

## Teoría y práctica del electrón, 1928-1949

*Xavier Roqué (\*)*

---

Arbor CLVIII, 622 (Octubre), 191-204 pp.

*Este artículo se ocupa de parte de la historia del electrón entre 1928 (aparición de la ecuación del electrón de Dirac) y 1947-49 (reformulación de la electrodinámica cuántica). Durante este período la física del electrón experimenta cambios sustanciales, entre los que destaca el descubrimiento de la primera antipartícula, el positrón, y la trabajosa elaboración de la teoría que seguimos utilizando para describir al electrón y sus interacciones. Son dos décadas cruciales no ya para la física del electrón, sino para la física entera, que se industrializa y militariza.*

---

En la medida en que se puede escribir la historia de una partícula, este artículo se ocupa del electrón entre 1928 y 1947-49. ¿Por qué estos límites y no otros, como el final de la Segunda Guerra Mundial, por ejemplo? El límite inferior corresponde al relevo conceptual y generacional que supone la creación de la mecánica cuántica, cambio que dará pie a dos físicas del electrón, la una preocupada por la extensión relativista de la nueva teoría, la otra por su aplicación al estado sólido. Ambas cierran una etapa en la inmediata posguerra, simbolizada en el caso de la física del estado sólido por la construcción del primer transistor (1947), y en el de la electrodinámica cuántica, por la medida del desplazamiento Lamb y el cultivo de las técnicas de renormalización (1947-49).

---

(\*) Estudio parcialmente financiado por la DGICYT, proyecto número PS92-0048.

La aplicación de la mecánica cuántica a la materia sólida iba a transformar, en espacio de pocos años, la comprensión de los materiales, configurando una de las disciplinas social y económicamente más relevantes de la ciencia del siglo XX. Se puede constatar el nivel de madurez alcanzado por esta disciplina emergente en los textos de revisión y síntesis que aparecen por primera vez alrededor de 1933, y entre los que destaca el de Arnold Sommerfeld y Hans Bethe para la segunda edición del monumental *Handbuch der Physik*<sup>1</sup>. La historia posterior de la física del estado sólido es paradigmática de los cambios experimentados por la física a lo largo del último siglo, en particular por la íntima relación que establece con agentes económicos e industriales, patente ya antes de la Segunda Guerra Mundial y la eclosión de la Gran Ciencia. No en vano se da en el período de entreguerras un gran auge de la investigación industrial, uno de los factores que hará posible que la Segunda Guerra Mundial sea la guerra de los físicos.

El nacimiento de la electrodinámica cuántica y de la física del estado sólido representan dos momentos distintos en la manipulación, experimental y teórica, del electrón. Razones de espacio y la mayor familiaridad del autor con la historia de la electrodinámica cuántica (EQ), hacen que este artículo se ocupe tan sólo de ésta, lo que en ningún modo debe interpretarse en clave jerárquica —que daría si acaso cierta ventaja al estado sólido por su mayor relevancia social y tecnológica—. En cualquier caso, las bases para el crecimiento espectacular de ambas disciplinas en la segunda mitad del siglo, se sientan sin duda en los años de entreguerra y durante la guerra, lo que hace de este período uno de los más atractivos de la historia de la física del siglo XX<sup>2</sup>.

### 1. Una ecuación relativista para el electrón

La mecánica cuántica creada entre 1925 y 1927 por Max Born, Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, entre otros, no tenía en cuenta la relatividad. Los intentos por extender relativísticamente la nueva teoría se sucedieron antes incluso de que estuviera completamente formulada. Entre abril y septiembre de 1926, varios físicos dedujeron independientemente la llamada *ecuación de Klein-Gordon*, la ecuación escalar que se obtiene a partir del hamiltoniano clásico para una partícula relativista,  $H^2 = \mathbf{p}^2c^2 + m^2c^4$ . Esta ecuación fue aceptada en

tanto que generalización natural de la ecuación de Schrödinger, pese a que no daba cuenta de la estructura fina del átomo de hidrógeno<sup>3</sup>.

Uno de los físicos insatisfechos con la ecuación de Klein-Gordon era el joven Paul A. M. Dirac, que había ya contribuido decisivamente a la formulación de la mecánica cuántica con su teoría de transformaciones. En enero de 1928 Dirac propuso una nueva ecuación del electrón de primer orden —como exigía la teoría de transformaciones, factor determinante en la génesis de la ecuación—, que describía al electrón mediante funciones de onda de cuatro componentes. De esta manera la nueva ecuación no sólo incorporaba de forma natural el espín —introducido tres años antes por George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit— sino que, como más de un físico se aprestó a comprobar, permitía recuperar la fórmula de estructura fina de Sommerfeld<sup>4</sup>. Junto a estas razones, su elegancia formal hizo que la ecuación de Dirac se impusiera con relativa facilidad entre los físicos teóricos, pese a las incógnitas que planteaba su interpretación física.

