

LAS FILOSOFÍAS DE LOS CREADORES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

José Manuel Sánchez Ron. Universidad Autónoma de Madrid

Resumen: En este trabajo se estudian diversos aspectos de las posturas «filosóficas» de algunos de los principales protagonistas de la historia de la física cuántica: Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Born y Pauli. La principal conclusión que se extrae de los casos tratados es la variedad de ideas defendidas, que con frecuencia implicaban interpretaciones filosóficas en principio incompatibles, y la superficialidad filosófica de algunos enfoques, que podemos calificar como «filosóficos» solamente en un sentido relativamente primario.

Abstract: In this article, several aspects of the «philosophical» postures of some of the leading protagonists of the history of quantum physics, Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Born and Pauli, are studied. The main conclusion that follows from the cases considered is the variety of ideas defended, which often implied incompatible philosophical interpretations, as well as the superficiality of some approaches, which we can consider «philosophical» only in a relatively elementary sense.

¿Hasta qué punto la filosofía influye en el contenido de la ciencia? O, más concretamente, ¿inciden de alguna manera los planteamientos filosóficos de los científicos en su producción, en sus teorías, interpretaciones o selección de temas, datos y conceptos? Son éstas preguntas que los historiadores pocas veces se formulan, especialmente en lo que se refiere a la ciencia contemporánea, una ciencia diferente en bastantes sentidos de la elaborada durante siglos como, por ejemplo, el XVII o el XVIII. No es lo mismo, en efecto, plantearse este tipo de cuestiones en casos como los de Leibniz o Descartes, científicos al igual que filósofos (*filósofos de la naturaleza*, de hecho), que en los de Planck, Einstein, Bohr, Schrödinger o Heisenberg.¹

¹ En otras ocasiones ya he abordado aspectos de estas cuestiones: José M. Sánchez Ron, «¿Físicos o filósofos? Sobre la problemática relación entre ciencia y filosofía», *Actas I Simposio Hispano-Mexicano de Filosofía*, vol. I, pp. 244-253. Salamanca, Ediciones Universidad de Salamanca, 1986; y «Hermann Weyl, científico-filósofo», *Theoria* 7 (1992), 703-713.

En el presente ensayo abordaré estos problemas, con relación a los principales creadores de la mecánica cuántica, junto a las teorías especial y general de la relatividad una de las dos grandes revoluciones conceptuales en la física de nuestro siglo. Protagonistas de mi estudio serán científicos como Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born y Wolfgang Pauli.

1. Planck, «revolucionario» a pesar suyo

Con frecuencia se suele asociar el comienzo de la historia de la física cuántica con el descubrimiento —teórico— que Max Planck, catedrático de la Universidad de Berlín, hizo en 1900 de los cuantos de energía. Evidentemente, semejante punto de partida está justificado solamente en la medida en que la discontinuidad cuántica constituye un rasgo esencial de la física atómica, ya que, como es bien sabido, la aportación de Planck tiene sus raíces y su razón de ser en trabajos —teóricos y experimentales— anteriores, a cargo de científicos como, entre otros, Maxwell, Clausius, Kirchhoff, Wien, Boltzmann o Lorentz.² Cabría, por consiguiente, extender la presente discusión a estos y otros científicos, pero tal ampliación nos llevaría demasiado lejos. Por este motivo, yo también situaré mi punto de partida en Max Planck.

Con anterioridad a la publicación de sus dos artículos de 1900, «Sobre una mejora de la ley de Wien para el espectro» y «Sobre la teoría de la ley de distribución de energía para el espectro normal»,³ las investigaciones de Planck habían estado centradas en extender el rango de aplicación de la termodinámica, de sistemas caracterizados por magnitudes macroscópicas como volumen, presión o temperatura, a sistemas que implicasen, por ejemplo, procesos electroquímicos, reacciones químicas o transiciones de fase.⁴ Sus modelos eran científicos como Helmholtz o Clausius. A partir de 1894, sus investigaciones sufrieron un cierto giro: se planteó el relacionar la irreversibilidad manifestada por el segundo principio de la termodinámica (crecimiento de la entropía) con otras leyes (todas invariantes bajo

² Ver, por ejemplo, Stephen G. Brush, *The Kind of Motion we Call Heat*. Amsterdam, North-Holland, 1976; René Dugas, *La théorie physique au sens de Boltzmann*. Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1959; Hans Kangro, *Early History of Planck's Radiation Law*. Londres, Taylor and Francis, 1976.

³ M. Planck, «Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (2) 2 (1900), 206-210, «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (2) 2 (1900), 237-245.

⁴ M. Planck, *Vorlesungen über Thermodynamik*. Leipzig, 1897. Una versión accesible de la quinta edición (1917) de esta obra es: *Treatise on Thermodynamics*. Nueva York, Dover, 1945.

inversión temporal), principalmente las de la electrodinámica y la mecánica de medios continuos. La interpretación —estadística— que Boltzmann había hecho de la entropía no figuraba, en modo alguno, entre sus planteamientos. Él buscaba leyes que se verificasen siempre, normas absolutas, no probabilistas.

Sin embargo, y como es bien sabido, Planck terminaría viéndose «obligado» a recurrir a la ley de Boltzmann (que según la expresión del propio Planck se escribía como $S = k \ln W$), para explicar la ley de radiación del cuerpo negro que había obtenido más heurística que teóricamente.⁵ Fue en base a la ley de Boltzmann que llegó a la cuantificación de la energía de los osciladores cargados que suponía formaban la pared de la cavidad que contenía la radiación de cuerpo negro.⁶

Más de treinta años después de su célebre descubrimiento, en una carta que escribió el 7 de octubre de 1931 al físico estadounidense Robert Williams Wood, Planck se refirió a su hallazgo en los siguientes términos:⁷ «resumido brevemente, se puede describir lo que hice como un acto de desesperación. Por naturaleza soy pacífico y rechazo toda aventura dudosa. Pero por entonces había estado luchando sin éxito durante seis años (desde 1894) con el problema del equilibrio entre radiación y materia y sabía que este problema tenía una importancia fundamental para la física; también conocía la fórmula que expresa la distribución de la energía en los espectros normales. Por consiguiente, había que encontrar, costase lo que costase, una interpretación teórica. Tenía claro que la física clásica no podía ofrecer una solución a este problema, puesto que con ella se llega a que a partir de un cierto momento toda la energía será trasferida de la materia a la radiación. Para evitar esto se necesita una nueva constante que asegure que la energía se desintegre. Pero la única manera de averiguar cómo se puede hacer esto es partiendo de un punto de vista definido. En mi caso, el punto de partida fue el mantener las dos leyes de la termodinámica. Hay que conservar, me parece, estas dos leyes bajo cualquier circunstancia. Por lo demás, estaba dispuesto a sacrificar cualquiera de mis convicciones anteriores sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo se establece el equilibrio termodinámico mediante un equilibrio estadístico, y si se aplica semejante método al equilibrio entre la materia y la radiación,

⁵ Sobre las ideas de Planck acerca de la ley de la entropía de Boltzmann, ver M. Planck, *The Theory of Heat Radiation*. Nueva York, Dover, 1959, pp. 118-120; versión inglesa de *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, 2ª. ed. Leipzig, Barth, 1913.

⁶ Martin J. Klein, «The beginnings of the quantum theory», en *History of Twentieth Century Physics*. Nueva York, Academic Press, 1977, pp. 1-39; Thomas S. Kuhn, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*. Madrid, Alianza, 1980.

⁷ Citada en Armin Hermann, *The Genesis of Quantum Theory (1899-1913)*. Cambridge, Mass., The MIT Press, 1971, pp. 23-24.

se encuentra que se puede evitar la continua transformación de energía en radiación suponiendo que la energía está obligada, desde el comienzo, a permanecer agrupada en ciertos cuantos. Ésta fue una suposición puramente formal y en realidad no pensé mucho en ella».

