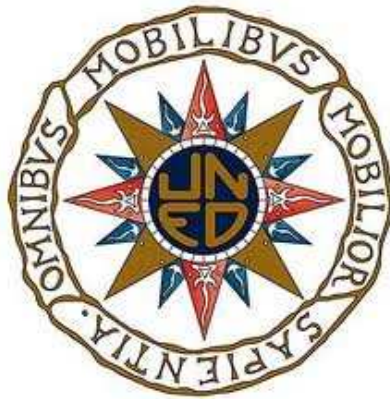


UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Facultad de Filosofía

Departamento de Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia



LA PARADOJA DEL GATO DE SCHRÖDINGER
Y LOS PROBLEMAS DE INTERPRETACIÓN
DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Trabajo Fin de Máster en Filosofía Teórica y Práctica
Especialidad: Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia
Autor: CONTÍN AYLÓN, Guillermo C.
Director: Dr. D. Manuel SELLÉS GARCÍA
Área: Historia de la Ciencia
Convocatoria: Febrero de 2012

LA PARADOJA DEL GATO DE SCHRÖDINGER Y LOS PROBLEMAS DE INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Autor: Guillermo C. Contín Aylón – Febrero de 2012

RESUMEN

En 1935, E. Schrödinger publicó un importante artículo (“The Present Situation in Quantum Mechanics”), en el cual realizaba una revisión de las principales cuestiones acerca de la interpretación de la mecánica cuántica. En este artículo, Schrödinger incluía la famosa paradoja del gato “vivo y muerto” a partes iguales. El gato de Schrödinger se convirtió en un símbolo de los límites de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. En nuestro trabajo, estudiamos el contexto en el cual apareció dicho artículo de Schrödinger (respecto del cual la paradoja EPR tuvo un papel motivador), las principales ideas contenidas en él y el debate posterior acerca de las cuestiones de interpretación señaladas: la cuestión del realismo (teorías de variables ocultas) y el problema de la medida (Wigner, Everett, GRW, Penrose y los experimentos recientes sobre la decoherencia cuántica).

PALABRAS CLAVE

Erwin Schrödinger - Interpretación de la mecánica cuántica - Interpretación de Copenhague – Paradoja EPR – Gato de Schrödinger – Realismo – Problema de la medida – Variables ocultas – Colapso – Decoherencia cuántica.

ABSTRACT

In 1935, E. Schrödinger published an important article (“The Present Situation in Quantum Mechanics”), in which he revised the main questions related to the interpretation of quantum mechanics. In this article, Schrödinger included the famous paradox of a “living and dead cat”, in equal parts. Schrödinger’s cat became a symbol of the limits of Copenhagen interpretation of quantum mechanics. In our work, we study the context in which Schrödinger’s article appeared (in which EPR paradox had a motivating role), the main ideas contained in it and the subsequent debate about the pointed interpretation questions: the question of realism (hidden-variable theories) and the measurement problem (Wigner, Everett, GRW, Penrose and recent experiments about quantum decoherence).

KEY WORDS

Erwin Schrödinger - Quantum mechanics interpretation – Copenhagen interpretation – EPR paradox – Schrödinger’s cat – Realism – Measurement problem – Hidden variables – Collapse – Quantum decoherence.

ÍNDICE

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN. EL PROBLEMA DE LA INTERPRETACIÓN DEL FORMALISMO CUÁNTICO	5
2. CUESTIONES PRELIMINARES.....	10
2.1. <i>La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica</i>	11
2.2. <i>La paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen</i>	17
2.3. <i>Primeras reacciones al artículo de Einstein-Podolsky-Rosen</i>	24
3. EL ARTÍCULO DE SCHRÖDINGER DE 1935: "LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA"	28
3.1. <i>La comunicación entre Einstein y Schrödinger en 1935</i>	28
3.2. <i>La interpretación de las relaciones de indeterminación. "¿Son realmente borrosas las variables?"</i>	32
3.3. <i>La interpretación de la función de ondas. El problema de la medida</i>	36
3.4. <i>La cuestión del entrelazamiento de sistemas</i>	37
3.5. <i>Conclusión. Los problemas principales en la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica</i>	41
4. LOS PROBLEMAS DE INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: EL DEBATE POSTERIOR.....	45
4.1. <i>Las teorías de variables ocultas</i>	47
4.2. <i>El problema de la medida</i>	54
4.3. <i>Investigaciones más recientes. La noción de decoherencia</i>	62
BIBLIOGRAFÍA	69

RESUMEN

La interpretación de Copenhague del formalismo cuántico atribuye un papel fundamental al acto de medición. Antes del mismo, el sistema cuántico se encuentra en una superposición de estados, como indica la pluralidad de soluciones de la función de ondas. Las variables clásicas (como la posición o la velocidad) no tienen un valor definido. En el momento de la medida se produce el colapso de la función de ondas, que hace que las variables clásicas adquieran un valor determinado.

En la primavera del año 1935, Einstein, Podolsky y Rosen criticaron, en un famoso artículo, el carácter presuntamente completo de la descripción dada por la función de ondas. En el artículo aparecía una paradoja resultada al aplicar la interpretación ortodoxa en un experimento mental ideado por A. Einstein: la interpretación de Copenhague permitía que el estado de un sistema pudiera depender de una medición realizada en un sistema alejado, violando el principio de localidad de la relatividad especial.

A finales del mismo año, tras una nutrida correspondencia con Einstein, E. Schrödinger publicó un importante artículo (“La situación actual de la mecánica cuántica”), en el cual realizó una revisión de las principales cuestiones acerca de la interpretación de la mecánica cuántica: la interpretación de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, el carácter aparentemente borroso de las variables, la completitud de la descripción dada por la función de ondas, el entrelazamiento entre sistemas y la paradoja EPR, el problema de la medida. Para el autor, la dificultad central reside en el hecho de que el conocimiento de la función de ondas de un sistema compuesto no incluye el conocimiento máximo de sus partes (problema del entrelazamiento). Fue en este artículo donde Schrödinger propuso la conocida paradoja del gato vivo y muerto a partes iguales, como ejemplo para mostrar el absurdo de la interpretación borrosa de las variables. Esta paradoja se ha convertido en un símbolo de los límites de la interpretación de Copenhague.

En los años posteriores, las cuestiones interpretativas señaladas en el artículo de 1935 fueron objeto de un interesante debate. En el trabajo nos referimos, en primer lugar, a los trabajos encaminados a completar la teoría cuántica por medio de parámetros ocultos (D. Bohm, 1952). J. S. Bell demostró en el año 1964 que la existencia de variables ocultas es incompatible con el postulado de localidad, por lo que algunas propuestas recientes (Bohm y Hiley) han incluido en la interpretación el principio de totalidad. En segundo lugar, recogemos algunas propuestas de explicación del fenómeno del colapso de la función de ondas. H. Everett III (1957) negó la existencia del colapso, proponiendo una interpretación de muchos mundos paralelos. E. Wigner (1961) sugirió una interpretación subjetiva del colapso: este era causado por la conciencia del

observador. Ghirardi, Rimini y Weber (1986) y R. Penrose (1986, 1989, 1994) atribuyeron el colapso a diversos procesos espontáneos.

Recientemente, las teorías sobre la decoherencia cuántica han ofrecido una posible explicación de por qué no vemos superposiciones cuánticas en el mundo que nos rodea. En la actualidad se están desarrollando experimentos que parecen indicar que la superposición cuántica no es un fenómeno exclusivo del mundo microscópico. Estas investigaciones, seguramente, aportarán luz a las cuestiones acerca de la interpretación de la mecánica cuántica.

1. INTRODUCCIÓN. EL PROBLEMA DE LA INTERPRETACIÓN DEL FORMALISMO CUÁNTICO

La idea de la cuantización de la energía, propuesta por M. Planck en el año 1900, dio origen a una nueva rama de la física para el mundo microscópico: la *mecánica cuántica*, rama que se fue distanciando cada vez más del formalismo continuo y determinista de las leyes de la mecánica clásica. En 1926, Heisenberg, Born y Jordan propusieron un nuevo formalismo para la mecánica cuántica, basado en el cálculo matricial. Simultáneamente, aparecía un trabajo de E. Schrödinger (1887-1961) proponiendo un formalismo (que luego se demostraría equivalente al anterior) en términos ondulatorios, de acuerdo con las ideas de De Broglie. Todo sistema cuántico se hallaba regido por una ecuación, denominada *ecuación de ondas* (la llamada “ecuación de Schrödinger”): una ecuación diferencial de segundo orden para la función de ondas ψ (función compleja en un espacio multidimensional)¹.

Gracias a esta sólida base matemática, la teoría cuántica realizó progresos espectaculares. En pocos años, los físicos fueron capaces de explicar multitud de resultados experimentales, como los espectros de átomos complejos o las propiedades de algunas reacciones químicas. Sin embargo, los autores encontraban gran dificultad en la interpretación de las mismas ecuaciones utilizadas. ¿Qué interpretación real había que atribuir a la función de ondas, teniendo en cuenta que su espacio de configuración (un espacio de $3N$ dimensiones, donde N es el número de partículas) no podía ser identificado con el espacio real? ¿Cómo entender que las funciones de ondas pudieran describir combinaciones de distintos estados (las llamadas “superposiciones”)?

¹ P. Dirac propondría un tercer formalismo, también equivalente, basado en el álgebra de los q -números (un álgebra sin la propiedad conmutativa).

¿Significaban estas que una partícula podía hallarse realmente localizada en varias posiciones simultáneamente?²

N. Bohr propuso una interpretación del formalismo cuántico alejada de las tradicionales interpretaciones realistas propias de la física clásica. Para N. Bohr (principal autor de la que será llamada “interpretación de Copenhague” de la mecánica cuántica), la limitación de los conceptos clásicos al ser aplicados a los fenómenos atómicos significaba la imposibilidad de definir, en sentido propio, el estado de un sistema físico. Sin embargo, el principio de correspondencia (enunciado por el mismo Bohr) imponía que la teoría cuántica había de converger, en el límite macroscópico, con la teoría clásica. En consecuencia, las variables clásicas habían de ser también utilizadas en la física cuántica, mas no como variables reflejando valores realmente existentes, sino como variables matemáticas de valores indefinidos³. De hecho, según el principio de complementariedad (también de Bohr), eran posibles varias descripciones simultáneas de un sistema utilizando distintos términos clásicos. Las relaciones de indeterminación descubiertas por Heisenberg en 1927 vinieron a reforzar la defensa de estos principios por parte de Bohr y su Instituto en Copenhague.

Aunque la interpretación de Bohr no suponía problemas en la investigación experimental, sus afirmaciones no parecían, con todo, exentas de problemas teóricos. Según la interpretación de Bohr, por ejemplo, un electrón no tenía una posición definida hasta que esta posición era medida por un observador. (Por una parte, la posición era un concepto clásico, sin pleno sentido a nivel subatómico: el electrón en realidad se encuentra “deslocalizado”. Por otra, había que seguir admitiendo la posibilidad, que

² Cf. M. TEGMARK y J. A. WHEELER, “Cien años de misterios cuánticos”, *Investigación y ciencia* 295 (2001), p. 51.

³ Cf. N. BOHR, *Introductory Survey* (1929), en *Atomic Theory and the Description of Nature* (1934), Cambridge 2011, p. 8.

tantos frutos había dado a nivel experimental, de realizar mediciones: para ello había que utilizar aparatos macroscópicos). Estas ideas planteaban varias dificultades. ¿Dónde colocar el límite entre lo microscópico (regido por las leyes cuánticas) y el mundo macroscópico (en el cual tiene validez la mecánica clásica)? ¿Qué sentido ontológico tiene esta división? ¿Qué sentido dar a las variables matemáticas clásicas en el mundo microscópico, toda vez que son utilizadas pero no se les atribuye un valor definido? ¿Qué o quién puede ser considerado, desde el nuevo punto de vista, un observador? ¿Cómo puede el procedimiento físico de observación provocar un salto tan importante desde el punto de vista conceptual (la emergencia de la existencia de un valor definido para la variable)? Estas preguntas se engloban en la pregunta acerca de la interpretación del formalismo cuántico señalada al comienzo: ¿qué interpretación física debemos dar a la ecuación de ondas?

En 1935, E. Schrödinger propuso un experimento mental con el cual quería llamar la atención de las dificultades de la interpretación propuesta por N. Bohr. El experimento consistía en un gato encerrado en una cámara junto con una pequeña cantidad de sustancia radiactiva. Un dispositivo en el interior de la cámara accionaba, al producirse la desintegración de uno de los átomos de dicha sustancia, una palanca que liberaba un veneno mortal para el gato. El comportamiento atómico de la sustancia radiactiva venía regido por la indeterminación propia del mundo cuántico, de modo que sólo podía predecirse la probabilidad (supongamos $1/2$) de que en una hora se produjese una desintegración. La función de ondas representaba una superposición de dos estados (sustancia íntegra y desintegración atómica) con iguales coeficientes ($1/2$). Tomando en sentido literal la interpretación de Bohr, de ella se debía deducir que en la cámara habría de

encontrarse una superposición de dos estados del gato (respectivamente vivo y muerto) a partes iguales, lo cual es absurdo según la experiencia común⁴.

El ejemplo paradójico del gato se convirtió en un símbolo de los límites de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, de ahí que lo hayamos tomado como parte del título del presente trabajo. La paradoja venía incluida dentro de un artículo (“*Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*”), publicado por Schrödinger en tres partes, en el año 1935, en el cual el autor trataba varias de las cuestiones principales de la interpretación de la mecánica cuántica y de las dificultades surgidas de la interpretación de N. Bohr. El objetivo principal de este trabajo consistirá en realizar un análisis de dicho artículo y una exposición de la historia de los problemas que aparecen en él reflejados.

El trabajo constará de tres partes principales. En la primera de ellas (próximo apartado) trataremos algunas cuestiones preliminares que nos servirán para contextualizar el artículo de Schrödinger de 1935. En concreto, expondremos los fundamentos de la interpretación bohriana (la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica) y un artículo de Einstein, Podolsky y Rosen de 1935, conteniendo una paradoja (la llamada “paradoja EPR”), la cual será el estímulo principal que llevará a Schrödinger, tras una intensa comunicación con Einstein, a redactar el artículo citado. En la siguiente parte del trabajo (apartado tercero), analizaremos detenidamente el artículo de Schrödinger. A continuación (apartado cuarto), realizaremos una exposición del debate suscitado en los años posteriores, hasta las investigaciones más recientes.

⁴ Cf. E. SCHRÖDINGER, “The Present Situation in Quantum Mechanics” (1935), traducción de J. D. TRIMMER, en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton 1983, p. 157.

Nuestro trabajo, dentro del área de la Historia de la Ciencia, será un trabajo fundamentalmente histórico: pretende ofrecer una presentación actualizada de la historia del problema. Como fuentes para el trabajo, hemos tratado de acudir, en cuanto nos han sido disponibles, a las fuentes originales de los autores. En este sentido, nos ha sido de gran utilidad la recopilación realizada por Wheeler y Zurek (1983; v. bibliografía). En cuanto a las fuentes historiográficas, hemos partido principalmente de los estudios de Jammer (1974) y de la monumental historia de la teoría cuántica escrita por Mehra y Rechenberg (2001; especialmente el volumen sexto). Para el estudio de las investigaciones más recientes, así como para el tratamiento de algunas cuestiones específicas, hemos acudido a diversos artículos de revistas especializadas. Creemos haber recogido, así, las aportaciones más relevantes acerca de las cuestiones estudiadas.

2. CUESTIONES PRELIMINARES

El artículo de Schrödinger de 1935, con su conocida paradoja del gato, supuso una seria llamada de atención sobre los problemas principales que conllevaba la interpretación más divulgada de la mecánica cuántica, debida a N. Bohr. Antes de exponer las ideas del artículo, hemos de tratar algunas cuestiones preliminares.

En primer lugar, expondremos (de modo sumario) los fundamentos principales de la interpretación bohriana de la mecánica cuántica (la llamada “interpretación de Copenhague”). La interpretación de Bohr, centrada en el principio de “complementariedad” de las distintas descripciones en términos clásicos, niega una realidad física independiente, como cantidad determinada, a las variables clásicas del formalismo (tales como la posición, la velocidad, el momento angular...) Estas sólo adquieren realidad (fenoménica) cuando se efectúa la medición de sus valores. De este modo, como veremos, Bohr otorga al acto de medición un papel peculiar -y no exento de problemas- en la teoría cuántica.

En segundo lugar, hablaremos de la famosa “paradoja EPR” (propuesta por Einstein, Podolsky y Rosen en mayo de 1935). Esta paradoja, que resultó uno de los principales argumentos de A. Einstein en la discusión de las ideas de N. Bohr, trataba de atacar el pretendido carácter definitivo y completo de la teoría cuántica existente. En realidad, la paradoja señala -como explicaremos- la incompatibilidad del pretendido carácter completo de la teoría cuántica con el principio de localidad. La paradoja EPR dio lugar a una animada discusión, en la cual la respuesta de Bohr no se haría esperar.

2.1. La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica

Durante los años de desarrollo de la teoría cuántica (décadas de 1920 y 1930), surgió un esquema interpretativo de la misma que recibe comúnmente el nombre de *interpretación de Copenhague*. Esta interpretación tiene por principal “padre” al físico danés Niels Bohr (el cual nació y ejerció su docencia durante varios años en dicha ciudad de Dinamarca), en cuya línea se sitúan las contribuciones de W. Heisenberg, M. Born y P. Dirac, entre otros⁵.

La interpretación de Copenhague ha sido la interpretación de la teoría cuántica más difundida entre los físicos, sobre todo hasta los años 1980, de ahí que sea conocida también como la “interpretación ortodoxa”⁶. Sin embargo, esta interpretación no consiste en una doctrina unitaria, expuesta de modo sistemático, sino más bien (en expresión de M. Jammer) en un “denominador común” para una variedad de puntos de vista relacionados⁷. De hecho, Bohr y Heisenberg (sus máximos representantes) nunca coincidieron totalmente en el significado de los principios cuánticos fundamentales⁸.

En el centro de la interpretación de Copenhague se encuentra el llamado *principio de complementariedad*, presentado por Bohr en un congreso celebrado en Como (1927). N. Bohr parte de la constatación de los límites existentes al tratar de aplicar los conceptos

⁵ Cf. J. FAYE, “Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics”, en E. N. ZALTA (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2008 Edition), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-copenhagen/>>.

⁶ Como nombre más preciso, recibe también la denominación de “interpretación de complementariedad” (cf. M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics: the Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, New York 1974, p. 87).

⁷ Cf. M. JAMMER, op. cit., p. 87. Según Howard, el “mito” de la interpretación de Copenhague como teoría unitaria (así como la acuñación del término) se debe a un artículo de Heisenberg de 1955. (Cf. D. HOWARD, “Who Invented the «Copenhagen Interpretation»? A Study in Mythology”, *Philosophy of Science* 71/5 (2004), pp. 675ss.; ref. a W. HEISENBERG, *The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*, en W. PAULI [ed.], *Niels Bohr and the Development of Physics*, London 1955, pp. 12ss.).

⁸ K. Camilleri ha mostrado, por ejemplo, cómo Heisenberg y Bohr interpretaron de distinto modo la noción de complementariedad (cf. K. CAMILLERI, “Bohr, Heisenberg and the Divergent Views of Complementarity”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38 [2007], pp. 514-528).

de la física clásica a los fenómenos atómicos. La atribución de una esencial discontinuidad (carácter “cuántico”) a los procesos atómicos conlleva, en particular, la imposibilidad de realizar una observación del sistema sin perturbar su estado. La definición del estado de un sistema (en términos matemáticos) y la observación del mismo son *imposibles simultáneamente* (a diferencia de lo que ocurría en la física clásica)⁹. Para Bohr, esto es sólo una manifestación de un principio más general: el citado principio de complementariedad. Según este, las descripciones espacio-temporales de una partícula o sistema de partículas y las descripciones referidas al momento o la energía (simbolizadas respectivamente en la observación y la definición) son complementarias, ambas necesarias pero excluyentes entre sí, imposibles simultáneamente¹⁰.

Para ilustrar su tesis de la complementariedad, Bohr se refiere en primer lugar a la naturaleza dual de la luz¹¹. Los patrones de interferencia observados por Young (1804) habían mostrado el carácter ondulatorio de la luz¹². Sin embargo, el efecto fotoeléctrico (Einstein, 1905) y el efecto Compton (1923) mostraban su carácter corpuscular a la par¹³. Ambas descripciones son necesarias para la completa caracterización de la

⁹ Cf. N. BOHR, “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory” [1928], en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 88-90. (Se trata de un artículo presentado para su publicación, en el cual Bohr elabora lo expuesto oralmente en el Congreso de Como).

