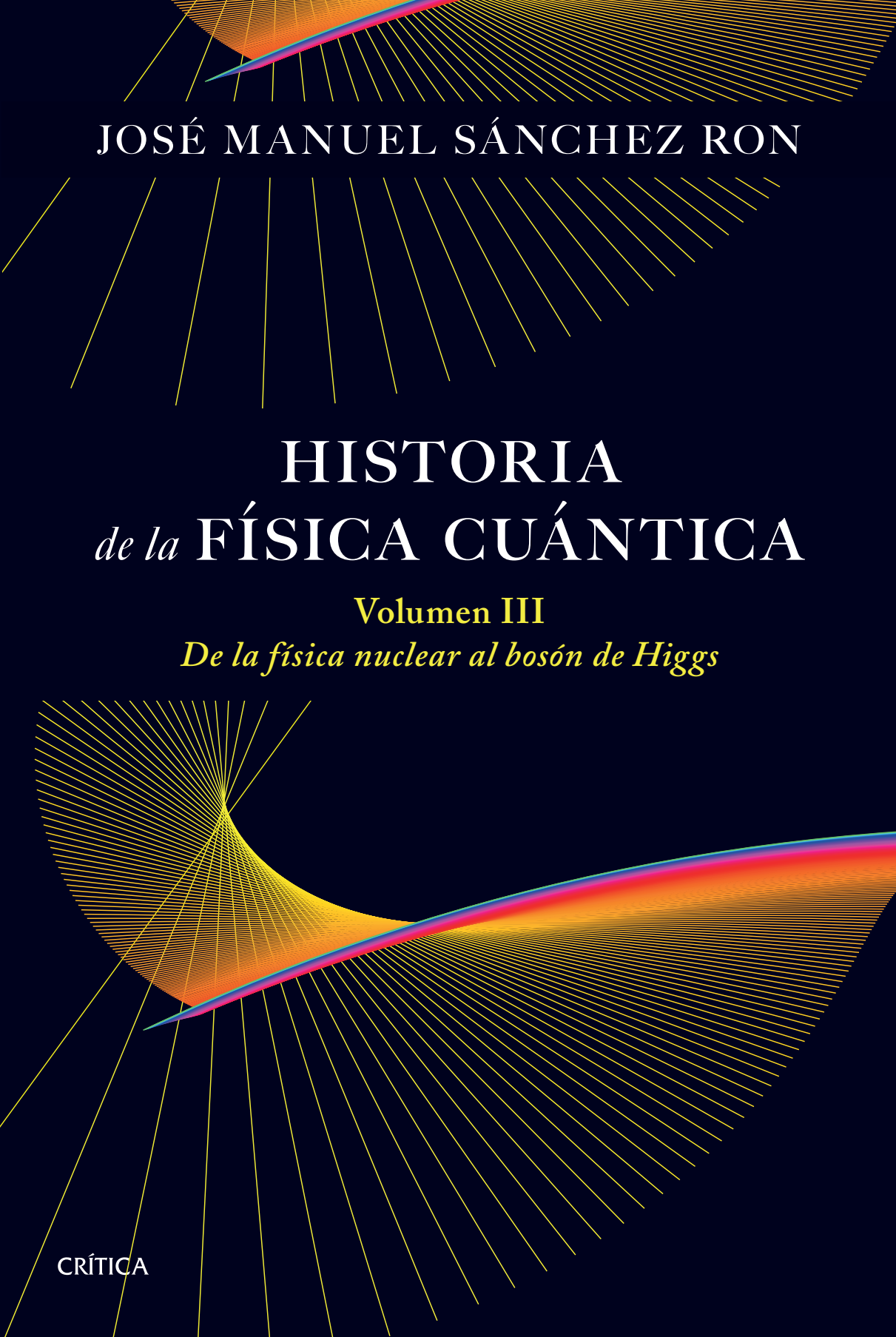




JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON

HISTORIA
de la FÍSICA CUÁNTICA

Volumen III

De la física nuclear al bosón de Higgs

CRÍTICA

HISTORIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA VOLUMEN III

De la física nuclear al bosón de Higgs

José Manuel Sánchez Ron

CRÍTICA

BARCELONA

Primera edición: noviembre de 2025

Historia de la física cuántica. Volumen III

De la física nuclear al bosón de Higgs

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. Diríjase 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

Iconografía: DAU, Grupo Planeta

El editor hace constar que se han realizado todos los esfuerzos para localizar y recabar las autorizaciones de los propietarios del copyright de las imágenes que ilustran esta obra, manifiesta la reserva de derechos de la misma y expresa su disposición a rectificar cualquier error u omisión en futuras ediciones.

