

IV. CIENCIAS FÍSICAS

Representaciones en microfísica: Sobre la mecánica cuántica

MARÍA CRUZ BOSCA¹
Universidad de Granada

I. INTRODUCCIÓN

Hace más de 80 años que, en el marco del V Congreso Solvay (Bruselas, 1927), la entonces nueva Mecánica Cuántica fue postulada como “una teoría completa, cuyas hipótesis fundamentales, físicas y matemáticas, no son susceptibles de modificación”, y que “conduce a resultados precisos en lo que concierne a valores medios, pero no da ninguna información sobre los detalles de cada proceso individual”.² La nueva física, pese a su consolidación como una de las más fructíferas herramientas desarrolladas en ciencia, fue desde su origen objeto de un debate interpretativo que, muchos años después, permanece abierto. El estudio de la interpretación estándar del formalismo cuántico³ es imprescindible para conocer el contenido de ese debate y sus implicaciones para nuestra concepción de la realidad física.

En este artículo, sirviéndonos de algunos de los experimentos cuyos resultados más nos alejan de la intuición clásica, discutiremos las consecuencias epistemológicas que la nueva teoría ha supuesto para nuestra concepción de la naturaleza y de la forma con que la representamos. Porque, en palabras de Legget, “La Mecánica Cuántica es mucho más que simplemente una teoría; es una forma completamente nueva de mirar al mundo, implicando un cambio de paradigma quizás más radical que ningún otro en la historia del pensamiento humano”.⁴

1 Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear; Universidad de Granada; bosca@ugr.es.

2 Born y Heisenberg; Actas V Congreso Solvay.

3 Un formalismo que permanece fértil: vivimos en un período de descubrimientos y reinterpretaciones, en que surgen nuevos fenómenos que han propiciado el que, ya en 2003, el 30% del P.I.B. de E.E.U.U. dependiera de algún modo de aplicaciones cuánticas.

4 Legget; J.Phys.: Cond. Matter 14(2002)R415.

II. FORMULACIONES, INTERPRETACIONES, REPRESENTACIONES

Disponemos de distintas formulaciones de la mecánica cuántica, hecho que no constituye ninguna novedad respecto a la situación en mecánica clásica, donde las formulaciones lagrangiana, hamiltoniana, o de Hamilton-Jacobi, entre otras, están disponibles y presentan una conveniencia de aplicación que depende del problema concreto bajo consideración. Recientemente, Styer⁵ presentó un catálogo con hasta nueve formulaciones de la mecánica cuántica no relativista, entre las que se incluían la formulación matricial de Heisenberg, la formulación ondulatoria de Schrödinger, la formulación de amplitudes o de integrales de caminos de Feynman y la formulación de De Broglie-Bohm, quizá las más populares.

El término “formulación” debiera ser distinguido del de “interpretación”. Si se acepta que una teoría científica es un formalismo interpretado, algunos de los formalismos anteriores, si se ligan a interpretaciones que proporcionan representaciones o concepciones no equivalentes para describir el devenir fenoménico (y, sólo a veces, también una supuesta realidad subyacente a él), debieran considerarse como teorías diferentes. Entre los físicos, sin embargo, es frecuente convenir en que sólo se aceptan como teorías científicas diferentes aquellas que difieren en alguna predicción empírica, en una adopción de los puntos de vista positivistas que perdura. Así, se habla preferentemente de las distintas formulaciones de la teoría cuántica, haciendo hincapié en su equivalencia y procurando eludir la cuestión interpretativa, juzgada sin interés ya que no es capaz de plantear una sola situación experimental de contraste. No es raro por ello encontrar el término interpretación usado como sinónimo de formalismo, y ambos de teoría.

En cualquier caso, el hecho es que las diferencias de lenguaje matemático permiten conceptualizaciones distintas, que a veces difieren radicalmente, de forma que tiene pleno sentido hablar, al menos, de interpretaciones distintas. Las diferencias residirán tanto en los términos teóricos introducidos, y en el significado de los que manejan en común, como, por consiguiente, en la representación que se traza, es decir, el lenguaje con que se exponen los rasgos que se consideran característicos del fenómeno que se analiza y la ontología a la que se apela, si alguna. En lo que sigue, pues, hablaremos de las “distintas interpretaciones de la teoría cuántica”,⁶ con lo que nos referiremos a las distintas herramientas teóricas disponibles que:

5 Styer; Am. J. Phys. 70,3(2002)288-297.

6 Nos centraremos en la teoría no relativista.

1) Proporcionan predicciones empíricas idénticas (consistentes con los resultados experimentales hasta la fecha).

2) Recurren a formalismos matemáticos diferentes. El término formalismo, en sí, en ocasiones refiere simplemente a una especificación distinta de la misma estructura matemática general; otras veces, el formalismo hace uso de una estructura matemática general no coincidente (como puede ser el álgebra C^* frente al espacio de Hilbert). En cualquier caso, la consecuencia suele ser que los términos matemáticos que centralizan el desarrollo difieren. Por ejemplo:

- Los formalismos matricial y ondulatorio corresponden a especificaciones diferentes de la misma estructura matemática general, el espacio de Hilbert.
- En la formulación de Feynman, todos los caminos posibles entre dos puntos del espacio-tiempo contribuyen a la amplitud de probabilidad para el paso entre ellos, sean o no realizables en la dinámica clásica, y cada aportación es ponderada con una fase que depende de la acción clásica sobre el camino. A partir de esta idea inicial, todos los resultados fundamentales del formalismo en el espacio de Hilbert se reproducen; recíprocamente, a partir del formalismo de Hilbert puede llegarse al de Feynman.
- El formalismo matricial centra su representación de los fenómenos en los observables o magnitudes físicas medibles (posición, momento, etc.), que representa matemáticamente por operadores matriciales; el ondulatorio destaca la función de onda o vector de estado; la formulación de Feynman concede el protagonismo en la descripción a las amplitudes de probabilidad.

3) Construyen una representación específicamente propia: por la conceptualización que introducen o semántica empleada; por la imagen de los fenómenos que proporcionan y la comprensión que de ellos ofrecen; por las descripciones o narraciones de los fenómenos que generan; por los compromisos ontológicos que, en su caso, adquieren, etc.

El tercer requisito es el fundamental para considerar que, referido a un formalismo concreto, lo ha convertido en una interpretación de suyo de la teoría cuántica. Son ejemplos que lo cumplen, entre otros: la interpretación de Bohm, que introduce una ontología de partículas que se localizan objetivamente en el espacio-tiempo y se desplazan en él según trayectorias bien definidas (aunque ocultas); la interpretación de muchos mundos de Everett (o interpretación del estado relativo), que enfatiza las correlaciones entre los sistemas y los dispositivos de medida, introduciendo una multiplicidad ontológica al dividir el universo en muchos mundos mutuamente inobservables pero igualmente reales; o la interpretación de historias consistentes, que arranca de la anterior introduciendo

el concepto de “historias alternativas del universo”, originadas a partir de su condición inicial y estudiadas a partir de dominios cuasiclásicos.

Conviene señalar que, por conveniencia práctica, puede elegirse como herramienta de cálculo un formalismo matemático, pero sin asumirlo como una interpretación alternativa, en cuanto no se incorpore la conceptualización asociada. Es lo que ocurrió históricamente con el formalismo ondulatorio, que fue mostrado desde el principio como equivalente al formalismo matricial,⁷ pero, al mismo tiempo, interpretado originariamente de forma diferente, y por ello objeto de controversia.

