



La Teoría Cuántica y la Discontinuidad de la Física*

Luis Enrique Otero Carvajal

El nacimiento de la física atómica: el modelo atómico de Rutherford.

Entre 1808 y 1810, John Dalton había desarrollado la teoría atómica de la química, en su obra *Nuevo sistema de filosofía química*, en la que estableció la relación entre los conceptos de *elemento químico* y *átomo*, fundamento de la moderna química. Dalton defendió que la materia se encontraba compuesta de átomos indivisibles e invariables cuya agrupación daba lugar a la formación de moléculas¹. La situación a finales del siglo XIX no había progresado mucho desde entonces y la teoría atómica se circunscribía casi en exclusiva al terreno de la química. De otra parte, el dominio de la visión ondulatoria de la naturaleza de la luz durante la segunda mitad del siglo XIX se presentaba como un serio obstáculo en la aceptación de la naturaleza corpuscular de los fenómenos vinculados a los fenómenos electromagnéticos y luminosos, generando una profunda confusión a la hora de establecer el status de la teoría atómica dentro de la física clásica. La teoría cinética había permitido aproximarse al tamaño de los átomos, mientras que su estructura interna era por completo desconocida y lo más que llegaba a suponerse es que alguno de sus componentes estaba cargado eléctricamente. El conocimiento sobre la estructura y naturaleza del átomo en los decenios finales del siglo XIX no sobrepasaba este burdo nivel de nociones. La situación comenzó a cambiar con rapidez a partir del último decenio del siglo XIX con el descubrimiento de la radiactividad y la mejora del

* Texto basado en OTERO CARVAJAL, L. E.: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, capítulo VI, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1988. La revisión y corrección de estilo de los textos traducidos del inglés ha sido realizada por el profesor Luis F. García, de la Universidad de Puerto Rico, recinto de Río Piedras, al que expreso mi más sincera gratitud.

1 HURD, D. L. y KIPLING, J. J.: *The Origins and Growth of Physical Science*, 2 vols., Penguin Books, 1964, se encuentran extractos de los trabajos de Dalton; PATTERSON, E. C.: *John Dalton and the Atomic Theory*, New York, Anchor Books, 1970; CARDWELL, D. S. L. (ed.): *John Dalton and the Progress of Science*, New York, Barnes & Noble, 1968. GREENAWAY, F.: *John Dalton and the Atom*, Ithaca, Cornell University Press, 1967; NASH, L. K.: "The origins of Dalton's chemical atomic theory", *Isis*, vol. 47, 1956, pp. 101-116; SMYTH, A. L.: *John Dalton 1766-1844: A Bibliography of Works by and About Him*, Manchester, Manchester University Press, 1966.

instrumental a disposición de los físicos experimentales. En primer lugar, el descubrimiento de los rayos X, la radiactividad natural y del electrón en aquellos años despertaron un interés creciente de los físicos por desentrañar la naturaleza de la estructura del átomo y el conocimiento de sus propiedades.

En 1894 Philipp Lenard, físico alemán, observó que los rayos catódicos, esto es el haz de rayos que se produce en el tubo que William Crookes construyó en 1875, atravesaban con facilidad varias pantallas colocadas en su camino sin provocar alteraciones en las mismas, por lo que llegó a la conclusión de que los rayos catódicos eran de naturaleza ondulatoria en concordancia con la teoría dominante sobre la naturaleza de la luz². Por contra, Jean Perrin observó que una placa metálica interpuesta en el camino de los rayos catódicos adquiría una carga negativa, lo que le llevó a pensar que en la composición de los rayos catódicos debían existir unas partículas cargadas negativamente³. Crookes, el inventor del tubo que lleva su nombre, había observado con anterioridad que el haz de rayos catódicos era desviado en presencia de un imán⁴. De esta forma, pues, a la altura de 1895, la naturaleza de los rayos catódicos no estaba perfectamente establecida y numerosas incógnitas atraían la atención de los físicos. Los rayos catódicos parecían atravesar sin dificultad placas de diversos materiales sin alteraciones visibles en su trayectoria, este resultado parecía indicar junto con su comportamiento eléctrico su naturaleza corpuscular, lo cual abría numerosos interrogantes sobre su composición a la vez que parecía informar de la estructura porosa de los átomos, al no oponer resistencia a la trayectoria de dichos rayos⁵.

En 1895, Wilhelm K. Röntgen descubrió la existencia de una nueva clase de rayos hasta entonces desconocida, que denominó *rayos X* por su extraña naturaleza⁶. Su descubrimiento inauguró una nueva rama de la física, la física atómica. Röntgen trabajaba con el tubo de Crookes, su investigación se centraba

2 LENARD, Ph.: "Über Kathodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und in äussersten Vakuum", *Annalen der Physik und Chemie*, 51, 1894, pp. 225-267. LENARD, Ph.: "Über die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen", *Annalen der Physik und Chemie*, 52, 1894, pp. 23-33.

3 PERRIN, J.: "Nouvelles propriétés des rayons cathodiques", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 121, 1895, pp. 1.130-1.131, reproducido en PERRIN, J: *Oeuvres Scientifiques de Jean Perrin*, Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, 1950, pp. 3-5.

4 CROOKES, W.: "Experimental contributions to the theory of the radiometer", *Proceedings of the Royal Society*, 25, 1876-1877, pp. 304-314. CROOKES, W.: "On the illumination of lines of molecular pressure, and the trajectory of molecules", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 170, 1879, pp. 135-164.

5 GLASSER, O.: *Wilhelm Conrad Röntgen and The Early History of Röntgen Rays*, Springfield, Ill., Charles C. Thomas, 1934.

6 RÖNTGEN, W. K.: "Ueber eine neue Art von Strahlen", *Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft zu Würzburg*, 1895, pp. 132, 141.

en el análisis de los rayos catódicos, cuando por casualidad descubrió la existencia de una radiación inesperada que era capaz de atravesar los cuerpos opacos, la naturaleza de tal radiación era completamente desconocida. En 1896, unos meses después del descubrimiento de Röntgen, el físico francés Henri Becquerel descubrió un fenómeno más sorprendente aún, cuando trataba de producir rayos X a partir de sales de uranio, la *radiactividad natural*. Becquerel pensaba que dichas sales de uranio podrían ser una fuente de rayos X al exponerlas a la luz solar, cual sería su sorpresa al observar casualmente que la placa fotográfica era impresionada sin necesidad de exponerla a la luz solar. ¡La radiación procedía naturalmente de dicho material!, comprobó además que el ritmo de emisión de la radiación no variaba aunque sometiese a las sales de uranio a variadas condiciones (aumento de la temperatura, de la presión, alteraciones químicas, etc.), Becquerel acababa de descubrir la radiactividad natural⁷. Sólo después de esfuerzos sobrehumanos el matrimonio Curie consiguió aislar la fuente productora de los "rayos Becquerel", descubriendo el *radio*, elemento dentro de la larga serie de los elementos pesados, al que seguiría el *polonio*, en honor de la patria de Marie Curie⁸.

Joseph John Thomson trató de desentrañar las razones que explicaban el

7 BECQUEREL, H.: "Sur les radiations émises par phosphorescence", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 122, 1896, pp. 559-564. BECQUEREL, H.: "Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 122, 1896, pp. 501-503. BECQUEREL, H.: "Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles mesurées par divers corps phosphorescents", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 122, 1896, pp. 559-564. BECQUEREL, H.: "émission de radiations nouvelles par l'uranium métallique", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 122, 1896, pp. 1.086-1.088.

8 CURIE, P. y CURIE, M.: "Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pechblende", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 127, 1898, p. 175, reimpresso en CURIE, P.: *Oeuvres de Pierre Curie*, Paris, Gauthier-Villars, 1908, pp. 335-338 y CURIE, I. (ed.): *Oeuvres de Marie Sklodowska Curie*, Varsovia, Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, 1954, pp. 46-48. CURIE, M.: "Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 126, 1898, p.p. 1.101-1.103, reimpresso en CURIE, I. (ed.): *Oeuvres de Marie Sklodowska Curie*, pp. 43-45. CURIE, P.; CURIE, M. y BÉMONT, G.: "Sur une nouvelle substance fortement radioactive, contenue dans la pechblende", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 127, 1898, pp. 1.215-1.217, reimpresso en CURIE, P.: *Oeuvres de Pierre Curie*, pp. 339-342 y CURIE, I. (ed.): *Oeuvres de Marie Sklodowska Curie*, pp. 57-59. CURIE, P. y CURIE, M.: "Sur la radioactivité provoquée par les rayons de Becquerel", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 129, 1899, p. 714, reimpresso en CURIE, P.: *Oeuvres de Pierre Curie*, pp. 343-345 y CURIE, I. (ed.): *Oeuvres de Marie Sklodowska Curie*, pp. 77-79. CURIE, P. y CURIE, M.: "Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu'elles émettent", en GUILLAUME, C. y POINCARÉ, L. (eds.): *Rapports présentés au Congrès International de Physique*, vol. III, p. 79 y ss., reimpresso en CURIE, P.: *Oeuvres de Pierre Curie*, pp. 374-409 y CURIE, I. (ed.): *Oeuvres de Marie Sklodowska Curie*, pp. 106-133. SÁNCHEZ RON, J. M.: *Marie Curie y la radiactividad*. Madrid, Consejo de Seguridad Nuclear, 1998. SÁNCHEZ RON, J. M.: *Marie Curie y su tiempo*. Barcelona, Crítica, 2000.

comportamiento de los rayos catódicos, para ello inició un programa de investigación que le llevó a descubrir el electrón en 1897 y a formular un primer modelo de átomo⁹. Thomson era una de las principales figuras de la Física británica y director del Laboratorio Cavendish de Cambridge. Partiendo del supuesto de que los rayos catódicos estaban compuestos por haces de partículas cargadas eléctricamente, Thomson dirigió sus investigaciones a medir la masa y la carga eléctrica de las supuestas partículas, para ello recurrió a estudiar la desviación de los rayos catódicos bajo el efecto de un campo magnético. De esta forma pudo comprobar que estaban compuestos por haces de partículas, electrones, determinando su velocidad y la relación de carga y masa. En su afán de comprobar la exactitud de sus mediciones recurrió a la Cámara de Wilson, desarrollada por Charles Thomson R. Wilson en el Laboratorio Cavendish, a fin de verificar la igualdad entre la carga del electrón y la carga eléctrica elemental; los resultados no defraudaron sus expectativas, demostró dicha igualdad a la vez que calculó la masa del electrón en $0,9 \times 10^{-29}$ gr., esto es, 1.840 veces más pequeña que la masa del átomo de hidrógeno¹⁰.

El descubrimiento del electrón por Thomson constituyó un gran paso en el conocimiento de la estructura interna del átomo, hasta entonces vedado para la física¹¹. Para Thomson el átomo se encontraba formado por una esfera de material cargado positivamente en cuyo interior se encontraban incrustados multitud de electrones de carga negativa, de tal manera que la carga final resultaba neutra, modelo atómico conocido con el nombre de *bollo de pasas* o *plumcake*¹². Según este modelo, los electrones se encontraban en reposo debido al equilibrio de las fuerzas de repulsión y de atracción electrostáticas. Su

9 THOMSON, J. J.: "Cathode rays", *The Electrician*, 39, 1897, 104-122, también en *Proceedings of the Royal Institution*, 1897, pp. 1-14. THOMSON, J. J.: "Cathode rays", *Philosophical Magazine*, 44, 1897, pp. 293-316. THOMSON, J. J.: "On the cathode rays", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 1897, pp. 243-244. THOMSON, J. J.: "On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays", *Philosophical Magazine*, 46, 1898, pp. 528-545.

10 THOMSON, J. J.: "On the cathode rays", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 1897, pp. 243-244. THOMSON, J. J.: "On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays", *Philosophical Magazine*, 46, 1898, pp. 528-545. THOMSON, J. J.: "On the masses of the ions in gases at low pressures", *Philosophical Magazine*, 48, 1899, pp. 547-567. THOMSON, J. J.: *Reflections and Recollections*, London, G. Bell & Sons, 1936. DAHL, P. F.: *Flash of the Cathode Rays: A History of J J Thomson's Electron*, London, Institute of Physics, 1997. DAVIS, E. A. y FALCONER, I.: *J J Thomson and the Discovery of the Electron*, London, Taylor & Francis Ltd., 1997.

11 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica, 2001, pp. 85-115.

12 THOMSON, J. J.: "The magnetic properties of systems of corpuscles describing circular orbits", *Philosophical Magazine*, 6, 1903, pp. 673-693. THOMSON, J. J.: *Electricity and Matter*, New Haven, Yale University Press, 1904.

propuesta, como es natural visto desde la perspectiva actual, no dejaba de ser burda y presentaba numerosas dificultades, por lo que no tardó en ser sustituida por el *modelo planetario* de Rutherford. *"Poco tiempo después del experimento de Lenard sobre la transmisión de los rayos catódicos a través de láminas delgadas, se hicieron varios intentos para construir un modelo atómico que incorporase la porosidad del átomo como se indicaba en tales experimentos... Se sugirió que cada átomo estaba formado por miríadas de fragmentos masivos, cada uno de ellos conteniendo una carga positiva y una negativa en partes iguales (dinamidas de Lenard, 1903), o bien que se trataba de una esfera homogénea con la masa distribuida en una capa delgada y electricidad positiva, y en su interior los electrones cargados negativamente situados como las semillas de una calabaza o moviéndose en órbitas circulares (J. J. Thomson, 1898, 1904). Se hizo un intento de distribuir las posiciones de los electrones y órbitas en una forma estable, de modo que las fuerzas mutuas eléctricas no originase una dispersión o colapso de toda la estructura (Thomson, Nagaoka, 1904). Sin embargo, el persistente y fatal defecto de tales modelos era la imposibilidad que presentaban para explicar el antiguo jeroglífico de los espectros de emisión de rayas¹³.*

Ernest Rutherford, se encontraba en Cambridge en 1895 disfrutando de una beca de postgraduado para estudiar física al lado de J. J. Thomson en el laboratorio Cavendish (en cuya dirección le sustituiría cuando este último se jubiló en 1919). Desde su llegada al laboratorio, Rutherford participó en las investigaciones dirigidas por Thomson sobre las propiedades ionizantes de los rayos X. Rutherford comprobó que dicha radiación estaba era de dos tipos diferentes, una de ellas la denominó *radiación alpha* (α), que se caracterizaba por la facilidad con que era absorbida por la materia; la otra, que llamó *radiación beta* (β), tenía un mayor poder de penetración¹⁴. Las propiedades y la naturaleza de estos dos nuevos tipos de radiación eran tan desconocidos como lo habían sido para Röntgen los rayos X, como concluía su artículo. *"La causa y el origen de la radiación emitida constantemente por el uranio y sus sales todavía continua siendo un misterio¹⁵.* Rutherford encaminó sus esfuerzos investigadores a determinar la naturaleza de dicha radiación. Antes de que

13 HOLTON, G.: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Barcelona, Reverté, 1984, pp. 672-673.

14 RUTHERFORD, E.: "Uranium radiation and the electrical conduction by it", *Philosophical Magazine*, 49, 1899, pp. 10-163, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 169-215.

15 RUTHERFORD, E.: "Uranium radiation and the electrical conduction by it", *Philosophical Magazine*, 49, 1899, pp. 10-163, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, p. 214, citado en SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica, 2001, p. 218.

finalizara el siglo Rutherford aceptó una plaza de profesor en la Universidad de McGill en Canadá, donde continuó las investigaciones iniciadas en Cavendish. En esas fechas Marie Curie, Henri Becquerel y Walter Kaufmann entre otros habían desvelado la naturaleza de la *radiación beta*, ésta no era sino una corriente de electrones que se movían a grandes velocidades, próximas a la de la luz¹⁶, a la vez que Paul Villard había descubierto un nuevo tipo de radiación, la *radiación gamma* - γ -, aunque inicialmente la denominó *rayos X del radio*¹⁷. Sin embargo, la naturaleza de la *radiación alfa* y de la nueva radiación *gamma* continuaba siendo un misterio, Rutherford defendió que la radiación *alfa* se trataba de una corriente de partículas que se movían a gran velocidad. Su masa debía ser muy superior a la masa de los electrones y su carga era positiva, pero mientras que en la radiación beta se sabía que estaba compuesta por electrones, la naturaleza de las partículas *alfa* y *gamma* constituían todavía un misterio.

Rutherford abrigó sospechas sobre su identidad cuando conoció que siempre aparecían huellas de helio en los minerales que contenían elementos radiactivos. Debieron transcurrir diez largos años de continuado esfuerzo investigador hasta que, ya siendo profesor de física en Manchester, identificó en 1911 a las *partículas alfa* como átomos de helio con carga positiva (mejor habría que decir núcleos de Helio). Se había descubierto el núcleo del átomo, hasta entonces y conforme con el modelo atómico de Thomson, la estructura del átomo se había representado como un *bollo con pasas*, a lo largo de cuya superficie se encontraba distribuida la materia cargada positivamente, en cuyo interior se hallaban incrustados los electrones. Dicho descubrimiento permitió a Rutherford construir un nuevo modelo atómico que sustituyó el propuesto por Thomson.

En paralelo a su investigación sobre la naturaleza de la radiación alfa, Rutherford estaba inmerso en la elaboración de una teoría general de la radiactividad, pues si bien se habían observado diferentes tipos de radiación (rayos X, rayos β , rayos α , rayos γ) nada se sabía sobre sus causas y el origen de las enormes energías que intervenían en la radiactividad. Los físicos se interrogaban sobre el origen de tan enormes energías en el interior del átomo sin encontrar una explicación plausible. Los descubrimientos de nuevas sustancias radiactivas, el conocimiento

16 BECQUEREL, H.: "Sur la dispersion du rayonnement du radium dans un champ magnétique", *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 130, 1900, pp. 372-376. BECQUEREL, H.: "Déviation du rayonnement du radium dans un champ électrique", *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 130, 1900, pp. 809-815. KAUFMANN, W.: "Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen", *Göttingen Nachrichten*, 1901, pp. 143-155.

17 VILLARD, P.: "Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium", *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 130, 1900, pp. 1.010-1.012. VILLARD, P.: "sur le rayonnement du radium", *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 130, 1900, pp. 1.178-1.179.

de diversos tipos de radiación no arrojaban mayores datos que los propiamente experimentales. A la elaboración de una teoría general de la radiactividad se dedicó Rutherford en colaboración con Frederick Soddy, un joven colega que como él había obtenido una plaza de profesor de química en la Universidad McGill. Rutherford necesitaba del concurso de un químico para completar sus investigaciones sobre radiactividad, pues era preciso proceder al aislamiento químico de determinados elementos mezclados a otras sustancias, en Soddy encontró al compañero ideal para culminar el programa de investigación sobre la teoría de la radiactividad.

De la colaboración entre Rutherford y Soddy surgió entre 1902 y 1903 la primera teoría general de la radiactividad. Después de descubrir casualmente que en la emisión radiactiva del *torio* se formaban dos nuevos compuestos: el *torio X* y un gas radiactivo que denominaron *torón*¹⁸, Rutherford y Soddy llegaron a la conclusión de que la radiactividad era el producto de la transformación en nuevos elementos más ligeros de los compuestos radiactivos, mediante la emisión de una partícula *alfa* o *beta*¹⁹. *“La desintegración del átomo y la expulsión de partículas cargas pesadas, con masas del mismo orden que el átomo de hidrógeno, deja atrás un nuevo sistema más ligero que el anterior, y poseyendo propiedades químicas y físicas bastante diferentes del elemento original. El proceso de desintegración, una vez empezado, continúa de nivel en nivel con velocidades que se pueden medir en cada caso. En cada nivel son proyectados uno o más “rayos” α , hasta que se alcanzan los últimos niveles, en el que se emite el “rayo” β , o electrón”*²⁰. De esta manera, la energía emitida por el átomo mediante la radiactividad era el producto de la desintegración de

18 RUTHERFORD, E. y SODDY, F.: “The radioactivity of thorium compounds, I: An investigation of the radioactive emanation”, *Transactions of the Chemical Society*, 81, 1902, pp. 321-350, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 376-402. RUTHERFORD, E. y SODDY, F.: “The radioactivity of thorium compounds, II: The cause and nature of radioactivity”, *Transactions of the Chemical Society*, 81, 1902, pp. 837-860, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 435-456.

19 RUTHERFORD, E. y SODDY, F.: “The cause and nature of radioactivity. I”, *Philosophical Magazine*, 4, 1902, pp. 370-396, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 472-495. RUTHERFORD, E. y SODDY, F.: “The cause and nature of radioactivity. II”, *Philosophical Magazine*, 4, 1902, pp. 569-585, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 495-508. RUTHERFORD, E. y SODDY, F.: “Radioactive change”, *Philosophical Magazine*, 5, 1903, pp. 576-591, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 596-608.

20 RUTHERFORD, E. y SODDY, F.: “Radioactive change”, *Philosophical Magazine*, 5, 1903, pp. 576-591, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, p. 604, citado en SÁNCHEZ RON, p. 227.

éste. Rutherford y Soddy establecieron tres familias de elementos radiactivos, cada una de las cuales procedía del torio, del actinio o del uranio; el resto de los elementos radiactivos conocidos eran resultado de la transformación de dichos elementos mediante su desintegración. Quedaba así despejada la incógnita sobre el origen de la energía liberada por el átomo a través de la radiactividad. Sin embargo, la teoría de Rutherford y Soddy no resolvía todos los problemas, pues nada decía sobre las causas que provocaban dicho proceso ni sobre el intervalo temporal de emisión de las partículas radiactivas. Habían establecido que la desintegración radiactiva era producto de una transformación interna del átomo, pero se desconocía que provocaba dicho cambio. En su teoría Rutherford y Soddy habían determinado los ritmos de desintegración sobre la base de cálculos estadísticos (la vida media), a pesar de lo cual era imposible establecer el comportamiento futuro de ningún átomo de cualquier sustancia radiactiva. En 1902 cuando publicaron su teoría de la radiactividad, ésta encontró numerosas resistencias hasta que en años posteriores fue aceptada universalmente por los físicos (en 1908 le fue concedido el premio Nobel por: "*sus investigaciones acerca de la desintegración de los elementos y la química de las sustancias radiactivas*"); significativa fue la oposición de Lord Kelvin, quien se mostró en desacuerdo con la misma argumentando que el radio no era un elemento químico sino un compuesto molecular de plomo y helio, cuya energía era debida a la absorción de *ondas etéreas*.

