

Mecánica cuántica y física nuclear

*Karl von Meyenn**

El descubrimiento del electrón y de la radiactividad a principios de nuestro siglo proporcionó los elementos esenciales de dos nuevas disciplinas, la física atómica y la nuclear, que en el curso del tiempo cambiaron esencialmente nuestra concepción del mundo y nuestra forma de vida. A partir del estudio del átomo y de su estructura surgió la teoría cuántica, que junto con generalizaciones apropiadas, configuró el marco en el que se inscribían los dos componentes básicos de la materia, el núcleo y las partículas elementales. En este trabajo ofrecemos un panorama general de los comienzos de la física nuclear y especialmente de la introducción de los conceptos cuánticos para explicar la estructura del núcleo y de las fuerzas que los mantienen unidos.

The discovery of the electron and radioactivity at the beginning of our century supplied the basic elements for two new disciplines, atomic and nuclear physics, which in the course of the time changed essentially our world view and our form of life. From the study of the atom and of its structure emerged the quantum theory, which, together with appropriate generalizations, also formed the framework to comprehend the next two underlying steps of matter, the nucleus and the elementary particles. In the following we give a general account of the beginnings of nuclear physics and specially of the introduction of quantum concepts to explain the structure of the nuclei and the forces which held them together.

1. El modelo nuclear de Rutherford y el surgimiento de la física nuclear como nueva disciplina

Las fuentes de energía [nuclear] son de un orden de magnitud completamente distinto del de las energías de los procesos físicos y químicos corrientes, y dan cuenta de las fuerzas gigantescas que operan en el interior de (los núcleos) de los átomos. El mundo interior del átomo está generalmente aislado del mundo externo; no se ve influenciado por las condiciones de temperatura y de presión que reinan en el exterior; rigen en él las leyes probabilistas de la desintegración espontánea, sobre las que no se puede influir. Sólo ocasionalmente se abre la puerta que conduce del mundo atómico interior al exterior; los rayos α y β que de ahí emanan son emisarios de un mundo que normalmente nos está vedado.¹

* Werner-Heisenberg-Institut. Max Planck Institut für Physik, Föhringer Ring 6, Postfach 401212. 8000 München 40. Alemania.
Agradezco a Xavier Roqué y a Víctor Navarro la ayuda para la redacción en castellano de este trabajo.

¹ Sommerfeld [1924, p. 71 y ss.]: «Die Energiequellen [...] sind von ganz anderer Größenordnung als die Energien der sonstigen physikalischen und chemischen Prozesse. Sie legen Zeugnis davon ab, welche gewaltigen Kräfte im Inneren der Atome (der Atomkerne) tätig sind. Diese Welt des Atominneren ist von der Außenwelt im allgemeinen abgeschlossen; sie wird nicht beeinflusst durch die Temperatur und Druckbedingungen, die im Äußeren herrschen; sie wird regiert durch das Gesetz der Wahrscheinlichkeit des spontanen, durch nichts zu beeinflussenden Zerfalls. Nur ausnahmsweise öffnet sich eine Tür, die aus der Innenwelt des Atoms in die Außenwelt führt; die hierbei austretenden α und β Strahlen sind Sendboten aus einer uns sonst verschlossenen Welt».

Con el descubrimiento del electrón, a fines del siglo pasado, por J. J. Thomson, E. Wiechert y W. Kaufmann, y la introducción del átomo nuclear de E. Rutherford en 1911,² se disponía finalmente —después de repetidos intentos frustrados durante siglos— de los elementos esenciales para formular una teoría atómica que satisficiera los requerimientos empíricos. De ahora en adelante, los fenómenos radioactivos se atribuirían a procesos dentro del núcleo atómico, distintos de aquellos que tenían su origen en las capas electrónicas exteriores que, según la nueva teoría de Bohr, rodeaban al núcleo a una distancia diez mil veces mayor que el propio diámetro nuclear.

Para los fines de la teoría atómica, pues, bastaba conocer la masa y la carga del núcleo; ya no era necesario saber nada de su constitución interna. Así, de ahora en adelante, la física atómica y la física nuclear podían seguir desarrollándose como disciplinas independientes.³ Esto no significaba, sin embargo, que los desarrollos en ambos terrenos dejaran de influirse mutuamente. El concepto de la desintegración espontánea de los núcleos desarrollado por Rutherford,⁴ por ejemplo, le sirvió de modelo a Einstein en su teoría de la radiación para describir las transiciones cuánticas en el átomo por medio de leyes probabilísticas.⁵

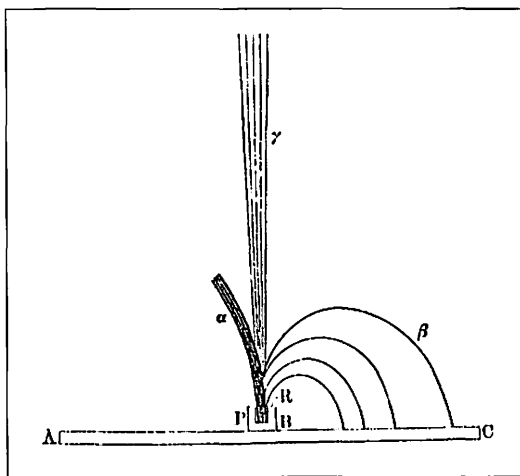


Fig. 1. Las radiaciones α , β y γ . Curie [1904, p. 42]

Cuando, a fines de los años 20, se hubo resuelto el problema de la constitución del átomo, la atención de los físicos teóricos se centró de nuevo en el núcleo atómico.⁶ Para explicar los fenómenos atómicos había sido necesario reemplazar la mecánica clásica, válida sólo en el mundo macroscópico, por la mecánica cuántica. Se trataba ahora de examinar la validez de esta nueva teoría en el ámbito nuclear, donde

² Trigg [1984, p. 50-62].

³ Sobre los comienzos de la física radiactiva ver, entre otros, Jauncey (1946), Badash (1978) y Malley (1979).

⁴ Véase von Schweidler (1904) y Kohlrusch [1928, p. 779 y ss.] y los artículos históricos de Amaldi (1977) y van Brakel (1984)

⁵ Einstein (1916). Cf. Klein (1982) y Bergia y Navarro (1988).

⁶ Cf. Bohr (1938).

las condiciones físicas eran muy distintas de las que regían en la corteza electrónica del átomo.

Al aplicar la mecánica cuántica a los fenómenos nucleares, aparecieron nuevas dificultades inexplicables dentro del marco de la nueva teoría. Mientras que la teoría era adecuada para describir el comportamiento de partículas pesadas como el protón,⁷ los electrones intranucleares postulados por las teorías anteriores al descubrimiento del neutrón mostraban un comportamiento cuántico paradójico. Los científicos se vieron obligados a revisar de nuevo los fundamentos de sus teorías. Mientras que algunos creían que la solución requería una nueva revolución conceptual,⁸ análoga a la que había supuesto la mecánica cuántica, otros trataban de superar la crisis extendiendo el dominio de aplicación de las teorías existentes.

La historia siguió un curso intermedio entre ambas alternativas. La explicación de los fenómenos nucleares requería tanto profundos cambios conceptuales —es decir, la creación y la aniquilación de partículas y la introducción de nuevas teorías de campo— como también el descubrimiento de nuevas partículas constituyentes del núcleo atómico —en especial el neutrón, el positrón, el neutrino y los mesones.

Nuevamente era preciso separar el problema de la constitución del núcleo atómico del problema de la constitución interna de las supuestas partículas elementales. Como consecuencia, se produjo una división dentro del cuerpo de la física nuclear, que dio origen a la física de las partículas elementales como nueva disciplina. A esta rama se unió también la física de los rayos cósmicos, investigados desde el comienzo de siglo al mismo tiempo que los fenómenos de la radioactividad.⁹

⁷ El criterio para poder aplicar la teoría cuántica a una partícula de masa m es que su longitud de onda sea mayor que la longitud de onda Compton $\lambda_{\text{Compton}} = h/mc$ (donde c es la velocidad de la luz y h la constante de Planck). Para el protón se tiene $\lambda_{\text{Compton p}} = 1,4 \times 10^{-13}$ cm y para el electrón $\lambda_{\text{Compton e}} = 2,4 \times 10^{-10}$ cm. Por lo tanto, siendo $2r_0 \approx 6 \times 10^{-12}$ cm el diámetro aproximado del núcleo, sólo la longitud Compton del protón es lo suficientemente pequeña como para poder tratarlo como una partícula que se desplaza libremente dentro del núcleo, según las leyes de la mecánica ondulatoria. A la misma conclusión se llega por la siguiente consideración. A una vibración fundamental (llamada también de punto cero) de una partícula de masa m e impulso $p = h/\lambda$ que se extiende por todo el núcleo, corresponde la longitud de onda $\lambda_0 = 2r_0$ y la energía $E = p^2/2m = h^2/8mr_0^2$. La correspondiente energía de punto cero del electrón y del protón sería entonces 60 MeV y 1 MeV respectivamente. Comparándola con la energía en reposo relativista $E_0 = mc^2$ del electrón (0,5 MeV) y del protón (938 MeV), se ve que sólo en el caso del electrón los efectos relativistas son relevantes. No era, pues, de extrañar que los electrones intranucleares fueran intratables por los métodos de la mecánica cuántica no relativista.

⁸ Así, el joven físico nuclear Fritz Houtermans [1930, p. 124], en su reportaje para la revista anual *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, creía que era necesario hallar una *supermecánica cuántica* para superar las dificultades asociadas a los electrones nucleares.

⁹ Wright (1926), entre otros, ofrece una visión contemporánea. Sobre la historia de la radiación cósmica existen diversos estudios, como Mukherji (1974), Cassidy (1981) y Sekido y Elliot (1985). Véase también el informe bibliográfico de Winckler y Hofmann (1967).

Diversos efectos nucleares, sin embargo, seguían exigiendo tener en cuenta la interdependencia de los fenómenos nucleares, los atómicos y los de las partículas.

2. Centros de investigación en radioactividad. Primeras monografías, conferencias y congresos

Mientras que Niels Bohr y sus seguidores en Copenhague se ocupaban de las leyes cuánticas y sus aplicaciones en el estudio del comportamiento de los átomos, Rutherford y su escuela, en Manchester¹⁰ —que en 1919 se trasladó a Cambridge— se dedicaba a investigar todos los fenómenos relacionados con el núcleo y sus radiaciones. Entre los otros centros destacados en el estudio de la radioactividad se hallaban el laboratorio de Marie Curie en París,¹¹ el *Institut für Radiumforschung* bajo la dirección de Stefan Meyer en Viena¹² y el *Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie* en Berlín, donde trabajaban, entre otros, Lise Meitner y Otto Hahn.¹³ Fermi y su equipo en Roma sólo se asociaron a ellos en los años 30.¹⁴ Asimismo, los físicos norteamericanos iban a dominar el campo a partir de 1935, coincidiendo con la afluencia de refugiados políticos procedentes del otro lado del océano.¹⁵

La expulsión de numerosos científicos de los países centroeuropeos produjo un desplazamiento notable de los centros de investigación nuclear. Los Estados Unidos e Inglaterra absorbieron una gran cantidad de estos emigrantes, algunos de los cuales encontraban en el nuevo entorno excelentes condiciones para poder continuar sus investigaciones.¹⁶ Esto ocurría especialmente en la física nuclear, donde la investigación, cada vez más costosa, requería la colaboración de un gran número de científicos y la construcción de grandes laboratorios.¹⁷

Durante los años 20 se empezó hablar de física nuclear, antes que de radioactividad, para referirse a la ciencia del núcleo atómico en general y no solamente a los fenómenos de desintegración de ciertos núcleos. La diferenciación de la nueva disciplina conllevó la aparición de los primeros libros de texto con ese título.¹⁸

¹⁰ Cf. Klein (1965).

¹¹ Véase Wolke (1988), el relato de Marie Curie [1963] y Weart [1979, p. 1-59].

¹² Véase Meyer (1950) y Paneth (1950).

¹³ Meitner (1954).

¹⁴ Amaldi (1977).

¹⁵ Cf. Weiner (1970). Kirchberger (1936) describe el impacto de los experimentos norteamericanos sobre la física nuclear.

¹⁶ Cf. von Meyenn (1982), Stuewer (1986) y Sánchez Ron [1992, p. 272-314].

¹⁷ Véase Gentner (1965) y el trabajo de John Heilbron (1986) sobre la instalación de los primeros ciclotrones en Europa.

¹⁸ Para la literatura histórica sobre física nuclear, véase Heilbron y Wheaton [1981, p. 339-355].

Entre los primeros textos sobre radioactividad, aparecidos poco después del descubrimiento de este fenómeno, figuran la disertación de Marie Curie [1903] y las monografías de Rutherford [1904 y 1907] y su colaborador Frederick Soddy [1904]. Inicialmente, los libros de física trataban la radioactividad como un apartado de la electricidad y el magnetismo.¹⁹ Desde 1904 existieron revistas dedicadas casi exclusivamente a este nuevo campo, como el *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* editado por Johannes Stark y la revista francesa *Le Radium*.

Entre los estudios más modernos, que intentan comprender los fenómenos radioactivos en términos de la teoría atómica de Bohr se hallan los textos de Stefan Meyer y Egon von Schweidler [1916], Kasimir Fajans [1919], Georg von Hevesy y Fritz Paneth [1923] y de K. W. Friedrich Kohlrausch [1928]. En 1922, Francis Aston publicó los importantes resultados de sus investigaciones con isótopos, que mostraron que la masa del núcleo es aproximadamente un múltiplo entero de la masa del protón.²⁰ La última entrega de esta serie de tratados clásicos sobre radioactividad es la tercera edición de la obra *Radioactive substances and their radiations*, publicada por Rutherford con un título algo distinto en 1906 y 1913; en 1930, Rutherford completó una nueva edición con la colaboración de James Chadwick y Charles D. Ellis. Se ha comparado a esta obra con los *Principia* [1687] de Newton, el *Treatise* [1873] de Maxwell o la *Quantum mechanics* [1930] de Dirac.²¹

En el volumen 22 del *Handbuch der Physik*, editado en 1926 bajo la dirección de Hans Geiger apareció por primera vez un capítulo dedicado exclusivamente a los núcleos atómicos, con contribuciones de algunos de los exponentes más destacados de la física nuclear.²²

El físico berlinés Fritz G. Houtermans (1930) expuso en 1930 las teorías cuánticas del núcleo. Le siguió el libro de George Gamow [1931], basado en su propia visión del núcleo como una gota de agua. El de Gamow es el primer libro cuyo título se refiere directamente a la estructura del

¹⁹ Por ejemplo, en la 10ª edición del famoso *Lehrbuch der Physik* de Müller-Pouillet, aparecida en 1914, donde el apartado correspondiente, redactado por Walter Kaufmann, se encuentra en el cuarto volumen (secciones 2 y 3).

