

# LA DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO EN LA FILOSOFÍA DE MAX BORN

Ana Rioja. Universidad Complutense

«La Física Teórica es Filosofía»  
Max Born.

**Resumen:** Este artículo pretende analizar la repercusión filosófica que en la obra de Max Born tuvo su peculiar enfoque de la dualidad onda-partícula. La consideración del significado de la función de onda de Schrödinger, o mejor, del cuadrado de su módulo, le condujo a la interpretación probabilística de dicha función de onda. Ello trajo consigo la necesidad de abordar el difícil problema del estatuto de realidad de ondas y partículas y, en general, el criterio de realidad física. La respuesta, ligada a la noción de invariantes de observación, se integrará en la denominada «interpretación ortodoxa» de la mecánica cuántica, la de Copenhague-Göttingen. Born parte pues de la aceptación del marco de la complementariedad de N. Bohr y del principio de incertidumbre de W. Heisenberg, a la que añadirá interesantes reflexiones sobre temas fundamentales de carácter ontológico y epistemológico.

**Abstract:** This article deals with the philosophical repercussion that the peculiar approach to wave-particle duality had on the work of Max Born. Admitting the meaning of Schrödinger's wave function, or rather, of the square of its modulus, led to the probabilistic interpretation of the above said wave function. This implied to tackle the difficult problem of reality status of waves and particles and, in a more general sense, discuss the very criterion for physical reality. His answer, together with the new idea of observational invariants, will form part of the so-called Copenhagen-Göttingen or «orthodox interpretation» of quantum mechanics. Born begins by accepting Niels Bohr's framework of complementarity and Heisenberg's uncertainty principle, to which he will add interesting reflexions concerning fundamental ontological and epistemological subjects.

Pocos temas de la ciencia del siglo XX han hecho correr tantos ríos de tinta como el de la denominada dualidad onda-corpúsculo. Los componentes básicos de materia y radiación, fundamentalmente electrones y fotones, desafían al estudioso de la naturaleza al poner de manifiesto experimentalmente un comportamiento paradójico de muy difícil justificación. Fenómenos como el de interferencia, difracción o polarización parecen exigir una interpretación ondulatoria de la luz, mientras que en el efecto fotoeléctrico o en el efecto Compton, en los que materia y radiación interactúan, ésta se muestra como si estuviera compuesta de un conjunto de proyectiles, o sea,

como si su naturaleza fuera corpuscular. Y lo mismo ocurre con los electrones y demás partículas elementales (protones, neutrones, etc.). Nacieron dentro del modelo atomista en cuanto corpúsculos portadores de carga eléctrica y masa, con posiciones y velocidades definidas. Sin embargo, la comprobación experimental de la difracción de electrones entre 1927 y 1928 hizo buena la hipótesis de De Broglie que sugería la existencia de ondas de materia.

Físicos teóricos y filósofos de la ciencia se han apresurado, a lo largo de todo este siglo, a dar sus peculiares y diversas versiones de los hechos. Lo único claro y cierto es que las propiedades de ondas y partículas son incompatibles. Pero a partir de aquí todo ha cabido, desde quien ha proclamado la necesidad de revisión de los principios básicos de la lógica aristotélica, o bien la sustitución de los conceptos físicos clásicos por otros enteramente nuevos y desconectados de la experiencia ordinaria, o el mantenimiento de esos conceptos pero limitando su aplicabilidad, hasta quien ha rechazado la existencia de tal dualidad en los objetos atómicos, o incluso quien se ha refugiado en una suerte de misticismo oriental supuestamente capaz de conciliar todos los opuestos.

A nadie se le oculta, no obstante, que la cuestión tiene un profundo alcance que desborda el ámbito estricto de la física y se adentra en el de la ontología y la epistemología. Así lo entendieron los propios creadores de la teoría cuántica, quienes en numerosos escritos mostraron su interés por las consecuencias que podrían tener los nuevos planteamientos de la microfísica sobre los importantes y universales problemas de la realidad y la objetividad.

Este es el caso de Max Born. Es sabido que en 1926 propuso una de las primeras y más importantes explicaciones del posible significado físico de la dualidad onda-corpúsculo mediante su interpretación estadística de la mecánica ondulatoria, por la que obtuvo el Premio Nobel en 1954. Como secuela natural de esta interpretación, Born se planteó reiteradamente el tipo de realidad que habría de concederse a ondas y partículas y, en general, el criterio de realidad física. Su matizada respuesta se liga al concepto de invariantes de observación, en un intento de fundamentar cómo las percepciones sensibles individuales se transforman en conocimiento con validez intersubjetiva.

La aportación de este físico alemán constituye una parte inseparable de la interpretación «ortodoxa» de la mecánica cuántica, la de Copenhague-Göttingen, aunque menos citada y divulgada que la de Bohr y su marco de la complementariedad o la de Heisenberg y sus relaciones de incertidumbre. A la exposición y comentario de las concepciones filosóficas de Born se dedica este artículo. Pero antes convendrá repasar los hechos fundamentales de la historia de la física relacionados con su obra y acaecidos en torno a 1926; el lector familiarizado con estos temas puede omitir su lectu-

ra y pasar directamente al epígrafe 2.

### 1. Recordando el año 1926<sup>1</sup>

En este importante año para la mecánica ondulatoria aparecían en tres números sucesivos de la revista *Annalen der Physik* cuatro comunicaciones del entonces profesor de la Universidad de Zurich E. Schrödinger tituladas todas ellas «Cuantización como un problema de valores propios»<sup>2</sup>. La primera estaba terminada a finales de enero y la cuarta se publicaba seis meses después. En este escrito Schrödinger lograba presentar la existencia de valores cuantizados de energía sin necesidad de postular los estados estacionarios y los «saltos» de unos a otros de los que Bohr había hecho uso en 1913 para dar razón de la estabilidad del átomo de hidrógeno. Las perturbadoras discontinuidades se evitaban en su opinión al poner de manifiesto que esos estados discretos de energía podían obtenerse en forma de valores propios de un operador. El viejo y valioso principio de continuidad quedaría restituido y con ello el carácter clásico de la física puesto en cuestión por Bohr y los físicos del Instituto de Física Teórica fundado por éste último en Copenhague en 1921.

Siguiendo la vieja analogía de Hamilton entre mecánica y óptica ondulatoria, trató así de establecer una nueva mecánica basada en la prioridad absoluta de las ondas, en detrimento de las partículas. Los electrones son ondas de materia (ya introducidas por De Broglie) cuyo estado viene definido por una «función de amplitud de onda mecánica  $\psi$ »; lo que se trata es de encontrar la ecuación de onda que represente la propagación de esas ondas de materia. El resultado fue efectivamente el hallazgo de su famosa ecuación diferencial de 2º grado en derivadas parciales para la función de onda  $\psi$  y sus valores propios de energía. La mecánica de los desplazamientos de puntos en el espacio es sustituida por la de procesos ondulatorios en un espacio de configuración, de modo que nos hallamos

---

<sup>1</sup> Con respecto a este período de la historia de la Física puede consultarse: W.H. Cropper: *The Quantum Physicist*, New York, Oxford University Press 1970; M. Jammer: *Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Tomash Publishers 1989; J.J. Icaza: *La construcción de la mecánica cuántica*, Bilbao Servicio Editorial Universidad del País Vasco 1991; E.M. Mackinnon: *Scientific Explanation and Atomic Physicists*, Chicago and London, University of Chicago Press 1982; W.T. Scott: *Erwing Schorödinger. An Introduction to his Writings*, Massachusetts, University of Massachusetts Press 1967; L. Sklar: *Philosophy of Physics*, Oxford, Oxford University Press 1992.

<sup>2</sup> E. Schrödinger: «Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung)», *Annalen der Physik*, 79, (1926), pp. 361-376; «Quantisierung als Eigentwertproblem (Zweite Mitteilung)», *Annalen der Physik*, 79, (1926), pp. 489-527; «Quantisierung als Eigentwertproblem (Dritte Mitteilung)», *Annalen der Physik*, 80, (1926), pp. 437-490; «Quantisierung als Eigentwertproblem (Vierte Mitteilung)», *Annalen der Physik*, 81, (1926), pp. 109-139.

ante una mecánica ondulatoria, distinta en su formalismo y en sus supuestos básicos de la mecánica matricial que estableciera Heisenberg un año antes (si bien coincidente en los resultados al aplicarse al oscilador lineal armónico y a otros sistemas atómicos simples).

Para ello necesitó hacer uso de la noción de «paquete de ondas» (grupo de ondas superpuestas), mediante la cual trataba de explicar el hecho de que la carga de electrón estuviera concentrada en una región muy pequeña de espacio (un paquete de ondas es tanto menor cuanto mayor es la gama de longitudes de onda de las ondas que lo constituyen). En definitiva la interpretación de las partículas en términos de paquetes de ondas permitía servirse de la imagen de un grupo de ondas confinadas en una pequeña región del espacio. En un escrito enviado el 3 de septiembre de 1926 para su publicación, Schrödinger se manifestaba rotundo: «los puntos materiales no consisten sino en sistemas de ondas»<sup>3</sup>.

El objetivo perseguido por el físico austriaco no era baladí. Al definir los electrones y demás partículas como paquetes de ondas, siendo cada una de éstas descrita mediante la función de onda  $\psi$ , buscaba, como dije anteriormente, garantizar la conexión de la física cuántica con la física clásica mediante el restablecimiento del principio de continuidad. La ventaja era doble: por un lado se lograba eliminar la discontinuidad cuántica; por otro se alcanzaba una representación intuitiva de las ondas de materia al concebirse como procesos en el espacio y en el tiempo. Esto último permitía poner de manifiesto la superioridad del formalismo de Schrödinger frente al de Heisenberg en el que se renunciaba a toda descripción espacio-temporal.

En la primavera de 1926 el propio Schrödinger había hallado la equivalencia entre el formalismo de la mecánica matricial de Heisenberg y el de su mecánica ondulatoria<sup>4</sup>. Pero quedaba pendiente el espinoso problema de la interpretación física del formalismo. En concreto, y en contra de lo defendido en ese momento por Heisenberg y Bohr, Schrödinger proclamaba la absoluta improcedencia de abandonar la descripción espacio-temporal, si no se quería perder asimismo toda inteligibilidad de los fenómenos atómicos.

Armado de tales ideas, en septiembre de este año de 1926 Schrödinger aceptó la invitación de Bohr para visitarle en Copenhague. Heisenberg nos ha narrado lo allí sucedido, poniendo especial énfasis en lo siguiente: «los de Copenhague nos sentíamos al final de la visita plenamente seguros de que pisábamos el verdadero camino. Reconocíamos, sin embargo al mismo

---

<sup>3</sup> E. Schrödinger: «An Ondulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules», *Phys. Rew.*, 28, (1926), pp. 1049-1077.

<sup>4</sup> E. Schrödinger: «Über das Verhältnis des Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen», *Annalen der Physik*, 79, (1926), pp. 734-756.

tiempo, cuan difícil resultaría convencer a los mejores físicos que había que renunciar a una descripción espacio-temporal de los procesos físicos»<sup>5</sup>.

