

Realismo y teoría cuántica

ANTONIO J. DIÉGUEZ

*Grupo de Investigación en Ciencias Cognitivas
Universidad de Málaga*

RESUMEN

Los resultados empíricos y los análisis teóricos en física cuántica ni apoyan ni refutan concluyentemente el realismo. Aunque se mostrara que la interpretación de Copenhague era la única viable de entre todas las posibles, todavía quedaría por probar que con eso se había conculcado cualquier tipo de realismo. Bohr mismo aceptaba un realismo con tintes kantianos y mostraba desagrado hacia el instrumentalismo de Heisenberg. Pero además de la interpretación de Copenhague existen interpretaciones rivales que, a pesar de no estar tan desarrolladas como aquélla, dejan abierto el camino al realismo en la física cuántica. En particular la interpretación de David Bohm.

PALABRAS CLAVE

REALISMO CIENTIFICO—TEORIA CUANTICA—LOCALIDAD

ABSTRACT

The empirical achievements and theoretical analyses in quantum physics neither support nor refute conclusively realism. Even if it were shown that Copenhagen Interpretation is the only feasible one between all the possible interpretations in quantum mechanics, it would remain to prove that it forbids every kind of realism. In fact, Bohr himself accepted a realism with Kantian aspects and disagreed with Heisenberg's instrumentalism. But there are interpretations, rival to Copenhagen's, which in spite of not being so developed, smooth the way for realism in quantum physics. Particularly David Bohm's interpretation.

KEY WORDS

SCIENTIFIC REALISM—QUANTUM THEORY—LOCALITY

I. LOS ENIGMAS DE LA TEORIA CUANTICA

APENAS CONCLUIDO EL DEBATE DECIMONÓNICO sobre la existencia del átomo, se abrió una discusión más profunda y de consecuencias más radicales para la ciencia y para la filosofía de nuestro tiempo. Los físicos principales de este siglo han participado en ella y han introdu-

cido planteamientos tan imaginativos que habrían causado sin duda la envidia de muchos de los viejos filósofos de la naturaleza. La teoría cuántica volvió a poner sobre el tapete problemas que algunos consideraban ya superados por la marcha segura de una ciencia descargada de todo el lastre metafísico y exclusivamente sometida al veredicto experimental. Cuando más ajena a la filosofía se la declaraba desde la escuela neopositivista, la física cobijó en su interior, en ocasiones bajo apariencias puramente técnicas, pero en otras de forma explícita, una inspiración metafísica que dejó su impronta fructífera en el intenso debate entre Einstein y Bohr sobre los fundamentos de la teoría cuántica. El punto álgido de esta discusión, que por su importancia ha sido comparada con la mantenida entre Leibniz y Newton, se situó entre los años 1925 y 1935. Pero lejos de haber quedado zanjada la cuestión en aquel entonces, en las últimas décadas la polémica ha reverdecido a causa de paradójicos resultados experimentales y de una creciente insatisfacción de las nuevas generaciones de físicos teóricos con los dogmas filosóficos recibidos. Utilizando la expresión del físico Basil Hiley, los científicos han sentido la necesidad de «explorar ontologías», y desde luego no han sido timoratos en su búsqueda. De estos desarrollos recientes algo diremos después, pero todavía en 1929 Niels Bohr describía la situación del siguiente modo:

Sabemos ahora, es cierto, que las dudas expresadas con frecuencia respecto a la realidad de los átomos eran exageradas gracias a que el maravilloso desarrollo del arte de la experimentación nos ha permitido estudiar los efectos individuales de los átomos. Con todo, ha sido el reconocimiento mismo de la divisibilidad limitada de los procesos físicos, simbolizada por el cuanto de acción, lo que ha justificado las dudas [...] relativas al alcance de nuestras formas ordinarias de intuición cuando se las aplica a los fenómenos atómicos. Ahora bien, puesto que en la observación de esos fenómenos no podemos despreciar la interacción entre el objeto y el instrumento de medida, de nuevo pasan a primer plano las cuestiones que se refieren a las posibilidades de observación. Así, nos enfrentamos aquí, bajo una nueva luz, al problema de la objetividad de los fenómenos que ha suscitado siempre tanto interés en las discusiones filosóficas¹.

Esta vez, sin embargo, no se trataba de establecer si los mecanismos

¹ N. Bohr, «El cuanto de acción y la descripción de la Naturaleza» (1929), en Bohr 1988, p. 134.

propuestos por un modelo teórico eran reales o ficticios, como ocurrió en la astronomía antigua. Tampoco se cuestionaba sólo la existencia de determinadas entidades teóricas a causa de su inobservabilidad, como en el debate sobre la existencia de los átomos. Lo que entraba ahora en discusión era qué debía entenderse por la realidad misma cuando estaban involucrados los sistemas microfísicos. Con el desarrollo de la teoría cuántica la atribución de «realidad» a ciertos estados y procesos se tornó problemática. Para entonces nadie dudaba de que los átomos existían; la cuestión se desplazó al significado con el que debería dotarse al concepto de 'existencia real' en los nuevos contextos requeridos por la física, porque —en palabras de Heisenberg—, «aquella esperada realidad objetiva de las partículas elementales constituye una simplificación demasiado tosca de los hechos efectivos»².

Antes de nada conviene aclarar que sobre lo que hubo y hay desacuerdo entre los físicos teóricos no es sobre el formalismo matemático de la teoría cuántica, sino sobre su interpretación o significado concreto. Todos los físicos cuánticos aceptan un mismo conjunto básico de ecuaciones y las aplican de la misma manera, sin embargo algunos muestran discrepancias acerca de las estructuras físicas que subyacen a dichas ecuaciones. El problema no está, pues, en las matemáticas, por complicadas que éstas sean, ni en su adecuación empírica, mayor que ninguna otra en la historia de la ciencia. El problema está en la filosofía, y sobre todo en la ontología, que debe ponerse detrás (o delante) de las ecuaciones. Aunque, eso sí, como después se explicará, es un problema filosófico peculiar al que inopinadamente se le supo extraer un hallazgo científico de suma importancia.

En la mecánica cuántica, los valores de los estados observables (posición, momento, energía, polarización, spin...) de un sistema cuántico (un electrón o un fotón, por ejemplo) vienen representados por una *función de onda*, designada con la letra griega ψ , susceptible de tomar valores *complejos*, esto es, valores en los que aparece el número imaginario i ($i = \sqrt{-1}$). La evolución en el tiempo de la función de onda es descrita de manera determinista por la ecuación de onda propuesta por Schrödinger en 1926. Dicha ecuación permite calcular por tanto el comportamiento y evolución de los sistemas cuánticos. Se la llama ecuación de onda porque su estructura formal, en la medida en que recoge los aspectos ondulatorios manifestados por

² W. Heisenberg 1986, p. 14.

estos sistemas, es análoga a las ecuaciones de ondas de la física clásica. El propio Schrödinger pensó en un principio que ψ estaba asociada a un proceso vibratorio real en el interior del átomo y le adscribió como referencia una distribución continua de electricidad en el espacio, considerando a las partículas como «paquetes de ondas» que no se expanden³. Sin embargo, pronto se vio que las cosas no podían ser de esa manera. No quedaba explicado cómo un paquete de ondas podía conservar su estabilidad y no expandirse en el espacio. Además ¿cómo aceptar que ψ representa una onda real cuando no sólo aparecen en ella números imaginarios, sino que, para sistemas compuestos por varias partículas, tenía que ser una función en un espacio de más de tres dimensiones? He aquí, pues, la primera gran dificultad conceptual con que tropieza la fundamentación de la teoría cuántica: ¿qué significado real tiene exactamente la función de onda ψ ? Lo cual está ligado al enigma central de los fenómenos cuánticos: su doble aspecto ondulatorio y corpuscular. Pues ¿cómo se ha de interpretar que el comportamiento de algo que presenta características de una partícula se produzca conforme a los patrones de un proceso ondulatorio? O viceversa, ¿cómo interpretar que algo que presenta características de una onda se manifieste como partícula bajo ciertas condiciones?

Acerca del significado de ψ ha habido propuestas muy variadas. Alfred Landé dio una lista de siete interpretaciones distintas⁴. Pero usando un grano más grueso por razón de simplicidad pueden reducirse a cinco:

1) Representa algo real (un campo físico de algún tipo, ciertas propiedades objetivas) de un sistema cuántico individual.

2) No representa nada real; es simplemente un instrumento matemático para calcular las probabilidades de obtener ciertos resultados en posibles mediciones efectuadas sobre sistemas microfísicos individuales.

3) Describe nuestro estado de conocimiento sobre un sistema microfísico.

4) No representa una realidad actual, sino más bien un conjunto de *potencialidades* que podrían ser actualizadas de acuerdo con las condiciones experimentales.

5) Describe el comportamiento de un conjunto de sistemas, nunca de un sistema sólo.

³ Cf. M. Jammer 1966, pp. 260 y 281-3, y Jammer 1974, pp. 24-33.

⁴ Cf. A. Landé 1968, p. 137.

La primera interpretación tiene a su vez muchas variantes. De uno u otro modo ha sido defendida por Einstein, de Broglie, Schrödinger, Bohm, Bell y Penrose, por citar a los más importantes. La segunda forma parte de la llamada '*interpretación de Copenhague*' de la mecánica cuántica, y es la mayoritariamente aceptada por los físicos, dada la autoridad de su máximo inspirador Niels Bohr. La tercera, que también es considerada como ingrediente de la interpretación de Copenhague, fue defendida por Born, y en ciertos momentos por Bohr, por Heisenberg e incluso por Schrödinger. La cuarta fue formulada por el Heisenberg más tardío. Y la quinta constituye el núcleo de la *interpretación estadística* de la mecánica cuántica, desarrollada en diferentes grados y versiones por Einstein, Popper, Landé, y Ballentine entre otros.