²⁰ La denominación protón parece haber sido introducida en 1920 por Rutherford en el *Cardiff meeting of the British Association*.

²¹ Mackintosh (1995).

²² Este capítulo contiene las contribuciones de algunos líderes en el área, como Kurt Philipp, Otto Hahn, Lise Meitner, Hans Pettersson y Gerhard Kirsch. En una carta a Stefan Meyer del 30 de octubre de 1930, Hans Geiger le anuncia los preparativos para una segunda edición del volumen 22, primera parte del *Handbuch* correspondiente a *Elektronen Atome Ionen*, que salió en 1933.

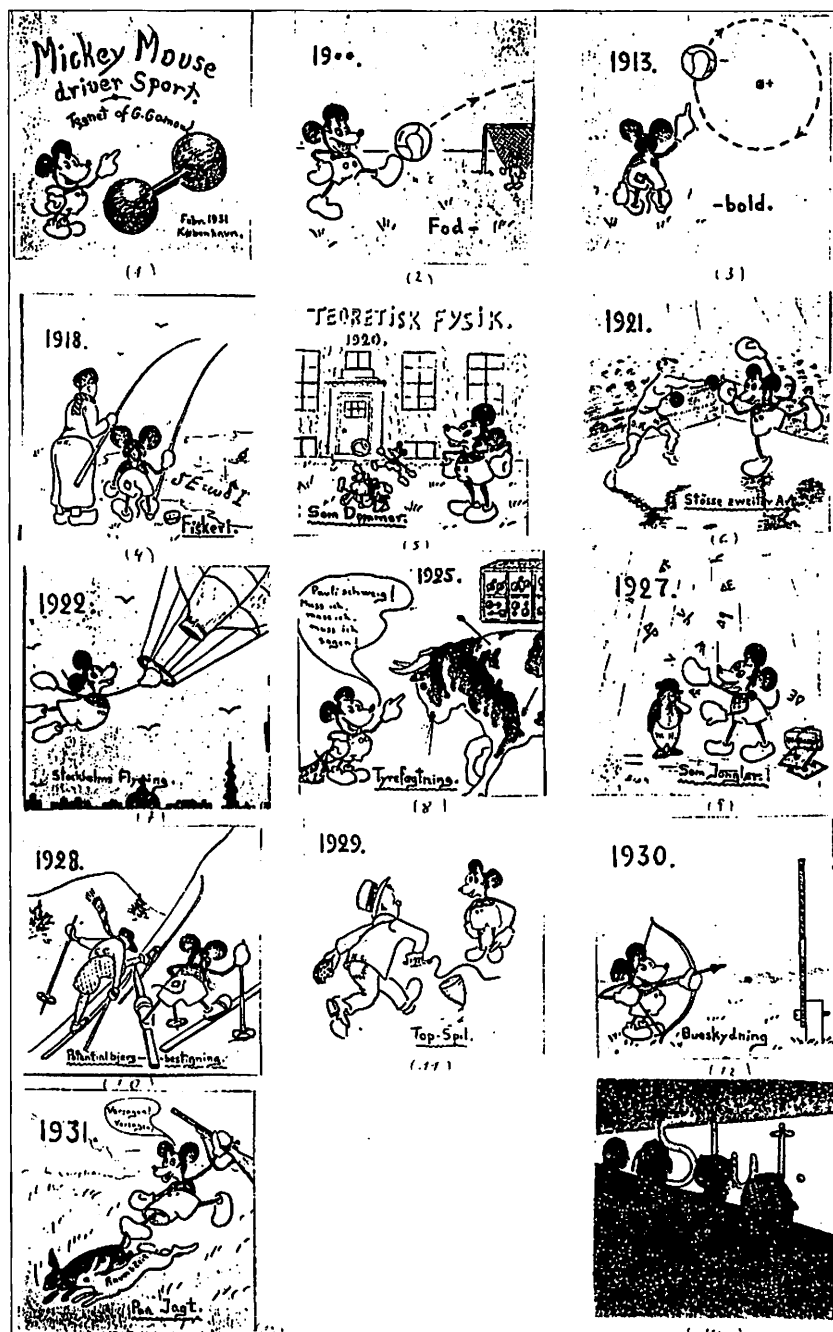


Fig. 2. Logros de los físicos cuánticos del círculo de Bohr durante los años 20. Tira cómica preparada por George Gamow con motivo de una reunión de físicos en Copenhague en marzo 1931. (Von Meyenn et al. 1985, p. 278 y ss.).

Explicación de la tira cómica de la página anterior

Niels Bohr aparece representado en esta serie de viñetas como Micky Mouse. Las (2) y (3) ilustran el desarrollo del modelo del átomo de Bohr. El campo de fútbol debe ser una alusión indirecta a la afición de Bohr a ese deporte. En (4) se muestra mediante cañas de pescar los esfuerzos, con ayuda del principio de correspondencia, en compañía de H.A. Kramer (H.K.), para formular una teoría cuántica general para múltiples sistemas periódicos. A finales de 1920 se concluyó la construcción del nuevo instituto, hoy Instituto Bohr. (5). Aquí aparece Bohr representado como árbitro. 1921 investigaciones de Oskar Klein (O.K.) y Svein Rosseland (S.R.) en Copenhague del «golpe de segunda clase» gracias al cual en un átomo excitado las partículas de los niveles energéticos del átomo pasan volando a niveles inferiores y emiten radiación-1922 Bohr viaja a Stockholmo (7), para recibir el premio nobel-las celdas en el castillo con espines antiparalelos sobre el toro (Woffgang Pauli) se refieren al principio de exclusión de Pauli. La lucha con el toro representa las intensas discusiones entre Bohr y Pauli. «Debe decir» en lugar de «podría decir» era un de las características expresiones de Bohr. A comienzos de 1927 Werner Heisenberg y Niels Bohr discutieron en Copenhague la interpretación de la nueva mecánica cuántica (9), y Bohr desarrolló su concepto de complementariedad y Heisenberg sus relaciones de incertidumbre. Un año más tarde Gamow (G.G.) realizó una importante contribución a la física nuclear, explicando la emisión de partículas α por medio del efecto túnel mecanico-cuántico a través de un pico de potencial (10). El equipamiento con esquís expresa el entusiasmo de Bohr por ese deporte. 1929 trabajos sobre la teoría mecánico-cuántica del movimiento del sólido rígido en Copenhague, establecida a través principalmente de los trabajos de Heindrick Casimir (H.C.) (11).-El tiro al arco (bueskydning) se refiere a la reanudación de las discusiones sobre problemas de medida en mecánica cuántica y los experimentos mentales de Bohr del paso de electrones por una rendija, presentados especialmente en el 6º Congreso Solvay en Bruselas (12). El año 1931 se abordaron numerosos problemas encaminados a la formulación de una generalización relativista de la mecánica cuántica (paradoja de Klein, dispersión de rayos γ , agujeros de Dirac, energía propia indefinida de los electrones, continuidad del espectro β). Bohr creía todavía que esas dificultades se relacionaban con la negación del concepto ordinario del espacio-tiempo.

núcleo atómico. Desde entonces se consideran incluidos en la física nuclear los libros que tratan de los fenómenos nucleares en general.²³

En los temas de las conferencias y asambleas de científicos se observa el mismo desplazamiento paulatino de la radioactividad hacia la física nuclear.²⁴ Durante las dos décadas que siguieron al descubrimiento de la radioactividad, hubo frecuentes reuniones de los especialistas para establecer los estándares de medida de la nueva ciencia.²⁵ Así, uno de los líderes de la investigación radioactiva austríaca, Stefan Meyer, comunicó el 30 de abril de 1914 a Julius Elster y Hans Geitel que «la comisión nombrada en 1910 en Bruselas para preparar el III Congreso Internacional de Radioactividad y Electrónica ha decidido realizar este congre-

²³ Mencionemos tan sólo algunos de los textos que aparecieron en las décadas de los años 30 y 40: Meitner y Delbrück [1935], Debye [1935], Bretscher [1936], von Weizsäcker [1937], Riezler [1937], Philipp [1937], Kallmann [1938], Heisenberg [1943], Bethe [1947], Rosenfeld [1948], Gamow y Crichfield [1949] y Fermi [1949/50].

²⁴ Trenn [1975] describe los avances en radioactividad a partir de las asambleas de la *Chemical Society* entre 1904 y 1920.

²⁵ Cf. Hahn [1962, p. 64 y ss.].

so en Viena en la semana del 27 de junio de 1915. El Presidente será Rutherford.» La guerra mundial impidió que se celebrase este evento.

En abril de 1929, durante la primera reunión en Copenhague de los físicos teóricos del círculo de Bohr, se discutieron las aplicaciones de la teoría cuántica a los problemas del núcleo atómico.²⁶ El primer congreso internacional dedicado a los problemas de la física nuclear tuvo lugar en mayo de 1931 en Zurich.²⁷ En octubre del mismo año se celebró otro congreso en Roma, con mayor número de participantes. Bajo la dirección de Fermi los físicos italianos habían apostado por la investigación en física nuclear.

Con el descubrimiento del neutrón, en 1932, aumentaron las conferencias centradas en la física nuclear. Los problemas de la nueva disciplina jugaban un papel cada vez más importante en las reuniones que Bohr convocaba periódicamente para discutir, en un ambiente informal, los desarrollos más recientes de la física cuántica.²⁸ En julio de 1932 Fermi elaboró un informe sobre el estado actual de la física nuclear para el congreso de electricidad celebrado en París.²⁹

3. Recursos experimentales

El órgano más sensible de la humanidad ...³⁰

En la primera etapa del estudio de la radioactividad y la física nuclear —desde el comienzo del siglo hasta los años 1920— predominaron los estudios experimentales.³¹ Las altas energías de los procesos nucleares requerían la construcción de nuevos aparatos y equipos experimentales, más grandes y costosos.³²

²⁶ Desafortunadamente, los manuscritos de estos informes —si es que llegaron a prepararse— no se conservan, por lo que sólo podemos referirnos a la narración de Rosenfeld (1972) y a algunas observaciones contenidas en la correspondencia de aquella época. Véase von Meyenn (1989).

²⁷ Bretscher y Guth (1931).

²⁸ La reunión del año 1932 tuvo lugar durante la semana de Pascua. Uno de los temas de mayor interés durante la conferencia fue el descubrimiento del neutrón, que jugó un papel importante en la parodia de Fausto representada por los participantes en el congreso. Se trataba de una versión de la obra de Goethe adaptada por los físicos para la ocasión. Véase von Meyenn, Stolzenburg y Sexl [1985, p. 308 y ss.].

²⁹ Fermi (1933).

³⁰ Así describió Einstein el contador Geiger en una carta a Hans Geiger del 15 de abril de 1929: «Das empfindlichste Organ der Menschheit ...»

³¹ Una recapitulación histórica de esta primera fase del desarrollo del conocimiento de los fenómenos radioactivos se encuentra al final del libro de Hevesy y Paneth [1923, p. 195-200].

³² Heilbron y Seidel [1989] es un estudio histórico del gran ciclotrón construido por Lawrence en Berkeley. Cornell (1988) describe las contribuciones de Tuve a la construcción de los generadores de alta tensión usados en el *Department of Terrestrial Magnetism* de la Carnegie Institution en Washington para producir partículas de elevadas velocidades, con las cuales se pudo demostrar en 1936 la independencia de las fuerzas nucleares de la carga de las partículas.

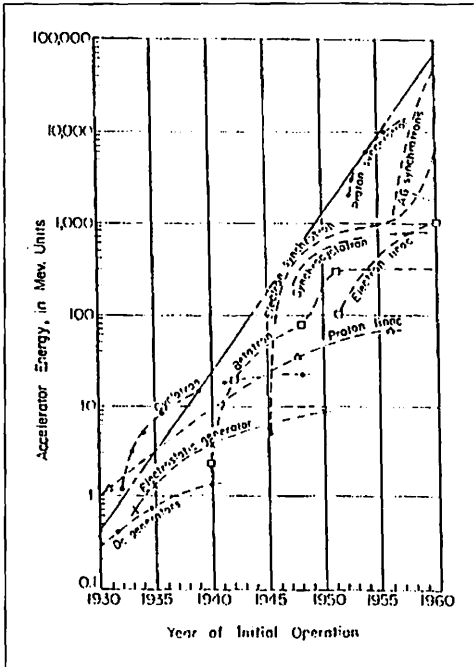


Fig. 3. La evolución de los aceleradores de partículas, desde el ciclotrón a los grandes laboratorios de alta energía. (Livingston 1966, p. 3).

En un primer momento las fuentes radioactivas sirvieron como fuente de radiación en los experimentos nucleares. Rutherford estableció su famoso modelo nuclear mediante el estudio de la radiación α . En 1919 obtuvo, gracias a la misma radiación, la primera desintegración artificial.

El registro automático, los circuitos de coincidencia y el contador Geiger fueron las innovaciones más destacadas de los años 1920; con ellas se podían efectuar mediciones cada vez más precisas en un dominio completamente ajeno a la experiencia humana cotidiana. En la década de los treinta empezaron a construirse los primeros ciclotrones y aceleradores de alta tensión, que permitían producir artificialmente haces de partículas cada vez más intensos, con los que se podían obtener los datos necesarios para formular una teoría de las fuerzas nucleares.³⁵

La construcción de estos aceleradores de partículas requería grandes recursos tecnológicos y económicos, difíciles de reunir para la ciencia europea. Los Estados Unidos, en cambio, asumieron pronto el liderazgo

La cámara de niebla de Wilson fue, por mucho tiempo, el detector más eficaz de las partículas emitidas por los núcleos radioactivos. Su uso en conexión con una cámara fotográfica permitía trazar las trayectorias de las partículas.³³ Otro instrumento importante era el contador Geiger-Müller presentado en 1928, descrito por Einstein como «el instrumento más sensible de la humanidad».³⁴ Con su ayuda era posible detectar y medir las más ínfimas radiaciones radioactivas.

En un primer momento las fuentes radioactivas sirvieron como fuente de radiación en los experimentos nucleares. Rutherford estableció su famoso modelo nuclear mediante el estudio de la radiación α . En 1919 obtuvo, gracias a la misma radiación, la primera desintegración artificial.

³³ Sobre las circunstancias del invento de la cámara de niebla de Wilson, véase Galison y Assmus (1989). Gentner, Maier-Leibnitz y W. Bothe [1940] contiene una colección representativa de fotografías tomadas con el método de Wilson.

³⁴ Carta a Geiger del 15 de abril de 1929. Véase Trenn (1976).

