



Enric Pérez Canals

enperez@ub.edu

<https://orcid.org/0000-0003-0303-4401>

Departament de Física de la Matèria
Condensada, Universitat de Barcelona,
Espanya.

Blai Pié i Valls

mblai.pie.valls@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9388-8472>

Departament de Física de la Matèria
Condensada, Universitat de Barcelona,
Espanya.

Artículo recibido: 09 de mayo de 2023

Artículo aceptado: 19 de junio de 2023

Artículo publicado: 31 de julio de 2023



[CC BY, Enric Pérez Canals, Blai Pié i Valls,
2023]

Artículo de Investigación

<https://doi.org/10.35588/cc.v4i1.6127>

La Posición de las Partículas Atómicas en los Artículos Fundacionales de la Mecánica Cuántica, 1925-1927

The position of atomic particles in the foundational papers of quantum mechanics, 1925-1927

Resumen

Ofrecemos un estudio introductorio del papel que tuvo el concepto de partícula en los artículos fundacionales de la mecánica cuántica. Nos centramos en el período 1925-1927, lo que incluye el análisis de los primeros trabajos de Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger y Dirac, y también las primeras formulaciones de la complementariedad de Bohr. Nuestro objetivo es discutir hasta qué punto se puso en duda el concepto de partícula a nivel atómico entre los creadores de la nueva teoría, justo en el momento de su creación y cuando aún no existía una interpretación consensuada ni establecida. Posteriores desarrollos, como la teoría cuántica de campos, pusieron la vigencia de ese concepto bajo sospecha. Mostramos que un análisis historiográfico articulado mediante este concepto permite caracterizar la relación que los distintos autores de la mecánica cuántica mantuvieron con la visualización de los procesos atómicos. En algunos casos, como el de Heisenberg, su evolución es especialmente significativa. Asimismo, también citaremos algunos fragmentos donde los autores considerados reclaman para sí el legado de la antigua teoría cuántica, tratando de legitimar sus propios desarrollos a partir de su coherencia con los primeros descubrimientos de los Planck, Einstein o De Broglie. De prácticamente todos ellos hemos encontrado textos en este sentido.

Palabras clave: electrón, dualidad onda-corpúsculo, atomismo, Heisenberg, Schrödinger.

Abstract

We present an introductory study of the role of the particle concept in the foundational papers of quantum mechanics. We focus on the period, 1925-1927, which includes the analysis of the first papers by Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger and Dirac, and also the first formulation of Bohr's complementarity. Our aim is to discuss to what extent the concept of particle at the atomic level was questioned among the creators of the new theory, just at the time of its creation and when there was still no agreed or established interpretation. Subsequent developments, such as quantum field theory, put the validity of this concept under suspicion. We show that a historiographical analysis articulated by means of this concept makes it possible to characterize the relationship that the different authors of quantum mechanics maintained with the visualization of atomic processes. In some cases, such as that of Heisenberg, their evolution is particularly significant. Likewise, we will also quote some fragments where the authors considered claim for themselves the legacy of the old quantum theory, trying to legitimize their own developments on the basis of their coherence with the first discoveries of Planck, Einstein or De Broglie. From practically all of them we have found texts in this sense.

Keywords: electron, wave-corpucle duality, atomism, Heisenberg, Schrödinger.

1. Introducción

La historia de la física cuántica y, más en particular, el nacimiento de la mecánica cuántica, han sido estudiados desde muchas perspectivas (Jammer, 1966; Forman, 1971; Sánchez Ron, 2001; Seth, 2010; Duncan y Janssen, 2019). Hay cierto acuerdo en que las bases de la interpretación ortodoxa de la teoría, conocida también como *interpretación de Copenhagen*, se establecieron con relativa rapidez, quedando más o menos diseñadas sus líneas maestras en el quinto congreso Solvay, celebrado en Bruselas en otoño de 1927 (Jammer, 1974; Bacciagaluppi y Valentini, 2009; Beller, 1999). Ciertamente, hubo episodios posteriores con implicaciones nada desdeñables, como el desarrollo de la física nuclear, la aparición del libro fundamental de von Neumann en 1932, o la polémica suscitada en 1935 por el artículo de EPR (Einstein-Podolski-Rosen), pero los rasgos distintivos de la ortodoxia quedaron formulados a finales de 1927.

En este artículo queremos poner el foco en el papel que tuvo el concepto de partícula a nivel atómico. ¿Cómo fue tratado por los diferentes participantes en la construcción de la teoría? ¿Se cuestionó su vigencia en los artículos que pusieron las bases de la nueva mecánica? ¿O las dudas llegaron después? Con *partícula* nos referimos a *partícula atómica*, a la sazón electrones y protones. Como es lógico, tras el establecimiento del atomismo en los primeros años del siglo XX (Chalmers, 2009; Smith y Seth, 2020), los primeros modelos del átomo que se construyeron eran sistemas mecánicos que contenían esas partículas *elementales* (los nuevos átomos, pues eran indivisibles). Aquí hemos acudido a los artículos originales con los que se fue construyendo el corpus fundacional de la nueva mecánica cuántica, centrándonos en esos años 1925-1927, sin asomarnos en esta entrega a los cambios que se produjeron en los años posteriores. Aunque algunos de esos cambios dieron en desarrollos como la teoría cuántica de campos, que cuestiona directamente la viabilidad del concepto tradicional de partícula (Davies, 1984; Hobson, 2013), mostraremos que ya en la mecánica cuántica original éste se problematizó. Veremos que las discusiones sobre la *visuabilidad* de los modelos, sobre la posibilidad de elaborar imágenes de los procesos atómicos, en esos años tan fecundos como controvertidos se pueden ir caracterizando a la luz de las vicisitudes que iba sufriendo el concepto de partícula.¹ De hecho, ya en la teoría cuántica antigua (1900-1925) habían asomado vislumbres de la necesidad de redefinir los límites de los conceptos de partícula y onda (Wheaton, 1991), y argumentaremos que precisamente por eso los distintos autores que contribuyeron a construir la nueva mecánica reclamaron para sí el papel de continuadores de los pioneros que habían hollado por primera vez el territorio cuántico.

En definitiva, presentamos el resultado de un caso de estudio con el que queremos contribuir desde un punto de vista historiográfico a desbrozar el terreno para debatir dónde ha quedado la identidad de las partículas atómicas y apreciar hasta qué punto los físicos que erigieron la nueva mecánica estaban dispuestos a renunciar a la visuabilidad de los procesos atómicos. Los debates que vamos a tratar pertenecen a la década de 1920. De forma que el establecimiento del atomismo fue una victoria, en cierto sentido, pírrica, pues poco después que surgieran pruebas alrededor de la década de 1910, la misma idea de partícula elemental se vio fuertemente cuestionada.

¹ Con el término *visuabilidad* nos queremos referir a la propiedad de una teoría de proporcionar imágenes de los procesos descritos, propiedad que se discutió y se sigue discutiendo en relación a la mecánica cuántica y la física moderna en general. La palabra alemana original es *Anschaulichkeit*, y no creemos que exista una traducción justa al español. Alternaremos *visuabilidad* o *visualización*, confiando en que el propio contexto de la explicación deje claro su significado. Agradecemos al editor el hacernos caer en la cuenta de esta ambigüedad.