© 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: 978-84-9199-821-1

Depósito legal: B. 18.506-2025

Impresión y encuadernación: Huertas Industrias Gráficas, S. A.

Printed in Spain - Impreso en España



La mecánica cuántica y la electrodinámica

Aunque de manera formal esta tercera parte de la historia de la física cuántica cubre el período que va del descubrimiento del neutrón al del bosón de Higgs, es preciso ocuparse de desarrollos que tuvieron lugar con anterioridad y también, como se verá en otros lugares, mencionar otros posteriores a 1964. Así, este primer capítulo está protagonizado por trabajos efectuados antes de 1932, que fueron imprescindibles para otros avances subsiguientes, como la teoría de la desintegración β y la formulación de la electrodinámica cuántica a finales de la década de 1940.

1. PASCUAL JORDAN, PAUL DIRAC Y EL ORIGEN DE LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

Una vez que se dispuso de la mecánica de Heisenberg-Schrödinger-Dirac, era inmediato intentar aplicar sus postulados a una de las dos interacciones por entonces conocidas: la electromagnética. Esto es, tratar de construir una «electrodinámica cuántica», tarea que se inició casi de inmediato, pero que resultó extremadamente complicada. De hecho, no se pudo completar hasta finales de la década de 1940, con los trabajos de Schwinger, Feynman y Tomonaga. La otra fuerza, la gravitacional, planteaba, y lo sigue haciendo, problemas mucho más serios.

Ese proceso obligó de entrada a tomar una decisión: ¿hacer hincapié en la noción de campo, esto es, cuantizar el campo electromagné-

tico, o considerar a este como un conjunto de partículas, los fotones, que además se creaban y aniquilaban? Como veremos, se utilizaron ambos planteamientos, aunque no siempre resulte clara la distinción entre ellos. Lo que sí quiero resaltar es que, implícito a los esfuerzos por realizar la primera de estas opciones, estaba construir un formalismo más general, una «teoría cuántica de campos», que fuese más allá de la fuerza electromagnética, algo que resultó especialmente útil cuando se trataron las interacciones fuerte y débil.

Pascual Jordan fue el primero en llamar la atención sobre la importancia de aplicar la nueva mecánica a un sistema de infinitos grados de libertad, o lo que es lo mismo, cuantizar un campo (de ahí «teoría cuántica de campos», marco general que trata no solo de la interacción electromagnética). De hecho, lo hizo en el famoso *Dreimännerarbeit* (Born, Heisenberg y Jordan 1926; véase HFC-2), en la parte que él escribió. Sin embargo, la relevancia de lo que pretendía no fue apreciada en un primer momento. En una carta que envió a Bartel Leendert van der Waerden (1803-1996) el 10 de abril de 1962, Jordan defendía su pionera contribución y se quejaba de la escasa atención que había recibido inicialmente:¹

1. Citada en Duncan y Janssen (2008: 178). En su magnífica historia de la electrodinámica cuántica, Silvan Schweber (1994: 5-6) defendió con energía el papel de Jordan: «Pascual Jordan es el héroe anónimo entre los creadores de la mecánica cuántica. Partes importantes de los dos artículos que escribió con Born y Heisenberg que, siguiendo la idea inicial de Heisenberg, elaboraban la mecánica matricial fueron contribución de Jordan. Análogamente, él fue responsable de establecer los fundamentos de la teoría cuántica de campos (Born y Jordan 1926; Born *et al.* 1926; Jordan 1927; Jordan y Klein 1927; Jordan y Wigner 1928; Jordan y Pauli 1928). El hecho de que a comienzos de la década de 1930 sus intereses se desplazaran a problemas en biología, psicología, matemáticas, geología y cosmología, y que después de esto sus contribuciones fueran de naturaleza más especulativa, y en ocasiones polémicas, y nunca alcanzaron la importancia de sus anteriores trabajos en mecánica cuántica, probablemente fue un factor en la subsiguiente valoración que hizo de él la comunidad. Su dificultad en comunicarse con otros (era muy tartamudo) fue otro. Fue el único de los principales protagonistas del desarrollo de la teoría cuántica que no asistió al consejo Solvay de 1927. Su cooperación con los nazis en las décadas de 1930 y 1940 sin duda también contribuyeron a su falta de reconocimiento. [...] Sin embargo, como en cierta ocasión dijo Dirac: “Uno no debería juzgar el mérito de un hombre por su peor trabajo; uno debe juzgarlo siempre por lo mejor que ha hecho”». Una referencia importante, tanto para este capítulo como para los que siguen, es Pais (1986).