¹⁰ Escribe Bohr: “La naturaleza misma de la teoría cuántica nos fuerza así a contemplar la coordinación espacio-temporal y la pretensión de causalidad, cuya unión caracteriza las teorías clásicas, como características complementarias pero excluyentes de la descripción, las cuales simbolizan la idealización de la observación y la definición respectivamente” (Ibid., pp. 89s.) M. Jammer considera que estas líneas contienen la “esencia” de lo que más tarde fue conocido como “interpretación de Copenhague” (cf. M. JAMMER, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 21989, p. 366).

¹¹ Cf. N. BOHR, art. cit., en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 90s.

¹² En el experimento de Young, llamado “experimento de la doble rendija”, un haz de luz incide sobre una pantalla en la que se han practicado dos pequeños orificios próximos entre sí. En la pantalla situada a cierta distancia de ellos, se observa un patrón de franjas alternativamente iluminadas y oscuras, propio de los fenómenos de interferencia ondulatoria, en lugar de la suma de intensidades que habría cabido esperar.

¹³ La emisión de electrones de un metal al ser iluminado (efecto fotoeléctrico) fue explicada por Einstein cuantizando la radiación lumínica absorbida (en cuantos de luz que reciben el nombre de fotones). Compton explicó la radiación emergente al incidir un rayo de alta frecuencia sobre una lámina de metal

naturaleza de la luz pero, a la vez, son complementarias, ya que las características ondulatorias y corpusculares no se manifiestan simultáneamente¹⁴. Análogamente ocurre con la naturaleza dual de los constituyentes de la materia, como sabemos por las aportaciones de L. de Broglie (1924)¹⁵. Según Bohr, esta dualidad no refleja dos interpretaciones contradictorias, sino dos descripciones complementarias de los fenómenos¹⁶.

Además del carácter dual onda-corpúsculo, Bohr encontró un apoyo a su noción de complementariedad en las *relaciones de indeterminación*, presentadas por W. Heisenberg en el mismo año 1927. A finales de 1926, Dirac y Jordan habían elaborado un nuevo formalismo de la mecánica cuántica (la teoría de transformaciones), en el cual a cada variable dinámica venía asociado un operador (operación matemática que transforma una función en otra). Estos autores observaron que, en el caso de ciertos pares de variables físicas (las variables llamadas “conjugadas”, como la posición y el momento, o la energía y el tiempo)¹⁷, la obtención del valor numérico concreto para una de ellas dejaba a la otra “indeterminada”: ambas sólo podían ser determinadas simultáneamente con una cierta imprecisión. W. Heisenberg cuantificó esta indeterminación: el producto

en términos de choque corpuscular de fotones y electrones, choques en los cuales se conserva la energía y el momento.

¹⁴ Un ejemplo: Si se modifica el experimento de Young colocando detrás de cada rendija un detector que indique si un fotón ha atravesado o no este orificio, la figura de interferencia desaparece y la pantalla muestra, en su lugar, el tipo de figura que se obtendría si se sumasen sencillamente las figuras de dos experimentos individuales de una sola rendija (cf. L. SKLAR, *Filosofía de la física*, Madrid 1994, p. 243).

¹⁵ L. de Broglie extendió este carácter dual a toda la materia, al asociar una onda (“onda piloto” u “onda de fase”) a toda partícula en movimiento.

¹⁶ Cf. N. BOHR, art. cit., en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 91. El carácter ondulatorio se relaciona con la descripción espacio-temporal, mientras que el carácter corpuscular está referido a términos de energía y momento (variables propias del estudio de choques entre partículas).

¹⁷ En el formalismo cuántico, dos variables asociadas a los operadores A y B se dicen (canónicamente) conjugadas si su conmutador ($AB - BA$) es igual a la cantidad $i(\hbar/2\pi) \neq 0$, donde i es el número imaginario y h es la constante de Planck. Por ejemplo, la posición y el momento lineal (producto de la masa por la velocidad).

de las desviaciones de ambas variables (medida de la indeterminación) era siempre igual o superior a una constante ($\hbar = h/2\pi$, donde h es la constante de Planck)¹⁸.

En su presentación, la indeterminación se explicaba como originada por la inevitable perturbación introducida en el mismo experimento de medición. Así, por ejemplo, al iluminar un electrón para conocer su posición, se producía un fotoefecto que alteraba (de modo discontinuo) el momento¹⁹. Sin embargo, N. Bohr dio una interpretación más radical de las relaciones de indeterminación, al interpretarlas como expresión de la máxima precisión con que podían ser *definidas* simultáneamente (y no solamente medidas) características complementarias y considerarlas, de este modo, una confirmación matemática de las ideas que venía desde hace tiempo elaborando acerca de la complementariedad²⁰.

El principio de complementariedad suponía, según escribió Bohr en 1929, “un nuevo modo de descripción (...), en el sentido de que cualquier aplicación dada de conceptos clásicos excluye el uso simultáneo de otros conceptos clásicos que en una conexión diferente son igualmente necesarios para la elucidación de los fenómenos”²¹. En realidad, según la interpretación ortodoxa, esta complementariedad de dos descripciones mutuamente excluyentes (y a la vez ambas necesarias para una caracterización completa), ocurre porque estas descripciones lo son sólo del *fenómeno* cuántico

¹⁸ Cf. W. HEISENBERG, “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics” (1927), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 62-84. La constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s) representa el cuanto de energía básico de la naturaleza.

¹⁹ Cf. W. HEISENBERG, art. cit., en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 64.

²⁰ Cf. N. BOHR, art. cit., en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 98ss.; M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 69; ID., *The conceptual Development...*, op. cit., pp. 360. 363. La posición es la variable espacio-temporal de referencia, mientras que el momento lineal es la variable de referencia en la descripción en términos causales y de energía.

²¹ N. BOHR, *Introductory Survey* (1929), en *Atomic Theory and the Description of Nature* (1934); cit. en M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 95.

(conjunto formado por el sistema y el instrumento de medida) y no de la realidad objetiva²².

Según las tesis de Bohr, los conceptos de la física clásica (tales como la posición, la velocidad, el momento angular...) siguen siendo necesarios para explicar los fenómenos cuánticos tal como nuestros instrumentos de medida los detectan, pero no son aplicables a los sistemas cuánticos considerados en sí mismos²³. Así, por ejemplo, sólo tendría sentido hablar de posición (u otra propiedad) de una partícula cuando se realiza una medición con un aparato diseñado para determinarla, pero no como una propiedad suya objetiva.

Para comprender esto, debemos referirnos brevemente al formalismo dado por la ecuación de ondas de Schrödinger. En 1926, profundizando en la teoría ondulatoria de L. de Broglie, E. Schrödinger dedujo una forma general para la ecuación de la onda de fase, en términos de derivadas parciales de una función compleja ψ en un espacio multidimensional²⁴. Esta ecuación, que recoge la evolución del sistema en el tiempo, admite varias soluciones para cada una de las variables. Al efectuar una medición, el valor obtenido será una de las posibles soluciones. La función de ondas no da, con todo, ningún mecanismo para averiguar cuál de ellas será la efectivamente obtenida; sólo

²² Escribe N. Bohr: “El postulado cuántico implica que cualquier observación de los fenómenos atómicos involucrará una interacción con la acción de observación que no ha de ser descuidada. De acuerdo con esto, *una realidad independiente en el sentido físico ordinario no puede ser adscrita ni al fenómeno ni a las acciones de observación*” (N. BOHR, “The Quantum Postulate...”, art. cit., en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 89. El subrayado es nuestro).

²³ Cf. A. J. DIÉGUEZ, “Realismo y teoría cuántica”, *Contrastes. Revista Interdisciplinar de Filosofía I* (1996), pp. 80s. Escribe N. Bohr: “La teoría cuántica está caracterizada por el reconocimiento de una fundamental limitación en las ideas físicas clásicas cuando son aplicadas a los fenómenos atómicos” (N. BOHR, “The Quantum Postulate...”, en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 88).

²⁴ Cf. E. SCHRÖDINGER, “An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules”, *Physical Review (Second Series)* 28/6 (1926), p. 1049; ecuación en p. 1068.

permite deducir la distribución de probabilidad de la medida de los distintos valores²⁵. ¿Se trata de una limitación de nuestro conocimiento? La interpretación de Copenhague considera esto, más bien, algo propio de la constitución misma de la materia. Antes de la medida, la partícula se encuentra en una *superposición* de estados (por ejemplo, una superposición de distintas posiciones o velocidades). El mismo proceso de medición provoca el “colapso” de la función de onda, haciendo que adquiera una posición (o velocidad) determinada.

Pongamos un ejemplo. Supongamos un electrón cuyo *spin* puede tomar dos posibles valores, “arriba” y “abajo”²⁶ (simbolizamos como \uparrow y \downarrow), con probabilidad en ambos casos de 1/2. El estado del sistema vendría descrito por una superposición de estados $[\frac{1}{2} |\uparrow\rangle + \frac{1}{2} |\downarrow\rangle]$ ²⁷. Según la interpretación de Copenhague, el acto de observarlo provoca un cambio brusco en la función de onda (el “colapso”), la cual se decanta por una de las dos posibilidades. A partir de este momento, sólo subsiste la parte correspondiente de la función de onda (por ejemplo, la correspondiente a $|\uparrow\rangle$). Sucede algo así como si la naturaleza seleccionara, en el momento de la medida, un estado al azar, de acuerdo con las probabilidades que determina la función de onda²⁸.

Como vemos, la interpretación de Copenhague adscribe un papel fundamental (determinante de realidad) al proceso de medición de las variables. La peculiaridad que esta interpretación atribuye al acto de medición (proceso que, en vez de venir regido por las

²⁵ Fue M. Born, en el mismo año 1926, quien atribuyó un sentido estadístico al cuadrado de la función de ondas $|\psi|^2 d\tau$, como la probabilidad de encontrar una partícula en una región dada $d\tau$.

²⁶ Llamamos “arriba” o “abajo”, según la dirección en la que sea desviado el electrón al ser sometido a un campo magnético uniforme en todas las direcciones excepto en la dirección perpendicular al movimiento. Se trata del experimento de Stern-Gerlach (1922). El *spin*, uno de los números atómicos, refleja el momento de rotación intrínseco de las partículas elementales, y puede tomar dos valores, según el sentido de dicha “rotación” (no se trata propiamente de una rotación en sentido espacial).

²⁷ Utilizamos la notación de P. Dirac de semi-*brackets* para representar los estados, aunque se trate aquí sólo de una notación divulgativa (no formal).

²⁸ Cf. M. TEGMARK y J. A. WHEELER, art. cit., p. 51.

leyes de la mecánica cuántica, resulta totalmente distinto al resto de procesos mecánicos) hace que se plantee aquí un problema (el llamado *problema de la medida*) que ya fue explicitado por Von Neumann en sus célebres *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932). Como señala este autor, hallamos una “singular duplicidad” entre el cambio causal de un sistema sobre el que no se efectúa ninguna medición y el cambio aparentemente aleatorio que se produce cuando se efectúa una medida sobre el mismo²⁹. En el primer caso, la evolución del sistema viene regida de manera determinista por las ecuaciones dinámicas del movimiento (ecuación de onda de Schrödinger), como “mezcla” de estados superpuestos. En el segundo caso, el sistema da un “salto” instantáneo (y termodinámicamente irreversible) hacia uno solo de los posibles valores, según el postulado del colapso³⁰. Esta duplicidad dará lugar a algunas dificultades que serán objeto de discusión en los años inmediatamente posteriores. Estas quedarán condensadas en el año 1935 en dos paradojas, propuestas, respectivamente, por Einstein y el propio Schrödinger.

2.2. La paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen

En la quinta Conferencia Solvay (Bruselas, 1927), Albert Einstein había cuestionado el punto de vista que consideraba la mecánica cuántica una teoría completa de los procesos atómicos individuales³¹. Supongamos un experimento de un haz de electrones que se difracta al atravesar una rendija, detrás de la cual se coloca, a cierta distancia, una pantalla con una película fotográfica para detectar las partículas que allí inciden. Si $|\psi|^2$

²⁹ Cf. J. VON NEUMANN, *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* (1932), Madrid ²1991, pp. 297s.

³⁰ Cf. D. Z. ALBERT, *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge (Massachusetts) 1994, p. 80; A. J. DIÉGUEZ, art. cit., p. 79.

³¹ Cf. J. MEHRA y H. RECHENBERG, *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 6/2, New York 2001, p. 715. Una teoría física se llama “completa” si de sus leyes se pueden derivar todos los fenómenos de la fracción del mundo objeto de la teoría. En el caso de que haya enunciados verdaderos no derivables del formalismo, la teoría se llama incompleta.

expresase únicamente, como pretenden algunos físicos, la probabilidad de encontrar un electrón en un instante dado en un lugar determinado de la pantalla, nada impediría que una partícula actuara en dos lugares distintos de la pantalla. Para que la teoría fuera completa, deberíamos asumir además un particular mecanismo de acción a distancia, que impidiera que la onda de esta partícula (distribuida continuamente en el espacio) produjera un efecto en *dos* lugares distintos³². La solución de Einstein consiste en rechazar que la función de onda agote la representación del comportamiento de la partícula³³.

Durante los años 30, Einstein siguió preocupándose sobre esta cuestión, y elaborando algunos experimentos mentales para mostrar la incompletitud del formalismo cuántico³⁴. En 1931, Einstein escribió un artículo con Tolman y Podolsky, (*“Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics”*), en el cual trataban de demostrar que la incertidumbre de la mecánica cuántica se extendía también a la descripción de los eventos pasados³⁵. En las mismas fechas, elaboró un experimento mental (el experi-

³² Cf. A. EINSTEIN, “Discussion générale des idées nouvelles émises” [1928]; cit. en M. PATY, “Einstein et la complémentarité au sens de Bohr: du retrait dans le tumulte aux arguments d’incomplétude”, *Revue d’histoire des sciences* 38/3-4 (1985), pp. 336s. La idea de Einstein es que, al localizarse una partícula (incidir en la pantalla), debería haber una especie de “señal instantánea” que impidiera a su misma onda actuar en otro lugar lejano. Tal acción a distancia era rechazable según las enseñanzas de la teoría de la relatividad, dado que supondría una transmisión de tal “señal” a una velocidad mayor que la de la luz.

³³ Cf. *Ibid.*, p. 337.

³⁴ Puede verse detalladamente el desarrollo de estos años en M. JAMMER, *The Prehistory of the EPR Argument*, en *The Philosophy...*, op. cit., pp. 166-181.

³⁵ Para ello, los autores imaginan dos partículas emitidas desde una caja hacia un observador, la segunda por un camino más largo que la primera. El observador mide el momento de la primera partícula aproximándose y, a continuación, el tiempo de llegada. Esto le permitirá calcular el tiempo en que el obturador se abrió, y la velocidad y energía pasadas de la primera partícula. (La medida del tiempo de llegada alterará el momento lineal de la primera partícula, pero esto no nos importa, ya que conocíamos el momento en el pasado). Por la pérdida de peso en la caja, podrá también calcular la energía emitida. Con estos datos obtenidos, se podrá predecir la energía y también la velocidad de la segunda partícula y, por tanto, su tiempo de llegada, lo cual contradice las relaciones de indeterminación. La solución a la paradoja propuesta por los autores consiste en admitir que no sólo es imposible medir simultáneamente el momento y la posición de una partícula, sino también sucesivamente, ya que no existe método para medir el momento de una partícula sin alterar su valor. Existe también una incertidumbre en la mecánica cuántica que nos impide reconstruir totalmente la historia pasada de una partícula (cf. A. EINSTEIN, R. C. TOLMAN y B. PODOLSKY, “Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics” [1931], en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 135s.)

mento “de la caja y el fotón”) para ilustrar la insuficiencia del formalismo existente³⁶. Estas ideas cristalizaron en la paradoja expuesta en el artículo “*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*”, publicado por Einstein, junto con B. Podolsky y N. Rosen, en la primavera de 1935³⁷.

El artículo trata de demostrar la *incompletitud* de la descripción de la realidad dada por la función de onda en la mecánica cuántica. Comienza dando una condición necesaria para que una teoría sea completa (que cada elemento de la realidad física tenga una contrapartida en la teoría física) y una condición suficiente de realidad (que se pueda predecir con certeza el valor de una cantidad física sin perturbar el sistema)³⁸. A continuación, explica que en mecánica cuántica, si dos operadores no conmutan, el conocimiento preciso de uno de ellos impide un tal conocimiento del otro³⁹. De este hecho, se siguen dos posibilidades:

- a) la descripción dada por la función de ondas no es completa, o

³⁶ El experimento, aunque con distintas variantes, puede ser expuesto como sigue: En el interior de una caja cerrada se encuentra un reloj, conectado a un obturador, el cual al abrir la caja –en un tiempo señalado– permite la emisión de un fotón hacia un espejo. Una vez emitido el fotón, puedo predecir, bien el tiempo exacto en que llegará el fotón reflejado (abriendo la caja, mirando el reloj y comparándolo con la escala estándar de tiempo), o bien la energía del fotón (pesando la caja y comparándolo con el peso inicial, por la equivalencia entre masa y energía). Como dichos valores (tiempo o energía) pueden ser predichos “a distancia” del fotón, estos deben tener realidad física precisa (para evitar una acción transmitida a velocidad mayor que la de la luz), pese a lo que afirman las relaciones de indeterminación (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., pp. 170-172).

³⁷ Cf. A. EINSTEIN, B. PODOLSKY y N. ROSEN, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”, *Physical Review* 47 (1935), pp. 777-780. Este artículo es conocido como “artículo EPR”, por las iniciales de los apellidos de sus autores. Fue recibido el 25 de marzo y publicado el 15 de mayo.

³⁸ Cf. *Ibid.*, p. 777.

³⁹ En el formalismo cuántico de transformaciones, a cada variable dinámica venía asociado un operador matemático. En el caso de que dos operadores que no conmutan (es decir, dos operadores F y G tales que $FG \neq GF$ -situación nada extraña, habida cuenta de que los operadores pueden ser representados también con matrices-), sucede que las dos variables no pueden ser definidas simultáneamente con precisión indeterminada. En el caso de dos variables conjugadas representadas por los operadores A y B, sucede que $AB - BA = i(\hbar/2\pi) \neq 0$. (Variables conjugadas son, por ejemplo, la posición y el momento, o la energía y el tiempo). Por tanto, dichas variables no conmutan, y ambas sólo pueden ser definidas simultáneamente con una cierta indeterminación (en este caso, expresada en las relaciones de Heisenberg).

- b) cuando los operadores correspondientes a dos cantidades no conmutan, las dos cantidades no pueden tener simultáneamente realidad⁴⁰.

Llegando ya al núcleo de la argumentación, los autores suponen que la descripción de la mecánica cuántica fuese completa [a) falso]. Sean ahora dos sistemas (dos partículas por ejemplo) I y II que han interactuado en un intervalo de tiempo de 0 a T, y de los cuales conocemos sus estados antes de $t=0$. Podemos conocer, con la ayuda de la ecuación de Schrödinger, el estado del sistema combinado I+II en cualquier tiempo posterior. En el caso de que pueda conocer el momento p de la primera partícula (en un tiempo posterior a la interacción), podré calcular el momento de la segunda partícula (sin perturbarla), cantidad que será, por tanto, un elemento de realidad. Igualmente, en el caso de conocer la posición q de la primera partícula, podré calcular la posición de la segunda, la cual será un elemento de realidad⁴¹.

La conclusión puede resumirse del siguiente modo: Dado que la medición en el primer sistema no puede alterar el estado del segundo sistema (pues este se encuentra alejado), se sigue que ambos valores p y q en el segundo sistema han de tener simultáneamente un valor de realidad [b) falso]. Lo cual está en contradicción con lo expuesto al comienzo (lo equivalente a las relaciones de indeterminación). De ahí se sigue que la suposición [a) falso] era errónea. La función de ondas, por tanto, no proporciona una descripción completa de la realidad física⁴².

El argumento de Einstein, Podolsky y Rosen se basaba en dos criterios explícitos (las condiciones de realidad y completitud) y dos suposiciones tácitas: la localidad (que en el caso de que dos sistemas ya no interactúen, no puede haber un cambio real en el

⁴⁰ Cf. Ibid., p. 778. Si la tuvieran, estos valores deberían estar incluidos en la descripción completa.

⁴¹ Cf. Ibid., pp. 779s. Omitimos en nuestra recensión los procedimientos matemáticos expuestos.