³⁵ Una cronología del desarrollo de los aceleradores de partículas se encuentra en el libro de Livingston [1969, p. 109-111]. Cf. también Frisch [1961].

en este campo. En un informe sobre la situación de la física alemana bajo el régimen nazi, Heisenberg destacó la desidia del gobierno en la formación de nuevos físicos y las grandes ventajas que tenían los físicos estadounidenses:

El método de Lawrence se basa en la utilización de un gigantesco electroimán, que acelera hasta grandes velocidades iones de hidrógeno que siguen una trayectoria en espiral, por medio de una tensión eléctrica de alta frecuencia. Otros métodos parten de la generación de altísimas tensiones eléctricas (de varios millones de electrón-voltios), que confieren inmediatamente a los iones de hidrógeno la velocidad requerida. En los Estados Unidos existen varias instalaciones de este tipo y otras están en construcción, de modo que este país dispondrá en breve de más de diez instalaciones grandes, que no sólo permitirán producir intensos haces de neutrones, sino también investigar la estructura del núcleo atómico en general, y que pueden tener un valor práctico inestimable.[...] Al mismo tiempo, e íntimamente relacionado con esta falta de una nueva generación, se constata un declive apreciable del nivel científico de las instituciones académicas alemanas. La física constituye un ejemplo característico. En esta ciencia el desarrollo más intenso tiene lugar en el campo de la física nuclear (producción de elementos radioactivos artificiales, etc.). La mayoría de los grandes congresos internacionales de física, en Roma (1931), Bruselas (1933), Zurich (1935), Londres (1936), París (1937), Bolonia (1937), etc.³⁶ han estado dedicados a estas cuestiones.³⁷

La radiación cósmica representaba otra fuente de radiación de alta energía. Durante los años 1930 y 1940, los rayos cósmicos suministraron las radiaciones de mayor energía conocidas y condujeron a la mayoría de descubrimientos de nuevas partículas.³⁸

Mientras predominó el estudio de las radiaciones y de las series de desintegración, el nuevo campo de investigación se denominó radiactividad. Una vez comprendida a grandes rasgos la fenomenología, comenzaron a formularse los primeros modelos nucleares, que inicialmente eran primordialmente clásicos y meramente descriptivos.³⁹ Como constituyen-

³⁶ Se trata del congreso sobre física nuclear celebrado en octubre de 1931 en Roma, y del congreso Solvay de octubre de 1933 (Bruselas). Probablemente, Heisenberg se refiere al congreso de física nuclear del verano de 1936 (y no 1935) en Zurich y a la gran conferencia internacional de Londres de octubre 1934.

³⁷ «Die Methode von Lawrence benützt einen riesigen Elektromagneten, in dem durch hochfrequente elektrische Spannung Wasserstoffionen auf einer Spiralbahn bis zu hohen Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Die andere Methode beginnt mit der Erzeugung höchster elektrischer Spannungen (mehrere Millionen Volt), in der die Wasserstoffionen unmittelbar die notwendige hohe Geschwindigkeit erhalten. In den Vereinigten Staaten sind mehrere solche Anlagen in Betrieb und einige weitere im Bau, so daß dieses Land wohl in kurzer Zeit über mehr als zehn große Anlagen verfügen wird, die nicht nur zur Herstellung von intensiver Neutronenstrahlung dienen, sondern allgemein für alle Untersuchungen über den Aufbau des Atomkerns und deren praktische Konsequenzen von unschätzbaren Nutzen sein werden. [...] Gleichzeitig und in engem Zusammenhang mit diesem Fehlen des Nachwuchses vollzieht sich ein deutliches Absinken des wissenschaftlichen Niveaus der deutschen Hochschulen. Ein charakteristisches Beispiel hierfür bietet die Lage der Physik. In dieser Wissenschaft findet z. Z. die stärkste Entwicklung auf dem Gebiete der Physik des Atomkerns (Herstellung künstlicher radioaktiver Elemente, etc.) statt. Die großen internationalen physikalischen Kongresse in Rom 1931, Brüssel 1933, Zürich 1935, London 1936, Paris 1937, Bologna 1937 usw. gelten zum größten Teil diesen Problemen.»

³⁸ Heisenberg [1943] sigue los avances en el estudio de la radiación cósmica durante este periodo.

³⁹ Cf. Rutherford [1907, p. 265 y ss.]. Sobre las diversas concepciones de la estructura del núcleo antes del descubrimiento del neutrón, véase Meitner (1926b) y Rutherford et al. [1930, p. 532 y ss.].

tes del núcleo se consideraban las mismas partículas α y β que salían del mismo en forma de radiaciones. Tras el descubrimiento de la desintegración artificial, se incluyó también al protón entre los constituyentes nucleares. A medida que se comprendía el papel del electrón como mediador de las fuerzas moleculares, se trataba de atribuirle un papel similar en el ligamiento de los protones.

4. Los primeros modelos cuánticos del núcleo. La fórmula $E = mc^2$ de Einstein y su conexión con la energía nuclear

Los primeros intentos de explicar la estructura nuclear mediante la teoría cuántica se deben a Arthur Erich Haas.⁴⁰ Este físico vienés consideró un modelo cuántico del átomo de Thomson invertido, en el que los papeles de las cargas positivas y negativas del modelo clásico estaban intercambiados. Al reemplazar de esta manera la masa del electrón por la masa (2.000 veces mayor) del protón, el radio de los protones orbitales disminuía en la misma proporción.

Este modelo fue pronto extendido al modelo del átomo de Rutherford por un alumno de Sommerfeld, Wilhelm Lenz,⁴¹ que se encontraba aún (mayo de 1918) en el campo de batalla. Dentro de la diminuta esfera de carga negativa se colocaba cierto número de electrones positivos, cuyo movimiento respondía a la teoría cuántica de Bohr y Sommerfeld. Lenz obtuvo así un radio del núcleo del orden de 10^{-12} cm, del mismo orden de magnitud que el estimado mediante experimentos de difusión. Sin embargo, la energía calculada según este modelo para el caso del núcleo de He resultaba 1.000 veces menor que la correspondiente a su defecto de masa.⁴² A pesar de estas discrepancias, el modelo de Lenz fue discutido por Sommerfeld en diversas ediciones de su tratado *Atombau und Spektrallinien*.

En la cuarta edición de su influyente libro, Sommerfeld dice: «Lo esencial de este modelo no es precisamente la imagen concreta o el valor numérico exacto obtenido, sino el método de aplicar las reglas cuánticas al núcleo. La aparición de la radiación γ característica está asimismo relacionada con

⁴⁰ Haas (1917). Mucho antes que Haas, el mismo Max Planck había propuesto explicar las emisiones radioactivas como un fenómeno cuántico. El 3 de febrero de 1911, en una sesión de la Academia Prusiana de Ciencias, dijo: «Finalmente, cabe señalar que también los fenómenos radioactivos admiten sin dificultades la hipótesis de la emisión cuántica.» Haas fue también uno de los precursores del modelo atómico de Bohr, al cuantificar en 1910 la órbita de un electrón que se mueve sobre la superficie de la distribución continua de carga positiva del modelo de Thomson. Al considerar esta única órbita, Haas no pudo obtener las órbitas cuánticas de Bohr que dan origen a las líneas espectrales.

⁴¹ Lenz (1918). Cf. Haas [1921, p. 40-42].

⁴² Smekal (1920, 1921a) interpretó este resultado como un indicio de la falta de validez de la ley de Coulomb a muy pequeñas distancias.

ello: Como Ellis⁴³ suponemos que los electrones β del núcleo poseen diferentes estados cuánticos, y que en una transición del uno al otro se emite una radiación γ monocromática. Estamos, pues, convencidos de que los núcleos se construyen a partir de sus constituyentes elementales según los mismos principios que rigen la construcción de los átomos de núcleos y electrones, es decir, según las reglas de la teoría cuántica».⁴⁴

Mientras las radiaciones radiactivas α y β sugerían un núcleo formado por núcleos de helio y electrones,⁴⁵ la radiación γ consistía, según Lise Meitner, en una emisión electromagnética que acompañaba la reorganización de las partículas nucleares después de un proceso de desintegración radiactiva: «Si, tras emitir una partícula α o β , el núcleo sufre una profunda reorganización, entonces ésta va acompañada de una emisión de grupos de rayos γ discretos, de modo análogo, cuyo nivel K o L haya sido ionizado y que vuelve bajo emisión de su radiación característica a estados más estables».⁴⁶ La aparición de un espectro de líneas discretas sugería, pues, una interpretación cuántica, análoga a la de los espectros atómicos.⁴⁷

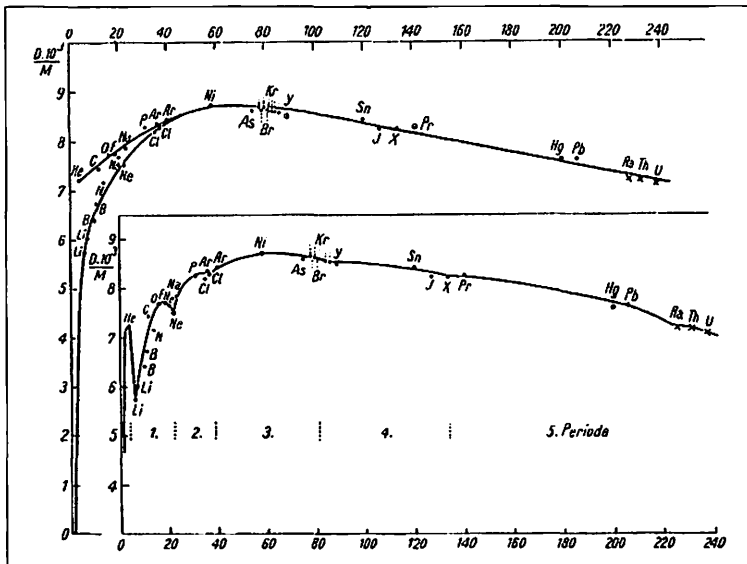


Fig. 4. Energía de empaquetamiento por protón en función del número de protones del núcleo, según Aston (*diagrama superior*) y St. Meyer, 1928 (*diagrama inferior*). (Kirsch y Teller, 1933, p. 543).

⁴³ Ellis (1921). Cf. Mackintosh (1995).

⁴⁴ Sommerfeld [1924, p. 217].

⁴⁵ Kossel (1919) y Geiger (1932). Rosenblum (1959) ofrece un tratamiento histórico sobre las partículas α .

⁴⁶ Meitner (1929, p. 2113).

⁴⁷ Véase también el artículo sobre la historia de los rayos γ de Gentner (1959).

A partir de la famosa relación masa-energía de Einstein se pudo determinar la energía de enlace de los núcleos como la diferencia entre su masa total y la de las diferentes partículas que lo integraban (energía de empaquetamiento).⁴⁸ Las partículas α podían también ser consideradas como subunidades estables dentro del núcleo, constituidas a su vez por protones y electrones.⁴⁹

5. Las primeras desintegraciones artificiales del núcleo. El protón y la hipótesis de electrones intranucleares

Dado que el experimentador no podía influir en modo alguno sobre las transformaciones de los núcleos y las leyes de desintegración radioactiva, se hacía difícil construir una dinámica del núcleo.

Rutherford consiguió en 1919 la primera desintegración artificial del núcleo. Mediante el bombardeo con partículas α logró arrancar un protón del núcleo de nitrógeno, al que identificó por la mayor longitud de su trayectoria en la cámara de niebla de Wilson.⁵⁰ Desde entonces estos protones fueron considerados, junto con los electrones, como verdaderos constituyentes del núcleo. Las partículas α , a su vez compuestos estables de cuatro protones y dos electrones, seguían siendo consideradas como subunidades que mantenían su individualidad dentro del núcleo.

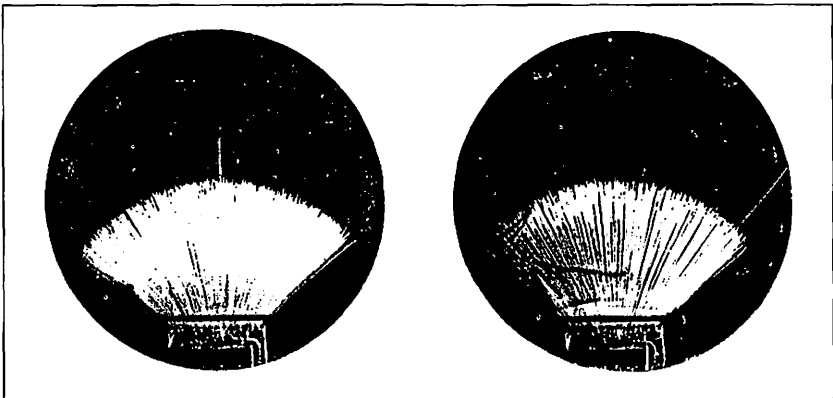


Fig. 5. Rayos α del radio RaC . (Philipps, 1926, p. 1204).

⁴⁸ Véase Aston [1923, p. 107ff.], Houtermans (1930, p. 185f.) y Stuewer (1993).

⁴⁹ La gran estabilidad de los núcleos de helio se explicó por la comparación del peso atómico del helio con el peso de los 4 protones que lo constituían. A partir de la diferencia de masa ΔM , se calculó la energía de enlace $\Delta E = \Delta M c^2$. Véase Sommerfeld [1921, p. 569].

⁵⁰ Rutherford (1919). Véase el resumen de estos trabajos en Sommerfeld [1924, p. 206-217]. Meitner (1927) describe los diferentes métodos de visualización de los procesos nucleares mediante el uso de la cámara de niebla.

A diferencia de la física atómica, donde las interacciones entre los electrones y el núcleo eran de tipo electromagnético, las fuerzas que actuaban entre las partículas nucleares eran de tipo desconocido. Los experimentos de difusión de partículas α realizados hasta entonces sólo revelaban una fuerte repulsión coulombiana global por parte del núcleo.

Aston había determinado empíricamente, mediante su espectrómetro de masas, la masa de los núcleos, que resultaba ser aproximadamente un múltiplo entero A de la masa del protón.⁵¹ Los experimentos de desintegración artificial revelaban también la presencia de protones entre los productos de la colisión. Era natural suponer que todos los núcleos contenían protones, y que su número era igual al número de masa A obtenido por Aston. La pequeña diferencia entre el peso atómico empírico y el determinado por la suma de los pesos de las partículas integrantes proporcionaba la energía de enlace. Como el número Z de cargas positivas —determinado por los experimentos de dispersión de partículas α y la ley encontrada por Moseley, para la relación entre Z y la frecuencia de las líneas características del espectro de rayos X— era generalmente inferior a este número de protones, se suponía la presencia de $N_e = A - Z$ electrones dentro del núcleo, que contrarrestarían el exceso de carga positiva. El modelo de electrones intranucleares estuvo vigente hasta el descubrimiento del neutrón en 1932. El neutrón, a su vez, fue considerado durante varios años como una partícula compuesta de un protón y de un electrón.⁵²

Basándose en estos resultados, el físico austriaco Stefan Meyer publicó en 1929 la curva de la energía de enlace media por partícula en función del número de masa A .⁵³

Dada la fuerte repulsión entre las cargas positivas de los protones, debían existir otras fuerzas atractivas para mantener la estabilidad del núcleo. Como sólo se conocían las fuerzas electromagnéticas y la fuerza gravitatoria (de magnitud insignificante para este propósito), la estabilidad del núcleo era un misterio inexplicable. Las energías entonces disponibles no eran lo suficientemente grandes como para indicar inequívocamente una desviación de la ley de Coulomb,⁵⁴ como lo harían los experimentos norteamericanos de los años treinta.⁵⁵

No es de extrañar, pues, que esta concepción errónea del núcleo presentara todo tipo de dificultades teóricas. No se comprendía, por ejemplo, por qué en la desintegración β del núcleo de nitrógeno no se conservaban el

⁵¹ Aston [1922] y (1936). Cf. Strutt (1901).

