



JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON

HISTORIA
de la FÍSICA CUÁNTICA

Volumen II

*La creación e interpretación de la mecánica cuántica:
de Heisenberg al gato de Schrödinger (1925-1935)*

CRÍTICA

HISTORIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA

VOLUMEN II

La creación e interpretación de la mecánica cuántica:
de Heisenberg al gato de Schrödinger (1925-1935)

José Manuel Sánchez Ron

CRÍTICA

BARCELONA

Primera edición: junio de 2025

Historia de la física cuántica. Volumen II
La creación e interpretación de la mecánica cuántica:
de Heisenberg al gato de Schrödinger (1925-1935)
José Manuel Sánchez Ron

La lectura abre horizontes, iguala oportunidades y construye una sociedad mejor. La propiedad intelectual es clave en la creación de contenidos culturales porque sostiene el ecosistema de quienes escriben y de nuestras librerías. Al comprar este libro estarás contribuyendo a mantener dicho ecosistema vivo y en crecimiento.

En Grupo Planeta agradecemos que nos ayudes a apoyar así la autonomía creativa de autoras y autores para que puedan continuar desempeñando su labor. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Queda expresamente prohibida la utilización o reproducción de este libro o de cualquiera de sus partes con el propósito de entrenar o alimentar sistemas o tecnologías de inteligencia artificial.

© José Manuel Sánchez Ron, 2025

© Editorial Planeta, S. A., 2025
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-9199-779-5
Depósito legal: B. 7.546-2025
Impresión y encuadernación: Gómez Aparicio
Printed in Spain - Impreso en España



La mecánica cuántica de matrices de Heisenberg

El primer tomo de esta historia finalizó con el establecimiento de las bases sobre las que se construiría una mecánica para los procesos del mundo atómico, una mecánica *cuántica*, un cuarto de siglo después de que Max Planck se viera obligado a introducir elementos discretos de energía, la inmortal fórmula $E=h\cdot\nu$. El largo camino que condujo a este logro, cuyas aplicaciones tecnológicas terminaron por conmocionar al mundo, o mejor dicho, por cambiarlo de manera radical, fue transitado por un numeroso conjunto de científicos, físicos en su inmensa mayoría, entre los que destacaron nombres que ya forman parte de lo mejor de la historia de la ciencia, como sin duda son Albert Einstein, Ernest Rutherford y Niels Bohr.

En ese primer volumen ya apareció, aunque brevemente, un joven estudiante de Arnold Sommerfeld, con dotes excepcionales para un gran número de actividades, sobre todo las intelectuales: Werner Heisenberg (1901-1976), sobre quien recayó el honor de construir la primera mecánica cuántica. En el capítulo 9 de la anterior entrega comencé a esbozar su biografía y expliqué que en el otoño de 1920 Sommerfeld le encargó el estudio del efecto Zeeman anómalo. También que el alumno, utilizando el modelo *Rumpf*, encontró que los nuevos datos experimentales que habían enviado a su maestro podían explicarse mediante la asignación a los estados estacionarios de números cuánticos internos semienteros, $1/2$, $3/2$, $5/2$, resultado que publicó en última instancia en 1922, una vez que se supo en Múnich que Alfred Landé había llegado a ideas similares. Heisenberg mostraba

así su creatividad en un dominio tan complejo como actual. Sin embargo, Sommerfeld decidió que sería conveniente para la educación de su joven discípulo que no se centrara exclusivamente en la física atómica y le asignó como tema para su tesis doctoral un problema de hidrodinámica clásica: la transición de un flujo laminar a otro turbulento. También ahí Werner demostró sus habilidades y desarrolló métodos aproximativos para manejar las ecuaciones no lineales implicadas en este análisis. En 1923 completó su tesis, que apareció publicada al año siguiente (Heisenberg 1924), y logró así el título de doctor, aunque no sin dificultades; es conocida la historia de sus aprietos en el examen oral (julio de 1923), que tenía como fin comprobar los conocimientos generales del candidato sobre física. Wilhelm Wien, uno de los examinadores, le planteó preguntas sobre el poder de resolución de microscopios, telescopios e interferómetros de Fabry-Perot, que el aspirante no pudo contestar. Solo la ayuda de Sommerfeld le salvó del suspenso, en el que Wien insistía, aunque únicamente logró la calificación más baja posible: *rite* (el orden era: *summa cum laude*, *magna cum laude*, *cum laude* y *rite*). Heisenberg no olvidó nunca aquella humillante lección y tuvo buen cuidado de aprender a calcular el poder de resolución de los instrumentos ópticos, conocimientos que le sirvieron bien en 1927, cuando los utilizó en el experimento mental con el que sustentó el principio de incertidumbre.