⁴² Cf. Ibid., p. 780. Los autores concluyen afirmando: “Dejamos abierta la cuestión de si existe una tal descripción. Creemos, sin embargo, que tal teoría es posible” (cf. Ibid.)

segundo sistema debido a las medidas realizadas en el primero)⁴³ y la validez predictiva de la teoría. La validez (al menos estadística) de la teoría era supuesta por el éxito obtenido en los cálculos de los físicos: las probabilidades predichas por la teoría se correspondían con gran exactitud con la estadística de las mediciones realizadas. La localidad era un supuesto derivado de las teorías relativistas de Einstein, que impedían cualquier tipo de acciones a distancia. Tales acciones eran imposibles, al implicar “señales” que habrían de transmitirse a una velocidad infinita (mayor al límite superior fijado por la velocidad de la luz). En el artículo se prueba que, supuestos el criterio de realidad y la validez de la teoría, y aceptada la localidad, la teoría no satisface la condición de completitud⁴⁴.

La argumentación aparece presentada como una evidencia concluyente de la incompletitud de la descripción de la mecánica cuántica. Sin embargo, como ha mostrado A. Fine, Einstein no quedó totalmente conforme con la redacción final del artículo (realizada por Podolsky). Más bien opinaba que lo esencial había quedado “ahogado por la erudición” del formalismo⁴⁵. En realidad, el interés principal de Einstein consistía en señalar la *paradoja*⁴⁶ del hecho de que el estado de un sistema pueda depender de lo que

⁴³ Suelen utilizarse indistintamente los términos “localidad” (imposibilidad de acciones a distancia, instantáneas) y “separabilidad” (posibilidad de hablar separadamente de dos sistemas suficientemente alejados, al no ser posible la influencia instantánea entre ambos) .

⁴⁴ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 185.

⁴⁵ Cf. A. FINE, *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*, Chicago 1996, p. 35. A. Fine cita a A. EINSTEIN, Carta a Schrödinger (19 junio 1935): “Por razones de lenguaje, este [artículo] fue escrito por Podolsky después de mucha discusión. Con todo, no salió tan bien como yo había querido originalmente; más bien lo esencial había sido, por así decirlo, ahogado por la erudición”. A la misma conclusión llega D. Howard, estudiando la correspondencia de Einstein (cf. R. DELTETE, “Einstein and EPR”, *Philosophy of Science* 58 [1991], p. 378, ref. a D. HOWARD, “Einstein on Locality and Separability”, *Studies in History and Philosophy of Science A*, 16 [1985], pp. 171-201). No obstante, no hay duda –como señala Jammer– de que la idea principal del artículo se debe a Einstein (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 185).

⁴⁶ M. Jammer señala que los autores nunca miraron su tesis como una “paradoja”, sino que había sido Schrödinger en llamarla así por primera vez, el 19 de agosto de 1935 (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 186). Sin embargo, A. Fine muestra cómo el término de “paradoja” aparece ya citado por Einstein con anterioridad, en carta del 8 de agosto, y es propio de este autor (cf. A. FINE, op. cit., p. 47, nota 11).

el experimentador decida medir en otro sistema alejado, violando el “principio de separación” (localidad)⁴⁷. La elección de dos variables conjugadas oscurecía el razonamiento, que podría ser expresado más nítidamente como sigue: Al medir el momento de una partícula A podría, por la ley de conservación, inferir el momento de otra partícula B que había interactuado con A en el pasado. Esta propiedad de B debería haber existido ya cuando realizo la medición en A. (En caso contrario, yo habría creado el momento en B al medir A, en violación del principio de separación). Por tanto, la descripción proporcionada por la teoría es incompleta⁴⁸.

Ya en 1933, en una conferencia dictada por Rosenfeld, Einstein había planteado el núcleo de la paradoja incluida en el argumento EPR. En el caso de dos partículas que habían interactuado, la medición de la posición o el momento de una de ellas permitía deducir, según el formalismo, la posición o el momento de la otra. Einstein se preguntaba entonces: “¿No es muy paradójico? ¿Cómo puede ser influido el estado final de la segunda partícula por una medida llevada a cabo en la primera, después de que toda interacción física ha cesado entre ellas?”⁴⁹.

En el fondo, la paradoja se dirige contra el hecho de que, en la interpretación bohriana de la mecánica cuántica, el proceso de medida “creaba” el valor de la cantidad medida, al producirse en la medición el colapso de la función de onda. Antes de la

⁴⁷ Einstein siempre insistió en la contradicción con el principio de localidad. Lo habíamos visto ya en los experimentos mentales de la caja y el fotón (v. nota supra). En 1952, Einstein persiste en la misma idea, como prueban estas líneas escritas a M. Besso: “Yo descarto [que el estado cuántico caracterice completamente un estado real], pues nos obligaría a admitir que existe una ligadura rígida entre partes del sistema alejadas unas de las otras de manera cualquiera en el espacio” (cit. en A. J. DIÉGUEZ, art. cit., p. 93).

⁴⁸ Cf. A. FINE, op. cit., pp. 36-38. Lo que el argumento de Einstein establece es, en rigor, la incompatibilidad entre separación y completitud. Así lo señaló el propio Einstein años más tarde: “La paradoja nos fuerza a renunciar a una de las siguientes dos afirmaciones: (1) la descripción por medio de la función ψ es completa; (2) los estados reales de objetos separados especialmente son independientes unos de otros” (cit. en Ibid., p. 37; la traducción es nuestra).

⁴⁹ Recordado por L. Rosenfeld, “Niels Bohr in the Thirties” (1967), extractado en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 137. Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 173.

medición, sólo la ecuación de onda caracterizaba el sistema: no había ningún parámetro interno que determinase completamente el resultado de la medida. Para Einstein, esto era inaceptable⁵⁰.

Veámoslo con una reformulación de la paradoja EPR, utilizando un modelo de dos partículas con *spines* correlacionados⁵¹. Supongamos dos partículas que, por haber interactuado en el pasado, se encuentran correlacionadas de modo que, si el *spin* de una es “hacia arriba”, el *spin* de la otra es “hacia abajo” (y viceversa)⁵². Establezcamos que, para cada partícula, la probabilidad de obtener en una medición “*spin* arriba” o “*spin* abajo” es 1/2. Supongamos ahora que tales partículas se alejan en el espacio (habrían de ser divididas por algún dispositivo que no perturbase las correlaciones de *spin*). Según la interpretación de Bohr, antes de la medición, ninguna de las partículas posee un *spin* definido, sino que se encuentra en una superposición de estados ($\frac{1}{2} |\uparrow\rangle + \frac{1}{2} |\downarrow\rangle$). En un momento determinado, medimos el *spin* de una de las partículas, obteniendo, por ejemplo, el valor “arriba”. Se habría producido (desde el punto de vista de Bohr) un colapso de la función de ondas para la primera partícula, que ahora expresaría sólo el estado $|\uparrow\rangle$. Ahora bien, en el mismo momento en que obtengo el valor “arriba” para el *spin* de dicha partícula, podría deducir (por la correlación existente) el valor del *spin* de la otra partícula (“abajo”). Para ello, debería suceder que, en ese mismo instante, la segunda partícula “saltase” hacia el estado $|\downarrow\rangle$ (se produjese el colapso de su función de ondas), y esto aunque la segunda partícula se encontrase a años luz de distancia. La medición del *spin* en la primera partícula actuaría “a distancia”, de este modo, sobre el sistema de la segunda partícula, violando las leyes de la relatividad especial.

⁵⁰ Cf. L. SKLAR, op. cit., p. 308.

⁵¹ Cf. Ibid., pp. 309-311.

⁵² Ya hemos aludido anteriormente al significado de estas expresiones (v. nota supra).

Para Einstein, el caso del doble sistema propuesto en la paradoja, en el cual sucedería un colapso instantáneo en un sistema por una medida realizada en otro arbitrariamente alejado, sería una muestra de lo absurdo de la concepción de Bohr y de la necesidad de una extensión (o transformación) de la mecánica cuántica para obtener una teoría completa⁵³, en la cual se pudieran predecir los valores reales: aquellos que se obtienen efectivamente en la medida.

2.3. Primeras reacciones al artículo de Einstein-Podolsky-Rosen

La primera reacción al artículo EPR fue la publicación en el periódico *The New York Times* (4 de mayo de 1935) de la noticia titulada “Einstein ataca la teoría cuántica”, en la cual se señalaba que, según el físico alemán, la teoría cuántica era “correcta”, pero sin embargo no era “completa”⁵⁴. No obstante, la primera reacción aparecida en una publicación científica fue una carta escrita por E. C. Kemble al editor de *Physical Review* sólo diez días después de la publicación del artículo de Einstein-Podolsky-Rosen. Según Kemble, en el argumento EPR yacía la falacia de descuidar el hecho de que, cuando dos sistemas interactúan durante un tiempo, se crea una correlación entre ellos: un sistema puede ser “afectado” por la observación sin necesidad de ser “perturbado”. El autor proponía la solución completa desde una interpretación estadística de la mecánica cuántica. Si se considera ψ como una mera herramienta computacional, que describe únicamente las propiedades de un conjunto de gran número de sistemas similares (dando una distribución de probabilidad de los mismos), y no el estado para una única partícula, el argumento EPR no refuta la completitud de la descripción. Podolsky escribió una res-

⁵³ El artículo EPR concluye diciendo: “Mientras que hemos mostrado que la función de ondas no proporciona una descripción completa de la realidad física, dejamos abierta la cuestión de si tal descripción existe o no. Creemos, sin embargo, que una tal teoría es posible” (Cf. A. EINSTEIN, B. PODOLSKY y N. ROSEN, art. cit., p. 780).

⁵⁴ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 189.

puesta, nunca publicada, en la cual señalaba que una mecánica estadística podía no ser una descripción completa de los procesos elementales y constataba, por otra parte, la diferencia filosófica de su concepción con la de Kemble⁵⁵.

El 13 de junio de 1935, W. Pauli escribió una carta a W. Heisenberg pidiéndole que enviara una respuesta a *Physical Review*. En la carta, Pauli señalaba el núcleo de su objeción: “En realidad, la descripción mecánica-cuántica debe atribuir características a la partícula 1 que contengan ya todas aquellas propiedades de 1 que -*después* de posibles medidas de 2 que no perturben 1- puedan ser predichas con certeza”⁵⁶. Heisenberg se tomó en serio la propuesta de Pauli y comenzó a estudiar el tema de la posibilidad de una extensión determinista de la mecánica cuántica, inclinándose por la respuesta negativa. El manuscrito, que no fue publicado, termina afirmando que la evidencia experimental no proporciona ningún indicio de que la futura descripción de la naturaleza vuelva a “ajustarse de nuevo al estrecho esquema clásico de una descripción visualizable y causal de procesos objetivos en el espacio y en el tiempo”⁵⁷.

La respuesta más esperada al artículo EPR, con todo, vino de parte de N. Bohr, primero con una carta fechada el 29 de junio⁵⁸, y luego con un artículo titulado como el de Einstein-Podolsky-Rosen, y publicado en *Physical Review* el día 15 de octubre⁵⁹. La tesis principal de Bohr es que el criterio de realidad propuesto en EPR contiene “una

⁵⁵ Cf. Ibid., pp. 190-193.

⁵⁶ Cit. en Ibid., p. 728. (La traducción es nuestra).

⁵⁷ Cit. en Ibid., p. 733. (La traducción es nuestra). Un resumen del manuscrito de Heisenberg puede verse Ibid., pp. 729-734.

⁵⁸ Cf. N. BOHR, “Quantum Mechanics and Physical Reality” (1935), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 144. En esta carta, Bohr sostiene que el “criterio de realidad física” del artículo EPR “contiene una esencial ambigüedad” en el caso cuántico, dado que “el procedimiento de medida tiene una influencia esencial en las condiciones sobre las que descansa la misma definición de las cantidades físicas en cuestión”, y promete un artículo con un ulterior desarrollo de este argumento (cf. Ibid.)

⁵⁹ Cf. N. BOHR, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” (1935), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 145-151.

esencial ambigüedad cuando es aplicado a los problemas reales con los que tratamos aquí”⁶⁰.

Bohr considera el experimento de un diafragma rígido con dos aberturas paralelas (muy estrechas en comparación con su separación), a través de cada una de las cuales pasa una partícula con momento inicial dado, y de modo independiente a la otra. Se mide exactamente el momento P del diafragma antes y después del paso de las partículas. En este experimento, la medida bien de la posición, bien del momento de una de las partículas determinará por las leyes de conservación, respectivamente, la posición o el momento de la otra partícula con cualquier exactitud deseada, pero impedirá la medición exacta de las respectivas variables conjugadas⁶¹. De este modo, la medida del momento de la primera partícula (p_1) impedirá la determinación de la posición, no sólo de la primera partícula (q_1), sino también de la segunda (q_2). Sucede entonces que, si bien es cierto que al medir p_1 no hay perturbación mecánica directa de la segunda partícula, sí que existe, sin embargo, “una influencia en las mismas condiciones que definen los posibles tipos de predicciones respecto del futuro comportamiento del sistema” (2), condiciones que constituyen “un elemento inherente en la descripción” del fenómeno⁶². Aquí se encuentra la ambigüedad señalada al comienzo: no es precisamente correcta la expresión “sin perturbar el sistema de ningún modo” del criterio de realidad de EPR, que resulta un criterio ambiguo⁶³.

Lo que Bohr propone es un cambio de mentalidad respecto del punto de vista común cuando tratamos fenómenos cuánticos, una “radical revisión de nuestra actitud respecto de la realidad física”, según la noción de complementariedad. Al discriminar una de las

⁶⁰ Ibid., p. 146.

⁶¹ Cf. Ibid., pp. 148s.

⁶² Cf. Ibid. (El subrayado es de Bohr).

⁶³ Cf. Ibid.

dos descripciones complementarias, “no estamos tratando con una descripción incompleta caracterizada por la selección arbitraria de diferentes elementos de la realidad física al coste de sacrificar otros tantos elementos, sino con una discriminación racional entre proyectos y procedimientos experimentales esencialmente diferentes”. La necesidad de esta discriminación está basada en la imposibilidad de controlar exactamente la interacción del objeto con los instrumentos de medida. La distinción entre los objetos y los instrumentos de medida (que aparecen en una posición singular) puede ser considerada una diferencia principal entre la descripción clásica y la descripción propia de la mecánica cuántica⁶⁴.

M. Jammer señala la importancia de la totalidad del fenómeno experimental en la concepción de N. Bohr. El resultado de cualquier medida en mecánica cuántica nos informa, no del estado del objeto en sí, sino de la situación experimental total en la cual está inmerso (el fenómeno cuántico). En particular, cuando una partícula ha cesado de interactuar con otra, no puede ya ser considerada como un sistema independiente de atributos físicamente reales. El experimento EPR pierde, para Bohr, su carácter paradójico por esta propiedad de totalidad (*wholeness*)⁶⁵. Para Einstein, era precisamente esta concepción (como vuelta a las “acciones a distancia”, en contraste con la recién desarrollada cosmología relativista) lo más difícil de explicar⁶⁶. El debate entre Einstein y Bohr prosiguió, prácticamente en los mismos términos, en las siguientes décadas⁶⁷.

⁶⁴ Cf. *Ibid.*, pp. 146. 148-151.

⁶⁵ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., pp. 197s.; A. DIÉGUEZ, art. cit., p. 94.

⁶⁶ Más adelante, cuando hablemos de las teorías de variables ocultas, retomaremos el problema de la localidad (o totalidad) en la mecánica cuántica.

⁶⁷ Bohr y Einstein nunca llegaron a entenderse mutuamente (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., pp. 156-158). Puede verse la valoración que ambos autores hacen en 1949 de la prolongada discusión en N. BOHR, “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics”, en P. A. SCHILPP (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-scientist*, La Salle (Illinois), pp. 201–241; A. EINSTEIN, “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume (Reply to Criticisms)”, en P. A. SCHILPP (ed.), op. cit., pp. 663-688.

3. EL ARTÍCULO DE SCHRÖDINGER DE 1935: “LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA”

La respuesta principal al artículo EPR vino, con todo, de manos de E. Schrödinger. La paradoja de Einstein suscitó en Schrödinger una reacción favorable, motivando el deseo de realizar un análisis de la cuestión de la interpretación desde sus bases. Este deseo cristalizó en un artículo publicado a finales del mismo año, cuyo título (“La situación actual de la mecánica cuántica”) nos habla ya de la generalidad de su enfoque.

En el artículo de 1935, Schrödinger, además del problema señalado en la paradoja EPR, trata varios problemas interpretativos fundamentales de la mecánica cuántica, como la cuestión de la interpretación de las relaciones de indeterminación (en relación con la cuestión del realismo de las variables) y el problema de la medida (asociado a la pregunta sobre la interpretación de la función de ondas). Al referirse a la primera de estas cuestiones, expone su famoso ejemplo del gato, llevando la indeterminación cuántica al nivel macroscópico. El gato del experimento mental ideado por Schrödinger, “vivo y muerto a partes iguales”, se convertirá en una muestra de la dificultad de interpretar correctamente el formalismo cuántico, y en paradigma de las limitaciones de la interpretación de Copenhague.

3.1. La comunicación entre Einstein y Schrödinger en 1935

Durante los meses de verano del año 1935, tuvo lugar una nutrida correspondencia entre Albert Einstein y Erwin Schrödinger acerca de las cuestiones cuyo debate había despertado la paradoja EPR. La primera carta fue escrita por Schrödinger, el día 7 de junio. En ella, felicita a Einstein por haber “alcanzado públicamente el corazón de la

dogmática mecánica cuántica”⁶⁸. Aunque Schrödinger propone algunas correcciones matemáticas en la argumentación de la contradicción, coincide con Einstein en la incapacidad del esquema ortodoxo para describir los procesos de separación de dos sistemas “entrelazados” (*entangled*)⁶⁹.

Einstein respondió el 19 de junio, proponiendo una analogía⁷⁰. Sean dos cajas cerradas y una pelota, que puede encontrarse, al realizar la observación, en una de las dos cajas. Ahora describo la situación del siguiente modo: “la probabilidad de que la pelota esté en la primera caja es $\frac{1}{2}$ ”. ¿Es una descripción completa? Einstein señala dos posibles respuestas:

- a) No: una descripción completa sería “la pelota está (o no) en la primera caja” (interpretación estadística de Born).
- b) Sí: antes de abrir la caja, la pelota no está en *una* de las dos cajas. Esta existencia en una caja definida ocurre en el momento en que yo abro una de las dos. El estado antes de abrir las cajas está completamente descrito por el número $\frac{1}{2}$ (interpretación llamada por Einstein “Schrödinger-like”⁷¹).

⁶⁸ Cit. en J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, p. 739.

⁶⁹ Cf. Ibid., pp. 739s.; A. FINE, op. cit., pp. 67s.

⁷⁰ Cf. J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, pp. 740s.; W. MOORE, *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge 1993, pp. 304s. A. Fine considera que es en el contexto de esta analogía de la pelota en la caja donde comienza la elaboración de la paradoja del gato de Schrödinger (de la que hablaremos más adelante). (Cf. A. FINE, op. cit., p. 69).

⁷¹ Einstein pensaba que Schrödinger consideraba ψ como la representación de la realidad, en abolición con toda conexión con los conceptos de la mecánica clásica. En carta escrita el 19 de agosto, Schrödinger explica que hacía ya tiempo que había abandonado este punto de vista (Cf. J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, p. 743).

Si ahora se añade el principio de separación, se ha de optar por la primera de las opciones (incompletitud de la descripción cuántica), para evitar una inmediata acción a distancia⁷².

El 13 de julio, Schrödinger escribió expresando su deseo de realizar “un análisis de la presente situación de la interpretación *ab ovo*”, y señalando diversas cuestiones peculiares que debían ser estudiadas⁷³. El 8 de agosto, Einstein le envió otra carta proponiéndole el ejemplo de una masa de pólvora que probablemente explotaría (espontáneamente) en el transcurso de un año. Durante este tiempo, la función ψ describiría una especie de superposición de pólvora explotada y sin explotar⁷⁴. Schrödinger respondió inmediatamente, señalando que había elaborado un ejemplo similar:

“En un ensayo más amplio, que acabo de escribir, discuto un ejemplo muy similar a tu barril de pólvora explosiva (...) Un contador Geiger⁷⁵ es encerrado en una cámara de acero en conexión con una minúscula cantidad de uranio –tan pequeña que *una* desintegración atómica en la siguiente hora es tan probable como improbable-. Un transmisor amplificador nos asegura que la primera desintegración atómica quiebra una pequeña retorta conteniendo ácido cianhídrico. Esta y –cruelmente- un gato están contenidos en

⁷² El caso es análogo a los ejemplos tratados en la paradoja EPR. Al abrir la primera de las cajas, podría saber inmediatamente si la pelota se encuentra en la segunda caja o no. Si suponemos que la existencia en una caja definida sucede en ese mismo instante, en el momento de abrir la primera caja se debería producir una acción que haría que la pelota no se encontrase (o sí, respectivamente) en la segunda. Esta acción sería instantánea y, por tanto, una acción a distancia, en contra de los postulados de la relatividad.