Como es sabido, Werner Heisenberg fue el primero en articular con éxito una propuesta rompedora que pusiera las nuevas bases de una nueva teoría (Heisenberg, 1925). En el mismo año 1925, un artículo de Max Born y Pascual Jordan, ambos en Göttingen, identificaban el aparato matemático subyacente a la idea de Heisenberg: la teoría de matrices; finalmente, en otra publicación firmada por los tres autores, la nueva teoría ya podía considerarse formulada (Born y Jordan, 1925; Born, Heisenberg y Jordan, 1925). Aún hay que añadir otro trabajo a esta serie, en el que Wolfgang Pauli calculó los términos de la serie de Balmer del hidrógeno con las nuevas herramientas (Pauli, 1927). En noviembre, Paul Dirac, enterado del trabajo de Heisenberg, terminó en Cambridge su primer artículo, y un par de meses después también indicó cómo acometer el tratamiento del hidrógeno (Dirac, 1925; Dirac, 1926a). La tercera y última propuesta vino de Zürich, donde en esos momentos vivía y trabajaba Erwin Schrödinger. Su primer artículo se publicó en febrero de 1926 (Schrödinger, 1926b). La posteriormente bautizada interpretación de Copenhague se nutrió de estas contribuciones, y por ello nos centraremos en estos autores, dejando de lado otros igualmente relevantes en ese contexto histórico, como Louis De Broglie, cuya propuesta no acabó formando parte de la ortodoxia.² Por motivos opuestos, sí dedicaremos un último apartado a Niels Bohr.

En el apartado 2 consideraremos los artículos seminales de Heisenberg, Born, Jordan y Schrödinger. En el apartado 3 analizaremos la siguiente etapa, marcada en gran medida por la reacción de los físicos de Göttingen a las contribuciones de Schrödinger. Dedicamos la sección 3.1 a Born y su interpretación estadística, la 3.2 a la evolución del pensamiento de Heisenberg, la 3.3 a las aportaciones de Dirac y la 3.4 a las de Jordan. Antes de pasar a los comentarios finales, dedicamos aún un apartado a Bohr, centrándonos en su presentación del principio de complementariedad en el quinto congreso Solvay.

2. Entre la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria

El análisis seminal de Heisenberg no pudo ser más claro respecto al nuevo estatuto de las partículas: cualquier intento de imaginar el interior del átomo, de pensarlo en términos de electrones orbitando alrededor del núcleo, quedaba desterrado de entrada.³

Es bien sabido que las reglas formales que se utilizan en la teoría cuántica para calcular cantidades observables, como la energía del átomo de hidrógeno, pueden ser criticadas seriamente porque contienen, como elemento básico, relaciones entre cantidades que en principio son aparentemente inobservables, por ejemplo, la posición y el período de revolución del electrón. Por lo tanto, estas reglas carecen de un fundamento físico evidente, a menos que uno quiera conservar la esperanza de que las cantidades hasta ahora inobservables puedan entrar más tarde en el reino de la determinación experimental. Esta esperanza podría considerarse justificada si las reglas antes mencionadas fueran internamente consistentes y aplicables a un rango claramente definido de problemas de mecánica cuántica. Sin embargo, la experiencia muestra que solo el átomo de hidrógeno y su efecto Stark son susceptibles de ser tratados por estas reglas formales de la teoría cuántica. (Van der Waerden, 1967, p.261)

² Sobre la teoría de De Broglie véase (Bacciagaluppi y Valentini, 2009).

³ Cuando esté disponible —como en este caso— daremos la referencia de la traducción inglesa de los artículos originalmente escritos en alemán. En la totalidad de las citas la traducción es nuestra y los énfasis aparecen en los originales.

Heisenberg certifica el fracaso de las teorías ordinarias para dar cuenta de los espectros, lo que en su opinión debe llevarse por delante la utilización de magnitudes y objetos físicos no observables. Notemos, sin embargo, que al mismo tiempo da por descontado que hay átomos y electrones, aunque a estos últimos los prive explícitamente de localización y período de revolución. Semejante planteamiento es también el que encontramos en los artículos subsiguientes con que quedó inicialmente montada la estructura de la mecánica matricial en Göttingen.⁴ Y del mismo tono son las posteriores contribuciones de Dirac. Su posicionamiento respecto a la cuestión que aquí nos ocupa es muy similar, al menos inicialmente, al de los creadores de la mecánica matricial: la vigencia de la idea de partícula ni es un tema apremiante ni está expresamente problematizada, a pesar de que las partículas no son directamente observables.

La irrupción en escena de Schrödinger abrió para muchos físicos un resquicio de esperanza, una posibilidad de reencontrarse con los conceptos y explicaciones tradicionales, pero introduciendo una constitución ondulatoria de la materia. Y es que, como indica su nombre, la mecánica ondulatoria alentaba una interpretación de tipo continuista, tanto en lo que se refiere a la negación de la constitución discreta de la materia, como a su afinidad con la mecánica y electrodinámica vigentes hasta entonces.

De los padres fundadores de la nueva mecánica, Schrödinger era, sin duda, el más versado en física estadística. De hecho, en diciembre de 1925, y después de cartearse con Einstein al respecto, había publicado un interesante y original trabajo en el que presentaba un tratamiento ondulatorio completo de un gas ideal (Schrödinger, 1926a). Esto es, agotó, en términos pre-mecánico cuánticos, la analogía entre materia y radiación a la que Einstein andaba dándole vueltas desde hacía más de una década (Navarro, 2020). Así, ya antes de dar con su propuesta de solución del espectro del hidrógeno, Schrödinger era plenamente consciente de que, a cierto nivel, las novedades cuánticas conducían a una difuminación de la frontera que separaba fenómenos ondulatorios y corpusculares. Pero ni el primer artículo dedicado a la mecánica ondulatoria, ni los tres posteriores de la serie, estaban dedicados a los problemas estadísticos a que nos acabamos de referir, sino a la forma del espectro del hidrógeno y la estructura atómica en general.

El protagonista principal de su presentación es la función de onda, solución de la ecuación que hoy lleva el nombre de su creador. Fue en la segunda entrega donde Schrödinger planteó la analogía con la que pretendía fundamentar su programa (Schrödinger, 1926c). Su mecánica era a la mecánica ordinaria lo que la óptica ondulatoria a la óptica geométrica:

El estudio del movimiento de los puntos imagen, que es el objeto de la mecánica clásica, es sólo un tratamiento aproximado y tiene, como tal, tanta justificación como la óptica geométrica o de “rayos” en comparación con el verdadero proceso óptico. Un proceso mecánico macroscópico se representará como una señal ondulatoria del tipo descrito anteriormente, que puede considerarse confinada en un punto de manera aproximada, en comparación con la estructura geométrica de la trayectoria. (Schrödinger, 1982, p.25)

De manera que Schrödinger propone entender las representaciones corpusculares como aproximaciones macroscópicas. Un poco más adelante es más explícito, si cabe:

⁴ Mecánica matricial es el nombre con el que se designó la versión de la nueva mecánica propuesta por Heisenberg, pues Born y Jordan descubrieron que el álgebra subyacente no era otra que el álgebra de matrices.

En *este* sentido interpreto las “ondas de fase” que, según de Broglie, acompañan el camino del electrón; en el sentido, por lo tanto, de que no debe atribuirse ningún significado especial al propio camino electrónico (en todo caso, en el interior del átomo), y menos aún a la posición del electrón en su camino. (Schrödinger, 1982, p.26)

Una renuncia expresa a la trayectoria y posición del electrón, pero que nada tiene que ver con la promulgada por Heisenberg. Para Schrödinger, el electrón tiene una naturaleza intrínsecamente ondulatoria; para Heisenberg, no siendo observable, debe caer de la descripción física. Además, Schrödinger cree que es precisamente por ese apego a lo corpuscular por lo que otros autores han decidido abandonar las explicaciones causales, o espacio-temporales:

Todas estas afirmaciones contribuyen sistemáticamente a renunciar a las ideas de “lugar del electrón” y “camino del electrón”. Si no se abandonan, las contradicciones persisten. Esta contradicción se ha sentido tan fuertemente que incluso se ha llegado a dudar de que lo que ocurre en el átomo pueda llegar a describirse dentro del esquema de espacio y tiempo. Desde un punto de vista filosófico, consideraría que una decisión concluyente en este sentido equivale a una rendición completa. Pues en realidad no podemos alterar nuestra manera de pensar el espacio y el tiempo, y lo que no podemos comprender dentro de ellos no podemos comprenderlo en absoluto. *Hay* tales cosas, pero no creo que la estructura atómica sea una de ellas. (Schrödinger, 1982, pp.26-27)