La mecánica matricial se desarrolló como un método algebraico que, sustentado en cantidades directamente observables, destacaba la discontinuidad y renunciaba a cualquier representación continua en el espacio-tiempo. La formulación de Schrödinger, por el contrario, nació acompañada de una interpretación en la que su autor proponía la teoría cuántica como una teoría ondulatoria, negaba los niveles de energía discretos y los saltos cuánticos, y desarrollaba una descripción basada en frecuencias, no en energías. La conveniencia práctica del método de Schrödinger en la mayoría de las aplicaciones era tan manifiesta que hasta Heisenberg y Born lo adoptarían ya en 1926 para sus trabajos sobre el átomo de helio y las colisiones atómicas, respectivamente. No obstante, aceptar la herramienta matemática desarrollada por Schrödinger no implicaba asumir sus puntos de vista interpretativos.

La interpretación que Schrödinger anheló culminar sobre su formalismo se acompañaba de un ánimo hegemónico: constituirse como la teoría definitiva que permitiera la descripción de los fenómenos microscópicos representándolos en el continuo del espacio-tiempo,⁸ recuperando aspectos de la descripción clásica y desterrando conceptos como el de salto cuántico (del que, muy ilustrativamente, Born había afirmado que se trataba de un proceso “sobre el abismo”, sin descripción posible en “ningún lenguaje que pretenda la “visualización”⁹). Su concepción de ciencia, por el contrario, exigía precisamente que las teorías proporcionasen una forma de comprensión de los fenómenos ligada a la “visualización” o “captación intuitiva” (“*Anschaulichkeit*”) en el espacio y el tiempo: “Porque hasta se ha dudado de si lo que ocurre dentro de un átomo

7 La equivalencia ya la estudió el mismo Schrödinger en 1926, *Ann. Phys.* 79(1926)734-756; la afirmaron Dirac y Jordan en sus estudios sobre teoría de las transformaciones, y sería establecida por von Neumann en 1932, al formalizar la mecánica cuántica como un cálculo de operadores autoadjuntos en un espacio de Hilbert.

8 Esta cuestión ha sido muy estudiada; ver, por ejemplo, Icaza, *La construcción de la Mecánica Cuántica*, Univ. País Vasco, cap.2; Moore; *Erwin Schrödinger: una vida*, Univ. Cambridge, 1996, cap. 6.

9 Born; *Zeit. Phys.* 40(1926)167-192.

puede describirse dentro del esquema del espacio y el tiempo. Desde un punto de vista filosófico, yo consideraría una decisión concluyente en este sentido como equivalente a la rendición total. Porque no podemos realmente alterar nuestro pensamiento en términos de espacio y tiempo, y lo que no podemos comprender dentro de esto, no lo podemos comprender en absoluto. Existen tales cosas, pero no creo que la estructura atómica sea una de ellas”.¹⁰

La controversia con Heisenberg y Bohr fue intensa, realizándose fuertes críticas mutuas. Son ilustrativas las siguientes citas:

- De Schrödinger, en carta a Wien: “Rechazo *in limine* el punto de vista de Bohr de que una descripción del espacio-tiempo es imposible. La física no consiste sólo en la investigación atómica, la ciencia no consiste sólo en la física y la vida no consiste sólo en la ciencia. La meta de la investigación atómica es acomodar nuestros conocimientos empíricos acerca de ella al resto de nuestros pensamientos. Todo el otro pensamiento, en cuanto que tiene que ver con el mundo exterior, es activo en el espacio y en el tiempo. Si no se puede acomodar en el espacio y en el tiempo, entonces fracasa en su objetivo completo y no se sabe para qué motivo sirve realmente”.¹¹
- La afirmación de Bohr de que tal tipo de representación intuitiva no llevaba sino a una interpretación errónea de la teoría, porque “los conceptos representacionales con los que describimos los sucesos de nuestra vida cotidiana y los experimentos de la física clásica son inadecuados para describir los saltos cuánticos. No debíamos sorprendernos por ello, puesto que tales procesos involucran objetos que no pertenecen a la experiencia directa”.¹²

Han sido muchos los autores que han supuesto que la interpretación de Schrödinger conllevaba la asunción de una ontología realista, añadiendo a la petición de visualización la de que la correspondiente representación lo fuera directamente de la realidad, esto es, que se tradujera en la asunción de una realidad compuesta de ondas. Sin embargo, como han señalado autores como Regt,¹³ su énfasis en requerir que la ciencia proporcionase una adecuada “*An-schaulichkeit*” de los fenómenos ha de ligarse preferentemente a su posición metodológica, que exigía la comprensión o inteligibilidad de los mismos,

10 Schrödinger; cit. en Moore, *op. cit.*, pp. 185-186.

11 Moore, *op. cit.*, p. 204.

12 Bohr, cit. por Heisenberg, en *Niels Bohr. A centenary volume*, French y Kennedy, eds., Harvard, 1985, p. 165.

13 Regt; *St. Theor. Phil. Mod. Phys.* 28B,4(1997)461-481.

entendida como la adecuada imagen en el espacio-tiempo. La física clásica proporciona esta representación, pero la teoría cuántica incorporó desde sus inicios ingredientes que rehusaban este tipo de inteligibilidad, como era el caso de los saltos cuánticos, agregados a un sistema microplanetario en los primeros modelos semiclásicos atómicos.

El final de la historia es ampliamente conocido. Schrödinger, aunque no aceptaría nunca la interpretación ortodoxa que acabó imponiéndose, liderada por Bohr, Born y Heisenberg, tampoco fue capaz de desarrollar la interpretación que proporcionara la anhelada representación en el continuo espacio-temporal de los fenómenos atómicos. La pervivencia del término ‘mecánica ondulatoria’ es lo único quizás que ha sobrevivido de la pretensión de su autor de que “onda” fuese el objeto conceptual fundamental de la teoría; en este sentido, no existe una interpretación ondulatoria de la mecánica cuántica, y el formalismo ondulatorio se reduce a la condición de marco matemático disponible. Pero, lejos de cerrarse, el debate sobre la cuestión de fondo, la ausencia en la teoría de una representación de los fenómenos ubicada espacio-temporalmente, sigue abierto.

III. EL INSTRUMENTALISMO DE LA INTERPRETACIÓN ORTODOXA

En una concepción de ciencia que asigne a ésta como objetivo la explicación cierta del mundo físico, resulta ineludible interpretar los formalismos elaborando unas reglas de correspondencia que tiendan el puente entre dicho formalismo y una supuesta realidad base de ese mundo, constituida por objetos con propiedades atribuidas con independencia de su observación. La mecánica clásica satisfizo este requisito para el mundo macroscópico, de forma que proporcionó una representación de realidad subyacente separada del observador y ubicada en el espacio y el tiempo (absolutos).

Otras concepciones son también posibles. Por ejemplo, podemos elaborar una ciencia que sea fundamentalmente ciencia sobre los fenómenos, cuyo único reto y finalidad sea la predicción empírica satisfactoria, y desligada de la pretensión de verdad. La teoría cuántica adoptó esta concepción instrumentalista, y es precisamente esta adhesión (al menos de la que se considera actualmente la teoría estándar u ortodoxa) la que ha provocado principalmente que, pese a su completo éxito científico, universalmente aceptado, el debate en torno a sus fundamentos haya estado siempre abierto y vivo.