Hablamos de «desesperación» cuando llegamos a situaciones límite, cuando violentamos algunas de nuestras convicciones más profundas. Podemos, por tanto, entender que Planck hablase de un «acto de desesperación» como una violación por su parte de firmes convicciones filosóficas que hasta entonces habían guiado sus investigaciones científicas. En este caso la violación habría consistido en adoptar la ya citada formulación *estadística* de la entropía, que Boltzmann había propuesto en 1877. Doblarse ante semejante planteamiento, aceptar que el crecimiento de la entropía estaba asociado con probabilidades y que, por consiguiente, no era tan universal como él pensaba, debió ser doloroso para un físico del talante de Planck, dolor sólo mitigado haciendo de este paso una «suposición puramente formal». Las sucesivas teorías que Planck elaboró para evitar asumir de manera completa la discontinuidad se explicarían, desde esta perspectiva, como intentos por salvar su *filosofía*, filosofía ésta, por otra parte, que no le había permitido evitar el tener que recurrir a la ley de la entropía de Boltzmann.⁸ Pero veamos ya cual era la «postura filosófica», «la filosofía», de Planck.

Los documentos a los que se puede recurrir para analizar la filosofía de Planck son diversos, los más explícitos proceden —como suele ocurrir en estos casos— de épocas posteriores al descubrimiento que le aportó fama universal.

Una de las ocasiones en las que Planck se pronunció acerca de lo qué esperaba de una teoría científica, fue el 26 de abril de 1918, en un acto en que la *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (Sociedad Alemana de Física) celebraba el sexagésimo cumpleaños del propio Planck.⁹ «Siempre me ha parecido —manifestó entonces— que lo más importante, el propósito que ha guiado todos mis trabajos científicos, es la mayor simplificación y unificación posible de la imagen del mundo física y que el primer medio para alcanzar este fin es la reconciliación de opuestos mediante la fertilización y amalgama mutua».

Y no se trataba únicamente de su propio trabajo, sino que —como dejó

⁸ Kuhn, *La teoría del cuerpo negro...*, *op. cit.*, cap. 10 («La nueva teoría de la radiación de Planck»).

⁹ M. Planck, «Erwiderung auf die Ansprachen vom 26. April 1918 zu Max Planck's 60. Geburtstag in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft», en *Physikalische Abhandlungen und Vorträge* 3, 327-330. Braunschweig, Vieweg, 1958. Esta obra fue publicada con ocasión del centenario del nacimiento de Planck por la *Verband Deutscher Physikalischer Gesellschaften* y la *Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V.*

claro en una conferencia que pronunció en Leiden el 9 de diciembre de 1908— consideraba que «en tanto que exista la Filosofía Natural, su fin último será siempre correlacionar las diversas observaciones físicas en un único sistema y, cuando sea posible, en una sola fórmula».¹⁰

Como ha señalado Stanley Goldberg, los esfuerzos de Planck «por obtener una imagen del mundo unificada tomó la forma de una búsqueda de absolutos».¹¹ De ahí su rápida aceptación (fue uno de los primeros, sino el primero) de la teoría especial de la relatividad, una formulación basada —por mucho que su nombre sugiera otra cosa— en un absoluto: la, invariante bajo transformaciones de Lorentz, métrica minkowskiana. «Si admitimos el concepto de relatividad —escribió en cierta ocasión—, entonces debemos admitir la existencia de un absoluto, pues es a partir de éste del que surge el concepto de relativo como tal».¹²

Esta búsqueda de absolutos también encontró eco en sus trabajos cuánticos; por ejemplo, en su reformulación de la ley estadística de la entropía, en la que introducía de manera explícita lo que el propio Boltzmann no había hecho: una nueva constante universal, la constante de Boltzmann, k . Incluso podemos ver en su adopción de esta ley para deducir teóricamente la ley de radiación de un cuerpo negro, una manifestación más de su procedimiento favorito de «reconciliación de opuestos mediante la fertilización y amalgama mutua».

Planck era un realista. En la citada conferencia de Leiden dejó claro este punto.¹³ Así, su respuesta a la pregunta: «¿Es el mundo físico únicamente una creación más o menos arbitraria del intelecto, o nos vemos conducidos a la conclusión opuesta de que refleja fenómenos que son real y básicamente independientes de nosotros?», era completamente positiva.

En una conferencia que pronunció el 12 de noviembre de 1930 ante la *Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften*, titulada «Positivismus und reale Aussenwelt», Planck desarrolló con cierto detalle sus ideas con respecto a la importancia de mantener una postura realista en la física, especialmente dentro del contexto histórico —social, cultural y, por supuesto, científico también— del momento.¹⁴ «Vivimos —señalaba

¹⁰ «Die Einheit des physikalischen Weltbildes», *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909), 62-75. He utilizado la versión inglesa («The unity of the physical universe») incluida en M. Planck, *A Survey of Physical Theory*. Nueva York, Dover, 1960, pp. 1-26; p. 1.

¹¹ S. Goldberg, «Max Planck's philosophy of nature and his elaboration of the special theory of relativity», *Historical Studies in the Physical Sciences* 7 (1976), 125-160; p. 142.

¹² M. Planck, «From the relative to the absolute», cap. VI de *Where is Science going?* Nueva York, W. W. Norton, 1932, pp. 170-200; p. 195. Este trabajo es una traducción al inglés de parte de «Vom Relativen zum Absoluten», *Naturwissenschaften* 13 (1925), 52-59.

¹³ «The unity of the physical universe», *op. cit.*, p. 22.

¹⁴ Utilizo la versión (parcial) al inglés de esta conferencia: «Is the external world real?», cap. II de *Where is Science going?*, *op. cit.*, pp. 64-83. Versión original alemana: *Positivismus und reale*

Planck— en un momento muy singular de la historia. Es un momento de crisis, en el sentido literal de esa palabra. En todas las ramas de nuestra civilización material y espiritual vemos que hemos llegado a un punto crítico». En medio de semejante confusión, el introductor de los cuantos encontraba natural preguntarse si existía «alguna roca de verdad en la que apoyarse». Y su respuesta inmediata era: «la física». Se daba cuenta, no obstante, que «incluso la ciencia física no ha podido escapar del contagio de este momento crítico de la historia». Y no se trataba únicamente de que «desde fuera» se cuestionase la seguridad de la física, sino también de que «incluso dentro de la provincia de esta misma ciencia ha comenzado a activarse el espíritu de confusión y contradicción». Un espíritu que se advertía especialmente con respecto a cuestiones que afectaban al «muy fundamental problema de cuán lejos y en qué medida la mente humana es capaz de llegar a conocer la realidad externa».

Para Planck este punto se encontraba estrechamente relacionado con el del ataque al que estaba siendo sometido el principio de causalidad (recordemos que pronunció su conferencia en 1930, cuando la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre habían sido desarrollados), que hasta entonces había sido «aceptado universalmente como un postulado indispensable de la investigación científica». «El hecho de que se pudiese manifestar semejante extraordinaria opinión en círculos científicos responsables, era considerado por muchos como representativo de la completa falta de seguridad del conocimiento humano». Esta implicación, sin embargo, no podía ser tolerada por Planck, que se veía así obligado a expresar públicamente sus opiniones. En particular, sometía a un detallado análisis a una «cierta escuela de filósofos y físicos», que denominaba «Escuela positivista», que, según él, mantenían «que el fin de la ciencia física es, sola y exclusivamente, describir, de la forma más simple y precisa, el orden que se observa al estudiar los diversos fenómenos naturales», utilizando como datos primarios las impresiones sensoriales.¹⁵

Planck reconocía que «el punto de vista positivista no podía ser acusado de inconsistencia lógica. En tanto que nos atengamos a sus principios no nos encontramos con ninguna contradicción. Este es el punto fuerte de todo el sistema». Sin embargo, se trataba de una aproximación a la naturaleza que él no podía aceptar. Uno de los argumentos que utilizaba era el siguiente: «Cuando intentamos aplicarlo como fundamento exclusivo para la investigación científica, encontramos que el resultado tendría muy poca importancia para la ciencia física. Si el ámbito de la ciencia física no se

Aussenwelt. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1931.

¹⁵ Éste era el punto de vista defendido por Ernst Mach, a quien Planck atacó en diversas ocasiones. Ver, J. L. Heilbron, *The Dilemmas of an Upright Man*. Berkeley, University of California Press, 1986, cap. 2.

extiende más allá de la mera descripción de experiencias sensoriales, entonces estrictamente solamente se pueden tomar como objeto de tal descripción las experiencias propias; porque únicamente las experiencias de uno mismo son datos primarios. Ahora bien, es claro que ni siquiera el más dotado de los hombres podría construir algo parecido a un sistema científico comprensivo en base a un mero complejo individual de experiencias».

Para Planck la estructura de la física reposaba en dos teoremas, de contenido claramente «antipositivista» y realista: «(1) *Existe un mundo exterior real que existe independientemente de nuestro acto de conocer*, y (2) *No se puede conocer el mundo real exterior directamente*».