⁷³ Cf. *Ibid.*, pp. 741s. Destaca Schrödinger el uso de los conceptos clásicos en las cantidades observables y el carácter clásico de los resultados de medida (a los que se atribuye al final la realidad), frente a las propiedades no clásicas y acausales de los modelos cuánticos, la dificultad de determinar la continua función de onda con un número finito de mediciones y, en tercer lugar, la afirmación de P. Dirac (difícilmente verificable) de que las variables canónicas pueden tener como autovalores todos los números reales, desde $-\infty$ a $+\infty$.

⁷⁴ Cf. W. MOORE, *op. cit.*, p. 305.

⁷⁵ Detector de partículas radiactivas.

la cámara de acero. Después de una hora, entonces, en la función ψ del sistema total –*venia verbo*- gato vivo y muerto están difuminados a partes iguales”⁷⁶.

A Einstein le agradó el ejemplo del gato, según deducimos de su carta del 4 de septiembre. El ejemplo venía a ser una prueba de que la función de onda no constituía una representación completa de la realidad física. Dado que no puede considerarse una función ψ que incluya un gato vivo y muerto simultáneamente como una descripción del estado real del sistema, es razonable atribuir la función de onda a un conjunto estadístico, que abarque igualmente tanto un sistema con el gato vivo como uno con el gato muerto⁷⁷. El ensayo referido por Schrödinger en esta última carta fue enviado en torno al 12 de agosto y publicado en tres números de la revista *Naturwissenschaften*, entre el 29 de noviembre y el 13 de diciembre, con el título “*Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*” (“La situación actual de la mecánica cuántica”)⁷⁸.

⁷⁶ Carta de Schrödinger a Einstein (19 agosto 1935), cit. en J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, p. 743. (La traducción es nuestra). A. Fine señala que tal vez el ejemplo del gato, pensado inicialmente para ilustrar el problema de la medida, fuera aplicado por Schrödinger también a la cuestión de la incompletitud de la teoría sólo a raíz de la lectura del ejemplo de la pólvora de Einstein. (cf. A. FINE, op. cit., pp. 82-84).

⁷⁷ Cf. J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, p. 743. Albert Einstein fue en esto favorable a la interpretación estadística de M. Born de la función de onda. Esta no se aplica a un sistema individual, por ejemplo a una partícula simple, sino que es una función estadística, que se aplica de modo correcto a un conjunto de sistemas, dando una distribución de probabilidad de los distintos valores. Esto no quiere decir que la realidad en sí sea estadística (es conocida la réplica de Einstein a Born el 4 de diciembre de 1926: “Dios no juega a los dados”; ref. en J. MEHRA y H. RECHENBERG, *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 6/1, New York 2001, p. 53s.) Según la postura de Einstein, lo que sucede es que la descripción dada por la función de onda no constituye una caracterización completa de la realidad (en esto se distancia de Born). Cf. C. SOLÍS y M. SELLÉS, *Historia de la ciencia*, Madrid 2005, p. 1027.

⁷⁸ Cf. Ibid. Cf. E. SCHRÖDINGER, “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Naturwissenschaften* 23 (1935), pp. 807-812; 823-828; 844-849. Traducción inglesa de J. D. Trimmer (1980), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 152-167.

En agosto de 1935, Schrödinger redactó otro ensayo (“Discussion of Probability Relations between Separated Systems”), que puede ser considerado la antítesis de la respuesta de Bohr al artículo EPR. En él se ignora la epistemología de la complementariedad y se generaliza el resultado obtenido en EPR. El entrelazamiento de las funciones de onda de dos sistemas que han interactuado previamente es visto como el “rasgo característico” de la mecánica cuántica. Ambos sistemas no pueden ser ya descritos separadamente. El “desenredo” (*disentanglement*) requiere una medida para restablecer la función ψ de uno de los sistemas. El hecho de que la descripción del estado de un sistema dependa de los “programas de observación” aplicados a otro alejado resulta “bastante incómodo”, y es indicativo de una seria deficiencia en la mecánica cuántica (Cf. E. SCHRÖDINGER, “Discussion of Probability Relations between

3.2. La interpretación de las relaciones de indeterminación. *¿Son realmente borrosas las variables?*

Schrödinger comienza su artículo reflexionando acerca de la física de modelos. En física clásica, un modelo matemático se cree que refleja adecuadamente la realidad si en muchos experimentos diversos el objeto natural se comporta como el modelo⁷⁹. En la mecánica cuántica, sin embargo, se dan algunas particularidades. Aunque continúan usándose los mismos conceptos clásicos (tales como posición, velocidad, aceleración, energía), sucede que sólo pueden asignarse valores numéricos definidos a una mitad de un conjunto completo de variables (por las relaciones de indeterminación de Heisenberg). En segundo lugar, sucede que sólo disponemos en las predicciones de una distribución estadística (de probabilidades): no es posible predecir con certeza qué valor de entre las posibles soluciones tomará el sistema. Escribe Schrödinger: “¿No adquiere uno la impresión de que aquí se trata con propiedades fundamentales de *nuevas* clases de características, que conservan sólo el nombre en común con las clásicas?”⁸⁰.

Schrödinger se detiene particularmente en la interpretación de la “relación de incertidumbre” de Heisenberg⁸¹. En mecánica cuántica, como hemos dicho, sólo la mitad de las variables pueden ser determinadas con precisión. ¿Qué sucede con las otras? “¿No tienen realidad, quizás (perdón por la expresión) una realidad borrosa; o son todas ellas

Separated Systems”, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31 (1935), pp. 555s.; M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 212; W. MOORE, op. cit., p. 311).

⁷⁹ Cf. E. SCHRÖDINGER, “The Present Situation in Quantum Mechanics” (traducción de J. D. Trimmer), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 152.

⁸⁰ Cf. Ibid., pp. 153-155.

⁸¹ El texto utiliza aquí el término inglés “*uncertainty*” (incertidumbre), aunque más adelante se refiere también al término “*indeterminacy*” (indeterminación). Aunque dichos términos se utilizan en ocasiones indistintamente, el término *incertidumbre* se referiría más correctamente a un límite en nuestro conocimiento (el caso de un valor definido pero no cognoscible con precisión; esta fue la primera interpretación de Heisenberg de las relaciones), mientras que el término *indeterminación* podría señalar también una indefinición constitutiva en la materia (que dichas variables no tienen un valor definido; es la interpretación de Bohr). Nosotros preferimos utilizar en todos los casos el término “indeterminación”, que traduce mejor el término original utilizado por Heisenberg (“*Unbestimmtheit*”).

siempre reales y sucede meramente (...) [por la relación de Heisenberg] que su *conocimiento* simultáneo está descartado?” La segunda interpretación es la propia de los defensores del punto de vista estadístico. Según esta línea de pensamiento, para describir un cuerpo no basta con dar un estado del modelo, sino, de acuerdo con los procedimientos de la mecánica estadística, un *conjunto de Gibbs* (conjunto imaginario de estados distintos para un mismo sistema, cuya distribución estadística refleja nuestro limitado conocimiento del cuerpo real). Se considera que el cuerpo se comporta como hallándose en un estado elegido arbitrariamente dentro del conjunto. Sin embargo, esta interpretación no casa con parte de las afirmaciones de la mecánica cuántica⁸². ¿Qué sucede entonces? “¿Son las variables realmente *borrosas*?”⁸³

Esta borrosidad parece funcionar bien, a primera vista, en el nivel subatómico. Por ejemplo, en el caso del estado de un núcleo radiactivo: la borrosidad es tal que no se puede establecer ni el instante de desintegración ni la dirección en que las partículas α son emitidas⁸⁴. La partícula emitida es descrita como una onda esférica que emana continuamente en todas las direcciones desde el núcleo y choca continuamente en una pantalla luminiscente situada alrededor. Sin embargo, la pantalla no muestra una superficie de brillo más o menos uniforme, como cabría esperar de una onda, sino que más

⁸² Un ejemplo citado por Schrödinger para mostrar cómo la interpretación estadística no resuelve todos los problemas. Supongamos un punto M situado con varias posiciones y momentos referidos al punto O, y que todas estas posibilidades se combinan en un conjunto ideal. Los valores permitidos para el momento angular son los valores de la serie $\hbar(2)^{1/2}$, $\hbar(2\cdot3)^{1/2}$, $\hbar(3\cdot4)^{1/2}$, etc. (donde $\hbar = h/2\pi$, siendo h la constante de Planck). Sucede que, si en vez de O, tomamos otro punto O' como sistema de referencia, los valores para el momento angular devienen valores inaceptables. En realidad, la opinión de Schrödinger es la de que nos encontramos ante un nuevo orden de características, para las cuales no sirven simplemente las herramientas estadísticas clásicas (cf. Ibid., pp. 154. 156).

⁸³ Cf. Ibid., pp. 155s. Cuando hablamos a este nivel de “borrosidad” (o “valor débil”) de las variables, nos referimos a una indeterminación ontológica de las mismas: que las variables no se encuentran, en sí mismas, en un estado o valor definido. Esto es diferente del caso en el cual tuviéramos un conocimiento incierto, pero de variables en sí mismas bien definidas.

⁸⁴ Las partículas α son núcleos de helio emitidos en la desintegración de átomos radiactivos.

bien se ilumina en puntos concretos a determinados instantes, en aparente contraste con la borrosidad señalada⁸⁵.

Uno puede establecer “casos bastante ridículos”, como el conocido por *paradoja del gato*, que muestran el absurdo de la interpretación borrosa. Merece la pena citar el párrafo completo, que ha hecho historia:

“Un gato es encerrado en una cámara de acero, junto con el siguiente dispositivo diabólico (que debe estar protegido de la injerencia directa del gato): en un contador Geiger hay una minúscula cantidad de sustancia radiactiva, tan pequeña que *quizás* en el curso de una hora uno de los átomos se desintegre pero también, con igual probabilidad, quizás ninguno; si esto sucede, el tubo del contador se descarga y, a través de un mecanismo, libera un martillo que quiebra un pequeño frasco de ácido cianhídrico. Si se ha dejado el sistema evolucionar durante una hora, se diría que el gato todavía vive *si* entretanto ningún átomo se ha desintegrado. La primera desintegración atómica lo habría envenenado. La función ψ del sistema completo expresaría esto teniendo en ella el gato vivo y el muerto (perdón por la expresión) mezclados o difuminados a partes iguales”⁸⁶.

Schrödinger propone este ejemplo como caso en el cual la indeterminación de dominio atómico se transforma en una indeterminación macroscópica. Antes de abrir la caja, la función de onda recogería una superposición de estados $\frac{1}{2}$ |“gato vivo” \rangle + $\frac{1}{2}$ |“gato muerto” \rangle . Según la interpretación que considera las variables como borrosas (es decir, indeterminadas en sí mismas), el gato estaría dentro de la caja simultáneamente

⁸⁵ Cf. Ibid., pp. 156s. Aparece aquí el carácter dual onda-corpúsculo de la materia. Las características ondulatorias casan bien con una noción borrosa de las partículas, pero esta noción no hace justicia a los aspectos corpusculares observados.

⁸⁶ Ibid., p. 157. (El subrayado es de Schrödinger; la traducción es nuestra).

vivo y muerto, lo cual es absurdo según el sentido común, y podría “ser resuelto mediante observación directa” (abriendo la caja).

Por medio de esta paradoja, Schrödinger desea prevenirnos de aceptar ingenuamente como válido un modelo borroso para representar la realidad. El ejemplo “en sí mismo no incorporaría nada oscuro o contradictorio. Hay una diferencia –señala Schrödinger con un esclarecedor ejemplo- entre una fotografía movida o desenfocada y una instantánea de nubes y bancos de niebla”⁸⁷. Debemos rechazar la interpretación borrosa, para aceptar que es nuestra (provisional) descripción la que se encuentra en realidad desenfocada.

Ante este duro dilema (no valen ni la interpretación estadística ni la borrosa), la doctrina ortodoxa recurre a la epistemología, abandonando el realismo y decantándose por una posición fenomenista. Expliquemos esto nosotros con el ejemplo del gato. En realidad, según se derivaría de la interpretación de Copenhague más radical, el animal no estaría ni vivo ni muerto hasta que un observador consciente abriera la caja y realizara la observación. Es el proceso de medida el que forzaría a la realidad a decidirse (en un sentido o en otro)⁸⁸.

Escribe Schrödinger: “Realmente –dicen- intrínsecamente sólo hay conciencia, observación, medida”. La cuestión del estado real queda sin significado. Pero incluso en este caso (que sólo contase la medida), nos veríamos forzados a admitir que “las medidas son en principio posibles” y que “cada variable singular debe ser medible hasta

⁸⁷ Cf. Ibid.

⁸⁸ Aclaremos que hablamos aquí en términos paradójicos (ideales). En la interpretación de Bohr, por supuesto, no tendría sentido hablar de superposición en el caso de objetos macroscópicos. En cuanto al papel de la conciencia, adelantamos ya que será E. Wigner (veremos en el siguiente capítulo) quien insistirá en el papel de la conciencia del observador para que se efectúe el colapso. El propio gato –pongamos por caso- no serviría para hacer el papel de observador, aunque sí un científico situado dentro de la caja.

una exactitud arbitraria”. Según Schrödinger, pues, debemos aceptar en todo caso la nitidez (“valor fuerte”) de las variables⁸⁹.

3.3. La interpretación de la función de ondas. El problema de la medida

Continuando con la exposición de la doctrina ortodoxa, Schrödinger se detiene en la función de onda ψ . El “punto más interesante de toda la teoría” es el *cambio abrupto* que se produce en la evolución causal del sistema en el tiempo (gobernada por una ecuación diferencial de primer orden respecto de la variable temporal, cuya solución es $\partial\psi/\partial t$) cuando se realiza una medida. Es por esta ruptura discontinua (el llamado “colapso”) por lo que no se puede tomar la función ψ directamente como modelo del objeto físico⁹⁰.

Desde el punto de vista clásico, el modelo dado por la función ψ distaría de ser completo, dado que comprende sólo el cincuenta por ciento de una descripción total (por razón de las relaciones de indeterminación). Pero desde el nuevo punto de vista debe serlo, por las razones señaladas anteriormente (el carácter borroso adjudicado a las variables; véase el apartado anterior). Schrödinger señala dos teoremas que juntos expresan el hecho de que la función ψ aportase una completa descripción de estado:

- 1) “Si hay diferentes funciones ψ en discusión, el sistema se encuentra en diferentes estados”.
- 2) “Para la misma función ψ , el sistema está en el mismo estado”⁹¹.

⁸⁹ Cf. Ibid.

⁹⁰ Cf. Ibid., p. 158. La razón de no tomar la función de ondas como modelo no viene del rechazo de posibles cambios abruptos en los procesos físicos, sino del carácter peculiar que esta visión otorga al acto de la medición. Esta debería ser un proceso natural como cualquier otro, gobernado por las mismas leyes, y no provocar una interrupción del orden natural de los sucesos (cf. Ibid.)

⁹¹ Cf. Ibid., p. 159. El segundo teorema expresa una condición suficiente para que el sistema se encuentre en el mismo estado. Refleja el hecho de la completitud (maximalidad) de la descripción. El primero expresa la condición necesaria, aunque escrita en modo inverso. (En modo directo, diría: “Si el sistema se

Ambos teoremas son válidos según casi todos los autores. Sin embargo, como hemos explicado, sucede que toda medida suspende la ley causal: la situación entonces ya no está gobernada por la ecuación de onda, sino por el resultado (no predeterminado) de la medición. Por ello, la descripción de estado dada por ψ ya no puede servir, como en el caso de los modelos clásicos, de “representación experimentalmente verificable de la realidad objetiva”⁹².

El cambio discontinuo que sucede en el momento de la medida incluiría en principio (debido a la maximalidad de ψ ; teorema segundo anterior) una pérdida de conocimiento. Pero esta pérdida no se produce, luego lo que debe ocurrir es que el objeto cambia “en una forma imprevista y diferente”. ¿Cómo sucede esto? Es el punto “más difícil y más interesante” de la teoría. Para estudiarlo debemos tratar de comprender objetivamente la interacción entre objeto e instrumento de medida. ¿No se trata de una interacción física entre dos objetos naturales? Entonces, ¿cómo explicar el hecho de que esta interacción – en apariencia- no esté gobernada por las mismas leyes (leyes de la mecánica cuántica)? Schrödinger trata de explicar el carácter peculiar de la medida por medio del concepto de “entrelazamiento” (*entanglement*)⁹³.

3.4. La cuestión del entrelazamiento de sistemas

En mecánica cuántica, el conocimiento total (por medio de la función de onda) de dos cuerpos separados permite conocer obviamente el sistema formado por la unión de ambos. Sin embargo (y esto es lo peculiar), la afirmación inversa no es cierta: “el conocimiento máximo de un sistema total no incluye necesariamente el total conoci-

encuentra en el mismo estado, entonces la función ψ es la misma”). Es un teorema de unicidad de la función de onda.

⁹² Cf. Ibid., pp. 159s. La función ψ no describe el proceso de la medición, el cual –insiste Schrödinger- ha de ser un proceso natural como los demás, no una interrupción del curso natural de los eventos (cf. Ibid., p. 160).

⁹³ Cf. Ibid., p. 160.

miento de todas sus partes”. No siempre se puede obtener la función ψ de un subsistema a partir de la función ψ del sistema total⁹⁴.

Tomando en términos generales la situación de la paradoja EPR, escribe Schrödinger:

“Si dos cuerpos separados, cada uno conocido en sí mismo maximalmente, entran en una situación en la cual se influyen mutuamente, y se separan de nuevo, entonces ocurre normalmente lo que acabo de llamar *entrelazamiento (entanglement)* de nuestro conocimiento de los dos cuerpos. El catálogo de expectativas combinado consiste inicialmente en una suma lógica de los catálogos individuales; durante el proceso se desarrolla causalmente de acuerdo con una ley conocida (...) El conocimiento permanece máximo pero, al final, si los dos cuerpos se separan, este no se divide de nuevo en una suma lógica de conocimientos de los cuerpos individuales”⁹⁵.

Esta peculiaridad es para Schrödinger la dificultad central, y constituye la más clara limitación de la función de ondas de cara a proporcionar una descripción completa de la realidad⁹⁶. Schrödinger aplica este caso general al problema de la medida. En una medición se produce una combinación de sistemas (objeto medido e instrumento de medida), de modo que a partir de ella los catálogos de expectativas ya no son

⁹⁴ Cf. Ibid., pp. 160s. Esta afirmación no niega la maximalidad (de información) de ψ . Lo que sucede en ocasiones no es que la función ψ no exprese el estado del subsistema, sino que no disponemos tal función, ya que el subsistema en realidad no se encuentra en un estado definido (cf. Ibid.)

⁹⁵ Ibid., p. 161. (La traducción es nuestra).

⁹⁶ La misma idea aparece en el otro artículo citado del mismo año: “Cuando dos sistemas, de los cuales conocemos los estados por sus respectivas representaciones [funciones ψ], entran en una interacción física temporal debida a fuerzas conocidas entre ambos, y cuando después de un tiempo de mutua influencia los sistemas se separan de nuevo, a partir de entonces no pueden ser ya descritos del mismo modo que antes (...) Llamaría a esto no *un*, sino *el* rasgo característico de la mecánica cuántica, el que impone su salida total de las líneas clásicas de pensamiento”. (E. SCHRÖDINGER, “Discussion of Probability...”, art. cit., p. 555). Y, más adelante: “Otro modo de expresar la situación peculiar es: el mejor conocimiento posible de una *totalidad* no incluye necesariamente el mejor conocimiento posible de todas sus *partes*, aunque ellas puedan ser separadas totalmente y, por consiguiente, virtualmente capaces de ser «conocidas lo mejor posible»” (Ibid.) (La traducción es nuestra; el subrayado es de Schrödinger).

independientes. La medida no es sólo un acto mental, sin influencia en el objeto medido; se produce algo de importancia: la influencia entre los dos cuerpos⁹⁷.