Ahora bien, la cuestión que en este punto se plantea es si efectivamente la función de onda permitía alcanzar los dos objetivos mencionados, y la respuesta es negativa. Sería demasiado fácil poder dirimir el tema de la dualidad onda-corpúsculo en estos simples términos: las partículas no son reales, sólo las ondas son reales en el espacio y en el tiempo (de hecho Schrödinger adscribió a la función de onda  $\psi$  un significado electromagnético: distribución continua de carga eléctrica en el espacio). Pero lamentablemente no era así. Son numerosas las dificultades a las que esta interpretación tenía que hacer frente.

En primer lugar, es poco comprensible que una partícula pueda representarse mediante un paquete de ondas debido a que toda partícula supone una concentración de carga eléctrica en una pequeña zona de espacio, mientras que los paquetes de ondas se dispersan rápidamente a lo largo de una amplia región, especialmente en procesos de colisión y de difracción. En definitiva la partícula tiene una localización casi puntual, mientras que la onda todo lo contrario. Schrödinger trató de responder a esta objeción postulando que todos los casos podrían asimilarse al del oscilador armónico simple en el que se muestra una concentración estable a lo largo del tiempo de un grupo de vibraciones con frecuencias limitadas a un determinado intervalo<sup>6</sup>. Heisenberg, sin embargo, probó que el especial caso del oscilador armónico simple no era extrapolable a los demás; la dispersión no podía evitarse.

Pero, en segundo lugar, sucede que este efecto de dispersión debe invertirse instantáneamente cuando el electrón es localizado. Durante un proceso de medida,  $\psi$  cambia discontinuamente a una nueva configuración. Es lo que se conoce con el nombre de «reducción del paquete de ondas», fenómeno inexplicable si estamos ante una onda física expandiéndose de manera continua en el espacio.

Hay una tercera razón que se opone a la realidad física de las ondas. La función  $\psi$  es una función en un espacio abstracto de configuración y no en un espacio real, ya que su número de dimensiones depende del número de grados de libertad del sistema. Así, para un sistema de  $n$ -partículas es una función en un espacio de  $3n$  dimensiones.

Además, en cuarto y último lugar,  $\psi$  es una función compleja, o sea, se

---

<sup>5</sup> W.Heisenberg: *Diálogos sobre Física Atómica*, Madrid, B.A.C. 1972, p. 96. La cuestión desde luego se complicará para los físicos de Copenhague, puesto que fenómenos como la trayectoria de un electrón en una cámara de niebla ponen de manifiesto que la renuncia a la descripción espacio-temporal había de ser revisada.

<sup>6</sup> E.Schrödinger: «Der stetig Übergang von der Micro- zur Macromechanik», *Naturwiss.*, 14, (1926), pp. 664-666.

expresa mediante números complejos y no mediante números reales.

En resumen, la interpretación ondulatoria de la función de onda ofrecida por Schrödinger se enfrentaba a problemas insalvables. Las ondas no parecían poder erigirse en los constituyentes fundamentales de la materia, eliminando uno de los términos de la dualidad onda-corpúsculo. Estando así las cosas, algún tiempo después de que Schrödinger hubiera publicado la cuarta comunicación de su escrito «*Quantisierung als Eigenwertproblem*», aparecía un breve artículo en el que se proponía una interpretación diferente de la función de onda. Se trata de la interpretación probabilística de la función de onda de Max Born<sup>7</sup>.

A mediados del año 1925 había aparecido un artículo de Heisenberg<sup>8</sup> en el que se incluía el nuevo formalismo matemático al que posteriormente se le denominaría mecánica de matrices. El original fue remitido a Born en el mes de Julio, siendo éste quien lo envió a la revista. A continuación el propio Born, en colaboración con P. Jordan, se propuso continuar lo emprendido por Heisenberg, fruto de lo cual serían dos artículos, uno firmado por ellos dos y publicado en 1925, y otro en el que también figuraba Heisenberg y que vio la luz a comienzos del año siguiente<sup>9</sup>.

Nos encontramos pues de nuevo en 1926. Born se halla a la sazón involucrado en la mecánica matricial. Sin embargo, al conocer el trabajo de Schrödinger sobre mecánica ondulatoria, advierte de inmediato las posibilidades de ese formalismo alternativo para tratar algunos procesos que se resistían a la formulación de Heisenberg; me refiero en concreto a los procesos de colisión. Pero ello exigía una interpretación de dicho formalismo en términos de partículas, y no de ondas. ¿Cómo? La interpretación estadística de  $\psi$  sería la respuesta a la cuestión. Born publica así en el mes de Junio, un artículo de cuatro páginas ya citado anteriormente<sup>10</sup>, al que seguirían otros dos<sup>11</sup>.

<sup>7</sup> M. Born: «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge», *Zeitschrift für Physik*, 37, 1926, pp. 863-867. Traducción inglesa: «On the Quantum Mechanics of Collisions», in: J.A. Wheeler - W.H. Zurek (eds.): *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press 1983, pp. 52-55.

<sup>8</sup> W. Heisenberg: «Über quantentheoretischer Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik*, 33, (1925), pp. 879-893.

<sup>9</sup> M. Born - P. Jordan: «Zur Quantenmechanik», *Zeitschrift für Physik*, 34, (1925), pp. 858-888 y M. Born - W. Heisenberg - P. Jordan: «Zur Quantenmechanik II», *Zeitschrift für Physik*, 35, (1926), pp. 557-615.

<sup>10</sup> Ver nota 7.

<sup>11</sup> M. Born: «Zur Wellenmechanik der Stossvorgänge», *Göttinger Nachrichten*, (1926), pp. 146-160 y M. Born: «Quantenmechanik der Stossvorgänge», *Zeitschrift für Physik*, 38, (1926), pp. 803-827.

«Bohr ha llamado la atención —dice Born en el primero de estos artículos— sobre el hecho de que todas las dificultades de principio asociadas con el enfoque cuántico que nos encontramos en la emisión y absorción de la luz por los átomos, residen en la interacción de los átomos a cortas distancias y consecuentemente en los procesos de colisión. En las colisiones tratamos, no con misteriosos campos de ondas, sino exclusivamente con sistemas de partículas materiales, sujetos al formalismo de la mecánica cuántica. Voy así a abordar el problema de investigar más detenidamente la interacción de una partícula libre (rayo alfa o electrón) con un átomo cualquiera, y de determinar si la descripción de una colisión no es posible en el marco de una teoría existente.

»Entre las diferentes formas de la teoría únicamente la de Schrödinger se ha mostrado adecuada para este proceso, y por ello justamente la considero como la formulación más profunda de las leyes cuánticas»<sup>12</sup>.

El modelo de partículas no puede abandonarse puesto que es posible contarlas mediante el contador Geiger o fotografiar sus trayectorias en una cámara de Wilson. Ahora bien, un haz de electrones puede representarse por una onda, que al chocar con un átomo, se transforma en un tren de ondas esféricas secundarias cuya amplitud de vibración  $\psi$  varía con la dirección. El cuadrado de la amplitud de esta onda determinará entonces la probabilidad relativa de dispersión en función de la dirección. Born dirá así con respecto a los problemas de la colisión entre un electrón y un átomo y, por tanto, de la localización del electrón dispersado tras la colisión, que la densidad de probabilidad de que dicho electrón esté en el punto  $\alpha, \beta, \gamma$  viene dada por  $|\psi(\alpha, \beta, \gamma)|^2$ . O también que  $|\psi|^2 dt$  mide la densidad de probabilidad de encontrar la partícula en el volumen elemental  $dt$ .

Años antes Einstein había formulado una hipótesis según la cual el campo de ondas electromagnéticas podía entenderse como un cierto «campo fantasma» que guiaría a los fotones en su trayectoria hacia regiones de mayor o menor probabilidad. Concretamente el cuadrado de la amplitud de onda óptica  $\rho$ , proporcional a la intensidad, expresaría la probabilidad de encontrar un fotón en una región determinada de espacio. O sea, podría considerarse la amplitud de onda, o más concretamente el cuadrado de su módulo, como una función de probabilidad que permitiría conocer la densidad de las partículas (la necesidad de atender al cuadrado del valor absoluto de la amplitud de onda se debe a que la propia amplitud de onda

<sup>12</sup> M. Born: «On the Quantum Mechanics of Collisions», p. 52.

puede ser compleja, mientras que las cantidades susceptibles de interpretación física deben ser reales).

Born aceptó esta hipótesis de Einstein, adaptándola a la nueva situación. La amplitud de onda óptica  $\rho$  es sustituida por la función de amplitud de onda mecánica  $\psi$ , de modo que puede decirse que la intensidad de la función de onda arroja una probabilidad, la de encontrar partículas en un volumen dado o en un estado dado.

En el artículo anteriormente citado afirma lo siguiente: «La mecánica cuántica de Schrödinger proporciona por tanto casi una respuesta definida a la cuestión del efecto de la colisión, pero no se trata de una descripción causal. No responde a la cuestión «cuál es el estado tras la colisión», sino sólo a la cuestión «cuál es la probabilidad de un resultado específico de la colisión». Aquí nos enfrentamos al problema del determinismo. Desde el punto de vista de nuestra mecánica cuántica no hay ninguna magnitud que en un caso individual establezca causalmente el efecto de la colisión. (...) Yo personalmente me inclino por renunciar al determinismo en el mundo atómico. Pero ésta es una cuestión filosófica para la cual los meros argumentos físicos no son decisivos»<sup>13</sup>.

Este texto pone de manifiesto la radical diferencia que alejará intelectualmente a Einstein de Born durante el resto de su vida. Pese a su novedosa propuesta, aquél mantiene una concepción clásica de la probabilidad que en modo alguno pone en entredicho el determinismo fundamental de la naturaleza. Por el contrario Born desde el primer momento se muestra partidario de abandonar esta convicción tan arraigada entre la mayoría de los físicos. En la teoría clásica el cuadrado de la amplitud de onda expresa un estado físico real, mientras que ahora el cuadrado de la función de onda únicamente se refiere a la probabilidad de encontrar las partículas en un volumen dado o en un estado dado. Resulta así que en la interpretación de Born de la función de onda de Schrödinger, las ondas de la mecánica ondulatoria se han convertido en «ondas de probabilidad». Podría resultar tal vez que sólo las partículas fueran físicamente reales, y lo fueran en un sentido clásico, esto es con posición definida y cantidad de movimiento definida, mientras que las ondas de probabilidad representarían meramente nuestro conocimiento del sistema. En ese caso habría quedado resuelta la dualidad onda-partícula, si bien en un sentido diferente al pretendido por Schrödinger: la prioridad la tendrían las partículas, no las ondas.

Sin embargo, no parece que el mundo microfísico esté dispuesto a facilitar tanto las cosas a quienes se atreven a adentrarse en él. Como veremos, la cuestión de esta dualidad onda-corpúsculo obligará a Born a

---

<sup>13</sup> M. Born: «On the Quantum Mechanics of Collision», p. 54.

asumir una concepción de la realidad física mucho menos clásica de lo que Schrödinger o Einstein hubieran deseado.

