

## REFERENCIAS

- Armstrong, K. 2007. "La gran transformación". Paidós. Barcelona.
- Damasio, A. 1996. "El error de Descartes". Crítica. Barcelona.
- Damasio, A. 2005, "En busca de Spinoza". Crítica. Barcelona.
- Damasio, A. 2010. "Y el cerebro creó al hombre". Destino. Barcelona
- Epel, E. et al. 2009. "Can meditation slow rate of cellular aging? Cognitive stress, mindfulness and telomeres". Ann. N. Y. Acad. of Sci. 1172: 34-53.
- Jaspers, K. 2001. "Los grandes maestros espirituales de Oriente y Occidente". Tecnos. Madrid.
- Johnson, D. D. P. 2016. "Hand of the gods in human civilization". Nature, 530 : 285-287.
- Kabat-Zinn, J. 2016. "Vivir con plenitud las crisis". Kairós. Barcelona.
- Lauricella, S. 2016. "The Ancient-Turned-New Concept of "Spiritual Hygiene". An Investigation of Media Coverage of Meditation Forms". Journal of Relig. Health 55:1748-1762
- Muehsa D. et al. 2017. ""The embodied mind : A review on functional genomic and neurological correlates of mind-body therapies". Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 73 : 165-181.
- Paloutzian, R. F. y C. L. Park. (Eds). 2015. "Handbook of the Psychology of Religion and Spirituality". The Guilford Press. New York.
- Purzycki, B. G. et al. 2016. "Moralistic gods, supernatural punishment and the expansion of human sociality". Nature, 530 : 327-330.
- Takayama, Z. 2017. "How are religious concepts created? A form of cognition and its effects". Cognitive Systems Research, 41: 73-83.



# La problemática ontológica de la mecánica cuántica

Rev. Aragón. Teol. 46 (2017)

*Lluc Torcal (Monje de Poblet)*

## Introducción

Por mecánica cuántica se comprende la física que nació el 14 de diciembre de 1900 con dos artículos del físico Max Planck publicados en la Sociedad de Física Alemana<sup>1</sup>. En ellos, Planck intentaba dar una solución a problemas puestos por la física del momento, tales como el problema de la radiación del cuerpo negro. Podemos indicar tan claramente esta fecha por las consecuencias completamente sorprendentes que proponía la solución dada por el físico berlinés al problema de la radiación del cuerpo negro: ¡la energía debía de ser cuantificada! Es esta cuantificación de la energía la que dará el nombre de “mecánica cuántica” a la nueva ciencia que apenas vislumbraba la luz. Dada la importancia que la mecánica tiene dentro de esta nueva física, el nombre de “mecánica cuántica” es general, esto es, indica no aquella parte mecánica de la disciplina sino, normalmente, toda la disciplina. En el curso del siglo XX, otras ramas como la electrodinámica o la termodinámica se han ido incorporando al formalismo, encontrando su lugar adecuado. Nosotros utilizaremos indiferentemente el término “mecánica cuántica” o “física cuántica” para referirnos a la misma realidad.

La mecánica cuántica es una de las grandes revoluciones conceptuales del siglo XX. Hay varias cuestiones filosóficas fundamentales que están involucradas en esta gran revolución. Preguntas sobre el significado de la materia, su carácter, su relación con la información, cuestiones relativas a la incertidumbre del universo físico, la naturaleza de los efectos no locales, el problema de la causalidad, y muchas otras preguntas sobre el estatus ontológico de las entidades cuánticas. El conjunto de estas preguntas nos ofrece ya el panorama del punto de inflexión que representa el nacimiento y desarrollo de la

<sup>1</sup> M. Planck, «Über die Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900) 202–204 y «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900) 237–245.

mecánica cuántica: un panorama que cambia radicalmente la visión del mundo que se tenía desde la óptica de la mecánica clásica de Newton y Galileo. En esta última teoría, ley y causa eran, de hecho, equiparadas, lo que refleja una tremenda confusión entre el plano formal y el nivel físico, que hemos ido reproduciendo hasta nuestros tiempos. Esa confusión, ha podido ser clarificada gracias a la luz que arroja la nueva teoría cuántica del mundo. En pocas palabras, el verdadero problema que plantea la mecánica cuántica es el de la relación entre la teoría y la realidad. El núcleo de este artículo va a tratar de este problema.

## Principales problemas

Conceptualmente los primeros problemas que pone la teoría provienen del estado del formalismo matemático. Las matemáticas sirven para describir los sistemas físicos y su evolución en el tiempo en ciertos tipos de contextos experimentales. Las descripciones matemáticas fundamentales corresponden a la E. Schrödinger y la de W. Heisenberg<sup>2</sup>. El principio de complementariedad<sup>3</sup> asegura que ambas descripciones son equivalentes. El problema matemático no es tanto la presencia de estas dos descripciones en paralelo, sino que se refiere a los resultados obtenidos a partir de ambas descripciones. Las ecuaciones describen una evolución lineal y continua del sistema hasta el momento en el que existe una interacción, v.g. un acto de medición, momento en el que el sistema objeto colapsa en un resultado concreto. Esta reducción, repentina, casual y drástica de todos los resultados posibles a uno solo, invita a pensar la física que hay detrás probabilísticamente. Por esta razón, se plantea la cuestión del valor de esta probabilidad: ¿tiene ésta sólo un valor epistemológico o, en cambio, habla de una característica ontológica del mundo físico, una característica que introduciría la indeterminación en el corazón de nuestra realidad? Según Einstein, como veremos más adelante, la probabilidad sólo tiene valor epistemológico. De hecho, en su opinión, la realidad no es aleatoria, sino que tiene un fondo determinista incluso si no se conoce. De alguna manera, Einstein se esperaba que los sistemas físicos fueran tipos de objetos, es decir, entidades teoréticas a las que correspondían asignaciones ontológicas reales. Sin embargo, cuando no hay objetos, no se puede, ni mucho menos, asignar ningún tipo de realidad física. Así que, en primer lugar, hay que preguntarse si hay objetos en el mundo físico y, en caso afirmativo, con qué tipo de objetos estamos tratando.

Para poder responder a esta pregunta, vamos primero tratar de los tres problemas fundamentales de la nueva teoría: el problema de la medición, el problema de la localidad y la no-localidad y el problema de la causalidad.

---

2 Cf. G. Auletta, G. – S.–Y. Wang, *Quantum Mechanics for Thinkers*, Sec. 4.6

3 El Principio de complementariedad fue formulado por primera vez por Bohr en 1927. Cf. G. Auletta, *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, 136 ; y F. Selleri, *Le grand débat de la théorie quantique*, 100.

## 1. El problema de la medición.

A pesar de que en la mecánica clásica los resultados de la medición son predecibles debido a que tanto el resultado como las leyes son deterministas, no sucede así según la mecánica cuántica. De hecho, los resultados de las diferentes mediciones, lo que podemos definir como eventos, son aleatorios, a pesar de que las leyes generales de la teoría son deterministas<sup>4</sup>. ¿Cómo explicar esta dicotomía? Son muchas las soluciones dadas a este problema, soluciones que pasan a través de la intervención de la mente del investigador, que conducen a la *Many World's Interpretation* (MWI, de ahora en adelante) o a la teoría de variables ocultas.

Las diferentes interpretaciones pueden dividirse en dos grandes grupos de características semejantes: las interpretaciones subjetivistas y las objetivistas. Antes de entrar a describir un poco por encima la mayor parte de ellas, conviene indicar que en física se miden variables o grados de libertad de un sistema, tales como la posición, el impulso, la energía, etc. Clásicamente se habla de variables en relación a estos parámetros que son los que definen el estado de un sistema. Todavía en el mundo de la física clásica, se supone que las variables son continuas y perfectamente determinadas en sí mismas. Sin embargo, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, eso no es así: hay discontinuidades básicas y no siempre sucede que todas las variables tengan valores determinados en un cierto contexto experimental. Por esta razón, en lugar de variables, en mecánica cuántica se habla de observables. Observables son, pues, la posición, el impulso o la energía, por ejemplo, de un sistema cuántico en general.

Von Neumann entendió el proceso de medición como la interacción entre un sistema físico y un observador consciente, esto es, capaz de leer los valores del aparato de medición y así obtener el valor de un determinado observable: según esta forma de ver las cosas, sin esta interacción con la subjetividad humana (la del científico que lee y entiende la medición) no sólo no hay medición posible, sino que ni tan siquiera se realiza el colapso del sistema en un resultado determinado y este continua en su superposición<sup>5</sup>. Estas ideas fueron aceptadas y desarrolladas más explícitamente por London y Bauer, en 1939, los cuales consideraron que esta reducción se produce en el momento en el que un ser inteligente observa el sistema, comprendiendo la actividad de la mente como una acción física e intentando así resolver la paradoja del gato de Schrödinger.

En un artículo de 1935, Schrödinger<sup>6</sup>, haciendo balance de todos los problemas planteados por la mecánica cuántica y las interpretaciones dadas has-

4 VON NEUMANN, J., *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, p. 233. Cf. G. AULETTA, *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, 220.

5 "Es un acto de percepción subjetiva la que crea la reducción del paquete de ondas". F. SELLERI, *Le grand débat de la théorie quantique*, 116.

6 E. SCHRÖDINGER, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik». Véase también J. MEHRA – H. RECHENBERG, *The Historical Development of Quantum Theory*, VI, p. 738 y, finalmente, A. FINE, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*.

ta la fecha, criticaba la idea de que la realidad fuera tan indeterminada como parecía ser según la nueva teoría, especialmente, según sugería el principio de superposición. En este contexto planteó un experimento ideal conocido como la paradoja del gato de Schrödinger. El experimento presenta un gato encerrado en una caja en la cual hay un frasco de veneno volátil y un martillo que puede caer sobre el frasco y romperlo. El martillo está conectado a un dispositivo de disparo, al que se une un contador Geiger activado por un átomo radiactivo. Si el átomo decae, el contador se activa y el martillo cae rompiendo el frasco; el frasco desprende el veneno y el gato muere. Si se observa la caja al cabo de un rato, el gato estará muerto o estará vivo. Pero, dado el carácter probabilístico de la decadencia radioactiva, el sistema se encuentra en superposición entre “gato vivo” y “gato muerto”, lo cual contradice la experiencia cotidiana. Lo extraño del caso es que si se quiere saber con exactitud si el gato estará vivo o muerto y se abre la caja, entonces la superposición entre estos dos resultados posibles se elimina y nos encontramos con la reducción del sistema a uno de esos dos resultados, sin posibilidad de predecir a priori en cuál de ellos se determina. Lo paradójico reside en el estado del gato antes de abrir la caja: estaría en una superposición entre vivo y muerto. El gato de Schrödinger “implica que no podemos hablar de un objeto separado y que no podemos saber *a priori* qué valor de un observable es el correcto”<sup>7</sup>.

Wigner, ensanchó el alcance de esta interpretación sosteniendo que “el argumento en favor de una diferencia de papeles jugados por los instrumentos de observación inanimados y los observadores dotados de consciencia es enteramente convincente en la medida en que se aceptan las afirmaciones de la mecánica cuántica ortodoxa en todas sus consecuencias”<sup>8</sup>. En el caso particular de la paradoja del gato de Schrödinger esto se traduce en el hecho de que, cuando un observador dotado de consciencia observara el gato, dejaría de cesar la superposición de los estados, en virtud de un acto trascendente de la consciencia<sup>9</sup>. Para el desarrollo de su teoría, el físico de origen húngaro propuso otra paradoja, llamada del amigo de Wigner<sup>10</sup>. En pocas palabras: si un amigo mío está mirando a un sistema cuántico con dos posibles estados y yo le interrogo sobre lo que está viendo, o bien soy yo quien reduce el sistema global amigo-sistema de observación a un único resultado determinado, con lo cual impongo a mi amigo ver el sistema de observación tal y como me lo ha descrito —lo que implica que yo puedo obrar en el pasado sobre la consciencia de mi amigo que permanece subordinada a la mía, llegando al solipsismo—; o bien, es mi amigo quien reduce el sistema a un resultado determinado, pero no por ser él equiparable a un aparato de medición sino por el hecho de tener consciencia, esto es, por algo irreducible por definición a lo material. Wigner rechazó la primera de las dos opciones para afirmar la segunda: según Wigner, es la toma de consciencia de la impresión la que altera el sistema cuántico.