Una segunda dificultad conceptual, que permanece sin una respuesta capaz de despertar el consenso, es el *problema de la medida*, también conocido como '*colapso de la función de onda*', o en denominación de Heisenberg, la '*reducción del paquete de ondas*'. Mientras no se efectúa ninguna medición sobre un sistema microfísico, éste evoluciona de manera determinista según la ecuación de onda de Schrödinger. Ahora bien, en esta ecuación el sistema evoluciona como una suma de todos los estados posibles superpuestos, en analogía con los fenómenos de superposición y suma de amplitudes en las ondas reales. Por ejemplo, antes de ser medida, la *orientación del spin* de un electrón vendrá caracterizada por la ecuación de onda como la «mezcla» de los dos estados posibles con los valores $+1/2$ y $-1/2$. Sin embargo, una vez que se efectúa una medición sobre el sistema, esto es, una vez que el sistema entra en contacto con el objeto macroscópico con el que se realiza el proceso de medición, obviamente el resultado que se obtiene es siempre uno sólo de los estados posibles y no una superposición de estados. Por tanto, como explicó von Neumann, se produce en el acto de medir un cambio discontinuo en la función de onda que no está regido por la ecuación de onda de Schrödinger y que presenta un carácter indeterminista. Este cambio instantáneo es el colapso de la función de onda. La cuestión es ¿cómo y por qué se produce este extraño salto?, ¿es un cambio que afecta sólo a nuestro conocimiento del sistema, o se trata, por el contrario, de una verdadera transformación física que la medición introduce de algún modo en el sistema medido?

II. LA INTERPRETACION DE COPENHAGUE

La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica fue el primer conjunto de respuestas para estos problemas⁵. No consiste en una doctrina claramente expuesta y sistematizada, ni es entendida de igual modo en todos sus aspectos por aquellos que declaran aceptarla. Se trata más bien –dice Max Jammer– de «un denominador común para una variedad de puntos de vista relacionados», que ni siquiera está «necesariamente ligado con una posición filosófica o ideológica específica»⁶. Sus máximos representantes, Bohr y Heisenberg, no siempre expresaron las mismas tesis sobre el significado de los principios cuánticos fundamentales. Heisenberg, por ejemplo, aceptó durante mucho tiempo una visión instrumentalista de la física que no encajaba muy bien con las ideas de Bohr⁷. Además, Bohr no consiguió, pese a sus esfuerzos, explicar con claridad sus puntos de vista; y ambos, Heisenberg sobre todo, variaron sus posiciones a lo largo de su vida. Por si eso no bastara, von Neumann, otro de los promotores de esta interpretación⁸, mantuvo tesis que no convenían con las de Bohr y Heisenberg, aunque a veces se las meta en el mismo saco. En particular, otorgó un papel central a la *conciencia* en el acto de medición; algo que Bohr no había hecho y contra lo que se pronunció repetidas veces. Por todo ello, es posible encontrar versiones notablemente diferentes, en ocasiones hasta contradictorias, de la citada interpretación.

En la interpretación de Copenhague aparecen ligadas cuestiones epistemológicas y cuestiones ontológicas, si bien a estas últimas, dada la atmósfera positivista en la que se desenvolvía la investigación en física en la década de los veinte y los treinta, se las intentó evitar infructuosamente. El núcleo de esta interpretación es la tesis de Bohr según la cual los conceptos clásicos con los que la física describía el mundo siguen siendo necesarios para explicar los fenómenos cuánticos tal como nuestros instrumentos los detectan y

⁵ No es posible proporcionar aquí información cumplida de las diversas interpretaciones que, con mayor o menor fortuna, han sido propuestas como alternativas a la de Copenhague. Para ello remitimos a la excelente obra de Max Jammer (1974) o, en un nivel introductorio, a la muy didáctica de Nick Herbert (1985).

⁶ Jammer 1974, p.87.

⁷ Sobre este particular, véase Folse 1985, esp. los capítulos 3 y 8.

⁸ Destacan además Wolfgang Pauli, Max Born, Pascual Jordan y Paul Dirac. Sus ideas filosóficas son deudoras en gran medida de los tres citados en el texto.

miden, pero –y he aquí lo esencial– no son aplicables a los sistemas cuánticos considerados *en sí mismos*, ya que para determinadas características que se obtienen en una medición sobre un sistema cuántico, sólo se puede decir que adquieren «realidad» en el conjunto del dispositivo experimental.

No debe confundirse esta afirmación con la idea, bien conocida por la tradición filosófica, de que determinadas propiedades que atribuimos a los objetos, tales como los colores, los sabores y los olores (las cualidades secundarias de Galileo), no tienen sentido sin un observador que las perciba. En realidad, aunque esto pueda ser admitido, se supone que los objetos poseen algunas características intrínsecas (reflejan sólo la luz con determinada longitud de onda, desprenden moléculas en la saliva o en el aire circundante, etc.) responsables de las reacciones neuroquímicas producidas en el observador. Esas características serían poseídas de manera definida por los objetos con independencia de que fueran o no observados, y su naturaleza no cambiaría al variar las condiciones de observación. Lo que Bohr sostiene no va tan lejos como antes fuera el obispo Berkeley, pero tampoco se queda en la mera constatación de que algunas propiedades que atribuimos a las cosas hacen referencia inevitable a un observador con un sistema sensorial determinado. Bohr considera que no hay nada objetivo, definido e independiente tras determinados atributos de los sistemas microfísicos cuando éstos no están siendo observados. Para esas características que cambian en diferentes observaciones (propiedades dinámicas) sí que su *ser* consiste en *ser percibido*, o, como diría Heisenberg, su «suceder» está restringido a su observación⁹. Son abstracciones que no obedecen a ningún rasgo del sistema microfísico en sí mismo, sino que surgen en el conjunto de la situación experimental. Por eso, en tales casos, más que de *propiedades* o de *atributos*, el lenguaje de la teoría cuántica habla de *procesos* y de *interacciones*¹⁰.

Esta tesis tiene una justificación que podemos poner en palabras del propio Bohr: «La magnitud finita del cuanto de acción

⁹ Cf. Heisenberg 1963, p. 52. Estas consideraciones no tienen por qué aplicarse a otras características, como la carga, la masa y la magnitud del spin, que no cambian en mediciones sucesivas y son compartidas por cada tipo de «cuantones». Born las llamaba 'invariantes de observación' y fundamentaba en ellas la atribución de realidad a las partículas subatómicas. Cf. Herbert 1985, pp. 99 ss. y J. Vuillemin, «Física cuántica y filosofía», en S. Deligeorges (ed.) 1990, pp. 190-191.

¹⁰ Cf. Jammer 1966, p. 381.

impide hacer una distinción neta entre el fenómeno y el instrumento de observación»¹¹. Esto es, la existencia de cuanto de acción impide el control total de la reacción del objeto al actuar sobre él el aparato de medida, de modo que el comportamiento del objeto observado sólo tiene sentido considerado como producto de la interacción entre ambos. El fenómeno observado no puede ser descrito, por tanto, como el comportamiento del objeto mismo. Es el resultado de la completa situación experimental, incluido el instrumento de observación. Pero además, en la medida en que es inseparable de dicha situación y carece de sentido fuera de ella, es en ella en la que se define como un fenómeno de un tipo o de otro, y no puede ser reconstruido independientemente, como si se tratase de un mero aspecto de la realidad objetiva cuyo modo de acceso puede ser obviado una vez que se sabe en qué lugar de la realidad encajarlo. Se deja ver de este modo un claro principio de la epistemología bohriana: la teoría cuántica no versa directamente sobre la realidad, sino sobre los fenómenos y, por tanto, sobre nuestro propio conocimiento de las cosas. «Nos encontramos aquí –escribe Bohr en el mismo lugar– bajo un nuevo aspecto, esa antigua verdad que dice que al describir los fenómenos nuestro propósito no es revelar su esencia misma sino establecer sólo, y en la medida de lo posible, relaciones entre los múltiples aspectos de nuestra experiencia»¹². Heisenberg, apurando aún más las cosas, saca una conclusión dura de oír en la boca de un físico: «las leyes naturales que se formulan matemáticamente en la teoría cuántica no se refieren ya a las partículas elementales en sí, sino a nuestro conocimiento de dichas partículas»¹³.

Las ideas filosóficas de los padres de la interpretación de Copenhague encierran, como decimos, variaciones sutiles que cobran gran importancia a la hora de responder a los enigmas fundamentales de la teoría cuántica. Ahora bien, sin olvidar en absoluto que Bohr, Heisenberg y von Neumann establecieron una compleja relación, muy diferente a la realista de la física clásica, entre la realidad, la teoría, el instrumental de observación y el observador, y que se dejaron llevar con frecuencia en sus explicaciones por la retórica idealista, hay que decir sin embargo que ninguno fue un idealista en el sentido fuerte de la palabra. Ninguno de ellos negó la existencia de una realidad independiente del sujeto cognoscente; tampoco en el nivel cuántico:

¹¹ Bohr, «Introducción» (1929), en Bohr 1988, p. 60.

¹² Bohr 1988, p. 66.

¹³ Heisenberg 1986, p. 14.

ninguno dudó, por ejemplo, de que el electrón existiera. Son, por tanto, exageradas las quejas acerca de un supuesto misticismo de la teoría cuántica que diluiría por completo la realidad¹⁴.