En 1904 Rutherford ya consideró que "*Si las partículas α están constituidas por materia de cualquiera de las formas conocidas, este resultado demuestra que esta forma de materia es o el átomo de hidrógeno o el átomo de helio*"²¹, cuatro años después en colaboración con Hans Geiger, ya concluyó en su artículo conjunto "*La carga y naturaleza de la partícula α* " que "*una partícula α es un átomo de helio*"²² (era un núcleo de helio no un átomo). En dicho artículo presentaban "*también otros resultados interesantes, como la carga del "átomo" (la expresión que utilizaban, pero que, sabemos, significa, el "núcleo") de hidrógeno –lo que es lo mismo también que decir, la carga del electrón-, el número de átomos en un gramo de hidrógeno, la masa del átomo de hidrógeno*

21 RUTHERFORD, E.: "Present problems of radioactivity", Rogers, 1906, reproducido en su versión francesa "Les problèmes actuels de la radioactivité" en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. I, 1962, pp. 746-775, citado en SÁNCHEZ RON, p. 228.

22 RUTHERFORD, E. y GEIGER, H.: "An electrical method of counting the number of α -particles from radio-active substances", *Proceedings of the Royal Society*, A81, 1908, pp. 141-161, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. II, 1963, pp. 89-108. RUTHERFORD, E. y GEIGER, H.: "The charge and nature of the α -particles", *Proceedings of the Royal Society*, A81, 1908, pp. 162-173, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. II, 1963, (pp. 109-120), p. 118.

y el número de moléculas por centímetro cúbico de un gas arbitrario... el valor que dedujeron para la carga del electrón... únicamente difería en un 2,5 por ciento del que se aceptaba todavía cincuenta años más tarde... recurriendo a las ideas de Planck se deducía un valor similar al de Rutherford, un hecho éste que Rutherford y Geiger señalaban²³.

Los trabajos de Rutherford sobre las partículas alfa habían sido analizados por la comunidad de físicos desde la perspectiva de la dispersión de dichas partículas, sin percatarse de que tal descubrimiento entrañaba la negación del modelo atómico de Thomson. Fue en Manchester bajo la dirección de Rutherford donde tales consecuencias fueron puestas en evidencia, lo que condujo a la formulación de una nueva teoría atómica, conocida como modelo de Rutherford o modelo planetario.

La teoría de la radiación de Planck: la introducción de la discontinuidad en la física.

Max Planck culminó sus estudios universitarios en la Universidad de Berlín, en donde se encontraba como profesor de física Hermann von Helmholtz, que había desempeñado un papel decisivo en el desarrollo de la termodinámica y el establecimiento de la primera ley o ley de conservación de la energía, en la misma Universidad se encontraba Gustav Kirchhoff, eminente físico cuyos estudios teóricos sobre la radiación gozaban de merecido prestigio. No debe extrañar, pues, que la dedicación de Max Planck como investigador se encontrara relacionada con ambos campos²⁴.

A finales de 1894 Max Planck inició un programa de investigación cuyo objetivo perseguía explicar la igualdad existente entre la radiación emitida por un cuerpo negro y la radiación de equilibrio (esto es, la igualdad entre energía emitida y absorbida en un intervalo de tiempo) de una cavidad cualquiera, tal como fue definido por Kirchhoff entre 1859 y 1860 en la ley de radiación de Kirchhoff²⁵.

23 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica, 2001, pp. 238-239.

24 PLANCK, M.: *Wissenschaftliche Selbstbiographie*, Leipzig, Barth, 1948, la versión en inglés fue publicada al año siguiente: *Scientific Autobiography and Other Papers*, New York, Philosophical Library, 1949, existe versión en español: "Autobiografía científica", en *Autobiografía científica y otros escritos*, Madrid, Nivola, pp. 21-52. Ver también SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica, 2001, pp. 117-128.

25 KIRCHHOFF, G. R.: "Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme", *Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1859, pp. 783-787, y KIRCHHOFF, G. R.: "Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht", *Annalen der Physik*, 109, 1860, pp. 275-301; los resultados se encuentran recogidos en la obra de KIRCHHOFF, G. R.: *Gesammelte*

Cuando este último elaboró dicha ley de radiación se suponía que la energía radiante se propagaba mediante ondas. Algunos decenios después, con los trabajos de Heinrich Hertz, en 1888, al descubrir las ondas electromagnéticas empezó a cobrar fuerza la idea de que la naturaleza de la radiación visible y térmica eran de carácter electromagnético y, por tanto, su comportamiento debía responder a las ecuaciones de Maxwell. En este mismo período, en 1884, Ludwig Boltzmann aplicó las ecuaciones de Maxwell a la radiación del cuerpo negro²⁶, cuyos resultados fueron generalizados en 1893 por Wilhem Wien²⁷. *"Planck intentaba explicar el crecimiento de la entropía total, de cuya validez universal no dudaba, relacionando la irreversibilidad que contenía con otras leyes también fundamentales. En concreto, quería desarrollar una teoría macroscópica basada en el electromagnetismo, esperando obtener el principio de irreversibilidad (crecimiento de la entropía) como parte de esa teoría. El problema de la radiación del cuerpo negro se prestaba de manera magnífica para semejante propósito."*²⁸

El problema de la radiación fue abordado primero mediante el recurso de la termodinámica. Para ello se recurrió al estudio de la radiación del cuerpo negro, según la ley de Stefan-Boltzmann la densidad total de la radiación negra es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura medida en la escala absoluta. Posteriormente Wilhem Wien señaló que la densidad espectral de la radiación negra, para una determinada frecuencia, era proporcional al producto del cubo de la frecuencia por una función del cociente de la frecuencia por la temperatura. Sin embargo, tanto la ley de Stefan-Boltzmann como la ley de distribución de Wien no resolvían de manera completa la forma de la ley de repartición espectral. Alcanzado este punto, se puso de manifiesto que la termodinámica en el estado en que se encontraba en el último tercio del siglo XIX resultaba incapaz de dar una solución completamente satisfactoria de la composición espectral. A primera vista la salida parecía fácil, se confiaba en que la teoría electromagnética desarrollada por Lorentz proporcionaría la solución,

Abhandlungen, Leipzig, 1882, pp. 566-597.

26 BOLTZMANN, L.: "Über eine von Hrn. Bartoli entdeckte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatz" y "Ableitung des Stefan'schen Gesetzes betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der Elektromagnetischen Lichttheorie", *Annalen der Physik*, 22, 1884, pp. 31-39, 291-294; III, pp. 110-121. La relación entre la densidad de energía de la radiación negra y la temperatura de la cavidad expresada en la ley de Boltzmann, había sido también expresada por Josef Stefan en 1879, por lo que es conocida normalmente como ley de Stefan-Boltzmann, STEFAN, J.: "Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur", *Wiener Ber.* II, 79, 1879, pp. 391-428.

27 WIEN, W.: "Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie", *Berl. Ber.*, 1893, pp. 55-62.

28 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica, 2001, p. 130.

explicando los procesos de absorción y emisión de la radiación por la materia. No obstante, este camino recorrido por Rayleigh en 1900, cuando Planck había culminado su teoría sobre la radiación del cuerpo negro, se mostró como un sendero cerrado que conducía a un callejón sin salida.

Los resultados experimentales sobre el espectro infrarrojo dejaban bastante que desear en aquellos años en cuanto a su exactitud, por lo que la ley de desplazamiento de Wien se asentaba sobre unas bases experimentales bastante frágiles. Fue, sobre todo, gracias al trabajo de Friedrich Paschen en 1895 cuando la situación se modificó notablemente; partiendo de los resultados anteriores de S. P. Langley sobre la radiación solar, Paschen calculó con precisión las determinaciones de la longitud de onda en el infrarrojo, obteniendo que la longitud de onda era inversamente proporcional a la temperatura absoluta, la fórmula de radiación así obtenida proporcionaba por vez primera una prueba directa de la ley de desplazamiento de Wien, a partir de la cual este último obtuvo la ley de distribución de Wien, por la que la longitud de onda y la intensidad son funciones solamente de la velocidad de traslación de las moléculas emisoras²⁹. *"En enero de 1899 Paschen encaminó sus investigaciones a comprobar la versión de Wien... Otto Lummer... y Ernst Pringsheim... dieron en febrero del mismo año una confirmación más completa de la versión de Wien, utilizando por vez primera una cavidad negra experimental dentro de la cual la radiación podía alcanzar el equilibrio antes de medir su intensidad. Kurlbaum... y Heinrich Rubens... aportaron también datos confirmatorios, mientras que Planck -ya en 1899- proporcionó una derivación magistral a partir de primeros principios. Fuese cual fuese el status de su derivación, la ley de Wien había triunfado. Aunque el triunfo, claro está, fue muy breve. La aplicación, a principios de 1900, de nuevas técnicas de infrarrojos de longitud de onda larga a las cavidades experimentales recién inventadas puso al descubierto la limitación de la ley, con efectos decisivos sobre la evolución subsiguiente de la física."*³⁰

En el estudio de la radiación jugó un papel de primer orden el cuerpo negro. El cuerpo negro constituye un emisor de luz casi perfecto; puesto que emite radiación de todas las longitudes de onda posibles al ser sometido a temperaturas elevadas. El espectro que de esta forma emite es conocido como *radiación del cuerpo negro*. La importancia del espectro de radiación del cuerpo negro radica en que no recibe influencia de factores vinculados a la sustancia del cuerpo emisor o de las condiciones de su superficie. A través de su estudio es posible comprender los procesos de radiación en general, de ello era consciente

29 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, Madrid, Alianza, 1980, pp. 26-30.

30 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, p. 30.

Planck y de ahí la elección de este tema dentro de su programa de investigación. *"Si se considera un recinto mantenido a temperatura uniforme, los cuerpos materiales contenidos en este recinto emiten y absorben radiación, y acaba por establecerse un estado de equilibrio en el cual los cambios de energía entre la materia y la radiación se compensan. Apoyándose únicamente sobre los principios fundamentales de la termodinámica, Kirchhoff ha demostrado que este estado de equilibrio es único y corresponde a una composición espectral perfectamente determinada de la radiación encerrada en el recinto. Además, la composición de esta radiación depende únicamente de la temperatura del recinto, pero en modo alguno de las dimensiones o de la forma de este recinto, ni de las propiedades particulares de los cuerpos materiales que contiene o que constituyen sus paredes. Esta radiación de equilibrio característica de la temperatura considerada es llamada a menudo con el nombre bastante incorrecto de radiación negra correspondiente a esta temperatura."*³¹

En la radiación de cuerpo negro y en la solución al problema de la intensidad de dicha radiación entran en juego la termodinámica, la teoría electromagnética y la mecánica estadística. Tres de las ramas de la física que habían conocido un avance sustancial en el último tercio del siglo XIX, y que constituían la vanguardia de la física de finales del siglo XIX. Tres campos de la física en los que Planck había trabajado con anterioridad a su investigación sobre el problema de la radiación de cuerpo negro.

En la radiación del cuerpo negro aparecía un problema, que sería conocido con el nombre de la *catástrofe ultravioleta*, que ponía en cuestión la teoría de la radiación clásica, algo que sería puesto de manifiesto por Einstein en 1905. Una radiación similar a la emitida por el cuerpo negro se observa cuando se calienta un trozo sólido de metal. A bajas temperaturas la radiación emitida es de ondas largas, correspondientes a la región infrarroja del espectro. Conforme aumenta la temperatura, las longitudes de onda se van haciendo más cortas, hasta alcanzar el extremo ultravioleta del espectro. El espectro del cuerpo negro mostraba cómo estaba distribuida la energía entre las diferentes longitudes de onda, el problema consistía en explicar la distribución específica de energía sobre la base de la teoría clásica de la radiación. Los problemas surgían cuando atribuían valores a la energía de las partículas responsables de la radiación. Si la energía era continua, como postulaba la teoría, significaba que en el extremo de ondas cortas (alta frecuencia) del espectro la energía de la radiación se tornaría infinita, al propiciar un aumento continuo de la energía hacia el infinito al disminuir la longitud de onda. De esta manera, la teoría clásica se enfrentaba a

31 BROGLIE, L. de: *La physique Nouvelle et les Quanta*, Flammarion, Paris, 1937, existe edición en español: *La física nueva y los cuantos*, Buenos Aires, Losada, 1965, pp. 92-93.

un problema irresoluble, la *catástrofe del ultravioleta*, pues un cuerpo incandescente no irradia una cantidad infinita de energía. Para evitar la catástrofe del ultravioleta era preciso limitar la energía de manera que no resulte infinita, ni se concentre fundamentalmente en las ondas más cortas, eso es lo que hizo la teoría de Planck y pondría de manifiesto Einstein en 1905 en su revolucionario artículo donde explicaba el efecto fotoeléctrico³², "era virtualmente imposible entonces darse cuenta de que la raíz de los inconvenientes estaba en el supuesto de la continuidad en la energía. Las mediciones con el cuerpo negro fueron el primer testimonio reconocible de que el mencionado supuesto pudiera ser erróneo... Incluso la idea de la continuidad en la naturaleza, y así de la energía ininterrumpida, ni siquiera parecía ser un supuesto. Se daba aquello por descontado... que fueran incapaces [los físicos] de resolver el problema [de la catástrofe ultravioleta] con semejante supuesto no hizo que lo pusieran en tela de juicio"²³.

Entre 1896 y 1899 Planck su trabajo sobre la irreversibilidad en los procesos de radiación se materializó en cinco artículos "*Sobre procesos de radiación irreversibles*"²⁴, en los que analizaba el comportamiento de la radiación en un sistema compuesto por uno o más resonadores que interaccionan con un campo. Planck confiaba en que al final de su investigación podría demostrar la irreversibilidad de los procesos de radiación en un sistema completo, a la vez que arrojar luz sobre la función universal de Kirchhoff³⁵. Estos cinco artículos

32 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, nº 17, 1905, p. 132, existe traducción al español en "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz", en STACHEL, J. (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*. Prólogo de Roger Penrose, Barcelona, Crítica, 2001, pp. 161-178, también en RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas): *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, Madrid, Nivola, 2004, pp. 45-71.

33 LOVETT CLINE, B.: *Los creadores de la nueva física*, México, FCE, 1973, p. 77.

34 PLANCK, M.: "Über irreversible strahlungsvorgänge. Erste Mittheilung", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlin, 1897, pp. 57-68; PLANCK, M.: "Über irreversible Strahlungsvorgänge. Zweite Mittheilung", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlin, 1897, pp. 715-171; PLANCK, M.: "Über irreversible Strahlungsvorgänge. Dritte Mittheilung", *Preussische akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlin, 1897, pp. 1.122-1.145; PLANCK, M.: "Über irreversible Strahlungsvorgänge. Vierte Mittheilung", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlin, 1898, pp. 449-476; PLANCK, M.: "Über irreversible Strahlungsvorgänge. Fünfte Mittheilung (Schluss)", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlin, 1899, pp. 440-480. A principios de 1900 Planck publicó un artículo en los *Annalen der Physik* en el que resumía los cinco anteriores PLANCK, M.: "Über irreversible Strahlungsvorgänge", *Annalen der Physik*, 1, 1900, pp. 69-122.

35 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 32-45.

constituyen la teoría inicial sobre la radiación de cuerpo negro, teoría previa a su descubrimiento de la discontinuidad de los procesos de radiación; o dicho con otras palabras, a su descubrimiento de que la energía es emitida en forma discontinua, mediante cantidades discretas regidas por el cuanto de acción.

En sus tres primeros artículos de la serie *"Sobre los procesos de radiación irreversibles"* Planck desarrolló su teoría inicial sobre el cuerpo negro, mientras que en el cuarto se aprecia un cambio de dirección que le condujo a un progresivo acercamiento de su teoría a la teoría de Boltzmann sobre los procesos irreversibles en gases³⁶. *"A mediados de 1897, cuatro meses después de leer Planck su primera entrega a la Academia, Boltzmann presentó una breve crítica ante el mismo auditorio, diciendo que aunque las nuevas fórmulas de Planck para la absorción y emisión de un resonador eran de gran valor, el programa para el que estaban concebidas tenía necesariamente que fracasar. Estén o no presentes los resonadores, tanto las ecuaciones de Maxwell como las condiciones de contorno sobre su solución son invariantes bajo inversión temporal. Todos los procesos que las satisfacen pueden transcurrir en ambas direcciones y, por tanto, son reversibles. "Cualquier unidireccionalidad que Hr. Planck encuentra en el efecto de los resonadores ha de provenir, por tanto", prosiguió Boltzmann, "de haber elegido condiciones iniciales unidireccionales"... En su segunda entrega, una breve réplica a Boltzmann presentada en julio, Planck barrió a un lado todas estas observaciones, alegando que eran producto de un "malentendido". Cinco meses después, al final de su tercera entrega, Planck admitía tácitamente una parte esencial de la tesis de Boltzmann."*³⁷

En su cuarto artículo Planck dio un giro a su investigación, mediante la introducción de una hipótesis inicial según la cual la radiación natural se comportaría de forma parecida al desorden molecular analizado por Boltzmann en su formulación del teorema H, dentro de su estudio de los procesos irreversibles en los gases desarrollado sólo unos años antes³⁸, puesto las *"ecuaciones de la electrodinámica no podían conducir a una situación de equilibrio más de lo que podían hacer las ecuaciones de la mecánica; ambas eran, en última instancia, simétricas en su relación con pasado y futuro (invariantes con respecto a una inversión temporal), y para evitarlo era preciso recurrir a suposiciones estadísticas"*³⁹, tal como le había hecho observar Boltzmann⁴⁰. De esta forma, Planck introducía el análisis combinatorio para

36 Un estudio muy detallado sobre el contenido de estos artículos se encuentra en KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 95-116.

37 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 100-101.

38 Sobre este tema ver KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 58-94.

39 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 131.

40 BOLTZMANN, L.: "Über irreversible Strahlungsvorgänge II", *Sitzungsberichte der Königlich-*

describir el comportamiento del resonador en el sistema elegido (la cavidad del cuerpo negro). *"Es en este pasaje [se refiere a los párrafos del cuarto artículo en los que Planck reconoce la necesidad de analizar la cantidad de energía absorbida de la radiación total por un resonador (p. 451 del cuarto artículo de Planck)] donde empieza a asomar la base para un tratamiento paralelo de la radiación y de la teoría de los gases. Las amplitudes individuales y los correspondientes ángulos de fase, que juntos especifican la serie de Fourier para un campo real o para su intensidad, son como las coordenadas reales de las moléculas individuales de un gas. Ambas son coordenadas microscópicas, y en ambos casos hay muchas especificaciones diferentes de la microestructura que se corresponden con los mismos valores de todas las magnitudes físicas mensurables. Así pues, para determinar la variación temporal de estas últimas hay que promediar sobre todos los microestados que sean compatibles con el mismo conjunto de magnitudes físicas. Para la radiación, y también para los gases, es necesario postular microestados prohibidos con el fin de garantizar que el cambio se opera irreversiblemente⁴¹.*

Una vez introducido el concepto de radiación natural, Planck trató de obtener la relación existente entre la energía del resonador y la intensidad física del campo real, la fórmula que obtuvo mediante la cual dicha relación quedaba explicitada la denominó *ecuación fundamental*, gracias a ella pudo calcular la lenta variación secular de la energía del resonador a través del tiempo. Una vez llegado a este punto pudo introducir la función de entropía, para posteriormente deducir la distribución de equilibrio, de ello se ocupaban la última parte del cuarto y el quinto (y último) artículo. *"Así pues, cuando Planck presentó la quinta entrega de la serie a la Academia de Berlín en mayo de 1899, su programa de investigación sobre la cavidad estaba casi completo. Aunque su inicial esperanza de evitar hipótesis especiales se había venido abajo y aunque faltaba todavía dar una prueba de unicidad, el programa estaba cumplido en su mayor parte. Planck había dado una nueva demostración de la irreversibilidad y, de paso, aumentando la profundidad con que los argumentos termodinámicos podían calar en los fenómenos de radiación. Uno de los indicios de la acrecentada potencia de este tipo de argumentos era su capacidad de educir de la teoría la ley de distribución de Wien, de base empírica; otro, el asomo de un nuevo sistema de unidades absolutas [se refiere a la incorporación de las constantes a y b de la Ley de Wien a la categoría de constantes absolutas, merced a los resultados de los trabajos de Planck, en especial al quinto artículo de la serie]. Planck podía estar más que satisfecho de lo que había logrado en los cinco*

Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1897, pp. 1.016-1.018.

41 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 102.