Aun sin haber defendido todavía su tesis doctoral, Heisenberg se trasladó a Gotinga como ayudante de Max Born, un físico que apareció en repetidas ocasiones en el tomo anterior, aunque no me detuve mucho en él. Ahora, es el momento de presentarlo debidamente, ya que es un personaje clave en la historia de la mecánica cuántica.

1. UN PERSONAJE CLAVE: MAX BORN

Tras finalizar sus estudios de secundaria y pasar tres semestres en la universidad de su ciudad natal, Breslavia (hoy en Polonia), y otros dos de verano en Heidelberg y Zúrich, en 1904 Max Born (1882-1970) entró en la Universidad de Gotinga. Por entonces, una de las grandes luminarias de esta institución era el matemático David Hilbert (1862-1943), con quien Max estableció relaciones muy pronto y quien le encargó (lo que constituía un gran honor) que preparase las transcripciones de sus clases para que pudiesen ser consultadas por

otros alumnos en la sala de lectura; en 1905, el joven se convirtió en ayudante personal de Hilbert.¹ De hecho, una de las características de la carrera científica de Born fueron sus grandes dotes y conocimientos matemáticos, que, como veremos más adelante, resultaron decisivos a la hora de dar una forma matemática acabada a la mecánica cuántica que Heisenberg propuso en 1925.

Pese a sus habilidades en las ciencias exactas, Born no se inclinó por esta disciplina, sino que desde el principio mostró interés por la física teórica, en concreto por temas como la teoría del electrón (lo que le llevó a ser uno de los primeros físicos en introducirse en el campo de la relatividad especial), o como la elasticidad. De hecho, la separación entre matemática y física teórica no estaba muy bien definida todavía. «En aquella época —escribió en un breve texto autobiográfico (Born 1971 a: 33)—, las Matemáticas abarcaban también la Física matemática. Por ejemplo, Hilbert y Minkowski dirigían un seminario sobre Electrodinámica de los cuerpos en movimiento, en el que se trataban problemas que hoy se incluyen bajo el nombre de Relatividad.»

Una vez conseguido el título de doctor (defendió su tesis a finales de 1906), tuvo que realizar el servicio militar, del que fue licenciado en 1907. Decidió entonces irse a Inglaterra (llegó a Londres en abril), a Cambridge, para ampliar estudios con J. J. Thomson y Joseph Larmor: «Descubrí que la exposición del electromagnetismo hecha por Larmor apenas me enseñaba nada que no hubiera aprendido ya con Minkowski. Las demostraciones experimentales de J. J. Thomson eran, en cambio, brillantes y apasionantes» (Born 1971 a: 37).

A los seis meses, regresó a Breslavia, pero pronto recibió una oferta de Hermann Minkowski para volver a Gotinga y ayudarle con sus trabajos sobre la electrodinámica y la teoría de la relatividad especial. Born aceptó y llegó a esta ciudad en diciembre de 1908. No obstante, y por desgracia, Minkowski falleció muy poco después, en enero de 1909, tras una operación de apendicitis. No por ello, sin embargo, se frustró la carrera del joven en su *alma mater*. De hecho, su estatus como científico prosperó con rapidez y él se sumergió en los problemas de la física cuántica y en otros (como los mencionados en el capítulo 5 del primer tomo, con Theodore von Kármán, sobre

1. Sobre las relaciones de Born con Hilbert cuando era estudiante en Gotinga, véase Born (1978: 81-85).

la teoría atómica de cristales). Muestra de su creciente prestigio es que, en 1912, Michelson le invitó a dar una serie de conferencias sobre relatividad en Chicago, invitación que Born aceptó.