III.1. LA INTERPRETACIÓN ORTODOXA: UNA TEORÍA SOBRE FENÓMENOS

La única epistemología posible, que no es elucubración vana, es la que arranca de la ciencia real, permaneciendo atenta al progreso científico para

fundamentar sus propuestas. Necesita, pues, abordar desde su comprensión la discusión interpretativa sobre la teoría cuántica.

La interpretación ortodoxa aún:

- La introducción de un objeto matemático, el vector de estado cuántico, como herramienta que se postula proporciona la descripción más completa posible¹⁴ del sistema físico en cuestión. Se trata de un vector en el espacio de configuración, con un gran número de dimensiones en general, incluso para los sistemas más sencillos, de manera que en ningún caso puede identificarse con una onda clásica ni integrarse como elemento de una ontología que se postule compuesta por objetos físicos reales.¹⁵
- La interpretación probabilística del vector de estado, que lo identifica con una amplitud (compleja) de probabilidad para las propiedades físicas del sistema; tiene como consecuencia, unido al anterior, la pérdida general del determinismo en las predicciones relativas a la obtención de resultados experimentales.¹⁶
- Las relaciones de indeterminación, consecuencia matemática de la teoría que explicita la imposibilidad de realizar experimentos para la medida conjunta precisa de determinadas parejas de magnitudes físicas. Las magnitudes correspondientes se definen entonces como “complementarias”, de modo que el conocimiento preciso del valor de una de ellas implica que todos los valores posibles para la otra son igualmente probables.
- La ecuación de Schrödinger, que postula una evolución determinista para el sistema físico en ausencia de observaciones sobre él.
- El colapso o reducción del estado: se postula un cambio irreversible y estocástico del vector estado bajo los procesos de medida; su finalidad es garantizar la unicidad del resultado en cada medida.
- El entrelazamiento¹⁷ general de los vectores de estado asociados a los

14 Incluso cuando esta información es máxima, o caso de estado puro, siempre existen magnitudes físicas no compatibles, con dispersión en sus valores. Si la información sobre el estado no es máxima, el estado es mezcla y se representa por un operador o matriz densidad.

15 En el sentido clásico de ubicarse espacio-temporalmente y con independencia de su observación.

16 Consecuentemente, el vector de estado es la herramienta que permite hacer predicciones probabilísticas sobre una colectividad de sistemas igualmente preparados, y no describe las propiedades físicas de los sistemas (se excluye su interpretación realista), sino las distribuciones estadísticas de resultados para los experimentos realizables.

17 En inglés, “entanglement”; en el caso de un sistema compuesto de dos objetos, un estado puro (máximamente determinado) es entrelazado cuando no admite expresión como producto de los vectores estado individuales.

distintos componentes de un sistema compuesto, que surge también del formalismo matemático. Esta propiedad es, precisamente, la que permite generar las predicciones correctas, esto es, concordantes con los resultados experimentales, para los valores de las correlaciones entre resultados obtenidos en determinadas situaciones experimentales, valores que son imposibles de reproducir con éxito para toda teoría realista local. Es esta imposibilidad la que ha dado lugar a la frecuente afirmación de que la teoría cuántica es una teoría no local.¹⁸

A continuación expondremos las características principales que configuran la representación que la teoría cuántica ofrece de los fenómenos.

III.2. NO SEPARABILIDAD (O IMPOSIBILIDAD DEL REALISMO LOCAL)

Gracias a los trabajos de Bell,¹⁹ quien fue capaz de establecer que en determinadas situaciones las predicciones de la teoría cuántica y las de cualquier teoría realista local diferían, una larga serie de experimentos²⁰ han producido una colección de resultados que una teoría que incorpore elementos de realidad locales, también llamados elementos Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), es incapaz de predecir.

Los elementos de realidad tipo EPR fueron introducidos por estos tres autores en su famoso artículo de 1935,²¹ en el que pretendían demostrar que, precisamente porque eran incompatibles con el formalismo cuántico, éste era incompleto (aunque asumían su corrección). Su definición fue: “Si, sin de ninguna manera perturbar un sistema, podemos predecir con certeza (i.e., con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física”. Se asumían de este modo como objetivos, esto es, existentes en una región del espacio con independencia de su observación, y se postularon además como locales, es decir, no pueden ser afectados por sucesos que tengan lugar en regiones separadas en sentido relativista (separación por un intervalo de género espacio²²) de aquélla en la que existen.

18 Por supuesto, la teoría no es en absoluto “no local” en el sentido de violar la relatividad permitiendo acciones a distancia (causales) instantáneas; por ello, la denominación no es muy afortunada, y es preferible hablar de no-separabilidad en vez de no-localidad.

19 Bell; Phys. I(1964)195.

20 Una URL de actualización: <http://www.nature.com/nature/journal/v409/n6822/full/409791a0.html>.

21 Einstein, Podolsky y Rosen; Phys. Rev. 47(1935)777-780.

22 $\Delta s^2 = [c^2\Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)] < 0$

Si se aceptan como definitivos²³ los numerosos resultados experimentales disponibles, que van progresivamente cerrando las imperfecciones señaladas en ellos por los defensores del realismo local, entonces toda teoría que introduce este tipo de elementos de realidad (locales²⁴) para propiedades no conjuntamente medibles o complementarias es metafísica e incompatible con los resultados experimentales, que la mecánica cuántica²⁵ sí predice correctamente.

La respuesta de Bohr en defensa del formalismo cuántico consistió en señalar que este tipo de elementos de realidad “contiene una ambigüedad esencial cuando se aplica a los problemas de la mecánica cuántica”, ya que “las condiciones de los procedimientos de medida deben considerarse como un elemento inherente de cualquier fenómeno al cual el término ‘realidad física’ pueda aplicarse sin ambigüedad”.²⁶ Si dos experimentos son incompatibles, por ser complementarios entre sí las magnitudes físicas u observables que miden, entonces, puesto que un elemento de realidad sólo puede estar asociado con un montaje experimental de medición concreto, no está justificado (“es esencialmente ambiguo”) considerar que esos dos observables corresponden a dos elementos de realidad existentes simultáneamente. Sin embargo, Einstein, Podolsky y Rosen ya habían anticipado en su artículo que de “ninguna definición razonable de realidad se espera que permita tal cosa”.

La respuesta de Bohr, no obstante, más que a invalidar el argumento EPR venía a señalar una característica de algunas magnitudes físicas en la teoría cuántica que se denomina “contextualidad”, consistente en que no poseen valores definidos con anterioridad a los experimentos que se realizan para determinarlos, lo cual supone que las predicciones de la mecánica cuántica sobre los valores obtenidos para las variables contextuales, como, por ejemplo, posición, momento, o las proyecciones del espín, dependen del tipo de montaje experimental específico que se aplique. En efecto, el teorema de Bell-Kochen-Spec-

23 Durante todos estos años, ha habido grupos minoritarios de científicos que han argüido seriamente contra la aceptación de esta imposibilidad del realismo local para dar cuenta de los resultados experimentales; ver, por ejemplo, Santos, arXiv:quant-ph/0410193v1. Para algunos, el realismo local nunca podrá ser refutado, porque el experimento necesario, libre por completo de *loopholes* o “posibilidades de escape”, es teóricamente imposible.

24 Han empezado a publicarse resultados experimentales que van también excluyendo la posibilidad de determinados tipos de elementos de realidad no locales; ver, por ejemplo, Gröblacher *et al.*; Nature 446(2007)871-875.