⁵² Kohlrausch [1928, p. 837-848] describe las concepciones del núcleo antes del descubrimiento del neutrón.

⁵³ Meyer (1929).

⁵⁴ Véase p. ej. Smekal (1920).

⁵⁵ Tuve, Heydenburg y Hafstad (1936). Cf. Cornell (1988).

espín y la estadística.⁵⁶ El espín de este núcleo era distinto de la suma de los espines de las partículas emitidas y el núcleo resultante después de la transformación, lo que violaba los principios de conservación de la física.

6. Espectroscopía nuclear y momento magnético de los núcleos

El espín nuclear plantea otro grave problema, que sin embargo no carece de interés. Si Schüler y Brück están en lo cierto, parece que los electrones no contribuyen en absoluto al espín, sólo los protones. Al igual que ocurre con el espectro β continuo, esto indicaría que los electrones no existen como tales en el núcleo. [...] Estoy ansioso por saber qué dirá Pauli sobre todo esto.⁵⁷

En 1924, una observación de Pauli abrió una nueva vía de acceso a la estructura nuclear. Pauli relacionó la estructura hiperfina de las líneas espectrales con una interacción magnética entre el núcleo y los electrones orbitales.⁵⁸ Dado que en la expresión del momento magnético generado por el movimiento de una partícula cargada, la masa de dicha partícula aparece en el denominador, el momento magnético del protón debería ser 1.800 veces menor que el del electrón.⁵⁹ Sin embargo, el análisis de las estructuras hiperfinas sólo reveló la existencia de momentos de una magnitud correspondiente al del protón. A esta paradoja de los momentos nucleares se asociaba la de los espines nucleares y la estadística aplicada en el análisis de las líneas espectrales. En algunos casos, los espines nucleares no concordaban con los obtenidos por la regla de composición de los espines de las partículas integrantes del núcleo.⁶⁰

Midiendo la posición, la intensidad y la separación de estas líneas, se podía obtener información sobre la estructura interna de los distintos núcleos sin necesidad de bombardearlos con partículas, o de que fueran radioactivos.⁶¹

⁵⁶ Cf. Hund [1967, p. 191f.].

⁵⁷ Heisenberg a Bohr, 20 de diciembre de 1934: «Ein großes, aber interessantes Unglück scheint ja auch beim Kernspin aufzutreten. Wenn Schüler und Brück recht haben, sieht es so aus, als ob die Elektronen überhaupt nicht zum Spin beitragen, nur die Protonen. Dies würde auch, wie die kontinuierlichen β -Spektren darauf hindeuten, daß es nicht eigentlich *Elektronen* mehr im Kern gibt. [...] Ich bin gespannt, was Pauli zu dem allen sagen wird.»

⁵⁸ Pauli (1924) y Goudsmit (1961).

⁵⁹ Esta paradoja fue reconocida por primera vez por R. Kronig (1926).

⁶⁰ Kronig (1928) y Heitler y Herzberg (1929).

⁶¹ Kronig y Frisch (1931). Véase también Bothe (1937), que describe las posibilidades de esta nueva rama de la física tras descubrirse que el bombardeo del núcleo con partículas alfa provocaba la emisión artificial de radiación gamma.

7. La teoría cuántica de la desintegración α y el modelo de la gota líquida nuclear de Gamow

Ya en 1920, el mismo Rutherford había señalado en su segunda conferencia la dificultad de interpretar la emisión de partículas α por los núcleos desde una concepción mecánica simple, como la que había permitido explicar la difusión de las partículas α por los núcleos, ya que la velocidad de las partículas emitidas no era lo bastante grande como para permitirles penetrar de nuevo en el núcleo, venciendo la repulsión eléctrica. Sin embargo, la posibilidad de que las partículas penetraran la barrera de potencial fue pronto reconocida como una de las consecuencias de la mecánica ondulatoria; basándose en ella, en 1928 Gamow en Gotinga y Condon y Gurney en Princeton encontraban una explicación general de la desintegración α .⁶²

Durante su visita a Gotinga, Copenhague y Cambridge en 1928, el joven físico ruso George Gamow hizo dos importantes contribuciones a la teoría nuclear. Por primera vez, utilizó satisfactoriamente conceptos cuánticos para explicar hechos experimentales no comprendidos hasta entonces.

En primer lugar, dio una explicación de la enigmática desintegración α , que Rutherford había tratado recientemente de explicar en vano.⁶³ El artificio ideado por Rutherford para explicar la emisión de las partículas α , sugirió de inmediato a Gamow una solución cuántica.⁶⁴ Como Friedrich Hund fue el primero en observar,⁶⁵ según la mecánica cuántica una partícula podía atravesar un obstáculo, aunque no tuviera la energía necesaria (clásicamente) para ello. Este «efecto túnel» fue utilizado por Gamow para explicar la emisión de partículas α confinadas en los pozos de potencial nuclear, creado por una atracción no coulombiana entre las partículas nucleares. Utilizando los datos experimentales (la carga, masa y energía de la partícula α emitida y la carga y radio del núcleo emisor), y resolviendo la ecuación de Schrödinger correspondiente, Gamow obtuvo la conocida ley de desintegración encontrada empíricamente en 1911 por Geiger y Nutall

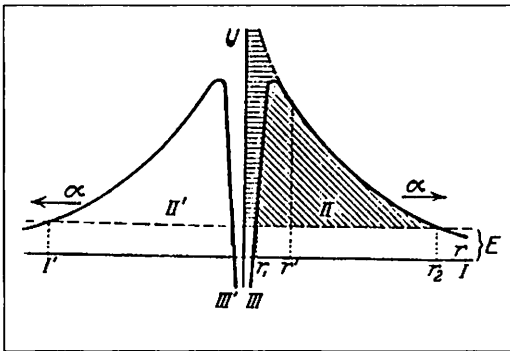


Fig. 6. La energía potencial del núcleo utilizada por Gamow para describir la desintegración α . (Gamow, 1928, p. 210).

⁶² Bohr [1965, p. 146]

⁶³ Rutherford (1927).

⁶⁴ Ver Stuewer (1986a).

⁶⁵ Hund (1927). Hund menciona también su descubrimiento en su *Geschichte der Quantenmechanik* [1967, p. 172]. Esta publicación previa no es mencionada en Condon (1978).



Fig. 7. Gamow discutiendo con Pauli en la oficina del instituto de física de la ETH de Zurich. (Enz y von Meyenn *et al.*, 1988, p. 72).

que relaciona la constante de desintegración y la energía de las partículas α emitidas por el núcleo.⁶⁶

Gamow desarrolló un modelo del núcleo en el que las partículas nucleares experimentaban intensas fuerzas de atracción de corto alcance —que se superponían a la repulsión coulombiana que predomina a mayores distancias— similares a la fuerza de atracción dipolar inducida entre moléculas de agua (semejante a las fuerzas de van der Waals de la física molecular). Tal conjunto de partículas se comporta como una pequeña gota de agua. Teniendo en cuenta la tensión superficial característica de una gota así, y la

presión interna establecida mediante el principio de Heisenberg, Gamow obtuvo una fórmula para la energía del núcleo en función del número másico, que reproducía la curva empírica establecida por Aston.⁶⁷ El modelo explicaba también, en particular, la inestabilidad de los núcleos pesados frente a la desintegración α .

8. La radiación β y el problema de la conservación de la energía y el momento angular. La hipótesis del neutrino

Posteriormente he pensado mucho acerca de las posibles limitaciones de los teoremas de conservación en la teoría cuántica relativista, y hemos discutido precisamente si en la inversión de la transformación en rayos β hemos hallado la misteriosa fuente de energía solicitada por la teoría de Eddington de la constitución de las estrellas.⁶⁸

Creo que cuando uno acepta una teoría de campos consecuente e interpreta las desviaciones del teorema de la conservación de la energía mediante un campo adicional, debe también aceptar que el nuevo campo adicional está cuantizado, es decir, que consiste de corpúsculos, de la misma manera que la luz consiste de cuantos de luz o la carga negativa consiste de elec-

⁶⁶ Geiger y Nutall (1912).

⁶⁷ Gamow (1929) y Kirsch y Teller (1933, p. 544 y ss.). Stuewer (1994) analiza la historia de este modelo nuclear.

⁶⁸ Bohr, en una carta del 14 de febrero de 1929.

trones. Puede que los neutrinos sólo alcancen el grado de realidad de los cuantos de luz, pero con esto basta para describirlos de acuerdo con los teoremas de conservación. Quizás percibas mi renovado amor por los neutrinos como una aberración mental, pero debo conceder que este amor ha sido reforzado especialmente por el experimento de Joliot.⁶⁹

Debido a su gran peso, las partículas α se mueven dentro del núcleo con velocidades relativamente pequeñas, lo que justifica la aplicación de la mecánica cuántica no relativista.⁷⁰ El caso de los electrones nucleares libres era muy distinto, ya que, en virtud del principio de indeterminación de Heisenberg, deberían adquirir velocidades altamente relativistas (cercasas a la de la luz).

Hemos visto que la longitud de Compton del electrón ($2,4 \times 10^{-10}$ cm) marca el límite de validez de la teoría cuántica.⁷¹ Cuando la variación, sobre esta distancia λ , de la energía potencial del campo en que se encuentra el electrón, excede a la energía $m_0e c^2$ correspondiente a su masa en

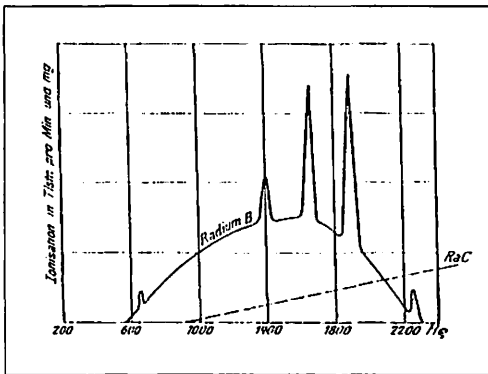


Fig. 8. El espectro continuo de rayos β (Chadwick y Ellis, 1922).

reposito, los efectos relativistas entran en juego.⁷²

Teniendo en cuenta que el radio nuclear es aproximadamente $r_0 = 3 \times 10^{-12}$ cm y que la energía de los electrones observados en las desintegraciones nucleares excede con frecuencia de $m_0 c^2$, se esperaba que la mecánica cuántica sería reemplazada, a esas distancias, por una nueva teoría, una especie de supermecánica cuántica (*Überquantenmechanik*).⁷³

⁶⁹ «Ich glaube, daß man sobald man eine konsequente Feldtheorie zuläßt, und die Abweichungen vom Energiesatz sozusagen durch ein neues dazukommendes Feld interpretiert auch zulassen muß, das dieses neue dazukommende Feld *gequantelt* ist, d. h. gewissermaßen aus Korpuskeln besteht, ähnlich wie das Licht aus Lichtquanten, die negative Ladung aus Elektronen. Die Neutrinos werden also vielleicht nur den Realitätsgrad der Lichtquanten besitzen, aber das reicht doch hin, um mit ihnen eine Beschreibung im Sinne der Erhaltungssätze durchzuführen. Vielleicht empfindest Du meine neu entstandene Liebe zu den Neutrinos als eine seelische Verirrung, aber ich muß gestehen, daß mich besonders das Experiment von Joliot sehr in dieser Liebe bestärkt hat». Heisenberg a Bohr, 12 de marzo de 1934.

⁷⁰ Véase la nota 7.

⁷¹ Esta longitud se introdujo para medir el cambio que experimenta la longitud de onda del fotón en la colisión con un electrón. Este efecto reveló en forma biunívoca la estructura cuántica de la luz, ya que mostró que la energía distribuida en el frente de onda actúa como si estuviera concentrada en el sitio donde se produce la interacción entre el fotón y el electrón.

⁷² Los argumentos correspondientes se encuentran reunidos en la monografía de Kaplan [1955, p. 149 y ss.].

⁷³ Houtermans (1930, p. 124).

A finales de los años 1920, la desintegración β planteaba dos dificultades que parecían exigir una profunda modificación de las teorías existentes. Una de ellas, el espectro continuo de los rayos β primarios⁷⁴ contradecía la noción de estados de energía bien definidos de los núcleos antes y después de la emisión.

Cuando se confirmó que en los experimentos no se había escapado ninguna otra radiación conocida que diera cuenta de la energía restante, se propusieron dos alternativas para resolver la paradoja. La solución más radical era la de Bohr, que creía que el principio de conservación de la energía dejaba de ser válido en las condiciones extremas que se dan en el núcleo. Pauli por su parte, no quería renunciar a los principios de conservación de la física, tan bien establecidos en los diferentes campos de la disciplina. En lugar de ello recurrió a una partícula neutra de naturaleza efímera, que apenas dejaba rastro en la materia y que había escapado a la detección.⁷⁵ Después del descubrimiento del neutrón, esta partícula fue denominada con el diminutivo italiano de «neutrino». Como la hipótesis del neutrino resolvía además las anomalías mencionadas en conexión con el espín y los momentos nucleares, los físicos se acostumbraron a integrarlo en sus teorías, pese a que no se había encontrado ninguna prueba concreta de su existencia.

Tras una larga búsqueda, el neutrino fue finalmente detectado en 1956 por Reines y Cowan, utilizando la abundante producción de neutrinos en un reactor nuclear.⁷⁶ Por este descubrimiento, Reines recibió el premio Nobel de física de 1995.

9. La ecuación relativista de Dirac y su aplicación a los problemas del núcleo atómico

El trabajo de Dirac merece toda mi admiración. Sin embargo, no me satisface en absoluto que una teoría aparentemente tan perfecta como la de Dirac tenga un defecto tan grave, como las transiciones de energía positiva a energía negativa.⁷⁷

Para resolver las dificultades encontradas en el estudio de los electrones nucleares, Dirac propuso en 1928 una ecuación cuántica y relativista

⁷⁴ Cf. Houtermans (1930, p. 178ff.). Con tal fin se escogieron algunos núcleos que sólo emitían radiación β . Para demostrar que la radiación provenía del núcleo y no de electrones expulsados de la corteza electrónica del átomo por un proceso secundario, se comprobó que el número de electrones emitidos era igual al de los núcleos generados por la desintegración.