últimos años.⁴²

Tanto Boltzmann en su estudio sobre los procesos irreversibles en los gases, como Planck en su investigación sobre los procesos irreversibles en la radiación habían tratado de encontrar una respuesta determinista al problema de la irreversibilidad surgido con el segundo principio de la termodinámica. Sin embargo, ambos terminaron por recurrir a la estadística a la hora de encontrar una solución satisfactoria a los procesos irreversibles. La investigación de Planck sobre los procesos irreversibles en la radiación, realizada entre 1897 y 1899, no constituyó, sin embargo, una fractura de los fundamentos epistemológicos de la física moderna. Si Planck no hubiera continuado su trabajo sobre la radiación de cuerpo negro, y la hubiera llevado más allá de los resultados alcanzados en 1899, habría pasado a los anales de la Física como el físico que realizó importantes contribuciones al análisis termodinámico de la radiación y por haber comprobado la ley de distribución de Wien. Sin embargo, el nombre de Planck se encuentra indisolublemente asociado a la introducción de la discontinuidad en la física, la *constante de Planck* fue el primer paso de una senda que revolucionó en la primera mitad del siglo XX los cimientos de la Física, *"en marzo de 1900 el programa del cuerpo negro de Planck había llegado por segunda vez a lo que muy bien podría haber sido su etapa final. Pero los experimentos volvieron a mostrarse tercos, hecho que Planck tuvo que conocer, como muy tarde, a principios de octubre. En un artículo cuyo contenido esencial fue comunicado a la Sección de Física de la Naturforscherversammlung del 18 de septiembre de 1900, Lummer y Pringsheim llegaban a la conclusión de que "la ley de distribución de Wien-Planck no daba cuenta de nuestra medición de la radiación negra en la región de 12 a 18 "...*⁴³

Planck se encontraba por esas fechas en condiciones de modificar sus resultados, de tal manera que la nueva fórmula de radiación por él propuesta, conocida como *ley de radiación de Planck*, se adecuase a nuevas mediciones realizadas sobre la banda del infrarrojo. *"representa [se refiere a la nueva fórmula de radiación propuesta], por lo que una inspección rápida me permite ver, los datos observacionales hasta ahora publicados, e igual de bien que la mejor función de distribución hasta ahora propuesta... Por consiguiente, me creo autorizado a llamar la atención acerca de esta nueva fórmula, a la cual, desde el punto de vista de la teoría de la radiación electromagnética, tengo por la más*

42 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 115.

43 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 122. El artículo al que hace referencia Kuhn en este párrafo es LUMMER, O. y PRINGSHEIM, E.: "Über die Strahlung des schwarzen körpers für lange Wellen" *Verhandlungen der Deutsche physikalische Gesellschaft, Berichte*, 2, 1900, pp. 163-180, citado en Kuhn. Sobre este tema ver la nota 10 de Kuhn en la página 323.

*simple, exceptuando a la de Wien.*⁴⁴

Llegado a este punto, Planck recurrió a la definición estadística de Boltzmann de la entropía, con el fin de considerar la relación existente entre entropía y probabilidad, debido a que la entropía de n osciladores depende no sólo de la energía total sino también de la energía de un sólo oscilador, cuyo valor sólo puede venir expresado conforme a la teoría de las probabilidades. *"El mismo día que formulé por primera vez esta [nueva] ley [de distribución], comencé a dedicarme a la tarea de dotarla de significado físico real, tema que de por sí me llevó a considerar la relación entre entropía y probabilidad y por consiguiente a la línea de pensamiento de Boltzmann."*⁴⁵ Planck inició aquí el camino que le condujo al descubrimiento del cuanto de acción y a la consiguiente introducción de la discontinuidad en la Física.

Entre diciembre de 1900 y enero de 1901 Planck publicó dos artículos en los que avanzaba en la dirección apuntada en el artículo de octubre⁴⁶. El de diciembre recogía la intervención de Planck en la Sociedad Alemana de Física, bajo el título *"Zur Theorie des Gesetzes der Energievertheilung im Normalspektrum"*⁴⁷, donde introdujo su célebre fórmula $E = h\nu$ y con ella el cuanto de acción en la física, h conocida como *constante de Planck*. En el segundo titulado *"Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum"* Planck desarrolló la segunda de las derivaciones de su nueva ley de radiación anunciada en la citada sesión de la Sociedad Alemana de Física⁴⁸.

Planck era consciente de que había encontrado la solución del problema del cuerpo negro, pero no fue capaz de comprender que significaba dicha solución⁴⁹. La había obtenido a partir de conjeturas y mediante la combinación de distintas fórmulas y métodos, pero con ello había cambiado inconscientemente los supuestos sobre los que dichas fórmulas reposaban. Planck quería resolver el problema del cuerpo negro, pero también pretendía algo más cuando en 1897 se

44 PLANCK, M.: "Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung", *Verhandlungen der Deutsche physikalische Gessellschaft, Berichte*, 2, 1900, pp. 202-204, citado en Kuhn, pp. 122-123.

45 PLANCK, M.: "The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory", en http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck-lecture.html, Nobel Lecture, June 2, 1920.

46 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 127-128.

47 PLANCK, M.: "Zur Theorie des Gesetzes der Energievertheilung im Normalspektrum", *Verhandlungen der Deutsche physikalische Gessellschaft, Berichte*, 2, 1900, pp. 237-243.

48 PLANCK, M.: "Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum" *Annalen der Physik*, 4, 1901, pp. 553-563.

49 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 45-59.

embarcó en el programa de investigación sobre el cuerpo negro; pretendía demostrar el carácter fundamental de la segunda ley de la termodinámica. Creía que si podía demostrar el aumento de entropía en el caso de la radiación de cuerpo negro, habría conseguido demostrar lo segundo. A ello se dedicó durante los años siguientes a 1900, una vez completada su teoría de la radiación. Para ello tuvo que recurrir al método estadístico de Boltzmann, abandonando su pretensión anterior de definir el aumento de entropía en términos absolutos.

Pero, Planck hizo algo más que aplicar mecánicamente el método de Boltzmann, al dividir la energía en elementos les dio a éstos un carácter físico, algo que no había hecho Boltzmann, y con ello introdujo el *cuanto de energía*, un paso que rompía radicalmente con la física del siglo XIX al introducir la discontinuidad en la emisión y absorción de energía. La fórmula de Planck $E = h\nu$ resultaba extraña para los físicos de la época, porque establecía una igualdad entre la energía concebida como discontinua y la energía considerada como continua, en función del carácter ondulatorio de la frecuencia. *"resumido brevemente, se puede describir lo que hice como un acto de desesperación... por entonces había estado luchando sin éxito durante seis años (desde 1894) con el problema del equilibrio entre radiación y materia y sabía que este problema tenía una importancia fundamental para la física; también conocía la fórmula que expresa la distribución de la energía en los espectros normales. Por consiguiente, había que encontrar, costase lo que costase, una interpretación teórica. Tenía claro que la física clásica no podía ofrecer una solución a este problema, puesto que con ella se llega a que a partir de un cierto momento toda la energía será transferida de la materia a la radiación. Para evitar esto se necesita una nueva constante que asegure que la energía no se desintegre. Pero la única manera de averiguar cómo hacer esto es partiendo de un punto de vista definido. En mi caso, el punto de partida fue el mantener las dos leyes de la termodinámica. Hay que conservar, me parece, estas dos leyes bajo cualquier circunstancia. Por lo demás, estaba dispuesto a sacrificar cualquiera de mis convicciones anteriores sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo se establece el equilibrio termodinámico mediante un equilibrio estadístico, y si se aplica semejante método al equilibrio entre la materia y la radiación, se encuentra que se puede evitar la continua transformación de energía en radiación suponiendo que la energía está obligada, desde el comienzo, a permanecer agrupada en ciertos cuantos. Esta fue una suposición puramente formal y en realidad no pensé mucho en ella"*⁵⁰.

50 Carta de Max Planck a Robert Williams Wood, de 7 de octubre de 1931, reproducida en HERMANN, A.: *The Genesis of Quantum Theory (1899-1913)*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1971, pp.23-24, reproducida en español en SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* pp. 134-135.

Fue en el artículo de diciembre de 1900, publicado en la revista de la Sociedad Alemana de Física, en el que Planck introdujo por primera vez el *cuanto de acción*, al definir el tamaño de los diferentes elementos de energía, a la hora de calcular la entropía de una distribución arbitraria de energía. Para ello recurrió al método seguido por Boltzmann a la hora de subdividir el continuo de energía en elementos de tamaño finito, pero fue mucho más allá al señalar que éstos debían de tener un valor constante y proporcional a la frecuencia, de esta manera introdujo el *cuanto de acción* en la física. *"Debemos considerar ahora la distribución de energía entre cada tipo de resonador, en primer lugar la distribución de la energía E entre los N resonadores de frecuencia ν . Si consideramos a E infinitamente divisible, entonces son posibles un número infinito de distribuciones diferentes. Nosotros, sin embargo, suponemos -y ese es el punto esencial- que E está compuesta de un número determinado de partes finitas iguales y empleamos en su determinación la constante natural $h = 6,55 \times 10^{-27}$ (ergios \times seg.). Esta constante, multiplicada por la frecuencia ν del resonador, da el elemento de energía ε en ergios, y dividiendo E por ε obtenemos el número P de elementos de energía a distribuir entre los N resonadores."*⁵¹

Planck al aplicar la ley de Boltzmann para la entropía $S = k \cdot \ln W$ para la distribución de la energía convirtió a esta en discontinua, en oposición al carácter continuo que tenía en la física clásica, *"era esencial suponer que la energía, compartida por igual por los N osciladores, no pudiese variar de manera continua, es decir, que no fuese una magnitud... infinitamente divisible; era preciso tratarla como formada por un número, P , de partes iguales (elementos de energía; ε en la notación de Planck...)... el tamaño de los elementos de energía ε es arbitrario, pero de la ley de Wein... se sigue que la entropía es una función, g , que depende de $\frac{u}{\nu}$... [por lo que] es inevitable concluir que ε debe ser proporcional a ν , esto es $\varepsilon = h \cdot \nu$, donde h es una constante, una constante universal, la... "constante de Planck". Fue en ese momento cuando apareció la cuantización de la energía."*⁵²

Durante varios años paso desapercibida la diferencia entre la formulación de Boltzmann y la de Planck, pues mientras Boltzmann en su estudio sobre los gases propugnaba que el continuo de energía era divisible en elementos sin

51 PLANCK, M.: "Zur Theorie des Gesetzes der Energievertheilung im Normalspectrum", *Verhandlungen der Deutsche physikalische Gessellschaft, Berichte*, 2, 1900, pp. 239-240, citado en Kuhn, p. 131 y en MEHRA y RECHENBERG, pp. 50-51.

52 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* pp. 138-139.

establecer un valor mínimo y constante, Planck planteó como una cuestión esencial asignar un valor constante, correspondiente a la constante h que multiplicada por el valor de la frecuencia da el valor de los distintos elementos de energía. *"Cuando Planck escribió en enero de 1901 a los Annalen, omitió describir el problema general -distribuir una energía total dada E_0 entre resonadores de diversas frecuencias- que había contemplado en su conferencia de diciembre y que proporcionó la base conceptual para su prueba alternativa. En lugar de eso, postuló primero el equilibrio y abordó inmediatamente el problema de distribuir una energía $E(= NU = P\varepsilon)$ entre N resonadores a una sola frecuencia, señalando que hay exactamente $\frac{(N+P-1)!}{(N-1)!P!}$ maneras de hacerlo; a partir de ahí el argumento continuaba como antes. En esas circunstancias no es maravilla que sus coetáneos, sobre todo los que no estaban familiarizados con su conferencia de diciembre, encontrarán difícil seguir la exposición."*⁵³

Las repercusiones del descubrimiento del *cuanto de acción* pasaron desapercibidas durante los primeros años para la gran mayoría de los físicos, el propio Planck no se percató en el período inmediatamente posterior a la publicación de su artículo de diciembre de 1900 de la enorme trascendencia del resultado por alcanzado, o cuando menos en sus escritos posteriores no puso el acento sobre dicho particular hasta después de publicar en 1906 su obra *Lecciones sobre la teoría de la radiación térmica*. En general, los físicos de la época consideraban demasiado abstracto e hipotético el razonamiento de Planck como para ocupar su atención inmediata en los resultados de un razonamiento que por lo demás les resultaba bastante extraño. *"Aparentemente sin proponérselo, Planck había logrado un nexo cuantitativo y concreto entre la teoría electromagnética y las propiedades de los electrones y los átomos. Hacia finales del siglo pasado y principios del presente [del siglo XX] la búsqueda de nexos como ese era un empeño central en el área quizá más activa, apasionante y problemática de la investigación física, porque durante una generación la relación entre la electrodinámica y la mecánica se había tornado cada vez más problemática."*⁵⁴

En efecto, la física a finales del siglo pasado se encontraba atrapada por el dilema de la aceptación del electromagnetismo derivado de la teoría de Maxwell y la contradicción que su aceptación suponía respecto de la teoría mecanicista, procedente de la interpretación más extendida de la física newtoniana, y, en particular, con la teoría atomista, al no parecer posible la integración de la

53 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 135.

54 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 138.

materia en la teoría electromagnética. El descubrimiento del electrón en el último decenio del siglo XIX no hizo sino complicar la situación. De ahí el interés de los físicos de la época por encontrar una teoría que compatibilizara el electromagnetismo con la existencia de átomos y partículas con carga eléctrica.

Planck no era ajeno a estas preocupaciones, sus esfuerzos se dirigieron a intentar lograr la compatibilización del segundo principio de la termodinámica con la mecánica, fue un intento fallido. Por otra parte, Planck no desconocía el programa de Lorentz de reducir la materia y la mecánica a la electrodinámica, programa que a finales del siglo XIX y comienzos del XX gozaba de gran predicamento entre los físicos y que pretendía dar una visión electromagnética de la Naturaleza, de hecho Planck mantuvo una frecuente correspondencia con Lorentz durante estos años en donde discutían sobre estos problemas.

Entre 1900 y 1906 Planck mantenía una concepción de su teoría de la radiación que se desenvolvía dentro de los límites de la física clásica, a pesar de haber introducido en su artículo de diciembre de 1900 el *cuanto de acción*. De hecho, la teoría de la radiación de Planck, tal como fue expuesta por éste entre 1900 y 1906, resultaba incompatible con la cuantificación de la energía de los resonadores. En aquellos años, Planck no consideraba éste el problema esencial, sino que trataba de resolver los problemas con los que había topado entre 1894 y 1899 sobre la entropía de un resonador. *"Cuando en 1899 Planck resumió en los Annalen el resultado de su anterior investigación, reconoció que su teoría era esencialmente incompleta en un aspecto: carecía de una prueba de la unicidad de la función que había "definido" como entropía del resonador. En marzo de 1900, con la ley de Wien en duda, intentó salvar esta brecha con el argumento que desembocó en la ecuación... $\partial^2 S / \partial U^2 = -\alpha / U$, de la cual se seguía la ley de Wien. Al presentar su otra ley de distribución en octubre, subrayó que ese argumento era la única parte de su trabajo previo que había de dejar ahora a un lado, reintroduciendo así la brecha que en apariencia había salvado en marzo. Los nuevos artículos de derivación combinatorios que presentó en diciembre y enero proporcionaban un nuevo medio para salvarla, porque su producto era una función de entropía única $S(U)$ a la que cabía volver a aplicar su antigua teoría. Eso es lo que, desde 1901 hasta 1906, Planck y la mayoría de los lectores pensaban que era el papel de su argumento combinatorio: sustituir la deficiente prueba de unicidad de marzo de 1900. Aunque la teoría de la radiación de Planck planteaba problemas que requerían solución, no parecía que pusiesen en peligro la integridad de su anterior trabajo, y no digamos de la física clásica."*⁵⁵

Entre 1900 y 1906 Planck no diferenciaba los caminos recorridos por él y por

55 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 142.

Boltzmann. En otras palabras, la introducción de la combinatoria en su teoría de la radiación no difería esencialmente, a su juicio, del método empleado por Boltzmann. En aquellos años, Planck no se percató, o al menos no lo expresó de manera clara, de que la introducción de valores discretos regidos por una constante para los diferentes elementos de energía constituía una profunda revisión de los fundamentos de la física, respecto del concepto clásico de energía. Lejos de ello, Planck se mostraba convencido de que en su teoría de la radiación la emisión y absorción del resonador se encontraban determinadas por las ecuaciones de Maxwell, de esta forma *"aunque la estructura del continuo de energía viene fijada por el elemento de energía $h\nu$, el movimiento de los resonadores de Planck sigue siendo continuo, tanto dentro de los elementos que constituyen ese continuo como de un elemento al siguiente."*⁵⁶

Sin embargo, para Planck, en su artículo de diciembre de 1900, el *cuanto de acción* tenía una significación física, aunque sobre ello no insistió hasta después de 1906. En su obra *Lecciones sobre la teoría de la radiación térmica* aparecía un párrafo harto significativo: *"Un rasgo de este resultado [se refiere a $\varepsilon = h\nu$] que choca de inmediato es la entrada de una constante universal h cuyas dimensiones son un producto de energía por tiempo. Supone una diferencia esencial respecto a la expresión de la entropía de un gas. En esta última, la magnitud de una región elemental que llamamos dw desaparece del resultado final, porque su único efecto es sobre la constante aditiva, que físicamente carece de significado... Así pues, la termodinámica de la radiación no llegará a una conclusión enteramente satisfactoria hasta entender el pleno y universal significado de la constante h . Quisiera llamarle el "cuanto de acción" o el "elemento de acción", por tener las mismas dimensiones que la magnitud a la que el Principio de Mínima Acción debe su nombre"*⁵⁷.

Así pues, en 1906 Planck, aunque no consciente todavía de la gran fractura que el *cuanto de acción* iba a suponer respecto de la física clásica, se había percatado de que la introducción de la constante h constituía un hecho de profunda significación física a la hora de establecer una teoría termodinámica de la radiación satisfactoria. En otras palabras, a la altura de 1906 Planck había identificado el *cuanto de acción* con h , estableciendo además que era una constante universal, pero aún no había llegado a la conclusión de que dicho descubrimiento suponía introducir la discontinuidad en la Física, algo que tardaría aún varios años en realizarse. Es posible que por estas razones los artículos de diciembre de 1900 y enero de 1901, junto con su obra *Lecciones*

56 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 153.

57 PLANCK, M.: *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, p. 153, citado en Kuhn, p. 159.

sobre la teoría de la radiación térmica aparecida en 1906, no fuesen valorados por los físicos de la época como una aportación que revolucionaría los cimientos de la física. "Sea cual fuere la idea que Planck tenía de hasta que punto su teoría rompía con la tradición clásica, lo cierto es que la mayoría de sus primeros lectores no la acogieron como una obra radical. Pero, en parte por eso mismo, tampoco fue muy nutrido ese grupo. La teoría del cuerpo negro siguió siendo hasta después de 1906 una especialidad esotérica, como lo había sido antes de 1900. Lo cual no quita para que los escritos de Planck fuesen conocidos. Las revistas inglesas y alemanas clásicas, donde aparecieron recensiones de dichos trabajos en 1901 y en 1902, los trataron simplemente como trabajos que elaboraban un poco más la línea de investigación de la que había venido informando Planck desde 1895."⁵⁸

Entre 1900 y 1905, Rayleigh trató de derivar una ley de radiación completa basándose en la teoría electromagnética de Lorentz, el resultado fue un fracaso. La ley de Rayleigh proponía una reinterpretación de la ley de repartición espectral que se mostraba en grave contradicción con la experiencia. En 1900 Rayleigh señaló que la ley de Wien, tal como había sido derivada por Planck, exigía que la energía no aumentase una vez alcanzado determinado umbral de energía, al no considerar satisfactorio dicho resultado proponía la modificación de la ley, de manera que la intensidad de energía creciera con la temperatura en todas las longitudes de onda en concordancia con la ley de desplazamiento⁵⁹. Sin embargo, la experiencia mostraba que la densidad espectral, una vez alcanzado un máximo para una cierta frecuencia, disminuía rápidamente conforme aumentaba la frecuencia. La ley de Rayleigh conducía, pues, a una conclusión que se mostraba en clara disconformidad con la experiencia, al propugnar que la densidad total de la radiación negra debería tender al infinito conforme aumentara la temperatura. Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum comprobaron los datos de sus experimentos sobre densidades de energía de la radiación con las diferentes teorías de la radiación existentes, y llegaron a la conclusión de que la ley de Rayleigh sólo era satisfactoria en el límite que coincidía con la ley de Planck, por lo que fue rápidamente desechada en favor de esta última⁶⁰. Los resultados de Rayleigh no hacían sino poner en evidencia las teorías clásicas de la radiación, que postulaban valores infinitos para la energía conforme aumentaba la frecuencia de la radiación a intervalos crecientes de temperatura, algo que no sólo estaba en contradicción con los resultados experimentales

58 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 163.

59 RAYLEIGH, lord: "Remarks upon the Law of Complete Radiation", *Philosophical Magazine*, 49, 1900, pp. 539-540.

60 RUBENS, H. y KURLBAUM, F.: "Über die Emission Langwelliger Wärmestrahlen durch den schwarzen Körper bei verschiedenen Temperaturen", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlín, 1900, pp. 929-941.

disponibles, sino que chocaba de raíz con los postulados de la física teórica.

James Jeans se ocupó posteriormente de la teoría de Rayleigh desde una perspectiva diferente, relacionada con ciertas anomalías observadas en la teoría del calor específico de los gases, según la cual el *calor* de un gas era debido al movimiento irregular, de naturaleza probabilística, de las innumerables moléculas que constituyen dicho gas. Jeans decidió aplicar los métodos estadísticos, que se habían aplicado con éxito en el estudio del movimiento térmico de las moléculas, al problema de la radiación térmica. Jeans se preguntó si la distribución de energía entre las diferentes longitudes de onda en el caso de la radiación estarían sujetas a las mismas leyes estadísticas de la distribución de energía entre las moléculas de un gas⁶¹.