En 1914, justo al iniciarse la primera guerra mundial, fue llamado a Berlín, como profesor extraordinario (el puesto, recordemos, previo al de catedrático), para ayudar a Max Planck en sus obligaciones docentes, tarea a la que se incorporó en la primavera de 1915. Allí, además de servir a su país, Born intimó con Einstein. Recurriendo de nuevo a sus notas autobiográficas (Born 1971 a: 42-43):

En los aciagos días de la guerra, cuando resultaba difícil conseguir alimento suficiente para la familia, la amistad con Einstein constituyó un gran consuelo. Nos veíamos a menudo, tocábamos juntos sonatas para violín y discutíamos no solo cuestiones científicas, sino también la situación política y militar. [...] Desaprobábamos abiertamente las metas políticas del Gobierno alemán y estábamos convencidos de que habrían de conducir a una catástrofe. En este año [diciembre de 1915] completó Einstein su teoría de la relatividad general y la discutí conmigo. Quedé tan impresionado de la grandeza de su concepción que decidí no trabajar jamás en este campo. [...] Juntos vivimos la derrota militar, la Revolución en Berlín y la fundación de la República Alemana. Como estaba regida desde Weimar y no desde Postdam, abrigamos la esperanza de un futuro pacífico.

En 1919, y como Max von Laue estaba muy interesado en vivir en Berlín, permutaron sus respectivos puestos, lo que significó que Born se trasladó a Fráncfort, donde tuvo un pequeño laboratorio a su disposición. Allí, su ayudante, Otto Stern, realizó junto a Walther Gerlach los experimentos comentados en el primer tomo, cuando se analizó el efecto Stern-Gerlach.

Dos años más tarde, la Universidad de Gotinga le ofreció suceder a Peter Debye como catedrático y director del Instituto de Física, que englobaba tanto las ramas teórica como experimental de esta disciplina. Sin embargo, Born no estaba interesado en ocuparse de la parte empírica y convenció al Ministerio para que nombrara también a James Franck, para que se hiciera cargo de esta sección. La propuesta fue aceptada y así Gotinga contó a partir de entonces con tres institutos y tres catedráticos de Física: Robert Pohl, que ya estaba allí con anterioridad, Born y Franck.

Victor Weisskopf (1908-2002), un físico austriaco que desarrolló una brillante carrera, primero en Alemania y después y durante mucho más tiempo en Estados Unidos (también llegó a ser director general del CERN, el laboratorio europeo de física de altas energías ubicado en Ginebra), recordó en sus memorias el ambiente que reinaba en Gotinga en aquella época, así como la personalidad de algunos de sus principales protagonistas, Born y Franck en particular (Weisskopf 1991: 30):

Cuando llegué a Gotinga en 1928, encontré que mientras el régimen era mucho menos estricto que en Múnich [donde había estudiado con Sommerfeld], tenía otras ventajas. El profesor de física teórica de más alto rango era Max Born, uno de los principales contribuyentes al desarrollo de la mecánica cuántica. Se mantenía algo distante de sus estudiantes y tenía un enfoque bastante formal de la física. Cuando daba clases, tendía a expresar todo en términos matemáticos complejos. Aunque yo prefería un enfoque menos formal, su presencia me deslumbraba. Sabía que, a pesar de todas nuestras diferencias, era un gran hombre. Quería emularlo. De hecho, era muy amigable y me animaba. Pero cuando entré en contacto con la nueva mecánica cuántica, pensé que era una teoría esotérica muy alejada de la experiencia humana ordinaria. Yo todavía era muy joven e idealista, y mi dedicación a los asuntos humanos y sociales se había convertido en muy importante para mí. [...]

A pesar de varios encuentros positivos con Born, mi colaboración con él no fue tan estrecha como había esperado. Él era, por naturaleza, un hombre poco dado a abrirse a los demás en circunstancias normales. Poco después de mi llegada a Gotinga, había sufrido un infarto y era todavía más difícil acercarse a él. Aun así, tuvimos algún contacto. Born me llamó a su despacho y me dijo que estaba preparando un libro de texto sobre óptica. Sabía que yo había estado interesado en el comportamiento de la luz en cristales. Dijo que no había pensado todavía en el capítulo sobre ese tema y que necesitaba mi ayuda. Yo debía leer la literatura y preparar una sinopsis de lo que pensaba debería ser el capítulo. Lo escribí, pero el resultado fue tan diferente al estilo de Born que no podía incluirlo en el libro sin hacer muchos cambios. Cuando se publicó el libro [*Optik: Ein Lehrbuch der elektromagnetische Lichttheorie*, 1933] fui incapaz de reconocer el capítulo como algo que había escrito.