## 2. La función de onda y la medida

¿Cuál es el significado de las ondas de probabilidad de Max Born? ¿Son algo físicamente real? La respuesta que surge al hilo de lo expuesto es que lo que más bien representan es nuestro conocimiento del estado de un sistema de partículas, puesto que sólo nos permiten calcular la probabilidad de un resultado específico tras una colisión, y esto por principio de modo que no cabe esperar ninguna aproximación futura al planteamiento determinista. Podríamos así decir, empleando palabras del propio autor, que se trata de «ondas de conocimiento parcial», en vez de ondas en sentido físico que se propagan en el espacio real.

Jammer<sup>14</sup> ha señalado con todo acierto que esta interpretación permitiría resolver todas las dificultades que suscitaba la versión de Schrödinger de la función de onda. En efecto, concretamente el problema de la dispersión del paquete de ondas o el problema de la multidimensionalidad del espacio abstracto de configuración no se plantearían. Además, respecto a la reducción del paquete de ondas, sería asumible el cambio discontinuo de  $\psi$  con ocasión de una operación de medida si se entendiera, no como el colapso súbito de una onda muy extendida, sino meramente como un cambio de nuestro conocimiento de una situación física al acceder al resultado de una medida.

Ahora bien, en ese caso surgen otras dificultades ligadas esta vez a los fenómenos de interferencias y superposición de estados. El propio Born se hará eco de ello en numerosas ocasiones. Supongamos que tenemos dos haces de partículas que provienen de la misma fuente y que, al calcular por separado su densidad de probabilidad da como resultado  $|\psi_1|^2$  y  $|\psi_2|^2$ . En la teoría clásica, cuando se superponen y calculan conjuntamente se obtiene la suma  $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$ . Pero ahora el resultado es distinto:  $|\psi_1 + \psi_2|^2$ . Tenemos la interferencia de probabilidades ejemplificada en el famosísimo experimento de la doble rendija, en el que la probabilidad de encontrar fotones en la pantalla cuando ambas rendijas están abiertas no es una simple superposición de la que se obtiene cuando sólo una lo está<sup>15</sup>. La cuestión es que la onda procedente de la rendija 1 y

<sup>14</sup> M. Jammer: *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York, John Wiley and Sons 1974, p. 43.

<sup>15</sup> M. Born: «Physics and Metaphysics», *Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, vol. 91, No. 3, (1949-50), pp. 1-19, cf. p. 10; M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford 1949. Reprint: New York, Dover 1964, pp. 106-107.

la onda procedente de la rendija 2 interfieren destructivamente; es un hecho experimental que las ondas físicas producen fenómenos de interferencia, pero ¿pueden hacerlo las ondas de probabilidad?, ¿tiene algún sentido considerar el conocimiento parcial de si un haz de partículas, o una sola partícula, pasó por la rendija 1 como interfiriendo con el conocimiento parcial de si pasó a través de la 2?

Putnam<sup>16</sup> resume la situación con toda claridad: «la reducción del paquete de ondas no tiene sentido a menos que digamos que las ondas no son ondas físicas sino sólo «ondas de probabilidad» (razón por la cual colapsan cuando se obtiene más información); pero el patrón de interferencia no tiene sentido a no ser que digamos que las ondas (muy particularmente en el caso tridimensional) son ondas físicas»<sup>17</sup>.

Dejamos así planteado por ahora el problema del estatuto ontológico de las ondas, para abordarlo con respecto a las partículas. Clásicamente una partícula es representada como un punto-masa poseyendo posición y cantidad de movimiento con valor determinado en todo tiempo. Es indispensable poder atribuir de manera unívoca y simultánea ese par de magnitudes a cada sistema individual, pues son ellas las que constituyen el estado mecánico del sistema en cada instante. La cuestión es si, al interpretar Born de manera corpuscular la función de onda de Schrödinger, mantuvo la acepción clásica del término «partícula». En un primer momento todo apunta a que así fue, de modo que podría defenderse una forma de realismo tradicional para las partículas<sup>18</sup>. Pero también aquí las cosas se complicarán como consecuencia del principio de indeterminación.

En el contexto de la mecánica de matrices de Heisenberg, las relaciones de incertidumbre se obtienen a partir del carácter no conmutativo de los operadores. Sin embargo, cabe también una versión ondulatoria de dichas relaciones. En efecto, si partimos del paquete de ondas que representa a una partícula, cuanto mayor sea su extensión en el espacio, tanto más imprecisa será la posición de la partícula, pero en cambio menor será el

<sup>16</sup> H. Putnam: «A Philosopher Looks at Quantum Mechanics», in: R.G. Colodny (ed.): *Beyond the Edge of Certainty*, New York Prentice Hall 1965. Reprint: Lanham, University Press of America 1983, pp. 75-101.

<sup>17</sup> H. Putnam: «A Philosopher Looks at Quantum Mechanics», p. 81.

<sup>18</sup> Jammer, por ejemplo, se refiere a la denominada «original probabilistic interpretation» de M. Born de la función  $\psi$  como aquella en la que « $|\psi|^2 dt$  mide la densidad de probabilidad de encontrar la partícula en el volumen elemental  $dt$ , siendo la partícula concebida en sentido clásico como un punto masa que posee en cada instante tanto una posición como un momentum definidos». M. Jammer: *The Philosophy of Quantum Mechanics*, pp. 42-43 (en cursiva en el original). Lo mismo manifiesta Putnam: en la interpretación «original» de M. Born, a diferencia de la de Copenhague, «las partículas elementales son partículas en sentido clásico —puntos-masa que tienen en cada instante tanto posición definida como velocidad definida—, si bien no obedecen a las leyes clásicas». H. Putnam: «A Philosopher Looks at Quantum Mechanics», p. 80.

numero de onda (número de longitudes de onda en una distancia dada) y en consecuencia menor el intervalo de valores de la velocidad. Y, recíprocamente, cuanto menor sea el número de onda, mayor será su extensión en el espacio, con lo que el mejor conocimiento del valor de la velocidad se traducirá en una pérdida de información de la posición. En definitiva, no es posible fijar simultáneamente ciertos pares de magnitudes (las denominadas magnitudes conjugadas), con igual grado de precisión.

Naturalmente acto seguido se suscita la importante cuestión que tanto separó a Einstein de Bohr y del propio Born, y que tiene que ver con el modo como deba interpretarse esa indeterminación básica: ¿cabe seguir atribuyendo a las partículas posición y cantidad de movimiento definidas en todo tiempo aunque no sea posible conocerlas o ha dejado de tener sentido tal atribución? La respuesta depende a su vez de la opinión que se tenga acerca de si la física ha de limitarse o no a pronunciarse sobre observables y, en último término, si se considera que la teoría es completa o por el contrario es incompleta pero completable mediante alguna teoría de parámetros ocultos.

En la correspondencia con Born, Einstein se mostró abiertamente contrario al punto de vista según el cual la definición de la posición (o de la cantidad de movimiento) de una partícula no podría interpretarse como posición «antes de» la medición sino sólo como resultado de la operación de medida, que incluye no sólo la verdadera situación de la partícula sino también la naturaleza del mecanismo de medición que por principio es incompletamente conocida<sup>19</sup>. Lo que a Einstein le preocupaba era la puesta en entredicho de esa forma clásica de realismo en la que los objetos «tienen» propiedades con independencia de la medida. Muy especialmente las variables de estado, es decir, aquéllas que nos permiten conocer el estado mecánico del sistema, han de disfrutar de valor definido en todo tiempo, al margen de que ese tiempo corresponda a un momento de observación o no. En definitiva, los objetos han de poseer existencia real independiente del sujeto que percibe, observa y mide. Pauli denominó a esta hipótesis de Einstein la del «observador desligado», que consiste en el «prejuicio filosófico según el cual se puede definir objetivamente un estado (llamado «real») en cualquier circunstancia, o sea, sin especificar la ordenación experimental utilizada para el sistema»<sup>20</sup>.

¿Qué posición tomó Born al respecto? Putnam señala que precisamente el error inicial de este ilustre físico estuvo en la aceptación tácita de un «principio de no-perturbación», el cual establece que «la medida no perturba el observable medido, o sea, el observable tiene casi el mismo valor un

---

<sup>19</sup> Einstein a Born, 5 abril 1948. A. Einstein - M. y H. Born: *Correspondencia 1916-1955*, México, Editorial Siglo XXI 1973, p. 214.

<sup>20</sup> Pauli a Born, 3 marzo 1954; A. Einstein - M. y H. Born: *Correspondencia 1916-1955*, p. 272.

instante antes de la medida que en el momento en que se realiza la medida»<sup>21</sup>. Pero Bohr, y también Heisenberg influenciado por éste, argumentarán ampliamente en favor de la atribución de observables únicamente en circunstancias experimentales específicas, o dicho con otras palabras, defenderán la inclusión obligada del propio dispositivo experimental en la descripción del fenómeno físico.

No es el momento de analizar este núcleo fundamental de la interpretación de Copenhague. Baste con indicar algo importante en la trayectoria filosófica de Born, y es la aceptación de la filosofía de la complementariedad de Bohr aplicada a observables incompatibles. Esta incompatibilidad, que se pone de manifiesto en el principio de indeterminación o en el principio de superposición de estados, nos obliga a una revisión profunda del concepto clásico de realidad, así como a reconsiderar la desvinculación entre realidad y observación.

En terminología de Reichenbach<sup>22</sup>, hay que distinguir entre «fenómenos», esto es, las cosas propiamente observables (como la presencia de fotones en la pantalla en el experimento de la doble rendija) e «interfenómenos» o construcciones teóricas acerca de lo ocurrido entre dos observaciones (sería, por ejemplo, la trayectoria del electrón atravesando una u otra rendija, ¿o incluso las dos?). La cuestión es si siempre se puede dar razón de los interfenómenos a partir de los fenómenos, gracias a que los estados y propiedades de los objetos son los mismos tanto si son observados como si no lo son. Reichenbach niega esta última condición y apunta que las descripciones de inobservables quizás deban ser no-normales. Born coincide con este filósofo en que la dificultad se origina al trascender las observaciones actuales y tratar de reconstruir lo que sucede entre dos observaciones<sup>23</sup>.

¿Es posible describir los fenómenos en continuidad con los interfenómenos de modo que podamos garantizar la permanencia en todo tiempo de objetos con propiedades bien definidas? La respuesta es no. Una vez abandonado lo que Putnam denominó el principio de no-perturbación, la expresión «realidad física» adquiere un significado nuevo. Nos preguntábamos anteriormente en qué sentido las partículas son reales. De momento lo único que cabe decir es que, en el mejor de los casos, no lo son al modo clásico; las relaciones de incertidumbre y la interferencia de probabilidades excluyen tal posibilidad.

«La existencia de fenómenos de «interferencia de probabilidades»

<sup>21</sup> H. Putnam: «A Philosopher Looks at Quantum Mechanics», p. 83.

<sup>22</sup> H. Reichenbach: *Philosophical Foundations of Quantum Mechanics*, Berkeley-Cal., University of California Press 1944.

<sup>23</sup> M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, pp. 107-108. En lo que Born no estará de acuerdo con Reichenbach es en su propuesta de abandono del principio del tercero excluido.