7 G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 362.

8 E. P. WIGNER, «Remarks on the Mind-body Question», 178.

9 Cf. S. ORTOLI - J. PHARABOD, *El cántico de la cuántica*, 72.

10 Paradoja del amigo de Wigner según S. ORTOLI - J. PHARABOD, *El cántico de la cuántica*, 74. Puede verse también E. P. WIGNER, «Remarks on the Mind-body Question», 173, 176-177, o G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 231-232.

co<sup>11</sup>. Si la consciencia puede alterar el sistema físico, eso es debido al primado de la consciencia sobre la materia: Wigner tomó tan seriamente su propuesta que llegó a proponer la fabricación de una "célula psico-eléctrica" para poder medir la acción de nuestra consciencia sobre la materia<sup>12</sup>. El mayor problema de una interpretación que pone al observador como solución al problema de la medición reside en la intersubjetividad: en efecto, esta solución no puede reconciliarse con el acuerdo intersubjetivo entre observadores independientes<sup>13</sup>. Además, "esta interpretación *presupone* un dualismo mente-cuerpo. Si la consciencia fuese sólo otra propiedad física entonces (...) las funciones de onda de los sistemas físicos se colapsarían en el contexto de ciertas configuraciones físicas complejas. (...) Si el dualismo es válido, entonces el criterio del colapso [la reducción] puede ser verdaderamente fundamental. Más aún, el hecho de que la causa del colapso [la reducción] sea externa al procesamiento físico hace posible una teoría mucho más simple. Todos los sistemas puramente físicos estarían ahora gobernados únicamente por la dinámica de Schrödinger; la muy diferente dinámica de la medición tendría una fuente independiente"<sup>14</sup>.

Desde otro punto de vista bien diferente, rechazando la reducción, repentina, casual y drástica de todos los resultados posibles a uno solo, y basándose en la interpretación estadística de la medición, se ofrecen otras visiones del problema. La interpretación estadística sugiere que siendo la mecánica cuántica una teoría estadística, sus objetos tienen que ser tratados como conjuntos estadísticos y nunca como entidades individuales<sup>15</sup>. En otras palabras, para determinar un estado es necesario no un solo acto de observación sino con gran número de ellos por lo que la mecánica cuántica no trata de resultados determinados aleatoria y drásticamente sino de predicciones basadas en con-

11 "The important point is that the impression which one gains at an interaction may, and in general does, modify the probabilities with which one gains the various possible impressions at later interactions. In other words, the impression which one gains at an interaction, called also the result of an observation, modifies the wave function of the system. The modified wave function is, furthermore, in general unpredictable before the impression gained at the interaction has entered our consciousness: it is the entering of an impression into our consciousness which alters the wave function because it modifies our appraisal of the probabilities for different impressions which we expect to receive in the future. It is at this point that the consciousness enters the theory unavoidably and unalterably. If one speaks in terms of the wave function, its changes are coupled with the entering of impressions into our consciousness. If one formulates the laws of quantum mechanics in terms of probabilities of impressions, these are ipso facto the primary concepts with which one deals". E. P. WIGNER, «Remarks on the Mind-body Question», 172.

12 Cf. F. SELLERI, *Le grand débat de la théorie quantique*, 115.

13 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 232. Como nota curiosa podemos citar el siguiente comentario de A. J. LEGGETT que da al terminar su presentación de la teoría de Wigner: "(...) remark that the very meaning of 'consciousness' is itself the subject of furious controversy among philosophers, psychologists and others, and that it may be somewhat dangerous to 'explain' something one does not understand very well by invoking something one does not understand at all", «Reflections on the quantum measurement paradox », 94.

14 D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 426. Chalmers, pero, no acepta la idea de que el mundo tenga dos tipos diferentes de dinámica en su nivel básico, con lo cual rechaza la idea de la reducción.

15 "In this interpretation the description of the final state of the 'universe' after a measurement has been made merely gives us statistical information about the distribution of results obtained in a long series of trials using identical pieces of apparatus and identical initial conditions, and nothing more; the question 'In what macroscopic state is this particular apparatus on this particular occasion?' is one which simply does not lie within the competence of quantum mechanics to answer. The formalism is simply a calculus for predicting, from given macroscopic initial conditions, the probability of various macroscopic outcomes". A. J. LEGGETT, «Reflections on the quantum measurement paradox », 95.

juntos de experimentos idénticos. Una interpretación estadística entendida de esta forma es inadecuada por ser incoherente con algunos fenómenos experimentales tales como la auto-interferencia<sup>16</sup>. Todavía es interesante analizar una interpretación basada en esta última, la anteriormente mencionada MWI.

Esta teoría supone que la mecánica cuántica puede ser una descripción completa y global de todo el universo físico, de forma que se puede comprender toda la realidad, de forma reductiva, según micro-entidades: esto es, el universo puede ser entendido como un sistema que viene descrito por una función de onda. La evolución de esta función de onda es a su vez determinada por la ecuación de Schrödinger. Ésta fue la interpretación dada por Everett, el cual mediante la noción de “estado relativo” estableció una conexión entre el sistema observado y el aparato, que corresponde a una fuerte correlación entre los estados del sistema y del aparato, asegurando una condición necesaria pero no suficiente a la medición. Esta correspondencia genera, después de la interacción entre el sistema y el aparato, una función de onda total que puede ser representada como la superposición de pares de estados de subsistemas, según el teorema de Everett, que permite el almacenamiento de los resultados de la medición en la memoria del aparato. De este modo, todos los valores de la medición de un observable existen a la vez, del mismo modo que todas las lecturas del aparato de medición, con lo que, de hecho, no se da una reducción aleatoria a un resultado determinado ni tan siquiera una discontinuidad (pierde también el carácter drástico). Everett pretendía eliminar así la elección entre los diferentes resultados posibles y proponer una concepción en la que no hubiera necesidad del aparato macroscópico de medición. El problema principal de esta concepción reside en el hecho de que cuando se realiza una medición se obtiene sólo un valor, esto es, un estado relativo y no una superposición de éstos. Para resolver esta dificultad Everett, extendió la superposición hasta el observador, asociando cada uno de los estados de la superposición a observadores separados, de forma que en la medición aparecen dos observadores, cada uno de los cuales experimentando un estado discreto del único mundo, esto es, un resultado. El “estado relativo” no es sino la percepción del mundo discreto y separado correspondiente al observador<sup>17</sup>.

De Witt desarrolló la formulación de Everett analizando la noción de probabilidad, no comprendída como ignorancia subjetiva. En otras palabras, la probabilidad mecánico-cuántica era, a los ojos de De Witt, algo objetivo y absoluto, no relativo a ningún sujeto, de forma que el acto de medición no puede cambiar la distribución *a priori* de probabilidad. Si bien es cierto que la probabilidad no es la medición de nuestra ignorancia, no por eso tiene que ser algo

---

<sup>16</sup> La auto-interferencia, un fenómeno típicamente mecánico-cuántico, fue verificada experimentalmente por primera vez por Pfleegor y Mandel. Sucesivamente, ulteriores confirmaciones llegaron de la mano de, entre muchos otros, Grangier, Roger and Aspect (1986) and by Franson and Potocki (1988). Cf. G. AULETTA - M. FORTUNATO - G. PARISI, *Quantum Mechanics*, Subsec. 1.2.3

<sup>17</sup> Cf. D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 435-436. En un interesante artículo el físico irlandés A. Whitaker, analizando algunas ambigüedades del trabajo de Everett, llega a proponer tres posibles formas de comprender esa teoría: una primera que se centra en el formalismo matemático; una segunda que contempla el desdoblamiento de un único observador y una tercera que concibe las posibilidades no observadas como “perezosas”. A. WHITAKER, «Many Worlds, Many Minds, Many Views», 375-381.

absoluto: depende del contexto experimental y de las interacciones realizadas. Esto es hasta tal punto cierto que la introducción de un aparato de medición, incluso si no hay interacción, cambia la distribución de probabilidades con respecto a un observable. La hipótesis de De Witt es válida sólo en el caso de sistemas aislados, pues sólo en este caso las distribuciones de probabilidad no cambian. Esta interpretación no resuelve el problema de la medición, pues la interrelación del sistema con el aparato de medición impide (lo que llamaremos *entanglement*) su aislabilidad. Si Everett entendía la función de onda total, resultante de la interacción entre el sistema del aparato de medición, como la superposición de pares de estados de subsistemas, De Witt entendió este conjunto de pares como mundos alternativos, en cada uno de los cuales una parte del aparato de medición obtiene uno de los valores de la superposición apenas indicada. Así se forma un conjunto de universos paralelos, reales pero aislados entre sí. Ésta, y no la teoría de Everett que hace referencia a un único mundo, es propiamente la MWI.

Además de una innecesaria multiplicación de los estados o de los universos que realizan ambas teorías, una de las dificultades principales es la hipótesis de la aislabilidad. Esta hipótesis mina en su base las dos interpretaciones, pues impide la interferencia entre los posibles valores del sistema antes de la reducción, ya sean observados por diferentes observadores, en el primer caso, ya sean observados por observadores pertenecientes a dos mundos diferentes, en el segundo. Si eso fuera posible, si hubiera comunicación entre estos observadores, se produciría la transición de un estado puro (en total interferencia) a un estado reducido, presupuesto que niega la MWI. De hecho, este grupo de interpretaciones ni eliminan la extraña naturaleza de la medición ni eliminan el subjetivismo del que querían desprenderse, pues a fin de cuentas, suponen que la medición causa la creación de mundos alternativos, en la formulación de De Witt, o precisa de una consciencia universal, en la hipótesis de Everett, que impida que diferentes observadores vean diferentes componentes en un mismo experimento, con lo cual se afronta la misma dificultad que se encontraba en la teoría de Wigner<sup>18</sup>.

David Chalmers ve en la teoría de Everett una omisión importante en el tratamiento de la relación mente-cuerpo, que le hace postular sin justificar una descomposición objetiva. Por eso, se pregunta si no sería posible, en lugar de identificar cada componente con un observador distinto, asociar todos los estados a un sólo observador, con un estado mental superpuesto y confuso, centrándose nuevamente en la consciencia, aunque con un matiz nuevo, pues al negar la reducción que induce la medición y sostener la supremacía de la ecuación de Schrödinger, la pregunta fundamental a la que habría que responder es cómo ciertas estructuras físicas (regidas por la continuidad y la reversi-

18 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 250. "It was shown by Everett that if two observers measure the same observable, they will obtain the same result; this will be so in each branch of the wave-function. In a many views plus consciousness (MVC) interpretation, though, there is a further question. How can I be sure that the you who obtain the same result as me are yourself conscious?". A. WHITAKER, «Many Worlds, Many Minds, Many Views», 383.

bilidad) originan la experiencia (que aparece discreta e irreversible)<sup>19</sup>. Para no postular una teoría de la consciencia *ad hoc* que, aun respondiendo a estas necesidades, rompiera la simplicidad de aceptar, al igual que hace Everett, como única ley universal la ecuación de Schrödinger, el filósofo americano propone “una teoría de la consciencia *independientemente motivada* que puede responder a esa pregunta (...) y que implique el Principio de superposición”<sup>20</sup>.