Los dos profesores seniors de física experimental eran James Franck y Robert Pohl. Me atrajo especialmente Franck, que había ganado el Premio Nobel en 1925 por demostrar que cuando los átomos colisionan,

ganan o pierden energía en saltos cuánticos. Al contrario que el solitario Born, Franck era cálido e interaccionaba de forma muy personal y amigable con sus estudiantes, que estaban muy impresionados con él. También tenía un grupo de activos jóvenes ayudantes, que nos resultaban muy accesibles y que eran profundamente devotos de su jefe. Constituía un gran placer discutir física con Franck. Me impresionaba su intuitiva comprensión de la ciencia, su misterioso sentido de la física y su maravillosa forma de trabajar. Parecía ser capaz de predecir con gran precisión el resultado de un experimento o de cálculos teóricos, incluso aunque no estuviese muy familiarizado con los métodos matemáticos implicados. Debido a esto decíamos que tenía un contacto directo con Dios. [...]

Además de los «grandes hombres» había en Gotinga muchos jóvenes en el nivel que en Estados Unidos se denomina profesores ayudantes. Aprendimos bastante de los miembros júnior de la Facultad, porque eran mucho más accesibles y nos relacionábamos con ellos socialmente. Recuerdo en particular a Walter Heitler, Lothar Nordheim y Gerhard Herzberg, quien después se instaló en Canadá y ganó el Premio Nobel por su trabajo en física molecular. Herzberg enseñaba un curso denominado «Introducción a la mecánica cuántica». Este campo era entonces tan nuevo que todavía no formaba parte de la mayoría de los programas de estudio de física, pero Herzberg era joven y estaba ansioso de enseñar los últimos desarrollos. Para mí, el curso de Herzberg significó muchísimo, porque me ayudó enormemente a familiarizarme con la nueva física.

Con Born, Franck y Pohl, además de los jóvenes que se congregaron a su alrededor, la física floreció en Gotinga. En el semestre de verano de 1932, por ejemplo, 206 de los 3.662 matriculados en la universidad de dicha ciudad, esto es el 5,6 %, estudiaban esa carrera, mientras que en toda Alemania lo hacían 2.299 alumnos, de un total de 126.381 universitarios, por consiguiente, el 1,8 %.

En Gotinga, Born se centró sobre todo en los problemas de la física cuántica, tarea en la que le ayudaron de manera considerable sus dos primeros ayudantes, un dúo extraordinario: Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg. Veamos la manera en que se refería a ellos en su autobiografía (Born 1978: 211):

La serie de los ayudantes [que tuve en Gotinga] fue bastante notable; a saber: Pauli, Heisenberg, Jordan, Hund, Hückel, Nordheim, Heitler y Rosenfeld. [...]

Pauli me fue recomendado por Sommerfeld. [...] Era un «wunder-kind» [«niño prodigio»]. [...] Nos encontramos por primera vez durante el verano de 1921, en Ehrwald, Tirol, estando yo de vacaciones. [...] Recuerdo que incluso en la escenografía montañosa más majestuosa, Pauli continuaba discutiendo problemas de física. No era posible ningún tipo de relajamiento mental en su compañía. Por supuesto, no fue un auténtico éxito como «ayudante». Trabajamos juntos en refinados problemas de la teoría de perturbaciones y su aplicación a la teoría cuántica de los átomos, y aprendí mucho de él, ciertamente más que él de mí. Pero apenas me ayudó en mi trabajo rutinario de enseñanza. Yo sufría entonces de ataques de asma y algunas veces tenía que permanecer en cama durante un día o dos. Se suponía entonces que Pauli debía dar mi clase, que era de 11 a 12 del mediodía. Pero a menudo lo olvidaba y si enviaba a nuestra criada para que se lo recordase a las diez y media, normalmente le encontraba todavía durmiendo.