⁷⁵ Cf. von Meyenn (1982a). La idea de Pauli fue ampliamente discutida en círculos científicos antes de que la divulgaran los trabajos de Fermi. Véase p. ej. la carta de O. R. Frisch a L. Meitner del 22 de marzo de 1933.

⁷⁶ La historia del experimento ha sido descrita en todo detalle por Asimov [1966].

⁷⁷ Heisenberg a Bohr, 31 de marzo de 1928: «Diracs Arbeiten hab ich auch sehr bewundert; aber ich finde es sehr beunruhigend, daß eine scheinbar so geschlossene Theorie wie die Diracsche eine so schlimme Lücke aufweist, wie die Übergänge von positiver zu negativer Energie».

para el electrón, que satisfacía la condición de invariancia relativista. Esta ecuación permitía determinar las energías de los electrones en la órbita K más cercana al núcleo de uranio, es decir, a una distancia del orden de la longitud de Compton del electrón.⁷⁸

La ecuación de Dirac sirvió también para extender la fórmula obtenida por Compton para la dispersión de fotones por electrones libres, al caso de una radiación γ de longitud de onda ultracorta. La nueva fórmula para la intensidad de la radiación dispersada, obtenida por Klein y Nishina fue pronto contrastada por diferentes investigadores.⁷⁹

No fue este el caso de la aplicación de la misma fórmula a la dispersión de la radiación γ por las partículas nucleares más pesadas. El problema persistió tras el descubrimiento del neutrón, como revela la siguiente carta de Heisenberg a Bohr del 18 de julio de 1932:

He reflexionado sobre la radiación gama y creo que existen dos tipos de dispersión. En el primer caso, la luz incidente perturba el movimiento de los neutrones y de los protones en el núcleo, pero la radiación resultante es, en general, demasiado débil, y sólo sería observable en caso de resonancia. En el segundo caso es el neutrón individual, es decir, su carga negativa, la que produce la dispersión.⁸⁰

Las anomalías observadas en estos casos tenían su origen —como se verá posteriormente— en la generación de pares electrón-positrón. Este fue uno de los primeros casos en que un problema de física nuclear se convertía en un problema de la disciplina en surgimiento de las partículas elementales.⁸¹

10. La resolución de las dificultades: el descubrimiento del neutrón y el surgimiento de la física de las partículas elementales

Con el descubrimiento del neutrón por Chadwick a comienzos de 1932,⁸² la física nuclear entra en una nueva etapa, ya que ahora se dispone de la otra pieza básica de la estructura nuclear. Además, el neutrón fue pronto utilizado por los Joliot-Curie en París y por Fermi en Roma como un proyectil muy eficaz en la investigación nuclear.⁸³ La importancia del descubrimiento para la física nuclear es comparable a la del descubrimiento del electrón para la física atómica.

⁷⁸ Cf. el comentario de Heisenberg sobre la teoría de Dirac en las cartas a Bohr del 21 de marzo de 1928 y del 30 de marzo 1930.

⁷⁹ Véase Meitner (1934b) y el artículo histórico de Gentner (1959).

⁸⁰ «Über die γ -Strahlstreuung hab ich mir folgendes überlegt: Es gibt zwei Arten von Streuung: Erstens wird die Bewegung der Neutronen und Protonen im Kern durch das einfallende Licht gestört dies gibt aber im allgemeinen eine viel zu schwache Streuung, höchstens an den Resonanzstellen könnte die merkbar werden. Zweitens wird das einzelne Neutron, d. h. die negative Ladung in ihm, streuen».

⁸¹ Véase Brown y Moyer (1984) y Roqué (1997).

⁸² Chadwick (1932 a, b). Véase también la descripción por Rùchardt (1936, p. 62f.).

⁸³ Cf. Bothe (1936).

Sin embargo, pasaron años hasta que se aceptó que el neutrón era una verdadera partícula elemental, es decir, no susceptible de una descomposición ulterior. Chadwick y Goldhaber aportaron la prueba definitiva al comprobar que la masa del neutrón era superior a la suma de las masas de protón y electrón.⁸⁴

El reconocimiento de este hecho señala el nacimiento de la física de las partículas elementales, ya que ahora se estaba en condiciones de estudiar los fenómenos nucleares independientemente de la estructura y comportamiento de las mismas partículas.

11. El modelo nuclear de Heisenberg y sus modificaciones

Mientras se descubría el neutrón, Heisenberg presentaba una teoría nuclear que describía al núcleo como un sistema de protones y neutrones que interactuaban según las leyes de la mecánica cuántica.⁸⁵ Los electrones intranucleares seguían presentes implícitamente, como Heisenberg explicaba en una carta a Bohr del 20 de junio de 1932: «La idea fundamental es culpar al neutrón de todas las dificultades básicas y practicar mecánica cuántica dentro del núcleo. Me parece que de esta manera se puede llegar bastante lejos».

Heisenberg concibió las fuerzas entre protones (p) y neutrones (n) por analogía con las interacciones moleculares, asignando a los electrones el papel de intermediario de las fuerzas nucleares. El neutrón era considerado como una partícula compuesta de protón y electrón. Las fuerzas entre los distintos pares de partículas (p-p, p-n y n-n) resultaban distintas. Mientras que entre dos protones sólo existía una repulsión coulombiana, las interacciones protón-neutrón y neutrón-neutrón implicaban el intercambio de uno o de dos electrones, mediante un mecanismo que Heisenberg denominó «Platzwechsel».⁸⁶

En esta teoría sólo se tenía en cuenta el intercambio de la carga electrónica. Heisenberg adoptó inicialmente la postura de Bohr al negar al electrón dentro del neutrón su individualidad y todos sus atributos, como el espín. Esto se explicaba por la supuesta violación del principio de incertidumbre en el caso de una partícula confinada dentro del núcleo.

⁸⁴ Chadwick y Goldhaber (1934). El contexto histórico es revisado en Stuewer (1993).

⁸⁵ Heisenberg (1932a, b, c). Sobre la historia del modelo de Heisenberg, véase Bromberg (1971), Brown y Moyer (1984), Miller (1985) y Brown y Rechenberg [1996].

⁸⁶ Esta interacción corresponde en química al enlace covalente y a las fuerzas de van der Waals. En el primer caso se trata de una fuerza puramente cuántica, en el segundo de una interacción de dipolos mutuamente inducidos. Heisenberg, en cambio, trataba este problema de la física nuclear de una manera más formal, intercambiando los papeles del neutrón y del protón por medio de una operación que sólo afectaba a la carga y la posición, sin preocuparse por el mecanismo de intercambio. El operador formal correspondiente a esta operación recibió posteriormente la denominación de isospín. Véase también los artículos de Jordan (1936, 1937) y Hund (1937).

El físico italiano Ettore Majorana presentó una teoría más completa tras una breve estancia en el instituto de Heisenberg en Leipzig. Además del «Platzwechsel», la teoría de Majorana tenía en cuenta el intercambio del espín como un atributo más del electrón.⁸⁷

En 1936 Carl Friedrich von Weizsäcker afirmaba que «el fundamento de la teoría nuclear que se adopta generalmente es el modelo de Heisenberg, según el cual los protones y los neutrones constituyen las partículas básicas de los núcleos. [...] Las investigaciones teóricas más recientes han demostrado que la teoría cuántica es aplicable a las partículas nucleares. En cambio, las fuerzas entre protones y neutrones, que condicionan la formación de los núcleos, son a priori completamente desconocidas.»⁸⁸ Weizsäcker proponía la búsqueda heurística de una ley de fuerzas que permitiera restaurar el orden en las propiedades nucleares, y que sería mejorada paulatinamente. Su fórmula semiempírica para la energía de un núcleo, obtenida en base al modelo de gota líquida, formaba parte de este programa.⁸⁹

12. Teorías cuánticas de campo y fuerzas nucleares de Fermi y de Yukawa

Sin embargo, la mayoría de los físicos cuánticos de los años 1930 buscó otra solución. En el curso sobre teoría nuclear del semestre de invierno de 1933/34, Heisenberg hacía las siguientes «observaciones generales sobre los electrones y la situación de la física nuclear: Hasta ahora, neutrones y protones, pero ley de fuerzas desconocida. Calcular más tarde esta ley; base: electrodinámica cuántica + teoría de electrones».⁹⁰

Esta observación, junto con la mención de los neutrinos como una «excusa de Pauli» para explicar el espectro continuo de la radiación β , revelan que la idea de los electrones intranucleares perduró por algunos años. Los físicos se familiarizaron paulatinamente con la idea de considerar protón y neutrón como verdaderas partículas elementales, y empezaron a buscar un mecanismo distinto al de los electrones para explicar las fuerzas nucleares.

Inmediatamente después del descubrimiento del neutrón, el físico ruso Dimitri Iwanenko propuso considerar al neutrón una partícula elemental, atribuyendo al electrón un papel similar al que juega el fotón en las transiciones entre niveles atómicos.

⁸⁷ Majorana (1933).

⁸⁸ Weizsäcker (1936, 1938).

⁸⁹ Von Weizsäcker (1935).

⁹⁰ Manuscrito en el archivo Heisenberg en el Max-Planck-Institut de Munich.

El primer paso consistía en someter el campo electromagnético a una cuantificación. En la teoría desarrollada en 1927 por Paul Dirac la radiación electromagnética se trataba como un sistema de osciladores armónicos que obedece ciertas reglas de cuantificación. La interacción del campo con los átomos se efectuaba a través de la emisión y absorción de los fotones resultantes de esta cuantificación. Con este procedimiento era posible abordar una serie de problemas de la teoría de la radiación que no habían sido resueltos por la mecánica cuántica no relativista de Heisenberg y Schrödinger.⁹¹

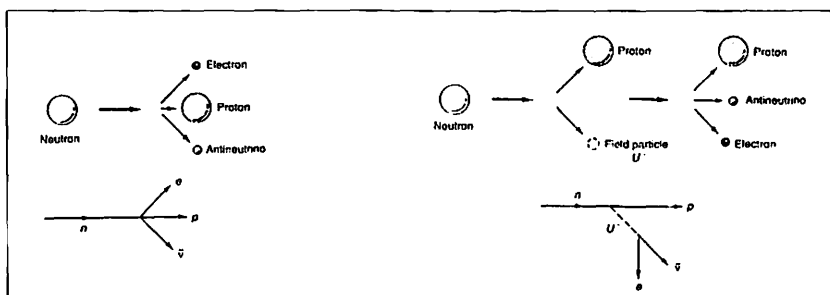


Fig. 9. Las teorías de desintegración β de Fermi y de la interacción nuclear de Yukawa

Ya hemos mencionado que el mismo Dirac encontró la ecuación relativista para el electrón, que permitía deducir de forma natural el momento magnético del electrón y la estructura fina de las líneas espectrales. Esta ecuación permitió describir el comportamiento de los electrones más cercanos al núcleo en los elementos pesados, electrones que adquieren altas velocidades relativistas. Además, Klein y Nishina pudieron obtener mediante la ecuación de Dirac una fórmula para la colisión relativista entre un fotón γ y un electrón libre, corrigiendo así la conocida fórmula de dispersión de Compton.⁹² Durante los años 30, la ecuación de Dirac sirvió de modelo para formular ecuaciones relativistas de partículas elementales —aún por descubrir— de espín cualquiera.⁹³

Ya que en la mecánica cuántica las partículas eran descritas por las ondas de materia de de Broglie, surgió la idea de someter tales ondas a una (segunda) cuantificación.⁹⁴ Después de los estudios previos de

⁹¹ Así, Dirac pudo derivar los famosos coeficientes de absorción y emisión de Einstein, necesarios para calcular las intensidades de las líneas espectrales. Cf. Wentzel (1933).

⁹² Cf. Wentzel (1925) y Bothe y Kirchner (1933, p. 112 y ss.). Heitler (1959) contiene un relato histórico sobre estas investigaciones.

⁹³ Un ejemplo es la ecuación relativista para partículas de espín entero de Pauli-Weiskopf (1934), que sirvió posteriormente como base para la teoría del campo nuclear mesónico.

⁹⁴ Se habla de una segunda cuantificación porque las ondas de materia provenían ya de una ecuación cuántica. Cf. Darrigol (1984).

Jordan, Pauli, Klein y Wigner, en 1929/30 Heisenberg y Pauli propusieron una teoría general de los campos cuantificados. A pesar de ser una teoría de gran generalidad y bien fundada en los principios de la física, resultó de poca utilidad en la práctica. Por un lado, requería el uso de métodos matemáticos poco familiares para la mayoría de físicos; por otro lado, lo que era más grave, aparecieron numerosas divergencias en el cálculo de algunas magnitudes de radiación. Sólo se obtuvo una solución parcial de las dificultades después de la Segunda Guerra Mundial, mediante el procedimiento conocido como renormalización propuesto por Feynman, Schwinger y Dyson en Estados Unidos e, independientemente, por Tomonaga en Japón.

Como hemos visto, Pauli introdujo el neutrino en 1930 para salvar los teoremas de conservación de la energía y el momento en la desintegración β .⁹⁵ Después del congreso Solvay de 1933, Fermi se inspiró en esta idea para formular una teoría de campo para la desintegración β , en la cual el neutrón se transforma en un protón emitiendo un par neutrino-electrón.⁹⁶ Aunque no describía en forma satisfactoria las fuerzas nucleares, la teoría de Fermi sirvió de modelo para muchas teorías posteriores. Yukawa, por ejemplo, introdujo una hipotética partícula de campo (mesón), cuya masa se elegía de acuerdo a la intensidad y el alcance de las fuerzas nucleares determinadas empíricamente.⁹⁷

La concepción del campo mesónico de las fuerzas nucleares experimentó un gran auge con el descubrimiento en 1938, por Anderson y Neddermeyer, de partículas en la radiación cósmica cuya masa coincidía con la de la partícula postulada por Yukawa. Sin embargo, las teorías mesónicas subsiguientes eran tan problemáticas como la de Fermi, al ser incapaces de deducir la independencia de carga de las fuerzas nucleares establecida en 1936 mediante experimentos de difusión de protones y neutrones.⁹⁸ Por si fuera poco, los mesotrones de la radiación cósmica presentaban un periodo de desintegración y un rango que era difícil conciliar con los requisitos nucleares.

La odisea en torno a las fuerzas nucleares sólo terminó durante la posguerra, cuando el grupo de físicos en torno a Powell en Bristol logró descubrir al *pión* como verdadera partícula portadora de las fuerzas nucleares.⁹⁹

⁹⁵ Brown (1978) y von Meyenn (1982a).

⁹⁶ Cf. Brown y Rechenberg (1988, 1990) y Darrigol (1988).