Recuerdo que en la medida en que advirtieron estas cuestiones otros teóricos de Gotinga [además de Born y Heisenberg], [Yakov] Frenkel, por ejemplo, consideraban, expresándolo a menudo en conversaciones, que mi opinión de que el campo electromagnético y el campo de Schrödinger tenían que ser cuantizados [...] era una exageración más o menos imaginaria de un lunático. Esto cambió cuando Dirac [1927] cuantizó tanto el campo electromagnético como el campo de las ondas de materia. Todavía recuerdo cómo Born, que había sido el primero en recibir una separata del artículo relevante de Dirac, me lo enseñó y lo miró inicialmente sacudiendo su cabeza. Cuando le indique que yo había predicado la misma idea desde nuestro *Dreimännerarbeit*, al principio se mostró sorprendido, pero luego estuvo de acuerdo. Heisenberg también dejó de lado su escepticismo temporal, aunque no fue hasta considerablemente más tarde que él mismo comenzó a trabajar hacia una teoría cuántica de campos (o «electrodinámica cuántica») en el artículo que publicó con Pauli [Heisenberg y Pauli (1929, 1930)], que seguía a mis tres artículos con Pauli [Jordan y Pauli (1928)], [Oskar] Klein [Jordan y Klein (1927)] y Wigner [Jordan y Wigner (1928)].

El artículo de Dirac al que se refería Jordan es el que de manera habitual se considera como el primero en intentar desbrozar el camino hacia una electrodinámica cuántica. El científico inglés, por entonces ya muy respetado, no tuvo los problemas de su colega alemán. Su trabajo, publicado en 1927 (un año antes que su teoría relativista del electrón; véase *HFC-2*), recibió atención de forma inmediata. Apareció en *Proceedings of the Royal Society*, donde se recibió el 2 de febrero y fue presentado por Niels Bohr, con el título «The quantum theory of the emission and absorption of radiation» (Dirac 1927 a). El propio autor del texto (1983: 47-48) resumió el contenido de su ensayo con las siguientes palabras: «Desarrollé una teoría para la interacción de un sistema atómico con la radiación electromagnética, considerando la radiación electromagnética como una perturbación externa que podía conducir a transiciones del sistema atómico en las que se podía absorber un cuanto de energía, o, alternatively, emitir un cuanto de energía, con un salto de un estado a otro». En definitiva, dedujo los coeficientes de emisión y absorción que Einstein había introducido en 1916 (véase *HFC-1*). Fueron los primeros factores de este tipo determinados de acuerdo con la nueva mecánica. Desde este punto de vista, se puede decir que los orígenes de la electrodinámica cuántica también

están ligados a la noción de creación y aniquilación de fotones. En el modelo atómico de Bohr, los electrones podían emitir (esto es, «crear») fotones cuando saltaban de una órbita a otra inferior de menor energía, y absorber (esto es, «aniquilar») fotones para pasar de una órbita a otra de energía mayor.²

De manera más concreta, en la «Introducción y sumario» del artículo, Dirac (1927 a: 243-244) explicaba:

La nueva teoría cuántica, basada en la suposición de que las variables dinámicas no obedecen la ley conmutativa de la multiplicación, ha sido desarrollada ahora suficientemente como para formar una teoría de dinámica razonablemente completa. Se puede tratar matemáticamente el problema de cualquier sistema dinámico compuesto por un número de partículas con fuerzas instantáneas actuando entre ellas, siempre que se pueda describir por una función hamiltoniana, y es posible interpretar físicamente la matemática mediante un método bastante general.³ Por otra parte, hasta el presente no se ha hecho prácticamente nada en electrodinámica cuántica. Las cuestiones del correcto tratamiento de un sistema en el que las fuerzas se propagan con la velocidad de la luz, en lugar de instantáneamente, de la producción de un campo electromagnético por un electrón que se mueve, y de la reacción de este campo en el electrón no se han tocado todavía. Además, existe una seria dificultad para hacer que la teoría satisfaga todos los requisitos del principio restringido de la relatividad, [...] Sin embargo, parece posible construir una razonablemente satisfactoria teoría de la emisión de radiación, y de la reacción del campo de radiación en el sistema emisor, en base a una cinemática y dinámica que no son estrictamente relativistas. Este es el principal objetivo del presente artículo. La teoría es no relativista únicamente en base a que el tiempo se considera un número c , en lugar de ser tratado de forma simétrica con las coordenadas espaciales. La variación relativista de la masa con la velocidad se toma en cuenta sin dificultad.

2. Como explicó Joan Bromberg (1976), antes de la mecánica cuántica ya se consideró en astrofísica la creación y aniquilación de partículas.

3. Una forma sencilla de introducir la función hamiltoniana, o mejor, el hamiltoniano, H , que en mecánica clásica describe el estado de un sistema en términos de las variables posición y momento, es recordar que la ecuación de Schrödinger se puede escribir como $E\psi = H\psi$. El hamiltoniano cuántico es un operador autoadjunto que representa la energía total del sistema.

La idea subyacente a la teoría de Dirac era, según él, «muy simple» (no lo era en absoluto). Consistía en

considerar un átomo interactuando con un campo de radiación, que podemos suponer confinado en un contenedor de manera que posea solamente un conjunto discreto de grados de libertad. Descomponiendo la radiación en sus componentes de Fourier, es posible considerar que la energía y fase de cada uno de los componentes son variables dinámicas que describen el campo de radiación.

Demuestra así que

mediante una elección adecuada de la energía de interacción para las partículas, se puede hacer que el hamiltoniano que describe la interacción del átomo y las ondas electromagnéticas sea idéntico al hamiltoniano del problema de la interacción del átomo con un conjunto de partículas que se mueven con la velocidad de la luz y satisfacen la estadística de Bose-Einstein.⁴

De esta manera conseguía «una armonía completa entre las descripciones de la interacción mediante ondas y cuantos de luz» (Dirac 1927 a: 245).⁵

El hamiltoniano que utilizaba estaba compuesto de tres partes: H^0 , correspondiente al átomo, que incluía el campo electrostático; H^{rad} , que dependía de las variables de la radiación y H^1 , que expresaba la interacción entre ambos. Tratando H^1 como una perturbación, con-

4. Recuérdese que una onda de luz elemental es equivalente a un oscilador armónico.

5. En un artículo en el que recordaba el origen de la teoría cuántica de campos, Dirac (1983: 49) insistió en este punto: «En lugar de trabajar con una imagen de fotones como partículas, se puede en su lugar utilizar los componentes del campo electromagnético. Se obtiene entonces una armonía completa entre las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz. Se puede tratar la luz como compuesta de ondas electromagnéticas, cada onda considerada como un oscilador; alternatively, se puede tratar la luz como compuesta de fotones, siendo los fotones bosones y cada estado del fotón correspondiendo a uno de los osciladores del campo electromagnético. Se obtiene entonces la reconciliación de las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz. Son simplemente dos descripciones matemáticas de la misma realidad física».

seguía deducir los coeficientes de absorción y emisión, vinculados, como he señalado, a la creación y aniquilación de fotones.

Este último punto fue muy importante. Aparecía de manera explícita, aunque como todo en el artículo de Dirac no de forma demasiado transparente, en la sección 6, titulada «Application to Light-Quanta», en donde se lee (Dirac 1927 a: 260-261):

El cuanto de luz tiene la peculiaridad de que aparentemente deja de existir cuando está en uno de sus estados estacionarios, a saber, el estado cero, en el que su momento, y por consiguiente también su energía, son cero. Cuando un cuanto de luz es absorbido puede considerarse que salta a este estado cero, y se puede considerar que cuando uno es emitido pasa a uno en el que está físicamente en evidencia, de manera que parece que ha sido creado. Como no existe límite en el número de cuantos de luz que pueden ser creados de esta manera, debemos suponer que existe un número infinito de cuantos de luz en el estado cero.