25 En 1997, Alain y Cabello publicaron un teorema EPR más fuerte que el original, para estados de tres partículas entrelazadas y con elementos de realidad “fuertes”, esto es, inferidos sin usar enunciados contrafácticos, y también demostrados como incompatibles con la mecánica cuántica.

26 Bohr, Phys. Rev. 48(1935)696-702; adoptó por consiguiente la denominada “concepción relacional del estado cuántico”, según la cual el sistema bajo observación y el aparato de medida forman un todo indivisible no sujeto a análisis por separado.

ker, establecido en 1966-67,²⁷ demostró que el formalismo mecánico-cuántico incorpora la incompatibilidad entre sus predicciones y la pre-existencia o no contextualidad de sus variables. De forma que, consecuentemente, el valor que obtengamos para una de estas variables dependerá de qué otras variables (no complementarias) decidamos también medir en un experimento concreto.

Propiedades fuertes o no-contextuales, por el contrario, serían aquéllas para las cuales sigue siendo posible suponer la pre-existencia de valores definidos antes de la medida (posición y momento, o las proyecciones del espín, no lo serían). Una definición para las propiedades fuertes la dio Mermin: “toda magnitud que no se vea afectada por lo que se haga en un experimento remoto²⁸ sobre otro sistema correlacionado con el primero”; un ejemplo lo proporcionarían las magnitudes que obedecen una regla de superselección, como la carga eléctrica.

La contextualidad de las variables en mecánica cuántica se considera que tiene consecuencias menos fundamentales que el destierro del realismo local. Y ello porque, en definitiva, se trata de un resultado “interno” a la mecánica cuántica, que afirma que sus predicciones son incompatibles con asumir sus variables como objetivas, habiendo de incorporar su dependencia del montaje experimental. En cambio, los elementos de realidad locales se afirman como objetivos desde la premisa de que desde regiones separadas no pueden ejercerse acciones, resultando por ello impactante que las teorías realistas locales no puedan realizar las predicciones empíricas requeridas por los experimentos realizados.

III.3. EL EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA²⁹

Si existe un experimento paradigmático para ilustrar algunas de las características de la teoría cuántica, es sin duda el experimento de la doble rendija, elegido recientemente como uno de los diez experimentos más bellos de la física.³⁰ El experimento, sucintamente, no es sino la realización cuántica del clásico de Young, de la primera década del siglo XIX, en el que luz tenue atraviesa dos rendijas para producir franjas de interferencia, observables sobre un pantalla situada a cierta distancia enfrente de ellas. La versión cuántica hace

27 Bell, *Rev. Mod. Phys.* 3(1966)447-452; Kochen y Specken, *J. Math. Mech.* 17(1967)59-87.

28 O sea, separado por un intervalo de género espacio.

29 Es famosa, y constante junto a las numerosas discusiones del experimento, la afirmación de Feynman de que se trata de “un fenómeno que es imposible, absolutamente imposible, explicar clásicamente, y que encierra la clave de la mecánica cuántica. En realidad, contiene el único misterio”; Feynman, *Six easy pieces*, Penguin, p. 117.

30 <http://physicsworld.com/cws/article/print/9745>.

interferir, además de luz, objetos materiales como, por ejemplo, electrones.³¹ La predicción teórica que afirmaba, para el conjunto adecuado de parámetros, la observación de franjas de interferencia, fue confirmada experimentalmente en 1961,³² y, posteriormente, también haciendo incidir los electrones sobre el dispositivo de uno en uno;³³ actualmente, se ha realizado el experimento incluso con moléculas complejas como los fullerenos,³⁴ y parece que se intenta hacer con ciertos virus.

Como es conocido, el tratamiento clásico del experimento con partículas materiales es incapaz de predecir la observación confirmada de franjas de interferencias. Si imaginamos canicas que van siendo sucesivamente lanzadas contra un plano de doble rendija con anchuras apropiadas, lo que se predice clásicamente para la distribución de impactos sobre la pantalla posterior es, simplemente, la suma de las distribuciones de impactos correspondientes a los casos en que sólo una de las dos rendijas está abierta. En el caso cuántico,³⁵ la existencia de un término adicional de interferencia entre los vectores de estado correspondientes a las situaciones con una sola rendija abierta, presente siempre que los dos caminos sean indistinguibles, proporciona una densidad de impactos sobre la pantalla que no es su mera suma y que coincide exactamente con la observada: una figura que exhibe franjas alternantes de zonas donde se concentran los impactos y zonas donde apenas se producen. La figura interferencial de franjas surge conforme los sucesivos registros de llegada, usualmente denominados como “impactos”, se van produciendo sobre la pantalla. Dónde va a ocurrir cada impacto individual es impredecible; producido uno de ellos, lo mismo ocurre respecto a dónde va a registrarse el siguiente; y para cada realización global, la secuencia individual de impactos es distinta y de imposible predicción (ausencia de determinismo).

Si el experimento incorpora un dispositivo de detección de rendija atravesada, que permita afirmar con certeza cuál de ellas lo ha sido, entonces es imposible observar las franjas de interferencia, y la distribución de impactos

31 Feynman, *Six easy pieces*, Penguin, p. 117.

32 Jönsson *et al.*, Tübingen; *Zeit. Phys.*, 161(1961)454.

33 Merli *et al.*, Bolonia, *Am. J. Phys.* 44(1976)306-307; equipo de Tonomura *et al.*, Hitachi, *Am. J. Phys.* 57(1989)117-120, quienes obtuvieron unas imágenes definitivas.

34 Un sistema C₆₀; son los proyectiles de mayor masa y complejidad (60 núcleos y 360 electrones) con que se han podido ver interferencias hasta la fecha en un experimento del tipo doble rendija (en este caso una red de difracción); *cf.* Zeilinger, *Rev. Mod. Phys.* 71,2(1999)288-297.

35 En realidad, todos los casos son cuánticos. Lo que ocurre es que es imposible observar interferencias con objetos macroscópicos: los máximos y mínimos de la intensidad total estarían tan próximos que sería imposible distinguirlos con detectores de tamaño finito y se observaría sólo su promedio, que coincide con la suma de las intensidades correspondientes a cada rendija; ver Feynman, *ibid.*

es la que corresponde al caso de una sola rendija abierta. La teoría genera la predicción correcta porque, en este caso, el término de interferencia entre las dos posibilidades resulta nulo.³⁶

III.4. LA DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO Y LA COMPLEMENTARIDAD DE BOHR

Para Bohr, el indeterminismo cuántico es consecuencia de la complementaridad, versión dualidad onda-corpúsculo, que se asume como un principio fundamental basado en la tesis epistemológica de que no necesitamos nuevos conceptos para comunicar los resultados de nuestras observaciones y experimentos, ya que sólo los de la física clásica son conceptos no ambiguos y por ello imprescindibles. Por ejemplo, en el experimento de la doble rendija, la complementaridad bohriana afirma que las dos descripciones clásicas, la descripción corpuscular que considera los electrones como partículas, localizables en un punto del espacio, y la descripción ondulatoria, que permite introducir el concepto de interferencia entre ondas, objetos extendidos, son necesarias para la completa explicación del fenómeno. Pero ambas, además, son mutuamente excluyentes: es imposible, con el mismo dispositivo experimental y sobre el mismo sistema individual, observar el aspecto corpuscular y el ondulatorio; por tanto, en la doble rendija, sería imposible determinar la rendija atravesada y observar simultáneamente la figura interferencial.