Es importante señalar que, a pesar de su firme postura realista y de que, obviamente, no le satisfacía renunciar a la causalidad estricta, el éxito de la mecánica cuántica le hizo ser precavido. En otra parte de su conferencia de 1930, y tras señalar que la «Ley de Causalidad era aceptada unánimemente hasta tiempos recientes como un principio fundamental de la investigación científica», pero que «ahora está teniendo lugar una batalla de opiniones en torno a él», se preguntaba:¹⁶

«¿Es válido, como se creía antes, el principio de causalidad, en toda su fuerza, para todos los sucesos físicos? ¿O tiene únicamente un significado sumario y estadístico cuando se aplica a los pequeños átomos?».

Sin embargo, en su opinión semejantes preguntas «no se podían decidir refiriéndolas a alguna teoría epistemológica o sometiénolas a la prueba de la investigación experimental. En su intento de construir su imagen hipotética del universo externo, el físico puede o no, según prefiera, basar su síntesis en el principio de una estricta dinámica causal, o puede adoptar solamente una causalidad estadística. La pregunta importante es lo lejos que se llega con una o con la otra. Y esto solamente puede ser contestado eligiendo provisionalmente uno de los dos puntos de vista y estudiando las conclusiones que se derivan de él».

La respuesta final era, en definitiva, cosa del futuro, de comparar lo que tuviesen que ofrecer las diferentes aproximaciones —la causal y la estadística— a los fenómenos cuánticos.

¹⁶ «The scientist's picture of the physical universe», cap. III de *Where is Science Going?*, op. cit., pp. 84-106; p. 99.

2. Einstein, su realismo, y Bohr

No existe una filosofía científica de Albert Einstein, sino varias. Como he argumentado en otros lugares,¹⁷ el Einstein que produjo las teorías especial y general de la relatividad era muy diferente —desde el punto de vista filosófico— del posterior a 1916. Tal cambio se puede apreciar, por ejemplo, en el giro que dieron sus opiniones sobre las aportaciones de Ernst Mach. En la relatividad especial (1905), la definición que daba Einstein de simultaneidad se puede considerar como una manifestación del requisito machiano de que toda afirmación que se haga en física se debe referir a relaciones entre magnitudes observables (sucesos). Asimismo, inicialmente Einstein pensó que las ideas de Mach le habían sido útiles para desarrollar la relatividad general. En este sentido, el 25 de junio de 1913, recién acabada su colaboración con Marcel Grossmann, en la que introdujo la geometría riemanniana en su búsqueda de una teoría relativista de la gravitación, escribió al propio Mach:¹⁸

«Probablemente haya recibido Vd. recientemente mi nueva publicación sobre relatividad y gravitación que por fin terminé después de un trabajo inacabado y penosas dudas. El próximo año se verá en el eclipse solar si los rayos de luz son curvados por el Sol, o en otras palabras si la suposición básica y fundamental de la equivalencia entre la aceleración de un sistema de referencia y un campo gravitacional es realmente válida. Si es así, sus inspiradas investigaciones sobre los fundamentos de la mecánica recibirán —a pesar de las injustas críticas de Planck— una espléndida confirmación. Ya que es una consecuencia necesaria [de la relatividad general en el sentido, entonces, de Einstein-Grossmann] el que la inercia tiene su origen en una especie de interacción mutua entre campos, totalmente en el sentido de su crítica al experimento del cubo de Newton».

Ideas similares aparecen en un artículo que Einstein publicó un año después: «Bases physiques d'une théorie de la gravitation».¹⁹ Y todavía a comienzos de 1916, cuando ya había formulado la versión definitiva de la relatividad general, en un obituario que escribió de Mach (que acaba de

¹⁷ J. M. Sánchez Ron, «¿Físicos o filósofos?», *op. cit.* y *El origen y desarrollo de la relatividad*. Madrid, Alianza, 1985.

¹⁸ Martin J. Klein, A. J. Kox y Robert Schulmann, eds., *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 5 («The Swiss years. Correspondence, 1902-1914»). Princeton, Princeton University Press, 1993, pp. 531-532. A. Einstein y M. Grossmann, *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig, Teubner, 1913.

¹⁹ *Archives des Sciences Physiques et Naturelles* 37 (1914), 5-12.

fallecer; el 19 de febrero), señalaba:²⁰ «no es improbable que Mach hubiese llegado a la teoría de la relatividad si, cuando su mente estaba todavía joven y fresca, la cuestión de la constancia de la velocidad de la luz hubiese atraído a los físicos (...) Sus pensamientos relativos al experimento del cubo de Newton demuestran lo cerca que estuvo su espíritu de exigir la relatividad en general (relatividad de aceleraciones)».²¹

Inmediatamente, sin embargo, Einstein abandonó toda simpatía por las ideas de Mach. Sin duda, se dio cuenta de que no era posible reducir todos los elementos que intervenían en las teorías físicas a experiencias sensibles directas (sensaciones). El concepto de campo, esencial para la relatividad general, constituía una buena muestra de ello.²² Y recordemos que Einstein terminó pensando que la transición de la física de partículas a la física de los campos constituía uno de los mayores, sino el mayor, logro en la historia del pensamiento humano, y que a partir de la década de 1920 dedicó la mayor parte de sus esfuerzos científicos a elaborar una teoría unitaria de campos.

Una pregunta que surge inmediatamente de lo dicho hasta el momento, es en qué medida Einstein fue o no un realista durante la época en la que manifestó sus simpatías por las ideas de Mach. En mi opinión, Einstein nunca llegó a sospechar de la existencia de un transfondo real, absoluto incluso, que subyacía detrás de los análisis operacionalistas que empleó en algunos de sus trabajos (esencialmente, en la relatividad especial), en una actitud que tiene puntos en común con la manera en que Planck —como vimos con anterioridad— compatibilizaba la relatividad con el absoluto. Esto se ve con claridad en una conversación que mantuvo con Heisenberg en 1922, a la que me referiré más adelante.

Pero el tema de este trabajo es la física cuántica, así que hay que referirse, fundamentalmente, a la postura de Einstein con relación a esa rama de la física y que se concreta especialmente en su oposición a la interpretación más extendida de la mecánica cuántica.

Einstein, que junto con Planck fue uno de los originadores del movimiento que condujo a la mecánica cuántica, nunca aceptó esta teoría.

²⁰ «Ernst Mach», *Physikalische Zeitschrift* 17 (1916), 101-104.

²¹ Como es patente, Einstein se refería aquí tanto a la relatividad especial como a la general.

²² Refiriéndose al campo eléctrico, el operacionalista Percy Bridgman señalaba en su influyente libro, *The Logic of Modern Physics*. Nueva York, MacMillan, 1927, p. 57: «Creo que un examen crítico demostrará que adscribir realidad física al campo eléctrico está carente por completo de justificación». Naturalmente, tal comentario se podía aplicar también al campo gravitacional de la relatividad general. El propio Bridgman criticó la actitud de Einstein posterior a la relatividad especial en: «Einstein's theories and the operational point of view», en Paul A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. La Salle, Ill., Open Court, 1970, pp. 335-354. Notemos, asimismo, la estrecha relación entre los puntos de vista operacionalistas y los que mantenía Mach.

Entendía que no se la podía considerar una formulación completa. No aceptaba su carácter estadístico, situación un tanto peculiar, toda vez que también fue él quien, en 1916, introdujo realmente tal rasgo en la física cuántica.²³ Sus manifestaciones en contra de la mecánica cuántica abundan en sus escritos.²⁴ Ahora bien, tal oposición no le impedía reconocer que se trataba de la teoría física de más éxito de su tiempo, en tanto que, poseyendo una forma lógica consistente, permitía comprender unitariamente las experiencias relativas al carácter cuántico de los procesos microscópicos.

El rasgo de la mecánica cuántica que más chocaba a Einstein era el que en ella el resultado de una medida dependiese del proceso de medición; pensaba que tal característica de la interpretación más ampliamente aceptada de la mecánica cuántica —la interpretación de Copenhague— era incompatible con una definición aceptable del concepto de «lo físicamente real». Lejos de limitarse a expresar una oposición de carácter meramente pragmático o metodológico, Einstein expresó su rechazo mediante argumentos que utilizaban situaciones experimentales posibles. La manifestación más conocida de sus ideas es un artículo que publicó en 1935, en colaboración con Boris Podolsky y Nathan Rosen, en el que la fe de Einstein en el realismo alcanza uno de sus momentos más intensos.²⁵

Este célebre artículo comienza con las siguientes palabras (p. 777):

«Cualquier consideración sería de una teoría física debe tener en cuenta la distinción entre la realidad objetiva, que es independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con los que opera la teoría. Estos conceptos pretenden corresponderse con la realidad, y por medio de estos conceptos nos construimos una imagen de esta realidad».