La teoría de la consciencia aducida precisa de la existencia de mentes asociadas por superposición además de mentes no superpuestas. Las mentes discretas experimentan el mundo en forma totalmente discreta. Aun así, se postula una evolución de las mentes de forma que una mente evoluciona en todos los estados de su superposición dando lugar a otras mentes que, desde su punto de vista, son privilegiadas, esto es, son esa y no otra mente. La indicatividad garantiza la identidad de la mente evolucionada<sup>21</sup>. Con todo este aparato conceptual, Chalmers puede mantener la superposición de la función de onda del universo a la vez que permitir la existencia de sujetos que experimenten el mundo discretamente. Si bien esta propiedad permite de algún modo superar las dificultades antes indicadas, por el hecho de que los sujetos no hacen reducir la función de onda que mantiene su superposición a nivel global, nos encontramos ante una interpretación que, del mismo modo que la MWI y la teoría de Everett, precisa de una función de onda para el universo, hipótesis que, además de no tener mucho sentido filosóficamente, (pues ¿qué significa una función de onda global en perfecta superposición?), no está libre de dificultades al nivel físico. Una función de onda que expresara el estado del universo estaría siempre en superposición en relación a un punto de vista universal, que es en sí un concepto muy problemático. El problema reside en que si hubiera una única función de onda viviríamos en un universo donde en realidad las elecciones estarían siempre suspendidas: esto es, no se podría saber nunca si un posible fotón fuera una partícula o una onda. Por eso, sólo sería admisible una función de onda universal si admitiéramos la posibilidad de que o bien el observador de esa función de onda fuera Dios mismo, conclusión que está muy por fuera del alcance de la mecánica cuántica<sup>22</sup>, o bien que el observador estuviera en otro universo, lo cual está fuera de toda verificación y que, de hecho, no hace sino trasladar el problema aun ámbito más amplio: ¿Dónde encontrar un observador para la función de onda de ambos universos a la vez?<sup>23</sup> Por lo tanto, negando la posibilidad de una función de onda del universo, se renuncia a la posibilidad de describir el universo como

19 Cf. D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 436-438.

20 D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 438.

21 Cf. D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 439, 441-443.

22 En relación a la acción directa de Dios en el mundo cuántico, suscribimos totalmente lo que Robert Russell, en su artículo sobre la acción divina y la mecánica cuántica, señala cómo algo que quiere sostener su interpretación, “does not reduce God to a natural cause, nor does God's direct action at the quantum level give rise to phenomena that cannot be explained by science. It affirms that science is characterized by methodological naturalism, and thus it abstains from viewing “God” as an explanation within science. Instead, God's direct action at the quantum level is hidden in principle from science, supporting the integrity of science and yet allowing science to be integrated fruitfully into constructive theology where “God” as an explanation of natural events is appropriately and fully developed”. R. RUSSELL, «Divine action and Quantum Mechanics», 296.

23 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 453

un todo, como un sistema cerrado –con el que sería imposible interactuar desde dentro. Chalmers mismo admite que estamos ante una interpretación casi imposible de creer y, a pesar de la fascinación que siente por la simplicidad de una descripción con una única función de onda y una única ley, la ecuación de Schrödinger, termina aceptando como más probable el dualismo mente-cuerpo que hace inviable su propia teoría<sup>24</sup>.

## 2. El problema de la localidad y no localidad.

La Mecánica Clásica prevé sólo efectos locales: acciones locales de tipo fundamentalmente mecánicos inducen sólo efectos locales. La mecánica cuántica descubre, en cambio, que las acciones locales pueden tener efectos no locales, no vinculados mecánicamente a sus causas locales, pero de alguna manera relacionadas. Esta novedad no fue fácilmente aceptada: ha habido y todavía hay interpretaciones que no admiten esta posibilidad y ofrecen explicaciones de tipo mecánico y determinista que, sin embargo, contradicen conceptos básicos de la física contemporánea como el límite que marca la velocidad de la luz.

En las primeras etapas del desarrollo de la teoría, una gran mente como Einstein, junto a Podolsky y Rosen (EPR), plantearon la cuestión crucial de si la mecánica cuántica representaba una descripción estadística de nuestro mundo o más bien una descripción fundamental<sup>25</sup>. En otras palabras, EPR estaban inclinados a pensar que las probabilidades cuánticas (y por lo tanto también las leyes cuánticas, que son probabilísticas) representarían la medición de nuestra ignorancia con respecto a la micro-realidad que no es inmediatamente accesible. Para saber si la mecánica cuántica podría ser una descripción completa de la realidad, propusieron un argumento paradójico. La intención de este argumento queda claramente manifestada desde las primeras palabras del artículo. Teniendo bien presente la distinción entre la realidad independiente de la teoría y los conceptos con los que la teoría trabaja, se pretende que los conceptos representen la realidad, con lo que una teoría será aceptable (tendrá éxito) si es correcta y si su descripción es completa. Se entiende que una teoría es totalmente correcta si cada elemento de la teoría tiene su contraparte en la realidad. Por otro lado, una teoría es completa si cada elemento de la realidad tiene su contraparte en la teoría. EPR entienden por elemento de la teoría aquella realidad física a la que corresponde el valor de una cantidad que puede ser predicha con certeza, sin que de ningún modo se perturbe el sistema, siendo éste un criterio que, a sus ojos, puede agotar todas las posibilidades de reconocimiento de la realidad física<sup>26</sup>. “Este criterio puede tener numerosas aplicaciones en el dominio macroscópico donde aparece como manifiestamente verdadero. (...) Debe ser notado que el criterio supone solamente la existencia de un elemento de la realidad, sin especificar su naturale-

24 Cf. D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 447.

25 A. EINSTEIN - B. PODOLSKY - N. ROSEN, «Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?», 138.

26 Cf. A. EINSTEIN - B. PODOLSKY - N. ROSEN, «Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?», 138.

za o su referencia al valor medido de la cantidad física seleccionada”<sup>27</sup>. El artículo intenta demostrar que si se asume el criterio anterior como una condición suficiente de la realidad física, entonces la mecánica cuántica no satisface la condición de completitud. Esta demostración quiere probarse mostrando que hay elementos de la realidad que no tienen su contrapartida en la teoría, en concreto, viendo que si podemos medir simultáneamente dos observables no-conmutables entre sí, se encuentra una realidad sin contrapartida en la teoría, dado que la teoría cuántica asegura que no podemos tener simultáneamente valores determinados de ambos observables<sup>28</sup>. Por esta razón, EPR pensaban que la mecánica cuántica era una teoría incompleta. El principal objetivo de la crítica de EPR se focalizó en el principio de incertidumbre.

EPR propone un experimento mental según el cual dos partículas cuánticas gemelas, nacidas de una misma fuente común, se separan a continuación para no interactuar más entre si localmente. Medir en una de ellas la ubicación, por ejemplo, debería de dar un cierto valor. Gracias a las leyes de la mecánica cuántica, debería ser posible predecir el valor de la posición de la otra partícula, incluso sin interactuar con ella, esto es, sin perturbarla. Esto permitiría pensar que este valor es objetivo y real, independientemente de nuestra decisión de realizar una medición. Del mismo modo se podría hacer una medición de la cantidad de movimiento y llegar a la misma conclusión. Entonces, la partícula gemela tendría ya sea la posición como el impulso perfectamente determinados. El principio de incertidumbre de Heisenberg indica que no podemos tener la determinación perfecta y simultánea de la posición y la cantidad de movimiento. Por lo tanto, a los ojos de EPR, negando que el principio de incertidumbre fuera contradictorio, la única manera de resolver la antinomia presentada sería admitir que la mecánica cuántica es sólo una descripción estadística y, por lo tanto, incompleta de la realidad física.

Para poder establecer un experimento que permita determinar si EPR tenían razón o no, es bastante difícil tratar con “variables continuas” como son la posición y la cantidad de movimiento. Por esta razón, el físico anglo-norteamericano D. Bohm, propuso, en 1951, abandonar ese tipo de variables y utilizar variables que pudieran tomar pocos valores como por ejemplo el *spin* de los electrones, protones o neutrones: de este modo se simplificaba el argumento y se abría el camino para su verificación experimental. Bohm propuso considerar dos partículas de *spin*  $\frac{1}{2}$  que estén en un estado singlete, esto es, el *spin* total del cual sea 0. En un cierto momento se las deja separar de forma que en un tiempo posterior la distancia es suficientemente grande para considerar que no pueden interactuar. Teniendo en cuenta que no hay ninguna interacción, el estado total del sistema continúa siendo un singlete y el momento angular se conserva. Esto conlleva que, si medimos el *spin* de una de las partículas, sabremos con exactitud el de la otra. Pero, dado que la función de onda del sistema es rotacionalmente invariante, el resultado no es tan obvio como parecería de la mera conservación del momento angular total.

---

27 Cf. F. SELLERI, *Le grand débat de la théorie quantique*, 124.

28 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 534.

La invariancia rotacional hace que, si se mide una componente direccional del *spin* de una de las partículas, la medición de la misma componente direccional del *spin* de la otra debe ser, según la mecánica cuántica, opuesta. De este modo, parece que la medición del *spin* sobre una partícula decida el resultado de la medida sobre la otra partícula separada, violándose el Principio de separabilidad<sup>29</sup>.

Aquí reside, para EPR, el *quid* de lo paradójico: resulta casi absurdo sostener que la medición de una variable (posición, cantidad de movimiento o *spin*) en una partícula fije al mismo tiempo la de la segunda, pudiendo estar ambas partículas muy separadas. En otras palabras, lo absurdo del caso resulta del hecho de que si la medición de una variable en una partícula determina los valores en la otra, las variables no poseen realidad física, según el criterio arriba anunciado. Por lo tanto, si se asume ese criterio de la realidad física, el resultado de la paradoja lleva al artículo a concluir que la teoría cuántica no se sostiene y postula la existencia de unos parámetros suplementarios o variables ocultas, que la física cuántica no tiene en cuenta, las cuales sirven para determinar antes de la medición la posición o la cantidad de movimiento, en el caso propuesto en el artículo EPR. Nacía, de este modo, la teoría de las variables ocultas<sup>30</sup>.

La teoría de las variables ocultas intenta completar la mecánica cuántica en un sentido determinista asumiendo la separabilidad. Supone que los sistemas cuánticos tienen propiedades o elementos de realidad, determinados incluso en ausencia de toda medida. Son estas propiedades, ocultas, las que completan la descripción de la teoría cuántica. Más precisamente, definimos "las variables ocultas con respecto a una teoría, a aquel conjunto de variables de un sistema que no son detectables experimentalmente mediante el aparato instrumental de la teoría, pero que permiten obtener los valores del conjunto total de los observables que describe el sistema físico"<sup>31</sup>. Una teoría de variables ocultas supone que no sólo el estado del sistema y sus observables están perfectamente determinados, sino que lo está, por lo tanto, su evolución dinámica. "Todas las teorías de variables ocultas son de la opinión que todas las entidades ontológicas objeto de estas teorías no son relativas a ninguna

29 Este principio supone que los sistemas que no mantienen ningún tipo de actividad entre sí son separables, es decir, un sistema no influye en las propiedades del otro. Concibiendo la materia en modo corpuscular, este principio conduce a la posibilidad de la factorización: el sistema puede ser reducido a sus elementos constitutivos y podemos suponer la independencia de las fuerzas o de los movimientos que componen el sistema. Así, todo puede ser descompuesto en movimientos simples y el movimiento total es la composición de movimientos simples, lineales, armónicos, térmicos, etc. Un problema físico cualquiera puede ser reducido al problema de sus componentes. "The principle of separability may be expressed in the following way: Given two non-interacting physical systems, all their physical properties are separately determined, or, in other terms, the result of a measurement on one system cannot depend on a measurement performed on the other system. The meaning of the principle is the following: Two systems can be interdependent only through a physical interaction (for example some form of potential energy)". G. AULETTA, «Critical Examination of the Conceptual Foundations of Classical Mechanics in the Light of Quantum Physics», 8. Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 536-537.