Volviendo al caso general de entrelazamiento (sin considerar ahora el caso especial de la medida), Schrödinger considera el caso sucedido en la paradoja EPR, para la cual da ahora un ejemplo concreto. Supongamos dos sistemas con un solo grado de libertad, de coordenadas (respectivamente) q y Q y momentos lineales p y P . Supongamos que se produce en un instante un entrelazamiento que reflejamos con las ecuaciones $q = Q$ y $p = -P$ (caso de un choque). Una medida de q ó p (ó Q ó P) resuelve el entrelazamiento y hace que ambos sistemas sean maximalmente conocidos (bien conociendo q y Q , bien conociendo p y P). Ahora supongamos que mido $q = 4$ y $P = 7$. En tal caso, podría deducir: $q = 4$, $p = -7$; $Q = 4$, $P = 7$. ¿Sería una predicción correcta? (habida cuenta de que es hipermáxima). No hay duda de ello, dado que cada medida sería para su sistema la primera. Y “las medidas en sistemas separados no pueden influir directamente una sobre otra –esto sería mágico–” (escribe Schrödinger, en concordancia con las afirmaciones de Einstein)⁹⁸. Entonces, ¿cómo explicar la aparente violación de las relaciones de indeterminación?

Schrödinger cita todavía otra aparente contradicción. En el caso de poder obtener los valores q y p para la posición y el momento de un sistema (un valor obtenido por

⁹⁷ Cf. *Ibid.*, p. 162. En la mecánica clásica, la influencia del acto de medir sobre el objeto medido se suponía despreciable, al poder reducirse tanto cuanto se quisiera (aumentando la sensibilidad de los instrumentos). En mecánica cuántica, dicha influencia no puede ser ya descuidada. Recordemos el ejemplo citado por Heisenberg: Al iluminar una partícula con un fotón para conocer su posición, la incidencia del fotón produciría un fotoefecto que alteraría el momento de la partícula. (En realidad, la influencia no se reduce a este tipo corpuscular de “choques”; los problemas en términos ondulatorios de superposición de estados hacen todavía más compleja la cuestión. Instrumento de medición y partícula medida pasan a interdepender el uno del otro).

⁹⁸ Cf. *Ibid.*, pp. 162-164. Schrödinger coincidía con las ideas básicas subyacentes en el artículo EPR. Sin embargo, no se quedó en las conclusiones epistemológicas de estos autores, sino que mostró que la situación conceptual era más compleja. Para Schrödinger, de hecho, no se trataba sólo de una cuestión de incompletitud de la teoría, sino que era una manifestación de una dificultad en sus mismos cimientos (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 221).

medida directa; el otro por medida indirecta, midiendo el sistema entrelazado separado), uno se puede convencer de que la expresión $(p^2 + a^2 q^2) / a\hbar$ (donde $\hbar = h/2\pi$, siendo h la constante de Planck, y a un número positivo arbitrario constante cualquiera) no es un número entero impar, como debería ser de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica⁹⁹. Esta “antinomía”, al igual que la anterior, es una muestra del gran “dilema” que se nos muestra al tratar de explicar la relación entre dos sistemas que han interactuado en el pasado¹⁰⁰. Dilema que resulta central en la comprensión la mecánica cuántica, dado que el problema de la medida puede reducirse al problema del salto que se produce en el entrelazamiento entre objeto e instrumento de medición. Escribe Schrödinger:

“La notable teoría de la medida, el aparente salto de la función ψ y finalmente las «antinomias de entrelazamiento», *todo deriva de la manera simple en que los métodos de cálculo de la mecánica cuántica permiten que dos sistemas separados sean conceptualmente combinados juntos en uno solo (...)* Tan pronto como los sistemas comienzan a influirse mutuamente, la función combinada deja de ser un producto y, por otra parte, no se divide de nuevo, después de que han sido nuevamente separados, en factores que puedan ser asignados individualmente a los sistemas (...) Esta es la razón de que el conocimiento de los sistemas individuales pueda disminuir al mínimo, incluso a cero, mientras el del sistema combinado permanece continuamente máximo. *El mejor conocimiento posible de una totalidad no incluye el mejor posible conocimiento de sus partes – y esto es lo que continúa atormentándonos*”¹⁰¹.

⁹⁹ Según las reglas generales de la mecánica cuántica, la suma de cuadrados $p^2 + q^2$ ha de tomar uno de los valores de la serie $\hbar, 3\hbar, 5\hbar, 7\hbar...$ Igualmente, se puede demostrar que, dado cualquier número real positivo a , la cantidad $p^2 + a^2 q^2$ debe tomar uno de los valores de la serie $a\hbar, 3a\hbar, 5a\hbar, 7a\hbar...$ Esto no sucede en el caso propuesto para *cualquier* valor de a (cf. Ibid., pp. 164s.)

¹⁰⁰ Cf. Ibid. Se trata de un caso –el de los sistemas entrelazados– que no somos todavía capaces de explicar. Sus características reflejan una laguna en nuestro conocimiento sobre la interrelación de las variables en el interior de un sistema, en el estado actual de la mecánica cuántica. La teoría cuántica es vista, por consiguiente, como algo inacabado, necesitado de pasos más allá de la visión actual.

¹⁰¹ Ibid., p. 167. (El subrayado y la traducción son nuestros).

Las dificultades son prácticamente las mismas en el caso del campo electromagnético. Las leyes cuánticas (todavía no relativistas) no constituyen tampoco una teoría intachable del electromagnetismo. Quizás esto sea, después de todo, porque el simple procedimiento provisto por la teoría no relativista sólo sea “un conveniente artificio de cálculo”. Se comparte con Einstein-Podolsky-Rosen la intuición de que la mecánica cuántica no es todavía algo definitivo, una teoría acabada. Con todo, el cambio en la comprensión de los procesos microscópicos iniciado por la teoría cuántica es irreversible. Schrödinger concluye reconociendo que este “artificio” (útil pero no totalmente exento de paradojas) ha alcanzado “una influencia de alcance sin precedentes sobre nuestra actitud básica hacia la naturaleza”¹⁰².

3.5. Conclusión. Los problemas principales en la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica

El artículo de Schrödinger supuso una importante reflexión sobre el estado de la mecánica cuántica en 1935 y las principales cuestiones discutibles en la interpretación ortodoxa de esta teoría, que podríamos recapitular del siguiente modo:

- La interpretación de las relaciones de indeterminación: ¿Es realmente el modelo de variables “borrosas” un modelo adecuado para representar la realidad?
- La interpretación de la función de ondas: ¿Aporta ψ una completa descripción del estado cuántico?
- El problema del “salto” en el momento de la medida: ¿Cómo sucede el cambio abrupto que se produce en la evolución causal del sistema en el momento de la medición?

¹⁰² Cf. Ibid.

- El problema del entrelazamiento de sistemas: ¿Cómo es posible que el conocimiento de un sistema no incluya necesariamente el conocimiento de sus partes?¹⁰³ ¿Cómo explicar las antinomias que se producen? (el caso EPR)

En realidad, estas cuestiones pueden reducirse a dos problemas principales: *el problema del realismo* (si la descripción dada por la función de onda constituye un modelo adecuado y completo de representación de la realidad física) y *el problema de la medida* (relacionado con las cuestiones de interacción entre sistemas y la paradoja EPR).

Ambos problemas aparecen reflejados en el ejemplo del gato, ejemplo que ha sido considerado una especie de símbolo de la crítica de Schrödinger a la interpretación de Bohr, y que ha resultado ser (por su carácter a la vez intuitivo y paradójico) lo más divulgado del pensamiento de nuestro autor al respecto. En efecto, la paradoja del gato constituye, en primer lugar, un claro cuestionamiento del realismo de la descripción cuántica. Siguiendo la interpretación de Copenhague de la indeterminación a nivel atómico, de carácter borroso, se llegaría a una situación absurda en un nivel macroscópico. Esto es señal, según Schrödinger, de que el modelo cuántico no constituye una representación adecuada de la (borrosa) realidad, sino más bien una “borrosa representación” (a la manera de una fotografía desenfocada) de la realidad física (de variables “nítidas”) y, por tanto, una teoría todavía no definitiva. En segundo lugar, el ejemplo del gato puede ser tomado también (yendo más allá del tenor literal del artículo de Schrödinger) como representación del carácter paradójico de la teoría ortodoxa de la medida. El gato encerrado en la cámara estaría simultáneamente vivo y muerto mientras no se realizase ninguna medida sobre él. En el momento de abrir la caja para comprobar el

¹⁰³ Como hemos visto en el apartado anterior, este problema es para Schrödinger el problema central, dado que incluye el problema de la medida (como caso particular de entrelazamiento) y constituye la mayor limitación de la función de ondas de cara a ofrecer una descripción completa de la realidad.

estado del gato, se produciría el colapso que “decidiría fatalmente” (en fortuna o desventura) la vida o muerte del felino.

En el siguiente apartado, estudiaremos el debate posterior acerca de estos dos problemas fundamentales. En el tema del realismo, nos deberemos detener en la reflexión acerca de la posibilidad de una extensión completa de la mecánica cuántica, por medio de variables ocultas (trabajos de Bohm y Bell). En cuanto al problema de la medida, deberemos analizar la contribución de Wigner, junto con otras propuestas más recientes (GRW, Penrose y los estudios sobre la decoherencia cuántica).

Respecto de la situación en los años inmediatamente posteriores a los artículos de Einstein y Schrödinger, simplemente señalaremos que, a pesar de la oposición de tan renombrados autores, la gran mayoría de los físicos aceptaron la interpretación de la complementariedad de Bohr sin reservas, al menos durante las dos primeras décadas, movidos por una actitud pragmática (habida cuenta de los numerosos éxitos de la teoría en diversos campos de la microfísica)¹⁰⁴. En cuanto a Schrödinger, su negación a aceptar el principio de complementariedad de Bohr fue vista (injustamente) por sus oponentes como una postura reaccionaria, “atrapada” en los modos de pensar realistas y deterministas de la física clásica¹⁰⁵. En 1953, M. Born escribió: “Doy la bienvenida al ataque de Schrödinger contra la complacencia de muchos físicos que aceptan la interpretación actual porque funciona, sin preocuparse sobre la solidez de sus fundamentos. Pero no

¹⁰⁴ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 247.

¹⁰⁵ Cf. M. BELLER, “«Against the stream»- Schrödinger’s Interpretation of Quantum Mechanics”, *Studies in History and Philosophy of Science*, 28/3 (1997), p. 421. Sobre las críticas de reaccionario (especialmente de Pauli), puede verse U. RÖSEBERG, “Erwin Schrödinger’s Position in the Einstein-Bohr Debate”, en J. GÖTSCHL (ed.), *Erwin Schrödinger’s World View*, Dordrecht 1992, pp. 148-150. Lo que más oposición suscitó fue su negación de los saltos cuánticos y la complementariedad onda-partícula (Schrödinger rechazaba la individualidad de las partículas elementales), en favor de la naturaleza ondulatoria de la materia (cf. E. SCHRÖDINGER, “Are there Quantum Jumps?” [2 partes], *The British Journal for the Philosophy of Science* 3/10 [1952], pp. 109-123; 3/11 [1952], pp. 233-242; J. NAVARRO FAUS, *Schrödinger: Una ecuación y un gato*, Madrid 2009, pp. 164-167).

pienso que Schrödinger haya hecho una contribución positiva a los problemas filosóficos”¹⁰⁶. En octubre de 1960, un par de meses antes de su muerte, Schrödinger escribió a su amigo Born, convencido del carácter provisional de la interpretación ortodoxa: “La impudicia con que afirmas una y otra vez que la interpretación de Copenhague es prácticamente aceptada universalmente (...) está en el límite de lo estimable (...) ¿No te preocupa el veredicto de la historia? ¿Estás convencido de que la raza humana sucumbirá mucho antes que tu propia locura?”¹⁰⁷.

¹⁰⁶ M. BORN, “The Interpretation of Quantum Mechanics”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 14 (1953), p. 105. M. Born era favorable a una interpretación estadística del formalismo cuántico.

¹⁰⁷ Cit. en J. NAVARRO FAUS, op. cit., p. 168. Schrödinger era de la opinión de que los saltos cuánticos interesarían en el futuro únicamente a los historiadores, como sucedió en astronomía con la ingeniosa teoría de los epiciclos (cf. E. SCHRÖDINGER, “Are there...?”, art. cit., p. 112).

4. LOS PROBLEMAS DE INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: EL DEBATE POSTERIOR

Las dificultades de interpretación señaladas en el artículo de 1935 fueron objeto de reflexión en las décadas posteriores, en de un debate que ha llegado hasta nuestros días. Una de las cuestiones principales (referida al problema del realismo de la mecánica cuántica) era la pregunta acerca del carácter completo de la descripción dada por la función de ondas. Si la interpretación de Copenhague afirmaba el carácter completo de esta descripción dada la naturaleza (supuestamente) indeterminada de las variables, esta comprensión se había hecho más problemática desde el descubrimiento teórico de las antinomias del entrelazamiento (paradoja EPR).

Los trabajos en busca de una “ampliación” determinista de la mecánica cuántica que recogiese una causa para los valores efectivamente observados en la medición vinieron de mano de las llamadas “teorías de variables ocultas”¹⁰⁸. El valor efectivamente obtenido en la medición (o deducido a partir de una medición en un sistema correlacionado alejado) podría venir determinado por ciertos parámetros internos del sistema, todavía no descubiertos (“ocultos” a nuestra vista). Se trata de una idea ya apuntada en la conclusión del artículo EPR: la idea de la posibilidad de una extensión de la mecánica cuántica que ofreciese una descripción completa de la realidad física (evitando las aparentes acciones a distancia). El mayor defensor de este tipo de teorías ha sido David Bohm, a partir de la década de los cincuenta. Los trabajos de Bell, en la década de los

¹⁰⁸ Recordemos que, mientras que el formalismo dado por la función de ondas incluía la existencia de superposiciones, las observaciones siempre ofrecían un único valor para cada una de las variables. La función de onda sólo permitía calcular la probabilidad de obtener un valor dado de entre varios posibles, no predecir dicho valor con total seguridad, dado que este se generaba de modo aleatorio, indeterminado. La mecánica cuántica había perdido, por tanto, el determinismo propio de la mecánica clásica. Las teorías de las variables ocultas trataron de recuperar este carácter determinista.

sesenta, demostrarán que, en realidad, tales teorías de parámetros ocultos no son compatibles con el principio de separabilidad defendido por Einstein. A estas cuestiones dedicaremos el primer apartado de este capítulo.

Estas cuestiones se hallan íntimamente relacionadas con la dificultad de explicar el fenómeno del colapso (el llamado “problema de la medida”, al cual dedicaremos el segundo apartado). E. Wigner, en continuidad con las ideas de Von Neumann, propuso una explicación subjetiva del colapso: la reducción de la superposición de la función de ondas viene provocada por la conciencia del observador. La propuesta de otros autores ha sido la de atribuir el colapso a procesos espontáneos, ya aleatorios (teoría GRW), ya inducidos gravitatoriamente (R. Penrose). La radical negación del colapso (otra de las posibilidades) llevó a H. Everett a una propuesta que se ha hecho famosa, aunque ontológicamente resulte cuando menos extraña: una teoría que admite, para cada observación, varios mundos paralelos, en cada uno de los cuales la variable toma uno de los posibles valores. (El resultado final es una práctica infinidad de mundos simultáneos).

En la década de los 80, algunos investigadores, estudiando los fenómenos de correlación cuántica, sugirieron que la interacción con el ambiente circundante podía ofrecer un mecanismo físico que explicase por qué no solemos ver las superposiciones cuánticas en el mundo que nos rodea sin necesidad de recurrir al colapso de la función de ondas. Nos referimos a las teorías sobre la decoherencia cuántica, a las que dedicaremos el último apartado. Como veremos, las teorías sobre la decoherencia admiten que, en ciertas condiciones, las superposiciones macroscópicas son de hecho posibles. Algunos experimentos recientes de construcción de “gatos de Schrödinger” en el laboratorio parecen haber generado tales estados superpuestos macroscópicos, ofreciendo una interesante aportación al debate que nos ocupa.

4.1. Las teorías de variables ocultas

El éxito de la mecánica cuántica en explicar diversos fenómenos del mundo micro-físico hizo que la teoría se viera, en general, como *correcta*. Sin embargo, las dificultades de interpretación y las paradojas aparecidas hicieron que surgiera la idea de la posibilidad de un *refinamiento* de la misma. La correlación entre los dos resultados de medida obtenidos en lugares distantes en la paradoja EPR sugería que esos resultados podían estar determinados por adelantado por ciertas variables dinámicas que, aunque *ocultas* a nuestra vista, constituyeran el vínculo de causalidad del que la teoría cuántica carecía. Las hipotéticas cantidades recibieron el nombre de “parámetros ocultos” o “variables ocultas”¹⁰⁹. Algunos físicos se dedicaron a proponer teorías con tales parámetros, animados principalmente por las siguientes motivaciones:

- El deseo de encontrar una descripción homogénea del mundo, sin fronteras entre el mundo clásico y el mundo microfísico (*principio de totalidad*).
- La posibilidad de explicar el carácter probabilístico de las predicciones cuánticas. Si las aparentes fluctuaciones aleatorias vinieran en realidad determinadas por tales variables, la teoría cuántica ordinaria quedaría como una teoría estadística de valores medios (*principio determinista*).
- La explicación de las aparentes “acciones fantasma” a distancia, como en el caso de la paradoja EPR (*principio de localidad*)¹¹⁰.

En la obra citada de von Neumann de 1932, el matemático húngaro había probado la imposibilidad de ampliar causalmente el formalismo cuántico por medio de variables

¹⁰⁹ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., pp. 253-255.

¹¹⁰ Cf. J. S. BELL, “Introducción a la cuestión de las variables ocultas” (1971), en *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Madrid 1990, pp. 61s. El autor considera la primera de ellas (la eventualidad de una descripción homogénea del mundo) la “motivación principal del estudio de la posibilidad de las llamadas <<variables ocultas>>” (Ibid.)

ocultas¹¹¹. En los años siguientes, algunos autores criticaron la prueba¹¹², pero sus ideas no fueron tomadas en serio hasta los trabajos de David Bohm, en la década de los cincuenta.

En el libro *Quantum Theory* (1951), D. Bohm había ofrecido una prueba, basada en la paradoja EPR, de que la teoría cuántica es inconsistente con las variables ocultas¹¹³. Sin embargo, inmediatamente, y estimulado por sus discusiones con Einstein, Bohm comenzó a estudiar la posibilidad de introducir tales variables en el formalismo¹¹⁴. En un artículo escrito en dos partes, y publicado en 1952, Bohm propuso una “interpretación alternativa consistente” en términos de variables ocultas¹¹⁵.

La nueva idea introducida por Bohm consiste en adscribir a cada partícula una posición precisa, aunque oculta al observador (las variables ocultas) y una fuerza cuántica que la hace moverse. Esta fuerza está descrita por el vector de estado y evoluciona según la ecuación de Schrödinger. La partícula se comporta entonces como un

¹¹¹ Cf. J. VON NEUMANN, *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* (1932), Madrid ²1991, caps. IV.1. y IV.2. Resumimos la idea general de la prueba. Esta consiste en demostrar que todo conjunto es dispersivo (el sentido físico de la “dispersión” es el de la desviación de una radiación en una región del espacio, en varias direcciones). La asunción de variables ocultas implica que ningún conjunto dispersivo es homogéneo (medida interna de uniformidad). En tal caso, por lo tanto, no podrían existir conjuntos homogéneos. Sin embargo, se puede demostrar que tales conjuntos existen. De ahí se sigue la refutación de la hipótesis de existencia de variables ocultas (Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 270). Escribe von Neumann: “Los resultados de la Mecánica cuántica que se encuentran fuera de duda no pueden obtenerse de nuevo en ningún caso acudiendo a tales parámetros. Es más, incluso está excluido que existan las mismas propiedades físicas con los mismos vínculos (...) cuando a la función de onda acompañan otros elementos determinantes («parámetros ocultos»)” (op. cit., p. 231).

¹¹² M. Jammer cita a G. Hermann, J. Ullmo y D. I. Blokhinzev (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., pp. 272-277).

¹¹³ “Concluimos entonces que ninguna teoría de variables ocultas mecánicamente determinadas puede conducir a *todos* los resultados de la teoría cuántica”, escribe, aunque dejando abierta la posibilidad de que en un experimento hipotético “pudiéramos violar el principio de incertidumbre”, en cuyo caso tal teoría de variables subyacentes estaría “fuertemente indicada” (Cf. D. BOHM, “The paradox of Einstein, Rosen and Podolsky” [originalmente en *Quantum Theory* (1951)], en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 368).