A continuación, Einstein y sus colaboradores se hacían una pregunta en absoluto frecuente en un trabajo científico: «Al pretender juzgar el éxito de una teoría física, debemos hacernos dos preguntas: (1) «¿Es correcta la teoría?» y (2) «¿Es completa la descripción dada por la teoría?». Únicamente en el caso de que la respuesta a ambas cuestiones fuese positiva, sería la teoría satisfactoria.

El problema era lo que entendían por «teoría completa». «Cualquiera

²³ A. Einstein, «Quantentheorie der Strahlung», *Zeitschrift für Physik* 18 (1917), 121-128. Ver también, Abraham Pais, *'Subtle is the Lord' ... The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford, Clarendon Press, 1982, sección 21d.

²⁴ Ver, por ejemplo, A. Einstein, *Mis ideas y opiniones*. Barcelona, Antoni Bosch, 1981, quinta parte, y Arthur Fine, *The Shaky Game. Einstein, Reality and the Quantum Theory*. Chicago, The University of Chicago Press, 1986.

²⁵ Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review* 47 (1935), 777-780.

que sea el significado asignado al término *completa*, el siguiente requisito parece ser necesario: *todo elemento de la realidad física debe tener una contrapartida en la teoría física*. Llamaremos a esto, la condición de completitud». Obviamente, esta condición no resolvía todavía el problema, ya que no se había concretado qué se entendía por «elemento de realidad física». La propuesta de Einstein, Podolsky y Rosen era la siguiente: «*Si, sin perturbar de ninguna manera el sistema, podemos predecir con certeza (esto es, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esta cantidad física*».

Apoyados en semejante instrumental conceptual, concluían que la descripción de la realidad dada por la función de ondas en la mecánica cuántica no era completa.

El efecto del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen fue inmediato. Niels Bohr, que de hecho había mantenido vivas discusiones con Einstein sobre estos temas durante los Congresos Solvay de 1927 y 1930, publicó inmediatamente, con el mismo título y en la misma revista, una respuesta a las objeciones de Einstein, abriendo un debate que todavía no se ha cerrado.²⁶

Según Bohr, el criterio de Einstein, Podolsky y Rosen contenía «una ambigüedad esencial cuando se aplica a problemas de la mecánica cuántica. Es cierto que en las medidas consideradas se excluye cualquier interacción mecánica directa del sistema y de las agencias que miden, pero una inspección más cuidadosa revela que el procedimiento de medida ejerce una influencia esencial en las condiciones en que se apoya la propia definición de las cantidades físicas en cuestión. Como estas condiciones deben ser consideradas como un elemento inherente de cualquier fenómeno al que se puede aplicar sin ambigüedad el término "realidad física", la conclusión de los mencionados autores no parece estar justificada».²⁷

Este último punto me trae a colación la figura de Niels Bohr, uno de los grandes patriarcas de la física cuántica, incluyendo su interpretación estándar, a la que no en vano se denominó, «interpretación de Copenhague», ciudad ésta en la que se encontraba el instituto de física de Bohr y por el que, antes o después, pasaban prácticamente todos los científicos de alguna importancia que trabajaban en temas relacionados con la física cuántica.²⁸ Ahora bien, estudiar las raíces o dimensión filosófica de la obra

²⁶ Existe una versión de estas discusiones, preparada por el propio Bohr: «Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica», en N. Bohr, *Física atómica y conocimiento humano*. Madrid, Aguilar, 1964, pp. 40-82.

²⁷ N. Bohr, «Quantum mechanics and physical reality», *Nature* 136 (1935), 65. El razonamiento completo de Bohr se encuentra en N. Bohr, «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review* 48 (1935), 696-702.

²⁸ Sobre Bohr, veáse Abraham Pais, *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity*.

de Bohr —el gurú de los físicos cuánticos— es una tarea que ha sido abordada demasiadas veces como para intentar repetirla aquí.²⁹ Aunque se ha señalado la posible influencia en Bohr de filósofos como William James, Poul Martin Møller y Harald Høffding,³⁰ al igual que existen elementos kantianos en su pensamiento (por ejemplo, la creencia en la posibilidad de deducir conocimiento necesario, inevitable, del mero análisis de condiciones de la experiencia),³¹ en realidad su contribución «filosófica» fue pequeña y con frecuencia oscura.³² Es cierto que escribió numerosos artículos con pretensiones filosóficas, pero con las más de las veces las diferencias entre ellos eran muy pequeñas.³³

El elemento central de las construcciones filosóficas de Bohr era la idea de que «*la magnitud finita del cuanto de acción impide hacer una distinción neta entre el fenómeno y el instrumento de observación*».³⁴ De ahí emanaba la consecuencia de que «el contenido físico de los métodos de la mecánica cuántica [está] restringido a la formulación de regularidades estadísticas que relacionan entre sí los resultados de medidas que caracterizan las diferentes evoluciones posibles de los fenómenos»,³⁵ al igual que el «particular carácter complementario que impide todo uso simultáneo de los conceptos de espacio y de tiempo y de las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, característico de la descripción causal de la mecánica».³⁶ En su ambición, Bohr intentó —con escaso éxito— extender la complementariedad cuántica a dominios alejados de la física, como la biología o la cultura.³⁷

Oxford, Clarendon Press, 1991.

²⁹ Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*. Nueva York, John Wiley, 1974. H. J. Folse, *The Philosophy of Niels Bohr*. Amsterdam, North-Holland, 1985. Dugald Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1987. J. Honner, *The Description of Nature: Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics*. Londres, Clarendon Press, 1987.

³⁰ Gerald Holton, «The roots of complementarity», *Daedalus* (otoño de 1970), 1015-1055; reimpresso en *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*. Cambridge, Mass., Harvard University Press 1973, pp. 115-161.

³¹ Mara Beller, «Einstein and Bohr's rethoric of complementarity», *Science in Context* 6 (1993), 241-255.

³² Los artículos y manuscritos filosóficos de Bohr se encuentran repartidos en los volúmenes de sus *Collected Works*, de los que hasta ahora se han publicado siete volúmenes (Amsterdam, North-Holland). John T. Sanders ha compilado todos estos documentos filosóficos en dos volúmenes: J. T. Sanders, ed., *Niels Bohr: Essays and Papers*. Rochester, 1987.

³³ En este mismo sentido, Miguel Ferrero Melgar se preguntaba: «¿Por qué escribió Bohr tantas veces "el mismo artículo"?». «Prólogo» a N. Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Madrid, Alianza 1988, pp. 9-46; p. 27.

³⁴ N. Bohr, «Introducción» a *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, op. cit., p. 60.

³⁵ *Ibid.*, p. 61.

³⁶ *Ibid.*, p. 60.

³⁷ N. Bohr, «Luz y vida», «Biología y física atómica» y «Física y culturas humanas», en *Física*

Independientemente de la relevancia filosófica de las ideas de Bohr, existe un punto que conviene señalar y que probablemente afecte de la misma manera a otros físicos cuánticos. Me refiero a la poca estima que aparentemente llegó a sentir Bohr por los esfuerzos de filósofos profesionales que se ocupaban de la mecánica cuántica. Es éste, en realidad, un tema apenas explorado todavía, por lo cual el comentario que sigue debe tomarse con cierta precaución.

El 5 de mayo de 1947, Wolfgang Pauli escribía a Bohr indicándole que estaba colaborando con una revista filosófica —*Dialectica*— fundada hacía poco en Zurich por F. Gonseth y un grupo de matemáticos, «en la que se discuten los fundamentos epistemológicos de la matemática y de diferentes partes de las ciencias naturales, incluyendo la física».³⁸ La revista había pedido a Pauli que organizase un número dedicado a la complementariedad y los fundamentos de la mecánica cuántica, y éste se dirigió a Bohr preguntándole que opinaba. Pauli —que sí parecía respetar la obra de los filósofos que he mencionado— aprovechaba para mencionar que si a Bohr le parecía bien la idea, él cursaría enseguida invitaciones para colaborar en el número a otras personas: «entre otros, autores interesados en la lógica trivalente, como von Neumann, Reichenbach etc.».