Hay además quienes, no dándose cuenta de la inconsistencia que ello encierra, tras afirmar que la interpretación de Copenhague niega la existencia de una realidad independiente, subrayan el carácter instrumentalista de dicha interpretación. Si la teoría cuántica es sólo una teoría útil para manejar ciertos datos empíricos, como cree el instrumentalista, entonces no puede extraerse de ella ninguna tesis sobre la estructura de la realidad, ni siquiera que dicha realidad es dependiente del observador. Si por el contrario se dice esto último, entonces la teoría incluye afirmaciones sobre la realidad que pretenden ser verdaderas y, por lo tanto, ya no es un mero instrumento de cálculo. En pura coherencia, un instrumentalista sólo podría sostener que el concepto de realidad independiente debe ser abandonado (quizá junto con otros conceptos clásicos) si quiere tener una teoría exitosa sobre el mundo subatómico. El propio Heisenberg dio pie para soslayar esta inconsistencia al defender ambas posturas en momentos diferentes de su vida. Quizás pueda tomarse como su posición final al respecto la recogida en su obra *Physics and Philosophy*. Allí distingue tres tipos de realismo: el *realismo metafísico* (el mundo, las cosas extensas, existen), el *realismo práctico* (hay afirmaciones que pueden ser objetivadas) y el *realismo dogmático* (todas las afirmaciones acerca del mundo material pueden ser objetivadas). Heisenberg rechaza el realismo metafísico por hacer un uso excesivamente ingenuo del término 'existencia', pero cree que no se gana nada sustituyéndolo por una filosofía positivista que tome las percepciones en lugar de las cosas como elementos últimos de la realidad. Rechaza asimismo el realismo dogmático, que considera propio de la física clásica y que atribuye también a Einstein, porque ha sido puesto en jaque por la teoría cuántica. Sin embargo, del realismo práctico dice que «ha sido siempre y siempre será una parte

¹⁴ Así por ejemplo las de Prigogine y Stengers 1990: «[...] ¿cómo entender que una ciencia pueda llegar a negar, a la manera de un saber místico, la realidad de lo que se proponía comprender?» (p. 190). Bien es verdad que Heisenberg (1986) llega a escribir lo siguiente: «La noción de la realidad objetiva de las partículas elementales se ha disuelto por consiguiente en forma muy significativa» (p. 14), pero lo hace para subrayar que la teoría cuántica se ocupa de interacciones entre los aparatos de medida y los sistemas físicos observados y que «no le es lícito hablar sin más de la Naturaleza 'en sí'» (p. 15), no para negar la existencia real de los sistemas observados.

esencial de la ciencia natural»¹⁵. Entre los elementos teóricos que se consideran centrales en la interpretación de Copenhague, los que mejor reflejan la desviación del realismo clásico quizás sean la interpretación probabilística de la función de onda, formulada por Born, y el principio de complementariedad de Bohr. Veamos por qué.

En 1926, el mismo año en que Schrödinger presenta su mecánica ondulatoria y meses antes de que Heisenberg formulara el principio de indeterminación, Max Born hizo una crítica de la interpretación realista que Schrödinger había dado de ψ y ofreció una interpretación alternativa que, aceptada en lo esencial por Bohr y por Heisenberg, se convirtió en la interpretación ortodoxa. Born pensaba que la multidimensionalidad de ψ y su valor complejo impedían considerarla como la representación de una onda real, tal como pretendía Schrödinger. Sin embargo, era posible atribuir un significado real a $|\psi|^2$, esto es, al cuadrado de su valor absoluto, que será siempre un número real no negativo. Einstein había interpretado anteriormente la dualidad onda-partícula en el caso del fotón considerando que el cuadrado de la amplitud de la onda luminosa (es decir, su intensidad) daba la densidad de probabilidad de la *existencia* de fotones en ese punto.

Born aplicó esta idea a la función de onda de cualquier partícula e interpretó $|\psi|^2 d\tau$ como la densidad de probabilidad de encontrar dicha partícula en el volumen $d\tau$ ¹⁶. Born aún sostenía la idea de que las partículas cuánticas eran como las partículas clásicas, en el sentido de que tenían una posición y un momento definidos en cada instante, y reducía los aspectos ondulatorios introducidos por el formalismo a una mera representación de nuestro conocimiento sobre el comportamiento de esas partículas. Nótese que a lo que se refiere $|\psi|^2$ es al resultado obtenido en un proceso de medida y no a una realidad objetiva: se trata de la probabilidad de que un observador *encuentre* la partícula *si efectúa una medición*, en lugar de la probabilidad de que la partícula esté allí sin más. Con ello, dicho sea de paso, se podía dar una solución fácil al problema del colapso de la función de onda: no habría ningún colapso de ninguna onda real provocado por nuestra medición, sino un mero cambio perfectamente explicable en nuestro estado de conocimiento sobre el sistema. De no saber qué valor tomarán determinadas variables, pasaríamos a conocer

¹⁵ Heisenberg 1963, p. 75.

¹⁶ Cf. Max Born 1926. Cf. también Jammer 1966, pp. 281-290 y 1974, pp. 38-44.

ese valor con exactitud.

Sin embargo, la formulación del principio de indeterminación descartó la imagen corpuscular que Born había dibujado. Por otra parte, aunque en el Congreso Solvay de 1927 la mayor parte de los presentes estuvo dispuesto a admitir que la función de onda era una expresión de nuestro conocimiento sobre un evento y no la representación de los eventos mismos, los experimentos de difracción de electrones (experimento de la doble rendija), que mostraban fenómenos ondulatorios reales en los sistemas microfísicos, parecían indicar que «la función ψ tenía que ser algo físicamente real y no meramente una representación de nuestro conocimiento»¹⁷. No obstante, era factible mantener la interpretación probabilística si, al margen de toda discusión sobre la referencia real de ψ , se usaba $|\psi|^2$ como un instrumento matemático para calcular los resultados posibles de una medición. Otra posibilidad era otorgar algún tipo de realidad, aunque fuese intermedia entre la auténtica realidad y la mera posibilidad, a lo que la función representa. En esta línea, Heisenberg habló décadas más tarde de las ondas de probabilidad como expresión cuantitativa del concepto aristotélico de *potencia*¹⁸. Estas oscilaciones y titubeos explican por qué los significados 2), 3) y 4) de la función de onda antes citados, aún siendo muy distintos, han sido tenidos como propios de la interpretación de Copenhague.

Por lo que se refiere al principio de complementariedad, no resulta fácil ofrecer en pocas palabras una idea precisa del mismo, lo que no es sorprendente si se tiene en cuenta que nada menos que

¹⁷ Jammer 1974, p. 44.

¹⁸ Cf. Heisenberg 1963, p. 42. Para Heisenberg la «onda de probabilidad» sería, pues, algo parecido a una posibilidad o tendencia, pero sería también algo objetivo, algo inherente al objeto antes de la observación. Sin embargo, lo que podemos conocer del objeto observado es siempre el resultado de su interacción con los instrumentos de observación. Por eso, la «función de probabilidad» que se obtiene como resultado «combina elementos objetivos y subjetivos. Contiene afirmaciones sobre posibilidades, o mejor tendencias, (*'potentia'* en la filosofía aristotélica), y estas afirmaciones son completamente objetivas, no dependen de ningún observador; y contiene afirmaciones sobre nuestro conocimiento del sistema, que, claro está, son subjetivas en la medida en que pueden ser diferentes para diferentes observadores» (p. 53). La subjetividad debe ser entendida aquí en este sentido preciso, no en el sentido de que el sistema observado dependa de alguna manera de la consciencia del observador: «Ciertamente, la teoría cuántica —sigue diciendo Heisenberg— no contiene genuinos rasgos subjetivos, no introduce la mente del físico como una parte del suceso atómico» (p. 55).

Einstein se declaró incapaz de hacerlo. Como no es cuestión de intentar superar a Einstein en una tarea para la cual él estaba más capacitado que nadie, lo que aquí se diga no pretenderá pasar de un mero esbozo, aun contando con la ayuda de algunos excelentes análisis¹⁹.

El énfasis de su pensamiento como científico y como filósofo lo puso Bohr en algo que consideraba una consecuencia necesaria de la indivisibilidad del cuanto de acción: los conceptos de la física clásica no son irrestrictamente aplicables en el dominio atómico; o, para ser más precisos, la aplicación de determinados conceptos clásicos en la descripción de un fenómeno cuántico excluye la aplicabilidad de otros conceptos que en la física clásica habrían podido acompañar sin problemas a los primeros. Se puede efectuar, por ejemplo, una caracterización espacio-temporal de un sistema microfísico (determinar su posición en un instante concreto), pero entonces no se pueden determinar los valores de la energía y del momento, que son necesarios para caracterizar procesos causales del sistema mediante la aplicación de las respectivas leyes de conservación; y viceversa, si se hace esto último no se puede hacer lo primero.