Este procedimiento es el que más tarde se denominó «segunda cuantización». Dirac lo introdujo para bosones y posteriormente Pascual Jordan y Eugene Wigner lo extendieron a los fermiones (Jordan y Wigner 1928). La transformación que desarrollaron (y que lleva su nombre: «transformación de Jordan y Wigner»), permitió construir operadores de creación y aniquilación fermiónicos, lo que implica que el número de partículas no es constante.

Ahora bien, el procedimiento de Dirac tenía limitaciones importantes. Una de ellas era que los «procesos radiactivos del tipo más general, considerados por Einstein y Ehrenfest [(1923)], en los que toman parte simultáneamente más de un cuanto de luz, no están permitidos en la presente teoría» (Dirac 1927: 261). Existían también otras trabas que impedían que su propuesta pudiese ser considerada como una electrodinámica cuántica coherente. Por ejemplo, la cuantización se aplicaba tan solo a la componente de radiación del campo, sin tener en cuenta la interacción coulombiana entre las cargas y, además, las partículas se consideraban no relativistas.⁶

6. Para explicaciones más detalladas de este trabajo de Dirac, véanse Pais (1986: 334-338), Schweber (1994: 23-32) y Kojevnikov (2002).

En cualquier caso, se trató de un logro considerable. En un texto publicado en un libro dedicado a la memoria de Wolfgang Pauli, Gregor Wentzel (1960: 49) señalaba:⁷

Hoy puede ser difícil apreciar la novedad y atrevimiento de la aproximación de Dirac al problema de la radiación. Durante la década precedente se había convertido en tradición pensar que el principio de correspondencia de Bohr era la guía suprema en estas cuestiones, y, de hecho, los esfuerzos para formular este principio de manera cuantitativa habían conducido a las ideas esenciales que prepararon el descubrimiento de la mecánica matricial de Heisenberg. Un aspecto nuevo del problema apareció cuando fue posible, mediante la teoría mecánico-cuántica de perturbaciones, tratar las transiciones inducidas por campos ondulatorios externos dados, p. ej., el efecto fotoeléctrico. Las transiciones calculadas de esta manera podían ser interpretadas como causadas por procesos de absorción, pero la «reacción sobre el campo», a saber, la

7. Gregor Wentzel (1898-1978) formó parte del selecto grupo de los estudiantes de Arnold Sommerfeld en Múnich. En 1916, se matriculó en la Universidad de Friburgo con la idea de convertirse en astrónomo, pero la primera guerra mundial interrumpió sus planes, al ser llamado a filas en 1917. Después del armisticio, regresó a Friburgo, pero en el otoño de 1919 se trasladó a Greifswald, donde estudió sobre todo matemáticas, mientras aprendía física por su cuenta. La lectura del libro de Hermann Weyl, *Raum, Zeit und Materie (Espacio, tiempo y materia)* le impresionó y de acuerdo con el consejo de uno de sus profesores en Greifswald (Rudolf Seelinger, quien se había doctorado con Sommerfeld) y con su ayuda, fue admitido por este último en Múnich, ciudad a la que llegó en noviembre de 1920. Allí no solo se doctoró (1921) y obtuvo su habilitación (1922), sino que conoció a Heisenberg y a Pauli. Permaneció allí como profesor no titular hasta 1926, cuando se incorporó como docente asociado a la Universidad de Leipzig, donde Heisenberg era catedrático. En 1928, sucedió a Schrödinger cuando este dejó su cátedra en la Universidad de Zúrich, prácticamente al mismo tiempo que Pauli se incorporaba a la ETH en un puesto similar. En 1948, aceptó la oferta de la Universidad de Chicago, donde estaba Fermi, y permaneció en ella hasta su jubilación en 1970. En 1943, publicó uno de los textos canónicos sobre la teoría cuántica de campos: *Einführung in die Quantentheorie der Wellenfelder (Introducción a la teoría cuántica de los campos ondulatorios)*, que el físico suizo Josef-Maria Jauch (1914-1974), autor de notables trabajos sobre electrodinámica cuántica, tradujo al inglés junto a Charlotte Houtermans en *Quantum Theory of Fields* (1949). Esta versión incluía un apéndice debido al propio Jauch, quien escribió a su vez un libro importante, *The Theory of Photons and Electrons. The Relativistic Quantum Field Theory of Charged Particles with Spin One-half* (con Fritz Rohrlich; 1955), así como otro sobre los fundamentos de la teoría cuántica, *Foundations of Quantum Mechanics* (1968).