—afirma Born— excluye la posibilidad de pensar la partícula como teniendo una posición definida (y una velocidad) en cada instante y de conectar estas posiciones en la imaginación con una órbita. (...) Hay que formular un concepto de realidad física que dé cuenta de la existencia actual de fenómenos de interferencia en la región atómica y que vaya más allá del concepto tradicional (que aceptó Einstein) adecuado para los macro-cuerpos». Y páginas más adelante añade: «Los efectos esencialmente cuánticos son de dos tipos: (...) las relaciones de incertidumbre y la interferencia de probabilidades. (...) Para macro-cuerpos ambos efectos pueden ser pequeños en el comienzo y seguir siéndolo durante mucho tiempo; durante este período la descripción de individuos de la mecánica clásica tradicional es una buena aproximación. Pero siempre hay un momento crítico  $t$  en el que deja de ser verdadera y lo casi-individual se transforma en un conjunto estadístico genuino»<sup>24</sup>.

Partiendo de la mecánica ondulatoria de Schrödinger, Born ha accedido a su interpretación probabilística de la función de onda. Pero a su vez en el marco de ésta última se ha producido una modificación del pensamiento del físico alemán que le ha aproximado a las posiciones que se venían defendiendo desde 1927 en el Instituto de Física Teórica de Copenhague en torno al problema de la medida. Putnam resume la evolución intelectual de Born del siguiente modo:

«El principio de Born puede mantenerse, pero con una modificación: el cuadrado de la amplitud de onda mide, no la probabilidad de que la partícula *esté* en un determinado lugar (la observemos o no), sino la probabilidad de que *sea encontrada* en un lugar si se realiza una medida de posición en el tiempo adecuado (si la medición de la posición no se realiza en el tiempo pertinente, entonces no tiene sentido adscribir una posición a la partícula)»<sup>25</sup>.

Se ha hecho intervenir la operación de medida en la interpretación de la función de onda, algo que cada vez desagradaría más a Schrödinger, tal como puso de manifiesto en su célebre paradoja del gato. Nos hallamos ante una situación sin precedentes en la ciencia natural en la que se incluye en la noción misma de objeto a observar su interacción con los aparatos de medida y, por tanto, algo que depende de la intervención directa del sujeto observador.

Ahora bien, ello no puede dejar de plantear un asunto de la mayor importancia. Los conceptos de los que se sirven el físico para describir la realidad (campo, espacio, tiempo, cantidad de movimiento, átomo, etc., y por supuesto, onda y partícula), tienen un significado unívoco cuando son

<sup>24</sup> M. Born: «Continuity, Determinism and Reality», *Dan. Mat. Fys. Medd.*, 30, No. 2, (1955), pp. 1-26; cita en pp. 10-11 y 26.

<sup>25</sup> H. Putnam: «A Philosopher Looks at Quantum Mechanics», p. 84.

utilizados en el marco clásico, de modo que está garantizado su uso con la misma significación aplicados a objetos distintos. Lo que ahora se suscita es si, al situarnos en el nuevo contexto cuántico con la consiguiente inseparabilidad objeto-aparato, cabe mantener esa univocidad o si, por el contrario, se introduce una perturbadora equivocidad que obliga a interpretar de manera diversa un mismo término. Pudiera ser que estuviéramos llamando «onda» o «partícula» a cosas tan distintas en el mundo clásico meso-físico y en el mundo cuántico micro-físico que incluso conviniera considerar la posibilidad de prescindir de los términos clásicos y acuñar otros enteramente nuevos, a fin de evitar incompatibilidades y paradojas. En definitiva, se impone una reflexión que permita dirimir la pertinencia de mantener el lenguaje físico clásico allí donde rige el cuanto de acción, no sea que la debatida cuestión de la dualidad no consista en el fondo sino en un mero problema lingüístico.

### *3. Los conceptos físicos clásicos en el contexto cuántico*

En pura teoría son varias las opciones con respecto a la dualidad onda-partícula: a) definir ambas al modo clásico, admitiendo una y otra con igual estatuto ontológico independientemente de los aparatos de medida, cosa que es incompatible con la mecánica cuántica; b) postular la prioridad de las ondas entendidas como términos primitivos de la teoría, mientras que las partículas habrían de definirse a partir de ellas; pero ya vimos que este intento de Schrödinger de restablecer la vieja continuidad en física fracasó; c) dar la prioridad a las partículas privando a las ondas de realidad física y reduciéndolas a meras ondas de conocimiento parcial; sin embargo, el principio de superposición de estados cuánticos y el de indeterminación desaconsejan avanzar por este camino; d) prescindir de estos términos clásicos y tratar de renovar el lenguaje físico al margen de los conceptos ligados a la experiencia ordinaria y a la intuición; cabría así dejar de usar el aparato conceptual del que se ha servido la física desde Newton hasta nuestros días, en cuyo caso la realidad cuántica sería ajena a la distinción onda-corpúsculo; e) mantener los conceptos clásicos pero redefiniendo su significado; ello conduciría a compromisos ontológicos no-clásicos. Consideremos las dos últimas opciones.

La adopción del paquete de ondas sugiere que éstas no son ondas físicas sino sólo ondas de probabilidad; en cambio los fenómenos de interferencia exigen dar entrada a ondas físicas. Por otra parte los impactos apreciables de electrones en una placa fotográfica, o la huella visible de su paso por una cámara de Wilson llevan a hablar de porciones elementales de materia con localización puntual y, por tanto, de partículas capaces de comportarse como auténticos proyectiles en casos como el efecto Compton o el efecto fotoeléctrico. Ahora bien, la imposibilidad de atribuir localiza-

ción precisa en todo tiempo a esas partes de materia (o de radiación) siembra la duda acerca de la viabilidad del concepto de corpúsculo. ¿Qué camino tomar? ¿Convendrá prescindir de términos físicos como onda, corpúsculo, trayectoria, posición, tiempo, cantidad de movimiento, etc?

Se impone un proceso de reflexión filosófica acerca de los conceptos utilizados en las teorías físicas. Born no adoptará un punto de vista original al respecto, sino que aceptará las enseñanzas de Bohr y Heisenberg. Aunque no se trata de analizar en detalle las opiniones de éstos últimos, sí convendrá al menos decir lo siguiente.

Lo que está en juego es, primero, la posibilidad de traducir a términos unívocos o «bien definidos» los resultados de los experimentos y, segundo, la conexión de estos resultados con el formalismo de la teoría. Ello nos permite, por un lado, interpretar dichos resultados experimentales desde la única instancia desde la que esto puede hacerse, desde la teoría, y, por otro, atribuir a un lenguaje formal un significado físico.

En los meses inmediatamente anteriores a la formulación de las relaciones de incertidumbre (febrero de 1927), Heisenberg se planteó precisamente la conveniencia de abandonar el empleo de conceptos clásicos como el de trayectoria o posición, pese a que ello fuera en detrimento de la interpretación física de su recién construido formalismo matricial. Quizá la nueva física tuviera que renunciar absolutamente a las descripciones espacio-temporales y a las explicaciones causales que habían jugado un papel tan importante en la física clásica. La opción entonces consistiría, bien en limitarse al uso de un lenguaje matemático abstracto sin conexión alguna con los conceptos de la experiencia ordinaria, bien en acuñar términos físicos específicamente cuánticos que serían por completo nuevos y desconectados asimismo de los del lenguaje natural. Pese a que pareció tener la tentación de seguir uno de estos caminos, no obstante finalmente Heisenberg se aproximó a las posiciones defendidas con fervor por Bohr: sin los conceptos clásicos no hay teoría física ni clásica ni cuántica.

Es bien conocida la razón de la defensa a ultranza de los viejos conceptos. No es posible suprimir la fase experimental en la elaboración de una teoría; ahora bien los experimentos han de realizarse mediante aparatos de medida mesofísicos, cuyos resultados no pueden ser expresados y comunicados si no es mediante el lenguaje clásico. En consecuencia la física cuántica no puede permitirse la construcción de un lenguaje nuevo sino la adaptación del antiguo. Las condiciones de adaptabilidad y uso de los viejos conceptos vendrán expresadas en dos principios, uno de carácter cualitativo, el principio o marco filosófico de la complementariedad, y otro cuantitativo, el principio de indeterminación. Tal como refleja el título del artículo en el que Heisenberg publica las relaciones de incertidumbre («Sobre el

contenido intuitivo de la cinemática y de la mecánica teórico-cuánticas») <sup>26</sup>, éstas no serán sino la respuesta al problema del contenido intuitivo o físico del formalismo cuántico, o sea, al de la recuperación de los conceptos intuitivos de la física clásica, y muy en especial de los de espacio y tiempo, aunque eso sí pagando el tributo de la limitación de su mensurabilidad. Como telón de fondo de los puntos de Bohr y Heisenberg está la aceptación del postulado cuántico y la consiguiente imposibilidad de separación nítida entre el objeto a medir y el aparato de medida.

Hay además otro aspecto de la mayor importancia. El lenguaje natural es el único que se ha formado en contacto con el mundo que nos rodea y, por tanto, a partir de la experiencia. El lenguaje físico clásico no es sino la depuración y simplificación del anterior. En consecuencia éste último no es sustituible. Es tarea de la ciencia encontrar la manera de pasar del lenguaje matemático al lenguaje natural; prescindir de éste es tanto como romper toda conexión con la experiencia ordinaria.

Se impone pues el mantenimiento del aparato conceptual clásico. Pero los problemas no han hecho sino comenzar. Los términos acuñados desde y para los objetos no-cuánticos no puede ser empleado para pensar y hablar de objetos regidos por el cuanto de acción sin que surjan desajustes y paradojas. El uso inequívoco de los conceptos fundamentales clásicos se apoyaba en la separabilidad entre objeto y aparato de medida, de manera que las propiedades lo eran de las cosas mismas, y no producto de toda la situación experimental incluyendo los propios instrumentos de observación. Así nos encontramos con la acepción clásica del término partícula según la cual ésta «tiene» por sí misma posición y cantidad de movimiento, y si los tiene con independencia del dispositivo experimental, es claro que hay que atribuirles en todo tiempo un valor definido. De otro modo sería como decir que un mesa tiene longitud, pero sin que mida en cada instante tanto o cuanto.

En el contexto de la física cuántica, sin embargo, las cosas no son así; al menos no los son en la interpretación de Copenhague. ¿Qué posición adopta Born con respecto al problema del lenguaje que venimos planteando? Según dije anteriormente, compartirá con Bohr y Heisenberg la exigencia de atenerse al lenguaje físico clásico, lo que implicará la necesidad de seguir expresando los resultados experimentales en términos corpusculares u ondulatorios. Ahora bien, ello no quiere decir que no deba revisarse el significado semántico de palabras como onda o partícula.

Agazzi <sup>27</sup> atribuye a Born el mérito de haber comprendido lo que él denomina «el punto de vista lingüístico», o sea el hecho de que el significa-

---

<sup>26</sup> W. Heisenberg: «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischer Kinematik und Mechanik», *Zeitschrift für Physik*, 43, (1927), pp. 172-198.