⁹⁷ Cf. Wentzel (1938) y Yukawa (1950). Sobre la historia de estos desarrollos, véase Brown (1985), Brown y Rechenberg (1991a, b) y Darrigol (1988).

⁹⁸ En una carta de Pauli a Wentzel del 24 de febrero de 1936 se indica la importancia de este descubrimiento para la física nuclear.

⁹⁹ Véase el estudio histórico de Murkherji (1974), la biografía de Rossi [1990] y las reminiscencias recogidas en Foster y Fowler (1988).

Cronología

- 1896 *Becquerel* descubre la radioactividad en las sales de uranio.
- 1898 Marie y Pierre Curie descubren las radiaciones del Ra, Po y Ac
- 1899 *Rutherford* descubre los rayos α y β .
- 1900 Villard examina las propiedades de la radiación γ .
- 1902 Rutherford y Soddy: leyes de las series de desintegración.
- 1911 Modelo nuclear del átomo de Rutherford.
- 1912 Leyes de desplazamiento de Soddy y Fajans.
Cámara de niebla de Wilson.
- 1913 Átomo cuántico de Bohr.
van den Broek reconoce la identidad del número de orden del elemento y de su número de carga nuclear.
El experimento de Franck y Hertz revela la existencia de niveles atómicos discretos.
- 1914 *Chadwick* descubre el espectro continuo de los rayos β .¹⁰⁰
- 1917 Modelo cuántico del núcleo de Haas.
- 1918 Modelo cuántico del núcleo de Lenz.
- 1919 Rutherford consigue la primera desintegración artificial.
- 1920 Descubrimiento de los isótopos por Aston.
- 1921 *Ellis* utiliza una concepción cuántica para explicar las líneas características del espectro de rayos γ .
- 1922 *Lise Meitner* interpreta el espectro continuo por procesos secundarios.¹⁰¹
- 1925 Mecánica matricial de Heisenberg.
- 1926 Mecánica ondulatoria de Schrödinger.
- 1927 Experimento de *Ellis* y *Wooster*: espectro continuo de la radiación β .
Dirac publica su teoría cuántica de la radiación.
- 1928 *Dirac* publica su ecuación relativista del electrón.
Gamow y *Gurney* explican la desintegración α mediante la teoría cuántica.
- 1928/29 Violación de conservación de la estadística y del espín en la desintegración β : La anomalía del nitrógeno (*Kronig*, *Heitler* y *Herzberg*).¹⁰²
- 1929 Gamow propone su modelo de la gota líquida nuclear.
- 1929/30 *Heisenberg* y *Pauli* publican su teoría general de la cuantificación de los campos.
- 1930 *Meitner* y *Orthmann*¹⁰³ repiten el experimento de *Ellis* y *Wooster*.
Pauli propone una partícula neutra (posteriormente llamada

¹⁰⁰ Chadwick (1914).

¹⁰¹ Meitner (1922).

¹⁰² Kronig (1928), Heitler y Herzberg (1929).

¹⁰³ Meitner y Orthmann (1930).

- neutrino) para salvar los principios de conservación (energía, impulso angular y estadística) durante la desintegración β .
- 1931 20-24 de Mayo: Primera conferencia de física nuclear en Zurich.¹⁰⁴
15-20 de Junio: Congreso de la *American Physical Society* en Pasadena: primer anuncio público de la hipótesis del neutrino por Pauli.
1 Octubre: *Monopol-dipol Colloquium* de Pauli y Dirac en Princeton.
11-18 de Octubre: Congreso de física nuclear en Roma; *Goudsmit* menciona en su exposición el neutrino de Pauli.
- 1932 *Anderson* descubre el positrón y *Chadwick* el neutrón; *Heisenberg*, *Iwanenko* y *Majorana* proponen diversos modelos nucleares basados en el neutrón.
5-12 de Julio: Congreso Internacional de Electricidad en París: Fermi menciona por primera vez en público el neutrino de Pauli
- 1932 Urey descubre el deuterón, importante para el desarrollo de la teoría de las fuerzas nucleares.
- 1933 *Fermi* formula su teoría de la desintegración β , que proporciona la base para las futuras teorías de las fuerzas nucleares *Ellis* y *Mott* comprueban que la energía máxima del espectro β corresponde exactamente a la diferencia de los respectivos estados de los núcleos.¹⁰⁵
Cockcroft y Walton: Transformaciones nucleares con partículas aceleradas artificialmente.
Francis Perrin considera los neutrinos de Pauli como partículas nucleares, creadas durante el proceso de emisión β .¹⁰⁶
- 1934 *Bethe* y *Peierls* discuten la desintegración β inversa.
Henderson confirma la existencia de un límite superior del espectro β continuo.
Fermi, Irene Curie y Frederic Joliot descubren la radioactividad artificial.
- 1935 *Yukawa* propone su teoría mesónica de las fuerzas nucleares
Alvarez descubre la captura K de los electrones por los núcleos
- 1938 *Anderson* y *Neddermeyer* descubren el mesón (el posterior muón μ^-), al cual se identifica erróneamente con la partícula transmisora de las fuerzas nucleares.
- 1947 *Conversi*, *Pancini* y *Piccioni* descubren la naturaleza leptónica del muón.
Descubrimiento del mesón π por *Powell* y sus colaboradores.

¹⁰⁴ Bretscher y Guth (1931).

¹⁰⁵ Ellis y Mott (1933).

¹⁰⁶ Perrin (1933).

- 1952 Invento de la cámara de burbujas por *Donald Glaser*.
- 1954 Formulación del teorema CPT por *Pauli y Lüders*.
- 1953-56 *Reines y Cowan* logran detectar los neutrinos ν_e emitidos por las reacciones nucleares en la planta nuclear de Savannah River.¹⁰⁷
- 1955/56 Paradoja $\theta - \tau$.¹⁰⁸
- 1957 Violación de la paridad (desintegración ^{60}Co) descubierto por la física *Wu* y otros.
Neutrinos longitudinales.
- 1962 Descubrimiento del neutrino muónico ν_μ en Brookhaven por *Melvin Schwartz* y colaboradores.
- 1973 Corrientes neutras y dispersión de neutrinos (CERN).
- 1975 Observación del leptón pesado τ por *Perl* y colaboradores.¹⁰⁹
- 1977 Descubrimiento del quark *bottom* por *Lederman*.
... ..
- 1994/95 Descubrimiento del quark *top* en el *Fermilab* cerca de Chicago.

Bibliografía

Nuestro artículo se ocupa primordialmente del influjo de la mecánica cuántica sobre el desarrollo de la física nuclear en la década que siguió a su creación por Heisenberg y Schrödinger. Sin embargo, la comprensión cabal de estos sucesos requiere conocer también algunos detalles de las concepciones nucleares antes de estos acontecimientos. Con tal fin hemos preparado esta bibliografía, que además de las contribuciones más importantes a nuestro tema incluye también la literatura sobre física nuclear anterior a la formulación de la mecánica cuántica. Los artículos originales de física nuclear están marcados con una *; los artículos de revista y las obras monográficas se indican con un §; y los estudios biográficos o historiográficos con una †. En algunos casos hemos señalado la relación entre los trabajos citados en esta lista, así como la existencia de traducciones.

Amaldi, E.

- † (1977a) Neutron work in Rome in the 30s. En Weiner [1977, p. 294-351]
- † (1977b) Radioactivity, a pragmatic pillar of probabilistic conceptions. En Weiner [1977, p. 1-28].

Asimov, I.

- † [1966] *The neutrino - ghost particle of the atom*. New York 1966.
[Traducción alemana: *Das Neutrino. Geisterjagd in der Atomphysik*. Frankfurt a. M. 1971].

Aston, F. W.

- * [1922] *Isotopes*. London 1922. [Traducción alemana: *Isotope*. Leipzig 1923].
- § (1936) Kanalstrahlen und Atomphysik. *Die Naturwissenschaften* **24**, 467-469 (1936).

¹⁰⁷ Reines y Cowan (1857)

¹⁰⁸ Cf. Maglich [1973, p. 94].

¹⁰⁹ Perl et al. (1975).

- Badash, L.**
† (1966) Becquerel's *unexposed* photographic plates. *Isis* 57, 267-269 (1966).
† (1978) Radium, radioactivity, and the popularity of scientific discovery. *Proceedings of the American Philosophical Society* 122, 145-154 (1978).
- Beck, G.**
(1933) Kernbau und Quantenmechanik. *Handbuch der Radiologie*, Volumen 6/1, p. 279-450. Leipzig 1933.
- Bergia, S. y L. Navarro**
† (1988) Recurrences and continuity in Einstein's research between 1905 and 1916. *Archive for History of exact Sciences* 38, 79-99 (1988).
- Bethe, H. y R. Peierls**
* (1934) The neutrino. *Nature* 133, 532; 689-690 (1934).
- Beyer, R. T., ed.**
†§ [1949] *Foundations of nuclear physics*. New Yoerk 1949. [Selección de trabajos originales].
- Bohr, N.**
* (1932) Chemistry and quantum theory of atomic constitution. Faraday lecture, 8 de Mayo 1930. *Journal of the Chemical Society* 1932, p. 349-384.
§ (1938) Wirkungsquantum und Atomkern. *Annalen der Physik* 32, 5-19 (1938).
§ [1985] *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*. Braunschweig/Wiesbaden 1985.
- Born, M.**
* (1929) Zur Theorie des Kernzerfalles. *Zeitschrift für Physik* 58, 306-321 (1929)
- Bothe, W.**
§ (1933) Das Neutron und das Positron. *Die Naturwissenschaften* 21, 825-831 (1933).
§ (1936) Wege und Arten der künstlichen Atomumwandlung. *Forschungen und Fortschritte* 12, 7-8 (1936).
§ (1937) Prinzipien der Spektroskopie der Atomkerne. *Forschungen und Fortschritte* 13, 405-406 (1937).
- Bothe, W. y F. Kirchner**
§ (1933) Zerstreung von Röntgenstrahlung. *Handbuch der Physik*. Volumen 23/2, p. 85-141. Berlin 1933.
- Brakel, J. van**
† (1984) The possible influence of the discovery of radio-active decay on the concept of physical probability. *Archive for History of Exact Sciences* 31, 369-385 (1984).
- Braunbek, W.**
* (1932) Über Massendefekt und Bindungsenergie des Neutrons. *Zeitschrift für Physik* 77, 534-540 (1932) [Stuewer (1993)].
- Bretscher, E. y E. Guth**
§ (1931) Zusammenfassender Bericht über die Physikalische Vortragswoche der Eidg. Technischen Hochschule Zürich vom 20.-24. Mai 1931. *Physikalische Zeitschrift* 32, 649-674 (1931).
- Brink, D.**
§† [1965] *Nuclear forces*. Oxford 1965 [Selección de trabajos originales].
- Bromberg, J.**
† (1971) The impact of the neutron: Bohr and Heisenberg. *Historical Studies of Physical Sciences* 3, 307-341 (1971).
- Brown, A. P.**
† (1996) Liverpool and Berkeley: The Chadwick-Lawrence letters. *Physics Today*. Mayo 1996, p. 34-40.
- Brown, L. M.**
† (1978) The idea of the neutrino. *Physics Today* 31 (9), 23-28 (1978).
† (1981) Yukawa's prediction of the meson. *Centaurus* 25, 71-132 (1981).
† (1985) How Yukawa arrived at the meson theory. *Progress in Theoretical Physics*, Supplement 85, 13-19 (1985).
- Brown, L. M., M. Dresden y L. Hoddeson**
† [1989] *Pions to quarks. Particle physics in the 1950s*. Cambridge 1989.
- Brown, L. M. y D. F. Moyer**
† (1984) Lady or tiger? - The Meitner-Hupfeld effect and Heisenberg's neutron theory. *American Journal of Physics* 52, 130-136 (1984).

- Brown, L. M. y H. Rechenberg**
 † (1988) Nuclear structure and β -decay (1932-1933). *American Journal of Physics* **56**, 982-988 (1988).
 † (1990) The Fermi-field theory of nuclear forces (1933-1937). En *Utha Conference on the history of gauge fields, 1987*.
 † (1991a) Quantum field theories, nuclear forces, and cosmic rays (1934-1938). *American Journal of Physics* **59**, 595-605 (1991).
 † (1991b) The development of the vector meson theory in Britain and Japan (1937-1938). *British Journal of History of Science* **24**, 405-433 (1991).
 † [1996] *Origin of the concept of nuclear forces*. [En preparación].
- Brush, S. G.**
 † (1993) Prediction and theory evaluation: Subatomic particles. *Rivista di Storia della Scienza, Serie II*, **1** (2), 47-152 (1993).
- Cassidy, D. C.**
 † (1981) Cosmic ray showers, high energy physics, and quantum field theories. *Historical Studies in Physical Sciences* **12**, 1-39 (1981).
- Chadwick, J.**
 * (1914) Intensitätsverteilung im magnetischen Spektrum der β -Strahlen von Radium B+C. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **16**, 383-391 (1914).
 * (1932a) Possible existence of a neutron. *Nature* **129**, 312 (1932).
 * (1932b) The existence of a neutron. *Proceedings of the Royal Society A* **136**, 692-708 (1932).
 † (1972) Discovery of the neutron. En Maglich [1972, p. 193-197].
- Chadwick, J. y C. D. Ellis**
 (1922) A preliminary investigation of the intensity distribution in the β -ray spectra of radium B and C. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **21**, 121-128 (1922).
- Chadwick, J. y G. Gamow**
 * (1930) Artificial disintegration by α -particles. *Nature* **126**, 54-55 (1930).
- Chadwick, J. y M. Goldhaber**
 * (1934) A nuclear photo-effect: Disintegration of the dipton by γ -rays. *Nature* **134**, 237-238 (1934).
- Cockroft, J. D. y E. T. S. Walton**
 * (1932) Experiments with high velocity positive ions. I. Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions. *Proceedings of the Royal Society A* **136**, 619-630 (1932).
- Condon, E. U.**
 † (1978) Tunneling- How it all started. *American Journal of Physics* **46**, 319-323 (1978).
- Congresos**
 a Lüttich, Solvay.
- Cornell, Th. D.**
 (1988) Merle Anthony Tuve: Pioneer nuclear physicist. *Physics Today*, Enero 1988, p. 57-62.
- Curie, M.**
 * [1904] *Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen*. Braunschweig 1904.
 † [1963] *Pierre Curie. With autobiographical notes by Marie Curie*. New York 1963.
- Darrigol, O.**
 † (1984) La genèse du concept de champ quantique. *Annales de Physique* **9**, 433-501 (1984).
 † (1986) The origin of quantized matter waves. *Historical Studies of Physical Sciences* **16**, 197-253 (1986).
 † (1988) The quantum electrodynamical analogy in early nuclear theory or the roots of Yukawa's theory. *Revue d'Histoire des Sciences* **41**, 225-297 (1988).
- Dirac, P. A. M.**
 * (1928) The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society A* **117**, 610-624; **118**, 351-361 (1928).
- Ellis, C. D.**
 * (1921) Magnetic spectrum of the β -rays excited by γ -rays. *Proceedings of the Royal Society A* **99**, 261-271 (1921) [Mackintosh (1995)].