Bohr respondió a Pauli el 16 de mayo. Tras manifestar que le interesaba la idea e intentaría preparar un artículo, señalaba: «En mi opinión, la situación está mucho más clara de lo que se supone generalmente, y considero a herramientas tales como la lógica trivalente más bien como complicaciones, ya que se puede dar una representación consistente de todos los aspectos axiomáticos y dialécticos de la situación en el sencillo lenguaje de la vida diaria.»³⁹

Pero estoy avanzando demasiado. Hay que retomar la secuencia histórica.

3. Heisenberg y la mecánica de matrices

Como es bien sabido, la larga y complicada búsqueda de una mecánica para los fenómenos cuánticos que habían ido apareciendo a partir de 1900, tuvo éxito en 1925, cuando Werner Heisenberg, un joven estudiante de Arnold Sommerfeld que poseía una indudable «sensibilidad filosófica»,⁴⁰

atómica y conocimiento humano, op. cit., pp. 5-39.

³⁸ Wolfgang Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a.*, vol. III, Karl von Meyenn, ed. Berlín, Springer-Verlag, 1993, p. 438.

³⁹ *Ibid.*, p. 443.

⁴⁰ Ver en este sentido los primeros capítulos de su autobiografía: W. Heisenberg, *Diálogos sobre la física atómica*. Madrid, Biblioteca de Autores Cristianos, 1972. Sobre Heisenberg, David

publicó un artículo titulado «Reinterpretación teórico-cuántica de relaciones cinemáticas y mecánicas». ⁴¹ Veamos algunos aspectos de la génesis de este trabajo, que dio origen a la denominada «mecánica matricial» o «mecánica de matrices».

En el verano de 1922, Werner Heisenberg asistió a una serie de conferencias que Niels Bohr pronunció en Gotinga (el denominado «Festival Bohr»). ⁴² Tras una intervención de Heisenberg, Bohr le pidió que le acompañase en un paseo. ⁴³ En aquella ocasión, Bohr comentó a Heisenberg que «nos encontramos en nuevo campo de la física, en el que los viejos conceptos probablemente no funcionarán. Vemos que no funcionan, porque de otra manera los átomos no serían estables. Por otra parte, cuando queremos hablar acerca de los átomos, debemos utilizar palabras y estas palabras solamente se pueden tomar de los viejos conceptos, del viejo lenguaje. Por consiguiente, nos encontramos frente a un dilema sin esperanza, somos como navegantes que llegan a un país muy alejado. No conocen el país y ven a gente cuyo idioma nunca han escuchado, de forma que no saben como comunicarse con ellos». De su conversación con Bohr, Heisenberg extrajo «la impresión de que nos deberíamos apartar de los conceptos clásicos, de que no se debería hablar acerca de la órbita de un electrón. A pesar del hecho de que se puede ver la traza de un electrón en la cámara de niebla, no se debería hablar de la velocidad o posición, etc.» El problema era, naturalmente, que «si se abandonaban estas palabras, entonces uno no sabía qué hacer».

La mecánica de matrices fue la respuesta de Heisenberg a este dilema. Un rasgo de esta formulación era el que en ella se introducían solamente cantidades que se podían observar. ⁴⁴ Para Heisenberg, ésta «era una una

C. Cassidy, *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*. Nueva York, W. H. Freeman, 1992.

⁴¹ W. Heisenberg, «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik* 33 (1925), 879-893.

⁴² Véase Jagdish Mehra, «The birth of quantum mechanics», CERN 76.10 (1976).

⁴³ Son varias las fuentes que se pueden utilizar en estos puntos. En lo que sigue me baso, esencialmente, en W. Heisenberg, «From a life of physics», en *From a Life of Physics. Evening Lectures at the International Centre for Theoretical Physics*. Viena, IAEA, 1968, pp. 31-46; reproducido en W. Heisenberg, *Gesammelte Werke*, vol. C.II. Munich, Piper, 1984, pp. 423-438; p. 427 y ss. Ver también W. Heisenberg, *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Madrid, Alianza, 1979.

⁴⁴ Recordemos en este sentido las siguientes frases de Heisenberg, en el artículo en el que introdujo el principio de indeterminación: «Cuando se quiere ser claro acerca de lo que se debe entender por las palabras “posición del objeto”, por ejemplo del electrón (con respecto a un sistema de referencia dado), se deben especificar experimentos concretos con los que se planea determinar la «posición del electrón»; de otra manera, esta palabra no tiene significado». W. Heisenberg, «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», *Zeitschrift für Physik* 43 (1927), 172-198.

idea natural, ya que se veía que existían frecuencias y amplitudes, y estas frecuencias y amplitudes podían reemplazar de alguna manera en la teoría clásica a la órbita del electrón. Un conjunto completo de ellas significa una serie de Fourier y una serie de Fourier describe una órbita. Por consiguiente, era natural pensar que se debería utilizar estos conjuntos de amplitudes y frecuencias en lugar de la órbita». Evidentemente, y como el propio Heisenberg señaló, «no era suficiente con decir: «tomemos algunas frecuencias y amplitudes para reemplazar a las cantidades de las órbitas» y utilicemos un tipo de cálculo que ya habíamos utilizado en Copenhague y que más tarde resultaría ser equivalente a la multiplicación matricial».

Pero este comentario, obvio, no reduce la importancia de semejante «componente filosófica» en el desarrollo de la mecánica de matrices. De hecho, Heisenberg insistió en este punto durante una conferencia que pronunció en Berlín en 1926, y a la que asistió Einstein. En una conversación privada que siguió a la intervención de Heisenberg, Einstein preguntó a aquél cuál era la «filosofía que subyacía detrás de su muy extraña teoría». Ante la afirmación de Heisenberg haciendo hincapié en la idea de introducir solamente cantidades observables, y de que en este punto él creía haber seguido el ejemplo del propio Einstein con la relatividad especial, éste manifestó su desacuerdo. En su opinión, «es la teoría la que decide lo que se puede observar». Este comentario resultó ser importante para Heisenberg, cuando, en compañía de Bohr, se planteó seriamente el problema de la interpretación de la teoría cuántica. Recordando el comentario de Einstein, Heisenberg analizó «lo que podía describirse en el formalismo de la mecánica cuántica», comprobando que «era muy fácil ver, especialmente cuando se utilizaban los nuevos descubrimientos de Dirac y Jordan sobre la teoría de la transformación, que no se puede describir al mismo tiempo la posición exacta y la velocidad exacta de un electrón».⁴⁵ Heisenberg se estaba refiriendo, claramente, al descubrimiento de su famoso principio de indeterminación, que de esta manera aparece como el producto no de la «filosofía» inicial de Heisenberg, sino como el resultado de una mezcla de aquellos planteamientos con los puntos de vista de Einstein.

Durante la conversación que mantuvieron en 1926, Einstein también señaló que era «peligroso decir que sólo se debería hablar de cantidades observables. Porque toda teoría razonable también dará la posibilidad de observar, además de todas las cosas que se pueden observar inmediatamente, otras cosas más indirectamente». En este punto, Heisenberg tenía que reconocer que tenía parte de razón, en tanto que en la mecánica cuántica no sólo es posible observar amplitudes y frecuencias, sino también amplitudes de probabilidad.

⁴⁵ Heisenberg, «From a Life of Physics», *op. cit.*, p. 433.