¹¹⁴ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 279.

¹¹⁵ Cf. D. BOHM, “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of «Hidden» Variables” (1952), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 369-396.

punto material que evoluciona guiado por el vector de estado (“onda piloto”). La ecuación de movimiento de una partícula de masa m queda¹¹⁶:

$$m (d^2\mathbf{x}/ dt^2) = -\text{grad} (V_{cl} + V_{qu}) + f (\mathbf{p} - \text{grad} S(\mathbf{x}))$$

El primer término expresa el producto de la masa por la aceleración, lo cual indica, según las leyes de Newton, que el segundo término será la fuerza que guía a la partícula. Esta consta de dos sumandos. El primero es (con signo negativo) el gradiente de la energía potencial (expresión de la fuerza); en este caso, esta es suma del potencial clásico y un potencial cuántico. El segundo sumando es el término añadido por Bohm, el cual depende de las variables ocultas. Este término $[f (\mathbf{p} - \text{grad} S(\mathbf{x}))]$ sería grande sólo en procesos referidos a distancias muy cortas (caso en el que $S(\mathbf{x})$ sería grande), es decir, en distancias de orden igual o inferior a 10^{-13} cm. En el límite clásico, la función $S(\mathbf{x})$ coincide con el momento $p = mv$, con lo que este término se anula¹¹⁷.

El formalismo propuesto por Bohm, distinto formalmente al formalismo habitual, tiene la cualidad de concordar con él totalmente en los aspectos empíricos¹¹⁸. Tiene además la ventaja de proporcionar –sostiene Bohm– una “alternativa consistente a la habitual asunción de que no es posible una descripción de la realidad objetiva y definible con precisión en el nivel cuántico de exactitud”¹¹⁹. Escribe D. Bohm en la conclusión del artículo:

“La interpretación habitual de la teoría cuántica implica que debemos renunciar a la posibilidad de describir un sistema individual en términos de un único modelo

¹¹⁶ Escribimos en negrita las variables vectoriales. La idea de la onda piloto proviene de De Broglie. La novedad introducida por Bohm consistió en añadir en la ecuación un término dependiente de las variables ocultas.

¹¹⁷ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 281.

¹¹⁸ Cf. A. APARICIO JUAN, “La teoría cuántica y sus interpretaciones: un enfoque filosófico realista”, *Revista Laguna* 13 (2003), p. 60; J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, p. 1213; M. JAMMER, “The Philosophy...”, op. cit., p. 283.

¹¹⁹ Cf. D. BOHM, “A Suggested...”, art. cit., en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 391.

conceptual definido con precisión. Nosotros hemos propuesto, sin embargo, una interpretación alternativa que no implica tal renuncia, sino que nos conduce en lugar de ello a contemplar un sistema cuántico como una síntesis de una partícula definible con precisión y un campo- ψ definible con precisión que ejerce una fuerza sobre esta partícula”¹²⁰.

Las primeras reacciones al artículo de Bohm fueron, en general, bastante desfavorables. De Broglie, por ejemplo, vio en él un retorno de sus antiguas ideas, que ya había rechazado hacía tiempo. El trabajo de Bohm era “insostenible”, principalmente porque la función de ondas (una función en un espacio ficticio, sin realidad física) no podía ser tomada para regular el movimiento de la partícula¹²¹. Sin embargo, el trabajo de Bohm renovó el interés en la demostración de imposibilidad de von Neumann: aunque objetable en otros puntos, el trabajo de Bohm parecía ser lógicamente consistente y, por ello, contradecía tal prueba. Jauch y Piron (1963) reformularon la prueba de von Neumann (sus hipótesis eran demasiado estrictas) y concluyeron que la mecánica cuántica no podía ser interpretada en términos de variables ocultas¹²².

La solidez de la prueba de Jauch y Piron fue puesta pronto en cuestión por John S. Bell, quien en 1964 escribió un importante artículo, titulado “Sobre el problema de las variables ocultas en la mecánica cuántica” (publicado en 1966), en el cual construía una teoría consistente de variables ocultas para partículas con *spin* $-1/2$ sin movimiento de

¹²⁰ Ibid. En 1959, Aharonov y Bohm descubrieron que un electrón puede ser influido por potenciales incluso en regiones donde el campo no actúa (efecto que toma el nombre de ambos autores). Si se admite la localidad, los potenciales deben ser considerados físicamente efectivos, no sólo como auxiliares matemáticos de los campos –como ocurre en mecánica clásica– (cf. Y. AHARONOV y D. BOHM, “Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory”, *Physical Review (Second Series)* 115/3 [1959], pp. 485-491).

¹²¹ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit, p. 287.

¹²² Cf. Ibid., pp. 292. 299-302. En su prueba, Jauch y Piron utilizaron un nuevo cálculo, la llamada “lógica cuántica”. La prueba consiste también (como la prueba original de von Neumann) en la demostración de que no hay estados sin dispersión.

traslación¹²³. La prueba de von Neumann era formalmente válida, pero suponía que el principio de aditividad, válido para los estados cuánticos, era también válido para los hipotéticos estados sin dispersión, lo cual no está justificado (de hecho, podía darse un ejemplo en contra)¹²⁴. La prueba de Jauch y Piron caía en el mismo error, al considerar el principio de aditividad una necesidad lógica, cuando sólo es una propiedad muy particular de los estados cuánticos¹²⁵.

Mientras trabajaba en este artículo, Bell estaba preocupado en la paradoja EPR. En el mismo año 1964, probó lo que se conoce como el *teorema de Bell*: una teoría local de variables ocultas no puede reproducir todas las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica¹²⁶. J. S. Bell parte de la demostración de una desigualdad de probabilidades entre resultados de medida de espines de pares de partículas correlacionados, en una teoría de parámetros ocultos (por tanto, de resultados predeterminados) en la que se supone la localidad (que no se puede intervenir causalmente en un dispositivo suficientemente alejado). Como, sorprendentemente, las predicciones de la mecánica cuántica

¹²³ Cf. Ibid., pp. 302-304.

¹²⁴ Cf. J. S. BELL, "Sobre el problema de las variables ocultas en la mecánica cuántica" [1966], en *Lo decible y lo indecible...*, op. cit., pp. 29s. El principio de aditividad dice que "toda combinación lineal real de dos operadores hermíticos cualesquiera representa un observable y la misma combinación lineal de valores esperados es el valor esperado de la combinación" (Ibid.) Los estados sin dispersión son aquellos determinados mediante variables adicionales, de modo que unos valores dados de esas variables junto con el vector de estado determinan precisamente los resultados de las medidas individuales (cf. Ibid., p. 27). Bell construye un contraejemplo utilizando el sistema bidimensional citado (partículas de *spin* $-\frac{1}{2}$ sin movimiento traslacional) (cf. pp. 26-30).

¹²⁵ Cf. Ibid., p. 32.

¹²⁶ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 306. Por "teoría local de variables ocultas" entendemos una teoría de parámetros ocultos en la cual es válido el principio einsteniano de "localidad" (imposibilidad de acciones a distancia), entendido en la práctica como equivalente al principio de "separabilidad" (posibilidad de hablar *separadamente* de dos sistemas suficientemente alejados, al no ser posible la influencia instantánea entre ambos), en el sentido de EPR.

violan la desigualdad demostrada¹²⁷, se sigue que se debe rechazar dicha predeterminación separable. Escribe Bell:

“En una teoría en la que se añaden parámetros a la mecánica cuántica para determinar los resultados de medidas individuales, sin cambiar las predicciones estadísticas, debe existir un mecanismo por el que la colocación de un aparato de medida pueda influir en el resultado proporcionado por otro instrumento no importa lo remoto que se encuentre. Además, la señal involucrada ha de propagarse instantáneamente, de modo que tal teoría no podría ser invariante Lorentz”¹²⁸.

El razonamiento de Bell en 1964 era eminentemente teórico. Posteriormente, las desigualdades de Bell han sido puestas a prueba en gran número de experimentos¹²⁹. En

¹²⁷ Cf. A. CASTIEL, *La virtud de la desigualdad*, en S. DELIGEORGES (dir.), *El mundo cuántico*, Madrid 1990, pp. 111-113. Veamos un ejemplo de desigualdad de este tipo dado por el mismo Bell, unos años más adelante:

Sometemos pares correlacionados de partículas a imanes Stern-Gerlach a ciertos ángulos (v. nota 26). Trivialmente, la probabilidad de una partícula de “ser capaz de pasar con un ángulo de 0° y no serlo a 45°”, más la probabilidad “de ser capaz de pasar a 45° y no serlo a 90°”, es mayor o igual a la probabilidad “de ser capaz de pasar a 0° y no serlo a 90°” (porque una partícula capaz de pasar a 0° y no a 90° es, bien capaz de pasar a 45° -y entonces contribuye a la segunda probabilidad-, bien incapaz de pasar a 45° -y en tal caso contribuye a la primera probabilidad-). Sin embargo, pese a ser una desigualdad trivial, las probabilidades de la mecánica cuántica (en el caso correlacionado) no respetan esta desigualdad. La probabilidad cuántica de que una de las partículas atravesase un imán de orientación a y la otra un imán de orientación b es

$$\frac{1}{2} (\text{sen} [(a-b)/2])^2$$

En este caso, la desigualdad anterior quedaría:

$$\frac{1}{2} (\text{sen } 22,5^\circ)^2 + \frac{1}{2} (\text{sen } 22,5^\circ)^2 \geq \frac{1}{2} (\text{sen } 45^\circ)^2, \text{ es decir, } 0,1464 \geq 0,25 \text{ (que no es verdadero).}$$

En el razonamiento se descarta la intervención en uno de los lados como una influencia causal sobre el otro (postulado de localidad). Dado que se llega a un callejón sin salida, la negación de la localidad pasa a ser, al menos, plausible (cf. J. S. BELL, “Los calcetines de Bertlmann y la naturaleza de la realidad” [1981], en *Lo decible y lo indecible...*, op. cit., pp. 208-210).

¹²⁸ J. S. BELL, “Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen” (1964), en *Lo decible y lo indecible...*, op. cit., p. 49. El postulado de relatividad de Einstein afirma la invariancia de las leyes de la física en cualquier sistema de referencia (inercial en el caso de la relatividad especial; en la relatividad general se añaden los sistemas no inerciales). Para ello, se requiere que el cambio de sistema de referencia venga expresado por las transformaciones que Lorentz enunció para las ecuaciones del electromagnetismo (transformaciones de Lorentz). Este formalismo implica un límite superior de la velocidad de cualquier objeto en cualquier sistema de referencia: la velocidad de la luz. La transmisión de señales cumple también, en la mecánica relativista, este límite superior. No es posible, pues, la transmisión instantánea de señales (supondría una velocidad infinita).

¹²⁹ Destacamos aquí una importante novedad. Hasta entonces, la discusión en torno a las propuestas nacidas de la paradoja EPR (la construcción de una teoría de variables ocultas, para salvar la separabilidad) era eminentemente teórica. Las desigualdades de Bell van a permitir, ahora, realizar experimentos para decantarse por unas u otras propuestas teóricas (en este caso, quedarán definitivamente descartadas las teorías simultáneamente locales y de variables ocultas).

1972, Freedman y Clauser midieron la correlación en la polarización lineal de fotones emitidos en una cascada atómica de calcio. Los autores consideraron sus resultados “una fuerte evidencia contra las teorías locales de variables ocultas”¹³⁰. El experimento más importante (y de mayores garantías) fue el llevado a cabo por Aspect, Dalibard y Roger en 1982, y consistió en varias medidas de correlaciones de polarizaciones lineales en pares de fotones¹³¹. El resultado fue que las desigualdades de Bell no se cumplían en ese sistema (con parámetros suplementarios y supuesto de localidad)¹³². Quedaba definitivamente rechazada la posibilidad de una teoría local de variables ocultas y, con ello, la posibilidad de una extensión completa de la mecánica cuántica que diera cuenta (en un sentido determinista y local) de los curiosos fenómenos de las correlaciones, en el sentido sugerido al final del artículo EPR¹³³.

Parecería que estos resultados (desfavorables al realismo local de Einstein) deberían haber conducido al fortalecimiento de la interpretación de Copenhague. Paradójicamente, no ha sucedido así, sino que ha aumentado el número de físicos que se declaran a favor de mantener el realismo (aunque no sea en un determinismo estricto) y renunciar

¹³⁰ S. J. FREEDMAN y J. F. CLAUSER, “Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories”, *Physical Review Letters*, 28/14 (1972), p. 940. Cf. *Ibid.*, p. 938.

¹³¹ A. Aspect explicó, en una entrevista, el experimento realizado. “Los pares de fotones correlacionados se someten a mediciones de polarización. Se asocian polarizadores a la fuente y al sistema de detección. Este último, muy sofisticado, permite hacer un recuento de los fotones en coincidencia, con ayuda de foto-multiplicadores. El término «en coincidencia» significa que dos fotones correlacionados pueden detectarse «simultáneamente», porque el intervalo de tiempo que separa dos detecciones puede medirse con una precisión de nanosegundo (una mil millonésima de segundo). Cuando se dispone de los índices de coincidencia, se puede realizar una prueba directa y sin ambigüedad de las desigualdades de Bell” (S. DELIGEORGES y A. CASTIEL, “En la criba de la experiencia. Una entrevista a Alain Aspect”, en S. DELIGEORGES [dir.], *El mundo cuántico*, Madrid 1990, p. 121). Se llevaron a cabo dos experimentos en este sentido, cuyos resultados violaron “de forma no ambigua las desigualdades de Bell” (cf. *Ibid.*, p. 122).

¹³² Cf. A. ASPECT, J. DALIBARD y G. ROGER, “Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers”, *Physical Review Letters* 49/25 (1982), pp. 1804-1807; cf. D. BOHM y B. J. HILEY, *The Undivided Universe*, London 1993, p. 144.

¹³³ Afirma A. Aspect: “Desde entonces [habla de las contribuciones de Bell, en 1964], sabemos que ya no podemos «comprender» las predicciones de la mecánica cuántica, en la situación EPR, con una imagen «razonable» en la línea de las ideas de Einstein” (S. DELIGEORGES y A. CASTIEL, art. cit., en S. DELIGEORGES [dir.], op. cit., p. 118).

al supuesto de localidad. Existe de hecho en la actualidad una cierta tendencia a tomar la no-localidad como una característica fundamental e intrínseca del universo¹³⁴.

Así, por ejemplo, Bohm y Hiley proponen una teoría de variables ocultas no locales, postulando la existencia de un potencial cuántico que influye (instantáneamente) en el sistema global del universo indiviso¹³⁵. La propuesta de estos autores considera fundamental este aspecto de *totalidad* del universo: el potencial cuántico depende del estado del sistema completo¹³⁶. Escriben Bohm y Hiley:

“Durante varios siglos, ha habido un fuerte sentimiento de que las teorías no locales no son aceptables en física. Es bien conocido, por ejemplo, que Newton se sentía muy inquieto por la acción a distancia y que Einstein la miraba como «fantasmal». Uno puede comprender este sentimiento, pero si se reflexiona profunda y seriamente sobre este asunto, se puede ver que nada hay fundamentalmente irracional en tal idea”¹³⁷.

4.2. El problema de la medida

En el año 1939, London y Bauer presentaron la teoría de la medida de Von Neumann en una formulación menos técnica¹³⁸. En su exposición, de acuerdo con las ideas del matemático húngaro, daban un papel esencial a la conciencia del observador: una medida había sido llevada a cabo únicamente cuando la posición del indicador había sido

¹³⁴ Cf. A. J. DIÉGUEZ, art. cit., pp. 97-100. Diéguez señala, además de a Bohm y Hiley (de los que hablamos a continuación), la interpretación de muchos mundos de Everett (nos referiremos a ella más adelante), la propuesta de M. Bunge de atribuir a los “cuantones” estados con propiedades no locales y la interpretación de A. Jabs, que hace de las partículas objetos extendidos (paquetes de onda) sin posición definida (dentro de una unidad en donde pierde sentido la idea de distancia). (Cf. Ibid., p. 100).

¹³⁵ Cf. Ibid. En el límite clásico, la no-localidad desaparece (cf. D. BOHM y B. J. HILEY, op. cit., p. 7).

¹³⁶ Cf. D. BOHM y B. J. HILEY, op. cit., p. 58.

¹³⁷ Ibid., p. 57. (La traducción es nuestra). Estos autores señalan que, además de no ser irracional, la no-localidad en nada contradice la relatividad especial. El hecho de que haya una conexión no local entre partículas distantes no significa que sea posible transmitir una señal a velocidad mayor que la de la luz. De hecho, la interpretación de Bohm y Hiley coincide en sus resultados con la interpretación convencional, que no permite tal transmisión (cf. Ibid., pp. 157s.)

¹³⁸ Cf. J. MEHRA y H. RECHENBERG, op. cit., vol. 6/2, p. 1204.

*observada*¹³⁹. Trasladando esto al ejemplo del gato, diríamos, de acuerdo con las ideas de London y Bauer, que la vida o muerte del mismo se decidía únicamente en el momento en que el observador abriese la cámara de acero y mirase el animal¹⁴⁰.

A comienzos de los años 60, E. Wigner, profundamente interesado en los aspectos físicos y epistemológicos del problema de la medida, publicó un ensayo (“Comentarios sobre la cuestión mente-cuerpo”) en el cual aceptaba esta interpretación subjetivista de la medida: la reducción de la superposición (el colapso de la función de ondas) era actualizada únicamente por la conciencia del observador¹⁴¹.

En el artículo, Wigner introduce en un experimento mental el papel de un “amigo”, que observa si se produce o no, en ciertos puntos, un destello lumínico en un campo de radiación. (La función de ondas me permitiría conocer la probabilidad de que un fotón incida en cierto punto, pero sólo la observación -en este caso del amigo-, me permite decir si tal incidencia se ha producido o no). A la pregunta de “¿percibiste el destello?”, el amigo respondería “sí” o “no”. La respuesta sería la misma en una ulterior pregunta: “¿habías percibido el destello antes de que te lo preguntase anteriormente?”. Esto es señal de que la función de ondas después de la interacción entre el amigo y el objeto ya no era una superposición de estados: la conciencia del amigo había modificado la función de ondas (produciendo el colapso). Esto no ocurría si en vez de un amigo consciente se hubiese colocado un aparato físico de detección (por ejemplo, un átomo que

¹³⁹ Cf. F. LONDON y E. BAUER, “The Theory of Observation in Quantum Mechanics” (1939), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., p. 251. Von Neumann fue el primero en señalar, para el caso cuántico, el papel determinante de la conciencia del observador. En estas ideas, influyó decisivamente su maestro Leo Szilard, quien acababa de publicar (1929) un estudio sobre la relación existente entre la intervención de un ser inteligente en un sistema termodinámico y la segunda ley de la termodinámica (cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., pp. 480-482).

¹⁴⁰ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 484.

¹⁴¹ Cf. *Ibid.*, p. 499. Cuando hablamos de subjetivismo, sin embargo, no debemos confundirlo con el solipsismo. El solipsismo (la consideración sólo de la propia consciencia), pese a ser lógicamente consistente con la mecánica cuántica, no era aceptable, como mostrará el ejemplo siguiente (la llamada “paradoja del amigo”). Para Wigner, toda mente consciente juega el mismo papel.

fuera excitado por el destello de luz): la superposición permanecía hasta que yo leía el detector. E. Wigner utiliza este ejemplo basado en la mecánica cuántica para ilustrar su tesis más general de que la conciencia influye en el universo físico¹⁴².

Podríamos trasladar las ideas de Wigner al dispositivo imaginario de la paradoja de Schrödinger. Según la interpretación de Wigner, sería mi mente –al abrir la caja y observar el contenido- la que determinaría en uno u otro sentido el estado del gato. (Hasta aquí coincidiría con la interpretación de Bohr). En cambio, si dentro de la caja se hubiera introducido un científico (junto al gato, protegido por una máscara, o bien si se quiere -más arriesgadamente- en lugar del gato), la situación sería diferente. No sería posible hablar en este sistema –tampoco desde fuera de la caja, frente a la interpretación ortodoxa- de superposición de estados (vivo-muerto), al encontrarse en su interior un ser consciente (quien podría tomar nota en una libreta, para comprobación posterior, del proceso de los acontecimientos)¹⁴³.