30 Cf. S. ORTOLI - J. PHARABOD, *El cántico de la cuántica*, 53-54. Cf. también M. REDHEAD, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*, 71-81.

31 G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 543.

forma de medición, o más en general, de interacción”<sup>32</sup>. Por esta razón, las teorías de las variables ocultas son o deberían ser teorías completas según la intención de EPR.

John von Neumann, en 1932, presentó en un artículo un teorema que probaba la inexistencia de las variables ocultas. El punto de partida de von Neumann consiste en considerar que es imposible aislar, mediante la medición, conjuntos de sistemas físicos microscópicos donde todos los elementos estén caracterizados por el mismo valor de dos variables conjugadas. Dicho de otra forma, es imposible experimentalmente seleccionar estados sin dispersión correspondientes a los valores de dos variables conjugadas. Esta imposibilidad se atribuye al carácter perturbador de las mediciones de una de las variables sobre la otra. Pero se puede imaginar que los valores de las variables existan antes de ser perturbadas, esto es, se puede suponer que los conjuntos sin dispersión existan independientemente de toda referencia experimental. De este modo, idealmente, se pueden considerar a estos conjuntos sin dispersión como aislados, atribuyendo a los elementos de estos conjuntos el valor preciso de una o más variables ocultas. Este procedimiento sólo será cierto si, según von Neumann, se puede asegurar que todo conjunto con dispersión puede ser representado como una mezcla de conjuntos sin dispersión. El teorema demuestra que las predicciones cuánticas sobre conjuntos con dispersión no pueden ser reproducidas por mezclas de conjuntos sin dispersiones, por lo que, consecuentemente, un estado puro no puede ser separado en conjuntos que correspondan al estado de una variable oculta. Así, las teorías de variables ocultas quedaban excluidas. Según M. Bitbol, pero, este teorema no pudo contradecir las teorías de las variables ocultas, sino que aportaba las primeras precisiones sobre lo que éstas no podían pretender ser si querían dar cuenta de los fenómenos mecánico-cuánticos. El argumento principal del filósofo francés se basa en el hecho que “von Neumann admitía implícitamente que para que un estado sea sin dispersión es necesario y suficiente que esté compuesto de elementos caracterizados por los mismos valores precisos de las variables que rigen la mecánica cuántica (...), esto es, la noción de dispersión permanece definida en relación exclusiva a los observables de la mecánica cuántica”<sup>33</sup>.

Hemos dicho que la idea de Bohm fue la de proporcionar un modelo de más fácil experimentación a la paradoja de EPR. Además, Bohm propuso una teoría de variables ocultas, que permitió hacer renacer de la discusión después del teorema de von Neumann, realizando una fuerte crítica a la interpretación según la cual la función de onda sería la mejor descripción de las entidades cuánticas, la llamada interpretación de Copenhague. En la intención de Bohm no sólo estaba presente la construcción de una teoría determinista del mundo mecánico-cuántico, sino que también pretendía garantizar una cierta objetivi-

---

32 G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 544. Cf. J. BRICMONT, «La non-localité et la théorie de Bohm», 30-31.

33 M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 346. Para mayor claridad sobre el teorema, cf. L. CARUANA, «John Von Neumann's 'Impossibility Proof' in a Historical Perspective», 109-116.

dad independiente del observador<sup>34</sup>. La teoría de Bohm continuaba la teoría de la onda-piloto desarrollada por De Broglie, con la diferencia que su teoría podía describir el movimiento de varias partículas, a la vez que asignaba a la onda-piloto un campo de información más bien que un campo de fuerzas. La onda-piloto de Bohm, sin dejar de ser la función de onda de la ecuación de Schrödinger, consiste en un campo de información que fija unívocamente la trayectoria de cada una de las partículas. Este campo de información depende del concepto de potencial cuántico desarrollado por Bohm, que en su última interpretación se concibe como información activa, la cual depende sólo de la forma de la onda y no de la amplitud de ésta<sup>35</sup>. Propuso también que la multidimensionalidad de la información debería corresponder a una cierta extensión de la estructura del espacio de Hilbert. En consecuencia, la teoría se presenta como contextual. En efecto, la forma de la onda-piloto depende de la configuración de la totalidad del ambiente circunstante, de forma que el movimiento de cada una de las partículas depende de las modificaciones de éste. Esta concepción holística, precisa a nivel físico de un éter o campo de conexiones a velocidades superiores a la de la luz en un sistema de referencia privilegiado<sup>36</sup>. Esta teoría es, por lo tanto, fuertemente no-local, dado que supone que el comportamiento de las partículas puede depender de la configuración de todas las otras, situadas tan lejos como se quiera. Una ulterior modificación de la teoría proponía comprender los efectos no-locales como efectos locales en un sistema de referencia universal realizados a velocidades superiores a la de la luz<sup>37</sup>. Entre algunos de los problemas mayores que presenta la teoría, cabe indicar la diferencia existente entre las trayectorias previstas por la teoría y las observadas<sup>38</sup>.

Las críticas que siguieron al teorema de von Neumann, fueron sintetizadas en el artículo de J. S. Bell del año 1966<sup>39</sup>. El contenido de este artículo puede resumirse como sigue: "las teorías de variables ocultas no son imposibles, pero tienen que cumplir ciertas condiciones de limitación, las llamadas desigualdades de Bell"<sup>40</sup>. El mérito de J. S. Bell fue el de descubrir un método concreto para expresar el conflicto existente entre las teorías de las variables ocultas y las predicciones de la mecánica cuántica, mediante una desigualdad que hace entrar en juego las variables propuestas por Bohm para la paradoja de EPR<sup>41</sup>. Dos son las hipótesis iniciales en las que se basa el teorema de Bell: una hipótesis de realismo y una de localidad. La primera afirma que la existencia de propiedades pertenecientes a los sistemas físicos se representa por

34 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 556-557.

35 Cf. M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 355-356. Cf. también G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 557-558.

36 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 561.

37 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 561.

38 Otras teorías que no vamos a analizar son las llamadas interpretaciones modales. En síntesis, proponen una evolución determinista para los estados mientras que suponen los valores de los observables sujetos a las constricciones estadísticas. Puede verse G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 563-564 y el libro de reciente aparición P. VERMAAS, *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics*.

39 J. S. BELL, «On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics», 397.

40 M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 348.

41 Cf. J. S. BELL, «On the Einstein Podolsky Rosen paradox», 403-408.

variables ocultas, lo que equivale a decir que los acontecimientos son independientes del contexto experimental de su comprobación. Por esta razón, podemos decir que este tipo de teorías de variables ocultas es no-contextual. La segunda sostiene que las propiedades y los acontecimientos no se influencian instantáneamente a una distancia arbitraria: son locales. En razón de estas hipótesis, Bell asignó al modelo EPR de Bohm unos parámetros ocultos de los que dependía únicamente la medida del *spin* de una partícula en una dirección, de forma que las distribuciones de probabilidad para ambas partículas resultaran independientes, dado que el principio de separabilidad prohibía ninguna interdependencia entre las partículas sin interacción dinámica. El problema está en saber si existe o no existe esta dependencia. Matemáticamente este problema se formula mediante la llamada desigualdad de Bell: una teoría de variables ocultas determinista basada en el principio de separabilidad debe satisfacer esa desigualdad mientras que la teoría cuántica la violaría<sup>42</sup>.

Bitbol resume las interpretaciones de las incompatibilidades entre las desigualdades de Bell y las predicciones de la mecánica cuántica de tres modos distintos. La primera rechaza las teorías de variables ocultas afirmando la imposibilidad de atribuir propiedades intrínsecas a los sistemas físicos. La segunda, aunque atribuye propiedades intrínsecas a los sistemas físicos, permite su influencia a distancias arbitrarias: niega la localidad. La tercera interpretación rechaza las predicciones de la mecánica cuántica, en particular allí donde se violan las desigualdades de Bell<sup>43</sup>.

Naturalmente, la tercera de las hipótesis es la que más fácilmente se puede dar a la verificación experimental, pues pone en tela de juicio las predicciones de la nueva teoría. A este fin fueron dirigidos los experimentos realizados por Alain Aspect en 1975 y 1982. El físico francés utilizó pares de fotones emitidos en la desexcitación de electrones de calcio excitados por rayos láser en un recipiente cilíndrico donde se ha hecho el vacío. Estos fotones son emitidos en todas las direcciones, aunque algunos de ellos entran en un dispositivo del cilindro que conduce a aparatos de medida de la polarización, esto es, son alejados en direcciones opuestas. Estos aparatos, con dos orientaciones, o bien dejan pasar al fotón o bien lo detienen. Al realizar el promedio de todos los productos de las mediciones simultáneas en una orientación de un polarizador y en una del otro, el resultado final violaba la desigualdad de Bell. Pero, el presupuesto inicial de este experimento era suponer que la fuente de fotones no dependiera de la orientación de los aparatos de medición: si este presupuesto no fuera cierto la violación de la desigualdad de Bell no implicaría una correlación entre los fotones.

En 1982, para despejar toda duda, realizó una importante modificación al experimento, interponiendo en el trayecto de los fotones un dispositivo de cambio de dirección extremadamente rápido, de forma que, separada convenientemente la fuente de fotones del aparato de medición, el tiempo necesario para que un fotón llegara al aparato de medición era dos veces superior al

---

42 Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 589-591.

43 Cf. M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 349.

tiempo que necesita el dispositivo de cambio de dirección para pasar de una dirección a la otra. De este modo se rompía la posible influencia entre la fuente y los aparatos de medida. Con esta nueva presentación, se continuaba violando la desigualdad de Bell, sin que pudiera atribuirse ahora a la influencia entre la fuente y el aparato de medida<sup>44</sup>. Esto implica que el estado del fotón no está determinado antes de la medición, de forma que, ya que son pares de fotones, la medición de la polarización en uno de ellos, implica que en el otro se dé la polarización opuesta, al mismo tiempo y sin interacción. Así, quedaban confirmadas las predicciones de la nueva física. La tercera de las interpretaciones dadas por Bitbol, arriba indicada, no puede sostenerse.