Se entiende perfectamente el efecto balsámico que tuvieron las contribuciones de Schrödinger para muchos colegas. Ese efecto fue, como veremos, efímero. Es interesante apreciar cómo en el artículo que Schrödinger dedicó a la equivalencia entre las distintas formulaciones de la nueva mecánica (Schrödinger, 1926d) se reivindica como heredero de la antigua teoría cuántica:

Mi teoría se inspiró en L. de Broglie (...) y en las breves pero infinitamente clarividentes observaciones de A. Einstein (...). Al principio no sospechaba en absoluto relación alguna con la teoría de Heisenberg. Naturalmente conocía esta teoría, pero me desanimaba, si no me repelía, lo que me parecían métodos de álgebra trascendental muy complicados, y la falta de perspicuidad (...) (Schrödinger, 1982, p.46)

Pero había procesos en los que parecía imposible negar el carácter corpuscular de la materia, como por ejemplo los procesos de colisión. Schrödinger recurrió a los paquetes de onda: superposiciones de ondas de diferentes frecuencias que permitían localizar el objeto estudiado, asemejando así las partículas a singularidades en un sustrato ondulatorio. Planteó y detalló su propuesta con el oscilador armónico, prácticamente el único sistema que no presenta problemas en este sentido. Y es que en los meses posteriores, cuando la oposición entre los partidarios de las distintas interpretaciones se encontró, se puso repetidamente de manifiesto que en la mayoría de los casos los paquetes de onda de Schrödinger se disgregaban con el tiempo, cosa que, por definición, no les ocurre a las partículas elementales como el electrón. De hecho, el propio Schrödinger fue consciente, ya en 1926, de ese y otros problemas relacionados con el concepto de partícula en su formulación (Bacciagaluppi y Valentini, 2009, p.116).

En relación a la interpretación de la función de onda, artefacto matemático que poco a poco iba copando el centro de la escena, en estos primeros artículos Schrödinger se decantó finalmente por interpretar su cuadrado como una función peso de los electrones del átomo, como una densidad de carga, rehuendo una interpretación probabilística. Esto leemos en su cuarta y última entrega (Schrödinger, 1926e), enviada en junio:

$\Psi\bar{\Psi}$ es una especie de *función de peso* en el espacio de configuración del sistema. La configuración mecánico-ondulatoria del sistema es una *superposición* de muchas, en sentido estricto de *todas*, las configuraciones mecánicas-puntuales cinemáticamente posibles. Así, cada configuración mecánica-puntual contribuye a la verdadera configuración mecánico-ondulatoria con un cierto *peso*, que viene dado precisamente por $\Psi\bar{\Psi}$. Si nos gustan las paradojas, podemos decir que el sistema existe simultáneamente, por así decirlo, en todas las posiciones cinemáticamente imaginables, pero no “con la misma intensidad” en todas. (Schrödinger, 1982, p.120)

En la ironía de esta última frase detectamos nuevamente su distanciamiento de las supuestas paradojas a que arrojaban los descubrimientos de la mecánica matricial. Como hemos señalado, Schrödinger sostenía que eran producto de aferrarse a las imágenes corpusculares.

3. Después de Schrödinger

La cercanía de los métodos de Schrödinger a los métodos tradicionales y el concomitante éxito de su formulación entre sus colegas vinieron acompañados de cambios importantes en las interpretaciones de Heisenberg y los físicos de Göttingen (Beller, 1999). Schrödinger, por su parte, no cejó en su empeño de reducir la discretización a la mínima expresión, preocupándose de indicar cómo dar cuenta de experimentos a la sazón muy conocidos y típicamente corpusculares, como el de Franck-Hertz o el efecto Compton (Schrödinger, 1927a; 1927b).

3.1 La probabilidad de Born

Si alguno de los autores de la mecánica matricial reaccionó rápidamente a la aparición de los trabajos de Schrödinger, ese fue Born. Se dio cuenta de que la formulación del vienés se adaptaba mucho mejor que la matricial al tratamiento de problemas de naturaleza no periódica, y dejó atrás buena parte de los resquemores positivistas a cambio de matizar o modificar profundamente la vigencia de la causalidad en los procesos elementales (Born, 1926a).⁵ Born afirma que fue Bohr quién propuso estudiar los procesos de colisión, hasta entonces ajenos a la nueva mecánica, con el objetivo de conocer más a fondo los procesos de emisión y absorción, cuya naturaleza continuaba siendo un enigma. Supone que, cuando el electrón colisiona con el átomo, viene y se va, asintóticamente, del infinito, lo que permite asociarlo a una onda plana:

Según Schrödinger, el átomo en su estado cuántico enésimo es una vibración de una función de estado de frecuencia fija W_n^0/h extendida por todo el espacio. En particular, un electrón que se mueve en línea recta es un fenómeno vibratorio de este tipo que corresponde a una onda plana. (Wheeler y Zurek, 1983, p.53)

En efecto, en la mecánica ondulatoria un electrón libre con un momento perfectamente definido viene descrito por una onda plana en el espacio de posiciones. ¿Cómo entender esa onda? Como una amplitud de probabilidad, que en ese caso equivaldría a equiprobabilidad de presencia en el tramo estudiado. La descripción causal de porqué el electrón sale en una u otra dirección en uno u otro momento queda, de momento, fuera de la teoría. Si eso llegará a poder determinarse o no es, para Born, una cuestión de otro orden, y él prefiere no detenerse en disquisiciones que no vayan acompañadas de artillería matemática.

⁵ Sobre los trabajos de Born puede verse (Beller, 1990).

Años más tarde admitió que su familiaridad con los experimentos de colisiones de electrones, que Franck preparaba diariamente en Göttingen en el mismo edificio donde él trabajaba, le habían convencido completamente de la corpuscularidad del electrón (Jammer, 1966, p.39).

En la siguiente entrega de esta investigación, mucho más prolífica, Born se desmarca ya abiertamente del planteamiento de Heisenberg, por un lado, y de Schrödinger, por el otro, y presenta su propia interpretación de los procesos atómicos (Born, 1926b). Aunque prueba su utilidad sólo en los procesos de colisión, cree que es extensible a otro tipo de fenómenos. En esta ocasión admite su deuda con la idea de Einstein del *campo fantasma* (Navarro, 2020, p.439), inspirada a su vez en la *onda guía* de Louis de Broglie. Él aplica esa idea al electrón:

Por lo tanto, me gustaría investigar experimentalmente la siguiente idea: el campo guía, representado por una función escalar ψ de las coordenadas de todas las partículas implicadas y el tiempo, se propaga de acuerdo con la ecuación diferencial de Schrödinger. El momento y la energía, sin embargo, se transfieren de la misma manera que si los corpúsculos (electrones) realmente se movieran. Las trayectorias de estos corpúsculos se determinan sólo en la medida en que las leyes de la energía y el momento las restringen; de lo contrario, sólo se encuentra una probabilidad para una determinada trayectoria, determinada por los valores de la función ψ . Esto podría resumirse, un tanto paradójicamente, tal vez de la siguiente manera: el movimiento de las partículas sigue leyes de probabilidad, pero esa misma probabilidad se propaga en armonía con la ley causal. (Ludwig, 1968, p.207)

Hallamos por primera vez explicado lo que hoy es común asociar a la función de onda: su evolución temporal es determinista, pero su interpretación física implica entender su cuadrado como una densidad de probabilidad de hallar la partícula en una posición determinada. Queda claro que Born recayó en el empleo de visualizaciones, y en sus artículos no hallamos tampoco rastro de duda sobre la corpuscularidad de los electrones. De hecho, celebra esa recaída, a pesar de que conlleve una enmienda a la causalidad:

Sobre la base de las discusiones anteriores, me gustaría presentar la opinión de que la mecánica cuántica no sólo permite la formulación y solución del problema de los estados estacionarios, sino también el de los procesos de transición. En estas circunstancias, la versión de Schrödinger parece hacer justicia a los hechos de la manera más fácil con diferencia; además, permite conservar las ideas convencionales de espacio y tiempo en las que los acontecimientos tienen lugar de una manera completamente normal. Por otra parte, la teoría propuesta no se corresponde con la exigencia de la determinación causal del acontecimiento individual. (Ludwig, 1968, p.224)

Es patente la influencia que ejerció en Born la aportación de Schrödinger y su crítica a la mecánica matricial en su versión original. Born abundó en las mismas ideas en un artículo posterior que publicó en la primavera de 1927, titulado “Mecánica cuántica y estadística” (Born, 1927), pero marcando distancia respecto Schrödinger. Ahí descarta la propuesta de asociar paquetes de onda a las partículas, y aunque los corpúsculos carezcan de individualidad (Born se refiere ya al concepto de indistinguibilidad, que abordaremos más abajo), defiende el poder seguir imaginándolos: “*La materia en sí todavía se puede representar bajo la forma de partículas (puntuales) móviles (electrones, protones); sólo que estos corpúsculos en muchos casos no se identifican como individuos, como por ejemplo cuando se encuentran asociados en un átomo*” (Born, 1963, p.394). Es decir, en la nueva teoría las partículas atómicas sí conservan su individualidad, pero sólo si no están confinadas varias de ellas, por ejemplo, en el mismo núcleo. Su individualidad se difumina cuando forman parte de un agregado de partículas idénticas.

Unos meses después, Pauli, en un trabajo en el que aplicaba la estadística de Fermi-Dirac al estudio del paramagnetismo, extendió la interpretación probabilística de Born a los gases ideales degenerados (Pauli, 1927). El hecho de que éste recurriera a la función de onda de Schrödinger no implicaba en absoluto que compartiera su interpretación continuista: tanto él como Heisenberg se encargaron de mostrar que los resultados de Born podían deducirse también en el marco de la mecánica matricial, sin recurrir a la función de onda (Bacciagaluppi y Valentini, 2009, p.98).

En breve, la interpretación probabilística empezó a establecerse como uno de los productos más característicos e impactantes de la nueva mecánica. A Schrödinger este uso de la función de onda no le convenció:

De una separata del último trabajo de Born en el Zeitsch. f. Phys. sé más o menos cómo piensa él las cosas: las ondas deben estar estrictamente determinadas causalmente a través de leyes del campo, las funciones de onda en cambio sólo tienen el significado de probabilidades para los movimientos reales de partículas de luz o materiales. Creo que con ello Born pasa por alto que (...) dependería del gusto del observador qué desea considerar como real, si la partícula o el campo guía.⁶ (Bacciagaluppi y Valentini, 2009, p.118)

Lo que puede leerse como un anticipo de la posterior oposición de Schrödinger a la dualidad onda-corpúsculo (Pié i Valls y Pérez, 2014).

3.2 La discontinuidad de Heisenberg

En verano de 1926 Heisenberg se dedicó al problema de varios cuerpos, debido principalmente a su interés en dar cuenta del espectro del helio. En su primer trabajo al respecto presenta lo que viene a ser la versión mecánico-cuántica de la indistinguibilidad que ya Einstein había introducido más de un año antes con el formalismo de la mecánica estadística clásica en el espacio fásico (Heisenberg, 1926a).⁷ También Enrico Fermi había presentado por entonces su estadística cuántica para los electrones (Pérez y Ibáñez, 2022). Para Heisenberg la vía de Schrödinger no debe considerarse la continuación de la de De Broglie, por el mero hecho de que las ondas tridimensionales propuestas por éste no se corresponden con las ondas multidimensionales de Schrödinger. Una descripción con ondas tridimensionales, como las de la física ordinaria, recuperaría una descripción tradicional espacio-temporal, lo que Heisenberg, a estas alturas, considera ya una rémora. Apela a la corpuscularidad para privilegiar la mecánica matricial:

En vista de esta analogía, me parece que uno de los aspectos más importantes de la mecánica cuántica es que está basada en una imagen corpuscular de la materia; por supuesto que no se trata de una descripción del movimiento de corpúsculos con nuestros conceptos ordinarios de espacio-tiempo. Esto difícilmente se podía esperar; pues incluso si los corpúsculos fueran singularidades de la estructura métrica del espacio, como es el deseo de la teoría del continuo, probablemente eso tampoco sería ninguna descripción con nuestros conceptos ordinarios de espacio-tiempo – a menos que consideráramos un espacio cuya medida se apartara esencialmente de la euclidiana, del espacio “ordinario”. (Heisenberg, 1926a, pp.412-413)⁸

⁶ Carta de Schrödinger a Wien, 25 de agosto, 1926.

⁷ Sobre los trabajos de Einstein véase (Navarro, 2020).

⁸ Notemos que Heisenberg se refiere a la *mecánica cuántica*: Al parecer, no le gustaba la denominación *mecánica matricial*. Véase (Bacciagaluppi y Valentini, 2009, p.81).

Mantiene pues los corpúsculos a pesar de negarles visuabilidad. Ahora bien, del mismo modo que las ondas tridimensionales no pueden dar cuenta de la información contenida en la función de onda, tampoco pueden hacerlo los corpúsculos individuales. Hay que suponerles cierta interrelación, acoplamiento, resonancia: “*Si se quisiera hacer una imagen clara que correspondiese a la solución mecánico-cuántica de los electrones en el átomo, habría que imaginar algo así como que los dos electrones intercambian sus posiciones periódicamente de forma continua (...)*” (Heisenberg, 1926a, p.421). Esta es la interpretación de Heisenberg de la *indistinguibilidad* de las partículas en mecánica cuántica. A la falta de localización se añadió esta propiedad, ya atisbada en los trabajos de Satyendra Nath Bose y Einstein (Navarro, 2020, p.301). Heisenberg y Dirac le dieron carta de naturaleza en la nueva mecánica: distinguir partículas idénticas no era un observable, y por lo tanto su individualidad debía quedar fuera de la teoría, a menos que se trataran sistemas de una sola partícula. Cuando había varias, su identidad individual se esfumaba, y así como Einstein imaginó una interrelación ondulatoria, Heisenberg imagina las partículas intercambiando sus posiciones constantemente.

A estas alturas, podemos decir que si bien Heisenberg quería mantener distancias con la interpretación continuista de Schrödinger, para lo cual resaltó las discontinuidades en las que se fundaba la mecánica matricial, ello no significa tampoco que defendiera a ultranza, ni mucho menos, una cosmovisión atomista. Así le manifestaba a Pauli la repulsa que le provocaba la idea de Born:

Por cierto, ¿¿qué me dices de la última nota de Born en el Zeitschrift?? [sic.] Una frase me recuerda vivamente un capítulo del Credo crist[iano]: “Un electrón *es* una onda plana...” También es bonito pensar sobre el significado profundo de la nota al pie de la página 865. Pero no quiero hacerte competencia en calumnias.⁹ (Pauli, 1979, p.338)

La nota al pie a la que se refiere es aquella en la que aparece por primera vez –que nosotros sepamos– la propuesta de interpretar el cuadrado de la función como una densidad de probabilidad. Las reticencias de Heisenberg a mantener una visión corpuscular se hacen aún más patentes en la transcripción de una charla que pronunció en la reunión anual de científicos alemanes en Düsseldorf, el 23 de septiembre de ese mismo año (Heisenberg, 1926b). Este documento representa, en nuestra opinión, el último hito en la trayectoria de Heisenberg antes de su posterior viraje hacia la visuabilidad de los procesos intraatómicos. Presenta tres restricciones a la realidad de los corpúsculos, tres argumentos contra la afirmación de que la materia está hecha de primordios. Son los siguientes:

- I. Los intentos de explicación de los fenómenos microscópicos han fracasado precisamente por consistir en la confección de imágenes. No es posible visualizar los átomos.
- II. La mecánica cuántica define magnitudes análogas a las clásicas, como la posición o el momento. Pero si bien puede asociarse energía a los estados estacionarios, por ejemplo, las magnitudes observables asociadas a un corpúsculo tampoco son directamente visualizables, concebibles.
- III. Para dar cuenta de un sistema de varios cuerpos, hay que suponer que son indistinguibles, que están intercambiando constantemente sus posiciones.