La “paradoja del amigo” manifiesta la dificultad de la interpretación de Copenhague para definir qué o quién es considerado el observador. Una descripción dramática de esta dificultad conceptual había sido redactada por Hugh Everett III (manuscrito de 1955, publicado en 1973), en analogía con la situación referida por Wigner¹⁴⁴:

En una habitación aislada en el espacio se encuentra un observador A, el cual realizará medidas en un sistema S y las registrará en un cuaderno. En el exterior se encuentra otro observador B, conocedor de la función de estado de la habitación en su conjunto antes de la primera medida (incluyendo S y A). Transcurrida una semana, B abre la puerta de la habitación y mira el cuaderno de A (realiza su observación). En-

¹⁴² Cf. E. P. WIGNER, “Remarks on the Mind-Body Question” (1961), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 172-177.

¹⁴³ Cf. L. SKLAR, op. cit., p. 269.

¹⁴⁴ Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 500.

tonces informa al observador A de que, dado que la función de onda (que da una descripción completa) tenía una amplitud distinta de cero en otro resultado distinto al anotado en el cuaderno, “el resultado debió haber sido decidido sólo cuando B entró en la habitación, de modo que A, su registro en el cuaderno y su memoria sobre lo ocurrido hace una semana no tenían existencia objetiva independiente hasta la intervención de B”. Para consternación de B, la reacción de A no es de gratitud, sino -señala Everett con alegre ironía- la de hacerle comprender que “la situación total presente puede no tener existencia objetiva, sino que puede depender todavía de las acciones futuras de otro observador”¹⁴⁵.

La solución de Wigner, consistente en la atribución de un papel central a la conciencia del observador como causante del colapso de la función de ondas, no estaba exenta de problemas. Wigner introducía un elemento exterior (la mente) al objeto de la propia teoría física y ajeno a sus leyes. La alternativa propuesta por Everett consistía, en cambio, en la negación del carácter real del colapso. Si la mecánica cuántica bastara para describir el universo, el estado actual del mismo estaría representado por una única (si bien extraordinariamente compleja) función de onda que evolucionaría de manera determinista. En lugar de desplomarse por las mediciones, las superposiciones microscópicas se amplificarían también en superposiciones macroscópicas: el gato estaría realmente vivo y muerto a la vez, en dos mundos paralelos¹⁴⁶.

La teoría propuesta por Everett, técnicamente denominada “teoría de la función de onda universal” o “del estado relativo”, es conocida como la *teoría de los “muchos*

¹⁴⁵ Cf. H. EVERETT III, “The Theory of the Universal Wave Function” (manuscrito de 1955), publicado en B. DeWITT y N. GRAHAM (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton 1973, pp. 5s.

¹⁴⁶ Cf. M. TEGMARK y J. A. WHEELER, art. cit., p. 52.

mundos”¹⁴⁷, dado que incluye el hecho de que en el momento de la observación “el estado compuesto se divide en una superposición para la cual cada elemento describe un diferente estado objeto-sistema y un observador con (diferente) conocimiento de él”¹⁴⁸. Se trata de una división del mundo en varias ramas, cada una de las cuales serían actuales (no sólo potenciales) y tan reales como el resto¹⁴⁹. En cada una de las ramas el sistema tomaría uno de sus posibles valores. La superposición tendría así una continuidad, sin producirse ninguna reducción (colapso), en una división del universo en varios mundos independientes.

La reacción de la mayoría de los comentaristas (físicos y filósofos) a la interpretación de muchos mundos es que resulta “demasiado extravagante ontológicamente para ser creíble”¹⁵⁰. La interpretación del multiuniverso, más que proponer una solución al problema de la medida, desplaza el problema hacia hipótesis no comprobables. Sin embargo, la teoría de los muchos mundos tiene para nosotros al menos el valor de mostrar que la interpretación de Copenhague no es la única interpretación consistente posible del formalismo cuántico.

¹⁴⁷ Fue B. DeWitt, en 1967, quien dio a la interpretación de los estados relativos de Everett la denominación de “*many-worlds*” (“muchos mundos” o “muchos universos”), que es la generalmente utilizada en la actualidad (cf. J. L. SÁNCHEZ GÓMEZ, “Interpretación actual de la teoría cuántica: de los muchos universos a las historias consistentes”, *Arbor* CLXVII, 659-660 [2000], p. 479).

¹⁴⁸ *Ibid.*, p. 98.

¹⁴⁹ Cf. H. EVERETT III, “«Relative State» Formulation of Quantum Mechanics” (1957), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, op. cit., pp. 320s., nota a pie. La teoría de “muchos mundos” fue propuesta por Everett, Wheeler y Graham (EWG), y divulgada por DeWitt. La interpretación de muchos mundos se basa en la asunción del formalismo cuántico tal cual, sin añadir nada, y en el rechazo del colapso de la función de ondas (que sólo se guía, por tanto, según la ecuación de Schrödinger). La división del mundo en ramas quedaría inobservada: de acuerdo con las leyes cuánticas no habría ninguna sensación de ella (cf. B. S. DeWITT, “Quantum Mechanics and Reality” [1970], en B. DeWITT y N. GRAHAM (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton 1973, pp. 160s.)

¹⁵⁰ Cf. D. ALBERT y B. LOEWER, “Two No-Collapse Interpretations of Quantum Theory”, *Noûs* 23/2 (1989), p. 180. Según DeWitt, cada transición cuántica en cada remoto rincón del universo estaría escindiendo nuestro mundo terrestre en miríadas de copias de sí mismo (¡!) (cit. en *Ibid.*, pp. 179s.) Albert y Loewer presentan algunos problemas más de la interpretación de EWG. En primer lugar, el hecho de que el estado no determina unívocamente los “mundos”: existen infinitas formas equivalentes distintas de representar el estado del sistema (según distintos conjuntos de vectores básicos, todos autovectores de diferentes operadores). En segundo lugar, entre otras dificultades, el hecho de que no queda claro el sentido de la probabilidad en la teoría (cf. *Ibid.*, pp. 180s.)

Ante las dificultades que suponían tanto la negación del colapso (teorías de muchos mundos) como la atribución de la causa del mismo a la conciencia del observador (ideas de Wigner), algunos autores han propuesto, en las últimas décadas, distintas explicaciones del colapso de la función de ondas por medio de procesos espontáneos, aleatorios o de naturaleza física. En el primer caso, debemos citar la propuesta de G. Ghirardi, A. Rimini y T. Weber (GRW). En el segundo, nos detendremos en las ideas de R. Penrose.

Ghirardi, Rimini y Weber propusieron, en 1986, una pequeña modificación de la teoría cuántica para conseguir una descripción unificada de los sistemas microscópicos y macroscópicos¹⁵¹. Una de las dificultades conceptuales mayores de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica consiste en la derivable división del mundo en dos dominios: el dominio microscópico (de estados superpuestos) y el dominio macroscópico (en el que toda variable tiene un valor definido). En 1965, H. Putnam había señalado que la relevancia de la paradoja del gato de Schrödinger residía en el hecho de que había mostrado que el principio de que los macroobservables siempre tienen valores definidos no se deducía de los fundamentos de la mecánica cuántica¹⁵². Ghirardi, Rimini y Weber trataron de resolver esta dificultad nuclear¹⁵³.

Según la propuesta GRW, las partículas se comportan en general de acuerdo con la evolución dada por la ecuación de ondas. Sin embargo, con cierta (aunque escasa) frecuencia, los sistemas microscópicos sufren procesos de localización (colapso) espontáneos¹⁵⁴. Esta frecuencia ha de ser tan pequeña como para que sus efectos no se noten prácticamente en el nivel microscópico. Sin embargo, en los objetos macroscópicos, en

¹⁵¹ Cf. G. C. GHIRARDI, A. RIMINI y T. WEBER, "Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems", *Physical Review D* 34/2 (1986), pp. 470-491.

¹⁵² Cf. M. JAMMER, *The Philosophy...*, op. cit., p. 218.

¹⁵³ Cf. G. C. GHIRARDI, A. RIMINI y T. WEBER, art. cit., p. 470.

¹⁵⁴ Cf. *Ibid.*, p. 471.

que todas las partículas se encuentran en correlación (entrelazadas), el colapso de una de ellas arrastrará al todo, y el objeto manifestará muy temprano un estado definido. La teoría GRW estima un orden de magnitud en la frecuencia del colapso de 10^{16} segundos. Esto significa que un sistema constituido por una única partícula estaría localizado una vez cada $10^8 - 10^9$ años. En el caso de un objeto macroscópico (conteniendo un número de partículas del orden del número de Avogadro, $\sim 10^{24}$), espontáneamente sufrirían el colapso en torno a 10^7 partículas por segundo, con lo que el sistema estaría localizado desde un tiempo imperceptible (la primera diezmillonésima de segundo)¹⁵⁵.

El modelo GRW tiene el mérito de reproducir de un modo consistente la mecánica cuántica para objetos microscópicos y la mecánica clásica para objetos macroscópicos, así como de proporcionar una base para la explicación de la reducción del paquete de ondas en el momento de la medida¹⁵⁶. El carácter aparentemente *ad hoc* en la elección los parámetros hizo que R. Penrose desarrollara en los años siguientes una alternativa, consistente en dar un criterio para el colapso basado en la escala de gravedad cuántica.

En 1986, Penrose había planteado la idea de que el colapso cuántico ocurriría cuando la disminución de la entropía (medida física del desorden) que tiene lugar en el efecto de la reducción fuera por lo menos compensada por un correspondiente aumento de la entropía gravitacional. En un caso de una sola partícula (por ejemplo, la desintegración de un átomo radiactivo), la geometría producida no tendría una curvatura de Weyl significativa¹⁵⁷. Pero -escribe Penrose- “si la función de onda se acopla con algún sistema más grande [el observador], de manera que las diferentes posiciones de las partí-

¹⁵⁵ Cf. G. C. GHIRARDI, A. RIMINI y T. WEBER, art. cit., p. 480.

¹⁵⁶ Cf. Ibid., p. 481.

¹⁵⁷ En relatividad general, el campo gravitatorio se define como una curvatura del espacio-tiempo. (A cada masa viene asociada una deformación del espacio multidimensional). Uno de los tensores que define este campo es el tensor de curvatura de Weyl.

culas producen configuraciones de masa lo suficientemente agrupadas, entonces cada una de estas configuraciones individuales «agrupadas» puede tener suficiente curvatura de Weyl como para representar un incremento significativo de la entropía gravitacional¹⁵⁸ (se produciría entonces el colapso). Esta idea fue profundizada en su libro “La nueva mente del emperador” (1989), en la cual propone como significativa para producir el colapso la magnitud de un gravitón (escala de la masa de Planck, 10^{-5} g)¹⁵⁹:

“Un gravitón sería la unidad más pequeña de curvatura que estaría permitida por la teoría cuántica. La idea es que, en cuanto se alcanzara este nivel (...) se establecerá algún tipo de «inestabilidad no-lineal» con asimetría temporal. En lugar de tener para siempre superposiciones lineales complejas de «alternativas» coexistentes, una de las alternativas vence en esta etapa y el sistema «cae» en una alternativa u otra¹⁶⁰.”

Distanciándose claramente de la concepción de Wigner (y refinando las ideas de GRW), Penrose señala que, según esta idea, el procedimiento de reducción del paquete de ondas ocurre “espontáneamente de una manera totalmente objetiva, independientemente de cualquier intervención humana¹⁶¹”.

En un libro más reciente (1994), Penrose ha refinado estas ideas, sugiriendo un nuevo criterio para la reducción del vector de estado inducida gravitatoriamente. Ahora no se busca la medida absoluta (en términos de entropía) de la diferencia gravitacional entre estados, sino que se consideran los estados superpuestos que difieren ampliamente

¹⁵⁸ R. PENROSE, “Gravedad y reducción del vector estado” (1986), en S. W. HAWKING y R. PENROSE, *Cuestiones cuánticas y cosmológicas*, Madrid 1993, p. 298. Cf. la Introducción de J. M. SÁNCHEZ RON, p. 32.

¹⁵⁹ La escala de Planck mide las unidades tal que las constantes básicas del universo (como la constante reducida de Planck $\hbar = h/2\pi$, la velocidad de la luz c y la constante de gravitación G tengan el valor unidad). El orden de magnitud de la masa en la escala de Planck es de 10^{-5} g. El gravitón es la (hipotética) partícula elemental en la que residiría la interacción gravitatoria. Penrose establece su propuesta en términos de estas magnitudes básicas por razones de coherencia con el resto de la física.

¹⁶⁰ R. PENROSE, *La nueva mente del emperador* (1989), Madrid 1991, p. 457.

¹⁶¹ *Ibid.*, p. 458.

como estados inestables, de modo que exista un *ritmo* de reducción del vector de estado determinado por una medida de semejante diferencia: cuanto mayor es la diferencia, más rápido será el ritmo al que tendrá lugar la reducción¹⁶². La expresión del tiempo de reducción sería de \hbar/E , donde \hbar es la constante reducida de Planck ($\hbar = h/2\pi$) y E la energía de separación gravitacional. Esta magnitud da respuestas muy razonables: un tiempo de reducción de 10^{58} segundos (más de diez millones de años) en el caso de un neutrón o un protón, y de menos de una millonésima de segundo en el caso de una mota de agua de 10^{-3} cm de radio¹⁶³. La propuesta, pues, parece plausible, pero –como el propio Penrose reconoce– se trata por el momento sólo de ideas a la espera de algún tipo de comprobación experimental¹⁶⁴.

4.3. Investigaciones más recientes. La noción de decoherencia

Como hemos señalado anteriormente, uno de los problemas principales de la interpretación de Copenhague es el establecimiento de una división del mundo en dos dominios: el dominio cuántico (identificado generalmente con “lo microscópico”) y el dominio en el que tienen validez las leyes clásicas (los entes macroscópicos). Este problema –ejemplificado en la paradoja de Schrödinger– ha sido abordado, a partir de la década de los 80, por medio del mecanismo de *decoherencia cuántica*¹⁶⁵.

¹⁶² Cf. R. PENROSE, *Las sombras de la mente. Hacia una comprensión científica de la consciencia* (1994), Barcelona 2007, pp. 359s.

¹⁶³ Cf. *Ibid.*, p. 361.

¹⁶⁴ Cf. *Ibid.*, p. 364. En un libro más reciente, *El camino a la realidad* (2004), Penrose mantiene las mismas ideas: la objetividad de la reducción de estado, el papel de la gravedad en este proceso y la propuesta de escala de tiempo de reducción del orden de \hbar/E (cf. R. PENROSE, *El camino a la realidad* [2004], Barcelona 2007, pp. 1095. 1098. 1141).

¹⁶⁵ Se dice que dos ondas (o dos puntos o componentes de una onda) son coherentes si sus fases coinciden (o se hallan en una relación constante). Para que la superposición de dos ondas dé un patrón alternativo de interferencia constructiva y destructiva se requiere que ambas sean coherentes. Por ejemplo, en el experimento de Young, se requiere que los dos frentes de ondas sean coherentes para que se dé el patrón de franjas luminosas y oscuras. En el caso cuántico, la coherencia es un requisito para que se dé una

La idea principal de la teoría de la decoherencia es la constatación de que los sistemas cuánticos nunca se encuentran aislados, sino que se hallan en continua interacción con el ambiente circundante¹⁶⁶. Esta interacción conlleva correlaciones entre los estados del sistema y el ambiente cuyo efecto es la supresión de la interferencia o superposición de estados¹⁶⁷. Se produce el efecto de un “colapso aparente”: la correlación con el entorno provoca el hundimiento de la función de onda, sin necesidad de un colapso explícito ni de la intervención de un observador humano. Este fenómeno explica por qué no vemos superposiciones cuánticas en el mundo que nos rodea, mientras que sí las podemos mantener en objetos microscópicos, aislados con mayor facilidad de su entorno¹⁶⁸.

La principal motivación para la introducción de la noción de colapso de la función de onda en la interpretación de Copenhague era explicar por qué los experimentos y las mediciones producían resultados determinados y los objetos macroscópicos se comportaban de acuerdo con las leyes de la mecánica clásica (y no según extrañas superposi-

superposición estable de varios estados (como fenómeno no clásico, con términos de interferencia). La pérdida de esta recibe el nombre de “decoherencia”.

¹⁶⁶ El primero en introducir explícitamente la interacción con el ambiente en el estudio de los problemas de la medida fue H. D. Zeh, en 1970 (cf. G. AULETTA, *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, Singapore 2001, p. 263).

¹⁶⁷ En el experimento de Young con electrones, la colocación de un detector en una de las rendijas destruye el patrón de interferencias, en favor de uno solo de los posibles caminos. La interpretación de Copenhague había atribuido esto al colapso de la función de ondas provocado por la medida. La teoría de la decoherencia lo atribuye, en cambio, a una pérdida de la coherencia debida a la correlación con el instrumento de detección. Igualmente –afirman los defensores de esta postura–, los aparentes colapsos que se producen habitualmente en los sistemas cuánticos habrán de atribuirse a la interacción con el ambiente circundante. (Cf. G. BACCIAGALUPPI, "The Role of Decoherence in Quantum Mechanics", en E. N. ZALTA (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2008 Edition), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-decoherence/>>.)

¹⁶⁸ Cf. M. SCHLOSSHAUER, “Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 76 (2004), p. 1268; M. TEGMARK y J. A. WHEELER, art. cit., pp. 54s. La teoría de la decoherencia se distingue de las teorías estudiadas en el apartado anterior (como la GRW y las ideas de Penrose) en que ya no se admite el colapso en sentido propio, sino una correlación compatible con las leyes cuánticas. Escribe Zurek: “Un «colapso» en el sentido tradicional ya no es necesario”. “La reducción del paquete de ondas al igual que el «colapso» emergen como consecuencia de caer en la cuenta de que los estados efectivamente clásicos, incluidos los estados de la memoria del observador, deben existir a lo largo de períodos que son largos en comparación con el tiempo de decoherencia si han de ser útiles como depositarios de información” (W. H. ZUREK, “Decoherence, einselection and the existential interpretation (the rough guide)”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 356 [1998], pp. 1793s.)

ciones). Con el descubrimiento de la decoherencia, esta motivación ha dejado de existir¹⁶⁹. La decoherencia hace que las partículas cuánticas, asociadas con otras en cuerpos más grandes o bien en interacción con el ambiente externo, se comporten de manera clásica. Quedaría así explicada la transición de la evolución cuántica a las leyes de la mecánica clásica. Como escribió W. H. Zurek (el autor que más ha contribuido a la extensión de este programa de investigación), en un artículo publicado en 1991:

“Hay pocas dudas de que el proceso de decoherencia (...) es un fragmento importante, central para la comprensión del gran cuadro -la transición de lo cuántico a lo clásico-. La decoherencia destruye las superposiciones. El ambiente induce, en efecto, una regla de superselección que evita que ciertas superposiciones sean observadas. Sólo los estados que sobreviven a este proceso pueden llegar a ser clásicos”¹⁷⁰.

En los años 90 se realizaron distintos experimentos para probar el fenómeno de la decoherencia. Estos experimentos incluían la creación en laboratorio de estados de superposición en escalas de tamaño mesoscópico¹⁷¹ y, por tanto, situaciones cercanas al experimento (hasta entonces sólo mental) del gato de Schrödinger¹⁷². En particular, destaca la serie de experimentos realizada por S. Haroche con un grupo de investiga-

¹⁶⁹ Cf. M. TEGMARK y J. A. WHEELER, art. cit., p. 55.

¹⁷⁰ W. H. ZUREK, “Decoherence and the transition from quantum to classical”, *Physics today* 44/10 (1991), p. 44. En los objetos macroscópicos de posición distinguible, la decoherencia sería prácticamente instantánea; no así a nivel microscópico (cf. *Ibid.*, p. 41). Zurek añade a la decoherencia el fenómeno de la *einselection* (“environment-induced superselection”): la decoherencia impone una serie de restricciones que conllevan una selección de los estados más estables, que son los que sobreviven. La superselección (en la cual se produce una pérdida de información) refuerza la clasicidad generada por la decoherencia en los estados no aislados (cf. W. H. ZUREK, “Decoherence, einselection and the quantum origins of the classical”, *Reviews of modern physics* 75 [2003], pp. 715. 717).

¹⁷¹ La escala mesoscópica es aquella que comprende los tamaños intermedios entre lo molecular y lo macroscópico (visible a nuestros ojos).