Sin embargo, conviene hacer puntualizaciones sobre estas ideas de Bohr, dados los avances realizados en la experimentación:

- Es posible observar a la vez, en un experimento de doble rendija, características ondulatorias y corpusculares. Es decir, son posibles las situaciones experimentales intermedias,³⁷ en que no se conoce la rendija atravesada pero las probabilidades asociadas para cada una de ellas son diferentes, observándose simultáneamente una figura de interferencia no perfecta. Es importante advertir que, en esas situaciones, la transición es en la representación o semántica descriptiva del experimento, es decir, entre el recurso bien a los conceptos clásicos ondulatorios, bien a los corpusculares, pero en ningún caso puede representarse como una transición ontológica: ¡el paquete de ondas cuántico no experimenta ninguna transición entre onda y partícula! Zeilinger ha resumido la

³⁶ El hecho es que, si los caminos son distinguibles, matemáticamente los vectores de estado correspondientes son ortogonales, de lo cual se deriva la anulación del término de interferencia.

³⁷ Bardou, *Am. J. Phys.* 59(1991)458-461; Bartell, *Phys. Rev. D* 21,6(1980)1698-1699; Greenberger y Yasin, *Phys. Lett. A* 128(1988)391-394.

nueva situación teórica afirmando que “la complementaridad onda-corpúsculo es un concepto continuo”.³⁸

- Se dispone de montajes experimentales en que los aspectos ondulatorio y corpuscular se manifiestan simultánea y totalmente en un sistema individual. Por ejemplo, experimentos³⁹ en que se observa a la vez un efecto túnel, asociado con fenómenos ondulatorios, y una anti-coincidencia perfecta entre las señales de dos detectores, que implica propagación tipo partícula. Pudiera argüirse que en un experimento convencional de doble rendija, al coexistir la observación de las franjas de interferencia con la detección individual localizada de cada partícula, ya se observaban a la vez propiedades ondulatorias y corpusculares, pero, en cualquier caso,⁴⁰ lo radicalmente nuevo es poder observar esa dualidad con estados monofotónicos, mientras que el patrón interferencial, aunque se hagan pasar las partículas una a una por el interferómetro, se forma sólo cuando el número de detecciones o impactos en la pantalla es suficiente.

III.5. AUSENCIA DE TRAYECTORIAS ESPACIO-TEMPORALES

La base de la visión de la física de partículas clásica es la asunción de que los objetos individuales poseen constantemente valores objetivos de sus propiedades, moviéndose a lo largo de trayectorias espacio-temporales bien definidas. Históricamente, las relaciones de indeterminación surgieron, como nos ha narrado el mismo Heisenberg,⁴¹ de la reflexión de que, en realidad, la trayectoria de un electrón en una cámara de niebla no podía ser observada, ya que el experimentador sólo accede a una serie de puntos discretos, inconexos y mal definidos, a partir de unas gotas de agua cuyo tamaño es muy superior al del electrón.

La ortodoxia cuántica, en una adscripción positivista, asume que sólo tienen sentido físico aquellas cuestiones que pueden contestarse experimentalmente. En un experimento de doble rendija con electrones, si los caminos son indistinguibles, la pregunta de cuál rendija ha sido atravesada por cada electrón es por completo metafísica, y carece de sentido afirmar que, aunque no se hayan

38 Zeilinger, *Rev. Mod. Phys.* 71,2(1999)S292.

39 Ghose y Agarwal, *Phys. Lett.* A153(1991)403-406; Ghose, Home y Agarwal, *Phys. Lett.* A168(1992)95-99; Mizobuchi y Ohtaké, *Phys. Lett.* A168(1992)1-5; Brida *et al*, *Phys. Lett.* A328(2004)313-318.

40 Frecuentemente, el registro individual lo que prueba es la cuantización de los niveles atómicos en los átomos del detector.

41 Heisenberg ; *Niels Bohr. A centenary volume*, French y Kennedy, eds., Harvard, 1985, pp. 163-171.

hecho las medidas que permitan describir la realización experimental con los términos “la rendija atravesada ha sido ésta”, sin embargo “cada electrón tiene que haber pasado por una de ellas”.

Una afirmación como la anterior, por el contrario, tiene sentido en el marco de interpretaciones en las que se asuma una ontología de objetos con propiedades objetivas, poseídas con independencia de los actos de observación, y se postule la posición espacio-temporal de los correspondientes objetos como una de esas propiedades (por ejemplo, como veremos más adelante, en la interpretación de Bohm).

III.6. LA REPRESENTACIÓN EN LA INTERPRETACIÓN ORTODOXA

Hoy en día, el desarrollo experimental nos permite disponer de experimentos en los que se evidencia radicalmente la imposibilidad en la ortodoxia de acompañar la descripción de ciertos procesos con una representación compatible con nuestras intuiciones clásicas, esto es, una imagen mental que nos dé acceso a una visualización como la que exigía por principio Schrödinger a toda ciencia aceptable.

Por ejemplo, recientemente se ha realizado⁴² una versión con “elección retardada” del experimento de la doble rendija, propuesta por Wheeler en 1983 como un experimento conceptual; la idea, sumariamente, consiste en decidir si se va a intentar determinar o no la rendija atravesada una vez que el experimento ya está en marcha. El dispositivo utilizado sustituye el tradicional por un interferómetro de Mach-Zehnder, de doble camino, sobre el que se hacen incidir pulsos de luz. El montaje consta de dos divisores de haz,⁴³ dos espejos reflectores y dos detectores. Los pulsos de radiación se hace incidir sobre el primer divisor, a partir del cual son posibles dos caminos ópticos; los espejos permiten la recombinación de los dos haces en una zona donde pueden encontrarse o no con el segundo divisor; tras ella, se colocan los dos detectores.

Sobre el primer divisor de haz se hicieron incidir pulsos monofotónicos; el experimento en principio es equivalente por completo a la doble rendija usual: en ausencia del segundo divisor de haz, la presencia de los dos detectores hace los dos caminos distinguibles, y no se observan interferencias, registrándose en cada uno de ellos un 50% de cuentas, siendo imposible conocer de antemano cuál de ellos va a registrar cada vez. Si añadimos el segundo divisor, la recombinación de los haces en él vuelve los dos caminos indistinguibles, lo que provoca que, variando la fase relativa entre ellos, se obtenga un ritmo de

42 Jacques *et al*; Sc., 315(2007)966-968.

43 Un divisor de haz es un dispositivo que, al incidir la radiación sobre él, la desdobra, originándose dos caminos ópticos.

detecciones modulado por una función trigonométrica que se corresponde con la observación tradicional de franjas de interferencia.