4. Una esperanza para los físicos «clásicos»: La mecánica ondulatoria

La mecánica matricial, la formulación de la mecánica cuántica desarrollada por Heisenberg, en solitario primero y luego en colaboración con Born y Jordan, no suscitó simpatías entre algunos físicos alemanes, especialmente entre los de Berlín que, con «admiración y desconfianza a la vez, observaba[n] el desarrollo de la mecánica cuántica».⁴⁶ Esta postura de los «caballeros del continuo», como Heisenberg los llamaba en sus cartas a Wolfgang Pauli, se debía al carácter excesivamente abstracto de la teoría, que se había formulado prescindiendo de todo tipo de modelo para la descripción de los procesos atómicos. A Einstein, el representante más prominente de los físicos de la capital alemana, el formalismo matricial de Heisenberg le parecía un «verdadero cálculo de hechicería (...) [que] a causa de su complicación, está suficientemente protegido contra toda demostración de falsedad».⁴⁷ Más repelente aún les parecía a estos físicos la forma como el británico Paul Dirac, que desarrolló su propia versión de la teoría cuántica, solía presentar sus resultados.⁴⁸ Einstein la comparaba con «un balanceo sobre un sendero vertiginoso entre ingenio y locura; nada de lo cual puede cogerse con las manos».⁴⁹ De tono parecido eran los juicios emitidos por Max von Laue —que después de sus éxitos con la difracción de rayos X había conseguido instalarse entre la élite berlinesa— cuando se quejaba del «monstruoso tratamiento» que Pauli había dado al problema del átomo de hidrógeno utilizando el método matricial de Heisenberg.⁵⁰

Estas dificultades de tipo matemático aumentaron cuando se descubrió —gracias a Eugene Wigner especialmente— que la teoría de grupos resultaba ser particularmente útil para la nueva mecánica cuántica. La publicación en 1928 del libro que Hermann Weyl dedicó a estos temas, *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, suscitó el siguiente comentario de Schrödinger: «Queridos matemáticos: Todos sabemos cuán útiles pueden ser para nosotros sus puntos de vista. Pero deben intentar presentarnos estas herramientas en una forma más fácil, no relacionada con conceptos demasiado

⁴⁶ A. Einstein a P. Ehrenfest, 28 de agosto de 1926, citada, al igual que algunas de las cartas que siguen, en Karl von Meyenn y José M. Sánchez Ron, «Erwin Schrödinger y la concepción estadística del mundo», *Syloa Clius 1* (1987), n.º 3, 3-23.

⁴⁷ Einstein a Michele A. Besso, 25 de diciembre de 1925. Pierre Speziali, ed., *Albert Einstein. Correspondencia con Michele Besso (1903-1955)*. Barcelona, Tusquets, 1994, p. 228.

⁴⁸ Sobre Dirac, ver Helge Kragh, *Dirac. A Scientific Biography*. Cambridge, Cambridge University Press, 1990.

⁴⁹ Einstein a Ehrenfest, 23 de agosto de 1926.

⁵⁰ M. von Laue a E. Schrödinger, 12 de octubre de 1926. W. Pauli, «Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik», *Zeitschrift für Physik* 36 (1926), 336-363.

nuevos. Solamente podremos obtener una comprensión completa con la ayuda de ideas sencillas que puedan entenderse de un vistazo».

Ante los sentimientos de repulsa y frustración que los trabajos de los físicos «matriciales», Heisenberg y Pauli, en especial, suscitaron entre los famosos físicos berlineses, se puede comprender el alivio que éstos —y otros— experimentaron cuando Schrödinger presentaba, menos de medio año después del descubrimiento del formalismo matricial, una mecánica ondulatoria que prometía un retorno a la más familiar física del campo, entendiendo por tal «la esencia de todas aquellas teorías que describen los fenómenos físicos en forma causal mediante ecuaciones en derivadas parciales en el espacio y en el tiempo».⁵¹

La mecánica ondulatoria hundía sus raíces en la tesis doctoral, «Recherches sur la théorie des quanta», que Louis de Broglie había presentado el 29 de noviembre de 1924 en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París. En ella se introducía la famosa dualidad onda-corpúsculo que ya había atisbado Einstein en 1909.⁵²

Una manera de entender el resultado de de Broglie era que había obtenido la mecánica (ondulatoria, en tanto que asociaba ondas al movimiento de partículas) de electrones libres, que no interaccionaban. Se podía pensar que siguiendo por el camino que había abierto, se llegaría a obtener una mecánica cuántica —ondulatoria de nuevo— general. Entre los que creyeron en el enfoque del físico francés se encontraba Erwin Schrödinger, un austríaco que ocupaba una cátedra en Zurich desde 1921.⁵³

En una serie memorable de artículos publicados en 1926, Schrödinger desarrolló una mecánica cuántica ondulatoria.⁵⁴ Un rasgo que distinguía de entrada a la mecánica de Schrödinger de la de Heisenberg era su significado físico; al contrario que la mecánica matricial, la ondulatoria se podía visualizar. Y en cuanto a aparato matemático, lejos del entonces poco conocido cálculo matricial, las ecuaciones de Schrödinger eran las familiares ecuaciones en derivadas parciales, que tan bien recogía el recién publicado (1924) libro de Richard Courant y David Hilbert, *Methoden der mathe-*

⁵¹ Hans Thirring, «Die Grundgedanken der neuen Quantentheorie. Erter Teil: Die Entwicklung bis 1926», *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 7 (1928), 384-431; p. 429.

⁵² L. de Broglie, *Recherches sur la théorie des quanta*, reedición: París, Masson, 1963.

⁵³ Sobre Schrödinger, véase Walter Moore, *Schrödinger. Life and Thought*. Cambridge, Cambridge University Press, 1989.

⁵⁴ E. Schrödinger, «Quantisierung als Eigenwertproblem. (Erste Mitteilung)», *Annalen der Physik* 79 (1926), 361-376; «Quantisierung als Eigenwertproblem. (Zweite Mitteilung)», *Annalen der Physik* 79 (1926), 489-527; «Quantisierung als Eigenwertproblem. (Dritte Mitteilung: Störungstheorie, mit Anwendung auf den Stareffekt der Balmerlinien)», *Annalen der Physik* 80 (1926), 437-490; «Quantisierung als Eigenwertproblem. (Vierte Mitteilung)», *Annalen der Physik* 81 (1926), 109-139.

matischen Physik.

La idea física que subyacía inicialmente en los trabajos de Schrödinger fue resumida adecuadamente por Hendrik A. Lorentz en una carta que dirigió al físico austríaco el 27 de mayo de 1926:⁵⁵

«Su conjetura de que la transformación que tendrá que experimentar nuestra dinámica será similar a la transición de la óptica de rayos a la óptica ondulatoria suena muy tentadora, pero tengo algunas dudas acerca de ella.

»Si le he entendido correctamente, entonces una “partícula”, un electrón por ejemplo, sería comparable a un paquete de ondas que se mueve con la velocidad de grupo».

Aquellos a los que repugnaba renunciar a la máxima clásica «natura non facit saltus», los «caballeros del continuo» mencionados antes, recibieron con entusiasmo las contribuciones e ideas de Schrödinger. Einstein estaba convencido de que había «realizado un avance decisivo con su formulación de la condición cuántica, de la misma manera que estoy convencido de que el camino abierto por Heisenberg-Born es erróneo»; Planck leyó sus artículos de 1926 «igual que un niño curioso escucha en suspense a la solución de un rompecabezas que le ha preocupado durante mucho tiempo, y también estoy encantado con las bellezas que son evidentes a la vista»; y Lorentz señalaba que si «tuviese que escoger ahora entre su mecánica ondulatoria y la mecánica matricial, daría preferencia a la primera, debido a su mayor claridad intuitiva».⁵⁶

En el verano de 1926, Schrödinger pronunció una conferencia en Munich, entre cuya audiencia se encontraban Sommerfeld, que era quien le había invitado, Wilhelm Wien y Heisenberg. En su presentación, Schrödinger defendió su idea de ondas de materia tridimensionales, similares a las ondas electromagnéticas, con lo que creía podía evitar los saltos cuánticos. «Tras la conferencia de Schrödinger —recordó Heisenberg muchos años después⁵⁷— tomé parte en la discusión y argumenté que pensaba que con semejante interpretación no se podría entender ni siquiera la ley de Planck. Porque, después de todo, la ley de Planck se basaba en una teoría cuántica real, en los cambios de energía discontinuos y cosas por el estilo. Wien se enfadó tanto con este comentario que dijo: «Bien, jovencito, com-

⁵⁵ Incluida en A. Einstein, E. Schrödinger, M. Planck, H. A. Lorentz, *Letters on Wave Mechanics*. Londres, Vision, 1967, p. 47.

⁵⁶ Einstein a Schrödinger, 26 de abril de 1926; Planck a Schrödinger, 2 de abril de 1926; Lorentz a Schrödinger, 27 de mayo de 1926. Estas cartas se encuentran reproducidas en *Letters on Wave Mechanics*, *op. cit.*

⁵⁷ W. Heisenberg, «From a Life of Physics», *op. cit.*, p. 432.

prendemos que lamente que ahora la mecánica cuántica y los saltos cuánticos y todo lo demás vayan a ser olvidados, pero ya verá cómo Schrödinger solucionará todos estos problemas muy pronto».