¹⁷² En 1991, C. Stroud y J. Yeazell, experimentando con átomos de Rydberg (átomos de potasio “hinchados”, al expandirse las órbitas de sus electrones por medio de destellos de láser), descubrieron que el paquete de ondas se constituía en dos paquetes menores, situados en extremos opuestos de su gran órbita. En 1996, junto con M. W. Noel, C. Stroud mostró que los dos paquetes constituían un estado de “gato de Schrödinger”: un solo electrón en dos lugares. En el mismo año 1996, C. Monroe, D. J. Wineland y otros crearon un gato de Schrödinger con un ion de berilio, consiguiendo una superposición de estados *spin* arriba- *spin* abajo con una distancia de 80 nanómetros (cf. P. YAM, “La frontera entre lo cuántico y lo clásico”, *Investigación y ciencia* 251 [1997], p. 21).

dores de la *École Normale Supérieure* de París quienes, utilizando átomos de rubidio, manipularon campos electromagnéticos sobre una superposición mesoscópica del tipo “gato de Schrödinger”¹⁷³. Para escrutar cómo se deshacía la superposición, enviaron un “ratón” que les permitía comprobar si el gato estaba vivo o muerto¹⁷⁴.

El “gato” era un campo magnético atrapado (unos fotones de microondas en una cavidad). La superposición se creaba enviando dentro de la cavidad un átomo de Rydberg (un átomo “inflado” hasta tomar unas 2500 veces el tamaño de un átomo normal), excitado para adoptar una superposición de dos estados de energía diferentes. El átomo de Rydberg transfería su superposición al campo electromagnético, el cual adoptaba una superposición de dos estados vibracionales. Como “ratón”, el equipo lanzó otro átomo de Rydberg a la cavidad. Este átomo recibía del campo la información sobre sus fases superpuestas. Los físicos compararon el segundo átomo con el primero, para recoger información sobre la superposición del campo del interior de la cavidad. Variando el intervalo de tiempo entre los dos átomos enviados, vieron cómo variaba la superposición en función del tiempo. Aumentando el campo electromagnético, estudiaron cómo cambiaba el “colapso” con el tamaño¹⁷⁵.

Los experimentos mostraron la progresiva decoherencia, constatando la dificultad de mantener la coherencia cuántica (fase de estados superpuestos) conforme se incrementaba la escala métrica (la distancia entre los componentes de la superposición). Estos resultados concordaban grandemente con las previsiones de los teóricos de la decohe-

¹⁷³ Cf. M. BRUNE et al., “Observing the Progressive Decoherence of the *Meter* in a Quantum Measurement”, *Physical Review Letters* 77/24 (1996), pp. 4887-4890; W. H. ZUREK, “Decoherence and the Transition from Quantum to Classical—Revisited”, *Los Alamos Science* 27 (2002), p. 98;

¹⁷⁴ Cf. P. YAM, art. cit., p. 21.

¹⁷⁵ Cf. Ibid.; cf. G. TAUBES, “Atomic Mouse probes the Lifetime of a Quantum Cat”, *Science* 274 (1996), p. 1615.

rencia¹⁷⁶. En el caso de sistemas macroscópicos (como el gato de Schrödinger), la decoherencia destruiría instantáneamente la superposición cuántica, haciendo que el gato estuviera vivo o muerto inmediatamente, sin interferencia entre ambos desenlaces¹⁷⁷.

La teoría de la decoherencia proporciona un mecanismo físico progresivo donde la teoría ortodoxa ofrecía sólo un postulado de ruptura (la idea del colapso). Algunos autores, basados en estos resultados, han visto en el fenómeno de la decoherencia la solución al problema de la medida¹⁷⁸. El instrumento de medición, como objeto macroscópico, induce la decoherencia en el sistema cuántico, haciendo que muestre un único valor¹⁷⁹. Sin embargo, otros autores (como H. D. Zeh y E. Joos) niegan que la decoherencia resuelva por completo el problema. La teoría de la decoherencia, pese a sus grandes progresos experimentales, no resolvería las cuestiones fundamentales acerca de la particularidad del proceso de medición y la interpretación de la función de ondas¹⁸⁰.

Para el premio nobel de física A. J. Leggett, la decoherencia no resuelve en realidad el problema de la medida¹⁸¹. Este autor ha propuesto recientemente varios experimentos

¹⁷⁶ Cf. M. BRUNE et al., art. cit., pp. 4887-4890. Concluyen los autores: “Las señales de correlación disminuyen con el tiempo, revelando directamente la dinámica de la decoherencia cuántica. El acuerdo con el modelo analítico simple es excelente” (Ibid., p. 4889).

¹⁷⁷ Cf. G. TAUBES, art. cit., p. 1615.

¹⁷⁸ Así, por ejemplo, G. Auletta afirma: “La decoherencia es capaz de resolver prácticamente todos los problemas de la medida que hemos discutido en los capítulos precedentes” (G. AULETTA, op. cit., p. 289).

¹⁷⁹ W. H. Zurek incluye también el papel central del observador (lo que él llama *interpretación existencial*) dentro de los fenómenos de decoherencia (como pérdida de información del sistema) y “einselection” (v. nota supra). El observador consciente es también un sistema cuántico, pero un sistema “distinguido” de los demás por su memoria, su capacidad de adquirir información perdida por el sistema cuántico observado (cf. W. H. ZUREK, “Decoherence, einselection...”, art. cit., pp. 715. 762).

¹⁸⁰ Cf. M. SCHLOSSHAUER, art. cit., p. 1268s.; G. BACCIAGALUPPI, art. cit. En particular, se acusa a las explicaciones basadas en la decoherencia de ofrecer un razonamiento circular: el resultado que se ve en el mundo macroscópico surge del mundo cuántico porque esos son los resultados que vemos (cf. M. SCHLOSSHAUER, art. cit., p. 1268s.; P. YAM, art. cit., p. 22).

¹⁸¹ Se argumenta usualmente que, dado que es imposible ver efectos de interferencia entre los estados de gato vivo y gato muerto, en consecuencia, uno de los dos estados ha sido realizado. Este argumento incluye -opina Leggett- la falacia de confundir “la cuestión de la verdad con la cuestión de la evidencia” (cf. A. J. LEGGETT, “The Quantum Measurement Problem”, *Science* 307 [2005], p. 871).

para probar la existencia de interferencia cuántica entre estados macroscópicamente distintos (*QIMDS*, por sus iniciales en inglés)¹⁸², es decir, casos de superposición cuántica en la escala de medidas del mundo de la experiencia diaria¹⁸³. En los experimentos realizados (especialmente con superconductores) se ha obtenido –según este autor- una fuerte “evidencia del fenómeno de los QIMDS”¹⁸⁴. Así, por ejemplo, en el año 2000, J. R. Friedman (y otros) construyeron con superconductores una superposición de dos estados de flujo magnético, respectivamente en sentido horario y antihorario, de unos pocos microamperios¹⁸⁵.

Los experimentos recientes parecen indicar, por tanto, que la superposición cuántica no es un fenómeno exclusivo del mundo microscópico. El hecho de que no observemos estados superpuestos en los objetos de la vida diaria vendría explicado por el proceso de decoherencia: la interacción con el entorno hace que, en brevísimos instantes (salvo condiciones muy precisas creadas en el laboratorio) la interferencia de estados se diluya. La teoría de la decoherencia puede jugar, de este modo, un papel importante en la expli-

¹⁸² Se trata de experimentos destinados a refutar la tesis del “macrorrealismo”, según la cual “un objeto macroscópico que tiene a su disposición dos o más estados macroscópicamente distintos está en un momento dado cualquiera en un estado definido de estos” (A. J. LEGGETT, “Testing the Limits of Quantum Mechanics: Motivation, State of Play, Prospects”, *Journal of Physics: Condensed Matter* 14 [2002], p. 449). Los experimentos diseñados se refieren a cuatro tipos de sistemas: moléculas complejas en un espacio libre, biomoléculas magnéticas, sistemas óptico-cuánticos y dispositivos superconductores (cf. *Ibid.*, p. 433).

¹⁸³ La escala a la que nos referimos es el orden de 10^{24} partículas (escala del número de Avogadro). Cf. *Ibid.*, p. 447. El lema del programa sería –en palabras de Leggett- “la construcción del gato de Schrödinger en el laboratorio” (A. J. LEGGETT, “Autobiography” [2003], en URL = <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2003/leggett.html>).

¹⁸⁴ Cf. *Ibid.*, p. 442. Estos resultados han llevado a Leggett a decantarse por una suerte de operacionalismo, que afirma que la mecánica cuántica es la “verdad completa” (por proporcionar siempre seguras predicciones sobre la naturaleza de los experimentos), pero “no describe la realidad externa” (ya que sus símbolos no corresponden al mundo real). (Cf. A. J. LEGGETT, “The Quantum Measurement Problem”, art. cit., pp. 871s.) En un artículo más reciente, queda clara la postura de Leggett contraria al realismo clásico (el “macrorrealismo”, tesis que afirma que un objeto macroscópico con dos posibles estados se encuentra casi siempre en uno de ellos). Los experimentos más recientes han refutado esta tesis, al igual que hicieron los experimentos sobre las desigualdades de Bell con el realismo local (cf. A. J. LEGGETT, “Realism and the Physical World”, *Reports on Progress in Physics* 71 [2008], 022001 [6 pp.]).

¹⁸⁵ Cf. J. R. FRIEDMAN (et al.), “Quantum Superposition of Distinct Macroscopic States”, *Nature* 406 (2000), p. 43

cación de la transición de lo cuántico a lo clásico. En nuestra opinión, con todo, es todavía pronto para valorar ponderadamente estos resultados.

En la actualidad, varios programas de investigación continúan trabajando sobre el fenómeno de la decoherencia y cuestiones relacionadas con el entrelazamiento cuántico, también en el campo de la computación y criptografía cuánticas¹⁸⁶. Sus resultados iluminarán, sin duda, algunas cuestiones acerca de la interpretación de la mecánica cuántica y el problema de la medida. Debemos señalar, no obstante, que la decoherencia no elimina la necesidad de proponer una interpretación coherente del formalismo cuántico¹⁸⁷. El debate acerca de la interpretación del complejo formalismo matemático de la mecánica cuántica, más de setenta y cinco años después del importante artículo de Schrödinger, continúa abierto.

¹⁸⁶ Los ordenadores clásicos están contruidos con transistores que conmutan entre el 0 y el 1. En un “ordenador cuántico”, los transistores permanecen en una superposición de 0 y 1 (un *qubit*, bit cuántico). Los cálculos se efectúan mediante interacciones entre los estados superpuestos. Como podría procesar – en teoría- muchas respuestas simultáneamente, un ordenador cuántico podría acabar en segundos varias tareas que llevarían años en una máquina clásica. La creación de un ordenador cuántico útil, sin embargo, no parece sencilla, por la dificultad de mantener en estado de superposición un conjunto grande de partículas. Mejores perspectivas tiene la criptografía de clave cuántica. Los comunicantes legítimos obtienen, a partir de la polarización de pares de fotones entrelazados, una clave compartida. Cualquier intento de descerrajar esas claves se advertiría de inmediato, pues perturbaría las correlaciones entre los fotones que las generan (cf. P. YAM, art. cit., pp. 22-24).

¹⁸⁷ Cf. M. TEGMARK y J. A. WHEELER, art. cit., p. 53;

BIBLIOGRAFÍA

- AHARONOV, Y. y BOHM, D., “Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory”, *Physical Review (Second Series)* 115/3 (1959), pp. 485-491.
- ALBERT, D., *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Harvard 1994.
- ALBERT, D. y LOEWER, B., “Two No-Collapse Interpretations of Quantum Theory”, *Noûs* 23/2 (1989), pp. 169-186.
- APARICIO JUAN, A., “La teoría cuántica y sus interpretaciones: un enfoque filosófico realista”, *Revista Laguna* 13 (2003), pp. 41-67.
- ASPECT, A.; DALIBARD, J. y ROGER, G., “Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers”, *Physical Review Letters* 49/25 (1982), pp. 1804-1807.
- AULETTA, G., *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, World Scientific Publishing, Singapore 2001.
- BACCIAGALUPPI, G., "The Role of Decoherence in Quantum Mechanics", en ZALTA, E. N. (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2008 Edition), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-decoherence/>.
- BELL, J. S., “Sobre el problema de las variables ocultas en la mecánica cuántica” (1966), en *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza Universidad, Madrid 1990, pp. 25-40.
- ID., “Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen” (1964), en *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza Universidad, Madrid 1990, pp. 41-50.

- ID., “Introducción a la cuestión de las variables ocultas” (1971), en *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza Universidad, Madrid 1990, pp. 60-73.
- ID., “Los calcetines de Bertlmann y la naturaleza de la realidad” (1981), en *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza Universidad, Madrid 1990, pp. 197-220.
- BELLER, M., “«Against the stream»- Schrödinger’s Interpretation of Quantum Mechanics”, *Studies in History and Philosophy of Science* 28/3 (1997), pp. 421-432.
- BOHM, D., “The paradox of Einstein, Rosen and Podolsky” (originalmente en *Quantum Theory* [1951]), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 356-368.
- ID., “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of «Hidden» Variables” (1952), en J WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 369-396.
- BOHM, D. y HILEY, B. J., *The Undivided Universe*, Routledge, London 1993.
- BOHR, N., “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory” (1928), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 87-126.
- ID., *Introductory Survey* (1929), en *Atomic Theory and the Description of Nature* (1934), Cambridge University Press, Cambridge 2011, pp. 1-24.
- ID., “Quantum Mechanics and Physical Reality” (1935), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, p. 144.

- ID., “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” (1935), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 145-151.
- ID., “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics” (1949), en SCHILPP, P. A. (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-scientist*, Open Court, La Salle (Illinois), pp. 201–241.
- BORN, M., “The Interpretation of Quantum Mechanics”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 14 (1953), pp. 95- 106.
- BRUNE, M., et al., “Observing the Progressive Decoherence of the *Meter* in a Quantum Measurement”, *Physical Review Letters* 77/24 (1996), pp. 4887-4890.
- CAMILLERI, K., “Bohr, Heisenberg and the Divergent Views of Complementarity”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38 (2007), pp. 514-528.
- CASTIEL, A., *La virtud de la desigualdad*, en DELIGEORGES, S. (dir.), *El mundo cuántico*, Alianza Universidad, Madrid 1990, pp. 109-115.
- DELIGEORGES, S. – CASTIEL, A., “En la criba de la experiencia. Una entrevista a Alain Aspect”, en DELIGEORGES, S. (dir.), *El mundo cuántico*, Madrid 1990, pp. 117-125.
- DELTETE, R., “Einstein and EPR”, *Philosophy of Science* 58 (1991), pp. 377-397.
- DeWITT, B. S., “Quantum Mechanics and Reality” (1970), en DeWITT, B. y GRAHAM, N. (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton 1973, pp. 155-165.
- DIÉGUEZ, A. J., “Realismo y teoría cuántica”, *Contrastes. Revista Interdisciplinar de Filosofía* I (1996), pp. 75-105.

- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. y ROSEN, N., “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”, *Physical Review* 47 (1935), pp. 777-780.
- EINSTEIN, A.; TOLMAN, R. C. y PODOLSKY, B., “Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics” (1931), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 135s.
- EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume (Reply to Criticisms)” (1949), en SCHILPP, P. A. (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-scientist*, Open Court, La Salle (Illinois), pp. 663-688.
- EVERETT, H. (III), “The Theory of the Universal Wave Function” (manuscrito de 1955), en DeWITT, B. y GRAHAM, N. (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1973, pp. 4-140.
- ID., “«Relative State» Formulation of Quantum Mechanics” (1957), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 315-323.
- FAYE, J., “Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics”, en ZALTA, E. N. (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2008 Edition), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-copenhagen/>.
- FINE, A., *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, Chicago ²1996.
- FREEDMAN, S. J. y CLAUSER, J. F., “Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories”, *Physical Review Letters*, 28/14 (1972), pp. 938-941.

- FRIEDMAN, J. R. (et al.), “Quantum Superposition of Distinct Macroscopic States”, *Nature* 406 (2000), pp. 43-46.
- GHIRARDI, G. C.; RIMINI, A. y WEBER, T., “Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic systems”, *Physical Review D* 34/2 (1986), pp. 470-491.
- GÖTSCHL, J. (ed.), *Erwin Schrödinger’s World View*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1992.
- HAWKING, S. W. y PENROSE, R., *Cuestiones cuánticas y cosmológicas (Introducción de SÁNCHEZ RON, J. M.)*, Alianza, Madrid 1993.
- HEISENBERG, W., “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics” (1927), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 62-84.
- HOWARD, D., “Who Invented the «Copenhagen Interpretation»? A Study in Mythology”, *Philosophy of Science* 71/5 (2004), pp. 669-682.
- JAMMER, M., *The Philosophy of Quantum Mechanics: the Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, Wiley, New York 1974.
- ID., *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Tomash Publishers – American Institute of Physics, ²1989.
- LEGGETT, A. J., “Testing the Limits of Quantum Mechanics: Motivation, State of Play, Prospects”, *Journal of Physics: Condensed Matter* 14 (2002), pp. 415-451.
- ID., “Autobiography” (2003), en URL = <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2003/leggett.html>.
- ID., “The Quantum Measurement Problem”, *Science* 307 (2005), pp. 871s.

- ID., “Realism and the Physical World”, *Reports on Progress in Physics* 71 (2008), 022001 (6 pp.)
- LONDON, F. y BAUER, E., “The Theory of Observation in Quantum Mechanics” (1939), en J. A. WHEELER y W. H. ZUREK, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 217-259.
- MEHRA, J. y RECHENBERG, H., *The Historical Development of Quantum Theory* (6 vols.), Springer, New York 2001.
- MOORE, W., *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.
- NAVARRO FAUS, J., *Schrödinger: Una ecuación y un gato*, Nivola, Madrid 2009.
- PATY, M., “Einstein et la complémentarité au sens de Bohr: du retrait dans le tumulte aux arguments d'incomplétude”, *Revue d'histoire des sciences* 38/3-4 (1985), pp. 325-351.
- PENROSE, R., “Gravedad y reducción del vector estado” (1986), en HAWKING, S. W. y PENROSE, R., *Cuestiones cuánticas y cosmológicas*, Alianza, Madrid 1993.
- ID., *La nueva mente del emperador* (1989), Biblioteca Mondadori, Madrid 1991.
- ID., *Las sombras de la mente. Hacia una comprensión científica de la consciencia* (1994), Crítica, Barcelona 2007.
- ID., *El camino a la realidad* (2004), Debate, Barcelona ⁴2007.
- ROSENFELD, L., *Niels Bohr in the Thirties*, en ROZENTAL, S. (ed.), *Niels Bohr: His Life and Work as Seen by his Friends and Colleagues*, North-Holland, Amsterdam 1967,

- pp. 114-136, extractado en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, p. 137.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, J. L., “Interpretación actual de la teoría cuántica: de los muchos universos a las historias consistentes”, *Arbor* CLXVII, 659-660 (2000), pp. 475-488.
 - SCHLOSSHAUER, M., “Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 76 (2004), pp. 1267-1305.
 - SCHRÖDINGER, E., “An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules”, *Physical Review (Second Series)* 28/6 (1926), pp. 1049-1070.
 - ID., “Discussion of Probability Relations between Separated Systems”, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31 (1935), pp. 555-563.
 - ID., “The Present Situation in Quantum Mechanics” (1935), traducción de J. D. Trimmer, en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 152-167.
 - ID., “Are there Quantum Jumps?” (2 partes), *The British Journal for the Philosophy of Science* 3/10 (1952), pp. 109-123; 3/11 (1952), pp. 233-242.
 - SKLAR, L., *Filosofía de la física*, Alianza, Madrid 1994.
 - SOLÍS, C. y SELLÉS, M., *Historia de la ciencia*, Espasa Calpe, Madrid 2005.
 - TAUBES, G., “Atomic Mouse probes the Lifetime of a Quantum Cat”, *Science* 274 (1996), p. 1615.
 - TEGMARK, M. y WHEELER, J. A., “Cien años de misterios cuánticos”, *Investigación y ciencia* 295 (2001), pp. 48-56.

- VON NEUMANN, J., *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* (1932), C.S.I.C., Madrid ²1991.
- WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983 (recopilación de fuentes).
- WIGNER, E. P., “Remarks on the Mind-Body Question” (1961), en WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, pp. 168-181.
- YAM, P., “La frontera entre lo cuántico y lo clásico”, *Investigación y ciencia* 251 (1997), pp. 18-24.
- ZUREK, W. H., “Decoherence and the transition from quantum to classical”, *Physics today* 44/10 (1991), pp. 36-44.
- ID., “Decoherence, einselection and the existential interpretation (the rough guide)”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 356 (1998), pp. 1793-1821.
- ID., “Decoherence and the Transition from Quantum to Classical—Revisited”, *Los Alamos Science* 27 (2002), pp. 86-109.
- ID., “Decoherence, einselection and the quantum origins of the classical”, *Reviews of modern physics* 75 (2003), pp. 715-775.