Igualmente, es posible determinar el comportamiento del sistema atendiendo a sus aspectos corpusculares, o bien atendiendo a sus aspectos ondulatorios, puesto que un sistema microfísico permite las dos posibilidades, pero lo que no se puede es determinar ambos aspectos simultáneamente. Las condiciones experimentales en las que el sistema es susceptible de ser descrito como partícula excluyen a las condiciones experimentales en las que es susceptible de ser descrito como onda. Bohr llama a estas posibilidades alternativas 'descripciones complementarias', y el calificativo no es aquí accidental. Son descripciones complementarias porque, siendo excluyentes, ambas son necesarias para dar una caracterización completa del sistema microfísico. Pero no hay en ello ninguna contradicción, puesto que para Bohr estas descripciones lo son del *fenómeno* cuántico, esto es,

¹⁹ Particularmente Folse 1985 y Jammer 1974. Este último autor se aventura con la siguiente definición: «Una teoría T admite una interpretación de complementariedad (*complementarity interpretation*) si se satisfacen las siguientes condiciones: (1) T contiene (al menos) dos descripciones D_1 y D_2 de su objeto de estudio; (2) D_1 y D_2 se refieren al mismo universo de discurso U (en el caso de Bohr, la microfísica); (3) ni D_1 ni D_2 tomados aisladamente dan cuenta exhaustiva de todos los fenómenos de U ; (4) D_1 y D_2 son mutuamente excluyentes en el sentido de que su combinación en una descripción única conduciría a contradicciones lógicas» (p. 104).

del conjunto del sistema observado y del instrumento de observación (que no pueden ser considerados con independencia el uno del otro), y no de la realidad objetiva. Si fueran descripciones de la realidad objetiva, habría que atribuirle a ésta la posesión simultánea de características contradictorias. Las descripciones clásicas en términos de ondas y de partículas no serían aplicables por este motivo a una realidad exterior, sino únicamente al modo en que la realidad se nos aparece en el contexto de las condiciones experimentales, y en este caso lo serían de manera complementaria. Se trata, por otro lado, de una limitación en la aplicabilidad que no sería superable sustituyendo esos conceptos clásicos por otros nuevos, porque la expresión de las experiencias obtenidas a través de nuestros instrumentos de observación no puede prescindir de ellos²⁰.

El *principio de indeterminación*, formulado por Heisenberg casi al mismo tiempo que Bohr desarrollaba por escrito estas ideas (febrero de 1927), fue visto por este último como una confirmación de las mismas. El principio de indeterminación (o incertidumbre) es una de las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica, obtenida mediante una derivación puramente formal de otras ecuaciones de la teoría. El significado ortodoxo de esta ecuación —que no es el único posible— afirma que los valores de las variables *canónicamente conjugadas*, como posición y momento, o energía y tiempo, no pueden ser medidos simultáneamente con un grado de precisión arbitrario; el error en la medición conjunta es irreductible por debajo de un cierto límite aproximadamente igual a la constante de Planck. Así pues, cuanto más precisión se consiga en la determinación del valor de una de esas variables, menos precisión se podría conseguir en la determinación del valor de su correspondiente conjugada.

En un primer momento Heisenberg explicó la limitación teórica expresada por el principio de indeterminación acudiendo a una limitación de tipo práctico: la perturbación inevitable que en cualquier acto de observación producen los instrumentos de medida

²⁰ Cf. Bohr 1988, p. 64. Feyerabend lo ha sintetizado en pocas palabras: «Los conceptos ondulatorios y los conceptos corpusculares son los únicos conceptos disponibles para la descripción del carácter de la luz y la materia. La dualidad muestra que estos conceptos no pueden ser ya aplicados de forma general, sino que sólo pueden servir para la descripción de lo que sucede bajo ciertas condiciones experimentales. Usando términos familiares de la epistemología esto significa que la descripción de la *naturaleza* de la luz y la materia ha de ser reemplazada ahora por una descripción del modo en que la luz y la materia *aparecen* bajo ciertas condiciones experimentales». Feyerabend 1981, pp. 316-317.

sobre el sistema microfísico impediría aumentar la precisión por encima del límite prescrito. Si en la física clásica la perturbación causada por los instrumentos sobre el sistema observado era calculable y, en principio, mediante los refinamientos experimentales adecuados, era evitable o minimizable hasta volverse irrelevante, en la física cuántica, la indivisibilidad del cuanto de acción y su importancia en el ámbito atómico la convertía en algo irreductible e incontrolable. Esta explicación presupone que el sistema microfísico posee antes de la observación valores determinados para las variables consideradas y que esos valores son modificados por la acción de nuestros instrumentos en el acto de observación, quedando ya para siempre desconocido su valor exacto. La indeterminación no sería, pues, una característica del sistema, sino una limitación en nuestra capacidad para conocerlo. Esa es la idea que subyace al menos en el ejemplo de Heisenberg del microscopio de rayos gamma. Ahora bien, tal cosa, aparte de obviar la posibilidad de mediciones que no perturban el sistema, como la que describieron Einstein, Podolsky y Rosen en el famoso experimento mental del que ahora hablaremos, contradecía la tesis de su maestro Bohr sobre la imposibilidad de tratar al instrumento de medida y al microsistema observado como dos entidades independientes. Por eso Heisenberg abandonó pronto esta explicación, aún cuando muchos científicos y manuales de física se la siguen atribuyendo como si hubiese sido su opinión definitiva.

La explicación acordada finalmente por Bohr y Heisenberg sobre el principio de indeterminación se basa en la citada tesis de Bohr (más tarde, sin embargo, Heisenberg intentará atribuirle algún tipo de realidad «potencial» a las propiedades del sistema antes de la observación). Dado que no cabe considerar por separado el sistema observado y el instrumento empleado, a no ser como una mera abstracción, no cabe tampoco hablar de las propiedades medidas por el instrumento como si fueran independientes de éste. Antes de ser medido, el sistema microfísico no posee ciertos atributos en una forma definida. Sólo después del acto de medición, y en el contexto de la completa situación experimental, se puede decir que el sistema adquiere un valor definido para esos atributos. Dicho claramente, antes de que alguien lo observe, un electrón no tiene una posición o una velocidad concretas; cuando alguien mide su posición o su velocidad, el mismo proceso de medición hace que el electrón adquiera una posición o una velocidad determinadas, pero si se mide su posición con gran exactitud la situación experimental excluye hacer lo propio con la velocidad (y viceversa), ya que en cada caso

son necesarias diferentes interacciones con el microsistema. Folse lo ha explicado con acierto:

En lugar de suponer, como hace la interpretación «perturbacionista», que el concepto clásico de estado del sistema representa de hecho al sistema pero que el principio de incertidumbre muestra que éste no puede ser *conocido*, Bohr intentó mostrar que el concepto clásico de estado del sistema es una meta alcanzable sólo si se supone que es posible aplicar al sistema al mismo tiempo un modo de descripción espacio-temporal y un modo de descripción causal. Puesto que el postulado cuántico implica que esto es precisamente lo que no se puede hacer, el concepto de estado mecánico-clásico de un sistema ya no está bien definido cuando se aplica a los objetos de la descripción mecánico-cuántica²¹.

De hecho, si la interpretación «perturbacionista» fuera correcta, entonces sí que cabría pensar, como hizo Einstein, que la teoría cuántica no era una teoría *completa*, pues sería incapaz de recoger y de dar cuenta de determinados valores bien definidos del sistema. Cualquier duda al respecto se encargó Bohr de despejarla en la respuesta que dio a Einstein²².

Tenemos, pues, que para Bohr los conceptos que emplea la física no se refieren a una realidad exterior directamente (que, sin embargo, no es negada), sino a un objeto fenoménico que es el resultado de la conjunción de dos *sistemas físicos* mutuamente dependientes –el instrumento de medida y el sistema observado–,

²¹ Folse 1985, p. 132.

²² Arthur Fine cree que fue precisamente la respuesta de Bohr a la paradoja EPR la que le hizo rechazar definitivamente la explicación «perturbacionista», que Bohr habría mantenido por ejemplo en el Congreso Solvay de 1927, y concluye que «el artículo de EPR tuvo éxito en neutralizar la doctrina de la perturbación de Bohr. Forzó a Bohr a refugiarse en una perturbación meramente semántica y, por ello, eliminó una base física plausible e intuitiva para las ideas de Bohr»: Fine 1986, p. 35. En todo caso, se piense con Folse que la explicación «perturbacionista» procede de Heisenberg y que Bohr la rechazó *motu proprio* en cuanto percibió el choque con el principio de complementaridad, o se piense con Fine que la aceptó de buena gana porque creyó que era la explicación mejor de la indeterminación cuántica hasta que la paradoja EPR le hizo comprender el error, lo que está claro es que después de 1935 Bohr ya no la mantenía. No se comprende por tanto cómo todavía hoy se defiende tan ampliamente la explicación «perturbacionista», cuando además no puede ser mantenida coherentemente si es que hemos de tomar en serio la no-localidad de los sistemas cuánticos. Cf. Herbert 1985, pp. 227-229.

inseparablemente integrados en una totalidad que sólo puede ser escindida a modo de abstracción. Tenemos también que Heisenberg modificó sus ideas iniciales para ponerlas en consonancia con las de Bohr, aunque en ocasiones llegara a adoptar un instrumentalismo que dejaba al formalismo de la teoría como una herramienta predictiva sin referente fenoménico o real. Tenemos finalmente que para ambos y para Born la función de onda es un procedimiento de cálculo que delimita la probabilidad de obtener ciertos resultados experimentales, con lo que además del realismo de la mecánica clásica queda desterrado también el determinismo, muy a pesar de Einstein. Pues bien, von Neumann introducirá un nuevo elemento en la interpretación de la teoría cuántica que la escorará hacia el idealismo subjetivo, alejándola de la epistemología bohriana. Me refiero al papel central que otorga a la conciencia en el acto de medición.