- * (1922) β -ray spectra and their meanings. *Proceedings of the Royal Society A* **101**, 1-17 (1922).
- * (1925) Über die Deutung der β -Strahlspektren radioaktiver Substanzen. *Zeitschrift für Physik* **10**, 303-307 (1925).
- * (1934) The beta-ray type of radiative disintegration. *International Conference on Physics*, London, October 1934. Volumen I, p. 43-59.
- Ellis, C. D. y N. Mott**
 - * (1933) Energy relations in the β -ray type of radiative disintegration. *Proceedings of the Royal Society A* **141**, 502-511 (1933).
- Ellis, C. D. y W. A. Wooster**
 - * (1927a) Relative intensities of the groups in the magnetic β -ray spectra of radium B and C. *Proceedings of the Royal Society A* **114**, 276-288 (1927).
 - * (1927b) The continuous spectrum of β -rays. *Nature* **119**, 563-564 (1927).
 - * (1927c) The average energy of disintegration of radium E. *Proceedings of the Royal Society A* **117**, 109-123 (1927).
- Enz, Ch. P. und K. von Meyenn, ed.**
 - † [1988] *Wolfgang Pauli. Das Gewissen der Physik*. Braunschweig, Wiesbaden 1988.
- Fajans, K.**
 - § [1919] *Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen*. Braunschweig 1919.
- Fermi, E.**
 - * (1932) État actuel de la physique du noyaux atomique. En *Congrès International d'Électricité*. Paris 1932, 1^a Section, Rapport No 22.
 - * (1934) Versuch einer Theorie der β -Strahlen. *Zeitschrift für Physik* **88**, 161-177 (1934).
- Fiorini, E., Ed.**
 - † [1982] *Neutrino physics and astrophysics*. New York y London 1982.
- Fleischmann, R.**
 - † (1951) Zur Entdeckungsgeschichte der künstlichen Kern- γ -Strahlung. *Die Naturwissenschaften* **38**, 465-467 (1951).
- Foster, B. y P. H. Fowler, ed.**
 - † [1988] *40 years of particle physics*. Bristol y Philadelphia 1988.
- Franklin, A.**
 - † [1986] *The neglect of experiment*. Cambridge 1986.
- Frisch, O. R.**
 - § [1961] *Atomic physics today*. New York 1961.
- Frisch, O. R., F. Paneth, F. Laves y P. Rosbaud, ed.**
 - † [1959] *Beiträge zur Physik und Chemie des 20. Jahrhunderts*. Braunschweig 1959.
- Galison, P. y A. Assmus**
 - † (1989) Artificial clouds, real particles. En Gooding et al. [1989, p. 225-274].
- Gamow, G.**
 - * (1928a) Zur Quantentheorie des Atomkerns. *Zeitschrift für Physik* **51**, 204-212 (1928).
 - * (1928b) Zur Quantentheorie der Atomzertrümmerung. *Zeitschrift für Physik* **52**, 510-515 (1928).
 - * (1929a) Bemerkung zur Quantentheorie des Kernzerfalls. *Zeitschrift für Physik* **53**, 601-604 (1929) [Teoría de la desintegración α ; Stuewer (1986a)].
 - * (1929b) Über die Struktur des Atomkernes. *Physikalische Zeitschrift* **30**, 717-720 (1929) [«Tröpfchenmodell»: Modelo de la gota; Stuewer (1994)].
 - * (1930) Mass defect curve and nuclear constitution. *Proceedings of the Royal Society A* **126**, 632-644 (1930).
 - * § [1931] *Constitution of atomic nuclei and radioactivity*. Oxford 1931.
[Traducción alemana: *Der Bau des Atomkerns und die Radioaktivität*. Leipzig 1932].
 - † (1938) Das Lebenswerk von Lord Rutherford of Nelson. *Die Naturwissenschaften* **26**, 161-164 (1938).
 - § (1948) The reality of neutrinos. *Physics Today* (7), 4-31 (1948).
[Versión alemana: Die Existenz des Neutrinos. *Physikalische Blätter* **5**, 108-114 (1949)].

- Gamow, G. y F. G. Houtermans**
 * (1928) Zur Quantenmechanik des radioaktiven Kerns. *Zeitschrift für Physik* **52**, 496-509 (1928).
- Geiger, H.**
 § (1910) Neuere Forschungen über die α -Strahlen. *Physikalische Zeitschrift* **II**, 676-695 (1910).
 § (1932) Die Bedeutung der α -Strahlen für die Atomforschung. *Vorberichte für die Vorträge für die Hauptvorträge der Deutschen Bunsen- Gesellschaft* 1932, p. 3f.
- Geiger, H. y J. M. Nutall**
 * (1912) The ranges of the α particles from uranium. *Philosophical Magazine* **23**, 439-445 (1912).
- Gentner, W.**
 † (1959) Einiges aus der frühen Geschichte der Gamma-Strahlen. En Frisch *et al.* [1959, p. 28-44].
 † (1965) Individuelle und kollektive Erkenntnissuche in der modernen Naturwissenschaft. *Physikalische Blätter* **21**, 541-548 (1965).
- Glasson, J. L.**
 * (1921) Attempts to detect the presence of neutrons in a discharge tube. *Philosophical Magazine* **42**, 598 (1921).
- Gooding, D., T. Pinch y S. Schaffer, ed.**
 † [1989] *The uses of experiment. Studies in the natural sciences.* Cambridge 1989.
- Goudsmit, S.**
 † (1961) Pauli and nuclear spin. *Physics Today* **14** (6), 18-21 (1961).
- Goudsmit, S. y E. Back**
 * (1927) Feinstrukturen und Termordnung des Wismutspektrums. *Zeitschrift für Physik* **43**, 321-334 (1927).
- Haas, A.**
 * (1917) Der positive Kern der Atome. *Physikalische Zeitschrift* **18**, 400-402 (1917) [Modelo de Thomson invertido].
 § [1921] *Einführung in die theoretische Physik.* Volumen 2. Berlin y Leipzig 1921.
- Hahn, O.**
 [1962] *Vom Radiothor zur Uranspaltung. Eine wissenschaftliche Selbstbiographie.* Braunschweig 1962.
- Heilbron, J. L.**
 † (1968) The scattering of α and β particles and Rutherford's atom. *Archive for History of exact Sciences* **4**, 247-307 (1968).
 † (1977) Lectures on the history of atomic physics: 1900-1922. En Weiner [1977, p. 40-108].
 † (1986) The first European cyclotrons. *Rivista di Storia delle Scienze* **3** (1), 1-44 (1986).
- Heilbron, J. L. y B. R. Wheaton**
 † [1981] *Literature on the history of physics in the 20th century.* Berkeley 1981.
- Heisenberg, W.**
 * (1932) Über den Bau der Atomkerne. I, II, y III. *Zeitschrift für Physik* **77**, 1-11; **78**, 156-164; **80**, 587-596 (1932) [Bromberg (1971); Brown y Moyer (1984)].
 [1943] [Ed.] *Kosmische Strahlung.* Vorträge gehalten im Max Planck-Institut Berlin-Dahlem. Berlin 1943.
- Heitler, W.**
 † (1959) The penetration of γ -rays through matter and the development of radiation theory. En Frisch *et al.* [1959, p. 23-27].
- Heitler, W. y G. Herzberg**
 * (1929) Gehorchen die Stickstoffkerne der Boseschen Statistik? *Die Naturwissenschaften* **17**, 673-674 (1929).
- Henderson, W. J.**
 * (1934) The upper limits of the continuous β -ray spectrum of thorium C and C". *Proceedings of the Royal Society A147*, 572-582 (1934).
- Hendry, J., ed.**
 † [1984] *Cambridge physics in the thirties.* Bristol 1984.

- Houtermans, F. G.**
§ (1930) Neuere Arbeiten über die Quantentheorie des Atomkerns. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 9, 123-221 (1930)
- Hund, F.**
* (1927) Zur Deutung der Molekelspektren. I. *Zeitschrift für Physik* 40, 742-764 (1927) [Efecto túnel].
(1937) Theoretische Erforschung der Kernkräfte. *Physikalische Zeitschrift* 38, 929-935 (1937).
- Jauncey, G. E. M.**
(1946) The early years of radioactivity. *American Journal of Physics* 14, 226-241 (1946).
- Jensen, C.**
† (1990) *A history of the beta-spectrum and its interpretation, 1911-1934*. Dissertation, Universidad de Copenhagen 1990. Aparecerá pronto como libro bajo el título *Controversy and consensus: Nuclear β -decay, 1911-1934*.
- Jordan, P.**
§ (1936) Fortschritte der Theorie der Atomkerne. *Die Naturwissenschaften* 24, 209-216 (1936).
§ (1937a) Kernkräfte. *Die Naturwissenschaften* 25, 273-279 (1936).
§ (1937a) Fortschritte der Theorie der Atomkerne. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 16, 47-103 (1937).
- Kallmann, H. y H. Schüler**
§ (1932) Hyperfeinstruktur und Atomkern. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* II, 134-175 (1932).
- Kaluza, Th.**
(1922) Über Bau und Energieinhalt der Atomkerne. *Physikalische Zeitschrift* 23, 474-476 (1922).
- Kaplan, I.**
§ [1955] *Nuclear physics*. Cambridge, Mass. 1955.
- Kirchberger, P.**
† (1936) Amerikanische Forschungen über den Kern des Atoms. *Die Umschau* 40, 586-588 (1936).
- Kirsch, G.**
§ (1931) Atomkernstruktur. En *Handwörterbuch der Naturwissenschaften*, volumen 1, p. 575-587. Jena ²1931.
§ (1933) Radioaktivität. En *Handwörterbuch der Naturwissenschaften*, volumen 8, p. 145-169 Jena ²1933.
- Kirsch, G. y E. Teller**
§ (1933) Der elektrische Aufbau der Atomkerne. En *Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik*. Volumen 4, 3^o parte, p. 445-578.
- Klein, M. J.**
† (1965) Lord Rutherford and the origins of nuclear physics at Manchester. *Scientific American* 212 (3), 129-134 (1965).
† (1982) Fluctuations and statistical physics in Einstein's work. In *Albert Einstein. Historical and Cultural Perspectives*. The Centennial Symposium in Jerusalem, *Symposium*, 14-23 March 1979, p. 39-58. Princeton 1982.
- Klein, O.**
* (1929) Die Reflexion von Elektronen an einem Potentialsprung nach der relativistischen Dynamik von Dirac. *Zeitschrift für Physik* 53, 157-165 (1929) [Paradoja de Klein].
- Kohlhörster, W.**
§ [1924] *Die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre*. Hamburg 1924.
- Kohlrausch, K. W.**
§ [1927] *Probleme der γ -Strahlung*. Braunschweig 1927.
§ [1928] Radioaktivität. En *Handbuch der Experimentalphysik*. Volumen 15. Leipzig 1928.
- Kossel, W.**
* (1919) Über die Zusammensetzung des Atomkerns und seine Neigung zum Zerfall. *Physikalische Zeitschrift* 20, 265 (1919).

- Kronig, R.**
 * (1926) Spinning electron and the structure of spectra. *Nature* **117**, 550 (1926).
 * (1928) Der Drehimpuls des Stickstoffkerns. *Die Naturwissenschaften* **16**, 335 (1928).
- Kronig, R. de L. y S. Frisch**
 § (1931) Kernmomente. *Physikalische Zeitschrift* **32**, 457-472 (1931).
- Laue, M. von**
 * (1928) Notiz zur Quantentheorie des Atomkernes. *Zeitschrift für Physik* **52**, 726-734 (1928).
- Lederman, L. M.**
 † (1970) Resource Letter Neu-1 History of the neutrino. *American Journal of Physics* **38**, 129-136 (1970).
- Lenz, W.**
 * (1918) Über ein invertiertes Bohrsches Modell. *Münchener Berichte* 1918, 355-365 [Modelo de Rutherford invertido].
 * (1920a) Die Kernstruktur der Atome. *Zeitschrift für Elektrochemie* Nr. 13/14, 277-281 (1920).
 * (1920b) Betrachtungen zu Rutherfords Versuchen über die Zerspaltbarkeit des Stickstoffkerns. *Die Naturwissenschaften* **8**, 181-186 (1920).
- Livingston, M. S.**
 † [1966] *The development of high-energy accelerators*. New York 1966.
 † [1969] *Particle accelerators: A brief history*. Cambridge, Mass. 1969.
- Lüttich**
 (1905) *Erster internationaler Kongreß zum Studium der Radiologie und Ionisation*. Lüttich, 11.-16. September 1905. *Physikalische Zeitschrift* **6**, 681-727 (1905).
- Mackintosh, A. R.**
 † (1995) The third man: Charles Drummond Ellis, 1895-1980. *Notes and Records, Royal Society, London* **49** (2), 277-293 (1995).
- Maglich, B., ed.**
 † [1972] *Adventures in experimental physics*. Volume α Princeton 1972.
 † [1973] *Adventures in experimental physics*. Volume β . Princeton 1973.
 † (1973) *Discovery of parity violation in weak interactions*. En Maglich [1973, p. 93-162].
- Majorana, E.**
 (1933) Über die Kerntheorie. *Zeitschrift für Physik* **82**, 137-145 (1933).
- Malley, M.**
 † (1971) The discovery of the β -particle. *American Journal of Physics* **39**, 1454-1460 (1971).
 † (1979) The discovery of atomic transmutation: Scientific stiles and philosophies in France and Britain. *Isis* **70**, 213-223 (1979).
- Meitner, L.**
 § (1921) Radioaktivität und Atomkonstitution. *Die Naturwissenschaften* **9**, 423-427 (1921).
 * (1922a) Über die Entstehung der β -Strahl-Spektren radioaktiver Substanzen. *Zeitschrift für Physik* **9**, 131-144 (1922).
 * (1922b) Über den Zusammenhang zwischen β - und γ -Strahlen. *Zeitschrift für Physik* **9**, 145-152 (1922).
 * (1922c) Über die β -Strahl-Spektren und ihren Zusammenhang mit der γ -Strahlung. *Zeitschrift für Physik* **11**, 35-54 (1922).
 * (1922d) Über die Wellenlänge der γ -Strahlen. *Die Naturwissenschaften* **10**, 381-384 (1922).
 * (1924a) Über die Energieentwicklung bei radioaktiven Zerfallsprozessen. *Die Naturwissenschaften* **12**, 1146-1150 (1924).
 § (1924b) Der Zusammenhang zwischen β - und γ -Strahlen. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* **3**, 160-181 (1924).
 * (1925) Die γ -Strahlung der Actiniumreihe und der Nachweis, daß die γ -Strahlen erst nach erfolgtem Atomzerfall emittiert werden. *Zeitschrift für Physik* **34**, 807-818 (1925).
 * (1926a) Neuere Arbeiten über die Streuung der α -Strahlen und den Aufbau der Atomkerne. *Die Naturwissenschaften* **14**, 863-869 (1926).