Una teoría de variables ocultas determinista, basada en el principio de separabilidad, está en abierta contradicción con la violación de las desigualdades de Bell que muestra el experimento de Aspect. Ese tipo de teorías presuponen que existe un mundo externo de entidades con propiedades bien definidas que pueden ser descubiertas simplemente por medición, los valores de las cuales coinciden con el resultado de aplicar la mecánica cuántica en modo estadístico<sup>45</sup>. Que las predicciones de la teoría cuántica no son puramente estadísticas, razón por la que para llegar a una teoría completa sería necesario postular la existencia de esas variables ocultas, parece ser el resultado más importante de la violación de las desigualdades de Bell. El problema de la separabilidad se pone para hacer frente a los problemas que pone la superposición a la medición: si se postulan variables ocultas que correspondan a todos los observables y de las cuales estos dependen, podremos aplicar la separabilidad sin más. El Principio de separabilidad es un elemento tan central de la filosofía natural moderna, que parece "lógico", esto es, normal dentro de una concepción físico-clásica del mundo, que al intentar elaborar una nueva teoría que pretenda completar la física cuántica se recurra a ese principio<sup>46</sup>. Además, debe añadirse que la mecánica cuántica, en cuanto teoría, está en contradicción con el Principio de separabilidad: la violación de éste es estructural a la teoría, pues corresponde a una propiedad lógico-algebraica. El Teorema de Kochen-Specker indica una contradicción algebraica en la que se cae cuando se intenta asignar valores concretos a todos los observables en todos los estados del sistema. Dado que una teoría de variables ocultas supone valores determinados para todos los observables, el Teorema de Kochen-Specker, de naturaleza puramente algebraica, es un fuerte impedimento para esas teorías<sup>47</sup>. Notemos que en esas teorías se supone que el valor del observable es independiente del camino cómo se llegue a él, esto es, independiente del contexto experimental.

44 Cf. S. ORTOLI - J. PHARABOD, *El cántico de la cuántica*, 58-63.

45 Cf. M. REDHEAD, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*, 45-48 et 119.

46 Podemos comprender desde esta óptica las siguientes palabras de F. Selleri cuando analiza las consecuencias que implica la paradoja EPR: "*Renoncer à l'existence d'éléments séparables de réalité, c'est renoncer à l'un des points d'appui les plus importants de la philosophie naturelle, avec toutes les conséquences que cela comporte sur notre vision du monde. (...) En examinant l'idée que la mécanique quantique n'est pas complète, nous avons conclu que : ou bien la mécanique quantique n'est pas correcte, ou bien le monde ne peut pas être analysé en termes d'éléments séparables de réalité. Cette alternative fait face à la physique moderne : l'un ou l'autre choix conduisent à un bouleversement de la philosophie naturelle*". F. SELLERI, *Le grand débat de la théorie quantique*, 160.

47 Cf. M. REDHEAD, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*, 119-121.

El problema del contextualismo<sup>48</sup> fue indicado como una razón por la que el teorema de Kochen-Specker no era aplicable a las teorías de variables ocultas. Mermin, siguiendo los resultados del examen de Peres, encontró una versión del teorema de Kochen-Specker más general que intentaba sobrepasar las dificultades del contextualismo. Lo interesante del resultado de Peres es la conclusión a la que llegó, suponiendo la separabilidad en la medición de la componente direccional del *spin* de una de las partículas de un par en estado de singlete, según la cual la mecánica cuántica violaría el Principio de separabilidad<sup>49</sup>.

Si se quieren mantener las teorías de variables ocultas y aceptar las predicciones de la mecánica cuántica, la única solución que existe es negar la localidad. "Una teoría de variables ocultas compatible con la mecánica cuántica debe ser necesariamente no-local"<sup>50</sup>. La no separabilidad manifestada experimentalmente y demostrada teóricamente se traduce en la propiedad de la no-localidad, que permite la influencia mutua de sistemas físicos tan distanciados como se quiera<sup>51</sup>. Antes de proseguir conviene notar que la no-localidad no implica la violación de la relatividad especial, en concreto, la superación de la velocidad de la luz (la llamada localidad de Einstein). Si, en el caso del experimento EPR con variables discretas, al medir el *spin* de una de las partículas podemos asegurar sin necesidad de medir cual será el de la otra, esto no significa que se haya transmitido ningún mensaje desde una partícula a la otra<sup>52</sup>.

Sentada esta premisa, podemos afirmar que la no-localidad cuántica se refiere a aquellas acciones a distancia que no tienen explicación en el mundo clásico. Estas acciones son efectos, condiciones, acontecimientos y especialmente las correlaciones existentes entre ellos. La no-localidad tiene su fundamento en el *entanglement* o la superposición de los sistemas, que impide la separabilidad, y se expresa mediante las llamadas correlaciones. La superposición es la fuente de la no-localidad en la medida en que la función

48 "Parler de contextualité [contextualidad] des événements, c'est dire que les événements ne sont même pas définis en l'absence de spécification d'un type de dispositif expérimental, et que le principe de bivalence ne vaut pas pour des propositions affirmant l'occurrence de ces événements lorsque le dispositif expérimental correspondant n'a pas été mis en œuvre. Parler de contextualisme [contextualismo] des déterminations ou des propriétés, au contraire, c'est commencer par poser que les propriétés existent indépendamment de la procédure expérimentale de leur mise en évidence, puis signaler que cette procédure, lorsqu'elle est mise en œuvre, les modifie systématiquement. La traduction des deux conceptions peut être exactement la même en termes de manifestations expérimentales, mais les visions du monde qu'elles favorisent sont profondément différentes". Cf. M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 351.

49 La demostración matemática, junto a la generalización de Mermin pueden verse en G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 555-556.

50 M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 350.

51 "L'idée de « localité » est fondée sur l'hypothèse raisonnable que deux objets interagissent d'autant moins que l'on fait croître leur distance relative". F. SELLERI, *Le grand débat de la théorie quantique*, 181. De modo más general, se puede definir el postulado de localidad como: "Etant donné deux objets A et B éloignés l'un de l'autre, les modifications de A produites par un quelconque accident arrivé à B (choc, interaction avec un troisième objet, désintégration, mesure, etc.) sont minimales, disons inférieures à 1 % pour n'importe quelle grandeur physique mesurable". F. SELLERI, *Le grand débat de la théorie quantique*, 182-183.

52 "(...) Nonlocality in the sense of instantaneous causal action-at-a-distance is to be avoided if at all possible, on pain of violating at any rate the spirit of special relativity". M. REDHEAD, "The tangled story of Nonlocality in Quantum Mechanics", 141. Cf. G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 625, 633-635.

de onda del sistema en superposición extiende la información del sistema en todas las dimensiones del espacio de las fases del sistema<sup>53</sup>. La no-localidad afecta no sólo a grupos de partículas, esto es, a estados en *entanglement* de varias partículas, sino que involucra la interferencia de una partícula consigo misma. Son varios los efectos observados experimentalmente de las propiedades no locales de los sistemas mecánico-cuánticos como, por ejemplo, el efecto Aharonov-Bohm, el famoso efecto túnel o el mismo efecto EPR<sup>54</sup>. La no-localidad es instantánea —aunque sin violar la relatividad—, es individuada —en el sentido que afecta a una entidad en concreto, por ejemplo, en la emisión de pares de partículas la no-localidad afecta partículas gemelas y no a cualquiera de las partículas emitidas—, es de alcance infinito —esto es, no decrece con la distancia—, pero no transmite ningún mensaje —razón por la que no se viola la relatividad<sup>55</sup>.

Notemos que ya en el mismo año en que EPR publicaron su artículo (es decir, 1935) otras dos grandes mentes de la física de ese momento, Bohr y Schrödinger, respondieron a EPR. Bohr negó que se pueda atribuir realidad independiente del contexto concreto de medición. La objeción de Bohr es, por lo tanto, válida si se considera la atribución de propiedades a los sistemas cuánticos, que no puede realizarse sin que haya necesariamente una detección de eventos. La objeción de Schrödinger toca la noción de separabilidad, subrayando que los sistemas que son independientes dinámicamente pueden mostrar todavía interdependencias estáticas. Este es de hecho el significado de la noción de *entanglement*, que él introdujo. En otras palabras, los sistemas cuánticos, incluso sin violar la localidad de Einstein (esto es, sin intercambiar señales a velocidad superluminal), muestran formas de interdependencia no-local, que pueden producir cambios instantáneos en sus configuraciones.

### 3. El problema de la causalidad.

Según EPR, para que una teoría sea completa cada elemento de la realidad debe tener su contraparte en la teoría. Demostrando que un elemento de la realidad no tenía su contraparte en la teoría podrían concluir que la mecánica cuántica no era completa, aceptando la localidad. La finalidad principal de EPR, según G. Cavallini, era la de afirmar la incompletitud de la mecánica cuántica y no la de sostener el realismo, aunque ambos términos estén estrechamente relacionados, en el sentido de que la función de onda denota una descripción completa de la realidad física, dejando abierta la cuestión de si existiría una teoría capaz de hacerlo. El físico italiano nota, en su artículo, que, si una teoría debe presentar una correspondencia de cada elemento con la realidad, esto implica necesariamente que la realidad puede ser conocida en línea de principio. Por esta razón acusa a EPR de haber intercambiado la

53 "La non-localité représentait une projection ontologique de la non-séparabilité". M. BITBOL, *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, 351. Cf. R. Y. CHIAO, "Quantum Nonlocalities: experimental evidence", 17-18.

54 No vamos a describir detalladamente todos estos efectos. Remito a R. Y. CHIAO, "Quantum Nonlocalities: experimental evidence", 18-35 y G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 693-704.

55 Cf. J. BRICMONT, "La non-localité et la théorie de Bohm", 32.

estructuralidad del sistema teórico por la realidad física, de forma que no fue considerado que la determinación de la realidad conlleva el recurso a la teoría. El autor subraya la incompreensión de dar una descripción de la realidad independiente de cualquier teoría. Desde este punto de vista critica todas las desviaciones hacia la no localidad de los fenómenos, entre otras cosas. Entiende todos los entes cuánticos como objetos de la teoría compatibles con las evidencias empíricas o, mejor, datos de las evidencias empíricas interpretadas compatiblemente con la teoría. El punto débil de esta interpretación reside, precisamente, en negar el valor de la mecánica cuántica fuera de una interpretación probabilista, interpretación que ya se ha demostrado inadecuada<sup>56</sup>.

Salvado este último escollo sobre la interpretación de la paradoja de EPR, podemos afirmar la existencia en el mundo cuántico de correlaciones entre los sistemas con carácter fuertemente no-local, fruto de la superposición. Se trata, en definitiva, de una relacionalidad sin causalismo. Las correlaciones se constituyen entre sistemas individuales y no son relaciones estadísticas, de forma que cuando se reduce el sistema en *entanglement* con otro a un resultado determinado, la correlación existente entre ellos hace que el otro sistema se reduzca al mismo momento. Esta propiedad está claramente en contradicción con la hipótesis que fundamenta la teoría de las variables ocultas locales, esto es, con el hecho que cada elemento de la teoría tiene su contrapartida en la realidad. La determinación del segundo sistema no depende de una variable local de éste sino de la correlación existente con el primero, gracias precisamente a la superposición de ambos. En general, esta reducción de un sistema producido por el colapso de otro sistema *entangled* es un fenómeno no-local, discontinuo e instantáneo, completamente dentro de la lógica de lo que hemos visto al inicio de este artículo. En otras palabras, la interacción con un sistema en *entanglement* proyectando una de las partes del sistema en uno de los valores propios posibles, provoca que las otras partes del sistema adquieran los otros valores posibles con el valor de la primera<sup>57</sup>.

Dicho de otro modo, con las correlaciones lo que cambia profundamente es el concepto de realidad utilizado en la física clásica y que está a la base del artículo EPR<sup>58</sup>. Según el criterio de realidad de EPR, cada elemento de la realidad puede ser representado distintamente por un elemento de la teoría, en perfecta correspondencia. Se establece así un paralelismo perfecto entre la realidad y la descripción<sup>59</sup>. Esta imagen se rompe con las correlaciones que siguen a la superposición. Pero se rompe a favor de una imagen más adecuada de la realidad, en modo alguno reductiva<sup>60</sup>. La realidad es no-local. “La no-

56 Cf. G. CAVALLINI, «La fallacia del realismo in “EPR”», 39-61.

57 Cf. M. REDHEAD, «The tangled story of Nonlocality in Quantum Mechanics», 142-143. Cf. D. J. CHALMERS, *La mente consciente*, 427-428.