En su influyente obra *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*, publicada en 1932, von Neumann establece una formalización axiomática de la mecánica cuántica en la que los estados atómicos son caracterizados por vectores en el espacio abstracto de Hilbert (un espacio vectorial de infinitas dimensiones). La axiomatización de von Neumann consigue, entre otros, dos resultados importantes. Por un lado permite derivar la mecánica de matrices de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger como casos particulares. Por otro, proporciona a von Neumann la base para su famosa prueba de la completud de la mecánica cuántica, o más precisamente, para su prueba de la imposibilidad de completar mediante variables ocultas la mecánica cuántica con el fin de convertirla en una teoría determinista. Pero desde el punto de vista filosófico se obtenía en esta obra una conclusión aún más interesante. Según von Neumann, el fenómeno cuántico, más que un todo inanalizable, forma un compuesto en el que la frontera entre el objeto observado y el instrumento de medida puede ser desplazada arbitrariamente, con lo cual también el instrumento puede ser tratado, a diferencia de lo que Bohr pensaba, como un sistema cuántico representado por la función de onda. Esto significa que no es en el instrumento donde dicha función colapsa. Y por tanto, sólo puede ser la *conciencia* del observador la que en el acto de medición haga que el sistema observado pase súbitamente de estar en una superposición de estados evolucionando de manera causal según la ecuación de Schrödinger a estar en uno sólo de esos estados. La conciencia del observador es el «lugar» donde se produce el colapso de la función de onda o, para ser coherentes con la terminología de von Neumann,

donde se reduce el vector de estado. Ya no es sólo que las leyes de la mecánica cuántica, más que a la realidad exterior, hagan referencia a lo fenoménico, a la totalidad formada por el sistema observado y el dispositivo experimental, o incluso a nuestro conocimiento, es además que todo lo que el físico pueda llamar 'realidad' en el nivel cuántico viene determinado por la conciencia humana en ejercicio²³.

III. LA PARADOJA EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN

En 1935, poco después de la aparición del libro de von Neumann, y bajo la forma de dos ingeniosos experimentos mentales, se llevó a cabo un desafío explícito al «espíritu de Copenhague» por parte de dos de las grandes figuras que habían contribuido al nacimiento de la física cuántica. En uno de esos experimentos, Schrödinger puso de manifiesto que las paradojas surgidas de las superposiciones de estados en los sistemas microfísicos no estaban confinadas en el ámbito atómico y subatómico, donde sólo los físicos interesados las encontrarían, sino que, para nuestra intranquilidad, podían ser trasladadas al ámbito macroscópico. Si la interpretación de von Neumann era correcta, sería posible construir un dispositivo experimental basado en un fenómeno de desintegración atómica, en el cual un gato permanecería antes de que alguien lo observara en una superposición de estados vivo/muerto (es decir, ni vivo ni muerto), y sólo adquiriría uno de esos dos estados en el momento en que se realizara la observación.

Por su parte, Einstein en colaboración con los jóvenes físicos Boris Podolsky y Nathan Rosen presentó en un breve artículo hoy sobradamente famoso un caso imaginario con el que sus autores pretendían mostrar la incompletud de la mecánica cuántica. La cuestión de la completud de la mecánica cuántica y del papel de la

²³ La diferencia entre esta solución y las tesis de Bohr es, como puede verse, bastante marcada. A este respecto N. Herbert 1985 ha escrito que «aquellos que abrazan la ontología ortodoxa (la mayoría de los físicos) caen en dos campos: los seguidores de Bohr y Heisenberg (copenhagueños) y los seguidores de John von Neumann» (p. 143). Sobre la postura de Bohr acerca del problema de la medida Herbert aclara: «En la interpretación de Copenhague, todas las misteriosas transiciones entre los modos de ser clásico y cuántico ocurren dentro del instrumento de medida o más exactamente en el límite entre el instrumento de medida y el sistema cuántico. Vemos que la interpretación de Copenhague más que resolver el problema de la medida, lo oculta. Barre el problema bajo la alfombra, en un lugar del mundo inaccesible al escrutinio humano —el interior del instrumento de medida» (p. 144).

probabilidad en dicha teoría había preocupado a Einstein desde el principio, y la había discutido con Bohr ampliamente desde los Congresos Solvay de 1927 y 1930. Para Bohr y para todos los partidarios de la ortodoxia, la mecánica cuántica era una teoría completa, o sea, la función de onda recogía toda la información relevante acerca de un sistema individual, sin que quedara fuera de ella ninguna *variable oculta* cuyo conocimiento pudiera restaurar el determinismo perdido de la física clásica. El carácter probabilístico de las predicciones cuánticas era, por tanto, un dato irreductible y último; no procedía, como se decía de la probabilidad clásica, de una falta de conocimiento sobre el sistema observado. A pesar de que von Neumann parecía haber demostrado en su libro la inviabilidad de las variables ocultas, Einstein se resistía a descartar la posibilidad de una futura teoría capaz de explicar causalmente, mediante un conocimiento más completo, lo que la mecánica cuántica atribuía al puro azar; y calificaba de «filosofía tranquilizadora», e incluso de «religión», las convicciones de Bohr y de Heisenberg en sentido contrario²⁴. Para justificar su arraigada esperanza tenía que mostrar la existencia de variables ocultas que la mecánica cuántica no recogía y cuyo conocimiento completaría la descripción del sistema observado. El experimento de Einstein-Podolsky-Rosen (experimento EPR) fue pensado y diseñado expresamente a tal efecto, si bien su significado actual ha desbordado el marco estricto del problema de la completud y ha dado lugar al desarrollo de reflexiones más amplias sobre la relación entre el formalismo de la teoría y el mundo real, en una dirección, eso sí, muy diferente de la que habría sido del agrado de

²⁴ En carta a Schrödinger del 31 de mayo de 1928 (citada en Jammer 1974, p. 130). La correspondencia de Einstein, especialmente la mantenida con Max Born, es sumamente esclarecedora en cuanto a la fuerza con que Einstein sustentaba esta convicción y al rechazo que provocaba en sus colegas. El 29 de abril de 1924 escribe a Born: «La idea de que un electrón expuesto a la radiación elija *por su propia voluntad* el momento y la dirección en que dará el salto me resulta insoportable. En ese caso preferiría ser zapatero o empleado de una timba y no un físico» (A. Einstein y H. y M. Born 1973, p. 108). Y todavía en 1944 le explicaba en otra carta: «En nuestras perspectivas científicas nos hemos vuelto antípodas. Tu crees en el Dios que juega a los dados y yo creo en la ley y la ordenación total de un mundo que *es* objetivamente y que yo trato de captar en una forma locamente especulativa [...] Yo *creo* firmemente, pero tengo la esperanza de que alguien descubrirá un método más realista, con bases más tangibles que el mio. El gran éxito inicial de la teoría cuántica no basta para hacerme creer en el juego de datos fundamental, aunque sé perfectamente que los colegas más jóvenes atribuyen mi actitud a la esclerosis. Llegará el día en que se vea cuál de las dos actitudes instintivas era la acertada» (p. 189).

Einstein.

El artículo en cuestión comienza dando un criterio de completud para cualquier teoría física. Para que una teoría sea completa «todo elemento de la realidad física ha de tener una contrapartida en la teoría física.» Pero ¿qué debe considerarse como «elemento de la realidad física»? La aclaración de esta cuestión es un punto esencial del experimento EPR y dice así: «Si podemos predecir con certeza (*i. e.*, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física sin perturbar el sistema de ningún modo, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física»²⁵. Debe tenerse presente que sus autores presentan esto como una condición suficiente para atribuir realidad a una magnitud física y no pretende ser una definición rigurosa de realidad física. Si se puede calcular el valor exacto de una magnitud sin tan siquiera intervenir sobre el sistema físico al que se le atribuye, parece razonable pensar que es porque en realidad el sistema tiene ese valor para esa magnitud. Max Jammer ha hecho notar dos premisas adicionales que son asumidas de pasada a lo largo del artículo para obtener la conclusión final. Por un lado se supone que para dos sistemas que hayan interactuado en el pasado, si esa interacción ha cesado ya en el momento en que se efectúa la medición, ningún cambio que tenga lugar en uno de ellos puede ser consecuencia de un cambio en el otro (supuesto de *localidad*). Por otro lado se acepta que las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica están confirmadas empíricamente (supuesto de *validez*)²⁶. La importancia del supuesto de localidad, supuesto que en el artículo se da por incuestionable, será realzada en el ulterior desarrollo del problema abierto por el experimento EPR. Este supuesto elimina la posibilidad de que la medición sobre un sistema ejerza alguna influencia instantánea sobre el otro sistema. Una vez separados, los dos sistemas son independientes. Pensar lo contrario sería para EPR tanto como postular misteriosas acciones telepáticas entre los dos sistemas. Años más tarde, en carta a su amigo Michele Besso, Einstein llega a poner sobre este supuesto el énfasis del argumento: «Yo descarto [que el estado cuántico caracterice completamente un estado real], pues nos obligaría a admitir que existe una ligadura rígida entre partes del sistema alejadas unas de las otras de manera cualquiera en el espacio (acción a distancia inmediata, que

²⁵ Einstein, Podolsky y Rosen 1935, p. 777.

²⁶ Cf. Jammer 1974, p. 185.

no disminuye cuando la distancia aumenta)»²⁷.

