen todos los resultados experimentales). Pero la actitud ampliamente dominante es de considerar confirmada la validez de la mecánica cuántica.

CONCLUSIONES

Las características fundamentales de la mecánica cuántica a que parece tenemos que acostumbrarnos pueden considerarse entonces:

- *la falta de realismo*: la realidad de los elementos de realidad física nace con la observación;
- *la falta de localidad*: al interior de sistemas cuánticos de cualquier extensión, todo se puede concebir como si se propagaran "influencias" con velocidad infinita;
- *la falta de separabilidad*: dos sistemas físicos que han interactuado siguen formando un sistema

único y ni pueden concebirse como separados (que es otra forma de plantear la falta de localidad).

Varios opositores de la interpretación ortodoxa han formulado la *interpretación estadística*, según la cual un estado mecánico-cuántico proporciona una descripción de las propiedades estadísticas de un conjunto de sistemas preparados con el mismo definido procedimiento, y no necesariamente una descripción de un sistema individual. En realidad la interpretación de Copenhague no aclara si los objetos cuánticos individuales existen realmente o no. Por otra parte, los experimentos parecen demostrar que el realismo clásico, tal como habría gustado a Einstein y Schrödinger, tampoco es aceptable.

Me parece interesante señalar un último aspecto: ¿Cuál fue realmente la necesidad histórica de la revolución cuántica? Recordamos que la física clásica pareció fracasar en la comprensión del espectro de la radiación en la cavidad y en los calores específicos de los sólidos: este fracaso se basa en el teorema de equipartición de la energía. En este sentido hace falta señalar varios trabajos interesantes. En primer lugar, se puede criticar el uso del teorema de equipartición al campo de radiación: este tiene un número infinito de grados de libertad y la atribución a cada uno de ellos de una energía constante lleva inevitablemente a una energía infinita (como ocurre en la ley de Rayleigh y Jeans), lo que puede considerarse un absurdo (con el cuanto de energía se logra un valor finito porque la energía media de cada cuanto depende de la frecuencia de forma tal que compensa el número de modos normales creciente con $\sqrt{\nu}$). Sin embargo, el teorema de equipartición se demuestra en mecánica estadística para un número finito de grados de libertad: no es claro si su aplicación al campo de radiación es autoconsistente, y se podría pensar que la divergencia de la energía total sea un índice de que el teorema no es válido para el campo de radiación.

En efecto, ya en 1954 Fermi, Pasta y Ulam, sobre la base de cálculos numéricos, habían encontrado de forma inesperada que, entre los modos de oscilación de una cadena rectilínea de partículas acopladas por interacciones no lineales, *no se obtenía equipartición*. Investigaciones más recientes, a partir de los años setenta, confirman que el teorema de equipartición no queda demostrado y que hay puntos de plausibilidad para su *no* validez. Si es así, aún queda por averiguar lo que la mecánica clásica prevé efectivamente, de forma rigurosa, sobre tales problemas.

^{xx} Para más detalles véase nuevamente el citado libro colectivo, *El Siglo de la Física*.