Jeans en su obra *Teoría dinámica de los gases* publicada en 1904⁶², trató de reconciliar la teoría de equipartición de los gases⁶³ de la física estadística con los calores específicos observados. Dicho intento provocó una larga polémica de Rayleigh con Jeans sobre la aplicabilidad de la ley de equipartición al problema de la radiación durante 1905, que culminó con la elaboración de la ley de Rayleigh-Jeans⁶⁴ y con la conclusión de que no era posible ninguna distribución de equilibrio de la radiación compatible con la física clásica⁶⁵, debido a la aparición de la *catástrofe del ultravioleta*, como el propio James reconocía esta ley "*debía, según la mecánica newtoniana, gobernar la distribución de la energía en el espectro. No puede ser una ley correcta, puesto que la energía total obtenida... sería infinita para cualquier valor de T [temperatura]; y si la energía total fuese finita el único valor posible para T sería T=0*"⁶⁶. Los intentos de James de evitar la catástrofe ultravioleta no tuvieron éxito y en 1914 reconoció en su *Report on Radiation and the Quantum-Theory* que "*no existía ninguna*

61 JAMES, J.: "The partition of energy between matter and ether", *Philosophical Magazine*, 10, 1905, pp. 91-98.

62 JAMES, J.: *The Dynamical Theory of Gases*, Cambridge, Cambridge University Press, 1904.

63 Según la cual dado un número grande de sistemas en interacción estadística entre ellos (como puede ser el caso de las moléculas de un gas), la energía disponible se encuentra por término medio distribuida de manera igual entre todos los sistemas.

64 RAYLEIGH, lord: "The Dynamical Theory of Gases", *Nature*, 71, 1904-1905, p. 559; JEANS, J.: "The Dynamical Theory of Gases", *Nature*, 71, 1904-1905, p. 607; RAYLEIGH, lord: "The Dynamical Theory of Gases and Radiation", *Nature*, 72, 1905, pp. 54-55; JEANS, J. H.: "The Dynamical Theory of Gases and Radiation", *Nature*, 72, 1905, pp. 101-102; RAYLEIGH, lord: "The Constant of Radiation as Calculated from Molecular Data", *Nature*, 72, 1905, pp. 243-244.

65 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 83-99.

66 JAMES, J.: *Report on Radiation and the Quantum-Theory*, London, The Physical Society of London, 1914, citado en SÁNCHEZ RON, p. 159.

esperanza de evitar dicha catástrofe, excepto aceptando el cuanto de energía de Planck⁶⁷. La teoría de la radiación defendida por Jeans para evitar dicha catástrofe no dejaba, pues, de plantear numerosas dificultades teóricas y experimentales, a la vez que generaba notables problemas en la aplicación del teorema de equipartición, por lo que no fue tomada en consideración⁶⁸. "En 1905 se sabía ya que la ley de Planck estaba en excelente acuerdo cuantitativo con los experimentos, y en el argumento de Jeans no había nada que lo explicara... Y tampoco eran sólo los experimentos sobre la distribución de la energía radiante los que, en principio, se tornaban inexplicables desde el punto de vista de Jeans. Al negar Jeans que estos experimentos, u otros parecidos, tuvieran que ver con situaciones de equilibrio, negaba también la pertinencia de los argumentos termodinámicos, y en ese caso habría que hallar nuevas derivaciones de la ley de Kirchhoff, de la de Stefan-Boltzmann y de la del desplazamiento de Wien⁶⁹.

Planck en su obra *Lectures on the Theory of Heat Radiation* desarrolló la formulación "de su visión de una teoría unificada de todos los fenómenos de radiación. La base de esta unificación fue proporcionada por la termodinámica, que explica los procesos reversibles e irreversibles en la naturaleza. En la teoría de la radiación fenómenos de propagación, reflexión y difracción de la luz pueden ser descritos como procesos reversibles, mientras que los fenómenos de absorción y emisión de la luz y la transformación de las frecuencias parecen requerir una descripción de los procesos irreversibles. En cuanto Planck publicó su concepción unitaria de la radiación, fue atacado duramente desde dos posiciones: Por un lado, Albert Einstein destruyó la unificación de la radiación térmica, haciendo hincapié en el carácter cualitativamente diferente de las radiaciones de longitud de onda corta y larga; por el otro, investigaciones más profundas demostraron que la fórmula de la radiación,

$$\Phi(\lambda, T) = \rho_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1}$$
, en contradicción con los conceptos fundamentales de la teoría electrodinámica existente⁷⁰.

67 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 159.

68 KANGRO, H.: *Early History of Planck's Radiation Law*, London, Taylor & Francis Ltd., 1976; KLEIN, M. J.: "Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory", *Archive for History of Exact Sciences*, I, 1962, pp. 459-479; KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 173-181.

69 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 179.

70 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, p. 59.

Sólo Einstein al postular en 1905 la existencia de partículas de luz (fotones) y con ello el carácter corpuscular y ondulatorio de la luz comprendería en toda su magnitud el alcance de la teoría de Planck⁷¹, "él fue el primer físico que entendió que significaba realmente la expresión $E=h.v$, que para Planck era una "suposición puramente formal"; el primero en darse cuenta de que implicaba un cambio profundo en la comprensión de la estructura física de la radiación electromagnética."⁷² Una posición que gozó de la animadversión del resto de los físicos, entre ellos el propio Planck, que atrapados por la teoría ondulatoria de la luz dominante en el siglo XIX, no podían concebir un comportamiento tan extraño, a primera vista tan contrario con los postulados de la física.

Tan sólo en 1922 con el descubrimiento del efecto Compton y el desarrollo de la mecánica cuántica por Bohr, Schrödinger, Born y Heisenberg entre otros, la solución propuesta por Einstein se abrió camino y fue cabalmente entendida. "La primera derivación de Planck, tal como fue publicada, omitía explícitamente un paso esencial, aunque conceptualmente inmediato. La segunda era completa, pero estaba expuesta en una forma harto condensada y especialmente difícil de seguir, porque las derivaciones de Planck, tras introducir la relación de Boltzmann entre la entropía y la probabilidad, se ocupaban de un problema de distribución muy diferente del de Boltzmann. De ahí que, hasta la aparición de sus Lecciones sobre la teoría de la radiación térmica en 1906, muchos de los contemporáneos de Planck encontrarán extremadamente oscuras sus derivaciones, sobre todo la segunda versión"⁷³.

Ehrenfest y Einstein: el reconocimiento de la discontinuidad y la fractura con la física clásica.

Sin embargo, las tesis de Jeans desempeñaron un papel de primer orden cuando fueron posteriormente aplicadas a la teoría de radiación de Planck por parte de Paul Ehrenfest. En un artículo publicado en la revista de la Academia de Viena en 1905 titulado "Sobre los presupuestos físicos de la teoría de los procesos de radiación irreversibles de Planck"⁷⁴, señalaba que Planck había obtenido una

71 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, nº 17, 1905, p. 132, existe traducción al español en "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz", en *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*. Prólogo de Roger Penrose, John STACHEL (ed.), Barcelona, Crítica, 2001, pp. 161-178, también en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*. Antonio RUIZ DE ELVIRA (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 45-71.

72 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 162.

73 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 128.

74 EHRENFEST, P.: "Über die physikalischen Voraussetzungen der Planck'schen Theorie der irreversiblen Strahlungsvorgänge", *Wiener Ber.*, 114, 1905, pp. 1.301-1.314.

función de entropía que sólo podía aumentar o permanecer constante para todos los estados de radiación naturales posibles, pero no demostraba que para una energía total dada la entropía sólo permaneciese constante si el estado estacionario alcanzado por la radiación se ajustaba a una distribución unívocamente determinada por la energía total, *"es muy probable que Planck no hubiese logrado advertir que el estado de radiación que maximizaba una función de entropía era también un estado estacionario para todas las demás. Esta circunstancia planteaba un problema que entre finales de octubre de 1905 y mediados de febrero de 1906 llevó a Ehrenfest a un conjunto de conclusiones mucho más importantes que las descritas en su artículo para la Academia... Hacia la época en que Ehrenfest presentó su primer artículo, había comenzado a hablar en sus cuadernos de notas de la necesidad de una "teoría general de las cuasi-entropías", una teoría que explicara por qué eran "siempre crecientes" y también la "unicidad del estado final" al que cada una de ellas conducía; y esa teoría debería relacionarse también de algún modo con la "teoría de las complejiones".*⁷⁵

Ehrenfest había señalado en su artículo a la Academia de Viena que cuando existían varias funciones de entropía posibles el estado realmente alcanzado no venía determinado sólo por la energía total, sino que dependía en alguna forma no clarificada de las demás condiciones iniciales del movimiento. De esta forma, todo valor estacionario sólo sería un máximo absoluto para una distribución inicial de velocidades seleccionada previamente. Por tanto, el modelo de Planck permanecía incompleto, en tanto en cuanto permaneciese incompleto el mecanismo equilibrador que permitía al modelo de radiación de Planck soportar numerosas cuasi-entropías. Este resultado fue expuesto por Ehrenfest en un nuevo artículo publicado en 1906, en el que señalaba que los resonadores lineales fijos del modelo de Planck no podían alterar la distribución de frecuencias de la energía del campo de radiación⁷⁶. *"En febrero [de 1906], como muy tarde, sabía que la existencia de funciones de cuasi-entropía podía deberse a un mecanismo equilibrador incompleto, y anteriormente había tenido razón al sospechar la naturaleza de la incompletud que caracterizaba al modelo de Planck. Estos descubrimientos no tuvieron necesariamente que hacerle pensar que todo modelo clásico de la radiación del cuerpo negro era inviable"*⁷⁷.

En la primera edición de las *Lecciones* de Planck publicadas en 1906, éste recogía los resultados a los que había llegado Ehrenfest⁷⁸ en una *conclusión*

75 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 185.

76 EHRENFEST, P.: "Zur Planckschen Strahlungstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 7, 1906, pp. 528-532.

77 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 185.

78 KUHN, Th. S.: *teoría del cuerpo negro...*, pp. 181-197.

añadida. *"La teoría de los procesos de radiación irreversibles aquí expuesta explica por qué en una cavidad irradiada y llena de osciladores de todas las frecuencias posibles, la radiación, independientemente de sus condiciones iniciales, alcanza un estado estacionario: Las intensidades y polarizaciones de todas sus componentes son simultáneamente equilibradas en magnitud y dirección. Pero la teoría se sigue caracterizando por una laguna esencial. Sólo trata de la interacción entre la radiación y la vibración de osciladores de la misma frecuencia. Por consiguiente, a una frecuencia dada el aumento continuo de entropía hasta un valor máximo, tal como exige el segundo principio de la termodinámica, queda probado sobre bases puramente electrodinámicas. Mas, para todas las frecuencias tomadas en conjunto, el máximo así alcanzado no es el máximo absoluto de la entropía del sistema, ni el correspondiente estado de radiación es en general el [estado de] equilibrio absolutamente estable... La teoría no dilucida para nada la manera en que las intensidades de radiación correspondientes a diferentes frecuencias son simultáneamente equilibradas, es decir, de qué modo la distribución arbitraria inicial se convierte con el tiempo en la distribución normal que es característica de la radiación negra. Los osciladores que proporcionan la base para el presente tratamiento influyen únicamente en las intensidades de la radiación correspondientes a sus propias frecuencias naturales. No son capaces, sin embargo, de cambiar de frecuencia si sus efectos se limitan a la emisión y absorción de energía radiante."*⁷⁹

Tal como ha señalado Thomas S. Kuhn: *"Estos párrafos, que constituyen la nueva "Conclusión" de Planck, tuvieron que resultarle desoladores, porque invalidan, no los detalles de la exposición, que en su mayor parte se sostiene, pero sí la estructura global del argumento en que esos detalles se engarzan a lo largo de las doscientas veinte páginas anteriores. Buena parte de la consiguiente molestia podría haberse evitado si Planck hubiese reconocido a tiempo la impotencia de los resonadores"*⁸⁰.

Ehrenfest cuestionó precisamente el papel que los resonadores debían cumplir en la teoría de Planck, indicando que su mantenimiento conducía al mismo resultado que la teoría de Jeans sobre el comportamiento de la radiación en una cavidad vacía. Para alcanzar el resultado de Planck era preciso establecer, señaló Ehrenfest, una restricción que constituía una ruptura con la teoría clásica, como era el limitar la energía de cada modo de vibración a múltiplos enteros del elemento de energía $h\nu$. En ello jugó un papel de primer orden la reinterpretación realizada por Ehrenfest de la combinatoria utilizada por Planck en su teoría del cuerpo negro. *"Primero en sus artículos sobre la radiación y*

79 PLANCK, M.: *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, p. 220, citado en Kuhn.

80 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 193.

*luego en las Lecciones, Planck había calculado la entropía a base de aplicar la teoría de las complejiones a los resonadores; pero esta teoría, así aplicada, no era más que la teoría de probabilidades, y su utilidad debería ser, por tanto, independiente -señaló Ehrenfest- del empleo de resonadores. Así pues, Ehrenfest, elaborando una representación "que se corresponde más de cerca con los métodos de Rayleigh y Jeans" que con los utilizados por Planck, procedió en la tercera parte de su artículo a aplicar directamente al campo la definición probabilística de Boltzmann para la entropía.*⁸¹

De esta manera, Ehrenfest señalaba la cuestión física fundamental de la teoría de la radiación del cuerpo negro de Planck. La cuestión no radicaba en la introducción de los resonadores, sino en el tratamiento probabilístico del campo que conducía a determinar las restricciones que la teoría exigía, *"a la ley de distribución de Planck podría llegarse con unas restricciones distintas de las suyas. Pero al menos cabe demostrar, concluye Ehrenfest, que la ley de Planck puede seguirse de la teoría de las complejiones aplicada al cuerpo solamente. Un buen método consiste en una condición adicional que restringe el valor de ϵ_v , a múltiplos enteros del cuanto de energía $h\nu$ "*⁸².

A conclusiones similares, aunque por caminos diferentes había llegado Albert Einstein por las mismas fechas. Tres meses antes del artículo de junio de 1906 de Ehrenfest, había enviado Einstein su artículo: *"Sobre la teoría de la emisión y la absorción de la luz"* a los *Annalen der Physik*⁸³. En él sostenía que el modelo del cuerpo negro de Planck conducía dentro de la física clásica a la ley de Rayleigh-Jeans. En este artículo Einstein expresó, por vez primera, que la teoría de Planck de la radiación exigía una restricción sobre el continuo clásico de estados del resonador. *"Debemos pues considerar el siguiente enunciado como aquello en que está basada la teoría de Planck de la radiación: la energía de un resonador elemental solo puede tomar valores que sean múltiplos enteros de; la energía de un resonador varía por absorción y emisión a saltos, y de hecho en múltiplos enteros de $(R/N)\beta\nu$."* [donde R es la constante de los gases, N el número de Avogadro y β una constante]⁸⁴.

81 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 197.

82 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 199.

83 EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik*, 20, 1906, pp. 199-206, existe traducción al español "Sobre la teoría de la emisión y absorción de luz", pp. 189-199, en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004.

84 EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik*, 20, 1906, pp. 199-206. "Sobre la teoría de la emisión y absorción de luz", p. 195, *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004.

Einstein en sus inicios como físico se sentía fuertemente atraído por la termodinámica, y dentro de ella por el enfoque estadístico desarrollado por Boltzmann en su *Teoría de los gases*⁸⁵. Sus primeros artículos se ocuparon de este tema, en ellos que intentó formular una termodinámica estadística que no se limitase exclusivamente al estado gaseoso⁸⁶, coincidiendo con los resultados que Gibbs desarrolló de forma paralela en 1902 en su *mecánica estadística*. En estos artículos, especialmente en el publicado en 1903 "*Theorie der Grundlagen der Thermodynamik*" Einstein trató de establecer una termodinámica estadística de carácter general. *"Einstein elabora luego... una serie de teoremas de los que la teoría de los gases no había tenido especial necesidad, pero que son precisos para pasar a una mecánica estadística o termodinámica estadística de aplicación más amplia; en concreto obtiene expresiones para aquellas magnitudes que han de corresponderse con la temperatura, la entropía y la probabilidad de un estado, y lo hace en términos de las funciones ϕ_i y $E...$ Está claro que esos son precisamente los elementos conceptuales de más flagrante ausencia en el estudio que hace Planck del problema del cuerpo negro. Planck se había visto obligado a "definir" la probabilidad de un estado, y había observado que su definición con ser plausible, sólo cabía justificarla a través de los experimentos. Esta incertidumbre en torno a la probabilidad contagiaba a la entropía, el logaritmo de la probabilidad, y de allí a la temperatura, que era la derivada de la energía con respecto a la entropía. El artículo de Einstein, escrito antes de mostrar signo alguno de ocuparse de la teoría del cuerpo negro, salvaba estas lagunas.*⁸⁷

En su artículo "*Allgemeine molekulare Theorie der Wärme*"⁸⁸ Einstein se ocupó de establecer el significado físico de la constante universal introducida por él en el artículo de 1903⁸⁹, por el que la fluctuación de energía debía de tener un

85 KLEIN, M. J.: "Thermodynamics in Einstein's Thought", *Science*, 157, 1967, pp. 509-516.

86 EINSTEIN, A.: "Folgerungen aus den Kapillaritätserscheinungen", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 4, 1901, pp. 513-523; EINSTEIN, A.: "Thermodynamische Theorie der Potential differenz Zwischen Metallen und vollständig dissoziierten Lösungen ihrer Salze, und eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte" *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 8, 1902, pp. 798-814; EINSTEIN, A.: "Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 9, 1902, pp. 417-433; EINSTEIN, A.: "Theorie der Grundlagen der Thermodynamik", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 11, 1903, pp. 170-187; EINSTEIN, A.: "Allgemeine molekulare Theorie der Wärme", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 14, 1904, pp. 354-362.

87 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 203-204.

88 EINSTEIN, A.: "Allgemeine molekulare Theorie der Wärme", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 14, 1904, pp. 354-362.

89 EINSTEIN, A.: "Theorie der Grundlagen der Thermodynamik", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 11, 1903, pp. 170-187.

carácter físico fundamental y que le condujo a ocuparse del problema del cuerpo negro⁹⁰. Einstein citaba en su artículo la definición de entropía dada por Planck, por aquel entonces ya conocía, pues, la teoría del cuerpo negro de éste aunque no mencionase la ley de radiación de Planck. *"Einstein tenía razones muy suyas para dudar de la derivación de esa ley [de radiación de Planck], aunque todavía no estaba en condiciones de sustituirla por otra ni de entender por qué proporcionaba un resultado tan certero. Hacían falta dos pasos más en el desarrollo de su propio programa de investigación antes de llegar a entenderlo. El primero de ellos lo dio Einstein en un famoso artículo publicado al año siguiente, 1905... El nuevo artículo de Einstein sobre el cuerpo negro fue enviado para su publicación en marzo de 1905, un mes antes de iniciarse aquella correspondencia en Nature a través de la cual Rayleigh y Jeans obtuvieron la ley que desde entonces lleva su nombre... De ahí resulta [de los resultados de su argumentación] la ley de Rayleigh-Jeans para u_{ν} y Einstein se para en ello lo suficiente como para advertir su imposible consecuencia: energía infinita en el campo de radiación."*⁹¹

En su artículo *"Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz"*⁹², por el que luego le fue concedido el premio Nobel por explicar el efecto fotoeléctrico, Einstein analizaba la ley de Planck y su comportamiento a altas y bajas y bajas frecuencias. En dicho artículo, Einstein equiparó la constante que había establecido en 1903 con la constante de Planck, de manera que la energía de las partículas luminosas (fotones) de Einstein es la misma que los elementos de energía de Planck⁹³. Si bien Einstein se refería a la ley de radiación de Planck no mencionaba, sin embargo, a la teoría de Planck sobre el cuerpo negro, las razones las explicó el mismo Einstein en un artículo escrito un año después. *"Entonces me daba a mi la impresión [cuando publicó el artículo de 1905, un punto de vista heurístico] como si la teoría de Planck de la radiación fuese contradictoria en determinada relación con mi trabajo. Nuevas*

90 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 59-74.

91 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 211-212.

92 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 132-148, existe traducción al español en "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz", en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 45-71; y en *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, STACHEL, J. (ed.), Barcelona, Crítica, 2001, pp. 161-178.

93 Klein realiza un análisis muy detallado de este artículo en KLEIN, M. J.: "Einstein's First Paper on Quanta", *The Natural Philosopher*, 2, 1963, pp. 59-86; ver también KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 212-214.

reflexiones, que se comunican en [1] de este trabajo, me mostraron, empero, que las bases teóricas sobre las que descansa la teoría de la radiación del Sr. Planck, se diferencian de aquellas en que se basa la teoría de Maxwell y de la teoría de los electrones, y de hecho en que la teoría de Planck hace uso implícito de la hipótesis de los cuantos de luz que se acaba de mencionar.⁹⁴

En este último artículo Einstein establecía que si la energía del resonador variaba de forma continua las ecuaciones conducían necesariamente a la ley de Rayleigh-Jeans, pero "se llega, sin embargo, a la fórmula de Planck si se asume que la energía E_α de un resonador no puede adquirir cualquier valor arbitrario, sino solo aquellos valores que sean múltiplos enteros de ε , donde $\varepsilon = \frac{R}{N} \beta v$ "⁹⁵.

El alcance de los resultados de Einstein iban a revolucionar la física, "la ley de Planck se sigue de un espectro de energía discreto, $\varepsilon = nh\nu$, pero siempre y cuando uno siente un supuesto adicional y extraordinario que Einstein pasa enseguida a considerar. Las ecuaciones anteriores sólo dan leyes de distribución para la energía del resonador; si se quiere obtener leyes parecidas para el campo, hace falta introducir el conocido factor $8\pi \frac{v^2}{c^3}$, que proviene de suponer que los resonadores emiten y absorben energía continuamente. Ningún supuesto semejante es compatible con la versión einsteiniana de la teoría de Planck, por lo cual Einstein sugiere adoptar el siguiente sustituto: "Aunque la teoría de Maxwell no es aplicable a resonadores elementales, la energía media de un

94 EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Lichtezeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 20, pp. 199-206, "Sobre la teoría de emisión y absorción de luz", en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 189-199, p. 189.