La ecuación de Dirac reformaba completamente las bases para el cálculo de las interacciones elementales del electrón, entre las que destacaba el *efecto Compton* (la dispersión fotón-electrón), posiblemente su blanco de aplicación más natural. Desde su descubrimiento en 1922, se habían propuesto hasta seis fórmulas distintas para la intensidad de la radiación dispersada por un electrón libre, empezando por la del propio A. H. Compton y siguiendo por las basadas en la mecánica cuántica. La ecuación de Dirac iba a posibilitar un cálculo más duradero. A los pocos meses de su aparición, Oskar Klein y Yoshio Nishina la habían aplicado no sin dificultades al cálculo de la intensidad, dejándose guiar por el viejo principio de correspondencia de Bohr. La *fórmula de Klein-Nishina* se reveló superior a las fórmulas previas, y su contrastación mediante rayos  $\gamma$  supuso un respaldo para la ecuación de Dirac.

Con ser importantes, éxitos como éste mal podían disimular las carencias de la ecuación de Dirac, «el capítulo más triste de la física moderna», entre las que destacaba la existencia de soluciones de energía negativa<sup>5</sup>. Dirac era consciente de lo insoslayable de la cuestión, pues en la teoría cuántica no podía descartarse arbitrariamente la posibilidad de una transición espontánea de un estado de energía positiva a uno de energía negativa. Por otro lado, éste no era el único argumento para tomar en serio tales estados. El mismo Klein, que en su artículo con Nishina los había descartado como carentes de sentido físico, mostró sus efectos perniciosos al tratar la reflexión de un electrón en una barrera de potencial. Según la teoría de Dirac, el electrón podía aparecer

tras la barrera con energía cinética negativa. La «paradoja de Klein» mostraba que los estados de energía negativa planteaban problemas incluso cuando no había procesos radiativos de por medio. Por poner sólo otro ejemplo, en 1930 el físico sueco Ivar Waller reinterpreto la colisión fotón-electrón como una sucesión de procesos simples de absorción y emisión (de forma parecida a como hacemos ahora), demostrando que para recuperar la fórmula de Klein-Nishina era necesario tener en cuenta los estados intermedios de energía negativa del electrón. Estos ominosos estados se revelaban tan imprescindibles como incomprendibles desde el punto de vista físico <sup>6</sup>.

La paradoja de Klein vino a complicar la ya de por sí delicada existencia de electrones en el núcleo, una constante en todos los modelos nucleares propuestos hasta principios de los años 1930. Los electrones eran necesarios para equilibrar la carga y masa del núcleo (algo imposible a base de protones nada más), y además, ¿acaso no se les veía abandonar el núcleo en la desintegración  $\beta$ ? Alrededor de 1930, sin embargo, se hizo patente que las razones que hacían deseable la exclusión del electrón del núcleo eran tan poderosas como las que recomendaban su inclusión. Las relaciones de imprecisión hacían poco menos que imposible confinar un solo electrón en el reducido volumen nuclear, por no hablar de los problemas de espín y estadística nucleares <sup>7</sup>. Tampoco se entendía por qué la emisión  $\beta$  presentaba un espectro continuo, cuando ninguna otra partícula parecía abandonar el núcleo. Niels Bohr y George Gamow, entre otros, consideraron seriamente la posibilidad de que el principio de conservación de la energía no valiera para los electrones nucleares <sup>8</sup>. Entre las demás propuestas realizadas para resolver el problema, destaca el «neutrón» de Wolfgang Pauli, una partícula con una masa del orden de la del electrón, neutra y de espín  $1/2$ , que sería emitida junto con un electrón en la desintegración  $\beta$  de forma que se conservara la energía y el momento. Como es bien sabido, los problemas del núcleo sólo empezarían a resolverse con el descubrimiento del neutrón y la formulación por Fermi de la teoría de la desintegración  $\beta$ , pero eso forma parte de otra historia <sup>9</sup>.