Schrödinger estuvo en Copenhague en ese mismo octubre (de 1926),¹⁰ una vez ya se habían publicado las cuatro entregas de su mecánica ondulatoria. Pero antes, en julio, había dado charlas en Berlín y Múnich (Jammer, 1974, p.31). Seguramente a una de estas visitas se refería Heisenberg en una carta a Pauli que ya hemos citado antes. En ella, su oposición a la versión ondulatoria es manifiesta:

⁹ Carta de Heisenberg a Pauli, 28 de julio, 1926.

¹⁰ Consta que el 4 de octubre dio una charla. Véase (Pauli, 1979, p.339).

Tan amable es Schr[ödinger] en persona como extraña encuentro su física: cuando se le escucha, uno se siente 26 años más joven. Schr[ödinger] ya echa por la borda todo lo “teórico-cuántico”: a saber, el efecto fotoeléctrico, las colisiones de Franck, el efecto de Stern-Gerlach, etc.; así no es difícil hacer una teoría. Pero simplemente no coincide con la experiencia.¹¹ (Pauli, 1979, pp.337-338)

Tal era la disposición de Heisenberg cuando Schrödinger atendió a la invitación de Bohr. En Copenhague tuvieron lugar encendidas discusiones entre los tres físicos, que seguro que contribuyeron a perfilar las posturas de los implicados. Heisenberg, en el siguiente artículo que comentaremos, escrito en marzo, presenta una postura claramente beligerante con el continuismo de Schrödinger, y en él se aprecia una discontinuidad muy llamativa con el que acabamos de ver. Se trata, ni más ni menos, del artículo donde Heisenberg presenta el principio de incertidumbre (Heisenberg, 1927). Lo que encontramos en él es un intento de interpretar algunos resultados de la mecánica cuántica a partir de los márgenes de incertidumbre de las medidas físicas, y proveer de sentido los conceptos clásicos en el reino cuántico. Así, en cierto modo, se puede volver a hablar de la trayectoria del electrón, aunque no en el sentido hasta entonces usual. Varios de los experimentos mentales que Heisenberg presenta exigen una visualización que es claramente incompatible con su propuesta iconoclasta de 1925. Veamos una nota que pertenece a este artículo y que parece una respuesta directa al artículo de Schrödinger que hemos comentado más arriba (Schrödinger, 1926d):

Schrödinger describe la mecánica cuántica como una teoría formal de aterradora, incluso repulsiva, abstracción y falta de visibilidad. Ciertamente, no se puede sobrestimar el valor del dominio matemático (y en esa medida físico) de las leyes de la mecánica cuántica que ha posibilitado la teoría de Schrödinger. Sin embargo, en lo que respecta a las cuestiones de interpretación física y de principios, la visión extendida de la mecánica ondulatoria, tal y como yo la veo, nos ha desviado del camino preciso que señalaban los trabajos de Einstein y de Broglie, por un lado, y los trabajos de Bohr y de la mecánica cuántica, por otro. (Wheeler y Zurek, 1983, p.82)

Apreciamos una vez más cómo Heisenberg quiere desmentir la visión de que la mecánica ondulatoria es la continuación natural de las ideas de Einstein y De Broglie. Y eso es aún más significativo si tenemos en cuenta que en este artículo vuelve a hablar de corpúsculos, colisiones y trayectorias. Además de la crítica al espacio de configuraciones y a sus ondas inimaginables, en este nuevo ataque Heisenberg insiste en desarbolar el intento de Schrödinger de representar partículas mediante paquetes de onda.

Este artículo lleva un apéndice añadido en pruebas de imprenta, y que es una consecuencia de las discrepancias entre Heisenberg y Bohr (Rosenfeld, 1971). Éste le reprochó a aquél su dejadez para con los aspectos ondulatorios en alguno de los experimentos descritos. La complementariedad que ya estaba barruntando el físico danés tras las discusiones con Schrödinger seguramente le indujo a ver en el artículo de Heisenberg un planteamiento demasiado arrimado a la corpuscularidad, demasiado anti-ondulatorio y separado de la dualidad que propugnaría en pocos meses y pasaría a convertirse en la ortodoxia. Dichas discrepancias tenían pues como eje principal el no privilegiar ninguno de los dos aspectos de la dualidad. Esto le escribía Heisenberg a Pauli en mayo de 1927:

¹¹ Carta de Heisenberg a Pauli, 28 de julio, 1926.

Bohr quiere escribir un tratado general sobre la “estructura conceptual” de la te[oría] cu[ántica] desde el punto de vista de “hay ondas y corpúsculos”; si directamente se empieza así, naturalmente se puede hacer que todo quede libre de contradicciones... Sin embargo, por supuesto que yo soy de la opinión antigua de que las discontinuidades son lo único interesante de la te[oría] cu[ántica] y que eso nunca se puede enfatizar lo suficiente (...) ¹² (Pauli, 1979, pp.394-395)

3.3 La indistinguibilidad de Dirac

Los escritos de Dirac se caracterizan por la preeminencia de las relaciones meramente matemáticas y el descuido de su interpretación física. Aunque dichos planteamientos suelen tildarse de asépticos, neutros, eso no siempre está justificado. Ya hemos apuntado cómo Dirac se refería, en esos artículos de 1925, a átomos y electrones sin problematizarlos. En 1926 publicó otro artículo en el que se hacía más notorio que para Dirac romper con la mecánica clásica no tenía nada que ver con romper con las partículas (Dirac, 1926b). En ese trabajo consideraba, entre otros, el problema del gas ideal y el problema de las colisiones. Casi al mismo tiempo que Heisenberg, dirigía su atención al sistema de varios cuerpos, el más sencillo de los cuáles es el del gas de partículas sin interacción. Es interesante señalar que probablemente Dirac fue el primero en utilizar la terminología “estados físicamente indistinguibles”. Aunque en este artículo no se refiere directamente a partículas indistinguibles, siempre explica y ejemplifica este concepto planteando permutaciones de electrones. Por ejemplo:

Surge la cuestión de si los dos estados (mn) y (nm), que son físicamente indistinguibles puesto que sólo difieren por el intercambio de los dos electrones, deben contarse como dos estados diferentes o como un solo estado (...) (Dirac, 1995, p.185)

Recordemos que esa era una de las limitaciones de la realidad atómica que Heisenberg presentó en setiembre ante sus colegas alemanes. Pero si Heisenberg planteó la posibilidad de intercambios de posiciones reales, Dirac se refiere solo a permutaciones sobre el papel. En este mismo artículo, Dirac da cuenta del principio de exclusión de Pauli también en términos netamente corpusculares:

Una función propia antisimétrica desaparece del mismo modo cuando dos de los electrones están en la misma órbita. Esto significa que en la solución del problema con funciones propias antisimétricas no puede haber estados estacionarios con dos o más electrones en la misma órbita, lo que no es más que el principio de exclusión de Pauli. En cambio, la solución con funciones propias simétricas permite que haya cualquier número de electrones en la misma órbita, por lo que esta solución no puede ser la correcta para el problema de los electrones en un átomo. (Dirac, 1995, 187-188)

Explica de forma diáfana por qué la individualidad, la identificación individual de cada electrón debe abandonarse por principios. Pero a pesar de prescindir de imágenes y visualizaciones, y de que el intercambio de electrones no se traduzca en estados físicamente distintos, Dirac, a diferencia de Heisenberg, no da muestras de dudar de su realidad.