95 EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Lichtezeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 20, pp. 199-206, "Sobre la teoría de emisión y absorción de luz", en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 189-199, p. 194. Einstein no se mostraba muy conforme con la forma en que Planck había derivado los cuantos de su ley de radiación de 1900, "se preguntaba cómo es que Planck había llegado a su ley y no a la de Rayleigh-Jeans. Esto le llevaba a manifestar que cuando se seguía un procedimiento establecido desde el punto de vista estadístico era inevitable, como sostuvieron en su momento Rayleigh, Jeans y otros (como Lorentz), obtener la ley de radiación que lleva el nombre de los físicos británicos y no la de Planck, y a señalar que se había utilizado en la expresión de Boltzmann una definición de W que no suministraba ninguna justificación física que sustentara el uso que hacía de casos igualmente probables; de hecho, Einstein argumentaba que la validez de la ley de Planck implicaba que todas las configuraciones no pueden ser igualmente probables. No sería hasta 1924 cuando Satyendranath Bose resolvería este problema estadístico.", SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 177.

resonador semejante en un campo de radiación es la misma que la que se calcularía a partir de la teoría de Maxwell". Este enunciado marca el nacimiento de la paradoja básica de la vieja teoría cuántica. La teoría tiene acceso tanto a las ecuaciones de Maxwell como a las de la mecánica clásica, pero su formulación ulterior es incompatible con una o ambas de estas teorías clásicas. Otros físicos explotaban esta incoherencia como argumento contra cualquier forma de discontinuidad cuántica, y para el propio Einstein fue motivo de honda preocupación. Durante largos años buscó un nuevo conjunto, no lineal, de ecuaciones del campo que a frecuencias bajas se redujeran a las ecuaciones de Maxwell y que representaran las discontinuidades en forma de singularidades del campo; pero ni él ni ningún otro logró encontrar una resolución tan clásica de la paradoja cuántica. Cuando, dos décadas más tarde, Bohr y otros hallaron la manera de resolverla, Einstein fue incapaz de aceptar su interpretación, que en esencia era no clásica.⁹⁶

Einstein cuando publicó "*Un punto de vista heurístico...*"⁹⁷ se encontraba inmerso en una reflexión de carácter más general sobre algunos de los graves problemas que aquejaban a la física de su tiempo, de hecho el mismo año y en la misma revista los *Annalen der Physik* publicaba el artículo donde exponía la Teoría de la Relatividad Especial⁹⁸. Dentro de este programa general, la teoría fotoeléctrica desarrollada en "*Un punto de vista heurístico...*" se encontraba íntimamente relacionada con el problema más general de la estructura de la luz, dentro de ella aparecía la contradicción entre la naturaleza corpuscular de la materia, de carácter, por tanto, discreto, y la naturaleza ondulatoria de la radiación, de carácter continuo.

En su intento de resolver dicho problema dirigió su atención al análisis del fenómeno de la radiación del cuerpo negro. Einstein conocía la obra de Planck, aunque en aquellos años (1905) no se mostraba muy satisfecho con ella, y conocía el fenómeno denominado *catástrofe del ultravioleta*, que generaba fuertes sospechas sobre el supuesto de la energía continua. Einstein conocía los

96 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 217.

97 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 132-148, "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz", en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 45-71; y en *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, STACHEL, J. (ed.), Barcelona, Crítica, 2001, pp. 161-178.

98 EINSTEIN, A.: "Zur elektrodynamik bewegter körper" en *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905, pp. 891-921, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 88-139, y STACHEL, J. (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*. Barcelona, Crítica, 2001, pp. 111-143.

trabajos experimentales de Philipp Lenard sobre la absorción de alta frecuencia en ciertos metales, desde 1901⁹⁹. En este caso la transferencia de energía, procedente del rayo luminoso, es de tal magnitud que algunos de los electrones de la superficie del metal bombardeado son arrancados. Este fenómeno analizado por Einstein es conocido como *efecto fotoeléctrico*. Conforme aumentaba la frecuencia de la luz emitida sobre el metal aumentaba la energía, según la teoría clásica de la radiación los electrones arrancados de la lámina del metal deberían poseer una mayor energía, y, por tanto, alcanzar velocidades mayores que los electrones desprendidos a frecuencias menos elevadas. Sin embargo, Lenard observó que no ocurría así, los electrones poseían la misma energía, la única diferencia consistía en que a mayores frecuencias era mayor el número de electrones desprendidos¹⁰⁰. En la introducción de *Un punto de vista heurístico* ya dejaba clara su posición desde la que debían atacarse estos problemas: *"las observaciones de la "radiación de cuerpo negro", fotoluminiscencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta, y otros fenómenos relacionados asociados con la emisión y transformación de luz parecen entenderse más fácilmente si se supone que la energía de la luz está distribuida por el espacio de forma discontinua"*¹⁰¹

Einstein interpretó de forma correcta los resultados de Lenard en su artículo de 1905, el *efecto fotoeléctrico* no podía ser interpretado desde la teoría ondulatoria de la luz; la luz debería de estar compuesta por partículas, fotones, que portaban una cantidad discreta de energía equivalente al valor del cuanto de acción de Planck. *"Por lo que puedo decir, esta idea del efecto fotoeléctrico contradice sus propiedades tal como han sido observadas por el Sr. Lenard. Si cada cuanto de energía de la luz incidente transmite su energía a los electrones, independientemente de todos los demás cuantos, entonces la distribución de velocidad de los electrones, i.e., la naturaleza de los rayos catódicos producidos, será independiente de la intensidad de la luz incidente; por otro lado, en circunstancias por lo demás idénticas, el número de electrones que dejan el*

99 El 28 de mayo de 1901 escribió a Mileva "acabo de leer un maravilloso tratado de Lenard sobre la producción de rayos catódicos con luz ultravioleta", SÁNCHEZ RON, J. M. (ed.): *Albert Einstein, Cartas a Mileva*, Madrid, Mondadori, 1990, p. 89, el artículo debía ser LENARD, Ph.: "Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht", *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Wien, 108, IIa, 1899, pp. 1.649-1666, reimpresso en *Annalen der Physik*, 2, 1900, pp. 359-375.

100 WHEATON, B. R.: "Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889-1911", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 9, 1978, pp. 299-322.

101 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, p. 132, "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz", *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, STACHEL, J. (ed.), Barcelona, Crítica, 2001, p. 162, y en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, p. 46-47.

*cuerpo será proporcional a la intensidad de la luz incidente*¹⁰². De esta forma, Einstein obtuvo una ecuación muy similar, por no decir idéntica, a la fórmula de Planck, según la cual la energía de los fotones se encuentra en relación con la frecuencia del rayo luminoso, quedando así explicado el efecto observado por Lenard, debido a que al incrementar la frecuencia del rayo luminoso emitido se incrementa el número de fotones del mismo, pero estos no varían su energía que es constante. Por tanto, se produce un mayor número de impactos de fotones sobre la lámina de metal con lo que el número de choques de fotón/electrón del metal se incrementa en razón del aumento de la frecuencia de la luz emitida y, por consiguiente, aumenta el número de electrones desprendidos pero no se produce un incremento de la energía de dichos electrones, al permanecer constante la energía de los fotones se evita así la catástrofe del ultravioleta y el *efecto fotoeléctrico* queda explicado¹⁰³.

En contrapartida, era absolutamente necesario abandonar la idea de una energía continua e introducir la discontinuidad en la física, por cuanto la energía es emitida y absorbida de manera discontinua. Einstein iba más allá, en su artículo *"Un punto de vista heurístico..."* postulaba que la naturaleza de la luz no era sólo ondulatoria sino también corpuscular, por la existencia de partículas luminosas, los fotones, con ello se enfrentaba a la teoría dominante sobre la naturaleza de la luz, que postulaba su carácter ondulatorio y que durante más de medio siglo había proporcionado innumerables avances de la física. *"La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha mostrado soberbia para describir fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Deberíamos tener en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a promedios temporales antes que a valores instantáneos; y es perfectamente concebible, pese a la completa confirmación experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc, que la teoría de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, lleve a contradicciones cuando se aplique a los fenómenos de emisión y transformación de la luz"*¹⁰⁴. A cambio introducía una teoría absolutamente extraña para los

102 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 145-147, "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz", en *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, p. 176, y en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 68-69.

103 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 132-148, "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz", en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 45-71; y en *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, pp. 161-178.

104 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 132-133, "Sobre un

físicos de la época en la que defendía la dualidad ondulatorio-corpúscular de la luz. "La manera en que Einstein intentaba hacer compatibles, por el momento a un nivel básicamente programático, aspectos continuos y discretos (los asociados a los cuantos) se puede tomar también como una primera manifestación –o premonición– de la dualidad onda-corpúsculo."¹⁰⁵

La ruptura que proponía con la física clásica era de tan profundas consecuencias que su artículo no fue tomado en consideración hasta varios años después, y cuando esto ocurrió, en 1910, sólo lo fue en lo referente a su explicación del efecto fotoeléctrico y en su defensa de la discontinuidad en la reinterpretación no clásica de la teoría de Planck. Entre 1910 y 1913 Lorentz¹⁰⁶, J. J. Thomson¹⁰⁷, Owen Richardson¹⁰⁸ y Sommerfeld¹⁰⁹ "diseñaron teorías para explicar el efecto fotoeléctrico que suponían que la luz incidente sobre la placa metálica que da origen al efecto estaba constituida por ondas electromagnéticas y que el comportamiento de los electrones emitidos se podía comprender considerando la estructura de los átomos de los que eran expulsados"¹¹⁰. Todavía en 1917, Robert Millikan sostenía respecto de la teoría de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico: "El experimento ha superado a la teoría, o, mejor, ha sido guiado por una teoría errónea"¹¹¹. La propuesta de Einstein sobre la existencia de partículas luminosas no fue tomada en consideración, cuando no lisa y llanamente rechazada como hizo el propio Planck, hasta 1922 con el descubrimiento del efecto Compton y el desarrollo en los años siguientes de la mecánica cuántica.

Los artículos de Einstein y Ehrenfest señalaban que la ley de Planck

punto de vista heurística concerniente a la emisión y transformación de la luz", *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, pp. 161-162, y en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 46.

105 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 175.

106 LORENTZ, H. A.: "Die Hypothese der Lichtquanten", *Physikalische Zeitschrift*, 11, 1910, pp. 349-354. LORENTZ, H. A.: "Alte und neue Fragen der Physik", *Physikalische Zeitschrift*, 11, 1910, pp. 1.234-1.257.

107 THOMSON, J. J.: "On the theory of radiation", *Philosophical Magazine*, 20, 1910, pp 238-247. THOMSON, J. J.: "On the structure of the atom", *Philosophical Magazine*, 26, 1913, pp. 792-799.

108 RICHARDSON, O. W.: "The theory of photoelectric action", *Philosophical Magazine*, 24, 1912, pp. 570-574.

109 SOMMERFELD, A.: "Theorie des lichtelektrischen Effektes vom Standpunkt des Wirkungsquantums", *Annalen der Physik*, 41, 1913, pp. 873-930.

110 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 372. Sobre dichos intentos ver STEUWER, R.: "Non-Einsteinian interpretations of the photoelectric effects", *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, 5, 1970, pp. 246-263.

111 MILLIKAN, R.: *The Electron. Its Isolation and the Determination of Its Properties*, Chicago, University of Chicago Press, 1917, p. 230.

representaba una ruptura con la física clásica. Einstein fue quien con mayor claridad lo expuso en sus artículos de 1905, titulado "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz", y de 1906 "Sobre la teoría de emisión y absorción de luz", en los que afirmaba que la introducción de cantidades discretas en la emisión de la radiación conllevaba necesariamente la discontinuidad¹¹². Esta posición era a la altura de 1906 una postura aislada y prácticamente reducida a Einstein y Ehrenfest, a la sazón dos jóvenes físicos prácticamente desconocidos por aquel entonces y, por consiguiente, con escasa capacidad de incidir decisivamente en la opinión de sus colegas de profesión. "Al igual que Jeans (y a diferencia de Rayleigh), Einstein y Ehrenfest afirmaban que la ley de Rayleigh-Jeans constituía la única función de distribución que era compatible con la teoría clásica; pero a diferencia de Jeans, ambos pensaban que la ley de Planck tenía que representar, al menos aproximadamente, la distribución de equilibrio de la energía radiante y que no era posible derivar ninguna ley de esa especie sin romper de modo fundamental con la teoría clásica. Acerca de la naturaleza de esa ruptura no estaba tan seguro Ehrenfest, pero, no teniendo ninguna alternativa que ofrecer, cerró filas con Einstein a la hora de demostrar que la ley de Planck podía derivarse, con tal de restringir la energía de los resonadores, a múltiplos enteros de $h\nu$. Ambos asociaban, pues, la teoría de Planck con la discontinuidad, colocándose así en una posición aislada. El propio Planck no aceptaría la discontinuidad hasta unos dos años después [de 1906]"¹¹³.

La aceptación de la discontinuidad por parte de la comunidad de físicos.

Entre 1906 y 1908 sólo Max von Laue, joven ayudante de Planck en Berlín entre 1905 y 1909, se mostró firme partidario de las posiciones defendidas por Einstein en 1905-1906. A la altura de 1908, el panorama comenzó a cambiar a partir de la reconsideración del problema por parte de Lorentz, convertido en aquellos años en el gran patriarca de la Física. "Lorentz obtuvo en 1908 una nueva derivación, bastante convincente, de la ley de Rayleigh-Jeans; poco después se percató de que sus resultados exigían abrazar la teoría de Planck, incluida la discontinuidad o alguna otra desviación equivalente respecto de la tradición. Wien y Planck adoptaron rápidamente posiciones similares, el primero probablemente bajo la influencia de Lorentz y el segundo influido con total seguridad por él. Hacia 1910 había empezado a tambalearse incluso la posición

112 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 72-83.

113 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 221.

de Jeans en este tema¹¹⁴.

Lorentz se había venido ocupando del problema del cuerpo negro en una serie de artículos desde 1900¹¹⁵, en los que se inclinaba por explicar el problema del cuerpo negro mediante el recurso a la teoría de los electrones. *"Lorentz derivó una ley de distribución del cuerpo negro para longitudes de ondas largas [en 1903], partiendo de los primeros principios de la teoría de los electrones. Una ventaja de su enfoque, señalaba al comienzo [de su artículo de 1903], era que permitía tratar el problema del cuerpo negro "por medio del movimiento térmico de sus electrones libres [los de un metal], sin recurrir a la hipótesis de "vibradores" de ninguna especie, encargados de producir ondas de períodos definidos". El resultado que obtuvo para longitudes de onda largas era, naturalmente, lo que ahora conocemos como la ley de Rayleigh-Jeans¹¹⁶.*

Hasta 1905 Lorentz trató de derivar de la teoría de los electrones las características de la radiación del cuerpo negro, permaneciendo escéptico frente a la teoría de Planck. Sin embargo, en 1908 su postura cambió radicalmente, su conferencia *"La división de la energía entre materia ponderable y el éter"*, pronunciada en Roma en ese año, marcó el abandono de los intentos de dar una explicación clásica, las palabras con las que finalizó su intervención fueron claras. *"Si uno compara la teoría de Planck con la de Jeans, comprueba que ambas poseen sus méritos y sus defectos. La de Planck es la única que da una fórmula que concuerda con los resultados experimentales; pero sólo podemos adoptarla a cambio de alterar profundamente nuestras concepciones fundamentales de los fenómenos electromagnéticos... La teoría de Jeans, por otra parte, nos obliga a atribuir a la casualidad el acuerdo, hoy por hoy inexplicable, entre las observaciones y las leyes de Boltzmann y Wien. Por fortuna cabe esperar que nuevas determinaciones experimentales de la ley [de distribución] de la radiación nos permitan decidir entre ambas teorías."¹¹⁷*

114 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 222-223.

115 LORENTZ, H. A.: "The Theory of Radiation and the Second Law of Thermodynamics" *Proceedings Akademie van wetenschappen, Amsterdam*, 3, 1901, pp. 436-450, existe reimpresión al inglés en LORENTZ, H. A.: *Collected Papers*, vol. 6, La Haya, Martinus Nijhoff, 1938, pp. 265-279; LORENTZ, H. A.: "Boltzmann's and Wien's Laws of Radiation" *Proceedings, Akademie van wetenschappen, Amsterdam*, 3, 1901, pp. 607-620, existe reimpresión en inglés *op. cit.*, vol. 6, pp. 280-292; LORENTZ, H. A.: "On the Emission and Absorption by Metals of Rays of Heat of Great Wavelengths", *Proceedings, Akademie van wetenschappen, Amsterdam*, 5, 1903, pp. 666-685, reimpresión en inglés *op. cit.*, vol. 3, 1936, pp. 155-176; LORENTZ, H. A.: "La thermodynamique et les théories cinétiques", *Bulletin des Séances de la Société Française de Physique*, 1905, pp. 35-63; reimpresión en inglés *op. cit.*, vol. 7, 1934, pp. 290-316.

116 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 223.

117 LORENTZ, H. A.: "Le partage de l'énergie entre la matière pondérable et l'éther", *Atti del IV Congresso Internazionale dei Matematici*, Roma, 6-11 de Aprile 1908, 3 vols., Roma, 1909, vol. I,

Si bien la posición de Lorentz parece indefinida, las determinaciones experimentales en las que confiaba para inclinar la balanza a un lado u otro de las dos teorías ya existían en aquel momento, su veredicto era claro y no dejaba lugar a dudas, era la teoría de Planck la que se imponía sobre la de Jeans. De hecho Wien, Lummer y Pringsheim no dejaron de expresar esta opinión, que no tardó en ser aceptada por el propio Lorentz¹¹⁸. *"Ahora que se me han hecho claras las notables dificultades con que uno tropieza de esta manera [defendiendo la ley de Jeans], sólo puedo concluir que difícilmente se puede derivar la ley de radiación a partir de la teoría de los electrones sin hacer hondos cambios en sus fundamentos. Debo, por tanto, pensar que la teoría de Planck es la única sostenible. Tendremos que reconocer que el intercambio de energía entre materia y éter ocurre por medio de los resonadores supuestos por Planck o de partículas similares que de algún modo eluden la aplicación del teorema de Gibbs."*¹¹⁹

Lorentz se encontraba todavía a considerable distancia de las posiciones sostenidas por Einstein y Ehrenfest dos años antes. *"El gran impacto que ejerció la conferencia de Lorentz en Roma probablemente haya que atribuirlo a algo más que al rango que su autor se había ganado hasta entonces. Su demostración de la ley de Rayleigh-Jeans era, por méritos propios, la más completa, general y convincente de las que se habían dado hasta entonces. La de Jeans se basaba en una analogía acústica del campo electromagnético; ni siquiera refundida -...-..., preveía ningún mecanismo para la interacción entre los modos ni, por consiguiente, para la redistribución de energía. El argumento de Einstein se basaba en abstracciones a la sazón poco familiares,... El tratamiento de Ehrenfest compartía las desventajas del de Jeans y exigía además recurrir a la teoría de las complejiones. Ninguna de estas dificultades se hallaba presente en la demostración de Lorentz: el campo de radiación satisfacía las ecuaciones de Maxwell; la cavidad no contenía resonadores fijos sino átomos y electrones -...- en movimiento; salvo el empleo de la colectividad de Gibbs, sus técnicas analíticas eran corrientes aunque no elementales. El que, a pesar de todo, se obtuviera al final la ley de Rayleigh-Jeans constituía razón sobrada para impresionar al auditorio. En particular, era imposible seguir creyendo, como habían creído Planck y Ehrenfest, que el empleo de resonadores en movimiento o de colisiones moleculares podía proporcionar un mecanismo para la redistribución de frecuencias y, por tanto, abrir una ruta directa desde la teoría*

pp. 145-165; reimpresión en inglés LORENTZ, H. A.: *Collected Papers*, vol. 7, pp. 317-346.

118 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 224-227.

119 LORENTZ, H. A.: "Zur Strahlungstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 9, 1908, pp. 562-563, citado en Kuhn, p. 227.

*de los electrones a la ley de radiación de Planck.*¹²⁰

Lorentz se encontraba muy cerca en esas fechas, junio de 1908, de aceptar la discontinuidad¹²¹. *"En una conferencia pronunciada en Utrecht en abril de 1909... [Lorentz manifestó que según la teoría de Planck] el intercambio de energía entre materia y el éter está mediado por "ciertas partículas" que Planck llama resonadores. "A un tal resonador le atribuye la propiedad de que no puede recibir ni dar energía en cantidades infinitamente pequeñas, sino sólo en cantidades finitas y convenientes, proporcionales a su frecuencia". Tras adoptar esta postura, Lorentz se convirtió en uno de los líderes en el desarrollo y propagación de la teoría cuántica.*"¹²²

En 1908 Planck no había abandonado la esperanza de encontrar una solución satisfactoria de su teoría con la teoría de los electrones que respetara las ecuaciones de Maxwell, tal como expresaba en su correspondencia con Lorentz. *"Lorentz [en una carta a Planck de agosto de 1908] ampliaba su reciente reconocimiento de la "teoría de Planck como la única sostenible", preguntaba cómo un campo electromagnético podía dejar de excitar a unos resonadores expuestos a él y afirmaba estar convencido de que las dificultades debían residir en las propiedades del éter. Planck rechazó vehementemente tal localización del problema, señalando que conduciría necesariamente "a la abrogación de las ecuaciones del campo de Maxwell... sigo sin ver" proseguía, "ninguna razón de fuerza para abandonar el supuesto de la absoluta continuidad del éter libre y de todos los sucesos en él. El elemento de acción h es, por tanto, una característica de los resonadores". No cabe duda que esta actitud había condicionado también su reacción a los análisis de Einstein y Ehrenfest de su teoría*"¹²³.