## 2. Una nueva forma de materia: el positrón

En 1929 Dirac recurrió magistralmente al principio de exclusión de Pauli en un primer intento por resolver las paradojas de su ecuación del electrón. Si todos los estados de energía negativa estuvieran ocupados, ningún electrón podría desplazarse hacia ellos. Asumiendo que

esta distribución infinita de carga no tuviera ninguna manifestación física, Dirac observó a continuación que una vacante o «agujero» en el «mar» de electrones de energía negativa aparecería como una partícula de carga positiva. En un primer momento, llevado por la ambición de reducir la materia a una única entidad fundamental, Dirac identificó a tales agujeros con el protón. Cuando esta interpretación se reveló inviable, tanto por razones de simetría como por la manifiesta estabilidad de la materia, Dirac predijo audazmente la existencia de «una nueva clase de partícula, desconocida de la física experimental, con la misma masa pero de carga opuesta a un electrón». Dirac llamó a esta partícula «antielectrón», porque la transición de un electrón a un estado vacante de energía negativa conllevaría la desaparición («aniquilación») de electrón y agujero con emisión de energía. Para Dirac, que no dudaba en anteponer la estética a la funcionalidad, el que nadie hubiera observado tal partícula era una simple contingencia, explicable por la corta vida media del antielectrón <sup>10</sup>.

La historia subsiguiente de la partícula anticipada por Dirac ha pasado a los anales de la física y la filosofía de la ciencia del siglo XX. En 1932, Carl D. Anderson, en Pasadena, atribuyó algunas de las trazas dejadas por los rayos cósmicos en su cámara de niebla a «una partícula positiva cuya masa y carga son comparables a las de un electrón». Ajeno a las elucubraciones de Dirac, Anderson no relacionó su «electrón positivo» con el «antielectrón». A los pocos meses, P. M. S. Blackett y G. Occhialini, en Cambridge, extendieron las observaciones de Anderson y establecieron la identidad entre su hallazgo experimental y la predicción teórica de Dirac. Como las buenas fábulas, ésta tiene más de una moraleja. Para algunos se trata de un ejemplo claro de que una observación experimental sólo adquiere pleno sentido dentro de cierto marco teórico: «Blackett y Occhialini... aplicaron la teoría de Dirac y por lo mismo aprovecharon casi íntegramente el experimento; por ello, su demostración de la existencia del positrón fue mucho mejor que la de Anderson» <sup>11</sup>. Otros, en cambio, han utilizado el mismo episodio para abogar por la emancipación de la manipulación experimental de toda representación teórica: «el significado de la frase “esto es un positrón” no tiene por qué venir dado por una teoría particular, de forma que cada vez que se afirma “esto es un positrón” se está de algún modo corroborando la teoría» <sup>12</sup>.

En cualquier caso, y por valiosas y sugerentes que sean, se trata de interpretaciones basadas en reconstrucciones históricas parciales. El primer artículo documentado sobre el descubrimiento del positrón no apareció hasta 1985. Si se sigue la historia hasta el final se puede

comprobar que se necesitaron varios meses para consumir el descubrimiento del positrón. Aun después de la aparición del trabajo de Blackett y Occhialini, los físicos se tomaron su tiempo antes de concluir que el «electrón positivo» de Anderson se comportaba efectivamente como el «anti-electrón» de Dirac. ¿Por qué este retraso? En primer lugar, porque el conocimiento experimental de los positrones era muy limitado. Y en segundo lugar, porque las predicciones de Dirac eran harto esquemáticas, y fue preciso que varios físicos confiaran en la teoría de agujeros y se decidieran a explorar sus consecuencias para que la contrastación de la teoría fuera finalmente posible<sup>13</sup>.

A este respecto, conviene destacar la coincidencia de métodos e intereses entre los primeros practicantes de la física del estado sólido y la electrodinámica cuántica. El caso más representativo es el de la escuela de Arnold Sommerfeld en Munich, donde se forma en los años 1920 una generación de jóvenes físicos especializados en la teoría electrónica de los metales, entre ellos Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli, que formarán a su vez dos escuelas muy activas de físicos teóricos en Leipzig y Zurich, respectivamente<sup>14</sup>. Entre 1927 y 1933, estos físicos y otros del mismo perfil, como H. Bethe, R. Peierls, M. Delbrück, y V. Weisskopf, exploraron por igual los límites de la naciente electrodinámica cuántica como las posibilidades de una teoría cuántica de los sólidos. Tal vez el ejemplo más claro de esta relación sea la teoría de agujeros de Dirac. Los historiadores han notado las profundas analogías de la concepción de Dirac con conceptos que se estaban desarrollando al mismo tiempo en el marco de la teoría electrónica de los metales. Es posible que el trasvase de métodos y conceptos entre ambas disciplinas se viera facilitado por el continuo trato profesional entre físicos que habían compartido, además, su período de formación.