<sup>27</sup> E. Agazzi: *Temas y Problemas de Filosofía de la Física*, Barcelona, Herder 1978, pp. 308 ss.

do preciso de los términos nace de su contexto, de manera que éstos han de verse sometidos a sucesivas ampliaciones y generalizaciones en su uso a fin de abarcar progresivamente fenómenos nuevos. O dicho de otra manera, la intensión o la extensión de los conceptos no están determinadas sino que se construyen «ex novo» en cada nuevo contexto; toda noción tiene así una naturaleza fundamentalmente contextual. Lo que le reprocha es haberse mantenido pese a todo fiel a las tesis de Copenhague en la defensa de un significado originario de los conceptos clásicos.

En realidad lo que Agazzi propone es lisa y llanamente la sustitución de los conceptos clásicos por otros nuevos, que es lo que rechazan Bohr, Heisenberg y el propio Born. No parece que éste último pretendiera adoptar una posición asimilable a la del filósofo italiano. Los conceptos clásicos son irrenunciables, de modo que no ha lugar a plantear la posibilidad de que denoten algo por completo nuevo. Lo que sí es cierto es que la acepción clásica no puede mantenerse íntegramente. Lo que ha permitido la interpretación unívoca de los conceptos clásicos es lo que Born denomina el supuesto de una «observabilidad absoluta»<sup>28</sup>, esto es, la presunta descripción de los fenómenos al margen de los procesos de observación y medida. Pero el hecho es que la determinación de la función  $\psi$  necesita incluir el aparato empleado.

«Resumiendo, podemos decir que mientras que la física clásica asume que los fenómenos naturales se desarrollan con independencia de la observación y son descriptibles sin referencia a ésta, la física cuántica puede pretender únicamente describir y predecir un fenómeno en relación a un modo bien definido de observación o de situación instrumental. (...)

»No podemos comparar al observador de un fenómeno físico con los espectadores de una representación teatral, (...) sino con la vida misma, en la que espectadores y actores son las mismas personas. Es la acción del físico experimentalista que diseña el aparato la que determina los caracteres esenciales de las observaciones. No hay por tanto situaciones que existan objetivamente, como suponía la física clásica»<sup>29</sup>.

Para comprender la dependencia de propiedades y relaciones cuánticas de los dispositivos experimentales, Born remite a la filosofía de la complementariedad de N. Bohr. Una misma situación experimental no puede agotar toda la información sobre los objetos, pues si se pretende determinar la distribución espacio-temporal de los electrones, por ejemplo, no es

---

<sup>28</sup> M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, p. 100.

<sup>29</sup> M. Born: «Physics and Metaphysics», pp. 11, 15.

posible determinar su distribución de energía o cantidad de movimiento. En efecto, toda localización espacial necesita un marco rígido, mientras que la determinación de la cantidad de movimiento necesita una quiebra de esa rigidez, de modo que una parte del aparato esté libremente móvil a fin de que pueda aplicársele principios de conservación. Este tipo de situaciones son así excluyentes pero complementarias, pues ambas son necesarias para proporcionar una información completa del sistema que abarque tanto sus coordenadas como su estado dinámico, si bien no con igual grado de precisión.

Todo esto no puede dejar de afectar al significado del término «corpúsculo»:

«El concepto de corpúsculo necesariamente implica que la cosa posea un *momentum* perfectamente definido y que esté en un lugar definido en el tiempo considerado. Pero el tema que surge es éste: ¿podemos en realidad determinar exactamente tanto la velocidad como la posición de la partícula en un momento dado? Si no podemos —y es una cuestión de hecho que no podemos— esto es, si no podemos nunca determinar más que una de las dos propiedades (posesión de una posición definida o de un *momentum* definido), y si cuando se determina una no es posible hacer afirmación alguna acerca de la otra en el mismo momento, entonces no hay justificación para concluir que la «cosa» a examen pueda realmente ser descrita como una partícula en el sentido usual del término»<sup>30</sup>.

Vemos pues que se mantiene el concepto de partícula, pero no en su «sentido usual». Su significado cambia parcialmente; algo se mantiene, o de lo contrario nos hallaríamos ante un concepto nuevo, y algo se pierde. Concretamente lo que se pierde es la posibilidad de seguir considerando las partículas como diminutos granos de arena con posiciones y velocidades determinadas en todo momento. En la conferencia que pronunció en 1954 con motivo de la entrega del Premio Nobel no deja de referirse a este asunto.

«El concepto de una partícula, por ejemplo, un grano de arena, contiene implícitamente la noción de estar en una posición definida y tener un movimiento definido. Pero según la mecánica cuántica es imposible determinar simultáneamente y con una precisión arbitraria la posición y el movimiento. (...) ¿Se justifica entonces que apliquemos al electrón

---

<sup>30</sup> M. Born: *Atomic Physics*, London 1935. Reprint: London, Blackie and Son Limited 1969, pp. 96-97.

el concepto de partícula y las ideas que están asociadas a él? (...) ¿Podemos llamar «cosa» o «partícula» a algo con lo que no se pueden relacionar en la forma usual los conceptos de posición o movimiento? En caso negativo ¿cuál es la realidad para cuya descripción hemos inventado nuestras teorías? La respuesta a esta cuestión no corresponde a la física sino a la filosofía, y abordarla exhaustivamente rebasaría los límites de esta conferencia. He expuesto mi punto de vista al respecto en otro lugar. Ahora diré únicamente que me manifiesto con énfasis en favor del mantenimiento de la idea de partícula. Naturalmente se hace necesario redefinir su significado»<sup>31</sup>.

Lo que no retenemos del concepto de partícula es la idea de un objeto con propiedades, de un soporte sustancial al que poder atribuir ciertos predicables de manera continua, con independencia de que dichos predicables sean observados o no. Dos cuestiones de enorme envergadura se plantean a continuación que abordaremos en los dos últimos epígrafes: la primera se refiere a la parte del significado semántico del concepto clásico de partícula que se conserva en el contexto cuántico; la segunda, relacionada con la anterior, se interroga por el tipo de realidad que cabe conceder a las partículas así definidas. La noción fundamental para considerar ambas será la de «invariante de observación».

Pero antes de pasar al apartado 4 convendrá decir algo acerca del concepto de onda. En este caso es mucho más claro que, al interpretar estadísticamente la función de onda de Schrödinger, Born había ya modificado este concepto. La noción clásica de onda tiene que ver con la propagación de un estado o perturbación debido a un movimiento vibratorio; o sea, supone transmisión de energía por una zona amplia de espacio. En la idea de onda de probabilidad u onda de conocimiento parcial no hay transmisión de energía, lo que lleva a su vez a tener que dirimir, por un lado, si en este caso nos hallamos ante un concepto formado «ex novo» y, por otro, si cabe conceder algún tipo de realidad física a las ondas. Lo mismo que con las partículas, los invariantes de observación jugarán aquí también un papel.

Nos preguntábamos al final del epígrafe anterior si las coordenadas cuánticas en las que se mueve la micro-física exigían abandonar los conceptos físicos clásicos y sustituirlos por otros enteramente nuevos. Incluso dejábamos en el aire la posibilidad de que un empresa lingüística de este tipo pudiera disolver la dualidad formulada en términos de onda y corpúsculo. Sin embargo, tal posibilidad no se ha realizado, puesto que el

---

<sup>31</sup> M. Born: «Statistical Interpretation of Quantum Mechanics», in: *Physics in my Generation*, New York-Berlin, Springer Verlag 1969, pp. 89-99, cita pp. 97-98.

lenguaje clásico no ha resultado prescindible. Llegados a este punto a donde sí nos vemos abocados es a reconsiderar el significado de estos términos en el nuevo contexto y el tipo de compromisos ontológicos que es posible asumir. Desde la semántica es preciso avanzar hacia la ontología.

#### 4. Invariancia y ontología

Cualquier planteamiento de carácter ontológico realizado desde las teorías científicas supone una concepción no instrumentalista o no positivista de éstas, pues de lo contrario carece de sentido toda pretensión de verdad ligada a una determinada interpretación de los datos empíricos. Dicha interpretación no es meramente formal sino que va unida a un modelo conceptual que, al menos hasta ahora, ha permitido una comprensión intelectual con apoyo en la imaginación. Es el caso de los modelos corpuscular y ondulatorio.

Wartofsky se cuestiona si, dado el estado actual de la mecánica cuántica, sería preferible no tratar de buscar ningún modelo representativo. Sin pronunciarse abiertamente sobre la cuestión, lo único que afirma es que «la historia de la ciencia y la filosofía plantea insistentemente que el intento de comprender las consecuencias de la nueva física a base de los modelos conceptuales que nos ofrece la naturaleza no será fácilmente desplazado por tal austeridad teórica»<sup>32</sup>.

El hecho es que los físicos en general y Born en particular efectivamente no comparten esa «austeridad teórica» que tiende a la total supresión de los modelos. En 1935 nos dice lo siguiente a propósito de las consecuencias del principio de indeterminación para la noción de partícula:

«El origen último de la dificultad reside en el hecho (o en el principio filosófico) de que nos vemos obligados a usar palabras del lenguaje común cuando pretendemos describir un fenómeno, no mediante análisis lógico o matemático, sino mediante una representación [«picture»] que apele a la imaginación. El lenguaje común se ha formado a partir de la experiencia cotidiana y no puede nunca sobrepasar ese límite. La física clásica se ha restringido ella misma al uso de conceptos de este tipo; analizando los movimientos visibles ha desarrollado dos modos de representarlos mediante procesos elementales: partículas en movimiento y ondas. No hay ninguna otra manera de dar una representación pictórica de los movimientos y hemos de aplicarlos incluso en la región de los procesos atómicos donde la física clásica fracasa.

---

<sup>32</sup> M.W. Wartofsky: *Introducción a la Filosofía de la Ciencia*, Madrid, Alianza Editorial 1987, p. 443.

Todo proceso puede ser interpretado o en términos corpusculares o en términos ondulatorios»<sup>33</sup>.

Volvemos a encontrar la tesis de Copenhague acerca de la imposibilidad de prescindir por completo del lenguaje natural (o mejor de los conceptos físicos clásicos que proceden de la depuración y objetivación del lenguaje natural), incluso en teorías científicas muy sofisticadas, debido a que dicho lenguaje es el único que tiene un origen empírico. Es necesario asociar los símbolos matemáticos a los fenómenos observados, y para ello los modelos representativos cumplen un papel insustituible. Una de las tareas de los físicos es, en efecto, traducir los contenidos de las formas abstractas a conceptos capaces de servir de puente con la experiencia; esta traducción a veces exige un uso meramente analógico de los mismos, pero la cuestión es si toda pretensión de traspasar la frontera de lo lógico o de lo matemático resulta ociosa.

Desde luego tiene razón Nagel cuando afirma que «desde el punto de vista estrictamente lógico no es esencial ofrecer un «modelo» para la teoría que ilustre el contenido estructural de ésta de una manera más o menos «pictórica». Sin embargo, la posesión de tales modelos para una teoría presenta grandes ventajas psicológicas»<sup>34</sup>. La enorme importancia del tema no reside, no obstante, en la psicología sino en la ontología. Los compromisos ontológicos en el seno de una teoría científica se adoptan en el contexto del proceso que asocia símbolos formales a hechos de observación, a menos desde luego que se mantenga una concepción instrumentalista de conceptos y teorías.