Sin embargo, no se tardó en descubrir que la interpretación de Schrödinger no se podía mantener (uno de los problemas, señalado por Lorentz, era la dispersión de los paquetes de ondas, que hacía casi imposible el sostener la interpretación de las partículas —electrones— como ondas en un sistema de más de una partícula). Los problemas con la interpretación física de Schrödinger de la mecánica ondulatoria no significaban, sin embargo, que el formalismo de la teoría fuese incorrecto, solamente que había que descartar esa interpretación particular. Esto fue confirmado por el descubrimiento, debido al propio Schrödinger, de la «identidad matemática, formal» de la mecánica ondulatoria (la mecánica que resaltaba lo continuo) y la mecánica matricial (que destacaba lo discontinuo).⁵⁸

Al principio, los partidarios de la mecánica matricial no recibieron con agrado la idea de que la mecánica ondulatoria representaba, en el fondo, la misma realidad física que la matricial. Heisenberg, en particular, fue muy reacio a aceptar la nueva formulación. Sin embargo, la teoría de Schrödinger terminaría imponiéndose con bastante rapidez, debido a ser mucho más fácilmente manejable. Y los antiguos proponentes del esquema alternativo terminarían también, no sólo «pasándose al bando contrario», sino contribuyendo a configurar su interpretación física, una interpretación que sería muy diferente a la que Schrödinger y los caballeros del continuo habían deseado. La interpretación probabilista realizada por Born de la función de ondas, Φ (el objeto que describía los entes microscópicos), consideraba a $|\Phi|^2$ como una medida de la densidad de probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado representado por Φ ; Heisenberg demostró en 1927 sus célebres relaciones de incertidumbre, que afirman que magnitudes canónicamente conjugadas (como la posición y el momento, o la energía y el tiempo) sólo se pueden determinar simultáneamente con una indeterminación característica (la constante de Planck): $\Delta q \cdot \Delta p \geq h$.⁵⁹ A partir de este resultado, al final de su artículo, Heisenberg extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance: «No hemos supuesto que la teoría cuántica es, al contrario de la física clásica, una teoría esencialmente estadística en el sentido de que sólo se pueden inferir conclusiones estadísticas de datos exactos. Ya que tal suposición se ve refutada, por ejemplo, por los conocidos experimentos de Geiger y Bothe. Sin embargo, en la formulación fuerte de la ley causal "Si conocemos

⁵⁸ E. Schrödinger, «Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen», *Annalen der Physik* 79 (1926), 734-756.

⁵⁹ W. Heisenberg, «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik,» *op. cit.*

exactamente el presente, podemos predecir el futuro”, no es la conclusión, sino más bien la premisa la que es falsa. *No podemos* conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles». Y Heisenberg concluía: «En vista de la íntima relación entre el carácter estadístico de la teoría cuántica y la imprecisión de toda percepción se puede sugerir que detrás del universo estadístico de la percepción se esconde un mundo “real” regido por la causalidad. Tales especulaciones nos parecen —y hacemos hincapié en esto— inútiles y sin sentido. Ya que la física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre percepciones».

5. *Entre dos aguas: Schrödinger*

En la sección precedente he tratado algunos aspectos de la mecánica ondulatoria, al igual que de la recepción de que fue objeto entre distintos físicos, pero el creador de esa teoría, Erwin Schrödinger, no ha sido sino una sombra, de la que poco o nada he dicho. Es el momento de remediar tal deficiencia.

El caso de Schrödinger es, en varios sentidos, algo complejo.⁶⁰ Al igual que su maestro, Franz Exner, director de uno de los Institutos de Física de la Universidad de Viena, Schrödinger creía —antes de involucrarse en la construcción de una mecánica de los fenómenos cuánticos— que el indeterminismo reinaba en el mundo microscópico.⁶¹ En la conferencia inaugural que pronunció al tomar posesión de su cátedra de Física Teórica en la Universidad de Zurich, el 9 de diciembre de 1922, señalaba que la regularidad que se observa en la naturaleza inanimada se «debe completamente al número tremendamente grande de procesos moleculares que cooperan entre sí. El proceso individual puede, o puede que no, tener su propia regularidad estricta».⁶²

Estas afirmaciones recuerdan las ideas de Boltzmann, del que Schrödinger se declaró firme admirador:⁶³ «Sólo unos meses antes de mi entrada en la Universidad de Viena —la única en la que me he matriculado o inscrito nunca— en el otoño de 1906, el gran Ludwig Boltzmann había

⁶⁰ Varios estudios dedicados a la dimensión filosófica de Schrödinger se encuentran en: Michael Bitbol y Olivier Darrigol, eds., *Erwin Schrödinger. Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*. París, Editions Frontières 1992.

⁶¹ Paul Hanle, «Indeterminacy before Heisenberg: the case of Franz Exner and Erwin Schrödinger», *Historical Studies in the Physical Sciences* 10 (1979), 225-269.

⁶² E. Schrödinger, «Was ist ein Naturgesetz?», *Die Naturwissenschaften* 17 (1929), 9-11; reproducido en E. Schrödinger, *Gesammelte Abhandlungen*. Viena, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Viena 1984, vol. 4, pp. 295-297; p. 296.

⁶³ E. Schrödinger, «Mi vida», en *Mi concepción del mundo*. Barcelona, Tusquets, 1988, pp. 133-157; p. 135.

encontrado en Duino su triste fin. En la lección de toma de posesión de su discípulo y sucesor en la cátedra, Fritz Hasenöhr, que tuvo lugar (...) en el otoño de 1907, éste nos explicó con palabras claras pero entusiastas, el pensamiento fundamental del trabajo que había ocupado la vida de Boltzmann. Dicha explicación me produjo una profunda impresión intelectual que no se ha separado ya nunca más de mi pensamiento. De hecho, a pesar de Planck y Einstein, nada me parece tan importante en la física como el saber de Boltzmann.»

El problema aparece cuando recordamos que, tras encontrar su célebre ecuación de ondas, Schrödinger se declaró, como hemos visto, defensor de un punto de vista realista, causal, basado en las continuidades de la ecuación de ondas. La interpretación, «casi psíquica», de la ecuación de ondas que Bohr, Heisenberg, Born y otros desarrollaron, le significó un «*shock* y desilusión». ⁶⁴ Al igual que a de Broglie, «no le gustaba la interpretación probabilista de la mecánica ondulatoria». ⁶⁵

Paul Hanle ha argumentado que este conflicto se disuelve porque Schrödinger se adhirió al punto de vista convencionalista introducido por Henri Poincaré. En favor de su tesis, Hanle recurrió a la conferencia inaugural que Schrödinger pronunció en 1929 en la Academia Prusiana de Ciencias. ⁶⁶ En aquella ocasión, Schrödinger utilizó el argumento de que en realidad se podía utilizar la geometría euclídeana o la no euclídeana en la teoría de la relatividad, aunque la primera fuese más engorrosa, para afirmar: ⁶⁷ «La misma afirmación se aplica al postulado de la causalidad rigurosa. Difícilmente podemos imaginar algún hecho experimental que decidiera en última instancia si la naturaleza está determinada de manera absoluta o si está parcialmente indeterminada. Lo más que podemos decidir es si uno u otro concepto lleva a una representación más y clara de todos los hechos observados». Asimismo, Hanle mantiene que Schrödinger entendía que lo único que probaba la mecánica cuántica, a través de la interpretación probabilista de la función de ondas de Born o del principio

⁶⁴ E. Schrödinger, «La signification de la mécanique ondulatoire», en *Louis de Broglie, physicien et penseur*. París, Albin Michel, 1953, pp. 16-32; reimpresso en *Gesammelte Abhandlungen*, vol. 3, pp. 694-710; p. 694.

⁶⁵ *Ibid.*, p. 698.

⁶⁶ Schrödinger, «Antrittsrede des Hrn. Schrödinger», *Sonderabdruck aus den Sitzungsberichten der Preussische Akademie der Wissenschaften. Öffentliche Sitzung vom 4. Juli 1919*; reproducida en *Gesammelte Abhandlungen*, vol. 4, pp. 303-305.