Mediante el experimento mental que proponen, Einstein, Podolsky y Rosen quieren probar que si se acepta la caracterización dada de la realidad física correspondiente a una magnitud física (junto con los dos supuestos implícitos de localidad y validez), entonces la mecánica cuántica es incompleta, pues habría elementos de la realidad física sin una contrapartida en la teoría. Veamos el experimento. Sea un sistema compuesto por dos partículas *A* y *B* que han estado interactuando entre el tiempo $t = 0$ y $t = T$ y después han dejado de interactuar. Se supone que se conoce el estado de las dos partículas antes de $t = 0$ y, por tanto, se puede determinar (mediante la ecuación de Schrödinger) el estado del sistema compuesto por las dos partículas en cualquier tiempo posterior, incluso en $t > T$ cuando han dejado de interactuar. Si medimos ahora el momento de una de las partículas (digamos *A*) mediante el instrumental apropiado, podemos calcular con seguridad el momento de la partícula *B* sin tener que efectuar ninguna medición sobre ella. Asimismo, si en lugar del momento, decidimos medir la posición de *A*, podemos calcular la posición de *B*. Puesto que en ambos casos hemos podido establecer los valores de la posición y el momento de una de las partículas sin perturbarla en absoluto, hemos de aceptar que la partícula posee real y simultáneamente una posición y un momento con esos valores. Ahora bien, la mecánica cuántica no recoge esa posibilidad en su formalismo, por lo tanto la mecánica cuántica es una teoría incompleta.

Bohr se apresuró a dar una respuesta al argumento. Apareció publicada bajo el mismo título que el artículo de EPR en el número siguiente de la *Physical Review*. Allí Bohr critica el criterio de realidad propuesto y se reafirma en la idea de que la única descripción posible es la del fenómeno cuántico, es decir, la totalidad de la situación experimental. Una medida efectuada sobre el sistema es una medida sobre esa totalidad. Ciertamente que no se perturba directamente la partícula *B* —reconoce Bohr—, pero al medir la posición o el momento de la partícula *A*, sí que se ejerce «una influencia sobre las condiciones mismas que definen los tipos posibles de predicciones sobre el comportamiento futuro del sistema», entendiéndose que en el sistema sigue incluida la partícula *B*, que no puede ser considerada independientemente de *A*, aunque haya dejado de interactuar con ella. Y «puesto que estas condiciones constituyen un elemento

²⁷ Carta a M. Besso del 8 de octubre de 1952, en Einstein 1994, p. 419.

inherente de la descripción de cualquier fenómeno con el que pueda asociarse correctamente el término 'realidad física', la conclusión que sus autores sacan del experimento mental es injustificada²⁸.

¿Quién tenía la razón Bohr o Einstein? Lo cierto es que los argumentos de Einstein, aunque causaron revuelo, apenas hicieron impacto en la comunidad de los físicos; excepción hecha del propio Bohr, quien en su prolongado debate con Einstein siempre se tomó muy en serio las ideas de éste, hasta el punto de que, según se cuenta, el día anterior a su muerte aún trabajaba en una respuesta a sus objeciones. La opinión general, fomentada por los duros comentarios de su amigo Born y de Heisenberg, fue que Einstein se había vuelto demasiado conservador, intelectualmente hablando, y sus prejuicios filosóficos le impedían aceptar de buen grado las ideas revolucionarias que traía la teoría cuántica, aún cuando él mismo hubiera contribuido a crearlas. No hace falta comentar la injusticia cometida con esta opinión y la amargura que produjo en su destinatario. Einstein insistió siempre en que lo que le movió a criticar la doctrina de Copenhague fue su convencimiento de que la teoría cuántica no estaba en su forma final y definitiva, que no era más que un caso límite de una teoría radicalmente nueva aún por descubrirse, que los conceptos de la física clásica debían ser reemplazados por otros nuevos y no meramente restringidos en un uso complementario al ámbito de lo fenoménico²⁹. La acusación de esclerosis intelectual pudo ser en su momento una salida cómoda para algunos, pero hoy no es una explicación creíble. Independientemente del peso de sus convicciones filosóficas y del éxito de sus argumentos, es lícito decir que, en lugar de anclarse en las viejas ideas, lo que Einstein quiso fue impedir que se consagraran unas nuevas antes de haber sido suficientemente cuestionadas.

IV. REALISMO VERSUS LOCALIDAD

Así quedaron las cosas en lo fundamental durante tres décadas³⁰,

²⁸ Bohr 1935, p. 700, las cursivas son de Bohr.

²⁹ Cf. Fine 1986, cap. 2 y A. Pais 1984, cap. 26.

³⁰ En ese tiempo la discusión sobre los fundamentos de la teoría cuántica desde luego no cesó. Cabe destacar la interpretación estadística de la mecánica cuántica desarrollada por Alfred Landé (1952) la interpretación realista del *potencial cuántico* de David Bohm (1952), la interpretación de *los muchos universos* de Hugh Everett (1957), y la *paradoja del amigo de Wigner* formulada por Eugene Wigner (1961). Max Jammer sitúa en los primeros años

hasta que en 1964 el joven físico irlandés John Bell, investigador del CERN, fue capaz de darle un giro inesperado a la situación. Bell desarrolló y publicó un teorema matemático que abría la posibilidad, al menos en principio, de determinar experimentalmente quién tenía la razón, si Bohr y los partidarios de la interpretación de Copenhague o Einstein y los partidarios de las variables ocultas. Ese mismo año de 1964, en un artículo que se publicó dos más tarde, Bell mostró además que la prueba de von Neumann en la que se establecía la inviabilidad de cualquier ampliación de la teoría cuántica mediante variables ocultas estaba basada en un postulado cuya validez no se podía mantener para otros estados de tipo diferente a los considerados por von Neumann. Con ello justificaba teóricamente por qué David Bohm había podido elaborar usando variables ocultas un modelo (no local) del electrón que igualaba en capacidad explicativa al modelo mecánico-cuántico standard³¹.

El Teorema de Bell tiene un ámbito de aplicación que no se restringe a los sistemas microfísicos. Se pueden buscar ejemplos de la vida diaria que lo satisfagan. Pero aplicado a la teoría cuántica se obtiene como una consecuencia de aceptar conjuntamente el supuesto de que la mecánica cuántica ha de ser completada mediante variables ocultas y el criterio de localidad propuesto por Einstein, Podolsky y Rosen. El teorema en sí es una desigualdad matemática que limita el nivel de correlación esperable para los resultados de medidas simultáneas efectuadas sobre dos partículas que han estado interactuando. Esta desigualdad marca una diferencia cuantitativa susceptible de contrastación empírica entre la interpretación de Copenhague y la interpretación realista-local de Einstein. La mecánica cuántica entendida al modo de Copenhague predecía que bajo ciertas condiciones el grado de correlación debía sobrepasar el límite marcado por la desigualdad de Bell, y era, por tanto, mayor que el grado de correlación permitido por la teoría entendida al modo de Einstein, que predecía el cumplimiento de la desigualdad en todas las circunstancias. Así pues, en pocas palabras, Bell consiguió establecer

el comienzo del cuestionamiento por los físicos del «dogma de Copenhague» y cita como hecho significativo en la «creación de una atmósfera más crítica hacia la filosofía de la complementariedad» la publicación en 1949 del volumen sobre Einstein editado por P. A. Schilpp, en el que se aireaba la disputa Einstein-Bohr. Cf. Jammer 1974, p. 250.

³¹ Ambos artículos, el de 1964 titulado «On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox», en el que establece su famoso teorema, y el de 1966 titulado «On the problem of hidden variables in quantum mechanics», donde critica la prueba de von Neumann, están recogidos en su libro *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*; cf. Bell 1990.

a partir de la hipótesis de la localidad y de la existencia de variables ocultas una predicción empírica que resultaba incompatible con las predicciones de la mecánica cuántica en su forma conocida.

De ahí concluía que si las predicciones de esta última eran correctas, entonces había que desestimar las teorías de variables ocultas locales. Y había que hacerlo no tanto porque la idea de completar la mecánica cuántica mediante variables ocultas fuese en sí misma inaceptable, como porque una teoría de variables ocultas no podría encajar con las predicciones de la mecánica cuántica a no ser que contemplara la existencia de «un mecanismo por el que la colocación de un aparato de medida pueda influir en el resultado proporcionado por otro instrumento no importa lo remoto que se encuentre», es decir, a no ser que se prescindiera del supuesto de localidad, pues «es el requisito de localidad [...] lo que crea la dificultad esencial»³². Se comprende el interés que tenía mostrar experimentalmente el cumplimiento o incumplimiento de la desigualdad. Sabido eso, se habría dado un paso de gigante en la resolución de los problemas planteados en la fundamentación de la teoría cuántica. El mérito de haber conseguido montar (en 1982) un experimento con las mayores garantías corresponde a los físicos del Instituto de Óptica de la Universidad de París Alain Aspect, Jean Dalibard y Gerard Roger³³. El experimento consistía en lo esencial en una situación comparable a la descrita en el experimento EPR, solo que en lugar de medir la posición y el momento en un sistema de dos partículas, se medía el ángulo de polarización de dos fotones correlacionados emitidos por una fuente común. El resultado fue que las desigualdades de Bell no se cumplían en ese sistema, o lo que es igual, que las predicciones obtenidas con las hipótesis de las variables ocultas y la localidad eran fallidas. El realismo local de Einstein se hacía así insostenible, mientras que la interpretación de Copenhague salía de la prueba mejor parada que antes.

Pero este veredicto experimental no ha acabado con las esperanzas de los realistas acerca de la teoría cuántica. Paradójicamente, ha sucedido más bien lo contrario: son cada vez más los físicos dedicados a cuestiones de fundamentación que se declaran realistas en teoría cuántica. Porque, en efecto, con los datos expuestos cabe aún la posibilidad de salvar el realismo. Aunque algunos pocos no estén de acuerdo con que los resultados sean concluyentes y otros

³² Bell 1990, pp. 49 y 41.