Aunque en dicha carta reconocía que la energía de los resonadores debía ser un múltiplo entero de h aún tardó en aceptar que tal hecho conducía necesariamente a la introducción de la discontinuidad en la física. Su apego a la visión clásica de la teoría electromagnética, con su defensa de la teoría del éter, condicionaba su visión, a pesar de que desde 1905 conocía la teoría especial de la relatividad de Einstein. En 1909, Einstein publicó un nuevo artículo, *"Estado actual del problema de la radiación"*, en el que insistía en los resultados alcanzados en su trabajo de 1906. *"Por mucho que le complazca a cualquier físico el que Planck ignorara de modo tan afortunado esa necesidad [de justificar la elección de elementos equiprobables a través de una consideración estadística*

120 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 229.

121 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 227-228.

122 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 228.

123 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 231.

en la representación teórica de resonadores y campo], *estaría fuera de lugar olvidar que la radiación de Planck es incompatible con los fundamentos teóricos que proporcionan su punto de partida. Es fácil ver de qué manera hay que modificar los fundamentos de la teoría de Planck para que su ley de radiación devenga realmente una consecuencia de aquellos fundamentos teóricos... Una estructura que puede vibrar con la frecuencia ν y que, por poseer una carga eléctrica, puede convertir energía de radiación en energía de materia y viceversa, no puede ocupar estados de vibración de cualquier energía arbitraria, sino sólo aquellos cuyas energías son múltiplos enteros de $h\nu$* ¹²⁴. Einstein basándose en su artículo sobre el movimiento browniano de 1905¹²⁵, y utilizando la termodinámica, los trabajos de Boltzmann y la ley de radiación de Planck, insistió en que *"ni ondas ni partículas (cuantos de energía), ni electrodinámica ni física estadística à la Planck, podían, por separado, cubrir todo el espectro de frecuencias y energías de la radiación"*¹²⁶.

Einstein insistió, ese mismo año, en una conferencia pronunciada en Salzburgo, *"Sobre el desarrollo de nuestras ideas relativas a la naturaleza y composición de la radiación"*, en la necesidad de proceder a una profunda revisión de la teoría clásica de la radiación y, consecuentemente, a abandonar la interpretación clásica de la teoría de Planck, por cuanto ésta no podía considerarse desde el planteamiento estadístico de la teoría de los gases realizado por Boltzmann, al incorporar el *cuanto*: *"Adoptar la teoría de Planck es, en mi opinión, rechazar los fundamentos de nuestra teoría de la radiación."* Einstein volvía así sobre los problemas que le habían llevado a cuestionar en 1905 la forma en la que Planck había introducido el cuanto de acción en su teoría de la radiación de 1900, ahora insistía en la *dualidad onda-corpúsculo* de una forma más acabada a partir de la fórmula de radiación que presentaba *"no es probable que exista otra fórmula de radiación que esté de acuerdo con la experiencia, dentro del rango experimental de error, que presente para las propiedades estadísticas de la presión de*

124 EINSTEIN, A.: "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungs-problems", *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10, 1909, pp. 185-193, citado en Kuhn, p. 218.

125 EINSTEIN, A.: "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen", *Annalen der Physik* 17, 1905, p. 549, existe traducción al español en "Sobre el movimiento exigido por la teoría molecular del calor de partículas en suspensión en fluidos sin movimiento", en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 72-87, y "Sobre el movimiento de partículas pequeñas suspendidas en líquidos en reposo exigido por la teoría cinético-molecular del calor", *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, pp. 81-93. En 1906 Einstein se volvió a ocupar del movimiento browniano en EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Brownschen Bewegung", *Annalen der Physik* 19, 1906, p. 371, existe traducción al español en "Acerca de la teoría del movimiento browniano", *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 174-188.

126 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 179.

radiación una forma tan sencilla como la de Planck. En lo que se refiere a su interpretación, lo primero que se advierte es que la expresión del valor medio de la fluctuación es una suma de dos términos. Parece, en consecuencia, que existen dos factores diferentes, independientes, que dan lugar a la fluctuación de la presión por radiación... La teoría ondulatoria proporciona una explicación solamente para el segundo término de la expresión obtenida... Pero ¿cómo explicar el primer término de la fórmula? Este término no se puede, en modo alguno, desprestigiar... Si la radiación consistiese en complejos de energía $h\nu$ de tamaño muy pequeño... entonces los momentos que actúan... debidos a las fluctuaciones de la presión de radiación serían del tipo representado únicamente por el primer término." Por si quedaba alguna duda entre el auditorio concluía: "Todo lo que quiero es indicar... que las dos propiedades estructurales (la estructura ondulatoria y la estructura cuántica) desplegadas simultáneamente por la radiación de acuerdo con la fórmula de Planck no deberían ser consideradas como mutuamente incompatibles."¹²⁷

En 1909 Einstein ya no era ese joven desconocido que en 1905 publicó varios artículos que revolucionaron la física del siglo XX¹²⁸, ya era catedrático en la universidad de Praga y su opinión no pasaba completamente desapercibida entre los físicos alemanes. En la conferencia de Salzburgo no sólo abogó por el abandono de los fundamentos de la teoría clásica de la radiación, cuando se refirió a la necesidad de introducir la discontinuidad en la física llamó la atención de que la introducción de la discontinuidad excedía el marco de la interacción entre materia y radiación. "Nadie, ni siquiera el propio Einstein, veía la manera de reconciliar las propiedades corpusculares con el vastísimo ámbito de efectos de interferencia cuya explicación había marcado el avance constante de la teoría ondulatoria de la luz durante cien años... Los conceptos de las partículas de luz [introducidas por Einstein en su explicación del efecto fotoeléctrico en 1905] y de los resonadores limitados a energías $h\nu$ habían entrado juntos en la física en los artículos de 1905 y 1906 de Einstein, y para él siguieron siendo parte de una sola teoría, bien que enteramente inacabada. Lo primero repugnaba incluso a

127 EINSTEIN, A.: "Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10, 1909, pp. 817-825, reproducción de la conferencia pronunciada en Salzburgo con motivo de la *Gesellschaft Deutscher Naturforscher*, publicada también en *Deutsche physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, Jahrg. II, 1909, pp. 482-500, p. 498 y p. 500, citado en SÁNCHEZ RON, pp. 179-181.

128 Max Born recordaba: "Después [1907-1908] quise desarrollar mi destreza experimental... Estudiábamos la literatura más reciente sobre física... Reiche y Loira me hablaron del trabajo de Einstein... y al punto quedé hondamente impresionado... Pero nadie sabía nada de su persona ni de su vida, salvo que era empleado de la Oficina de Patentes de Berna... Paso todavía cierto tiempo antes de que lo conociera yo personalmente, cosa que sucedió en 1909, en la *Asamblea de hombres de ciencia* de Salzburgo..." Max Born en *A. Einstein – M. y H. Born. Correspondencia (1916-1955)*, México, Siglo XXI, 1973, pp. 11-12.

*aquellos teóricos que estaban convencidos de la necesidad de los segundos; por eso, una de las tareas capitales para quienes se dedicaron a elaborar o aplicar los cuantos fue, hacia 1909, el desenredar ambos aspectos o encontrarles un sustituto.*¹²⁹

En dicha conferencia de Salzburgo, Planck se manifestó contrario a las tesis de Einstein respecto de la existencia de partículas de luz, mostrando su apego a la teoría de los electrones, aunque no pudo obviar las graves dificultades que esta última entrañaba. *"Quizá quepa suponer que un resonador oscilante no tiene una energía continuamente variable, sino que aquélla es un múltiplo sencillo de un cuanto elemental. Creo que la introducción de este supuesto puede conducir a una teoría satisfactoria de la radiación. Pero queda la cuestión: ¿cómo hacer tal cosa? Es decir, necesitamos un modelo mecánico o electrodinámico de ese resonador, pero ni la mecánica ni la electrodinámica contemporáneas poseen ningún cuanto de acción y, por tanto, no podemos construir un modelo mecánico ni electrodinámico. Mecánicamente, la tarea parece imposible, y habrá de irse acostumbrando a ello."*¹³⁰

En un artículo publicado tres meses después de la Asamblea de Salzburgo, Planck se vio obligado a reconocer más explícitamente la necesidad de proceder a una profunda modificación de la teoría de la radiación hasta entonces vigente, aunque sin llegar a aceptar aún los planteamientos expuestos por Einstein¹³¹, al aceptar que la emisión y absorción de la radiación se realizaba de forma discontinua y no continua, como propugnaba la teoría clásica de la radiación. *"Antes de 1909 [Planck] había hablado repetidas veces del cuanto de electricidad (la carga e), del cuanto de materia (el átomo) y, desde 1906, del cuanto de acción (la constante h). Pero la expresión $h\nu$ la llamaba normalmente "elemento" y no "cuanto" de energía... Tampoco aquí es difícil encontrar una explicación verosímil de esta distinción terminológica. Como indican los ejemplos anteriores, un cuanto es una cantidad fija que puede existir aislada y por su cuenta; es decir, no puede ser sencillamente una parte imaginada de una entidad concebible solamente como un todo... Mientras $h\nu$ fue simplemente el tamaño de una subdivisión del continuo de energía, no era un cuanto."*¹³²

En su obra *Acht Vorlesungen über theoretische Physik*, publicada en 1910,

129 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, pp. 219-220.

130 "Diskussion", *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10, 1909, (pp. 825-826), p. 825, es una reproducción del debate que siguió a la conferencia de Einstein, publicada a continuación de su texto "Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung", pp. 817-825, citado en Kuhn, p. 233.

131 PLANCK, M.: "Zur Theorie der Wärmestrahlung", *Annalen der Physik*, 31, 1910, pp. 758-768.

132 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 235.

resultado de sus conferencias en la Universidad de Columbia, Nueva York, entre abril y mayo de 1909, y editadas en inglés en 1915, con el título *Eight Lectures on Theoretical Physics*, Planck todavía sostenía que "todas las teorías del electrón desarrolladas hasta ahora sufren de una incompletad esencial que exige una modificación, pero cuán profunda debería ser la modificación en la estructura de la teoría es algo sobre lo que todavía existen puntos de vista muy diferentes... J. J. Thomson se inclina hacia el punto de vista más radical, al igual que J. Larmor, A. Einstein y con él J. Stark, que incluso cree que la propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío no tiene lugar de acuerdo con las ecuaciones del campo de Maxwell, sino en cuantos de energía definidos, h.v. Por el contrario, yo soy de la opinión de que en la actualidad no es necesario proceder de semejante forma revolucionaria, y que se puede salir adelante con éxito buscando el significado del cuanto de energía h.v, únicamente en las acciones mutuas con las que los osciladores se influyen entre sí."¹³³

En 1910, pues, Planck "creía que esa aparente (para él) cuantización no era real, sino producto de un proceso clásico."¹³⁴ En una carta dirigida el 7 de enero de 1910 a Lorentz reconocía la necesidad de contar con la discontinuidad, pero trataba de minimizar su alcance, "he localizado la discontinuidad allí donde menos daño puede hacer, en la excitación de los osciladores. Su degradación puede ocurrir luego continuamente, con amortiguamiento constante"¹³⁵. Las resistencias de Max Planck a aceptar la discontinuidad, a pesar de haber sido el introductor del *cuanto de acción*, hablan de las dificultades que tal *salto* representaba para la concepción de la Naturaleza derivada de la física moderna. Tuvieron que ser dos jóvenes físicos, Einstein y Ehrenfest, en aquellos años prácticamente desconocidos, quienes tuvieron el valor de efectuar dicha ruptura. En el caso de Einstein sus posiciones fueron mucho más allá de un mero reconocimiento de la introducción de la discontinuidad por la teoría de Planck. Su defensa de la existencia de partículas de luz, fotones, constituía para muchos físicos, en aquellos años, una auténtica herejía, cuya veracidad no pudo ser comprobada hasta el descubrimiento del efecto Compton varios lustros después, en 1922.

El reconocimiento de que la energía es emitida y absorbida de manera discontinua tardó, pues, cerca de diez años en ser admitido por los físicos, a pesar de que dicho resultado se encontraba contenido en la formulación de la teoría de la radiación de Planck de 1900. Sólo ante la evidencia abrumadora de

133 PLANCK, M.: *Acht Vorlesungen über theoretische Physik*, Leipzig, Hitzel, 1910, *Eight Lectures on Theoretical Physics*, New York, Columbia University Press, 1915, reimpresión en New York, Dover, 1998, pp. 95-96, citado en SÁNCHEZ RON, p. 140.

134 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 141.

135 Citada en SÁNCHEZ RON, p. 141.

los fenómenos de la radiación logró imponerse progresivamente la discontinuidad en la física. *"La mayoría de aquellos que introdujeron la constante h de Planck en otros campos no se percataron, al principio, del alcance de la ruptura involucrada. Hasta después de 1910, casi nadie que no hubiese bregado denodadamente con el problema del cuerpo negro estaba convencido de la necesidad de una nueva física discontinua."*¹³⁶

En 1910 dos nuevos físicos se incorporaron a la corta nómina de los partidarios de la discontinuidad, Wilhelm Wien y James Jeans. La postura de Wien tuvo, como la de Lorentz y Planck, una profunda influencia en la comunidad de físicos, dado su papel protagonista en el estudio de los fenómenos de radiación; otro tanto ocurrió con Jeans, al haber sido el autor de la teoría adversaria de Planck, su aceptación de la discontinuidad era la constatación de que no era posible seguir negando las consecuencias de la teoría de Planck. En 1910 Peter Debye publicó un artículo en los *Annalen der Physik*, en el que demostró que no era preciso recurrir a la existencia de osciladores para derivar la ley de Planck¹³⁷. Pocos meses después, Ehrenfest publicaba un nuevo artículo *"¿Qué rasgos de la hipótesis del cuanto de luz juegan un papel esencial en la teoría de la radiación térmica?"*¹³⁸, en el que demostraba que no era posible derivar ninguna ley de radiación que se encontrara de acuerdo con la de Planck sin recurrir necesariamente a la discontinuidad, resultados a los que de manera independiente también llegó Henri Poincaré tras su asistencia a la primera Conferencia Solvay, *"Ehrenfest concluía... que para evitar la "catástrofe ultravioleta de Rayleigh-Jeans" (fue él, quien introdujo esta expresión...) era necesario que cada modo de frecuencia ν sólo pudiese ser puesto en vibración si se le suministraba una cantidad finita de energía proporcional a su frecuencia. E iba un paso más allá: si la ley de distribución de Planck era correcta, entonces un elemento básico en su andamiaje, la denominada función de peso $G(q)$, era discreto, un resultado éste... que implicaba la suficiencia de la condición de cuantización para la ley de radiación de Planck"*¹³⁹.

Mención especial hay que hacer del papel desempeñado por Henri Poincaré en la extensión de la teoría cuántica, Poincaré era en aquellos años la máxima figura de la física francesa, con un enorme prestigio internacional, hasta después de la primera Conferencia Solvay, celebrada en 1911, no se mostró receptivo hacia los postulados defendidos por Einstein y Ehrenfest, posteriormente asumidos por

136 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 236.

137 DEBYE, P.: "Der Wahrscheinlichkeitsbegriff in der Theorie der Strahlung", *Annalen der Physik*, 33, 1910, pp. 1.427-1.434.

138 EHRENFEST, P.: "Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?" *Annalen der Physik*, 36, 1911, pp. 91-118.

139 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 214.

Lorentz, Planck, Wien y Jeans, "mientras que Ehrenfest podía ser ignorado y Einstein no aceptado, la autoridad de Poincaré difícilmente podía ser cuestionada. Sus argumentos fueron aceptados como la prueba de que la discontinuidad de la energía era absolutamente necesaria para la existencia de una energía finita en la radiación de cuerpo negro"¹⁴⁰. La publicación de su artículo "Sur la théorie des quanta" en 1911¹⁴¹, significó su posicionamiento favorable respecto de la nueva teoría y su interpretación discontinua, en su versión completa señalaba "los fenómenos físicos dejarían de obedecer a leyes que se expresan por ecuaciones diferenciales, y esto constituiría, sin ninguna duda, la mayor y más profunda revolución que la filosofía natural ha experimentado desde Newton... Por consiguiente, cualquiera que sea la ley de radiación, si se supone que la radiación total es finita, nos vemos conducidos a una función w que presenta discontinuidades análogas a las que da la hipótesis de los cuantos"¹⁴². Poincaré era plenamente consciente del alcance de la revolución cuántica. "sus conocimientos del mundo cuántico eran mínimos [cuando asistió a la primera conferencia Solvay en octubre-noviembre de 1911 sobre la teoría de la radiación y la teoría cuántica]... Es evidente de que Poincaré trabajaba y pensaba con rapidez. Claro que también hay que darse cuenta de lo que estaba en juego: la validez de la descripción teórica del mundo físico en la que él mismo se había movido y a la que había contribuido de forma destacada"¹⁴³.

La situación comenzaba a cambiar, la teoría cuántica empezaba a ocupar la atención de los físicos, más allá de sus primeros creadores e introductores. "Exceptuando a Einstein, y en menor grado a Wien, los físicos que trabajaban en la teoría de la radiación rechazaban o ignoraban la dispersa bibliografía cuántica... En 1911 cambió rápidamente la situación. Los artículos que aplicaban los cuantos a otros temas superaron por primera vez en número a los que versaban sobre la radiación del cuerpo negro, y algunos de ellos venían

140 KLEIN, M.: *Paul Ehrenfest. I: The Making of a Theoretical Physicist*, Amsterdam, North-Holland, 1970, p. 253.

141 POINCARÉ, H.: "Sur la théorie des quanta", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 153, 1911, pp. 1103-1108; reimpresso en *Oeuvres de Henri Poincaré*, vol. IX, Paris, Gauthier-Villars, 1954, pp. 620-625; en 1912 desarrolló más extensamente en un nuevo artículo los argumentos en favor de la teoría cuántica, POINCARÉ, H.: "Sur la théorie des quanta", *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 2, 1912, pp. 5-34; reimpresso en *Oeuvres*, vol. IX, pp. 626-653. Russell McCormach se ha ocupado de la posición de Poincaré sobre la teoría cuántica en McCORMMACH, R.: "Henri Poincaré and the Quantum Theory", *Isis*, 58, 1967, pp. 37-55.

142 POINCARÉ, H.: "Sur la théorie des quanta", *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 2, 1912, pp. 5-34; reimpresso en *Oeuvres de Henri Poincaré*, vol. IX, Paris, Gauthier-Villars, 1954, p. 626 y p. 649.

143 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 206 y p. 210.

*respaldados por un conjunto imponente de datos experimentales.*¹⁴⁴

La generalización de la discontinuidad en la física: el problema de los calores específicos.

A partir de 1911 un nuevo tema apareció con fuerza en el desarrollo de la teoría cuántica, el problema de los calores específicos de los sólidos¹⁴⁵, su aparición se debió al artículo de Einstein "Teoría de radiación de Planck y teoría de los calores específicos" de 1907¹⁴⁶, donde señalaba "Si las estructuras elementales que hay que suponer en la teoría del intercambio de energía entre materia y radiación no se pueden concebir en términos de la actual teoría cinético-molecular, entonces ¿no estamos obligados a modificar también la teoría para otras estructuras que oscilan periódicamente, consideradas en la teoría molecular del calor? En mi opinión no hay duda en la respuesta. Si la teoría de la radiación de Planck va al corazón del asunto, entonces se deben esperar contradicciones entre la teoría cinético-molecular actual y la experiencia también en otras áreas de la teoría del calor"¹⁴⁷

En dicho artículo Einstein establecía una fórmula para el calor específico de los sólidos, a temperaturas muy bajas la capacidad calorífica de todos los sólidos debería tender a cero conforme nos acercamos a la temperatura absoluta, en clara contradicción con los resultados previstos por la teoría cinética clásica. "La sorprendente formulación de Einstein no se mencionara para nada en la bibliografía de ambos campos [de la física y de la química de los calores específicos] durante los cuatro años siguientes a su publicación en los *Annalen der Physik*. La causa de esta negligencia inicial reside seguramente en dos factores. Aunque la teoría de los calores específicos de Einstein parece hoy día una extensión directa del trabajo de Planck, los teóricos del cuerpo negro no lo veían así en aquel entonces. Si Einstein tenía razón, la discontinuidad cuántica no cabía ya asociarla simplemente con la interacción entre radiación y materia, ni cabía tampoco esperar que la discontinuidad quedara desarmada al englobarla dentro de una teoría de los electrones mejorada. Es cierto que Einstein había

144 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 241.

145 El calor específico es la cantidad de calor que hay que transmitir a un mol de una sustancia para que aumente su temperatura un grado centígrado.

146 EINSTEIN, A.: "Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 22, 1907, pp. 180-190, y EINSTEIN, A.: "Berichtigung zu meiner Arbeit: "Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme", *Annalen der Physik*, vol. 22, 1907, p. 800.

147 EINSTEIN, A.: "Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 22, 1907, pp. 183-184, citado en SÁNCHEZ-RON, P. 185.