58 Cf. B. D'ESPAGNAT, «Physique et réalite, une introduction à la question», 34.

59 Notemos que la imagen de EPR es la imagen utilizada por el cientificismo y el positivismo lógico para comprender la realidad: hechos elementales empíricos que son descritos elementalmente mediante proposiciones atómicas, sin que exista nada más. “*Toute cette discussion [sobre las consecuencias de EPR y la desigualdad de Bell] montre que l'ambiguïté sur le statut de la fonction d'onde (moyen de calcul, objet réel?) entretenue par une certaine tradition philosophique de type positiviste ou instrumentaliste a rendu difficile la compréhension de la non-localité*”. J. BRICMONT, «La non-localité et la théorie de Bohm», 34.

60 “*Everything points to the fact that a particle cannot be fully known by empirical means; and if it be true*

localidad consiste en correlaciones instantáneas que, debido a la relatividad equivalen a la negación de la distancia espacial, en el sentido que la distancia entre sistemas *entanglados* es irrelevante<sup>61</sup>. G. Basti subraya que esto pone en evidencia que las propiedades del espacio-tiempo físico aparecen intrínsecamente ligadas a las interacciones dinámicas entre los cuerpos de un modo mucho más intrínseco de lo que aparecen a nivel cosmológico en la Teoría de la Relatividad General, en otras palabras, la relación que la relatividad manifiesta entre el espacio y el tiempo adquiere con la propiedad de la no-localidad una valencia mucho mayor<sup>62</sup>. Se trata, según el filósofo italiano, no de la simple necesidad de añadir una cuarta dimensión a un espacio geométrico tridimensional, que representa los acontecimientos, sino de algo más profundo: de comprender que el tiempo tiene una naturaleza intrínseca no-local. Además, en contra de la visión newtoniana, la estructura y las propiedades del espacio y el tiempo no son *a priori* sino que dependen críticamente de las interacciones causales o dinámicas entre determinados cuerpos<sup>63</sup>.

Naturalmente esta visión de la realidad excluye la idea de causalismo que reduce la idea de causalidad a la simple eficacia mecánica<sup>64</sup>. Es un hecho que la mecánica clásica sólo reconoce lo que se llama la causalidad eficiente o mecánica y que rechaza la doctrina aristotélica de la multiplicidad de las causas. No obstante, y al contrario de lo que pensaba Heisenberg negando la validez del Principio de causalidad en la naturaleza, esto es la visión causalista o mecánica, la concepción que nace de la mecánica cuántica contempla una idea mucho más general de causalidad, más dinámica, que cubre la noción de interacciones y de proceso (según se entiende en la filosofía de Whitehead). Efectivamente, es mediante las interacciones dinámicas que en la realidad natural existe la distinción, pues sin procesos de interacción, debido a la superposición, "ni el espacio, ni el tiempo, ni estructuras o distinciones tendrían lugar"<sup>65</sup>. Dicho en otros términos, sólo si no se admite el doble aspecto de la evolución temporal de los sistemas cuánticos y se asigna esta evolución únicamente a la descripción de la ecuación de Schrödinger, que es determinista, se debe afirmar el causalismo. Pero, si por el contrario, se mantiene el doble aspecto de la evolución temporal del sistema con la clara discontinuidad que supone la reducción del sistema y con la afirmación de la interacción

---

that "now we know in part," then it becomes readily conceivable that a particle may transcend its manifested locus, and thus its phenomenal identity as well. In a word, there may indeed be more to the particle than meets the scientific eye. (...) My point, thus, is not that the particle "projects into another dimension", but that in addition to its empirical aspect it has a nature which is not subject to "containment" at all". W. SMITH, *The Quantum Enigma*, 70.

61 G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 795.

62 Cf. G. BASTI, *Filosofia della Natura e della Scienza I*, 126-127.

63 Cf. G. BASTI, *Filosofia della Natura e della Scienza I*, 128-129. "The view, namely, that there is not only a space-time continuum containing various entities, but also -on a more fundamental level- an as yet undifferentiated potency, which is neither in space nor in time, and about which nothing specific can be affirmed. "Reality is non-local"; that, perhaps, is the closest we can come". W. SMITH, *The Quantum Enigma*, 71.

64 Cf. J. BRICMONT, «La non-localité et la théorie de Bohm», 33.

65 G. AULETTA, *Foundations and interpretation of Quantum Mechanics*, 795. Cf. H. P. STAPP, «Light as foundation of being», 259-260. Una tentativa de recuperar el concepto causalista mediante las ideas de Bohm del potencial cuántico que no transporta energía ni puede ser experimentado, se encuentra en J. P. VIGIER, «Causal particle trajectories and the interpretation of Quantum Mechanics», 169-204.

dinámica como elemento esencial a la evolución misma, el causalismo entra en crisis y se abren las puertas a una comprensión de la causalidad mucho más amplia, mucho más cercana a la visión aristotélica de la causalidad, o al menos no reduccionista<sup>66</sup>.

Al intentar comprender en qué consisten las correlaciones, se ha manifestado una propiedad fundamental del mundo cuántico como es la no-localidad. Así, se ha podido individuar la dimensión dinámica de la realidad. Si la superposición puede entenderse como una dimensión relacional estática, continua, y la determinación (reducción del sistema a un resultado concreto) como una dimensión que explicita las singularidades, discontinua, la no-localidad manifiesta el carácter dinámico, fruto de las interacciones y de los procesos físicos<sup>67</sup>. En resumen, en última instancia, el problema sugerido desde EPR, plantea la cuestión fundamental de si las interconexiones causales están prohibidas totalmente en la mecánica cuántica. Si los sistemas cuánticos remotos no intercambian señales físicas entre si y si los resultados de las mediciones son aleatorios, es evidente que en este contexto teórico no puede aplicarse el modelo de la causalidad eficiente o causalismo. El *entanglement* representa, por lo tanto, un conjunto de restricciones sobre los posibles resultados de la medición: de hecho, como EPR ha comprendido correctamente, la obtención de un resultado determinado en una de las dos partículas (del estado llamado EPR) permite predecir las propiedades de la otra partícula gemela. Esto demuestra que el entrelazamiento actúa como una reducción del espacio de los posibles resultados y puede, por lo tanto, ser comparado con una especie de causa formal. ¿Cómo concebir esta causalidad formal? Técnicamente hablando, el *entanglement* es una forma de información mutua entre sistemas remotos. Por lo tanto, con el fin de comprender los efectos cuánticos sin negar la causalidad como tal y, por lo tanto, recurrir a los milagros, la física nos invita a ampliar nuestra noción de causalidad reconsiderando el papel de lo que en la jerga aristotélica se llaman causas formales, además claro está de las causas eficientes.

## Ontología

Del tratamiento anterior, se desprende que estos problemas son una parte importante de la comprensión filosófica del mundo natural. En otras palabras, el examen que hemos realizado hasta este punto, pone de manifiesto la necesidad de contar con una interpretación ontológica de la teoría: una interpretación que, sin embargo, no sea ingenua en el sentido clásico, y que sea coherente con los resultados conocidos y aceptados de la teoría científica. Para lograr esta ontología, debemos:

1. Proponer una solución al problema de la medición y
2. Analizar la solución propuesta como modelo a utilizar en el tratamiento de las realidades cuánticas.

---

66 Cf. W. SMITH, *The Quantum Enigma*, 87.

67 Cf. G. AULETTA, «Some lessons of Quantum Mechanics for cognitive science», 4, in press.

Para intentar resolver el problema de la medición en un modo satisfactorio y coherente con los resultados de la física, conviene entender que la medición es ante todo un acto físico real que puede describirse matemáticamente y que, además, no se puede confundir el nivel matemático y formal con el de la física real. Para poder comprender el alcance de la solución que proponemos, debe considerarse el proceso de medición como dividido en tres fases: una primera fase en la que el sistema se prepara (preparación), una segunda fase en la que se establece la conexión (*entanglement*) del sistema con el dispositivo de medición (premedición) y, por último, una tercera etapa en la que se realiza una selección gracias a una detección mediante un detector. Por lo tanto, la preparación, la premedición y la detección constituyen las tres operaciones fundamentales locales a que un sistema puede someterse mecánica-cuánticamente hablando. De acuerdo con la formulación de Heisenberg<sup>68</sup>, estas operaciones deben ser consideradas como intervenciones concretas en el mundo físico que pueden afectar al sistema objeto de una determinada manera. Puesto que análogos a las tres operaciones pueden ocurrir de forma espontánea en la naturaleza<sup>69</sup>, estamos muy lejos de las interpretaciones subjetivistas de la teoría. La única diferencia entre las operaciones realizadas en el laboratorio y sus análogos espontáneos es que las primeras, realizadas de forma controlada, permiten hacer una inferencia sobre el sistema objeto, por lo que es posible atribuir propiedades al sistema. En principio, esta posibilidad no se excluye para los procesos espontáneos, aunque ésta resulte muy difícil.

Una preparación puede ser entendida como la determinación del estado de un sistema. Es el procedimiento mediante el cual sólo determinados sistemas en un cierto estado (teóricamente definido previamente) se seleccionan y se entregan para procedimientos adicionales, es decir, pueden ser sometidos a operaciones sucesivas, tales como la premedición y la detección. El estado preparado debe ser descrito en términos de probabilidad. Preparar un sistema en un cierto estado a menudo significa prepararlo en un estado de superposición, es decir, un estado que incluye en sí toda la información posible (todos los resultados posibles) que se alcanzará en fases sucesivas.

Una premedición consiste en la interrogación de un sistema cuántico en relación a un observable. Cada disposición experimental es específica de un observable particular: una disposición específica excluye otras configuraciones alternativas. En otras palabras, en esta fase, se acoplan un sistema objeto con un cierto aparato de medición para medir un observable físico dado. Por lo tanto, sin que todavía haya algún resultado particular, el sistema ha sido vinculado a una pregunta específica concreta que nos obliga a utilizar un aparato de medición también específico. Sólo a través de este paso intermedio tiene sentido hablar de detección. Formalmente, parece como si la base específica utilizada para la expansión matemática del estado compuesto sistema-aparato sea irrelevante, y que, por lo tanto, la premedición no se refiera a un observable

68 W. HEISENBERG, *Physics and Philosophy*, Chaps. 3

69 E. JOOS – H. D. ZEH, «The Emergence of Classical Properties Through Interaction with the Environment»; D. GIULINI – E. JOOS – C. KIEFER – J. KUPSCH – I.-O. STAMATESCU – H. D. ZEH., Eds., *Decoherence and the Appearance of a Classical World*.

específico. A un nivel abstracto, son posibles diferentes bases para el mismo estado compuesto por el aparato y el sistema, lo que refleja también la equivalencia de las formulaciones de Schrödinger y Heisenberg en la descripción de la evolución del sistema compuesto. Sin embargo, no podemos mezclar los procedimientos de medición con los algoritmos, como parece producirse en la MWI. Si consideramos una situación física específica (es decir, una vez que se elija un contexto experimental particular), se introduce un grado adicional de determinación (en relación con la preparación), y ya no se está autorizado a tratar los diferentes contextos experimentales como equivalentes. No sería propio de la Física considerar como equivalentes todos los observables físicos de un contexto experimental particular, puesto que cambiar la base con la que expresamos un determinado aparato de medición (es decir, el planteamiento de la cuestión) significa realizar un cambio concreto del aparato como tal, de forma que no se puede presumir de mantener el mismo proceso de medición. En resumen, la elección de un contexto experimental particular, identifica de forma exclusiva un cierto observable. Esto expresa exactamente por qué son necesarias las condiciones externas reales para que un evento acontezca.