desaparición de un fotón, no la describía esta teoría, ni existía posibilidad alguna, en esta construcción, de comprender el proceso de emisión espontánea. Aquí, el principio de correspondencia todavía parecía indispensable, un elemento bastante ajeno (una «mano mágica» como lo denominó Sommerfeld) en una, por otra parte, teoría muy coherente. En este punto, la explicación de Dirac en términos de la matriz q llegó como una revelación. Se volvían a obtener resultados conocidos, pero de una forma completamente unificada. La nueva teoría estimuló más ideas sobre la aplicación de la mecánica cuántica al campo electromagnético, al igual que a otros campos.

A ese artículo de Dirac le siguió otro, que la Royal Society recibió el 4 de abril, presentado en esta ocasión no por Bohr, sino por Ralph Fowler. Llevaba por título «The quantum theory of dispersión» (Dirac 1927 b) y en cierto sentido completaba su desembarco en el campo de la electrodinámica cuántica.

Antes de abandonar la contribución de Dirac al nacimiento de esta rama de la disciplina, voy a referirme a algo de lo que él mismo dejó constancia en unas conferencias que pronunció en 1943 en el Institute for Advanced Study de Dublín. Esta institución había sido creada en 1940 a instancias del «taoiseach» (jefe de Gobierno de la República de Irlanda), por el ministro de Educación, Éamon de Valera (1882-1975), y acogió a Erwin Schrödinger después de que este abandonase Austria tras la anexión (el *Anschluss*) de esta por Alemania en 1938. Las ponencias de Dirac trataron sobre electrodinámica cuántica y justo al comienzo resumió el que era su «método científico» (Dirac 1943: 1):

Las presentes conferencias, como las de Eddington, se refieren a la unificación de la relatividad con la teoría cuántica, pero tratan la cuestión desde un punto de vista diferente.⁸ El método de Eddington requie-

8. Aquí, Dirac se refiere a las conferencias que Eddington pronunció también en el Institute for Advanced Study de Dublín, ignoro si al mismo tiempo que las suyas. De hecho, el texto de sus intervenciones (1943) se publicó como número 1 de la serie A de *Communications of the Dublin Institute for Advanced Studies*, mientras que el de las charlas de Eddington, «The Combination of Relativity Theory and Quantum Theory», apareció el mismo año en la siguiente entrega de esa publicación. En la «Introducción», Eddington (1943: 1-2) explicaba lo que pretendía: «¿Cómo debemos proceder para extender la teoría de la relatividad para que inclu-

re primero tener las ideas físicas claras y construir luego gradualmente un esquema matemático. El método presente es justamente el contrario: lo primero es establecer un esquema matemático y luego intentar obtener su interpretación física. Este método debería ser el más fácil, porque toma primero la tarea más fácil. Debería ser más fácil obtener el esquema matemático, porque para este propósito el número de cosas entre las que se debe escoger es pequeño. Para ser aceptable, el esquema debe ser nítido y bello, y el número de esquemas con estas características que puede ofrecer la matemática pura es muy limitado. Cuando se ha elegido el esquema matemático, la siguiente tarea de encontrar su significado físico es considerablemente más fácil, debido a la existencia de muchos puntos de contacto entre la matemática y la física.

Trataremos el problema de la interacción de un número de partículas cargadas con el campo electromagnético, y nuestro objetivo será establecer un método para calcular resultados experimentales, tales como la probabilidad de ciertas partículas, que de alguna manera bien inciden o son difundidas, con acaso la emisión y absorción de algunos fotones. El método debe estar de acuerdo con los principios generales de la física, tales como las leyes de conservación y la invariancia de Lorentz, y con las leyes de la teoría cuántica según son entendidas.