*tenido que remitirse a los fenómenos radiactivos para justificar la cuantificación de la energía de los iones, pero de ahí en adelante su teoría de los calores específicos era una teoría mecánico-estadística, independiente de consideraciones electromagnéticas. El equilibrio exigía, señaló en seguida Einstein, cuantificar la energía no sólo de los iones, sino también de los átomos neutros. La aplicación de la mecánica clásica a cualquier proceso atómico estaba, por tanto, en entredicho, y con ella la totalidad de la teoría cinética.*¹⁴⁸

No debemos olvidar que todavía a la altura de 1907 la discontinuidad no había sido aceptada ni siquiera dentro de la teoría de la radiación, por lo que resultaba aún más difícil su aceptación dentro de un campo mucho más amplio de la Física; que, además, exigía replantear bajo nuevos fundamentos la teoría cinética; sobre todo, si tenemos en cuenta que en esas fechas los resultados previstos por Einstein para temperaturas muy bajas no habían sido observados; por el contrario, los resultados experimentales disponibles en la época parecían confirmar las previsiones de la teoría cinética y con ella de la ley de Dulong-Petit. La situación cambió radicalmente a partir de 1911 por los avances registrados en termodinámica química, que pusieron en cuestión la ley de Dulong-Petit y reactualizaron los resultados previstos en el artículo de Einstein¹⁴⁹. *"Fue su nuevo teorema [de Nernst] del calor y la consiguiente investigación sobre el calor específico lo que en origen atrajo la atención de Nernst hacia el trabajo de Einstein; y fue Nernst quien condujo allí a otros físicos y químicos. La primera vez que citó el artículo de Einstein sobre los calores específicos fue en 1909, en un debate sobre su teorema del calor. En febrero del año siguiente, en el segundo artículo de una serie que informaba sobre nuevos experimentos relativos a calores específicos, Nernst señaló, en el resumen final, que "uno tiene la impresión de que [los calores específicos] convergen a cero, de acuerdo con lo que exige la teoría de Einstein".*¹⁵⁰

El papel de Walther Nernst en el reconocimiento de los problemas suscitados por Einstein en 1907 fue fundamental. En aquellos años, 1909-1911, Nernst era toda una autoridad en el campo de la química y de la física, mientras que Einstein era todavía un desconocido. Su posición favorable a la postura del joven físico condujo de manera inmediata a numerosos físicos y químicos a trabajar sobre los calores específicos de los sólidos desde los postulados de la teoría cuántica, situando dicho programa en foco de atención de la incipiente teoría cuántica¹⁵¹.

148 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 247.

149 KLEIN, M. J.: "Einstein, Specific Heats, and the Early Quantum Theory", *Science*, 148, 1965, pp. 173-180.

150 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 250.

151 NERNST, W.: "Über neuere Probleme der Wärmetheorie", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzunberichte*, Berlín, 1911/I, pp. 65-90.

El problema de los calores específicos indicó que la teoría cuántica no se circunscribía exclusivamente al campo de la teoría de la radiación, sino que implicaba la necesidad de formular una nueva mecánica que fuese aplicable en los niveles atómicos y moleculares que sustituyera a la mecánica hasta entonces vigente. Una mecánica que debía de fundamentarse en el reconocimiento de las "condiciones cuánticas", de manera que los fenómenos atómicos y moleculares encontrasen una explicación satisfactoria. *"Entre 1911 y el comienzo de la labor sistemática sobre la teoría cuántica de los espectros (hacia 1916), el problema del calor específico desempeñó un papel principal en la difusión y desarrollo de la teoría cuántica. Precisamente porque los calores específicos y, en un nivel más general, la teoría cinética de la materia diferían del problema del cuerpo negro en que eran disciplinas clásicas de la física y la química física, su conversión al campo cuántico amplió notablemente el círculo de gente interesada en el cuanto... Las pruebas fundamentales elaboradas por Einstein, Lorentz, Ehrenfest y Poincaré para el problema del cuerpo negro valían igual para el de los calores específicos: ninguna distribución planckiana era reconciliable con una física continua. El argumento de que la discontinuidad era necesaria podía trasladarse directamente del tema original, los cuantos, a este otro."*¹⁵²

Las mediciones de Nernst mostraron desviaciones respecto de los cálculos previstos por la fórmula de Einstein, pero señalaban la veracidad de su propuesta, con Frederick Lindemann¹⁵³ modificó la "fórmula de Einstein, pero de manera empírica, sin base teórica alguna"¹⁵⁴. Peter Debye se ocupó de la cuestión en 1912 en el artículo "Sobre la teoría de los calores específicos"¹⁵⁵, paralelamente Max Born y Theodor von Kármán se ocuparon del asunto en un artículo en el que mejoraban las formulaciones de Einstein y Debye¹⁵⁶, su propuesta era "mucho más realista que la de Einstein, naturalmente, pero también que la de Debye"¹⁵⁷.

Nernst en 1910 era consciente del significado revolucionario de la propuesta de Einstein, como lo demuestra la carta que escribió a Ernest Solvay, industrial

152 KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, p. 252.

153 NERNST, W. y LNDEMANN, F. A.: "Spezifische Wärme und Quantentheorie", *Zietschrift für Elektrochemie*, 17, 1911, pp. 817-827.

154 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 187.

155 DEBYE, P. J. W.: "Zur Theorie der spezifischen Wärmen", *Annalen der Physik*, 39, 1912, pp. 789-839, reproducido en inglés en *The Collected Papers of Peter J. W. Debye*, Woodbridge, Connecticut, Ox Bow Press, 1988, pp. 650-696.

156 BORN, M. y KÁRMÁN, Th. von: "Über Schwingungen von Raumgittern", *Physikalische Zeitschrift*, 13, 1912, pp. 297-309.

157 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...* p. 191.

belga que desempeñó un papel de mecenazgo de la investigación física durante el primer tercio del siglo, en la que concretaba lo que sería la primera reunión de los Consejos Solvay¹⁵⁸. *"Parece ser que actualmente nos encontramos en medio de una revolucionaria reformulación de los fundamentos de la teoría cinética de la materia que aceptábamos hasta ahora. Por una parte, su coherente elaboración conduce a una fórmula de radiación que está en conflicto con toda la experiencia, situación que nadie discute; por otra, las consecuencias de esa misma teoría incluyen teoremas sobre los calores específicos (constancia del calor específico de los gases al cambiar la temperatura, validez de la regla de Dulong-Petit a las temperaturas más bajas) a los que contradicen completamente muchas mediciones. Estas contradicciones, como han demostrado sobre todo Planck y Einstein, desaparecen si uno restringe el movimiento de los electrones y átomos en torno a sus posiciones de reposo (doctrina de los cuantos de energía); pero esta concepción es tan ajena a las ecuaciones del movimiento hasta ahora utilizadas, que el aceptarla supone sin duda reformar a fondo nuestra intuición fundamental."*¹⁵⁹

El primer Consejo Solvay tuvo lugar en Bruselas, entre el 30 de octubre y el 3 de noviembre de 1911, bajo el título *Teoría de la radiación y los cuanta*, a la que acudieron buena parte de los físicos más destacados del momento, como Lorentz, Poincaré, Planck, Rutherford, Marie Curie, Nernst, Einstein y Sommerfeld entre otros. En el discurso inaugural, su presidente Hendrik A. Lorentz situó el estado de la cuestión: *"Las investigaciones modernas han hecho que aparezcan, cada vez más, las graves dificultades que se encuentran cuando se busca representar los movimientos de las partículas más pequeñas de los cuerpos ponderables y la unión entre estas partículas y los fenómenos que se producen en el éter. En el momento presente nos encontramos lejos de la plena satisfacción de espíritu que la teoría cinética de los gases –ampliada poco a poco a los fluidos, a las soluciones diluidas y a los sistemas de electrones– podía dar a los físicos hace una veintena o una decena de años. En lugar de esto, tenemos la sensación de encontrarnos en un impasse: las antiguas teorías se han mostrado cada vez más impotentes para penetrar las tinieblas que nos rodean por todas partes. Ante este semejante estado de cosas, la bella hipótesis de los elementos de energía, propuesta por primera vez por M. Planck y aplicada a numerosos fenómenos por M. Einstein, M. Nernst y otros, ha sido un precioso rayo de luz. Nos ha abierto perspectivas inesperadas e incluso aquellos que la*

158 BROGLIE, M. de: *Les premiers Congrès de physique Solvay et l'orientation de la physique depuis 1911*, Paris, Albin Michel, 1951. MEHRA, J.: *The Solvay Conferences of Physics. Aspects of the Development of Physics since 1911*, Dordrecht, Reidel, 1975. MARAGE, P. y WALLENBORN, G. (eds.): *Les Conseils Solvay et les débuts de la physique moderne*, Bruxelles, Université Libre de Bruxelles, 1995.

159 Carta de Nernst a Solvay, 26 de julio de 1910, citado en KUHN, *op. cit.*, p. 251.

*miran con una cierta desconfianza deben reconocer su importancia y fecundidad. Bien merece, por consiguiente, ser el tema principal de nuestras discusiones*¹⁶⁰

En el transcurso de la Conferencia el *"trabajo de Planck fue recibido con gran interés en la Conferencia Solvay de, muchos de los participantes, sobre todo, Einstein, Hasenöorl, Poincaré, Lorentz y Jeans participaron en el debate posterior. Henri Poincaré, por ejemplo, quería saber si existían algunas condiciones que determinasen la forma de la zona finita en el espacio de fases; esta forma, señaló, podría desempeñar un papel fundamental si se trataba de ampliar el concepto cuántico a los sistemas con varios grados de libertad. El comentario más crítico fue hecho por Albert Einstein, quien declaró abiertamente que Planck no había introducido la probabilidad estadística de manera adecuada. Einstein volvió sobre esta cuestión en su trabajo, donde subrayó una vez más el resultado al que había llegado con anterioridad: a saber, que una aplicación coherente de las ecuaciones de la mecánica estadística a la distribución de energía en la radiación de cuerpo negro le condujo a la conclusión de que la radiación no sólo poseía las propiedades descritas por la teoría electrodinámica, sino también las propiedades de los cuantos de luz (Einstein, 1909a). La misma conclusión, según lo que el demostró, a las vibraciones térmicas en los sólidos al aplicar y tener en cuenta la formulación cuántica"*¹⁶¹.

Las repercusiones se hicieron notar en la comunidad de físicos, la teoría cuántica comenzó a ser objeto de una mayor atención e interés. *"En los años posteriores a la Conferencia Solvay el desarrollo de la física cuántica vivió un período de consolidación. Los científicos siguieron trabajando con los conceptos que se establecieron en la década anterior, pero además ampliaron la aplicación de estos conceptos y trataron de profundizar en las bases de la teoría cuántica"*¹⁶².

Einstein se refirió a la situación de la teoría cuántica a finales de 1911. *"Estamos todos de acuerdo en que la teoría de los cuantos, en su forma actual, puede emplearse con utilidad, pero que no constituye verdaderamente una teoría en el sentido ordinario de la palabra, en todo caso no una teoría que pueda ser, por el*

160 LANGEVIN, P. y BROGLIE, M. de (eds.): *La théorie du rayonnement et les quanta. Rapports et discussions de la réunion tenue à Bruxelles, du 30 octobre au 3 novembre 1911*, Paris, Gauthier-Villars, 1912.

161 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 130-131.

162 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 136-137.

*momento, desarrollada de manera coherente.*¹⁶³. En cualquier caso, la teoría cuántica había dejado de ser un asunto exclusivo de la teoría de la radiación, su aplicación a los calores específicos amplió su radio de acción y llamó la atención de las nuevas generaciones de físicos, en ese momento, 1912, hizo su irrupción Niels Bohr con su propuesta de aplicar la teoría cuántica al átomo de Rutherford.

El modelo atómico de Rutherford.

Rutherford no se sentía muy feliz con el modelo atómico de Thomson después de su investigación sobre la radiación alfa, así que decidió bombardear el interior del átomo mediante un haz de partículas alfa, de su interacción con las partes cargadas del átomo dichas partículas deberían desviarse de su trayectoria originaria, permitiendo su dispersión conocer la distribución de la carga eléctrica en el interior del átomo.

Los trabajos sobre dispersión de partículas que Rutherford impulsó desde 1908, llevaron a Hans Geiger y Ernest Marsden llevaron a identificar el núcleo del átomo¹⁶⁴, aunque en dicho artículo no se hacía mención a ello, Rutherford se encontraba en disposición de elaborar una nueva teoría sobre la estructura del átomo. Hasta entonces su mayor ocupación había residido en identificar la naturaleza de la radiación alfa, conseguido dicho objetivo sólo restaba extraer las conclusiones pertinentes de los resultados alcanzados, algo que por lo demás había pasado desapercibido al resto de los físicos, exceptuando el núcleo de jóvenes investigadores que trabajaban con Rutherford en el laboratorio de Manchester: Ernest Marsden, Hans Geiger y Henry Moseley (que murió en la I Guerra Mundial en Gallípoli), a los que se uniría poco después Niels Bohr¹⁶⁵. Los resultados no defraudaron a Rutherford, cuando observaron un importante número de partículas alfa que eran desviadas de su trayectoria, aunque la mayoría permanecían en la dirección original del movimiento del haz de

163 LANGEVIN, P. y BROGLIE, M. de (eds.): *La théorie du rayonnement et les quanta. Rapports et discussions de la réunion tenue à Bruxelles, du 30 octobre au 3 novembre 1911*, Paris, Gauthier-Villars, 1912, p. 436.

164 GEIGER, H. y MARSDEN, E.: "On a diffuse reflection of the α -particles", *Proceedings of the Royal Society*, A82, 1909, pp. 495-500, reproducido en BIRKS, J. B. (ed.): *Rutherford at Manchester*, New York, W. A. Benjamin, 1963, pp. 175-181.

165 TRENN, Th. J.: "The Geiger-Marsden Results and Rutherford's Atom, July 1912 1913. The Shifting Significance of Scientific Evidence", *Isis*, 65, 1974, pp. 74-82; HEIMANN, P. M.: "Moseley's Interpretation of X-Ray Spectra", *Centaurus*, 12, 1968, pp. 261-274; HEILBRON, J. L.: "The work of H. G. J. Moseley", *Isis*, 57, 1966, pp. 336-364, reimpresso en HEILBRON, J. L.: *Historical Studies in the Theory of Atomic Structure*, New York, Arno Press, 1981, pp. 230-258. BUNGE, M y SHEA, W. R. (ed.): *Rutherford and Physics at the Turn of the Century*, New York, Dawson and Science History Publications, 1979, ver sobre todo los artículos de L. Badash, J.L. Heilbron y N. Feather.

partículas, e incluso algunas salían en dirección opuesta al sentido de su movimiento. Finalmente, Rutherford presentó en 1911 en su artículo "*Difusión de partículas α y β por la materia y la estructura del átomo*"¹⁶⁶ su modelo de átomo, la carga positiva del átomo se tenía que encontrar concentrada en una región muy pequeña del átomo, prácticamente un punto, que identificó como el núcleo atómico, "*Rutherford fue capaz de acomodar las observaciones y sugerencias de los resultados obtenidos por Geiger y Marsden con un modelo atómico en el que el núcleo estaba concentrado en unos 10^8 cm, y rodeado de una esfera con corpúsculos cargados de aproximadamente 10^{-12} cm de radio*"¹⁶⁷. Posteriormente, Geiger y Marsden establecieron que la carga del núcleo era igual al número de electrones que giran a su alrededor, y que esta carga es igual al número atómico del elemento en cuestión en el sistema periódico de elementos de Mendeleiev.

Los trabajos de Charles Barkla¹⁶⁸, William H. Bragg y William L. Bragg¹⁶⁹, Henry Moseley, Charles G. Darwin¹⁷⁰ sobre la estructura de los rayos X, terminaron por conducir a Moseley a una fuerte prueba experimental de la existencia del núcleo del átomo. "*existe en el átomo una cantidad fundamental, que aumenta en magnitudes regulares según se pasa de un elemento al siguiente. Esta cantidad solamente puede ser la carga del núcleo central positivo, de cuya existencia ya tenemos prueba definitiva. Rutherford ha demostrado, a partir del valor de la difusión de partículas α en la materia, que este núcleo transporta una carga positiva aproximadamente igual al de $\frac{A}{2}$ electrones, donde A es el peso atómico*"¹⁷¹.

166 RUTHERFORD, E.: "The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom", *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, IV, 55, 1911, pp. 18-20, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. II, 1963, pp. 212-213. La versión completa del artículo apareció en RUTHERFORD, E.: "The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom", *Philosophical Magazine*, 21, 1911, pp. 669-688, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. II, 1963, pp. 238-254.

167 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 252.

168 BARKLA, Ch. G.: "The spectra of the fluorescent Röntgen radiations", *Philosophical Magazine*, 22, 1911, pp.396-412.

169 BRAGG, W. L.: "On the spectral reflection of X rays", *Nature*, 93, 1912, p. 410. BRAGG, W. H.: "The reflection of X rays by crystals", *Proceedings of the Royal Society*, A89, 1913, pp.246-248. BRAGG, W. H. y BRAGG, W. L.: "The reflection of X rays by crystals", *Proceedings of the Royal Society*, A89, 1913, pp. 428-438.

170 MOSELEY, H. G. J. y DARWIN, Ch. G.: "The reflection of the X-rays", *Philosophical Magazine*, 26, 1913, pp. 210-232.

171 MOSELEY, H. G. J.: "The high-frequency spectra of the elements", *Philosophical Magazine*, 26, 1913, pp. 1.024-1.034), p. 1.031, citado en SÁNCHEZ RON, p. 292. MOSELEY, H. G. J.: "The

El descubrimiento del núcleo atómico echaba por tierra el modelo de Thomson, debido a que la masa del átomo cargada positivamente no se hallaba dispersa ocupando todo el espacio del átomo, sino que se encontraba concentrada en un punto, el núcleo del átomo, alrededor del cual giraban los electrones a través del espacio vacío. El modelo de Rutherford se asemejaba a un sistema planetario, en el que el núcleo cumpliría la función de la estrella y los electrones la de los planetas, un modelo similar había sido desarrollado en paralelo por el físico japonés Hantaro Nagoaka, como el propio Rutherford indicaba: "*Es interesante señalar que Nagoaka ha considerado matemáticamente las propiedades de un átomo "saturniano" que supuso está formado por una masa atractora central rodeada de anillos de electrones en rotación. Demostró que tal sistema era estable si la fuerza atractiva era grande*"¹⁷². Según el modelo atómico de Rutherford los electrones, de carga negativa, se moverían alrededor del núcleo, de carga positiva, describiendo órbitas elípticas. Inicialmente, el modelo atómico de Rutherford pasó bastante desapercibido, aunque dicho modelo presentaba numerosas ventajas frente al átomo de Thomson a la hora de explicar las propiedades y el comportamiento de los átomos, la utilización de nuevas técnicas de análisis basadas en la dispersión de las partículas α no facilitaron su difusión hasta la aparición de los trabajos de Geiger y Marsden de 1913¹⁷³, además el modelo planetario de Rutherford no dejaba de plantear importantes problemas¹⁷⁴. Hasta aquí los modelos atómicos desarrollados se habían

high-frequency spectra of the elements. Part II", *Philosophical Magazine*, 27, 1914, pp. 703-713.
172 RUTHERFORD, E.: "The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom", *Philosophical Magazine*, 21, 1911, p. 688, reproducido en CHADWICK, J. (dir.): *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, London, George Allen and Unwin, vol. II, 1963, citado en SÁNCHEZ RON, p. 253.

173 GEIGER, H. y MARSDEN, E.: "The laws of deflexion of α particles through large angles", *Philosophical Magazine*, 25, 1913, pp. 604-623, reproducido en BIRKS, J. B. (ed.): *Rutherford at Manchester*, New York, W. A. Benjamin, 1963, pp. 205-227. HEILBRON, J. L.: "The scattering of α and β particles and Rutherford's atom", *Archive for History of Exact Sciences*, 4, 1968, pp. 247-307, reimpreso en HEILBRON, J. L.: *Historical Studies in the Theory of Atomic Structure*, New York, Arno Press, 1981, pp.85-145.

174 ANDRADE, E. N. da C.: *Rutherford and the Nature of the Atom*, New York, Anchor Book, Doubleday & Company, Inc., 1964; BIRKS, J. B. (ed.): *Rutherford at Manchester*, New York, W.A. Benjamin Inc., 1963; EVE, A. S.: *Rutherford*, London, Cambridge University Press, 1939; ROBINSON, H. R.: *Rutherford by those Who knew Him.*, London, The Physical Society, 1954; BOORSE, H. A. y MOTZ, L.: *The World of the Atom*; New York, Basic Books, 1966; HURD, D. L. y KIPLING, J. J.: *The origins and Growth of Physical Science*, 2vols, Penguin, 1964; HAAR, D. der: *The Old Quantum Theory*, Oxford, Pergamon Press, 1967 (reimpresión artículos de Rutherford); ROMER, A.: *The Discovery of the Radioactivity and Transmutation*, New York, Dover Publications, 1964 y ROMER, A.: *Radiochemistry and the Discovery of Isotopes*, New York, Dover Publications, 1970 (ambas obras contienen una selección de artículos originales de la época con comentarios del autor); TRENN, Th. J.: "Rutherford and the Alpha-Beta-Gamma Classifications of Radioactive Rays", *Isis* 67, 1976, pp. 61-75; FREEDMAN, M. I.: "Frederik Soddy and the

fundamentado en la física clásica, la solución de las dificultades subyacentes en el modelo de Rutherford sólo comenzaron a encontrar solución cuando Niels Bohr aplicó los principios de la teoría cuántica de Planck en lo que comenzaba a ser una nueva rama de la física, la física atómica¹⁷⁵.

Niels Bohr y la introducción de la primera teoría cuántica en la física del átomo.

La teoría cuántica ocupó la atención de los físicos de los siguientes lustros, abriendo la puerta a la solución de los problemas a los que desde finales del siglo XIX, con el descubrimiento de la radiactividad Röntgen y Becquerel, se enfrentaba la Física a la hora de analizar la estructura atómica de la materia. El siguiente gran paso lo dio en 1912 Niels Bohr al aplicar la distribución cuántica de la energía para explicar el comportamiento de los electrones en el seno de la estructura atómica, proponiendo un modelo de átomo, conocido como el átomo de Bohr, que condujo directamente en los años veinte a la segunda teoría cuántica.