Puesto que la inserción o no del segundo divisor se produce aleatoriamente en una región separada por un intervalo del género espacio de la entrada de cada fotón en el dispositivo, la descripción ortodoxa de los resultados es incompatible con cualquier representación o imagen verbalizable de los fenómenos previa a la lectura de los registros en los contadores. Si la realización del experimento ha correspondido finalmente al dispositivo con dos divisores, entonces, recurriendo a la complementaridad bohriana, podríamos narrarlo diciendo que ha correspondido con la exhibición de un carácter corpuscular, “como si el objeto-partícula hubiera seguido sólo uno de los dos caminos”. Si, por el contrario, el experimento se ha ultimado con dos divisores, ahora podemos narrarlo como una exhibición ocurrida de propiedades ondulatorias, “como si el objeto-onda hubiese seguido los dos caminos”. En cualquier caso, se trata siempre de una narración *a posteriori*, y hemos de ser conscientes de que se construye la representación mental de lo que ha pasado tan sólo en aras de una mejor comunicación de los resultados ya obtenidos. Porque, antes y después de que el experimento finalizase, ningún corpúsculo y ninguna onda reales han existido, tan sólo, si se prefiere a efectos descriptivos un término análogo a los clásicos (no hay ontología cuántica en la ortodoxia⁴⁴), podría hablarse de objetos cuánticos,⁴⁵ sin localización espacio-temporal, que se integran en una representación que, al tener disponibles varias posibilidades en una realización experimental, se genera sólo tras la producción de unos fenómenos específicos de registro en los correspondientes dispositivos, regidos por una distribución de probabilidad determinada correctamente por el formalismo.

En realidad, si insistimos en querer un objeto que sea el actor de nuestra representación mental de lo que sucede en el interior del dispositivo entre la entrada y los registros, un sujeto para unos enunciados verbales transpuestos del lenguaje cotidiano, concebido para dar cuenta del mundo macroscópico, nuestro objeto no puede ser ni onda ni partícula. Y, puesto que no está localizado en ausencia de observación, tan absurdo es decir “ha pasado por una rendija y seguido el camino tal” (descripción corpuscular clásica, recuperada para des-

44 Bohr señaló el error de pensar que siempre hay objetos subyacentes a los fenómenos y atribuirles propiedades, siendo así que el último nivel al que tenemos acceso son los fenómenos, no los objetos, pero luego añadía que “un fenómeno no es nunca onda y corpúsculo a la vez: es onda o corpúsculo” (cf. Petersen, *Niels Bohr. A centenary volume*, French y Kennedy eds., p.305), con lo cual insistía en la pervivencia de los conceptos clásicos, sólo como términos del lenguaje, sin asumir ningún compromiso ontológico, y excluía al mismo tiempo la generación de un nuevo lenguaje integrado por conceptos puramente cuánticos.

45 Separándose de las ideas de Bohr, se ha sugerido la introducción de neologismos como “quantón” (Bunge), “ondícula” (*wavicle*), y otros, pero su uso es minoritario.

cribir la realización experimental cuántica con detector de camino) como “ha pasado por las dos” (descripción ondulatoria clásica, que se hace corresponder con la realización sin detector de camino).

La interpretación ortodoxa, prudentemente, puede afirmarse como una interpretación de mínimos, en que simplemente se establecen las correlaciones entre la preparación inicial de un sistema físico, representada por un operador densidad, con la secuencia completa de posibles resultados, a través de las correspondientes probabilidades, asumiendo un indeterminismo fundamental y descalificando toda pregunta sobre una realidad subyacente a los fenómenos como metafísica. La función de onda se asume como una mera herramienta matemática para evaluar esas probabilidades, descartándose cualquier interpretación adicional (en particular, su existencia antes o después del experimento específico en el que se encuadra). La teoría predice correctamente todos los resultados experimentales hasta la fecha, lo cual, desde un punto de vista instrumental, es todo lo que se le exige.

La ortodoxia estricta, pues, en un experimento como el anterior del interferómetro, vendría a proporcionar como única representación una caja negra que simbolizaría el oportuno silencio sobre lo que media entre el fenómeno de entrada de los sistemas al interferómetro y el de su registro en los detectores. Artísticamente, Wheeler propuso un dragón de humo⁴⁶ como representación alternativa, y Feynman afirmó, más literariamente, que “no podemos explicar el misterio en el sentido de ‘explicar’ cómo funciona. Decimos cómo funciona”.⁴⁷

El principal argumento a favor de esta representación (o, si se prefiere, a favor de esta ausencia de representación), es el mismo que ya Bohr empleó en contra de la insistencia de Schrödinger en mantener los conceptos intuitivos clásicos: persistir en imágenes para el interior de la caja negra sólo provoca comprensiones erróneas de la teoría. Entre los físicos, esta opinión es frecuente, y podríamos resumirla en la expresión “La teoría cuántica no necesita interpretación”. Con este mismo título, C.A. Fuchs y A. Peres, dos reconocidos físicos, sostuvieron un debate en las páginas de la revista *Physics Today*⁴⁸, en el que defendieron la “consistencia interna de una interpretación sin interpretación” para la mecánica cuántica, concebida ésta como una teoría para la que se asume que no describe la realidad física, sino que se reduce a “proporcionar un algoritmo de computación de probabilidades de sucesos macroscópicos (‘clicks de detectores’) que son las consecuencias de nuestras intervenciones experimenta-

46 Un sugerente dibujo puede verse en Kennedy; *Niels Bohr. A centenary volume*, French y Kennedy, eds., Harvard, 1985, p. 151.

47 Feynman; *Six easy pieces*, Penguin, p. 117.

48 Fuchs y Peres; “Quantum Theory Needs No ‘Interpretation’”, *Phys. Today* 53,3(2000)70-71; 53,9(2000)14, 90.

les”. Algo que a otros también magistrales físicos, como Bell, les ha resultado insoportable y frustrante, considerando que, necesariamente, la búsqueda de “una teoría más precisa” debería proseguir, aunque, por ahora, la actual teoría se aceptase como “válida para todos los propósitos prácticos” (FAPP, “*fine for all practical purposes*”, según el famoso acrónimo de Bell).

IV. OTRAS INTERPRETACIONES

La interpretación ortodoxa ha sido hegemónica en el desarrollo de la mecánica cuántica, pero existen otras interpretaciones, válidas como ella mientras sigan siendo empíricamente correctas. Es más, el progreso científico provoca que se sigan generando nuevas interpretaciones, conforme el interés investigador se centra en nuevos fenómenos que estimulan el desarrollo teórico.⁴⁹ Pero lo cierto es que la investigación en ellas fue frecuentemente estigmatizada, por lo que algunos han justificado su desarrollo insuficiente por no haber tenido el apoyo y estímulo que les hubiera permitido competir y madurar frente a la ortodoxa.⁵⁰ Por falta de espacio, nos limitaremos a continuación a discutir la que hasta la fecha es, probablemente, la alternativa más divulgada.

IV.1. LA INTERPRETACIÓN DE BOHM

¿Caben interpretaciones alternativas a la ortodoxa que den cuenta consistentemente de los resultados experimentales y conserven una ontología compatible con los conceptos clásicos? Quizás fue la búsqueda de una respuesta a ello lo que llevó a Bohm en 1952⁵¹ a presentar, siguiendo ideas previas de De Broglie, un nuevo formalismo para la mecánica cuántica, con una interpretación asociada pretendidamente realista, que hacía a la teoría determinista pero, lejos de la concepción clásica, explícitamente no local.

La nueva interpretación⁵² fue presentada en analogía con la formulación de Hamilton-Jacobi de la mecánica clásica, y representa los sistemas físicos como compuestos por partículas que se desplazan a lo largo de trayectorias objetivas

49 Por ejemplo, en los últimos años se está configurando una nueva interpretación, denominada a veces como “teoría de la información cuántica”, en la que se hace de la información el concepto fundamental, del cual se pretende que establezca no sólo qué puede decirse, sino también “qué pueda ser la realidad”; cf. Zeilinger; Inv. y Ciencia, abril 2008, p. 67.

50 Cushing esgrimió razones de contingencia histórica para la hegemonía ortodoxa en *Quantum mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, Chicago, 1994.