Cuando Pauli se marchó, Sommerfeld le recomendó a Heisenberg.

No era menos «niño prodigio». Estaba entonces trabajando en su tesis doctoral sobre un problema de hidrodinámica; Sommerfeld le aconsejó que aceptase mi oferta para que respirase una atmósfera científica diferente. Cuando llegó (debió ser en octubre de 1922) parecía un sencillo muchacho campesino, con pelo corto y rubio, ojos claros y brillantes, y una expresión encantadora. Tomó sus deberes como ayudante mucho más seriamente que Pauli, y me fue de gran ayuda. Su increíble rapidez de comprensión y agudeza le permitía llevar a cabo una cantidad colosal de trabajo sin demasiado esfuerzo; completó su tesis sobre hidrodinámica, trabajó en problemas atómicos, en parte solo y en parte en colaboración conmigo, y me ayudó a dirigir a mis estudiantes de investigación.

2. EN BUSCA DE UNA «MECÁNICA CUÁNTICA»

Entre las investigaciones de Heisenberg en Gotinga se encontraba el estudio sistemático de átomos más complejos que el de hidrógeno (el único para el que funcionaban las teorías disponibles entonces). La idea era emplear los métodos perturbativos procedentes de la mecánica clásica y celeste. Al tratar los átomos complejos como sistemas

«múltiplemente periódicos» y aplicar al helio dichos métodos (que ya habían estudiado antes Born y Pauli) y las condiciones de cuantización del tipo $\int p_k \cdot dq_k = n_k \cdot h$, descubrió (Born y Heisenberg 1923) que los estados energéticos así calculados conducían a valores para la energía de ionización del átomo de helio que no coincidían con los datos experimentales. Sin embargo, el propio Heisenberg había encontrado con anterioridad (aunque no lo había publicado, simplemente se lo había comunicado a Sommerfeld por carta en octubre de 1922) que si tomaba $\int p_\phi \cdot d\phi = \frac{1}{2} \cdot h$ entonces se llegaba al resultado correcto para esa energía. La conclusión era difícilmente evitable: el método/modelo atómico de Bohr-Sommerfeld tenía sus límites y no parecía funcionar más allá del hidrógeno, mientras que los números cuánticos semienteros reforzaban su presencia.

El artículo de Born y Heisenberg que acabo de citar fue enviado para su publicación el 11 de mayo de 1923 y apareció en el número del *Zeitschrift für Physik* correspondiente al 9 de julio, el mismo mes en que Heisenberg defendió (el día 23) su tesis doctoral en Múnich. En septiembre, regresó a Gotinga, donde continuó sus investigaciones, a pesar del inestable ambiente político imperante entonces en Alemania. Sin embargo, si el mundo social vivía en un estado de zozobra, el de la física cuántica no le iba a la zaga. La situación era ya insostenible y cundía cada vez con mayor certeza la sensación de que era imprescindible algún cambio profundo. Entre quienes compartían con más virulencia esa impresión se encontraba el heterodoxo y genial Wolfgang Pauli, como muestra la carta que dirigió a Bohr el 21 de febrero de 1924, en la que daba rienda suelta a su innato y pronunciado espíritu crítico (reproducida en Stolzenburg, ed. 1984: 410-414):

En Gotinga ahora imaginan que, *aparte de todas las cuestiones de la estructura compleja*, la penetración de las órbitas en los centros atómicos [*Atomrest*] y los valores de los términos en las series de los espectros se ajustan mejor con valores de k semienteros que con valores enteros. Sobre esto, en primer lugar, querría decir lo siguiente: los físicos atómicos de Alemania se dividen en la actualidad en dos clases. No incluyo a Heisenberg (él tiene más sentido). La primera clase hace cálculos para un cierto problema con valores semienteros de los números cuánticos, y si [sus resultados] no están de acuerdo con el experimento calculan entonces utilizando números cuánticos enteros. Los otros hacen cálculos primero con números cuánticos enteros y si [sus resultados] no están de