¹² Carta de Heisenberg a Pauli, 16 de mayo, 1927.

3.4 La dualidad de Jordan

Nos referiremos ahora a otro de los físicos de Göttingen, seguramente el menos estudiado. Jordan hizo mucho por perfilar la idea de dualidad, que como veremos en su caso tampoco conllevaba negación alguna de la realidad de átomos y electrones. Así, aunque por momentos parece que convierta a las *ondas de probabilidad* en el objeto físico mecánico-cuántico, no deja de hablar de la trayectoria de los electrones. En cierto modo, Jordan representa un caso eximio de adhesión a la interpretación de Born. En la que fuera su *Habilitationsvortrag* en Göttingen, a finales de 1926, hizo hincapié en la acausalidad de los procesos elementales, en la prioridad de las probabilidades en las ecuaciones (Jordan, 1927a). Si bien admite que dichas probabilidades se sustraen al entendimiento, dada su definición en el espacio de configuraciones y su irreductibilidad a procesos individuales, no deja de referirse a las expectativas de encontrar electrones en tal o cual sitio. Propone la interpretación de colectividades:

En los últimos tiempos se han realizado importantes avances en el descubrimiento de estas leyes. Ahora, por ejemplo, se puede calcular (en principio) el espectro relacionado con el movimiento de los electrones en un átomo con la misma seguridad con la que, en dinámica clásica, se podría calcular el movimiento de los planetas. Pero a pesar de la analogía entre los cálculos, hay una diferencia importante en la interpretación de sus resultados. El cálculo clásico nos da información sobre nuestro sistema específico de planetas. El cálculo teórico cuántico, en general, no nos dice nada sobre un solo átomo, sino sólo sobre las propiedades medias de un conjunto de átomos similares. (Jordan, 1927a, p.567)

Jordan menciona incluso las trayectorias de las cámaras de niebla: “(...) *de hecho, podemos observar realmente, en gran parte gracias al trabajo de C.T.R. Wilson, el destino de una sola partícula α , seguir su trayectoria y determinar el momento en que la trayectoria termina en un salto cuántico*” (Jordan, 1927a, p.569). Pero insiste, en los últimos párrafos, en que el tipo de probabilidades que intervienen en la teoría cuántica no se dejan entender al no poderse reducir a probabilidades de sucesos elementales, estadísticamente independientes.

En este artículo, y en relación al problema del gas ideal, del cual Jordan era buen conocedor, se refiere a los trabajos de Heisenberg y Dirac sobre la simetrización de la función de onda como a tratamientos corpusculares (Jordan, 1927b). La indistinguibilidad de las partículas (“*gleicher Teilchen*”) no sólo no le hace poner en cuestión la idea de partícula, sino que la confirma. También el hecho de que un electrón libre venga representado por una onda plana:

Así que esta onda tiene la misma intensidad a lo largo de todo el espacio unidimensional en donde se mueve el punto material. Esto sugiere la siguiente idea: cuando el punto material mecánico cuántico posee un valor definido del impulso, posee al mismo tiempo una cierta probabilidad de que su posición sea cualquiera en el espacio de que dispone, y todas las posiciones posibles son exactamente equiprobables. (Jordan, 1927b, p.647)

En Jordan hallamos pues muchas de las características de la que luego será la interpretación ortodoxa:

Todas las interpretaciones de las leyes físicas hechas mediante imágenes “gráficas” [“*anschauliche*”] no dan más que explicaciones de estas leyes mediante analogías en la región de las cosas visibles, tangibles. Pero las leyes de la microfísica son de un tipo tan especialmente extraño a nosotros que no es posible hallar analogías completas para ellas en la macrofísica. (Jordan, 1927b, p.648)

Jordan también reclamó ser uno de los continuadores genuinos de la física cuántica de los Planck, Einstein y Bohr, de los cuáles Schrödinger, en su celo continuista, se habría alejado: “*Como es sabido, Schrödinger, partiendo de las relaciones matemáticas con cuyo descubrimiento ha enriquecido la mecánica cuántica, ha desarrollado ideas que están en oposición radical con los supuestos básicos de la teoría cuántica desarrollados por Planck, Einstein y Bohr*” (Jordan, 1927c, p.661).

4. La complementariedad de Bohr

De los autores a que nos hemos referido, sólo Born, Heisenberg y Schrödinger presentaron ponencia en el quinto congreso Solvay. Pero al congreso acudieron también Einstein, Pauli, De Broglie, Lorentz y Bohr, entre otros.¹³ En la comunicación que presentaron conjuntamente Heisenberg y Born no apreciamos novedades, aunque las posturas sí parecen un poco más asentadas. Su declaración de principios aparece casi al comienzo:

Dos tipos de discontinuidades son características de la física del átomo: la existencia de corpúsculos (electrones, cuantos de luz), por un lado, y la existencia de estados estacionarios separados (valores determinados de energía, valores de momento, etc.), por otro. Ambos tipos de discontinuidades sólo pueden introducirse en la teoría clásica mediante hipótesis adicionales muy artificiales. (Solvay, 1928, p.144)

El hecho de que Heisenberg y Born pusieran al mismo nivel la corpuscularidad y la cuantización de los estados estacionarios sí sugiere que no estaban sino respondiendo, una vez más, a la cosmovisión de Schrödinger. Las discontinuidades debían quedar en el centro de la descripción del mundo atómico. Pero ello no les impide promover la dualidad: “*A la naturaleza dual de la luz –ondas, cuantos de luz– le corresponde la naturaleza dual análoga de las partículas materiales. En cierto sentido, éstas también se comportan como ondas*” (Solvay, 1928, p.164). De algún modo había que incluir la función de onda en las explicaciones y atenuaban así el carácter corpuscular de su versión. O, dicho de otro modo, comenzaban a establecer una visión un tanto confusa de los principios de la teoría.

Por su parte, Schrödinger tampoco dice nada que no hubiera dicho ya, e insiste en su propuesta:

El sistema clásico de puntos materiales no existe realmente, pero hay algo que llena continuamente todo el espacio y de lo que se obtendría una «fotografía instantánea» si, dejando abierto el obturador del cuarto oscuro, se hiciera pasar al sistema clásico por *todas* sus configuraciones, dejando que la imagen en el espacio q permaneciera en cada elemento del volumen $d\tau$ durante un tiempo proporcional al valor *instantáneo* de $\psi\psi^*$. (...) En otras palabras: el sistema real es una imagen compuesta del sistema clásico en todos sus estados posibles, obtenida empleando $\psi\psi^*$ como «función de peso». (Solvay, 1928, pp.191-192)

Se desmarca así una vez más de la interpretación probabilista de Born: la evolución de la función de onda no da probabilidades sino el comportamiento del objeto físico real, de aquello que está ocurriendo. Compara su propuesta con la de De Broglie, quien en Bruselas defendió su onda piloto,

¹³ Las actas pueden consultarse en (Solvay, 1928).

una onda tridimensional que guiaría a las partículas en su recorrido. El físico francés presentó una especie de propuesta mixta, más bien corpuscular, pero cuyo carácter ondulatorio no era ni mucho menos secundario.¹⁴

Lorentz, presidente del Congreso y patriarca de la Física al menos hasta cinco o diez años antes, manifestó su apego a la visión más clásica del electrón. A pesar de su creencia en la corpuscularidad, admitía sus limitaciones, pero exigía también poder hacerse imágenes, un cómo y un cuándo (Solvay, 1928, pp.248-249). Todo lo contrario que Bohr, quien renunció a la posibilidad de usar exclusivamente uno de los dos tipos de imágenes, ondulatorio o corpuscular, con todas las contradicciones que ello implicaba, reconocidas por él mismo. En relación a su constante empleo del concepto de partícula en su ponencia, leemos:

Observemos de nuevo que, si hemos hablado aquí repetidas veces de la velocidad de una partícula, es sólo con el fin práctico de ajustarnos al modo ordinario de descripción en el tiempo y en el espacio. Como ya se desprende de las consideraciones de De Broglie mencionadas anteriormente, la noción de velocidad debe aplicarse siempre con reserva. (Solvay, 1928, p.226)

Esta actitud se irá convirtiendo paulatinamente en la interpretación hegemónica: todos los conceptos clásicos de velocidad o posición deben seguirse utilizando, sí, pero con cautela y reservas. Más crudamente, en el interior del átomo, Bohr llega incluso a descartar la idea misma de salto cuántico o estado estacionario, que para él no es más que una forma de hacerse una idea de algo de lo que uno no debería hacerse una idea. Y lo mismo ocurre con la noción de partícula:

En resumen, podemos decir que las nociones de estados estacionarios y procesos de transición individuales tienen, en su campo de aplicación, tanta o tan poca realidad como las partículas individuales mismas. En ambos casos hemos expresado la condición de causalidad complementaria del modo de descripción en el espacio y en el tiempo, cuya aplicación lógica sólo está limitada por las posibilidades de definición de las nociones correspondientes. (Solvay, 1928, p.244)

Las descripciones causales de los procesos elementales no son más que tenues sombras de la realidad atómica. Y lo mismo le ocurre al concepto de partícula elemental. Además, Bohr establece una distinción entre partículas que interactúan y partículas libres. Sólo en este último caso tiene sentido imaginárselas (como ondas planas), pues cuando interactúan entre ellas, como ocurre en el interior del átomo, su acoplamiento (o resonancia) no permite pensarlas aisladamente. En las colisiones, esto sólo se aplicaría al momento mismo del choque, que aún siendo el momento decisivo del proceso, queda completamente fuera del conocimiento del observador (experimental o teórico). Ahora bien, esta cuestión deja al descubierto una consecuencia con la que debe acarrear la teoría cuántica. Si la observación modifica el sistema estudiado, y la teoría sólo puede dar cuenta de las medidas, de los observables, el mismo concepto de partícula libre en mecánica cuántica se queda en tierra de nadie. A pesar de ello –y siempre según Bohr– es una abstracción “esencial para expresar el contenido de la experiencia de una manera que guarde relación con nuestra representación ordinaria” (Solvay, 1928, p.219).

¹⁴ En la década de 1950 David Bohm redescubrió y desarrolló esta idea, aún hoy considerada seriamente por algunos investigadores (Freire, 2019).

5. Comentarios finales

Esta última lectura de la ponencia de Bohr nos devuelve a la pregunta: ¿se llegó a poner en duda el concepto de partícula durante el período fundacional de la mecánica cuántica (1925-1927), más allá de la propuesta explícita de Schrödinger? El físico danés sí creía que el grado de realidad del concepto de partícula se había visto seriamente mermado, y de hecho aún le dedica un último apartado: “El problema de las partículas elementales” (Solvay, 1928, p.244), donde vislumbra que la unión de la teoría cuántica y la relatividad todavía conllevará renunciaciones más drásticas, y confía en que la complementariedad vendrá a paliar esa y otras cuestiones de interpretación espinosas.¹⁵ No hemos encontrado ninguna declaración tan contundente en escritos de Heisenberg, Born, Jordan o Dirac. Sí de Schrödinger, quien cuestionó abiertamente la constitución discreta de la materia, postura que mantuvo hasta el final de sus días a pesar de no dar con una formulación satisfactoria de la nueva teoría (Bitbol, 1996; Pié i Valls y Pérez, 2014). Después de esta etapa inicial, prácticamente no hubo voces que se aunaran a la de Schrödinger, que quedó apartado de la ortodoxia. No deja de ser sintomático el desigual trato que han recibido en la divulgación y en la filosofía de la ciencia las discrepancias de Bohr con Einstein, y las de los físicos de Göttingen con Schrödinger. La disidencia de este último es muchísimo menos conocida, y su desafío al atomismo ortodoxo que quedó establecido apenas ha trascendido (Schrödinger, 1975).

Estamos parcialmente de acuerdo con la tesis de Mara Beller, según la cual el rápido posicionamiento de Schrödinger tuvo como consecuencia que los creadores de la mecánica matricial se decantaran hacia una ontología de tipo más corpuscular, llegando a contradecir palmariamente sus propios propósitos de pocos meses antes (Beller, 1999). Hay que añadir que el tipo de problemas que trataron en la segunda tanda de 1926 y 1927, y ya por separado, eran hartamente distintos del simple átomo de hidrógeno de los artículos seminales. El caso de Heisenberg es el más llamativo, pues pasó de negar la visuabilidad y conceptualización de las partículas atómicas, a tratar de recuperar imaginéncias clásicas para los procesos en su formulación inicial del principio de incertidumbre.¹⁶ Lo cierto es que nunca negó la constitución corpuscular de la materia (ni en su primer artículo), y tras su encontronazo con Schrödinger, reivindicó más y más la discontinuidad.

Cerraremos volviendo sobre un resultado inesperado de nuestra investigación: el intento de los diferentes autores que contribuyeron a formular la nueva mecánica de postularse como legítimos herederos de la teoría cuántica antigua de los Planck, Einstein y De Broglie. A pesar de que con el paso del tiempo y las reconstrucciones historiográficas Einstein y De Broglie hayan quedado casi exclusivamente asociados a la vía de Schrödinger, y a ambos frecuentemente se les asocia con una posición heterodoxa, hemos podido comprobar que tanto Heisenberg, como Born o Jordan demandaron ser reconocidos como sus legítimos sucesores. El posterior devenir de la teoría junto a las reconstrucciones históricas más recientes dejaron trazada una línea divisoria nítida entre la antigua teoría cuántica y la nueva mecánica; la insistencia de los padres fundadores de la mecánica cuántica por establecer vínculos con la teoría cuántica antigua (1900-1925) pone de manifiesto que ya por entonces sentían claramente el cambio abrupto que había producido el artículo de Heisenberg. Las discusiones que suscitó siguen, en muchos sentidos, todavía vivas. Pensamos que este artículo

¹⁵ Las expectativas de Bohr se cumplieron. La teoría cuántica de campos, que incluyó la cuantización de la radiación, prescindió casi por completo del concepto clásico de partícula (Chalmers, 2009).

¹⁶ Para un estudio historiográfico más detallado de la evolución de la interpretación de la mecánica cuántica por parte de Heisenberg puede consultarse (Camilleri, 2008).

puede contribuir a arrojar algo de luz sobre las posturas iniciales de los físicos que emprendieron estas transformaciones.