Sea como fuere, el descubrimiento del positrón no sólo representó el hallazgo de una nueva partícula, sino de un nuevo tipo de materia. Dirac había anticipado la posibilidad de que el encuentro entre un electrón y un antielectrón se saldara con la desaparición de ambos y la emisión de uno o más cuantos de energía. A lo largo de 1933, físicos teóricos y experimentales trabajaron para poner de manifiesto este fenómeno. En parte como resultado de esta investigación, la noción de partícula elemental experimentó durante este período un cambio sustancial. Los constituyentes de la materia dejaron de ser percibidos como entidades estables y permanentes, para poder ser creados o aniquilados en su interacción mutua a altas energías. La teoría de la desintegración  $\beta$  de Fermi incorporó esta intuición fundamental al proponer que «los electrones no existen en el núcleo como tales antes de

que se produzca la emisión  $\beta$ , sino que, por decirlo así, toman existencia en el mismo momento en que son emitidos»<sup>15</sup>. Fermi, sin embargo, prescindía de la visualización marítima de los procesos de creación y aniquilación, recurriendo sin más a los operadores correspondientes para cada una de las partículas implicadas. Junto con la cuantización por Pauli y Weisskopf del campo de Klein-Gordon, y la teoría de las fuerzas nucleares de Yukawa, la teoría de Fermi mostraba las posibilidades formales de una teoría cuántica de campos asediada aún por problemas aparentemente insalvables<sup>16</sup>.

La existencia de la antimateria no era la única implicación revolucionaria de una mecánica cuántica y relativista. Lo que había empezado como una ecuación para una sola partícula, conllevaba la existencia de agregados de partículas con propiedades inéditas y dotaba de estructura al «vacío». En adelante se renunciaría a interpretar la teoría en términos de partículas singulares, para explorar las posibilidades de una descripción coral del mundo subatómico.

### 3. Dos programas para la electrodinámica cuántica

A todo esto, Heisenberg y Pauli llevaban impulsando desde 1929 un programa propio de cuantificación del campo electromagnético. Una de sus motivaciones era explicar la existencia misma de las partículas conocidas por entonces, el electrón y el protón. Se trataba de los primeros pasos de la teoría cuántica de campos, en la que éstos asumían prioridad ontológica sobre las partículas, consideradas como cuantos del campo correspondiente. Aunque la versión teoría de campos de la EQ se revelaría como formalmente equivalente a la teoría de agujeros de Dirac, el potencial heurístico de ambas formulaciones era muy diferente, pues ponían el acento en procesos físicos y formas de visualización contrapuestas. Ello ha llevado a los historiadores a hablar, refiriéndose a esta etapa de desarrollo de la EQ, de dos programas enfrentados<sup>17</sup>. La EQ versión campos obtuvo sus mejores resultados en el estudio de las fuerzas nuclear y débil (teoría de la desintegración  $\beta$  de Fermi y teoría mesónica de las fuerzas nucleares de Yukawa), mientras que la versión «agujeros» tuvo más éxito en la caracterización de las interacciones elementales del electrón (frenado por radiación o *bremsstrahlung*, producción de pares electrón-positrón, chaparrones o *showers*). Destaca también en este mismo contexto el análisis de las interacciones electrón-electrón (Christian Møller, 1932), y electrón-positrón (Homi Bhabha, 1936). La motivación primordial del cálculo de

los distintos procesos de dispersión era elucidar el paso de electrones de alta energía a través de la materia, con vistas a su aplicación en la física de la radiación cósmica y nuclear, disciplinas en proceso de consolidación. Es necesario constatar, a este respecto, que a diferencia de lo que sugiere su presentación didáctica más habitual, los procesos de dispersión sólo adquirieron su condición actual de aplicaciones paradigmáticas de la EQ de forma retrospectiva, al introducirse las técnicas de renormalización<sup>18</sup>. Con todo, la base experimental de la EQ se vio consolidada y a mediados de los años 1930 se comprobó incluso que la teoría permitía describir la componente blanda (de menor energía) de la radiación cósmica. Esta constatación permitió comprender que la radiación dura debía estar formada por partículas distintas del electrón y condujo eventualmente al descubrimiento del muón<sup>19</sup>.

Cada una de las tradiciones de la EQ acabó por producir su propio libro de texto. La teoría de agujeros fue la primera en encontrar expresión: en 1936 Walter Heitler, un físico refugiado desde 1933 en Inglaterra y uno de los primeros conversos a la teoría, produjo *The Quantum Theory of Radiation*, una oportuna obra de síntesis que iba a enseñar a cientos de físicos a manipular la ecuación del electrón de Dirac<sup>20</sup>. Por su parte, la teoría cuántica de campos habría de esperar al magnífico artículo de revisión de Pauli (1941), y sobre todo, al texto introductorio de Gregor Wentzel (1943), para disponer de una herramienta de alcance parecido<sup>21</sup>.