51 Bohm; Phys. Rev. 85(1952)166-179, 180-193.

52 Goldstein, arXiv:quant-ph/79512027v1(1995); Dürr, Goldstein y Zanguí, Phys. Lett. A172(1992)6-12; Dürr, Goldstein y Zanguí, arXiv:quant-ph/9511016v1(1995).

en el espacio usual tridimensional, siendo la función de onda en el espacio de configuración, la onda piloto, la que guía su movimiento. En la formulación aparece un potencial cuántico, dependiente del estado del sistema, que cambia instantáneamente en todo el espacio de configuración al cambiar la función de onda y que es crucial en la generación de la predicción correcta para las correlaciones no locales (es decir, las de imposible predicción para cualquier teoría realista local).

Bohm y Hiley denominaron la mecánica bohmiana como una “interpretación ontológica de la mecánica cuántica”,⁵³ al estar fundada sobre una ontología, a diferencia de la interpretación estándar. En ella, la ecuación de Schrödinger se vuelve relevante respecto al movimiento de las partículas, que son consideradas como “entidades puntuales cuya característica más importante es su posición espacial”.⁵⁴ Consecuentemente, se introduce una propiedad objetiva, la “posición”, existente con independencia de si es observada o no; otras propiedades, como momento y energía, adquieren significado mediante su asociación con procedimientos experimentales, de forma que no son asumidas como objetivas, sino como contextuales,⁵⁵ al igual que sucede también con ellas, incluyendo a la posición, en la interpretación ortodoxa.

La mecánica de Bohm, como ha sido frecuentemente enfatizado, no es un regreso al paradigma clásico, sino que conlleva una separación de él por lo menos igual de radical que la mecánica cuántica estándar, a la cual es empíricamente equivalente.⁵⁶ Pero, frente a la interpretación instrumentalista de esta última, supone una realidad microscópica objetiva, constituida por, de un lado, partículas con posiciones definidas y que, consecuentemente, siguen trayectorias; de otro, un campo de onda.⁵⁷ En todo caso, la mecánica de Bohm no es tampoco newtoniana, de forma que “partícula” no significa “partícula clásica”, y se caracteriza por una no localidad radical que suscita dudas sobre la posibilidad de una adecuada generalización relativista.

Para un experimento de doble rendija usual, en contraste con la ortodoxia, la interpretación de Bohm proporciona una representación aparentemente próxima a la intuición clásica. En efecto, con observación de interferencias, la pregunta de cuál ha sido la rendija atravesada tiene sentido y la respuesta es que cada partícula pasa sólo por una de las dos rendijas, la más próxima a su punto de llegada a la pantalla; para cada partícula individual puede deducirse,

53 S. Goldstein, arXiv:quant-ph/79512027v1(1995)12.

54 Dürr, Goldstein y Zangüi; arXiv:quant-ph/9511016v (1995), p. 2.

55 Dürr *et al.*, arXiv:quant-ph/9511016v1(1995); Daumer *et al.*, arXiv:quant-ph/9601013v1(1996).

56 Con la teoría no relativista.

57 Esta es la opinión predominante; para una discusión general de las diferentes ontologías asociadas puede consultarse Belousek, Found. Sc. 8(2003)109-172.

a partir de su posición final observada, la rendija atravesada (retroacción) y la trayectoria seguida hasta la pantalla. La onda piloto atraviesa las dos rendijas, y cada trayectoria individual⁵⁸ está influida de forma no local por el hecho de estar abierta la otra rendija. Cualquier intento de comprobar la predicción teórica haciendo experimentalmente distinguible el pasar por una o por otra rendija destruye la interferencia, como en la teoría ortodoxa (y en la práctica), de forma que las trayectorias son “trayectorias ocultas”.

Pese a la imagen clásica de partículas localizadas siguiendo trayectorias, la incongruencia de pretender caracterizar la representación ofrecida como conforme con las intuiciones clásicas cotidianas ha sido afirmada recientemente. En 1992, un equipo de investigadores⁵⁹ reclamó haber establecido que, al menos en ciertas situaciones experimentales, las trayectorias bohmianas difieren de las que ellos denominaron como “trayectorias detectadas”, significando los caminos que se atribuirían en el relato de los resultados experimentales.⁶⁰ Consecuentemente, concluyeron, las trayectorias de Bohm no son reales, sino “surreales” (surrealistic), por completo metafísicas y reducibles a constructos matemáticos. Esta conclusión fue reafirmada en varios artículos posteriores;⁶¹ en particular, en 1999 Aharonov *et al*⁶² presentaron un experimento conceptual en que una partícula cuántica en una caja interactuaba localmente sin que la trayectoria de Bohm se acercara a la región en que tenía lugar dicha interacción, lo que les llevaba a descartar por completo la posibilidad de una interpretación realista en la que la trayectoria bohmiana estableciera la posición de las partículas como función del tiempo.⁶³

58 Un conjunto de figuras muy ilustrativas puede verse, por ejemplo, en Philippidis, Bohm y Kaye; *Nuovo Cim.* 71B(1982)75-88.

59 Englert *et al*; *Zeit. Natur. A: Phys. Sci.* 47a(1992)1175-1186.

60 Relato que, insistimos en ello, se apoya en conceptos clásicos, constituyendo una representación elaborada con fines descriptivos una vez que una medida ha sido realizada, a efectos de comunicar los resultados obtenidos.

61 Scully, *Phys. Scrip.* T76(1998)41-46.

62 Aharonov, Englert y Scully; *Phys. Lett.* A263(1999)137-146.

63 Desde el bando bohmiano, esta conclusión fue rechazada, abriéndose un amplio debate en el que se insistió en el carácter contextual de toda medida, que conllevaría el que, en determinadas situaciones experimentales, “aunque el detector parezca haber visto a la partícula, ésta no ha pasado”, porque “un detector en un interferómetro no se comporta igual que un detector aislado”, de forma que es “despistado” (*fooled*) por el potencial cuántico no local. De forma que las trayectorias de Bohm cambiarían tras cada acción de observación y, en última instancia, se asume que nunca podrían ser confirmadas o refutadas experimentalmente. Para una discusión amplia, consultar Dürr *et al.*; *Zeit. Natur.* 48a(1993)1261-1262; Dewdney *et al.*; *Phys. Lett.* 184A(1993)6-11; Barrett, arXiv:quant-ph/0002046v1(2000); Hiley *et al.*; arXiv:quant-ph/0010020v2(2000); Drezet, *Phys. Lett.* A350(2006)416-418.

De modo que, si suponemos un dispositivo simple, como una cámara de burbujas, una partícula puede dejar tras sí una traza en unas circunstancias tales que la trayectoria de Bohm no coincide con ella.⁶⁴ ¿cuál es entonces su significado físico? Parece evidente que no el “usual” reclamado, no al menos si el término “posición” se quiere que conserve el sentido cotidiano, establecido a partir de nuestras intuiciones clásicas y ligado por ello a la participación en interacciones locales. También desde la mecánica bohmiana, como desde la ortodoxa, parece por tanto ineludible acometer una renovación conceptual y lingüística radical, que abandone por completo los conceptos y términos clásicos en las representaciones que se proporcionan para los fenómenos microscópicos.