La línea de ataque será comenzar con el esquema matemático de la teoría cuántica, tal y como se conoce para el dominio no relativista y tratar de extenderlo para hacerlo relativista. Encontraremos que existe una manera natural de hacer esto. Pero cuando llegamos a considerar la interpretación física del esquema matemático, encontraremos que la ex-

ya la física del microcosmos? ¿Qué caminos se han dejado sin explorar? [...] Existen dos caminos sin explorar. Descuidamos la teoría *estadística* de la relatividad. Considerábamos las transformaciones de la relatividad de cantidades exactas, pero no desarrollamos seriamente la correspondiente teoría relativista de distribuciones de probabilidad. En segundo lugar, descuidamos el *espín*. [...] En 1928 Dirac abrió el camino del espín, y lo seguimos rápidamente. Mi camino se bifurcó de los otros poco después del comienzo. Los otros tomaron atajos para las cosas que más les interesaban, y produjeron una teoría adaptada a ciertas partes de la física que son campos de intensa actividad experimental. Pero durante catorce años yo nunca dudé de que la dirección que tomé en 1928 era la que conducía a unificar la relatividad y la teoría cuántica». En este punto, mencionaba su libro *Protons and Electrons* (Eddington 1936), «basado en la extensión del espín a la teoría de la relatividad». El contenido de sus presentaciones en Dublín formó parte posteriormente de los capítulos VI-VIII de su obra póstuma (Eddington 1953), *Fundamental Theory*, editada por Edmund Whittaker.

tensión natural de la teoría no relativista conduce a la aparición de energías y probabilidades negativas. Se hace necesario realizar algunas suposiciones nuevas, que resultan en que la interpretación es algo menos directa de lo que uno desearía, pero que está de acuerdo con todos los requisitos esenciales.

2. ROBERT OPPENHEIMER

La senda abierta por Dirac y Jordan fue pronto seguida por los trabajos, mencionados con anterioridad, de Jordan y Klein (1927), Jordan y Pauli (1928) y Jordan y Wigner (1928).⁹ También por los de otros científicos, como Heisenberg, Weisskopf, Bethe, Fermi y Oppenheimer. De todos ellos, ahora solo me voy a detener en Robert Oppenheimer (1904-1967), no tanto por la importancia de sus contribuciones, que desde luego no fueron menores, sino porque hacerlo así es una forma de presentar a un personaje que, como se verá, desempeñó un papel fundamental, tanto en la introducción de la física cuántica en Estados Unidos, como en el Proyecto Manhattan, en el que se fabricaron las primeras bombas atómicas, y que sufrió más adelante una persecución política.¹⁰ Además, las etapas iniciales de su biografía sirven también para conocer algunos aspectos de las relaciones entre físicos cuánticos en las décadas de 1920 y 1930.

J. Robert Oppenheimer nació en Nueva York, en el seno de una familia de origen judío. Su padre, Julius, vino al mundo en 1871 en Hanau (Alemania), pero emigró a Estados Unidos a la edad de diecisiete años para trabajar en un negocio de importación de textiles, propiedad de unos familiares. Más tarde, él tuvo su propia empresa, también especializada en la compraventa de paños en el extranjero, en concreto de lino. En 1903, se casó con una joven artista de Baltimore, Ella Friedman. Del bienestar económico de la familia da idea el hecho de que poseyeran cuadros de Rembrandt, Cézanne, Picasso y un Van Gogh, *Campo de trigo cerrado con sol naciente*, que Robert heredó y vendió en 1965 a la escritora Florence Gould por un

9. Los principales trabajos sobre la electrodinámica cuántica se reproducen en Schwinger, ed. (1958). Véase, asimismo, Miller (1994).