acuerdo [con el experimento] entonces calculan con semienteros. Sin embargo, ambas clases de físicos tienen en común la característica de que, *a priori*, de sus teorías no se pueden deducir argumentos que digan para qué números cuánticos y para qué átomos se deberían hacer los cálculos con valores semienteros de los números cuánticos, y para cuales se debería calcular con valores enteros. Solo pueden decidir esto *a posteriori*, comparando con el experimento. Yo no puedo aceptar este tipo de física teórica, y me retiro a mi conducción calorífica en cuerpos sólidos. Sin embargo, sobre este tema todavía tengo que decir: 1. Contrariamente al punto de vista que usted adoptó en el otoño, ahora creo que, también en el caso del número cuántico k (no solo para j), no se reproducen aspectos esenciales de la realidad con la teoría de los sistemas múltiplemente periódicos. 2. Soy mucho más radical que los físicos atómicos «semienteros». Ya que no creo que las desviaciones de la realidad [que se encuentran] en los resultados de la aplicación de la teoría de los sistemas múltiplemente periódicos a los sistemas atómicos con más de un electrón se agoten simplemente insertando en las fórmulas finales de esta teoría números semienteros en lugar de enteros. 3. Me parece que la cuestión más importante es esta: *¿en qué medida se puede hablar realmente de las órbitas definidas de los electrones en los estados estacionarios?* Creo que en modo alguno se puede suponer que esto sea evidente en sí mismo [...] En mi opinión, Heisenberg da precisamente en el blanco cuando duda de la posibilidad de hablar de órbitas definidas.

Con esta última frase, Pauli hacía referencia a ideas que Heisenberg desarrollaría más adelante, sobre todo en un artículo que envió a la redacción de *Zeitschrift für Physik* el 13 de junio de 1924 (Heisenberg 1924 b). En ese trabajo afirmó (véase el tomo anterior *HFC-I*): «Se hace más claro que nunca que una explicación del efecto Zeeman anómalo debe traer consigo modificaciones profundas en nuestras concepciones teóricas cuánticas».²

El mismo día (es decir, el 13 de junio) que se recibió en el *Zeitschrift für Physik* el anterior artículo de Heisenberg, llegó otro de Born (lo que sugiere que fueron enviados al mismo tiempo desde Gotinga): lle-

2. Las relaciones científicas entre Pauli y Heisenberg en este período crítico se estudian en diversos lugares, dentro del contexto del desarrollo por parte de Heisenberg de la primera versión de la mecánica cuántica, la mecánica de matrices. No obstante, una referencia especialmente interesante es Serwer (1977).

vaba el significativo título de «Über Quantenmechanik» («Sobre la mecánica cuántica»; Born 1924). En él se utilizaba por primera vez la expresión «mecánica cuántica». «Este artículo —se lee en sus primeras líneas— contiene un intento de dar un primer paso hacia una teoría cuántica del acoplo [interacción entre “sistemas” separados, como los átomos], que tenga en cuenta algunas de las propiedades más importantes de los átomos (estabilidad, resonancia para frecuencias de transición, principio de correspondencia) y que surja de manera natural de las leyes clásicas. Esta teoría incluye la fórmula de dispersión de Kramers y revela una estrecha afinidad con la formulación de Heisenberg de las reglas para el efecto Zeeman anómalo.»

Obviamente, Heisenberg se benefició de todo esto: «En los seminarios que bajo la dirección de Max Born tuvieron lugar en Gotinga, en el semestre de verano de 1924 —recordó en su autobiografía (Heisenberg 1996: 122)—, se hablaba ya de una nueva mecánica cuántica, que más tarde debería ocupar el lugar de la antigua mecánica newtoniana y de la que, por el momento, solo en puntos particulares aislados se podían conocer los contornos. También en el semestre de invierno que le siguió, durante el cual trabajé de nuevo a temporadas en Copenhague y me esforzaba por estructurar una teoría que había desarrollado Kramers de los llamados fenómenos de dispersión, se concentraron nuestros esfuerzos no en deducir las relaciones matemáticas exactas, sino en averiguarlas partiendo de la similitud con las fórmulas de la física clásica».

En esta cita, Heisenberg menciona que trabajó por temporadas en Copenhague y como este aspecto de su biografía es particularmente importante me detendré un instante en él.