- § (1926b) Kernstruktur. En *Handbuch der Physik*. Volumen 22. Berlin 1926, p. 124-145; nueva versión revisada en *Handbuch der Physik*. Volumen 22, 1. parte. Berlin 1933, p. 118-153.
- * (1927a) Über den Aufbau des Atominneren. *Die Naturwissenschaften* 15, 369-378 (1934).
- § (1927b) Ueber Wechselwirkungen zwischen Atomkernen. *Forschungen und Fortschritte* 6, 42-44 (1927).
- § (1929a) Die γ -Strahlen. En *Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik*. Volumen 2, 2/2, p. 2097-2118. Braunschweig ¹¹1929.
- § (1929b) Die Reichweite von β -Strahlen bestimmter Geschwindigkeit. *Forschungen und Fortschritte* 6, 321-322 (1929).
- * (1934a) Über die von I. Curie und F. Joliot entdeckte künstliche Radioaktivität. *Die Naturwissenschaften* 22, 172- (1934).
- * (1934b) Die Streuung harter γ -Strahlen. *Die Naturwissenschaften* 22, 174 (1934).
- * (1934c) Atomkern und periodisches System der Elemente. *Die Naturwissenschaften* 22, 733-739 (1934).
- † (1954) Erinnerungen an das Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie. *Die Naturwissenschaften* 41, 97 (1954).
- Meitner, L. y M. Delbrück**
§ [1935] *Der Aufbau der Atomkerne. Natürliche und künstliche Kernumwandlungen*. Berlin 1935.
- Meitner, L. y H. H. Hupfeld**
* (1930) Die Prüfung der Streuformel von Klein und Nishina an kurzweilliger γ -Strahlung. *Physikalische Zeitschrift* 31, 947 (1930).
- Meitner, L. y W. Orthmann**
* (1930) Über eine absolute Bestimmung der Energie der primären β -Strahlen von Radium E. *Zeitschrift für Physik* 60, 143-155 (1930).
- Meyenn, K. von**
† (1982a) Pauli, das Neutrino und die Entdeckung des Neutrons vor 50 Jahren. *Die Naturwissenschaften* 69, 564-573 (1982).
- † (1982b) Theoretische Physik in den dreißiger Jahren. Die Entwicklung einer Wissenschaft unter ideologischen Zwangsbedingungen. *Gesnerus* 39, 417-435 (1982).
- † [1985] [Ed.] *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a.* Volumen II: 1930-1939. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1985.
- † (1989) Physics in the making in Pauli's Zürich. En Sarlemijn y Sparnaay [1989, p. 93-130].
- Meyenn, K. von, K. Stoltzenburg y R. Sexl, ed.**
† [1985] *Niels Bohr 1885-1962. Der Kopenhagener Geist in der Physik*. Braunschweig/Wiesbaden 1985.
- Meyer, St.**
* (1927) Bemerkung über Atomgewichte und Packungseffekte. *Die Naturwissenschaften* 15, 623-625 (1927).
- † (1949) Zur Geschichte der Entdeckung der Natur der Becquerel-Strahlen. *Die Naturwissenschaften* 36, 129-132 (1949).
- † (1950) Die Vorgeschichte der Gründung und das erste Jahrzehnt des Institutes für Radiumforschung. *Wiener Berichte* 159, 1-26 (1950).
- Miller, A. I.**
† (1985) Werner Heisenberg and the beginning of nuclear physics. *Physics Today* 38, (11), 60-68 (1985).
- Mladjenovic, M.**
† [1992] *The history of early nuclear physics*. River Edge, N. J. 1992.
- Mott, N. F.**
* (1933) Wellenmechanik und Kernphysik. En *Handbuch der Physik*. Volumen 24. Berlin ²1933, p. 785-841.
- Murkherji, V.**
† (1974) A history of the meson theory of nuclear forces from 1935 to 1952. *Archive for History of Exact Sciences* 13, 27-102 (1974).

- Pais, A.**
 † [1986] *Inward bound: Matter and forces in the physical world*. Oxford 1986.
- Paneth, F. A.**
 † (1950) Aus der Frühzeit des Wiener Instituts. Die Darstellung des Wismutwasserstoffs. *Wiener Berichte* 159, 49-52 (1950).
- Pauli, W.**
 * (1924) Zur Frage der theoretischen Deutung der Satelliten einiger Spektrallinien und ihrer Beeinflussung durch magnetische Felder. *Die Naturwissenschaften* 12, 741-743 (1924) [Estructura hiperfina, momentos magnéticos nucleares; Goudsmit (1961)].
- Pauling, L. y S. Goudsmit**
 § [1930] *The structure of line spectra*. New York y London 1930.
- Peierls, R.**
 § (1935) Quantum theory of atomic nuclei. *Report of Progress in Physics* 2, 27-38 (1935).
 § (1939) The meson. *Report of Progress in Physics* 6, 78-94 (1939).
 § (1959) The atomic nucleus. *Scientific American* 1959 (1), p. 75-82.
 † (1982) The early days of neutrino physics. En Fiorini [1982, p. 1-10].
- Philipps, K.**
 (1926) Zur Existenz der weitreichenden α -Strahlen des Radium C. *Die Naturwissenschaften* 14, 1203-1204 (1926).
- Przibram, K.**
 † (1959) Erinnerungen an ein altes physikalisches Institut. In Frisch et al. [1959, p. 1-6].
- Purcell, E. M.**
 † (1964) Nuclear physics without the neutron: Clues and contradictions. *Actes Xth Congrès International d'Histoire des Sciences* 1, 121-132 (1964) [Goudsmit's Comment: p. 132].
- Regener, E.**
 (1913) Die neuen Versuche von C. T. R. Wilson. *Die Naturwissenschaften* 1, (1913).
- Reines, F., ed.**
 § [1972] *Cosmology, fusion and other matters: George Gamow Memorial Volume*. Boulder 1972.
- Roqué, X.**
 † (1997) The manufacture of the positron. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*. 28, 73-129 (1997).
- Rosenblum, S.**
 † (1959) Spectres magnétiques des particules alpha. En Frisch et al. [1959, p. 7-22].
- Rosenfeld, L.**
 † (1972) Nuclear reminiscences. En Reines [1972, p. 289-299].
- Rossi, B.**
 † [1990] *Moments in the life of a scientist*. Cambridge 1990.
- Rüchardt, E.**
 †§ (1935) Neuzeitliche Kernphysik und künstliche Umwandlung der Elemente. *Abhandlungen und Berichte des Deutschen Museums* 7, 43-76 (1935).
- Rutherford, E.**
 * [1904] *Radioactivity*. Cambridge 1904 [Traducción alemana: *Radioaktivität*. Berlin 1907].
 § [1906] *Radioactive transformations*. London 1906 [Traducción alemana: *Radioaktive Umwandlungen*. Braunschweig 1907].
 § [1913] *Radioactive substances and their radiations*. Cambridge 1913.
 * (1919) Collision of a particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen. *Philosophical Magazine* 37, 581-587 (1919).
 * (1920) Nuclear constitution of atoms. Bakerian lecture. *Proceedings of the Royal Society A* 97, 374-400 (1920).
 * (1924) Die elektrische Natur der Materie *Die Naturwissenschaften* 12, 1-14 (1924)
 * (1927) Structure of the radioactive atom and origin of the α -rays. *Philosophical Magazine* 4, 580-605 (1927).
- Rutherford, E., J. Chadwick y Ch. D. Ellis**
 * [1930] *Radiations from radioactive substances*. Cambridge 1930.

Sanchez Ron, J. M.

† [1992] *El poder de la ciencia*. Madrid 1992.

Sarlemijn, A. y M. J. Sparnaay, ed.

† [1989] *Physics in the making. Essays on the developments in 20th Century Physics in Honour of H. B. G. Casimir on the occasion of his 80th Birthday*. Amsterdam 1989.

Schweidler, E. von

* [1904] *Premier Congrès international de Radiologie*. Liège 1905.

Segrè, E.

† [1980] *From X-rays to quarks. Modern physicists and their discoveries*. Berkeley 1980.

Sekido, Y. y H. Elliot, ed.

† [1985] *Early history of cosmic ray studies. Personal reminiscences with old photographs*. Dordrecht 1985.

Sexl, Th.

(1934) Bericht über Fragen der Kernphysik. *Physikalische Zeitschrift* **35**, 119-141 (1934).

Smekal, A.

* (1920) Über die Abweichungen vom Coulombschen Gesetze in großer Nähe der elementaren Ladungen. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **1** (3. Reihe) 55-58 (1920).

* (1921a) Über Rutherfords X_3 und die Abweichungen vom Coulombschen Gesetze in großer Nähe der elementaren elektrischen Ladungen. *Wiener Berichte* **130/2a**, 149-157 (1921).

* (1921b) Über Rutherfords Entdeckung eines neuen leichten Atomkernes. *Die Naturwissenschaften* **9**, 77-82 (1921).

Shea, W. R., ed.

† [1983] *Otto Hahn and the rise of nuclear physics*. Dordrecht 1983.

Soddy, F.

§* [1904] *Radioactivity, an elementary treatise from the standpoint of the desintegration theory*. London 1904.

Solvay, Institut International de Physique

§* [1934] *Structure et propriétés des noyaux atomiques*. Paris 1934.

Sommerfeld, A.

§ [1919] *Atombau und Spektrallinien*. Braunschweig ¹1919, ²1921, ³1922, ⁴1924, ⁵1931.

Stark, J.

§ (1905) Radioaktivität. En *Handbuch der Physik*, editado por A. Winkelmann. Volumen 4, p. 654-686. Leipzig ²1905.

Steinke, E. G.

§ (1933) Die kosmische Ultrastrahlung. *Handbuch der Physik* **23**, 2. Teil, p. 477-529 (1933).

Stöckler, M.

† [1984] *Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik*. Berlin 1984.

Strachan, C., Ed.

† [1969] *The theory of beta-decay*. Oxford 1969.

Strutt, R. J.

* (1901) Über das Bestreben der Atomgewichte, sich ganzen Zahlen zu nähern. *Physikalische Zeitschrift* **2**, 555-556 (1901).

Stuewer, R. H.

† [1979] [Ed.] *Nuclear physics in retrospect: Proceedings of a Symposium on the 1930s*. Minneapolis 1979.

† (1983) The nuclear electron hypothesis. En Shea [1983, p. 19-67].

† (1984) Nuclear physicists in a new world: The emigres of the 1930s in America. *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* **7**, 23-40 (1984).

† (1986a) Gamow's theory of α -decay. En Ullmann-Margalit [1986, p. 147-186].

† (1986b) Rutherford's satellite model of the nucleus. *Historical Studies of Physical Sciences* **16**, 321-352 (1986).

† (1993) Mass-energy and the neutron in the early thirties. *Science in Context* **6**, 195-238 (1993).

- † (1994) The origin of the liquid drop model and the interpretation of nuclear fission. *Perspectives in Science* 2, 76-129 (1994).
- Sutton, Christine**
 † [1992] *Spaceship neutrino*. Cambridge 1992.
- Teller, E.**
 § (1933) Stand und Grenzen der heutigen Theorien über den Kernaufbau. En *Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik*. Volumen 4, 3a parte, p. 546-553. Braunschweig 1933.
- Trenn, T. J.**
 † (1974) The Geiger-Marsden scattering results and Rutherford's atom, July 1912 to July 1913: The shifting significance of scientific evidence. *Isis* 65, 74-82 (1974)
 † [1975] [Ed.] *Radioactivity and atomic theory*. London 1975.
 † (1976) Die Erfindung des Geiger-Müller-Zählrohres. *Abhandlungen und Berichte des Deutschen Museums* 44 (3), 54-64 (1976).
- Trigg, G. L.**
 [1984] *Experimente der modernen Physik. Schritte zur Quantenphysik*. Braunschweig/Wiesbaden 1984.
- Tuve, M. A., N. P. Heydenburg y L. R. Hafstad**
 * (1936) The scattering of protons by protons. *Physical Review* 49, 402 (1936).
- Ullmann-Margalit, E., ed.**
 † [1986] *The kaleidoscope of science*. Dordrecht 1986.
- Weart, S. R.**
 † [1979] *Scientists in power*. Cambridge, Mass. 1979.
- Weiner, Ch.**
 † (1970) Physics in the great depression. *Physics Today* 23 (10), 31-38 (1970).
 † (1972) 1932 - moving into the new physics. *Physics Today* 25 (5), 40-49 (1972).
 † [1977] [Ed.] *Storia della fisica del XX secolo*. New York y London 1977.
- Weiner, Ch. y E. Hart, ed.**
 † [1972] *Exploring the history of nuclear physics*. New York 1972.
- Weizsäcker, C. F. von**
 * (1935a) Zur Theorie der Kernmassen. *Zeitschrift für Physik* 96, 431-458 (1935).
 § (1935b) Die für den Bau der Atomkerne maßgebenden Kräfte. *Physikalische Zeitschrift* 36, 779-785 (1935).
 * (1936) Fortschritte in der Theorie des Atomkerns. *Forschungen und Fortschritte* 12, 171-172 (1936).
 * (1938) Neuere Modellvorstellungen über den Bau der Atomkerne. *Die Naturwissenschaften* 26, 209-230 (1938).
- Wentzel, G.**
 § (1925) Die Theorien des Comptoneffektes. I. *Physikalische Zeitschrift* 26, 436-454 (1925).
 § (1933) Wellenmechanik der Stoß- und Strahlungsvorgänge. *Handbuch der Physik*. Volumen 24/1, p. 695-784. Berlin 1933.
 § (1938) Schwere Elektronen und Theorien der Kernvorgänge. *Die Naturwissenschaften* 26, 273-279 (1938).
 § (1939) Probleme der Kraftwirkungen im Atomkern. In *Neue Wege exakter Naturerkenntnis*. Fünf Wiener Vorträge. Vierter Zyklus. Wien 1939.
- Winckler, J. R. y D. J. Hofmann**
 † (1967) Resource letter CR-1 on cosmic rays. *American Journal of Physics* 35, 2-12 (1967).
- Wolke, R. L.**
 † (1988) Marie Curie's doctoral thesis: Prelude to a Nobel Prize. *Journal of Chemical Education* 65, 561-573 (1988).
- Wright, C. S.**
 § (1926) Cosmic rays. *Nature* 117, 54-56 (1926).
- Yukawa, H.**
 * (1935) On the interaction of elementary particles. I. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan* (3) 17, 48-57 (1935).
 † (1950) Die Entwicklung der Mesonentheorie. *Physikalische Blätter* 6, 350-355 (1955).