#### 4. Las divergencias del electrón

El desarrollo de la EQ, en una versión u otra, se vio no obstante impedido por la presencia de divergencias aparentemente insalvables. Sólo los cálculos en primer orden de teoría de perturbaciones ofrecían resultados finitos y contrastables. En particular, la energía propia del electrón era infinita, lo que llevó a la suposición generalizada de que la teoría dejaba de ser útil para electrones de energía superior a  $137 mc^2$  ( $10^8$  volts) o de una longitud de onda menor que el radio clásico del electrón. Si bien éste era un problema que se daba ya en la física clásica, y que podía por tanto considerarse como vestigio de una situación previa poco satisfactoria, los problemas que creaba la nueva concepción del vacío (como el de la polarización o creación de parejas virtuales electrón-positrón) eran propios de la EQ y cuestionaban sin ambigüedad la bondad de la teoría. Las extraordinarias propiedades del vacío hicieron que se reconsiderara la posibilidad de una visión



puramente electromagnética de la materia, al estilo de Lorentz y Poincaré <sup>22</sup>.

Las divergencias suscitaron reacciones diversas. La actitud de físicos destacados como Bohr, Heisenberg, o Pauli, propagadores activos de la interpretación de Copenhague, ha sido caracterizada con acierto por J. L. Heilbron de «renuncia entusiasta», porque acogían los graves problemas de la teoría como indicio de una nueva revolución conceptual, de magnitud comparable a la que había supuesto la mecánica cuántica. La visión radical y revolucionaria de los físicos establecidos (con la excepción tal vez de Dirac) contrasta con la actitud conservadora y pragmática de físicos por lo general más jóvenes o por lo menos de situación profesional más incierta, que se mostraban partidarios de explorar los límites de las teorías disponibles <sup>23</sup>. Aún hoy no sabemos lo bastante de la estructura social de la física teórica de los años treinta para enjuiciar esta hipótesis, que sin embargo parece sustanciada por el intercambio de opiniones entre Pauli y Rudolf Peierls alrededor del desarrollo de la teoría de agujeros de Dirac. A diferencia de Pauli, preocupado por los problemas fundacionales de la teoría, Peierls, que había sido su asistente en Zurich antes de desplazarse a Cambridge, concebía la teoría de Dirac como un «esquema heurístico de cálculo» («heuristisches Rechenschema») que proporcionaba «respuestas razonables» a determinados problemas <sup>24</sup>. El potencial heurístico de la teoría de Dirac sería explotado a fondo durante los años treinta: la mayoría de predicciones experimentales de la EQ durante este período recurren a la conceptualización de Dirac. Sin embargo, no se obtendría una solución satisfactoria al problema de las divergencias hasta después de otra guerra mundial, de consecuencias palpables para el mapa de la física.

## 5. Posguerra y renormalización

Con el exilio científico y la guerra se consumó el desplazamiento del centro de gravedad de la física a los Estados Unidos. Se impuso así el estilo de hacer física pragmático y utilitario que había predominado en los laboratorios bélicos, desde los Alamos al Radiation Lab. En estos centros forzosamente multidisciplinares se había forjado una nueva generación de físicos, algunos de los cuales, como R. Feynman o W. Lamb Jr, iban a jugar un papel muy destacado en la renovación de la electrodinámica cuántica <sup>25</sup>.

La desmovilización conllevó la reanudación de las conferencias científicas, en las que se divulgó lo que era divulgable del conocimiento

y las técnicas desarrollados secretamente durante la guerra. Una serie de tres selectas reuniones celebradas entre junio de 1947 y abril de 1949 juegan un papel destacado en esta historia. La primera de ellas, celebrada en Shelter Island, Nueva York, fue comparada ya en su momento al congreso Solvay de 1911 (donde se sentaron las bases para el desarrollo de la teoría cuántica)<sup>26</sup>. En ella se reanudó el debate pospuesto sobre las dificultades de la EQ y se ofrecieron datos experimentales que mostraban desviaciones inequívocas de las predicciones basadas en la ecuación del electrón de Dirac. Las medidas, realizadas en la Universidad de Columbia, afectaban el desplazamiento de los niveles de energía del átomo de hidrógeno y el momento magnético anómalo del electrón. W. Lamb y Polykarp Kusch, al frente de reducidos equipos de experimentadores, se habían beneficiado de algunas de las técnicas desarrolladas para el proyecto radar durante la guerra<sup>27</sup>.