³³ Cf. Aspect, Dalibard y Roger 1982.

discrepen en la manera de interpretarlos, se puede decir que para la mayoría el experimento de Aspect ha mostrado suficientemente que los sistemas microfísicos violan las desigualdades de Bell y que, en consecuencia, éstos presentan un grado de correlación entre los valores obtenidos en mediciones sucesivas mayor del que cabría esperar si se aceptan los supuestos del experimento EPR (supuesto de realidad, supuesto de localidad y supuesto de validez). Por lo tanto, si estos supuestos son los únicos pertinentes y conducen a predicciones que no se cumplen, al menos alguno de ellos debe ser rechazado³⁴. No parece razonable esperar que un físico profesional esté dispuesto a rechazar el supuesto de validez, sobre todo habida cuenta del enorme éxito experimental de la teoría cuántica. Por eso es lógico que las discusiones se hayan centrado en los otros dos supuestos.

Bohr y los partidarios de Copenhague descartaron desde el principio el criterio de realidad propuesto por EPR, y con él la supuesta incompletud de la teoría cuántica y la necesidad de variables ocultas. Si se les sigue en esto, como hacen la mayor parte de los físicos, el alto grado de correlación encontrado por Aspect entre los

³⁴ Otros añaden el supuesto implícito de la lógica clásica, con lo que, en su opinión, el problema podría resolverse sustituyendo la lógica clásica por una «lógica cuántica» diferente. Esta lógica cuántica es por lo usual una lógica trivalente o una lógica en la que pierden validez las leyes distributivas. Sin embargo, esta salida no ha tenido mucha aceptación. Sus críticos no ven con buenos ojos una estrategia que más parece una huida, que salva con un cambio en la lógica una dificultad que surge en una ciencia empírica. Para una breve exposición, véanse Jammer 1974) cap. 8 y S. Haack 1980, cap. 8. Por otro lado, R. Tuomela ha sostenido que el principio de realidad no es asumido por Bell en la derivación de su teorema. En su opinión, Bell se atiene a un supuesto más débil (la anticorrelación), con lo que en ningún caso cabría decir que el incumplimiento de las desigualdades de Bell puede refutar el realismo. (Tuomela 1985, pp. 52-64). Tiene razón Tuomela en esto último, el incumplimiento de las desigualdades de Bell no basta para refutar el realismo. Ahora bien, sí que obliga a concluir que, en caso de aceptar el realismo, se ha de rechazar el supuesto de localidad. Los supuestos de los que parte Bell explícitamente son la necesidad de variables ocultas y la localidad, por tanto del incumplimiento de las desigualdades de Bell se sigue que uno o ambos supuestos de partida son falsos. Supongamos que se rechaza la existencia de variables ocultas, entonces, en la medida en que éstas surgen como consecuencia del realismo y de la localidad (experimento EPR), aceptar el realismo implica rechazar la localidad. Supongamos que se rechaza la localidad, entonces es obvio que cualquier modelo realista ha de ser no-local. En todo caso, y esto es lo relevante, el incumplimiento de las desigualdades de Bell impide cualquier modelo cuántico realista y local, si bien no refuta directamente el realismo.

valores medidos obtiene una explicación, aunque desde luego no simple ni clara. Mientras no se efectúa ninguna medición sobre el sistema, éste evoluciona según la ecuación de onda de Schrödinger, sin tomar valores definidos para ciertos atributos. Dicha ecuación es aplicable al sistema como un todo, aun cuando sus partes (las dos partículas en el experimento EPR) estén alejadas y hayan dejado de interactuar. Sólo al realizar una medición sobre el sistema adquiere «realidad» el valor medido, pero como el sistema sigue siendo un todo hasta el momento de la medición, el resultado de ésta es algo que compete a ese todo. Así pues, no es extraño que el valor medido en una partícula esté correlacionado con el valor medido en la otra. Una vez que las condiciones experimentales que definen el valor obtenido en una partícula han sido puestas, lo han sido *para la totalidad del sistema* y, por tanto, también para la otra partícula. Por utilizar los términos aristotélicos a los que recurrió Heisenberg, el sistema como un todo encierra una serie de potencialidades que se actualizan en todo el sistema cuando se efectúa la medida. La actualización de determinadas potencialidades provocada por la medición en una partícula significa la actualización de otras potencialidades en la segunda partícula. Esta explicación hace que la cuestión de la localidad o no-localidad pierda sentido, porque no hay influencias transmitidas entre dos partículas, sino un todo inanalizable o, si se quiere, un sistema no-separable.

El inconveniente de esta solución es su alto coste desde el punto de vista epistemológico. Una epistemología fenomenista con su aparejada renuncia a predicar algo sobre la realidad independiente no es un precio que un científico pague alegremente, por mucho que se diga. Cuando la autoridad de Bohr y de los artífices de la interpretación de Copenhague estaba intacta, apenas si se oyeron las voces críticas que hemos citado. Muchos físicos aceptaron de buena gana la filosofía de alguno de ellos, a veces en difícil amalgama. Muchos otros se limitaron a refugiarse en una actitud pragmática, pensando quizá que con ello eran fieles al espíritu de Copenhague y al sano escepticismo profesional. Se ciñeron a la aplicación y el desarrollo de las ecuaciones y consideraron todo lo demás, es decir, las cuestiones sobre el fundamento de la teoría, como problemas filosóficos sin sentido que, en todo caso, ya habían sido despejados por Bohr.

Sin embargo, por razones diversas —que incluyen el influjo de la actitud realista de Bell, el desarrollo de modelos no locales de variables ocultas (todo lo discutibles y extraños que se quiera, pero viables) como el de David Bohm, el descrédito de la filosofía positi-

vista, y las dificultades para encajar la teoría de la relatividad con la teoría cuántica—, ha aumentado el número de físicos que declaran optar por la otra alternativa: mantener el realismo (normalmente en una variante más debilitada que la expresada por el criterio de realidad de EPR) y renunciar al supuesto de localidad³⁵. Existe actualmente la tendencia a tomar la no-localidad como una característica fundamental e intrínseca del universo. Las soluciones pueden ser diversas, pero todas han de reproducir las predicciones de la mecánica cuántica en lo que se refiere a las correlaciones altas encontradas en el experimento de Aspect. En líneas distintas están, por citar algunos ejemplos, la teoría de variables ocultas no locales de Bohm y Hiley, que postula la existencia de un «potencial cuántico» capaz de transmitir influencias instantáneas; la interpretación de los muchos universos de Everett, en la que se acepta la escisión del universo en tantos otros universos como posibles resultados de una medición en un proceso cuántico; la propuesta de Mario Bunge de atribuir a los «cuantones» propiedades borrosas con valores distribuidos y estados que no sólo dependen de las condiciones locales, sino de su pertenencia a un sistema, por separado espacialmente que éste se encuentre; la interpretación de Arthur Jabs, que hace de las partículas objetos extendidos (paquetes de onda) sin posición definida ni estructura interna, susceptibles de fusionarse con otras similares en una unidad donde pierde sentido la idea de distancia³⁶.

Una realidad no-local tampoco es ciertamente un plato de gusto para el físico. Por ella se paga un alto precio ontológico. En cualquiera de las propuestas citadas habría lugar para cosas muy diferentes de las acostumbradas en la física clásica. Acciones instantáneas a distancia que no disminuirían en intensidad por grande que ésta fuera (algo que no sucedía ni siquiera con la fuerza gravitatoria en el sistema newtoniano); campos indetectables y sin energía; universos que se multiplican súbita e incesantemente; «cuantones» con propiedades sin valores definidos; paquetes de onda unidos entre sí en sistemas sin estructura, etc. No obstante, es necesario considerar la posibilidad de que el rechazo que provocan estas extrañas consecuencias de la no-localidad obedezca más a prejuicios unidos al

³⁵ La tercera posibilidad, abandonar la idea de una realidad independiente y mantener la localidad no parece llevar a ninguna parte. Al fin y al cabo ¿a qué atribuir entonces esa localidad? Cf. Herbert 1985, pp. 234-238.

³⁶ Cf. D. Bohm y B. J. Hiley 1993, B. DeWitt y N. Graham (eds) 1973, M. Bunge 1985a, vol. 7 (I), A. Jabs 1992.

desarrollo de la ciencia moderna que a razones objetivas³⁷. Después de todo la no-localidad no es un concepto contradictorio y, aunque choque con el modo intuitivo que usamos en la vida cotidiana para representarnos el mundo, encaja con los hechos conocidos en el nivel microfísico. Parece haber además un amplio consenso en que las acciones a distancia postuladas no permitirían enviar señales a velocidades supralumínicas, con lo cual no se entra en conflicto con el segundo postulado de la relatividad especial³⁸. Quizás convenga atender a aquellos que piensan que el misterio de la no-localidad no encierra en realidad ningún misterio; que pedir una explicación de él es comportarse como los cartesianos a los que no bastaba la ley de la gravitación newtoniana y seguían clamando por la causa de la gravedad. Cuando en aquella ocasión histórica la acción a distancia que ejercía la fuerza gravitatoria newtoniana chocó con la repugnancia que un concepto así (que al cabo implica cierto tipo de no-localidad) despertaba en los físicos, incluido el propio Newton, la salida consistió en una huida hacia adelante que cualquier instrumentalista de hoy habría aplaudido. Se aceptó la ley de la gravedad como ley científica y se dejó al ámbito de lo especulativo la razón de su funcionamiento. De hecho, la insatisfacción con tal concepto motivó en los siglos siguientes el trabajo de grandes científicos en el desarrollo de la teoría de campos, hasta llegar a la Teoría General de la Relatividad de Einstein, con la que se pudo tener una explicación alternativa de la gravedad en la que la acción a distancia había desaparecido.