Werner llegó a la capital danesa el 15 de marzo de 1924, en lo que constituía su primera visita. La cosa era diferente en lo que se refiere a Bohr, a quien había conocido bastante antes, cuando asistió (le llevó Sommerfeld, que cubrió sus gastos) al curso que dictó el físico danés entre el 12 y el 22 de junio de 1922 en Gotinga, ocasión financiada con los intereses del fondo (cien mil marcos) que había dejado en 1906 el matemático Paul Wolfskehl para quien demostrase el teorema de Fermat. Con sus preguntas, Heisenberg llamó la atención del ponente, que reconoció su talento, se entrevistó con él en solitario y le invitó a visitar su Instituto. Aquel primer viaje a Copenhague no fue muy largo (unas dos semanas), aunque sí intenso (véase Cassidy 1992: 172-176), y su anfitrión le atendió con esmero: la fama del discípulo de

Sommerfeld y colaborador de Born le había precedido. Pronto regresó para una estancia más prolongada: a principios de julio, Bohr le escribió para informarle de que la Junta de Educación Internacional de la Fundación Rockefeller le había concedido mil dólares para que trabajase en Copenhague durante un año. Sin embargo, la joven estrella de la física cuántica era un bien muy apreciado y Born no estaba dispuesto a renunciar a él. Llegó a un acuerdo con Bohr: como Born iba a estar el semestre de invierno de 1924-1925 en Estados Unidos, Heisenberg podía pasar ese período en Dinamarca, pero debía regresar a Gotinga antes del 1 de mayo de 1925. De esta manera, Werner se encontraba en una posición especialmente favorable, ya que podía combinar dos tradiciones, dos estilos científicos diferentes, pero complementarios. «El énfasis en Gotinga estaba más en el lado matemático, en el lado formal —señaló Heisenberg en la entrevista que mantuvo con Thomas Kuhn en febrero de 1963 durante el proyecto «Sources for History of Quantum Physics»³—, mientras que en Copenhague estaba más en el lado, yo diría, filosófico. Esto era cierto en el siguiente sentido: para Born, una descripción de física debería ser siempre una descripción matemática, de manera que su atención estaba concentrada en la idea de cómo el esquema matemático describiría esas curiosas cosas que vemos en nuestros experimentos. La aproximación de Bohr en Copenhague era diferente. Bohr diría: “Bien, ¿cómo puede evitar la naturaleza las contradicciones? Ahora tenemos la imagen ondulatoria, conocemos la interferencia, sabemos del efecto Compton, sabemos todo esto, pero ¿cómo puede poner el Señor orden en todo esto?”. Y así, lo primero que quería era comprender cómo se podían evitar las contradicciones, y diría: “Solamente cuando hayamos comprendido esto suficientemente, podremos esperar ponerlo en forma matemática”.» Heisenberg, con su mecánica matricial, en la que la forma matemática (el álgebra no conmutativa de matrices) y el enfoque filosófico (basar la teoría solo en magnitudes observables) constituían una unidad indivisible, combinó los estilos de Born y Bohr, el físico-matemático-formalista y el físico-filosófico, en un grado difícilmente igualable en la práctica científica.

Pero no avancemos tanto. El 24 de julio, en Gotinga, Heisenberg dio un nuevo paso en su carrera académica, al superar (esta vez sin

3. En el resto de este capítulo, cuando utilice citas de este proyecto, simplemente añadiré, entre paréntesis, «Sources».

ningún problema) las pruebas de habilitación que le daban derecho a enseñar (como profesor no titular) en cualquier universidad alemana. Al día siguiente, se fue a pasar tres semanas en los montes bávaros. En septiembre, estaba de vuelta en Copenhague, con lo que rompía el acuerdo alcanzado. Allí, no solo trabajó con Bohr, sino que también lo hizo con Hendrik Kramers, con quien extendió la teoría de la dispersión que este había obtenido antes (Kramers y Heisenberg 1925).

Como anuncié en el capítulo 11 del primer tomo, la teoría de la dispersión de Kramers desempeñó un papel muy destacado en la génesis de la mecánica de matrices de Heisenberg. Explicar la manera en que lo hizo constituye una tarea tan exigente y compleja como plural; pretendo tan solo resaltar algunos puntos que ayuden a entender la aportación de Heisenberg.