En la historiografía de la EQ, estos experimentos ocupan un lugar preferente, al haber estimulado nuevos cálculos teóricos y el desarrollo de técnicas de renormalización aletargadas. En su antología de la EQ, por poner un ejemplo representativo, Julian Schwinger justifica la inclusión de los artículos de Lamb y Retherford y Foley y Kusch (los únicos de carácter experimental) con la observación de que, tras la guerra, «el progreso sólo llegó de la mano de descubrimientos experimentales»<sup>28</sup>. Sin embargo, el papel catalizador de estos resultados debe ser calibrado con cautela. Teniendo en cuenta que el grupo liderado por Sin-itiro Tomonaga en Japón llegó independientemente a las mismas conclusiones partiendo de consideraciones puramente teóricas, se comprenderá que resulta cuando menos problemático identificar sin ambigüedad una causa determinante para el renacimiento de la «física substractiva»<sup>29</sup>.

De las tres presentaciones alternativas de la EQ propuestas entre 1947-49 por R. Feynman, J. Schwinger y Tomonaga, la primera era la que concedía mayor protagonismo al electrón. La «ecuación fundamental de la electrodinámica» de Feynman describía el intercambio de un fotón entre dos electrones, y tenía una función abiertamente heurística: «Servirá de prototipo para escribir las ecuaciones correspondientes al intercambio de dos o más cuantos entre dos electrones, o la interacción de un electrón con sí mismo»<sup>30</sup>. La nueva conceptualización del electrón en la electrodinámica cuántica renormalizada constituirá la base de la influyente exposición de J. M. Jauch y F. Rohrlich, con el significativo título de *The Theory of Photons and Electrons*<sup>31</sup>.

En 1949, la síntesis realizada por el joven Freeman Dyson de los resultados de Tomonaga, Schwinger y Feynman abrirá una nueva etapa para la electrodinámica cuántica, pero eso forma parte de otra historia.

### Notas

<sup>1</sup> SOMMERFELD y BETHE, 1933. La física del estado sólido es una de las disciplinas de la física contemporánea que más ha atraído recientemente la atención de los historiadores. Véase por ejemplo HODDESON, BRAUN, TEICHMANN y WEART, 1992, donde se recogen los resultados de un proyecto internacional sobre la historia de esta disciplina llevado a cabo en los años 1980.

<sup>2</sup> Según un análisis del *Science Citation Index* de 1972, la literatura de física presentaba dos grandes bloques hegemónicos, uno dedicado a la física de partículas, el otro a la física del estado sólido (WEART, 1992: 618).

<sup>3</sup> KRAGH, 1981, 1984. La ecuación de Klein-Gordon fue reinterpretada en 1934 por W. Pauli y V. Weisskopf como la ecuación de campo para partículas con carga y sin espín.

<sup>4</sup> DIRAC, 1928. Sobre la génesis y el desarrollo inicial de la ecuación de Dirac, véase KRAGH, 1981; KRAGH, 1990: caps. 3 y 5; MOYER, 1981a-c. DARRIGOL, 1990, es un breve ensayo divulgador, en castellano, de parte de la historia que estamos relatando, por parte de uno de sus historiadores más expertos.

<sup>5</sup> «Das traurigste Kapitel der modernen Physik ist aber nach wie vor die Diracsche Theorie», Heisenberg a Pauli, 31-7-1928, en HERMANN, VON MEYENN y WEISSKOPF, 1979: 467.

<sup>6</sup> ROQUÉ, 1993: cap. 1.

<sup>7</sup> Véase PAIS, 1986: cap. 14, para una descripción sucinta de estos problemas.

<sup>8</sup> Véanse por ejemplo las secciones marcadas en GAMOW, 1931, uno de los primeros textos de física nuclear propiamente hablando. Gamow no consiguió que el editor del libro utilizara calaveras para marcar las secciones problemáticas.

<sup>9</sup> BROWN y RECHENBERG, 1996: cap. 1.

<sup>10</sup> Véase, además de la literatura sobre Dirac citada en la nota 4, DIRAC, 1930, 1931.

<sup>11</sup> KUHN, 1982: 191 (publicado originalmente en 1962).

<sup>12</sup> HACKING, 1983: 179.

<sup>13</sup> DE MARIA y RUSSO, 1985; ROQUÉ, 1997. El libro de N. R. Hanson, *The Concept of the Positron* (HANSON, 1963), como indica su subtítulo, es un ensayo de carácter filosófico antes que histórico.

<sup>14</sup> HODDESON y otros, 1992; ECKERT y SCHUBERT, 1991: cap. 3; SÁNCHEZ RON, 1992: 113-119.

<sup>15</sup> FERMI, 1934.

<sup>16</sup> SCHWEBER, 1994: 76-92.

<sup>17</sup> WEINBERG, 1977; DONCEL, 1982; SCHWEBER, 1994. Sobre la cuantificación de las ondas de materia, véase DARRIGOL, 1986.

<sup>18</sup> ROQUÉ, 1993.

<sup>19</sup> GALISON, 1987: cap. 3.