Afirma Hannah Arendt en su libro *La condición humana* que «ninguna supuesta revelación divina superracional y ninguna supuestamente abstrusa verdad filosófica ha ofendido tan notoria-

³⁷ Cf. D. Bohm y B. J. Hiley 1993, pp. 157-8, y J. T. Cushing 1994, pp. 16-22.

³⁸ Una notable excepción es Popper, quien siendo realista nunca se ha sentido muy proclive al abandono de la localidad. En el volumen III del *Post-scriptum a la Lógica de la investigación científica* afirma: «Si hubiera acción a distancia (incluso aunque no pudiera usarse esta acción para enviar señales), entonces la relatividad especial tendría que ser corregida y adaptada en consecuencia. (En realidad, tendríamos que volver a la interpretación de Lorentz del formalismo de la relatividad especial [...]). Popper, «Prefacio de 1982», en 1985, p. 43. La razón de ello sería que la velocidad infinita de esta acción a distancia implicaría una simultaneidad absoluta entre dos sucesos y, por tanto, un espacio absoluto. Curiosamente, también Bell sugirió que la solución menos costosa a estos problemas quizás estuviera en volver a la relatividad de Lorentz y Poincaré. Cf. Davies y Brown (eds.) 1989, pp. 70-71.

mente a la razón humana como ciertos resultados de la ciencia moderna»³⁹. Resulta difícil en los tiempos que corren no coincidir en ello. Sin embargo, sabemos bien, porque la historia nos lo ha enseñado repetidas veces, de la rapidez con que la razón humana olvida las ofensas cuando ello le reporta un beneficio. Puede que una vez acostumbrados a la nueva y extraña idea de la no-localidad y, sobre todo, una vez que se aprecie su conveniencia, desaparezca la perplejidad. Sólo el tiempo y el desarrollo de sus implicaciones pueden decirlo.

V. CONCLUSIONES

Ahora sabemos que no son posibles teorías locales de variables ocultas, y quizá para el físico eso no sea poco. Pero el problema filosófico, después de haber logrado perfiles más nítidos, permanece sin respuesta. Los resultados empíricos y los análisis teóricos en física cuántica ni apoyan ni refutan concluyentemente el realismo. Y no podía ser de otro modo, habría que añadir. Para empezar, lo que entra en conflicto con el realismo clásico no es la teoría cuántica entendida como puro formalismo, sino la teoría cuántica en alguna de sus interpretaciones posibles, bien que la aceptada por la mayoría de los físicos. Y en cualquier interpretación se incluyen presupuestos filosóficos que determinan el sesgo que tomarán las consecuencias que con su ayuda se deriven de las ecuaciones. Pero aunque se mostrara que la interpretación de Copenhague era la única viable de entre todas ellas, todavía quedaría por probar que con eso se había conculcado cualquier tipo de realismo. Recuérdese que Bohr mismo aceptaba un realismo con tintes kantianos (existe una realidad independiente del observador, pero nuestros conceptos no versan sobre ella misma) y mostraba desagrado hacia el instrumentalismo de Heisenberg. Hemos visto, sin embargo, que la interpretación de Copenhague no es la única posible y que existen interpretaciones rivales que, a pesar de no estar tan desarrolladas como aquella, dejan abierto el camino al realismo en la física cuántica. En particular la interpretación de David Bohm.

Es necesario subrayar además que el realismo es una doctrina filosófica por mucho que se añada el apellido de científico, e igual sucede con el antirrealismo. Es, pues, una caricatura la que presenta al antirrealista como alguien atenido al formalismo de la teoría, a los

³⁹ H. Arendt 1993, p. 316.

hechos y al método experimental, mientras que el realista estaría cegado por prejuicios metafísicos añadidos ilícitamente. El antirrealismo de la Interpretación de Copenhague contiene una conjunción de propuestas, algunas con un carácter tan filosófico como las del realismo de Einstein, por ejemplo. Que el realismo sea una doctrina filosófica no significa que las consideraciones de tipo fáctico sean irrelevantes para su evaluación. Pero tratándose de una posición filosófica general, en lugar de una teoría filosófica específica, los datos sacados de la ciencia no son determinantes para tomar una decisión definitiva; son un elemento de juicio entre otros posibles. La ciencia posee implicaciones y presupuestos filosóficos que le permiten una continua interacción con la filosofía, en una mutua influencia que, siendo fluida, rara vez es conminatoria. Rechazar el realismo porque el antirrealismo supuestamente encaja mejor con la mecánica cuántica sería, en suma, una forma más de cientifismo.

Como ideal de conocimiento (la expresión es de Feyerabend), el realismo en sus diversas formas y el antirrealismo en sus diversas formas ofrecen imágenes generales de la ciencia. El juicio que haya de efectuarse sobre ellos obtendrá su mejor basamento en la capacidad que dichas imágenes tengan para interpretar de manera plausible la historia de la ciencia: forzando menos los hechos, usando menos supuestos *ad hoc*, desplegando mejores y más ricas interpretaciones, etc. Pero incluso entonces no podrá hablarse de confirmación o refutación de dichos ideales de conocimiento, porque la historia no habla por sí sola si no la interrogamos mediante alguna teoría. Historiar es en el fondo interpretar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ARENDDT, H., 1993: *La condición human*, tr. R. Gil Novales, Barcelona: Paidós.
- ASPECT, A., J. DALIBARD y G. ROGER, 1982: «Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-varying Analyzers», *Physical Review Letters*, 49, pp. 1804-1807.
- BELL, J. S., 1990: *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, tr. J. L. Sánchez Gómez, Madrid: Alianza.
- BOHM, D. y B. J. HILEY, 1993: *The Undivided Universe. An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. London: Routledge.
- BOHR, N., 1935: «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review*, 48, pp. 696-702; reimpresso en J. A. Wheeler y W. H. Zurek (eds.) 1983, pp. 145-151.
- _____, 1988: *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, tr. M. Ferrero Melgar, Madrid: Alianza, (1ª ed. en inglés en 1961).
- BORN, M., 1926: «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge», *Zeitschrift für Physik*, 37, pp. 863-867; reeditado y traducido al inglés en J. A. Wheeler y W. H. Zurek (eds.) 1983, pp. 52-55.
- BUNGE, M., 1985: *Treatise on Basic Philosophy*, 8 vols., Dordrecht: Reidel.
- CUSHING, J. T., 1994: *Quantum Mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: The University of Chicago Press.
- DAVIES, P. C. W. y J. R. BROWN (eds.), 1989: *El espíritu en el átomo*, tr. L. Lastowska, Madrid: Alianza.
- DELIGEORGES, S. (ed.), 1990: *El mundo cuántico*, tr. M. C. Martín Sanz, Madrid: Alianza.
- DEWITT, B. y N. GRAHAM (eds.), 1973: *The Many-Worlds Interpretations of Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press.
- EINSTEIN, A., B. PODOLSKY y N. ROSEN, 1935: «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review*, 47, pp. 777-780; reimpresso en J. A. Wheeler y W. H. Zurek (eds.) 1983, pp. 138-141.
- _____, 1994: *Correspondencia con Michele Besso (1903-1955)*, ed. P. Speziali, Barcelona: Tusquets.
- EINSTEIN, A. y M. y H. BORN, 1973: *Correspondencia (1916-1955)*, tr. F. Blanco, Mexico: Siglo XXI.
- FEYERABEND, P., 1981: *Realism, Rationality and Scientific Method. Philosophical Papers*, vol. I, Cambridge: Cambridge University Press.
- FINE, A., 1986: *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*. Chicago: The University of Chicago Press.
- FOLSE, H. J., 1985: *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity*. Amsterdam: North-Holland.
- HAACK, S., 1980: *Lógica divergente*, tr. E. Gil Borjabad, Madrid: Paraninfo.
- HEISENBERG, W., 1963: *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*. London: Allen & Unwin, (1ª ed. 1959).
- _____, 1986: *La imagen de la naturaleza en la física actual*, tr. G. Ferraté, Barcelona: Orbis, (1ª ed. en alemán en 1955).
- HERBERT, N., 1985: *Quantum Reality. Beyond the New Physics*. Garden City, NY: Anchor Press/Doubleday.

- JABS, A., 1992: «An Interpretation of the Formalism of Quantum Mechanics in Terms of Epistemological Realism», *Brit. J. Phil. Sci.*, 43, pp. 405-421.
- JAMMER, M., 1966: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- 1974: *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: John Wiley & Sons.
- LANDE, A., 1968: *Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica*, tr. V. Sánchez de Zavala, Madrid: Tecnos, (1ª ed. en inglés en 1965).
- PAIS, A., 1984: *El señor es sutil. La ciencia y la vida de Albert Einstein*, tr. F. Alsina, Barcelona: Ariel.
- POPPER, K. R., 1985: *Teoría cuántica y el cisma en Física. Post Scriptum a La lógica de la investigación científica*, vol. III, tr. M. Sansigre Vidal, Madrid: Tecnos.
- PRIGOGINE, I. e I. STENGERS, 1990: *Entre el tiempo y la eternidad*, tr. J. García Sanz. Madrid: Alianza.
- TUOMELA, R., 1985: *Science, Action, and Reality*. Dordrecht: Reidel.
- WHEELER, J. A. y W. H. ZUREK (eds.), 1983: *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press.

ANTONIO J. DIEGUEZ es Profesor Titular de Lógica y Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Málaga. Autor de *La teoría de las ciencias morales en John Stuart Mill* (Málaga: Universidad de Málaga, 1988).

Dirección Postal: Departamento de Filosofía, Universidad de Málaga, Facultad de Filosofía y Letras, Campus de Teatinos, E-29071 Málaga.