Una detección (o una medición en el sentido estricto del término) es una respuesta irreversible a la cuestión representada por todo el proceso. Al establecerse una relación con un aparato (*entanglement*), en realidad se correlaciona el sistema objeto con un determinado detector. Propiamente hablando, el aparato es una interfaz entre el detector y el sistema objeto<sup>70</sup>. Cuando se realiza una selección adecuada, el detector se encuentra en uno de sus estados básicos y, a través del acoplamiento con el sistema objeto, proporciona información sobre este último, y, por lo tanto, permite asignar una propiedad al sistema objeto. En otras palabras, esta conexión genera un cierto resultado casual que nos dice algo sobre el estado del sistema. Podemos considerar que cada fase del proceso de medición puede entenderse como una determinación adicional, esto es, como un proceso dinámico mediante el que, a partir de una realidad potencial y un contexto apropiado, la realidad actual (el evento) es activada<sup>71</sup>.

En relación a la interpretación parece que, en el esfuerzo para hacer frente a la imposibilidad de obtener lo que se llama un estado propio de un cierto sistema mediante su evolución unitaria, algunos objetivistas han caído en un problema mucho más grande, a saber, el de la confusión entre las matemáticas y la dinámica, esto es, la confusión entre la preparación y la fase de premeditación, olvidando el problema fundamental de la atribución de la realidad, que cada pregunta sobre física debe tener en cuenta. El problema puede ser resuelto gracias a lo que se conoce como decoherencia: aunque localmente se obtiene un resultado determinado (que es al azar, en cualquier caso), el estado global del sistema junto a todo el universo no presenta cambios, lo que no significa que los resultados locales sean ilusorios. Por el contrario, hasta cierto punto, los eventos son la única realidad con la que debemos confrontar-

---

70 Cf. G. AULETTA, «Quantum Information and Inferential Reasoning».

71 G. AULETTA – L. TORCAL, «From Wave-Particle to Features-Event Complementarity».

nos y debemos considerar actuales (en el sentido más profundamente metafísico). El problema consiste en entender que existe una dicotomía fundamental entre local y global. Esto puede explicarse considerando que un acto de medición aumenta la entropía local del sistema (y, por lo tanto, el desorden), moviendo un poco de orden hacia otro lugar, de modo tal que se conserve el balance general entre el orden y el desorden. Sin embargo, es precisamente este movimiento, lo que permite la aparición de formas más complejas de realidad actual.

Hasta aquí la solución propuesta para el problema de la medición. Toca ahora analizar esta solución para proponerlo como modelo para entender la realidad cuántica. Este análisis nos permite afrontar el problema ontológico del significado de las principales categorías de la teoría, es decir, los conceptos de estado del sistema, de observable y de propiedad. Aunque estas categorías principales se obtengan del análisis del proceso de medición, éstas no dependen del procedimiento específico que se lleva a cabo en el laboratorio, lo que implicaría, por supuesto, una forma de idealismo o instrumentalismo. Pensar lo contrario sería incorrecto. De hecho, hemos de pensar la medición como un tipo específico de interacción entre sistemas abiertos, es decir, entre sistemas que están abiertos al ambiente y que, por lo tanto, permiten un desplazamiento local de orden y de desorden. Por lo tanto, esta estructura ontológica, cuyas categorías principales son el estado del sistema, los observables y las propiedades, tiene un significado universal y es independiente de los procedimientos que nosotros, los humanos, podemos utilizar<sup>72</sup>.

### ***El estado cuántico***

En comparación con el estado clásico, el estado cuántico es muy diferente debido a la sobreposición inherente, esto es, a los términos de interferencia que encontramos en la descripción del estado y que no tienen ningún análogo clásico. De acuerdo con la mecánica clásica, un estado representa la información completa que se tiene de un sistema en un momento dado. Todavía dentro del sistema clásico, se presupone también que toda la información de tal sistema puede extraerse, que es un tipo de observable y que, por lo tanto, puede tratarse como si fuera una realidad inmediata e individual. Sin embargo, la mecánica cuántica demuestra que el estado no puede ser tratado ni concebido de esta manera. El proceso de medición nos ayuda a pensar el estado cuántico como una clase de equivalencia de preparaciones: el estado no es una realidad individual (no está asociado con una única realidad), sino más bien el carácter de un universal (una clase). Esto no quita a la noción de estado de significación ontológica. De hecho, esto es un trozo de lo que podría definirse como una ontología interpretada por la teoría, es decir, una categoría teórica anclada en la realidad, que, no obstante, no expresa esta misma realidad isomorfamente.

### ***Los observables***

Dado que diferentes configuraciones experimentales pueden conducir a la medición de un cierto observable, también podemos entender el concepto de

72 G. AULETTA – L. TORCAL, «From Wave–Particle to Features–Event Complementarity».

observable como una clase de equivalencia, en este caso de premedición. El observable es también una pieza de una ontología interpretada, es decir, una categoría teórica anclada en la realidad, que significaría no una entidad singular, sino una clase.

### ***Las propiedades***

Finalmente, una propiedad puede ser entendida como una clase de equivalencia de las detecciones de eventos y por lo tanto, tiene las mismas características generales que las otras dos categorías. De hecho, un evento en sí mismo sólo acontece y no dice nada del sistema objeto. Es sólo gracias a las acciones previas de preparación y premedición que podemos inferir que el sistema objeto tiene realmente esa propiedad dado un determinado acontecimiento.

Si entendemos de este modo estas categorías de nuestra ontología interpretada, la cuestión principal a la que esta interpretación debe responder es: ¿a qué tipo de realidad se refieren estas categorías? Para ello, es necesario introducir el concepto de características (*features*) mediante el que nos referimos a los términos de interferencia de un estado cuántico, un concepto que -como ya se ha dicho- no tiene su análogo clásico. Los *features* son:

- características reales del estado que determinan el comportamiento específico del sistema
- características no-locales.

Esta es la razón por la que no pueden ser llamados propiedades, ya que las propiedades, por definición, pueden ser experimentadas localmente. Es importante entender que no pueden ser medidos, ni podemos tener una prueba directa de su existencia. De hecho, sólo pueden ser inferidos. Sin embargo, puesto que determinan el comportamiento de los sistemas cuánticos, su realidad es verificable, aunque sólo sea de forma indirecta.

Debemos tener en cuenta también a los acontecimientos (eventos). Estos constituyen otra pieza de la realidad (en este caso completamente local) que nos permite hacer esta atribución ontológica. Sin embargo, también los propios acontecimientos son en sí mismos ciegos: no nos dicen nada, sino es gracias a determinadas condiciones, como por ejemplo un dispositivo experimental específico. En pocas palabras, esta interpretación entiende la realidad, en el sentido pleno de la palabra, como una interacción dinámica entre acontecimientos y *features*, en la medida en que, por una parte, en cualquier tipo de interacción, encontramos involucrados estos dos tipos de elementos, y por otra, sólo en el contexto de un proceso dinámico pueden jugar un papel ontológico.

En conclusión, los *features*, los acontecimientos y la interacción dinámica entre ellos son a la vez:

- lo que se deduce dada la teoría cuántica y determinados procedimientos y
- aquello que representa las condiciones objetivas necesarias para tener aquellos procedimientos (preparación, premedición y detección) que nos permiten hablar de tres piezas de ontología que hemos definido como interpretada (el estado, los observables y las propiedades).

En cambio, *features*, acontecimientos e interacción dinámica, por lo tanto, pueden ser llamados kantianamente piezas de una ontología no interpretada, esto es, son aquellos elementos que constituyen la realidad, pero que no son directamente accesibles a nosotros.

## Conclusión

Esta interpretación demuestra que EPR tenían razón en su búsqueda de un fundamento ontológico de la teoría<sup>73</sup>, pero no en el sentido de que la teoría cuántica debería estar integrada con una especie de ontología (físico)clásica. Por lo tanto, sólo estas operaciones (y sus contrapartes en los procesos espontáneos que se producen en nuestro mundo) son capaces de establecer un puente entre la teoría y la realidad.

Como se ha mencionado, podemos interpretar la correlación como una especie de causa formal. De hecho, el *entanglement* induce una forma de restricción del espacio de posibles resultados de una medición. Hay un concepto para abordar estos problemas: la información. A. Zeilinger define la información como la interdependencia entre posibles resultados, es decir, entre los posibles acontecimientos de selección de información.

La información aparece en dos formas principales: como pura forma de interdependencia (información mutua) y como adquisición de información, que requiere siempre un tipo de procedimiento local como la medición y representa una selección de la información potencialmente contenida en un determinado sistema<sup>74</sup>. Por esta razón, la noción aristotélica de potencia puede ser de gran ayuda para abordar estas cuestiones. El *entanglement* representa una cantidad de información que puede ser adquirida en fases sucesivas de la evolución de un sistema. Por ejemplo, cuando dos sistemas están “entrelazados” pueden hacer uso de las reservas de información para transmitir información en un modo clásicamente prohibido (por ejemplo, el teletransporte). Esta es una diferencia importante con respecto a la ciencia y a la filosofía clásica, que asumen como válidos sólo las categorías de actualidad y posibilidad. Potencialidad, sin embargo, significa algo muy diferente ya sea en relación a la reali-

73 Cf. A. EINSTEIN, «Quantenmechanik und Wirklichkeit»; «Remarks Concerning the Essays Brought Together in This Co-operative Volume», p. 667

74 Cf. G. AULETTA, *Cognitive Biology*, Sec. 2.3. Véase también G. AULETTA – S.-Y. WANG, *Quantum Mechanics for Thinkers*, Secs. 11.2 and 12.1.

dad actual, que en relación a la posibilidad, en la medida en que potencialidad se refiere a las restricciones existentes en nuestro mundo que, a pesar de ser reales no tienen un poder dinámico en sí mismos, sin la contribución de causas dinámicas.

Espero haber hecho entender que los problemas que plantea la mecánica cuántica encajan perfectamente en el marco de una filosofía de la naturaleza. De hecho, en mi opinión, esta disciplina científica estimula el desarrollo de la disciplina filosófica, ya que invita a pensar en la relación entre una teoría físico-matemática y en la realidad que la sostiene y quiere ser comprendida mediante esta teoría. No basta responder: “*It works*” (funciona), como dijo R. Feynman, uno de los más grandes físicos del siglo XX y Premio Nobel (1965), cuando se le preguntó si entendía la mecánica cuántica. La mecánica cuántica, por todo lo que tiene de enigmática e incomprensible (por supuesto, analizada consciente o inconscientemente bajo el paradigma filosófico de la física clásica) eleva el debate filosófico en la dirección de reanudar de nuevo la reflexión propia de la filosofía de la naturaleza, para comprender no sólo cómo funciona la realidad, sino sobretudo cómo y qué es esta realidad.