10. En el capítulo 6 de *HFC-2* ya avancé algo de Oppenheimer.

millón de dólares (en 1985, se subastó en Sotheby's de Nueva York y alcanzó los 9,9 millones de dólares).¹¹

Completó su educación universitaria en Harvard, donde ingresó en septiembre de 1922 y se graduó en junio de 1925 ¡en química! Escogió esta carrera por el interés que le suscitaba, aunque tuvo serias dudas sobre el camino a elegir. Consideró dedicarse a la arquitectura, especializarse en clásicas, ya que había estudiado griego en el instituto, e incluso hacerse poeta o pintor; leyó, por ejemplo, las tres mil páginas de la *Historia de la decadencia y caída del Imperio romano* de Edward Gibbon. Al principio, siguió cursos de filosofía, literatura francesa, inglés, introducción al cálculo e historia, más tres asignaturas de su licenciatura propiamente dicha: Análisis Cuantitativo, Análisis de Gases y Química Orgánica. Semejante incertidumbre, o mejor, amplitud de intereses, constituye una de las características de su personalidad, algo de lo que hizo gala a lo largo de toda su vida.

El caso es que pronto se dio cuenta de que prefería la física a la química, aunque, como señalé, completó esta última carrera. En primavera, solicitó a la Facultad de Física poder asistir a las clases de grado que se daban en ella. Merece la pena citar la carta al respecto que dirigió el 24 de mayo de 1923 a uno de los miembros del claustro, Edwin C. Kemble (Kimball Smith y Weiner, eds. 1980: 28-29):

Le escribo para solicitar permiso para cursar Física el próximo curso, sin haber completado primero la asignatura Física C. En apoyo de mi solicitud, permítame que mencione el trabajo que he realizado que puede prepararme para su curso.

En la escuela preparatoria seguí un curso completo de laboratorio en Física, en el que recibí el grado de A. Además del trabajo normal, realicé varios experimentos sobre mecánica, calor y luz; asimismo, leí bastantes libros de óptica, teoría del calor y física de la molécula. [...]

Este año he cursado Química 2, en la que recibí un grado A; Química 3, en la que mi grado ha sido, hasta el momento, A; y matemáticas con el profesor [Julian L.] Coolidge, en el que he recibido una A. Siguiendo el consejo del profesor Coolidge y del profesor [William F.] Osgood, el año que viene voy a cursar Matemáticas 5. Durante este tiempo he

11. Existen dos magníficas biografías de Oppenheimer: Bird y Sherwin (2023) y Monk (2012).

leído varios trabajos sobre termodinámica y temas relacionados. Sigue una lista parcial:¹²

- Ramsay; Lewis: Vol. 1, Teoría Cinética.
- Vol. 2, Termodinámica y Mecánica Estadística.
- Vol. 3, Teoría Cuántica.
- Lewis y Randall: Termodinámica.
- Crowther (del laboratorio de Thomson): Física Molecular.
- Poincaré: La Physique Moderne.
- Walker: Química Física.
- Ostwald: Soluciones.
- Gibbs: Sobre el equilibrio de Sistemas Homogéneos.
- Jeans: Teoría Dinámica de Gases (parte).
- Nernst: Termodinámica y Química.
- (parte de) Theoretische Chemie.
- Sommerfeld: Atombau u. Spectral-linien (parte).
- Mac Dougall: Termodinámica y Química.

Estaré encantado de hacer cualquier lectura o trabajo que me aconsejen, ya que deseo muy sinceramente que se me conceda mi petición.

Este listado era, desde luego, impresionante, más aún para un joven estudiante de química. Años después, Oppenheimer se enteró de que uno de los profesores de la facultad, George Washington Pierce, había comentado, divertido: «Obviamente, si Oppenheimer dice que ha leído estos libros, es un mentiroso, pero merecería el doctorado solo por conocer los títulos».

Lo que denota la anterior lista en cualquier caso es que la educación en física de Oppenheimer era tan ecléctica como amplia. Además de lo ya señalado, otra muestra de su versatilidad se encuentra en el hecho de que, cuando Alfred North Whitehead llegó a Harvard como profesor, el joven químico se apuntara a su curso, que estaba centrado en *Principia Mathematica* (1910, 1913), la obra que el propio Whitehead había escrito junto a Bertrand Russell, un libro tremendamente ambicioso y difícil. Mucho tiempo después, el 18 de abril de 1962, al felicitar a Russell por su noventa cumpleaños, Oppenheimer recordó aquella circunstancia con las siguientes palabras (Kimball Smith y Weiner, eds. 1980: 71):

12. Traduzco al castellano los títulos en inglés, pero mantengo los que aparecen en francés y alemán, para que se vean los conocimientos lingüísticos de Oppenheimer.