«El paso [de las estructuras mentales] a la realidad lo efectúa la física teórica al asociar símbolos [matemáticos] a fenómenos observados»<sup>35</sup>.

El asunto a tratar, por tanto, es si ondas y partículas son sólo procedimientos heurísticos valiosos, o si se pretende que dan cuenta de algo real. Dicho con palabras de Born hay que clarificar si a los conceptos físicos «corresponde una realidad física o si son únicamente un tipo de conceptos auxiliares lógicos»<sup>36</sup>.

En los libros de física encontramos conceptos como fuerza, energía, campo electromagnético, temperatura, electrón, onda, etc. Todos ellos tienen sólo en parte el carácter de los cuerpos u objetos materiales que nos rodean, pero en cualquier caso se han introducido para dar cuenta de resultados experimentales, de modo que siquiera indirectamente están

<sup>33</sup> M. Born: *Atomic Physics*, p. 97.

<sup>34</sup> E. Nagel: *La Estructura de la Ciencia*, Buenos Aires, Paidós 1974, p. 278.

<sup>35</sup> M. Born: «Symbol and Reality», in: *Physics in my Generation*, pp. 132-146; cita en p. 141.

<sup>36</sup> M. Born: «Der Realitätsbegriff in der Physik», *Veröff. d. Arbeitsgem. f. Forsch. d. Landes Nordrhein.-Westf.*, 80, (1958), pp. 5-23; cita en p. 5.

conectados con la experiencia. Así, por ejemplo, la serie de gotas en una cámara de niebla sugiere el paso de una partícula, o la serie de placas brillantes y oscuras de una placa alude a la interferencia de ondas. Nos hallamos ante auténticas «construcciones» teóricas con respecto a las cuales cabe interrogarse si son algo más que meras conexiones lógicas entre apariencias observables. Operamos con modelos, pero el verdadero problema es si tienen algún contenido de realidad. Contrariamente a una posición positivista Born se decanta en favor de una respuesta afirmativa: «Los modelos físicos [«die physikalischen Modelle»] y las construcciones [«die Konstruktionen»] tienen un contenido de realidad [«Wirklichkeitsgehalt»] totalmente determinado, que no es esencialmente diferente del de las cosas de la vida diaria»<sup>37</sup>.

¿Cómo se adquiere este contenido de realidad? ¿Cuál es el proceso mediante el cual se pasa a sostener que los campos electromagnéticos o los electrones son reales? ¿Cómo se convierten en objetos del mundo? Nos preguntamos por un criterio de realidad que en el fondo no es sino un principio de objetividad.

Si partimos de los datos de la percepción sensorial, lo que se pretende es poder distinguir aquéllos que son meramente subjetivos de aquéllos otros que tienen la peculiar característica de ser objetivos; sólo éstos dan cuenta de lo real. Resulta pues indispensable averiguar en qué pueda consistir la objetividad. Agazzi<sup>38</sup> señala con razón que se trata de un concepto de significado ambiguo; tomado en sí mismo debería indicar referencia al objeto, condición inherente a éste, reflejo de lo que es, de lo cual derive como simple corolario su independencia del sujeto. Pero es frecuente que la caracterización de lo objetivo se realice precisamente por la referencia a éste; así un conocimiento es objetivo si es independiente del sujeto, sin pretender por ello reflejar propiedades de los objetos mismos. En ambos casos el conocimiento objetivo, a diferencia del subjetivo, ha de ser válido para todos los sujetos, pero mientras que en el primer caso es tan sólo un requisito formal, en el segundo es un requisito sustancial de la objetividad.

Para Born sin duda lo objetivo es válido intersubjetivamente, pero el problema es cómo se alcanza esa validez universal. La respuesta que este físico nos ofrece pasa por un concepto que ya en Einstein había jugado un importante papel: el de «invariante». Todo cuanto percibimos aparece desde múltiples perspectivas o bajo infinitos aspectos; los datos empíricos son constantemente cambiantes. Y sin embargo algunas cosas conservan su identidad a pesar de su aspecto en perpetua modificación. En la teoría

---

<sup>37</sup> M. Born: «Der Realitätsbegriff», pp. 13.

<sup>38</sup> E. Agazzi: *Temas y Problemas de Filosofía de la Física*, p. 406.

de la relatividad la obligada vinculación a un sistema de referencia exigirá ciertas reglas de transformación que nos permitirán traducir las medidas realizadas por diferentes observadores en diferentes estados de movimiento relativo de unos sistemas a otros. En ese proceso se logran establecer algunos invariantes que harán posible las afirmaciones máximamente universales de la teoría, las que se refieren a leyes.

Lo que Born por su parte establece es ciertos invariantes de percepción. Más allá de la variabilidad de las impresiones sensibles, la mente fija un contenido constante e invariante al que denomina cosa u objeto. Esto puede hacerse a dos niveles: de manera inconsciente y precientífica a partir de la simple percepción, en cuyo caso tenemos las cosas reales en el sentido usual del término, o de manera consciente y científica haciendo intervenir aparatos de medida y constituyendo los objetos científicos.

«¿Queremos decir al hablar de un mundo que existe objetivamente? —se pregunta Born— . (...) Propongo expresar esto diciendo que la mente construye, mediante un proceso inconsciente, invariantes de percepción y que éstos son los que ordinariamente llamamos cosas reales. Y pienso que la ciencia hace exactamente lo mismo, si bien en un nivel diferente de percepción, o sea, usando todos los magníficos procedimientos de observación y medida. Las innumerables observaciones posibles están enlazadas mediante algunas características permanentes e invariantes, que difieren de las de la percepción ordinaria, pero que sin embargo son de igual manera indicadores de cosas, objetos o partículas»<sup>39</sup>.

Referirse a un mundo que existe objetivamente, es decir, que es real, exige ir más allá de los datos personales e intrasferibles de la percepción, tan absolutos como subjetivos, y acceder a lo que es común e invariante respecto de sujetos distintos. Ya en 1921, a propósito de la teoría de la relatividad de Einstein, Born afirmaba que la tarea de erigir un mundo objetivo consistía precisamente en abandonar sensaciones y percepciones y adentrarse en el ámbito de los conceptos abstractos, en el que tienen cabida los tonos inaudibles, las luces invisibles o los calores imperceptibles<sup>40</sup>.

En definitiva el proceso de construcción de la objetividad supone la formación de ciertos conceptos capaces de expresar lo que no varía al cambiar de sistema de referencia, esto es, de sujeto observador. Ahora bien, esos conceptos pueden ser de dos tipos según que nos desarrolva-

---

<sup>39</sup> M. Born: «Physics and Metaphysics», p. 16.

<sup>40</sup> M. Born: «Introduction to Einstein's Theory of Relativity», in: *Physics in my Generation*, pp. 1-5.

mos a nivel de la experiencia ordinaria o de la experiencia científica. Si se trata de la experiencia ordinaria, desembocamos en los conceptos y términos del lenguaje natural. Hay tres importantes características de estos conceptos que merece la pena destacar: en primer lugar no son conceptos abstractos meramente formales sino que tienen un contenido intuitivo, esto es son representables con apoyo en la imaginación; en segundo lugar remiten a objetos directamente observables en el espacio y en el tiempo sin mediación de aparatos; en tercer lugar describen propiedades «poseídas» por los objetos, aquéllas que por ser invariantes pueden considerarse como pertenecientes al objeto mismo. El resultado es que la combinación de un cierto número de propiedades invariantes nos permite no sólo describir sino visualizar el estado de los objetos. En este caso la atribución de un contenido de realidad a estos constructos se realiza sin excesivos problemas a partir precisamente de la afirmación de esos invariantes de observación, que son los que nos posibilitan trascender la experiencia subjetiva y alcanzar lo objetivamente real.

Pero lo que más nos interesa es la experiencia científica y el consiguiente proceso de construcción de los conceptos científicos. «La ciencia —afirma Born— no es sino el intento de construir esos invariantes allí donde no son obvios. Si uno no es un científico entrenado y mira a través de un microscopio, no verá nada más que puntos de luz y colores, no objetos. (...) Las palabras que denotan cosas se aplican a caracteres permanentes de la observación o invariantes observacionales»<sup>41</sup>.

Aquí nos hallamos ante un proceso mucho más sofisticado en el que, para empezar, no es posible la transformación de meros datos observables en objetos sin la existencia de un marco teórico que permita interpretar éstos. Además ya no se pueden obtener núcleos invariantes a partir de observaciones individuales directas, sino que es necesario la mediación de instrumentos de medida. Teniendo como polos extremos el formalismo matemático por un lado y los datos empíricos obtenidos gracias al recurso a los aparatos por otro, se trata de conseguir una interpretación que proporcione contenido físico al formalismo y dote de sentido a los puros datos. Ello exige acuñar ciertos conceptos teóricos que guardarán una relación muy lejana con los conceptos intuitivos ordinarios. Nos encontramos así con los conceptos de velocidad, aceleración, fuerza, campo, entropía, átomo, partícula, momento, onda, etc.; unos remiten a objetos, otros a propiedades de los objetos.

El problema que aquí se suscita con todo vigor es hasta qué punto podemos afirmar que estos constructos tienen un «contenido de realidad».

---

<sup>41</sup> M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, p. 104.

Born<sup>42</sup> recoge dos tipos de objeciones positivistas contra tal supuesto. Según la primera de ellas, no puede corresponderles realidad física porque, debido al orden de magnitud en el que nos movemos, no son objetos de experiencia directa; pero lo más grave es que habría que atribuirles propiedades que no se encuentran en las cosas de la experiencia ordinaria. El positivista parte de la prioridad del criterio de observabilidad como criterio de realidad y del isomorfismo entre los diversos órdenes de magnitud. La teoría cuántica, no obstante, exigirá reconsiderar a fondo si a todos los niveles el término objeto admite una única acepción, la que rige para la experiencia cotidiana.

El llamado «espíritu de Copenhague», del que Born participa, se caracteriza por asumir la necesidad de entender de una manera no-clásica los conceptos clásicos. Nagel<sup>43</sup> describe la posición de N. Bohr como aquella que se aparta de una interpretación «uniformemente completa» de la mecánica cuántica. Denomina así a aquella que, por una parte, asigna una interpretación a cada término no lógico empleado en un conjunto de postulados y, por otra, no cambia la interpretación para todos los contextos de aplicación de los postulados, de modo que no se da el caso de que un término no lógico reciba interpretaciones diferentes. Sucede, no obstante, que la dualidad onda-corpúsculo obliga a apartarse de tal interpretación. Se mantiene el lenguaje clásico, pero la asignación de significado definido a términos como partícula, posición, cantidad de movimiento tiene lugar en situaciones experimentales concretas, esto es, en interacción con todo el dispositivo experimental.