Lluc Torcal

## Bibliografía

- AULETTA, G., *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, Singapore – New Jersey – London – Hong Kong 2000.
- , «Some lessons of Quantum Mechanics for cognitive science», *Intellectica* 36-37 (2003) 293-317.
- , «How Quantum Mechanics Suggests New Insights in Metaphysics and Natural Theology», *Antonionum* 78 (2003) 705–710. Rev. ed. under the title «The 'Trialistic' Structure in Physics: New Insights for Metaphysics and Natural Theology», C. L. HARPER, Ed., *Spiritual Information*, Philadelphia 2005, 181-87.
- , «Critical Examination of the Conceptual Foundations of Classical Mechanics in the Light of Quantum Physics», *Epistemologia* 27 (2004) 55-82.
- , «Decoherence and Triorthogonal Decomposition», *International Journal of Theoretical Physics* 43 (2004) 2263–2274.
- , «Interpretazioni soggettivistiche della misurazione in meccanica quantistica», *Teorie e modelli* 9 (2004) 43–61.
- , «Quantum Information and Inferential Reasoning», *Foundations of Physics* 35 (2005) 155-69.
- , «Quantum Information as a General Paradigm», *Foundations of Physics* 35 (2005) 787-815.
- , «The Ontology Suggested by Quantum Mechanics», P. VALORE, Ed., *Topics on General and Formal Ontology*, Milan 2006, 161–179.
- , «The Problem of Information», G. AULETTA, Ed., *The Controversial Relations Between Science and Philosophy: A Critical Assessment*, Vatican City 2006, 109–127.
- , «Il dibattito tra Einstein, Bohr e Schrödinger: Causalità, determinazione e azione a distanza», *Il Protagora* 9 (2007) 181–98.
- , «Quantum Mechanics and Contingency», *Filozofia Przyrody i Nauk Przyrodniczych* 1 (2009) 7-16.
- , «Correlations and Hyper-Correlations», *Journal of Modern Physics* 2 (2011) 958-961.
- , *Cognitive Biology: Dealing with Information from Bacteria to Minds*, Oxford 2011.
- , «Inferences with Information», *Universal Journal of Applied computer Science and Technology* 2.2 (2012) 216–21.
- , «Causation Upside Down?», *Revista Portuguesa de Filosofia* 68.1-2 (2012) 9–32.

AULETTA, G. – TAROZZI, G., «Wavelike Correlations versus Path Detection. Another Form of Complementarity», *Foundations of Physics letters* 17 (2004) 889-895.

———, «On the Physical Reality of Quantum Waves», *Foundations of Physics* 34 (2004) 1675–94.

———, «Premeasurement vs. Measurement: A Basic Form of Complementarity», C. GAROLA – A. ROSSI – S. SOZZO, Eds., *The Foundations of Quantum Mechanics: Historical Analysis and Open Questions*, Singapore 2006, 40–47.

AULETTA, G. – TORCAL, L., «From Wave–Particle to Features–Event Complementarity», *International Journal of Theoretical Physics* 50 (2011): 3654–3668.

AULETTA, G. – WANG, S.–Y., *Quantum Mechanics for Thinkers*, Peking, 2013.

AULETTA, G. – ALAI, M. – TAROZZI, G., «Einstein's Local Realism and the Realistic Interpretation of the Wave Function», C. ALUNNI – M. CASTELLANA – D. RIA – A. ROSSI, Eds., *A. Einstein et H. Weyl (1955–2005). Questions épistémologiques ouvertes*, Paris–Maglie 2009, 33–49.

AULETTA, G., – FORTUNATO, M., – PARISI, G., *Quantum Mechanics*, Cambridge 2009; 2<sup>nd</sup> ed. 2013.

BASTI, G., *Filosofia della Natura e della Scienza, I. I fondamenti*, Roma 2002.

BELL, J. S., «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox », *Quantum Theory and Measurement*, 403 - 408, Princeton, N. J. 1983, WHEELER, J. A. – ZUREK, W. H., ed..

———, «On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics», *Quantum Theory and Measurement*, 397 - 402, Princeton, N. J. 1983, WHEELER, J. A. – ZUREK, W. H., ed..

BITBOL, M., *Mécanique Quantique, une introduction philosophique*, Paris 1996, 1999.

———, *L'aveuglante proximité du réel. Anti-réalisme et quasi-réalisme en physique*, Paris 1998.

———, *Physique & Philosophie de l'esprit*, Paris 2000.

———, «Physique Quantique et Cognition», *Revue Internationale de Philosophie*, 212 (2000) 299 - 328.

- BOHR, N., «On The Constitution Of Atoms And Molecules», *Philosophical Magazine* 26 (1913) 1–25, 476– 502, 857–875.
- , «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory», *Nature* 121 (1928) 580-590.
- , «Quantum Mechanics and Physical Reality», *Nature* 136 (1935) 65.
- , «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review* 48 (1935) 696-702.
- , «Causality and Complementarity», *Philosophy of Science* 4 (1937) 289–98.
- , «Natural Philosophy and Human Cultures», 1938, *Philosophical Writings*, II, 23-31.
- , «On the Notions of Causality and Complementarity», *Dialectica* 1 (1948) 312–19.
- , «Discussion With Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», A. SCHILPP, Ed., *Albert Einstein*, 201-241.
- , «Quantum Physics and Philosophy», in R. KYLBALSKY, Ed., *Philosophy in the Mid-Century*, Firenze 1958; rep. in *Philosophical Writings*, III, 1–7.
- , «Atoms and Human Knowledge», 1955, in *Philosophical Writings*, II, 83–93.
- , *Atomic Physics and Human Knowledge*, New York 1958.
- , «The Genesis of Quantum Mechanics», 1961, in *Philosophical Writings*, III, 74–78.
- , «The Solvay Meetings and the Development of Quantum Physics», 1961, in *Philosophical Writings*, III, 79–100.
- , *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge 1961.
- , *Collected Works*, Amsterdam 1985– 96.
- , *Philosophical Writings*, Woodbridge (Connecticut) 1958–63, 1987.
- BRICMONT, J., «La non-localité et la théorie de Bohm», *Implications philosophiques de la science contemporaine*, II. *Les interprétations de la physique quantique*, 29-40, Paris 2002.
- CAPEK, M., *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Madrid 1965.
- CARUANA, L., «John Von Neumann's 'Impossibility Proof' in a Historical Perspective», *Physis*, 32 (1995) 109-124.
- CAVALLINI, G., «La fallacia del realismo in "EPR"», *Epistemologia*, 25 (2002) 39-62.

CHALMERS, D. J., *The Conscious Mind. In Search of a Fundamental Theory*, Oxford 1996; trad. española, *La mente consciente. En busca de una teoría fundamental*, Barcelona 1999.

CHIAO, R. Y., «Quantum Nonlocalities: experimental evidence», *Quantum Mechanics. Scientific Perspectives on Divine Action*, 5, 17 - 39, Vatican City State – Berkeley 2001.

DIRAC, A. M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford 1930 ; trad. Francesa, *Les principes de la Mécanique Quantique*, Paris 1931, Sceaux 1990.

EINSTEIN, A., «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», *Annalen der Physik* 17 (1905) 132– 148.

———, «Prinzipien der Forschung», 1918, rep. in *Mein Weltbild*, 107–113.

———, «On the Method of Theoretical Physics», *Philosophy of Science* 1 (1934) 163–69.

———, «Physik und Realität», *Journal of Franklin Institute* 221 (1936) 349-382; eng. tr. in *Out of My Later Years: Estate of A. Einstein*, 59-97.

———, «Quantenmechanik und Wirklichkeit», *Dialectica* 2 (1948) 320–24.

———, «Remarks Concerning the Essays Brought Together in This Co-operative Volume», A. SCHILPP, Ed., *Albert Einstein*, 665– 88.

———, *Out of My Later Years: Estate of A. Einstein*, New York 1956.

———, *Mein Weltbild*, Frankfurt a. M. 1993.

EINSTEIN, A. – PODOLSKY, B. – ROSEN, N., «Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?», *Quantum Theory and Measurement*, 138 - 141, Princeton, N. J. 1983, WHEELER, J. A. – ZUREK, W. H., ed.

D'ESPAGNAT, B., «Meaning and Being in contemporary physics», *Quantum Implications. Essays in honour of David Bohm*, 151-168, London – New York 1987, HILEY, B. J. – PEAT, F. D., ed.

———, «Physique et réalité, une introduction à la question», *Implications philosophiques de la science contemporaine*, II. *Les interprétations de la physique quantique*, 29-40, Paris 2002.

EVERETT, H., «"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics», *Quantum Theory and Measurement*, 315 - 323, Princeton, N. J. 1983, WHEELER, J. A. – ZUREK, W. H., ed..

- FEYNMAN, R. P., «Quantum Mechanical Computers», *Foundations of Physics* 16 (1986) 507–531.
- FINE, A., *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, Chicago, 1986, 1996.
- FINKELSTEIN, D., «All is flux», *Quantum Implications. Essays in honour of David Bohm*, 289 – 294, London – New York 1987, HILEY, B. J. – PEAT, F. D., ed.
- HEISENBERG, W., «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik* 33 (1925) 879–893.
- , «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», *Zeitschrift für Physik* 43 (1927) 172–198.
- , *Physics and Philosophy*, New York 1958.
- , *Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, München 1969.
- JOOS, E. – ZEH, H. D., «The Emergence of Classical Properties Through Interaction with the Environment», *Zeitschrift für Physik B* 59 (1985) 223–243.
- KRONZ, F. M. - TIEHEN, J. T., «Emergence and Quantum Mechanics», *Philosophy of Science*, 69 (2002) 324–347.
- LEGGETT, A. J., «Reflections on the quantum measurement paradox », *Quantum Implications. Essays in honour of David Bohm*, 85 - 104, London – New York 1987, HILEY, B. J. – PEAT, F. D., ed.
- LOCHAK, G. et alt., *L'objet quantique*, Paris 1989.
- LOCKE, J., *The works*, I-III. *An Essay Concerning Human Understanding*, Aalen 1963; trad. española, *Ensayo sobre el entendimiento humano*, Biblioteca de la literatura y el pensamiento universal, 33, Madrid 1980.
- MEHRA, J. – RECHENBERG, H., *The Historical Development of Quantum Theory*, New York – Berlin – Heidelberg 2000.
- ORTOLI, S. - PHARABOD, J., *Le cantique des quantiques*, Paris 1984; trad. Española, *El cántico de la cuántica. ¿Existe el mundo?*, Barcelona 2001.
- PATY, M., «Interprétations et significations en Physique Quantique», *Revue Internationale de Philosophie* 212 (2000) 199–242.

PLANCK, M., «Über die Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900) 202– 204.

———, «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900) 237– 245.

REDHEAD, M., *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*, Oxford 1989.

———, «The tangled story of Nonlocality in Quantum Mechanics», *Quantum Mechanics. Scientific Perspectives on Divine Action*, 5, 141- 158, Vatican City State – Berkeley 2001.

RUSSELL, R., «Divine action and Quantum Mechanics», *Quantum Mechanics. Scientific Perspectives on Divine Action*, 5, 293- 328, Vatican City State – Berkeley 2001.

SÁNCHEZ OVCHAROV, C., «Algunos razonamientos sobre el aparato formal de la mecánica clásica, relativista y cuántica», *Revista de Filosofía*, 27 (2002) 419 - 430.

SÁNCHEZ RON, J. M., *Espacio-Tiempo y átomos. Relatividad y mecánica cuántica*, Historia de la ciencia y de la técnica, 51, Los Berrocales del Jarama 1992.

———, *Historia de la física cuántica. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona 2001.

SCHRÖDINGER, E., «Quantisierung als Eigenwertproblem I», *Annalen der Physik* 79 (1926) 361-376;

———, «Quantisierung als Eigenwertproblem II», *Annalen der Physik* 79 (1926) 489-527;

———, «Quantisierung als Eigenwertproblem III», *Annalen der Physik* 80 (1926) 437-490;

———, «Quantisierung als Eigenwertproblem IV», *Annalen der Physik* 81 (1926) 109-139;

———, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. I–III», *Naturwissenschaften* 23 (1935) 807-812, 823-828, 844-849.

———, «Discussion of Probability Relations Between Separated Systems», *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 32 (1935) 446-452.

———, *Mind and Matter*, Cambridge 1958; rep. in *What is Life? with Mind and Matter and Autobiographical Sketches*, 91–164].