Agradecimientos

Parte de esta investigación se ha financiado con el proyecto PID2019-105131GB-I00 del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Referencias

- Bacciagaluppi, G. y Valentini, A. (2009). *Quantum theory at the crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay conference*. Cambridge University Press. <https://doi.org/knd3>
- Beller, M. (1990) Born's probabilistic interpretation: a case study of 'concepts in flux'. *Historical Studies in the History and Philosophy of Science*, 21: 563-588. <https://doi.org/b3pj9b>
- Beller, M. (1999). *Quantum dialogue. The making of a revolution*. University of Chicago Press.
- Bitbol, M. (1996). *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*. Kluwer.
- Born, M. (1926a). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37: 863-867. Versión inglesa en (Wheeler y Zurek, 1983, pp.52-55). <https://doi.org/fq5wd4>
- Born, M. (1926b). Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 38: 803-827. Versión (parcial) inglesa en (Ludwig, 1968, pp.206-225). <https://doi.org/bgkhgn>
- Born, M. (1927). Quantenmechanik und Statistik. *Die Naturwissenschaften*, 15: 238-242. Reimpreso en (Born, 1963, pp.299-309). <https://doi.org/d2zg28>
- Born, M. (1963). *Ausgewählte Abhandlungen. Vol. 2*. Vandenhoeck & Ruprecht.
- Born, M. y Jordan, P. (1925). Zur Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 34: 858-888. Versión inglesa en (Van der Waerden, 1967, p.277-306). <https://doi.org/frq9nn>
- Born, M., Heisenberg, W. y Jordan, P. (1925). Zur Quantenmechanik. II. *Zeitschrift für Physik*, 36: 557-615. Versión inglesa en (Van der Waerden, 1967, pp.321-385). <https://doi.org/fbmkz7>
- Camilleri, K. (2008). *Heisenberg and the interpretation of quantum mechanics*. Cambridge University Press.
- Chalmers, A. (2009) *The scientist's atom and the philosopher's stone*. Dordrecht. <https://doi.org/d6jfbv>
- Davies, P. C. W. (1984). Particles do not exist. En Christensen, S. M. y De Witt, B. S. (Eds). *Quantum theory of gravity: essays in honor of the 60th birthday of Bryce S. De Witt* (pp.66-77). Adam Hilger.
- Dirac, P. A. M. (1925). The fundamental equations of quantum mechanics. *Proceedings of the Royal Society (London)*, A109: 642-653. Reimpreso en (Van der Waerden, 1967, pp.307-320). <https://doi.org/c6bfrz>
- Dirac, P. A. M. (1926a). Quantum mechanics and a preliminary investigation of the hydrogen atom. *Proceedings of the Royal Society (London)*, A110: 561-579. Reimpreso en (Van der Waerden, 1967, pp.417-427). <https://doi.org/bt4xhk>
- Dirac, P. A. M. (1926b). On the theory of quantum mechanics. *Proceedings Royal Society of London*, A112: 661-677. Reimpreso en (Dirac, 1995, pp.179-195). <https://doi.org/dcfn3r>
- Dirac, P. A. M. (1995). *The collected works of P.A.M. Dirac*. Cambridge University Press.
- Duncan, A. y Janssen, M. (2019). *Constructing Quantum Mechanics*. Oxford University Press. <https://doi.org/knkx>
- Forman, P. (1971). Weimar culture, causality, and quantum theory: adaptations by German physicists and mathematicians to a hostile environment. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 3, 1-115. <https://doi.org/j7pr>

- Freire Junior, Olival (2019). David Bohm. A life dedicated to understanding the quantum world. Springer. <https://doi.org/j8pb>
- Heisenberg, W. (1925). Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*, 33: 879-893. Versión inglesa en (Van der Waerden, 1967, pp.261-276). <https://doi.org/fc46xv>
- Heisenberg, W. (1926a). Mehrkörperproblem und Resonanz in der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 38: 411-426. <https://doi.org/ctt5db>
- Heisenberg, W. (1926b). Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 45: 989-994. <https://doi.org/cf972g>
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantenteoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43: 172-198. Versión inglesa en (Wheeler y Zurek, 1983, pp.62-84). <https://doi.org/bnv7xn>
- Hobson, A. (2013). There are no particles, there are only fields. *American Journal of Physics*, 81: 211-223. <https://doi.org/f43mwj>
- Jammer, M. (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*. McGraw Hill.
- Jammer, M. (1974). *The philosophy of quantum mechanics*. Wiley & Sons.
- Jordan, P. (1927a). Philosophical Foundations of Quantum Theory. *Nature*, 119: 566-569. <https://doi.org/c3x7st>
- Jordan, P. (1927b). Die Entwicklung der neuen Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 15: 638. <https://doi.org/dtkzbx>
- Jordan, P. (1927c). Über quantenmechanische Darstellung von Quantensprüngen. *Zeitschrift für Physik*, 40: 661. <https://doi.org/cpqw8z>
- Ludwig, G. (1968). *Wave mechanics*. Pergamon.
- Navarro, L. (2020). El desconocido Albert Einstein. Tusquets.
- Pauli, W. (1926). Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 36: 336-363. Versión inglesa en (Van der Waerden, 1967, pp.387-415). <https://doi.org/cqwdnp>
- Pauli, W. (1927). Über Gasentartung und Paramagnetismus. *Zeitschrift für Physik*, 41: 81-102. <https://doi.org/dsh2nt>
- Pauli, W. (1979). *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band I: 1919-1929*. Springer. <https://doi.org/bkxcch>
- Pérez, E. y Ibáñez, J. (2022). Indistinguishable elements in the origins of quantum statistics. The case of Fermi-Dirac statistics. *European Physical Journal H*, 47: 1. <https://doi.org/j7t5>
- Pié i Valls, B. y Pérez, E. (2014). L'atòm de Schrödinger. *Comprendre*, 16/2: 5-28.
- Rosenfeld, L. (1971). Men and ideas in the history of atomic theory. *Archive for History of Exact Sciences*, 7: 69-90. <https://doi.org/c5vnx6>
- Sánchez Ron, J. M. (2001). *Historia de la física cuántica, I. El periodo fundacional*. Crítica; 2001.
- Schrödinger, E. (1926a). Zur Einsteinschen Gastheorie. *Physikalische Zeitschrift*, 27: 95-101.
- Schrödinger, E. (1926b). Quantisierung als Eigenwertproblem. [Erste Mitteilung]. *Annalen der Physik*, 79: 361-376. Versión inglesa en (Schrödinger, 1982, pp.1-12). <https://doi.org/fpcg9z>
- Schrödinger, E. (1926c). Quantisierung als Eigenwertproblem. [Zweite Mitteilung]. *Annalen der Physik*, 79: 489-527. Versión inglesa en (Schrödinger, 1982, p.25). <https://doi.org/c5zt2n>
- Schrödinger, E. (1926d). Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen. *Annalen der Physik*, 79: 734-756. Versión inglesa en (Schrödinger, 1982, p.46). <https://doi.org/b5s6db>

- Schrödinger, E. (1926e). Quantisierung als Eigenwertproblem. [Vierte Mitteilung]. *Annalen der Physik*, 81: 109-139. Versión inglesa en (Schrödinger, 1982, p.120). <https://doi.org/d5tw86>
- Schrödinger, E. (1927a). Über den Comptoneffekt. *Annalen der Physik*, 82: 257-264. Versión inglesa en (Schrödinger, 1982, pp.124-129). <https://doi.org/dd6vp7>
- Schrödinger, E. (1927b). Energieaustausch nach der Wellenmechanik. *Annalen der Physik*, 83: 956-968. Versión inglesa en (Schrödinger, 1982, pp.137-146). <https://doi.org/bngh6h>
- Schrödinger, E. (1975). ¿Qué es una partícula elemental?. En *¿Qué es una ley de la naturaleza?* (164-191). Fondo de Cultura Económica.
- Schrödinger, E. (1982). *Collected papers on wave mechanics*. Chelsea Publishing Company.
- Seth, S. (2010). *Crafting the quantum: Arnold Sommerfeld and the practice of theory, 1890-1926*. MIT press.
- Smith, G. E. y Seth, R. (2020). *Brownian motion and molecular reality. A study in theory-mediated measurement*. Oxford University Press. <https://doi.org/knkp>
- Solvay (1928). *Électrons et photons. Rapports et discussions du cinquième conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927*. Gauthier-Villars et Cie.
- Van der Waerden, B. L. (1967). *Sources of quantum mechanics*. Dover.
- Wheaton, B. R. (1991). *The tiger and the shark: empirical roots of wave-particle dualism*. Cambridge University Press.
- Wheeler, J. A. y Zurek, W. H. (1983). *Quantum Theory and Measurement*. Princeton University Press. <https://doi.org/j7pq>