⁶⁷ Citado en P. Hanle, «Indeterminacy before Heisenberg», *op. cit.*, p. 267. Sobre el convencionalismo geométrico, ver Henri Poincaré, *La ciencia y la hipótesis*. Madrid, Espasa-Calpe, 1963; originalmente publicado en 1902, segunda parte («El espacio»); Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*. Nueva York, Dover, 1957; y Jerzy Giedymin, *Science and Convention. Essays on Poincaré's Philosophy of Science and the Conventionalist Tradition*. Oxford, Pergamon Press, 1982.

de incertidumbre de Heisenberg, era que la indeterminación estaba inserta en la mecánica cuántica, pero no en la naturaleza. De esta manera Schrödinger podía, en mi opinión, seguir manteniendo la tesis de su conferencia de Zúrich en 1922; esto es, que «el proceso individual puede, o puede que no, tener su propia regularidad estricta».

Ahora bien, también es posible mantener que la postura convencionalista de Schrödinger está estrechamente relacionada con el hecho de que en 1929 la interpretación indeterminista de la mecánica cuántica (incluyendo su mecánica ondulatoria) era ampliamente aceptada, y que lo que Schrödinger estaba haciendo era «salvar las apariencias» (de hecho, durante bastante tiempo dejó de oponerse a esa interpretación, aceptandola como «una solución temporal»⁶⁸). De ser así, la firmeza de sus opiniones filosóficas se vería sustancialmente disminuida.

6. *Un mundo filosófico plural*

Lo dicho hasta el momento debería ser suficiente para mostrar la variedad de «filosofías» de los científicos que tuvieron que ver con el desarrollo de la física cuántica. Semejante hecho continúa siendo notorio incluso con físicos a los que se incluye habitualmente entre los defensores —cuando no ellos mismos creadores— de la interpretación canónica de la mecánica cuántica, la interpretación de Copenhague. Incluso podríamos plantearnos la cuestión —de carácter un tanto sociológico— de si es posible identificar raíces «externalistas» en las posturas filosóficas de algunos científicos para con la física cuántica. Paul Forman, en un memorable artículo publicado ya hace cerca de un cuarto de siglo, estudió una posible conexión filosófico-ideológico-social (durante la República de Weimar) del indeterminismo cuántico.⁶⁹ Sin embargo, aprovechándome del hecho de que este trabajo es fácilmente disponible, dejaré de lado esta dimensión del problema, que, por otra parte, no añade demasiado a lo ya señalado en casos concretos. En esta, última, sección me limitaré a considerar un par de ejemplos que resaltan esa pluralidad filosófica antes citada; los casos de Max Born y Wolfgang Pauli, el primero responsable de la introducción —de manera explícita— del indeterminismo en la mecánica cuántica, el segundo uno de los espíritus más críticos de la física cuántica, estrecho colaborador en ocasiones de Heisenberg y Bohr, y autor de numerosas aportaciones básicas para la nueva mecánica atómica, como el principio de exclusión.

⁶⁸ Schrödinger, «La signification de la mécanique ondulatoire», *op. cit.*, p. 698.

⁶⁹ P. Forman, *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*. Madrid, Alianza, 1984; originalmente publicado en 1971 en *Historical Studies in the Physical Sciences*.

En un artículo publicado en 1926, Born demostró cómo tratar colisiones atómicas transponiendo los métodos matemáticos que se aplicaban al problema, análogo, clásico de la difusión de las ondas de luz en un medio polarizable.⁷⁰ La analogía óptica sugería que se comparase la intensidad de las ondas de materia con la de una onda de luz clásica, que la nueva mecánica cuántica interpretaba como la densidad de la distribución estadística de los fotones asociados. Born señaló que se podría mantener la descripción habitual, utilizando partículas, de los procesos de colisiones atómicas si se adoptaba una relación estadística similar entre las ondas de materia y las partículas atómicas asociadas. En consecuencia propuso interpretar la intensidad de onda, no como la densidad de una distribución de materia real, como imaginaba Schrödinger, sino como una densidad de probabilidad para la presencia de una partícula. Es interesante citar sus propias palabras.⁷¹ Tras señalar que la «mecánica cuántica de Schrödinger da (...) una respuesta definida al efecto de la colisión; pero no da lugar a una descripción causal. No se obtiene respuesta para la pregunta, “cual es el estado tras la colisión”, sino solamente para la pregunta, “cuán probable es un resultado específico de la colisión”», Born entraba en el problema, filosófico, del indeterminismo:

«Aquí surge todo el problema del determinismo. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica no existe ninguna cantidad que en cualquier caso individual fije de manera causal el resultado de la colisión; pero tampoco experimentalmente tenemos ninguna razón para creer que existan algunas propiedades internas del átomo que condicionen un resultado definido de la colisión. ¿Deberíamos esperar descubrir más tarde tales propiedades (como fases o movimientos atómicos internos) y determinarlas en casos individuales? ¿O deberíamos creer que el acuerdo entre la teoría y el experimento —con relación a la imposibilidad de prescribir condiciones para una evolución causal— es una armonía preestablecida fundada en la no existencia de tales condiciones? Yo me inclino a abandonar el determinismo en el mundo de los átomos. Pero ésa es una pregunta filosófica para la cual los argumentos físicos solos no son decisivos».

Sorprendentemente, nos encontramos con que en el documento en el que se introduce por primera vez, de manera formal, analítica, la interpretación probabilista de la mecánica ondulatoria, su autor, aun adoptando inequívocamente la postura de «abandonar el determinismo en el mundo

⁷⁰ M. Born, «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge», *Zeitschrift für Physik* 37 (1926), 863-867.

⁷¹ *Ibid.*, p. 867.

de los átomos», pensaba que, de hecho, ese problema no era sólo físico, sino también filosófico, con lo cual superaba el ámbito de la propia ciencia física. ¿Un vestigio tardío, tal vez, de los sentimientos, à la *Forman*, que destapó la República de Weimar?

Pasando ahora a Pauli, tenemos que a pesar de ser también uno de los físicos más notables del grupo que creó la mecánica cuántica, sus planteamientos filosóficos eran relativamente complejos. Así, aun estando «de acuerdo con Bohr en la opinión de que se debería definir la *objetividad* de una explicación científica de la naturaleza de la manera más literal posible», y citando con aprobación la forma como Bohr definía un fenómeno («como refiriéndose a observaciones que se obtienen bajo circunstancias específicas, incluyendo una especificación de *todo* el experimento»),⁷² Pauli mantenía una postura realista, no muy frecuente, eso sí.

Esa postura aparece, por ejemplo, en una carta que Pauli envió a Fierz, el 12 de agosto de 1948.⁷³

«Este problema está estrechamente relacionado con el problema de la *idea de realidad*. Cuando el lego dice “realidad”, habitualmente piensa que está hablando acerca de algo que se conoce por sí mismo de manera evidente; mientras que a mí me parece que trabajar en la elaboración de una nueva idea de realidad es precisamente la tarea más importante y extremadamente difícil de nuestra época. Es esto, también, lo que quiero decir cuando hago hincapié en que la ciencia y la religión *deben* tener algo que ver entre sí. (No quiero decir “religión dentro de la física”, ni “física dentro de la religión”, ya que ambos casos serían sin duda “parciales”, sino que lo que quiero decir más bien es colocar ambos dentro de un todo.) Me gustaría intentar dar un nombre a lo que trae a mi mente la nueva idea de realidad: la idea de la realidad del símbolo. Por un lado el símbolo es un producto del esfuerzo humano, y por otra es un signo para un orden objetivo en el cosmos del que el hombre es sólo una parte. Contiene algo del viejo concepto de Dios, al igual que algo del viejo concepto de materia. (Un ejemplo de la física: “el átomo”. Las cualidades primarias de llenar espacio se han perdido. ¿Si no fuera un símbolo, cómo podría ser “tanto onda como partícula”?)»

⁷² W. Pauli, «Phenomenon and physical reality», *Dialectica* 11 (1957), 35-48; reproducido en W. Pauli, *Writings on Physics and Philosophy*, Charles P. Enz y Karl von Meyenn, eds. Berlín, Springer-Verlag, 1994, pp. 115-123; p. 117.

⁷³ Citada en K. V. Laurikainen, *Beyond the Atom. The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*. Berlín, Springer-Verlag, 1988, p. 20.

Una más, en definitiva, entre las diversas aproximaciones filosóficas a una de las dos teorías físicas más sobresalientes de nuestro siglo, la mecánica cuántica.

* * *

José Manuel Sánchez Ron
Departamento de Física Teórica
Facultad de Ciencias
Universidad Autónoma de Madrid
Ciudad Univ. de Canto Blanco
28049 Madrid