<sup>20</sup> HEITLER, 1936.

<sup>21</sup> PAULI, 1941; WENTZEL, 1943. El libro de Wentzel, publicado en Viena en plena guerra, fue reimpresso en los Estados Unidos en 1946 (Edward Brothers Inc., Ann Arbor, Michigan; la traducción inglesa apareció en 1949). Para la génesis del artículo de Pauli, véase la excelente presentación de M. G. Doncel (MEYENN, 1993: 829-832) al manuscrito inicial de Pauli (MEYENN, 1993: 833-901).

<sup>22</sup> STUEWER 1979: 254-255.

<sup>23</sup> CASSIDY, 1981 sugiere que la estabilidad profesional puede explicar la diferencia de actitudes ante los problemas que presentaba la teoría. Cf. RÜGER, 1992.

<sup>24</sup> Peierls a Pauli, 17-7-1933; véase también Pauli a Peierls, 22-5-1933 (MEYENN, 1985: 197 y 163 respectivamente).

<sup>25</sup> SCHWEBER, 1986.

<sup>26</sup> K. K. Darrow a D. MacInness, 16-1-1948, citado en SCHWEBER, 1994: 156.

<sup>27</sup> LAMB y RETHERFORD, 1947; FOLEY y KUSCH, 1948. Cf. SÁNCHEZ RON, 1992: 342-349.

<sup>28</sup> «Further progress came only with the spur of experimental discovery», SCHWINGER, 1958: x.

<sup>29</sup> BROWN, KAWABE, KONUMA y MAKI eds., 1988.

<sup>30</sup> FEYNMAN, 1949: 769.

<sup>31</sup> JAUCH y ROHRLICH, 1955.

## Bibliografía

- BROMBERG, J.: «The concept of particle creation before and after quantum mechanics», *Historical Studies in the Physical Sciences* 7 (1976), pp. 161-191.
- BROWN, L. M.: «Introduction: Renormalization, 1930-1950», en BROWN, L. M. ed.: *Renormalization. From Lorentz to Landau (and Beyond)*. Springer, Nueva York, 1993, pp. 3-27.
- BROWN, L. M. y HODDESON, L. eds.: *The Birth of Particle Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- BROWN, L. M.; KAWABE, R.; KONUMA, M. y MAKI, Z. eds.: *Elementary Particle Theory in Japan, 1935-1960*. Research Institute for Fundamental Physics, Kyoto, 1988.
- BROWN, L. M. y RECHENBERG, H.: *The Origin of the Concept of Nuclear Forces*. Institute of Physics Publishing, Bristol y Filadelfia, 1996.
- DARRIGOL, O.: «La genése du concept de champ quantique», *Annales de Physique Française* 9 (1984), pp. 433-501.
- «The origin of quantized matter waves», *Historical Studies in the Physical Sciences* 16 (1986), pp. 197-253.
- «The quantum electrodynamical analogy in early nuclear theory or the roots of Yukawa's theory», *Revue d'Histoire des Sciences* 41 (1988), pp. 225-297.
- «Relatividad y mecánica cuántica: un matrimonio delicado», en DELIGEORGES, S. ed.: *El mundo cuántico* (Alianza, Madrid, 1990), pp. 85-98.
- DE MARIA, M. y RUSSO, A.: «The discovery of the positron», *Rivista di Storia della Scienza* 2 (1985), pp. 237-286.
- DIRAC, P. A. M.: «The quantum theory of the electron». Parte I, *Proceedings of the Royal Society* A117 (1928), pp. 610-624; parte II, *Proceedings of the Royal Society* A118 (1928), pp. 351-361.