Esto lleva a revisar las características del lenguaje científico en contraste con las del lenguaje natural anteriormente mencionadas. Primero nos encontramos con nociones abstractas de nulo o muy escaso contenido intuitivo, lo que las hace difícilmente representables mediante modelos mecánicos. Segundo, remiten a objetos inobservables, siendo únicamente observables los denominados «efectos» (fotoeléctrico, Compton, etc.) para cuya explicación se introducen las nociones en cuestión. Tercero, puesto que la asignación de significado tiene lugar en circunstancias experimentales dadas, ha de someterse a análisis la idea de objeto como soporte de propiedades poseídas de manera continua y estable.

Margenau<sup>44</sup> propone definir los sistemas físicos (puntos materiales, campos eléctricos, electrones, fotones, etc.) en cuanto «construcciones interpretativas» que funcionan como portadoras de propiedades observables (las propiedades también son construcciones interpretativas que se unen a las sensaciones mediante reglas de correspondencia). En el plano

<sup>42</sup> M. Born: «Der Realitätsbegriff in der Physik», pp. 11-12.

<sup>43</sup> E. Nagel: *La Estructura de la Ciencia*, pp. 279-280.

<sup>44</sup> H. Margenau: *La Naturaleza de la Realidad Física*, Madrid, Tecnos 1970, pp. 163-167.

de la percepción ordinaria, y también en el de la física clásica, no hay problema en suponer que la atribución de propiedades tiene un carácter posesivo («la flor tiene color azul», «la partícula tiene posición»), aunque tal vez sería más riguroso no hacerlo. Pero en los objetos atómicos y subatómicos los observables asumen valores diferentes dependiendo del contexto experimental. Por ello Margenau plantea la tesis según la cual el observable se ha de entender como una especie de cualidad abstracta asignable a modo de «atributo latente» a los objetos, que sólo se llena de contenido con ocasión de una observación efectiva y, por tanto, únicamente adquieren valor definido en virtud de una interacción con el observador. «Vemos pues que sólo cuando las propiedades son relativamente invariables podemos decir que el objeto las posee: en otro caso es preciso atribuir las como observables cuyos valores aparecen en la observación».

Con absoluta independencia del planteamiento de Born, Margenau utiliza un criterio para distinguir entre «observables poseídos como propiedades» por el sistema y «observables latentes» que no es otro que el de «invariabilidad». Desde luego la combinación de observables latentes produciría un estado sumamente abstracto, que no permitiría su visualización, pero la cuestión es qué tipo de realidad puede corresponder a estos sistemas definidos mediante observables latentes. No hay que olvidar que aquéllos para los cuales rige el principio de indeterminación y, en último término el cuanto de acción, son los que quedarían así definidos. Por tanto, nos estamos interrogando por la realidad de los objetos cuánticos.

De las consideraciones hasta aquí hechas se desprende que para Born en general el criterio de realidad viene dado por el de invariante observacional, el cual vale tanto para los objetos científicos como para los ordinarios. Ahora bien, el problema de fondo reside en el hecho de que no rige de igual manera en ambos casos.

El mundo que describe la física clásica tiene las características de un sistema clásico; esto quiere decir que el conjunto de observables que definen el estado del sistema es del tipo de lo que Margenau ha definido como «observables poseídos como propiedades por el sistema». Ello posibilita, en definitiva, que nos movamos dentro del esquema aristotélico de sustancia-accidente, con todas las implicaciones realistas que ello tiene. En este caso la condición de invariabilidad se aplica a las propiedades de los objetos mismos, mientras que las que varían con los sujetos pasan a no tener más realidad que la que tienen en la percepción; todas las propiedades objetivas son invariantes.

En cambio cuando nos introducimos en el micromundo encontramos que las magnitudes necesarias para describir el estado del sistema no son invariantes; muy al contrario su valor depende del contexto experimental. Ello no autoriza a reducirlas al ámbito del sujeto, como si de cualidades secundarias se tratara, pero tampoco a considerarlas como propiedades

poseídas por el objeto al margen de dicho sujeto. El criterio de realidad de Born se ha de utilizar ahora selectivamente, pues a unas magnitudes se le aplica y otras no, lo que en un primer momento parecería llevarnos a la conclusión de que sólo las primeras son objetivamente reales. Sucede, no obstante, que las que varían son las que están en relación de complementariedad y sometidas al principio de indeterminación, siendo necesarias para dar cuenta del estado de los sistemas cuánticos. Por otro lado este criterio juega de manera distinta cuando se trata de dirimir, no ya la naturaleza de magnitudes variantes e invariantes, sino la realidad de ondas y partículas. De la posición que se adopte al respecto dependerá una posible superación de la paradoja a que conduce esta dualidad.

### *5. La realidad objetiva de ondas y partículas*

Ante el problema de la realidad de los entes cuánticos, el primer peligro a conjurar ha sido el de la interpretación unívoca de los términos con los que hasta ahora se habían descrito los sistemas físicos. Si se pretende emplearlos con el mismo sentido tanto para individuos del mesocosmos como del microcosmos, fácilmente se concluirá que sólo los objetos de percepción directa son reales, al no compartir unos las características de los otros. Tenía razón Nagel al afirmar que Bohr y la Escuela de Copenhague se apartaron de una interpretación uniformemente completa de los postulados de la teoría cuántica: los términos no lógicos han de recibir interpretaciones diferentes.

Born se refirió a esto mismo mediante lo que él denominó la «ampliación de los conceptos» [«Begriffserweiterung»]. Su significación va variando, lo cual es cierto para los conceptos de la vida diaria, para el concepto de número (desde el número natural al número complejo) y también para los conceptos físicos clásicos (concepto de ultrasonido que no oímos o de luz ultravioleta o infrarroja que no vemos). Pues bien, es de esta libertad de la que hacemos uso cuando nos enfrentamos a las representaciones del mundo atómico. Concretamente en el caso del electrón seguimos considerándolo una partícula pese a que no posea en todo tiempo posición definida y cantidad de movimiento definida; no cabe duda de que el concepto de partícula ha sufrido una «ampliación».

Posición y cantidad de movimiento se han convertido en observables latentes y, por tanto, estrictamente hablando han perdido su condición de invariantes. Ahora bien, si el criterio de realidad que Born aplica es el de invariancia, ni una ni otro son reales. Cabe la duda si lo será el propio electrón.

«Mantengo que las partículas son reales porque representan invariantes de observación. Creemos en la «existencia» del electrón porque tiene

una carga definida  $e$ , una masa definida  $m$  y un spin definido  $s$ . Esto quiere decir que en toda circunstancia o condición experimental en la que observemos un efecto que la teoría adscribe a la presencia de los electrones, encontraremos para esas magnitudes el mismo valor numérico. (...) [En cambio] posición y velocidad no son invariantes de observación. Pero son atributos de la idea de partícula y debemos usarlos desde el momento en que hemos dispuesto nuestra mente para describir ciertos fenómenos en términos de partículas. Bohr ha subrayado el hecho de que nuestro lenguaje está adaptado a nuestros conceptos intuitivos. No podemos dejar de usarlos pese a que no tengan todas las propiedades de la experiencia ordinaria. Aun cuando un electrón no se comporte como un grano de arena en todos los aspectos, tiene suficientes propiedades invariantes como para ser considerado real»<sup>45</sup>.

Es éste un texto importante en el que Born afirma con toda rotundidad que las partículas son reales porque tienen ciertas propiedades invariantes, aquellas no sujetas a las relaciones de incertidumbre. Con respecto a las magnitudes conjugadas el cuanto de acción representa un límite absoluto a la posibilidad de medida simultánea con igual grado de precisión. Se trata de magnitudes complementarias, dependientes del contexto experimental y que, en consecuencia, no pueden ser consideradas invariantes. Pero no todas las propiedades sufren este proceso de transformación al variar de sistema de referencia; la masa, la carga y el spin no varían y, en consecuencia, puede afirmarse tanto su realidad como la del objeto del que son propiedades.

Magnitudes clásicamente invariantes ahora han dejado de serlo debido a la incontrolable e ineliminable interacción con los aparatos de medida. Ello obliga a modificar a su vez la acepción clásica del término partícula, puesto que ésta ha perdido ciertos invariantes fundamentales, pero todavía conserva las bastantes como para poder seguir adscribiéndole realidad física.

«Es verdad —insiste Born— que los objetos atómicos no tienen todas las propiedades de los objetos ordinarios, pero tienen suficientes propiedades definidas como para atribuirles realidad física del mismo tipo que a un perro. Pienso que el hecho de que observaciones diversas de los electrones den siempre la misma carga, la misma masa en reposo y el mismo spin, justifica totalmente que se hable de ellos como partículas reales»<sup>46</sup>.

<sup>45</sup> M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, pp. 104-105.

<sup>46</sup> M. Born: «Physics and Metaphysics», p. 16.

La invariancia como criterio de realidad en el fondo se convierte en un principio de objetivación que nos permite pasar de lo subjetivo individual a lo que es común o todos los sujetos. Agazzi<sup>47</sup> planteaba que el concepto de objetividad podía entenderse en el sentido de indicar prioritariamente referencia al objeto, condición inherente a éste, y sólo como corolario la independencia del sujeto, o bien aludir a dicha independencia como única pauta a tener en cuenta, sin pretender reflejar propiedades de los objetos mismos. Diríamos que en este segundo caso la objetividad se identifica con la intersubjetividad. Denominaré al primero de estos significados objetividad material y al segundo objetividad formal.

Lo que a continuación cabe plantear es si la invariancia es un principio de objetividad material o formal. En todo caso se trata de un proceso de liberación del yo, de sus sensaciones y percepciones subjetivas absolutamente válidas para quien las experimenta, pero sin que tal validez pueda ser extrapolable a otros sujetos. Buscamos una validez universal y ello pasa, como condición necesaria, por el abandono de cuanto pueda referirse a un solo yo. Se trata de establecer lo que es común, lo que no cambia, lo invariante.

Así dicho esto es tan antiguo como la filosofía presocrática. Pero la ciencia del siglo XX nos ha traído una novedad. La física clásica investigaba las propiedades objetivas de los sistemas al margen de los sujetos y sus procesos de observación y medida (objetividad material). Sin embargo la teoría de la relatividad ha planteado la necesidad de relativizar ciertos conceptos a fin justamente de garantizar su carácter objetivo. Espacio y tiempo han perdido la vinculación con el mundo de las sensaciones que aún tenían en Newton, al pasar a hacerse dependientes de los sistemas de referencia desde los cuales se miden. El carácter objetivo de las afirmaciones sobre espacio y tiempo no reside en su invariancia al margen de los procesos de medida, sino en la validez de tales afirmaciones para observadores ligados a sistemas de referencia distintos (haciendo uso de ecuaciones de transformación).

Podemos decir que la mecánica clásica hacía uso de un significado material de objetividad, mientras que la mecánica relativista pone en juego un significado formal. O dicho en otros términos, el espacio y tiempo newtonianos son invariantes absolutos, mientras que en Einstein cabe decir que son invariantes sólo con respecto a las percepciones de los sujetos, y en ese sentido independientes de ellos, pero no en relación a los sistemas de referencia. Sin entrar en las disputas acerca del carácter fenomenista o no del planteamiento de Einstein en esta época, lo que es claro es que espacio y tiempo no se convierten en cualidades secundarias, subje-

---

<sup>47</sup> Ver nota 38.

tivas y cambiantes. Nuestro conocimiento de ellos es objetivo, pero no tiene sentido pretender acceder a sus propiedades inherentes.