El precio pagado por la introducción de una ontología de objetos localizados en el espacio-tiempo sería, pues, un alejamiento todavía más radical de nuestras intuiciones clásicas que el que realiza la versión ortodoxa, donde la no separabilidad no genera ningún conflicto con la relatividad. La alternativa bohmiana, en cambio, es una teoría propiamente no local, que incluye acción a distancia efectiva instantánea, de modo que la interacción de las supuestas partículas reales con los dispositivos de medida puede suceder aun ocupando ambas regiones separadas espacialmente en sentido relativista.

V. DISCUSIÓN FINAL Y CONCLUSIONES

La existencia de un debate en torno a las diversas interpretaciones del formalismo cuántico, dado su rotundo éxito empírico, es incomprensible para algunos. Dos ejemplos: uno, la reciente carta al editor de *American Journal of Physics* de N. G. van Kampen, quien bajo el título “The scandal of Quantum Mechanics”, arremete contra la mera existencia “todavía” de “muchos artículos, discusiones, y libros de texto” en los que se habla (“*which advertise*”, denuncia) de “interpretaciones varias y profundidades filosóficas”, porque, dada la adecuada descripción física de todos los fenómenos a escala atómica que nos proporciona la teoría cuántica, “¿qué más puede uno querer?”;⁶⁵ y otro, la siguiente afirmación de Zeilinger: “Quizás haya un desarrollo que supere la mecánica cuántica, tal y como la teoría de la relatividad superó la mecánica newtoniana. Es probable, que, conceptualmente, resultara aún más extravagante que la actual mecánica cuántica. Pero lo jocoso es que con ésta tenemos una descripción buenísima de la naturaleza, ¡y entonces se disputa por la manera en

64 Aharonov y Vaidman; *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An appraisal*, Boston St. Phil. Sc., vol. 184, Cushing, Fine y Goldstein, eds., Kluwer, Dordrecht, 1996, pp. 141-154.

65 Van Kampen; *Am. J. of Phys.*, 76, 11(2008)989-990.

la que se la debe interpretar! Eso denota que no hemos comprendido todavía, como se debiera, el ‘mensaje’ conceptual”.⁶⁶

Lo cierto es que la teoría no representa, ni clásicamente ni de ninguna otra manera, una realidad subyacente a los fenómenos, ni crea modelos de explicación. Tan sólo predice los resultados de los experimentos que podemos preparar y realizar con corrección total, y los describe, cuando es posible, con analogías clásicas, pero en cualquier caso sin pretender ni trasladar al mundo microscópico la ontología del macroscópico ni proporcionar una imagen mental intuitiva veraz para él. Pretender que el mundo microscópico sea descrito, forzosamente, con el lenguaje de nuestras intuiciones clásicas, podría aceptarse, en principio,⁶⁷ desde un punto de vista epistemológico, como requería Bohr, pero el imponerle una ontología transpuesta de nuestra conceptualización del mundo macroscópico se ha mostrado imposible (pretensión quizás originada por nuestra hibris y constitutiva de una nueva versión del principio antrópico). El único hecho cierto es que, como afirmó Heisenberg, con la teoría cuántica disponemos de un esquema matemático consistente que nos permite describir todo lo que observamos a escala atómica.

Ello no significa en modo alguno negar la posible existencia de cualquier realidad objetiva independiente del experimentador,⁶⁸ ni siquiera obliga a negar una posible realidad microscópica objetiva, esto es, a la asunción de un antirrealismo que niegue expresamente la existencia de un mundo real compuesto de objetos independientes de nuestras realizaciones experimentales. Pero la teoría cuántica actual es una teoría instrumentalista, que no permite, en cualquier caso, “desvelar” ese mundo,⁶⁹ porque no versa sobre ninguna realidad objetiva, sino sobre los fenómenos, o si se prefiere otra expresión, sobre una realidad empírica, dependiente de su observación. Una realidad empírica que sería inteligible, pero no con nuestras intuiciones clásicas, ya que, por ejemplo, a nivel microscópico no sería concebible ni como localizable en el espacio-tiempo, ni como separable en partes cuyo conocimiento completo sea posible. Esta incapacidad

66 Zeilinger; *Inv. y Ciencia*, abril 2008, p. 69.

67 Aunque vaya siendo cada vez más difícil, de forma que la ciencia, para alcanzar la inteligibilidad de la realidad empírica, acabará probablemente retirándose, si es que no lo ha hecho ya, al ámbito de representaciones matemáticas puras.

68 La confusión a este respecto, lamentablemente, se ve propiciada frecuentemente por afirmaciones tales como “la mecánica cuántica acaba con el punto de vista de que el universo existe fuera de nosotros”, que grandes físicos, como, por ejemplo, Wheeler, declaran a veces; el punto de vista realista fue defendido, por contra, por Gardner, en “Guest comment: Is realism a dirty word?”; *Am. J. Phys.* 57,3(1989)203.

69 Una magnífica y extensa discusión puede encontrarse en D’Espagnat, *Reality and the physicist*, Cambridge, 1989; para un texto más técnico, ver *Veiled Reality. An Analysis of Present-Day Quantum Mechanical Concepts*, Addison-Wesley, 1995.

de nuestros esquemas conceptuales cotidianos, en mi opinión, podría suponer un argumento en contra de una relatividad conceptual que negara la existencia de objetos independientes de nuestros esquemas conceptuales, y a favor de un realismo crítico que acepte que el sujeto se funde o alea por su acción con la estructura de un mundo independiente de nuestra mente, haciendo emerger el mundo cognoscible o mundo fenoménico. Aplicada a este mundo que afloramos con nuestras intervenciones experimentales, la teoría cuántica ortodoxa no es consistente con su descripción en términos de nuestra estructura de intuición clásica espacio-temporal y causal.

Dotados de intuiciones clásicas, hemos concebido sin embargo una teoría que las erradica en la representación del mundo de los fenómenos microscópicos y que está establecida, cada vez más sólidamente, como la herramienta imprescindible para su descripción. Además, esta interpretación, al mismo tiempo que excluye la ontología clásica, incluso, cada vez más, a efectos de lenguaje mismo, no introduce una ontología (cuántica) propia, recurriendo al silencio ontológico. Si ese silencio es definitivo, o se trata sólo de una limitación de la teoría actual, es una de las cuestiones cruciales en el debate sobre las interpretaciones cuánticas alternativas a la consolidada.

BIBLIOGRAFÍA

- BAGGOT, J.; *The meaning of quantum theory*, Oxford Univ., Oxford, 1992.
- BALLENTINE, L.E.; *Quantum Mechanics: a modern development*, World Scientific, 1998.
- BELL, J. S.; *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza Univ., 1990.
- ESPAGNAT, B. d'; *Reality and the physicist*, Cambridge, 1989; *Veiled Reality. An Analysis of Present-Day Quantum Mechanical Concepts*, Addison-Wesley, 1995.
- JAMMER, M.; *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, Nueva York, 1966; *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, 1974.
- DELIGEORGES, S., ed.; *El mundo cuántico*, Alianza Univ., 1990.
- FRENCH, A.P. y KENNEDY, P. J.; *Niels Bohr: a centenary volume*, Harvard Univ. Press, 1985.
- V.V.A.A.; *Misterios de la Física Cuántica*, Investigación y Ciencia; Temas 10, 1997.
- V.V.A.A.; *Fenómenos cuánticos*, Investigación y Ciencia; Temas 31, 2003.
- WHEELER, J.A. y ZUREK, W. H., ed.; *Quantum Theory and measurement*, Princeton Univ., Princeton, 1983.