Como preparación, veamos antes lo que el propio Heisenberg (1979 b: 31) escribió en uno de sus ensayos posteriores:

En el cálculo de una fórmula para la dispersión, Kramers se dejó guiar por la idea de que los armónicos se corresponden con osciladores armónicos virtuales en el átomo. Kramers y yo analizamos luego también fenómenos de difusión en los que la frecuencia de la luz dispersada es distinta de la de la luz incidente. El cuanto de luz dispersado es aquí diferente del cuanto incidente porque durante la dispersión el átomo pasa de un estado a otro. Raman acababa de descubrir tales fenómenos en los espectros de bandas. Al intentar elaborar fórmulas para la deflexión, en estos casos era obligado hablar no solo de las probabilidades de transición de Einstein, sino también de las amplitudes de transición; había que asignar fases a estas amplitudes (por ejemplo, la amplitud para pasar del estado m al n por la de n a k) y sumar luego sobre los estados intermedios n ; solo así llegábamos a fórmulas razonables para la deflexión.

En esta cita, aparecen los siguientes elementos que me interesa destacar: (1) se asocia (conforme a una, por entonces, ya larga tradición) la radiación con osciladores (el que sean «virtuales», en el sentido de Bohr-Kramers-Slater [véase *HFC-I*], no es excesivamente importante en este contexto); (2) esos osciladores se representan por «armónicos», lo que permite desarrollarlos en series de Fourier (de ahí la presencia continua de expresiones —por ejemplo, para momen-

tos eléctricos o magnéticos— del tipo $\Sigma e^{2\pi i \nu t}$); (3) osciladores y radiación, tratados de la manera anterior, conducen a fórmulas en las que aparecen amplitudes de transición entre estados, las cuales obligan a sumar estados intermedios.

Es cierto que se puede argumentar que nada de esto era nuevo, pero Heisenberg no tenía demasiada experiencia en este campo y los resultados a los que llegó con Kramers eran lo bastante buenos como para animarle a aprovechar algunos de sus elementos. Algunos, pero desde luego no todos, en tanto que, hay que insistir en este punto, su planteamiento y desarrollo dependían de los de Bohr-Kramers-Slater. Ellos mismos lo reconocían así en el resumen de su artículo (Kramers y Heisenberg 1925: 681): «El tratamiento se basa en una extensión del punto de vista propuesto recientemente por Bohr, Kramers y Slater». Lo cierto es que la influencia del trabajo de estos tres físicos tuvo aspectos positivos, pero también otros claramente negativos, como se encargó de señalar en alguna ocasión, con su habitual virulencia, Pauli.⁴

Abundan las anécdotas relativas al carácter de este. Se cuenta, por ejemplo, que siendo todavía un estudiante en Múnich asistió a un seminario que dio Einstein y contribuyó a la discusión posterior con la siguiente manifestación: «¿Saben?, lo que dijo Herr Einstein no es tan estúpido». En otra ocasión, en una conversación con un colega, este le pidió que, por favor, fuese más lento, porque no podía pensar tan rápido como él, a lo que Pauli replicó: «No me importa que usted piense con lentitud, pero objeto que publique con más rapidez de como piensa». De un artículo, cuyo contenido era bastante oscuro, dijo una vez: «No solamente no es verdad lo que dice, ¡sino que ni siquiera está equivocado!» («*Das ist nicht nur nicht richtig, es*

4. Una buena muestra de los sentimientos de Pauli al respecto es lo que escribió a Kramers el 27 de julio de 1925 (Stolzenburg, ed. 1984: 440, 443): «En general, considero como un magnífico golpe de suerte que la interpretación de Bohr, Kramers y Slater haya sido refutada tan rápidamente por los bellos experimentos de Geiger y Bothe, al igual que por los publicados recientemente por Compton. Es verdad que el propio Bohr ya no apoyaría esta interpretación, incluso si no se hubiesen realizado estos experimentos. Pero muchos físicos excelentes (tales como, p. ej., Ladenburg, Mie, Born) la habrían apoyado, ¡y el desafortunado artículo de Bohr, Kramers y Slater podría acaso haberse convertido durante un largo tiempo en un obstáculo al progreso de la física teórica! Ya que se mueve en una dirección completamente falsa: *no es el concepto de energía el que debe ser modificado, sino más bien los conceptos de movimiento y fuerza*».