Pues bien, si vamos algo más allá de lo que va Born, es posible encontrar la aplicación de todo esto a la teoría cuántica. Los objetos tienen algunas propiedades invariantes (masa, carga, spin), que permiten asegurar su realidad; en este caso se trata de un principio de objetividad material. En cambio la posición o la cantidad de movimiento no mantienen ese tipo de invariancia, puesto que su valor está en función del contexto experimental, pero ello no los hace dependientes de la subjetividad. Se ha hablado mucho de la peculiar interacción sujeto-objeto en la nueva física, sin embargo esto no debe entenderse al modo de Popper y otros detractores de la Escuela de Copenhague, es decir, como si se estuviera desandando el camino recorrido en pos de la liberación del *ego* subjetivo. No son los sujetos y sus procesos psíquicos los que impiden el carácter invariante de las magnitudes conjugadas, sino situaciones experimentales intrínsecamente excluyentes, y esto con validez universal, es decir, para todo sujeto. Cabe hablar pues de objetividad formal con respecto a estas magnitudes, en virtud de la cual sería pertinente decir que son reales.

Así, parece inadecuado no incluir a las magnitudes sometidas a las relaciones de incertidumbre en el ámbito de lo objetivamente real. Es la concordancia con leyes generales lo que permite afirmar la realidad de algo, y no su carácter sustancial, continuo y permanente en el tiempo. Pero las relaciones de Heisenberg constituyen una de estas leyes. Luego, el hecho de que ciertas magnitudes se hallen sometidas a las limitaciones en la medida que impone el principio de indeterminación, por un lado las priva del carácter de invariantes y las convierte en observables latentes que sólo se manifiestan en un contexto observacional dado, pero por otro garantiza su realidad objetiva precisamente por estar regidas por una ley general de obligado cumplimiento en toda situación experimental. Es ésta una lección que en todo caso no es nueva para los lectores de la obra de Kant.

En definitiva, aplicando el criterio de realidad de M. Born hay que decir que las partículas y los observables que las definen son reales, y esto tanto con respecto a aquéllos que son poseídos por el sistema, como en relación a aquéllos otros meramente latentes que para hacerse manifiestos precisan de unas condiciones empíricas diseñadas por el sujeto que hace ciencia. No es necesario abandonar el «espíritu de Copenhague» para no caer en el más pernicioso de los subjetivismos.

Queda, por último, abordar la cuestión refiriéndola esta vez a las ondas. La verdad es que, dado el modo como Born las considera en el marco de la interpretación probabilística, su realidad es mucho más evanescente. Incluso no es infrecuente leer que para este físico únicamente las partículas son reales. No obstante, no parece que fuera éste su definitivo

punto de vista.

«Tras haber atribuído una realidad definida a las partículas, ¿qué decir de las ondas? ¿son también reales y en qué sentido?»<sup>48</sup>.

Born ha redefinido las ondas clásicas en términos de ondas de probabilidad, concretamente la probabilidad de encontrar partículas en un volumen dado o en un estado dado. Ello trae consigo algo de la mayor importancia: el comportamiento ondulatorio de los sistemas se relaciona con nuestro conocimiento del estado de dichos sistemas. Pero puesto que este conocimiento se refiere a magnitudes regidas por el principio de indeterminación, se comprende que Born hable de «ondas de conocimiento parcial»<sup>49</sup>.

Las ondas de probabilidad determinan la distribución de las partículas en el espacio y en el tiempo con arreglo a la ecuación de Schrödinger. La probabilidad es algo que se propaga en el espacio y evoluciona en el tiempo como si de una onda física se tratara, si bien no transmite energía. Lo que se difunde es información, y ésta remite al sujeto que crea las condiciones experimentales para poderla obtener. En ese sentido diríamos que «lo ondulatorio» no puede ser afirmado al margen de los sujetos y sus operaciones de observación y medida. Ahora bien ¿la propagación de conocimiento con características ondulatorias puede tener realidad objetiva? Para responder a este interrogante consideremos la aplicabilidad a este contexto del criterio de realidad de Born, el de invariancia. ¿Son las ondas invariantes de observación?

«La cuestión de si las ondas son algo «real» o una ficción para describir y predecir fenómenos de modo adecuado es una cuestión de opinión. Personalmente me inclino por considerar una onda de probabilidad, incluso en un espacio de 3N-dimensiones, como algo real y ciertamente como algo más que un mero instrumento de cálculo. La razón es que posee el carácter de invariante de observación; esto significa que predice los resultados de los experimentos y que esperamos encontrar los mismos valores medios si de hecho realizamos el experimento muchas veces en las mismas condiciones»<sup>50</sup>.

Las ondas de probabilidad son invariantes y, en consecuencia, reales. Pero el criterio de invariancia del que aquí hace uso Born no es el mismo que el que aplica a la masa, la carga y el spin de las partículas. Allí se trataba de propiedades poseídas por los sistemas con valor asignable en todo tiempo al margen del contexto experimental. Precisamente la depen-

<sup>48</sup> M. Born: «Physics and Metaphysics», p. 17.

<sup>49</sup> M. Born: *The Restless Universe*, London 1936. Reprint: New York, Dover 1951, p. 139.

<sup>50</sup> M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, pp. 105-106.

dencia de dicho contexto experimental es lo que había llevado a negar esta condición de invariantes a las magnitudes sometidas a las relaciones de incertidumbre (posición, cantidad de movimiento, etc). Sin embargo ahora se establece que la reiterada repetición de un experimento nos permite fijar la probabilidad de un resultado y, en consecuencia, su carácter invariante dentro de unas mismas condiciones experimentales. En el caso de las ondas el criterio de realidad objetiva se aplica a la probabilidad, y no a los objetos cuánticos y sus propiedades.

Como vemos, el desarrollo de este tema conduce a una cuestión que Born defendió con ardor y que para tratar adecuadamente sería necesario escribir otro artículo. Me refiero al carácter objetivo que, en contra de Einstein, concedió a la probabilidad y su pronunciamiento en favor de una concepción del mundo cuántico definitiva y no provisionalmente indeterminista. El cuadrado de la amplitud de onda no expresa el estado físico de un sistema sino sólo la probabilidad de hallar a éste en un cierto estado; y hay que asumir que este planteamiento probabilístico es irreductible.

La cuestión del estatuto ontológico de las ondas remite, por tanto, a la del estatuto de la probabilidad. Born ha afirmado en el texto anteriormente citado que no nos hallamos ante un mero instrumento de cálculo sino ante algo con realidad objetiva. Difícilmente podría aplicarse aquí un significado material de objetividad, puesto que no hablamos de ninguna característica o condición inherente al objeto mismo; lo que es invariante no es una propiedad de dicho objeto, sino el resultado estadístico de un experimento realizado múltiples veces.

Desde luego el resultado es consecuencia del propio dispositivo experimental, y no de lo que el objeto en sí mismo es o hace, pero resulta por entero ajeno a los sujetos observadores individualmente considerados. Cabe pues hablar de una objetividad formal con respecto a la probabilidad precisamente porque, al ser relativa al sistema de observación, es absoluta en relación a los sujetos observadores. Su validez intersubjetiva le asegura una forma de realidad, pero no igual a la de las partículas.

«A fin de describir una situación física —dice Born— es necesario servirse tanto de ondas, que describen un «estado», esto es, toda la situación experimental, como de partículas, que son los objetos propios de la investigación atómica. Aunque las funciones de onda representan, a través de sus cuadrados, probabilidades, tienen un carácter de realidad. La probabilidad tiene un cierto tipo de realidad que no puede ser negada»<sup>51</sup>.

---

<sup>51</sup> M. Born: «Physics and Metaphysics», p. 17.

Las ondas representan estados, las partículas objetos. Ahora bien, la descripción de estados incluye los aparatos y las propias operaciones de observación y medida que han de llevar a cabo los sujetos investigadores. De ahí que Born afirme que «las ondas, aparte de su realidad objetiva, tienen que tener algo que ver con el acto subjetivo de observación. (...) La onda es precisamente la parte de descripción del fenómeno que depende de la intervención de un observador»<sup>52</sup>.

Es en la interpretación del comportamiento ondulatorio de la materia donde más claramente se pone de relieve la proximidad entre las ideas filosóficas de Born y Bohr. En los escritos de éste último se insiste en que el concepto de «fenómeno» no se refiere sólo a los efectos observados sino también a las condiciones de la observación, incluyendo todo el dispositivo experimental. Pero esas condiciones son puestas por los sujetos que diseñan los aparatos, de modo que no puede obviarse, muy a pesar de Einstein, la mediación de éstos. Las ondas de probabilidad son la expresión de esa imprescindible y objetiva intervención de los sujetos en la descripción, o mejor, en la constitución de los objetos.

Carece de sentido hablar de un mundo que existe por sí mismo, o incluso de un mundo en tanto que es percibido según predicaba Berkeley, pues en ambos casos se parte de algo dado ante un espectador pasivo. Las cosas son construídas con validez intersubjetiva por ese espectador-actor que es todo ser racional. Ello nos aparta de una forma clásica de realismo, tan cara a todos los críticos de las ideas de Copenhague-Göttingen, pero permite interpretar de forma bella y coherente los paradójicos y sorprendentes efectos cuánticos.

Se ha afirmado la realidad objetiva de partículas y ondas, si bien de modo muy distinto a como podía hacerlo un físico del siglo XIX cuando se servía de estos conceptos para explicar la naturaleza de materia y radiación respectivamente. El surgimiento de la dualidad onda-corpúsculo, esto es, la necesidad de utilizar ambos modelos para dar razón tanto del comportamiento de la materia como del de la luz, puso en un principio a los físicos al borde del abismo, por cuanto parecía instalar la contradicción en el seno mismo de la realidad física. Filosóficamente la aportación de Born supone su compatibilización gracias al concepto de probabilidad. Así no se trata de que los electrones, por ejemplo, aparezcan unas veces como ondas y otras como partículas, lo cual no significa nada comprensible; más bien resulta que en el marco de la interpretación probabilística es necesario hacer uso simultáneamente de estos dos modelos conceptuales para describir los sistemas cuánticos y sus estados.

Empleamos el concepto de partícula para referirnos a objetos a través

---

<sup>52</sup> M. Born: *The Restless Universe*, pp. 157, 159.

de observables, unos poseídos por el sistema y otros latentes. Al mismo tiempo precisamos del concepto de onda para determinar la probabilidad de que un observable tenga uno de los valores posibles en caso de que una medida se lleve a cabo. No hay relación de exclusión entre el aspecto corpuscular y ondulatorio de los fenómenos y, por tanto, no son complementarios en el sentido de Bohr. A diferencia de lo que sucede con las magnitudes conjugadas, esta dualidad no integra elementos incompatibles. La superación de la paradoja es posible, pero ha exigido una profunda modificación de los compromisos ontológicos clásicos.

\* \* \*

Ana Rioja  
Departamento de Filosofía I  
Facultad de Filosofía  
Universidad Complutense  
28040 Madrid