- «A theory of electrons and protons», *Proceedings of the Royal Society of London A* 126 (1930), pp. 360-365.
- «Quantised singularities in the electromagnetic field», *Proceedings of the Royal Society of London A* 133 (1931), pp. 60-72.
- DONCEL, M. G.: *Partículas, campos y simetrías. Historia de la física de altas energías de los años 30 a los 60*. Publicacions UAB, Bellaterra, 1982.
- ECKERT, M. y SCHUBERT, H.: *Cristales, electrones, transistores. Del gabinete del físico a la investigación industrial*. Alianza, Madrid, 1991.
- FERMI, E.: «Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen». *Zeitschrift für Physik* 88 (1934), pp. 161-171.
- FEYNMAN, R.: «Space-time approach to quantum electrodynamics», *Physical Review* 76 (1949), pp. 769-788.
- FOLEY, H. y KUSCH, P.: «On the intrinsic moment of the electron», *Physical Review* 73 (1948), p. 412.
- GALISON, P. L.: *How Experiments End*. University of Chicago Press, Chicago, 1987.
- GAMOW, G.: *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity*. Clarendon Press, Oxford, 1931.
- HACKING, I.: *Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- HANSON, N. R.: *The Concept of the Positron. A Philosophical Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1963.
- HEILBRON, J. L.: «The earliest missionaries of the Copenhagen spirit», *Revue d'Histoire des Sciences* 38 (1985), pp. 195-230.
- HEITLER, W.: *The Quantum Theory of Radiation*. Clarendon Press, Oxford, 1936.
- HERMANN, A.; VON MEYENN, K. y WEISSKOPF, V. eds.: *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. Band. I: 1919-1929*. Springer, Berlín, 1979.
- HODDESON, L.; BRAUN, E.; TEICHMANN, J. y WEART, S. eds.: *Out of the Crystal Maze. Chapters from the History of Solid-State Physics*. Oxford University Press, Oxford y Nueva York, 1992.
- HODDESON, L.; BAYM, G. y ECKERT, M.: «The development of the quantum mechanical electron theory of metals, 1926-1933», en HODDESON, BRAUN, TEICHMANN y WEART, 1992: pp. 88-181.
- JAUCH, J. M. Y ROHRLICH, F.: *The Theory of Photons and Electrons. The Relativistic Quantum Field Theory of Charged Particles with Spin One-Half*. Addison-Wesley, Reading, 1955.
- KRAGH, H.: «The genesis of Dirac's relativistic theory of electrons», *Archive for History of Exact Sciences* 24 (1981), pp. 31-67.
- «Equation with the many fathers. The Klein-Gordon equation in 1926», *American Journal of Physics* 52 (1984), pp. 1024-1033.
- *Dirac. A Scientific Biography*. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- KUHN, T. S.: «La estructura histórica del descubrimiento científico», en *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia* (Fondo de Cultura Económica, México, 1982), pp. 189-201.
- LAMB, W. E. Jr. y RETHERFORD, R. C.: «Fine structure of hydrogen by a microwave method», *Physical Review* 72 (1947), pp. 241-243.
- MEYENN, K. VON, ed.: *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. Band. II: 1930-1939*. Springer, Berlín, 1985.

- *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. Band. III: 1940-1949.* Springer, Berlín, 1993.
- MILLER, A. I. ed.: *Early Quantum Electrodynamics. A Source Book.* Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- MOYER, D. F.: «Origins of Dirac's electron, 1925-1928», *American Journal of Physics* 49 (1981a), pp. 944-949.
- «Evaluations of Dirac's electron, 1928-1932», *American Journal of Physics* 49 (1981b), pp. 1055-1062.
- «Vindications of Dirac's electron, 1932-1934», *American Journal of Physics* 49 (1981c), pp. 1120-1125.
- PAIS, A.: *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World.* Oxford University Press, Oxford, 1986.
- PAULI, W.: «Relativistic field theories of elementary particles», *Review of Modern Physics* 13 (1941), pp. 203-232.
- ROQUÉ, X.: *D'aplicacions marginals a paradigmes. Les fórmules de Klein-Nishina, Moller i Bhabha en els inicis de l'electrodinàmica quàntica (1928-1947).* Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, 1993.
- «The manufacture of the positron», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 28 (1997), pp. 73-129.
- RUGER, A.: «Attitudes towards infinities: Responses to anomalies in quantum electrodynamics, 1927-1947», *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 22 (1992), pp. 309-337.
- SÁNCHEZ RON, J. M.: *El poder de la ciencia. Historia socio-económica de la física (siglo XX).* Alianza, Madrid, 1992.
- SCHWEBER, S. S.: «The empiricist temper regnant: Theoretical physics in the United States, 1920-1950», *Historical Studies in the Physical Sciences* 17 (1986), pp. 55-98.
- *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga.* Princeton University Press, Princeton, 1994.
- SCHWINGER, J. ed.: *Selected Papers on Quantum Electrodynamics.* Dover, Nueva York, 1958.
- SOMMERFELD, A. y BETHE, H.: «Elektronentheorie der Metalle», en H. Geiger y K. Scheel (eds.) *Handbuch der Physik*, 2.<sup>a</sup> ed. (Springer, Berlín, 1933), pp. 333-622.
- STUEWER, R. H. ed.: *Nuclear Physics in Retrospect.* University of Minnesota Press, Minneapolis, 1979.
- WEART, S.: «The Solid Community», en Hoddeson y otros 1992, pp. 617-669.
- WEINBERG, S.: «The search for unity: Notes for a history of quantum field theory», *Daedalus* 106 (1977), pp. 17-35.
- WENTZEL, G.: *Einführung in der Quantentheorie der Wellenfelder.* Franz Deuticke, Viena, 1943.