Niels Bohr era un joven físico danés que acudió al laboratorio Cavendish de Cambridge en 1911, con el fin de ampliar sus estudios y entrar en contacto con la investigación en uno de los más importantes centros internacionales de la física del momento dirigido por J. J. Thomson. En la primavera de 1912 se desplazó a la Universidad de Manchester para incorporarse al equipo dirigido por éste¹⁷⁶. Cuando Bohr llegó en el laboratorio de Manchester se estaba trabajando denodadamente en las consecuencias que el descubrimiento del núcleo acarreo sobre la estructura del átomo. Bohr se integró de inmediato a dicho trabajo,

Practical Significance of Radiactive Matter", *British Journal for the History of Science*, 12, 1979, pp. 257-260; TRENN, Th. J.: "The Central Role of Energy in Soddy's Holistic and Critical Approach to Nuclear Science, Economics, and Social Responsibility" *British Journal for the History of Science*, 12, 1979, pp. 261-276.

175 HEILBRON, J. L.: *Historical Studies in the Theory of Atomic Structure*, New York, Arno Press, 1981. KELLER, A.: *The Infancy of Atomic Physics. Hercules in His Cradle*, Oxford, Clarendon Press, 1983; WEINER, Ch. (ed.): *Exploring the History of Nuclear Physics*, New York, American Institute of Physics, 1972; NISIO, S.: "X-Ray, and Atomic Structure at the Early Stages of the Old Quantum Theory", *Japanese Studies in the History of Science*, 8, 1975, pp. 55-75; HIROSIGE, T. y NISIO, S.: "Formation of Bohr's Theory of Atomic Constitution", *Japanese Studies in the History of Science*, 3, 1964, pp. 6-28; HIROSIGE, T. y NISIO, S.: "The Genesis of the Bohr Atom Model and Planck's Theory of Radiation" *Japanese Studies in the History of Science*, 9, 1970, pp. 36-47; HEILBRON, J. L. y KUHN, Th. S.: "The Genesis of the Bohr Atom", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, 1969, pp. 211-290, reimpresso en HEILBRON, J. L.: *Historical Studies in the Theory of Atomic Structure*, pp. 149-228.

176 BOHR, N.: "Conferencia en memoria de Rutherford. 1958", reimpressa en BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano 1958-1962*, Madrid, Aguilar, 1970, pp. 37-38.

donde se ocupó de las dificultades que entrañaba el modelo atómico de Rutherford, *"llegué rápidamente a absorberme en las implicaciones teóricas generales del nuevo modelo atómico y, especialmente, en la posibilidad que ofrecía de hacer una clara distinción, por lo que se refiere a las propiedades físicas y químicas de la materia, entre aquellas que se originan directamente en el propio núcleo atómico y las que dependen primariamente de la distribución de los electrones ligados a él a distancias muy grandes comparadas con las dimensiones nucleares. En tanto que la explicación de las desintegraciones radiactivas había de buscarse en la constitución intrínseca del núcleo, resultaba evidente que las características ordinarias, físicas y químicas, de los elementos tenían que ver con propiedades del sistema electrónico exterior al mismo. Incluso estaba claro que, debido a la gran masa del núcleo y su pequeño tamaño comparado con el del átomo, la constitución del sistema electrónico debía depender casi exclusivamente de la carga eléctrica total del núcleo. Tales consideraciones sugerían inmediatamente la idea de basar la descripción de las propiedades físicas y químicas de cada elemento sobre un sólo número entero, conocido generalmente como número atómico, que expresa la carga nuclear como múltiplo de la unidad elemental de electricidad."*¹⁷⁷

El desarrollo de estas ideas, tanto en su vertiente experimental como teórica, constituía uno de los principales focos de atención del grupo de Manchester, y los resultados no tardaron en llegar. Los trabajos de Hevesy, Russell y Rossi supusieron un fuerte apoyo para la idea de que el número atómico determinaba las propiedades físicas de los elementos. A finales del otoño de 1912, Russell presentó una comunicación a la *Chemical Society*, en la que señalaba la relación existente entre los procesos radiactivos y el cambio resultante del número atómico del elemento. Mientras que Geiger y Marsden identificaban la igualdad existente entre la carga del núcleo y el número de electrones de cada elemento, constituyendo el número atómico. Meses después Soddy, establecido ya en Glasgow, junto con Fajans en Karlsruhe, establecían la ley del desplazamiento radiactivo en su forma completa, aunque éste último creía, erróneamente, que dicha ley se encontraba en contradicción con el modelo atómico de Rutherford.

El modelo planetario de Rutherford postulaba que los electrones giraban alrededor del núcleo describiendo órbitas elípticas, pero según las leyes de la electricidad una partícula cargada (como es el electrón) en movimiento debe producir radiación electromagnética en forma de luz. El electrón, según el modelo atómico de Rutherford, debería encontrarse siempre en movimiento, por lo que debía emitir de forma constante radiación y, por tanto, los átomos debían

177 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano 1958-1962*. Madrid, Aguilar, 1970, pp. 39-40.

emitir radiación electromagnética de manera continua, cosa que no sucedía. Además, si el electrón emitía radiación continuamente se produciría una pérdida paralela de energía, de igual magnitud que la radiación emitida, de tal manera que conforme perdiese energía iría disminuyendo el radio de su órbita hasta caer en el núcleo, por lo que sería imposible la existencia del átomo compuesto por un núcleo y un determinado número de electrones, lo que podríamos denominar la *catástrofe electromagnética* del átomo. El modelo atómico de Rutherford aunque presentaba una estructura del átomo muy sugestiva para los físicos, que permitía, además, explicar numerosas propiedades de los diferentes elementos, no podía resolver esos graves inconvenientes. *"Resultó evidente desde un principio, que, sobre la base del modelo de Rutherford, la típica estabilidad de los sistemas atómicos se hallaba en violenta contradicción con los fundamentos clásicos de la mecánica y de la electrodinámica. Efectivamente, en la mecánica newtoniana, ningún sistema de cargas puntuales admite un equilibrio estático estable, y, por otra parte, de acuerdo con la electrodinámica de Maxwell, cualquier movimiento de los electrones alrededor del núcleo debería dar lugar a una disipación de energía en forma de radiación, acompañada de una continua contracción del sistema, para terminar en una firme unión del núcleo y de los electrones dentro de una región de tamaño bastante más pequeño que las dimensiones atómicas."*¹⁷⁸

Dichas dificultades tenían una similitud con el fenómeno de la *catástrofe del ultravioleta* para el caso de la radiación. Bohr se interrogó si no ocurriría algo similar en el interior del átomo, los trabajos de Ehrenfest y, sobre todo, de Einstein de 1905 y 1909 habían puesto de manifiesto que la distribución discontinua de energía no era algo restringido al fenómeno de la radiación. De hecho entre 1910 y 1912 la discontinuidad se había abierto camino entre los físicos, y el problema de los calores específicos había ampliado notablemente su campo de aplicación. Bohr conocía tales investigaciones y se preguntó sino sería posible extender tales resultados al comportamiento de los electrones en el interior del átomo, de manera que introduciendo restricciones en la emisión y absorción de energía del átomo se eliminasen las dificultades subyacentes en el modelo de Rutherford. *"Sin embargo, esta situación no era del todo sorprendente [se refiere a las contradicciones entre el modelo de Rutherford y la física clásica], puesto que ya el descubrimiento realizado por Planck en 1900 del cuanto universal de acción había revelado una limitación esencial de las teorías físicas clásicas, lo que, especialmente en manos de Einstein, había encontrado aplicaciones tan prometedoras en la explicación de los calores específicos y de las reacciones fotoquímicas. Por tanto, y con entera independencia de la nueva evidencia experimental respecto a la estructura del átomo, había amplias*

178 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 42.

*esperanzas de que los conceptos cuánticos llegaran a adquirir importancia decisiva en el problema de la constitución atómica de la materia.*¹⁷⁹

Bohr trató de hallar una solución en esa dirección durante su estancia en Manchester. Sin embargo los resultados no fueron satisfactorios, antes de su regreso a Copenhague escribió a Rutherford un *memorando* en el que le informaba del estado de sus investigaciones sobre la estructura y la estabilidad de las moléculas, "*En la investigación de la configuración de los electrones en los átomos nos encontramos inmediatamente con la dificultad (relacionada con la mencionada inestabilidad [de los electrones girando alrededor de un núcleo con carga positiva, según el sentido mecánico habitual]), de que una órbita, aunque solamente se considere la fuerza de la carga central y el número de electrones, pueden girar hasta el infinito con un gran número de diferentes modos de rotación, de acuerdo con el supuesto de diferentes radios en el mismo, y parece que no hay nada (a causa de la inestabilidad) para permitir a partir de consideraciones mecánicas discriminar entre los distintos radios y modos de vibración. En nuestra investigación, por lo tanto, vamos a introducir y hacer uso de una hipótesis que nos permita determinar las cantidades en cuestión. Esta hipótesis es la siguiente: que existe para cualquier órbita [en el original ring] estable (en los estados naturales del átomo) una clara relación entre la energía cinética de un electrón en la órbita y el modo de rotación. Esta hipótesis, de la que no se realizará ningún intento de justificación mecánica (al parecer imposible*), es elegida como la única que parece ofrecer una posibilidad de explicación del conjunto de resultados experimentales, y que tomados en su conjunto parecen confirmar las concepciones sobre el mecanismo de la radiación como las propuestas por Planck y Einstein.*¹⁸⁰ [en el original ring ha sido traducido como órbita y *times of rotation* como modos de rotación]

Paralelamente a los intentos de Bohr por integrar la teoría del átomo con la teoría cuántica de Planck y Einstein, Arthur E. Haas había intentado en 1910 establecer las dimensiones y los períodos del movimiento de los electrones mediante la ecuación de Planck a partir del modelo atómico de Thomson, mientras que N. Bjerrum, partiendo de los trabajos de Nernst sobre rotaciones cuantizadas de las moléculas, había predicho en 1912 la estructura de bandas de las rayas de absorción infrarroja en los gases biatómicos, investigaciones que Bohr desconocía en ese momento. Por otra parte, John William Nicholson había recurrido, el mismo año que Bohr se planteaba dicha integración (1912), a la

179 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, pp. 42-43.

180 BOHR, N.: "The Rutherford memorandum (1912)", en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, (pp. 135-143), p. 137.

utilización de momentos angulares cuantizados para explicar el origen de ciertas rayas observadas en los espectros de las nebulosas estelares y de la corona solar¹⁸¹; Bohr conoció durante su estancia en Manchester los trabajos de Nicholson sobre los espectros de nebulosas estelares. *"En sus cálculos, Nicholson trata, como yo, con sistemas de la misma constitución que su modelo de átomo [de Rutherford], y en la determinación de las dimensiones y la energía de los sistemas busca, como yo, una base en la relación entre la energía y la frecuencia propuesta por Planck en su teoría de la radiación... en los sistemas considerados por Nicholson... se producen estados transitorios durante la formación de los átomos, y hay estados en los que la energía correspondiente a las líneas del espectro característico del elemento en cuestión es radiada"*¹⁸².

Para seguir avanzando Bohr recurrió a los resultados de la espectroscopia, *"Bohr advirtió las diferencias que le separaban de Nicholson: éste se centraba en estados excitados, los que daban origen a las líneas espectrales que deseaba estudiar, mientras que él se ocupaba de "estados fundamentales", no excitados; 6) como mínimo, se puede decir que todo esto atrajo finalmente su atención al problema de los espectros: debió de pensar que en ellos se encontraba otro elemento básico para construir un modelo atómico satisfactorio; hasta entonces su motivación venía de la química de los elementos y no de la espectroscopia."*¹⁸³

La espectroscopia durante los decenios precedentes había conseguido establecer los *espectros de líneas* de un amplio número de elementos químicos, en aquella época, 1912, se intuía que las líneas espectrales debían de tener alguna relación con las propiedades y la estructura de los átomos, pero los intentos realizados hasta esa fecha por desvelar dicha relación se habían saldado con el más absoluto de los fracasos. Se sabía que la luz que emiten los gases y vapores era producto de la *excitación* a la que éstos eran sometidos; además se conocía que la luz así emitida cuando se descomponía mediante un espectroscopio daba lugar a un espectro de emisión de líneas bien definido y diferente para cada uno de los diferentes gases o vapores de los elementos químicos¹⁸⁴. De esta manera, cada sustancia tiene su propio diagrama característico de longitudes de onda; a

181 McCOMMACH, R.: "The Atomic Theory of John William Nicholson", *Archive for History of Exact Sciences*, 3, 1966, pp. 160-184.

182 Carta de Niels Bohr a Ernst Rutherford de 31 de enero de 1913, en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, p. 579.

183 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 272.

184 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 194-196.

diferencia del espectro de emisión continua, sólo presentaban luz en algunas longitudes de onda definidas con espacios oscuros entre ellas. *"Siguiendo los trabajos de Kirchhoff y Bunsen, la espectroscopia experimental se desarrolló de un modo tan amplio y vigoroso que condujo al descubrimiento y clasificación de un número incalculable de líneas en los espectros de emisión y absorción de los distintos gases. La avalancha de datos relativos a longitudes de onda e intensidades de las mismas parecía sumir a la teóricos en un caos. Ciertamente se presentaron algunos síntomas de orden, por otra parte inexplicables: la apariencia general de los espectros de los metales alcalinos mostraba algunas características de semejanza cuando se incluían las regiones no visibles; la diferencia de longitudes de onda entre las líneas adyacentes de ciertas zonas del espectro del sodio y de cinc era constante, y también parecían presentarse en otros espectros ciertas normas de espaciamiento entre las líneas. Fue éste un período [entre 1859 y 1885] de búsqueda, casi obsesiva, de alguna relación numérica entre las longitudes de onda de las líneas espectrales.*¹⁸⁵

En 1885 el físico suizo Johann Jakob Balmer desarrolló una fórmula empírica que se ajustaba con enorme precisión a la distribución de las líneas del espectro de emisión del hidrógeno, a partir de ahí se establecieron una serie de relaciones numéricas que permitían describir la distribución de las líneas del espectro de emisión del hidrógeno y de otros elementos¹⁸⁶; Johannes Robert Rydberg en 1890 estableció que el espectro se componía de tres tipos de series¹⁸⁷; Edward C. Pickering en 1896, Heinrich Kayser inició en 1900 la publicación del *Handluch der Spectroscopie*, que se prolongó hasta 1912, con la publicación del quinto volumen¹⁸⁸, en la que la colaboración Carl Runge fue notable¹⁸⁹, mientras Friedrich Paschen en 1908 publicó las series del rango del infrarrojo del hidrógeno¹⁹⁰, y Theodore Lyman en 1906-1914 sobre el extremo ultravioleta. Sin embargo, la explicación de dichas distribuciones numéricas permanecía sumida en la oscuridad cuando Bohr se enfrentó en 1912-1913 a dicho problema, aunque se sospechaba que tal fenómeno debía de estar provocado por algún mecanismo físico hasta entonces desconocido¹⁹¹.

185 HOLTON, G.: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, revisada y ampliada por S.G. Brush, Barcelona, Reverte, 1984, p. 698.

186 BALMER, J. J.: "Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs", *Verhandlungen der Naturforschenden Gessellschaft*, Basel, 7, 1885, pp. 548-560.

187 RYDBERG, J. R.: "On the structure of the line-spectra of the chemical elements", *Philosophical Magazine*, 29, 1890, pp. 331-337.

188 KAYSER, H.: *Handluch der Spectroscopie*, Leipzig, Hize Verlag, 5 vols., 1900-1912.

189 KAYSER, H. y RUNGE, C.: *Über die Spectren der Elemente*, Berlin, Erster Abschnitt, 1890.

190 PASCHEN, F.: "Zur Kenntnis ultraroter Linienspektren. I (Normalwellenlängen bis 27000 A-E)", *Annalen der Physik*, 27, 1908, pp. 537-570.

191 HINDMARSH, W. R.: *Atomic Spectra*, New York, Pergamon Press, 1967; MCGUCKEN, W.: *Nineteenth - Century Spectroscopy*, Baltimore, The Johns Hopkins Press, 1969; MACHEAN, J.:

Al finalizar el semestre de la primavera de 1912 Bohr regresó a Copenhague, donde obtuvo un puesto de profesor de física en la Universidad, donde conoció a través de Hans M. Hansen, la fórmula de Balmer que describía el espectro de líneas del hidrógeno. El descubrimiento de los trabajos sobre espectroscopia desarrollados entre 1885 y 1908 pusieron a Bohr en el camino acertado. Tanto la fórmula numérica de Balmer como la constante de Rydberg, utilizadas para calcular la distribución espectral de las líneas de diferentes elementos, revelaron a Bohr una notable semejanza con la distribución cuántica de la energía según la teoría de la radiación de Planck. *"Las cartas que dirigí a Rutherford en el otoño de 1912 trataban de mis continuas tentativas para precisar el papel del cuanto de acción en la constitución electrónica del átomo de Rutherford,... Tras varios intentos de aplicar las ideas cuánticas en una forma más consistente, al principio de la primavera de 1913 se me ocurrió que las leyes notablemente simples que gobiernan los espectros ópticos de los elementos ofrecían una clave para abordar el problema de la estabilidad atómica directamente aplicable al átomo de Rutherford. Sobre la base de las medidas extremadamente precisas de las longitudes de onda de las rayas espectrales, realizadas por Rowland y otros, y tras las contribuciones de Balmer y de Schuster... Rydberg consiguió aclarar las leyes espectrales generales de manera muy ingeniosa. El resultado principal del profundo análisis de las series más notables en los espectros de rayas y de sus mutuas relaciones, fue el reconocimiento de que la frecuencia de ν de cada raya del espectro de un elemento dado podía representarse con extraordinaria precisión en la forma $\nu = T' - T''$, donde T' y T'' son dos elementos de un conjunto de términos espectrales T característico del elemento. Esta ley fundamental de combinación desafiaba claramente cualquier interpretación mecánica ordinaria... Para el átomo de Rutherford no cabía esperar siquiera un espectro de rayas, puesto que, de acuerdo con la electrodinámica ordinaria, las frecuencias de la radiación aneja al movimiento electrónico deberían cambiar continuamente con la energía emitida. Era, por tanto, natural intentar basar la explicación de los espectros directamente en la ley de combinación."*¹⁹²

En Copenhague continuó la investigación iniciada en Manchester, con la publicación de una serie de tres artículos en la revista *Philosophical Magazine*, después de haber consultado con Rutherford los textos originales, bajo el título *"Sobre la constitución de átomos y moléculas"*¹⁹³. *"La manera de considerar un*

"On harmonic ratios in spectra", *Annals of Science*, vol. 28, 1972, pp. 121-137.

192 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, pp. 45-46.

193 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, pp. 1-25, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 161-185. BOHR, N.: "The

*problema de este tipo, sin embargo, ha sufrido modificaciones esenciales en los últimos años debido al desarrollo de la teoría de la radiación de energía y la afirmación directa de las nuevas suposiciones introducidas en esta teoría, confirmada por experimentos sobre muy diferentes fenómenos como los calores específicos, el efecto fotoeléctrico, los rayos Röntgen, etc. El resultado de la discusión de estas cuestiones parece ser un general reconocimiento de la insuficiencia de los sistemas de tamaño atómico. Cualquiera que sea el cambio que se introduzca en las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir en las leyes en cuestión una cantidad extraña a la electrodinámica clásica, por ejemplo la constante de Planck, o como a menudo se denomina el cuanto elemental de acción."*¹⁹⁴ Más adelante señalaba los "principales supuestos utilizados son: (1) Que el equilibrio dinámico de los sistemas en los estados estacionarios puede discutirse mediante la mecánica ordinaria [clásica], mientras que el paso de los sistemas entre estados estacionarios diferentes no puede ser tratado sobre esa base. (2) Que este último proceso es seguido por la emisión de una radiación homogénea, donde la relación entre la frecuencia y la cantidad de energía emitida es la dada por la teoría de Planck... El segundo supuesto está en evidente contraste con las ideas ordinarias de la electrodinámica, pero parece ser necesaria a fin de dar cuenta de los hechos experimentales."¹⁹⁵

En apoyo de su formulación acudió a la descripción de las series del espectro del hidrógeno. Bohr se percató de que la fórmula de Balmer podía ser modificada sin alterar los resultados, de manera que en la misma se introdujese la constante de Planck. Obtuvo así una fórmula que describía el espectro real del hidrógeno, al igual que ocurría con la fórmula de Balmer, "Vemos que esta expresión explica la

Constitution of Atoms and Molecules. Part II.- Systems containing only a Single Nucleus", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 153, Sept. 1913, pp. 476-502, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 188-214. BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules. Part III.- Systems containing Several Nuclei", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 155, November 1913, pp. 857-875, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 215-233.

194 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, p. 2, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 162.

195 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, p. 7, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 167.

ley que relaciona las líneas en el espectro de hidrógeno. Si hacemos $\tau_2 = 2$ y dejamos variar a τ_1 , obtenemos la serie ordinaria de Balmer. Si hacemos $\tau_2 = 3$, tenemos la serie en el infrarrojo observada por Paschen y antes sospechada por Ritz. Si hacemos $\tau_2 = 1$ y $\tau_1 = 4, 5, \dots$, obtenemos series en el extremo ultravioleta y el extremo ultrarrojo, respectivamente, que no han sido observadas, pero cuya existencia cabe esperar¹⁹⁶. Pero que, y esto es lo fundamental, explicaba el espectro del hidrógeno en términos de cuantos de energía. "De hecho, aceptando la idea de Einstein de los cuantos de luz o fotones de energía $h\nu$, donde h es la constante de Planck, me veía obligado a suponer que cualquier emisión o absorción de radiación por el átomo es un proceso individual acompañado de una transferencia de energía $h\nu$ ($T' - T''$), y a interpretar el producto hT como la energía de ligadura de los electrones en cierto estado estable o estacionario del átomo. En particular, esta hipótesis ofrecía una explicación inmediata de la formación aparentemente caprichosa de las rayas de emisión y de absorción en los espectros atómicos. De esta forma, en los procesos de emisión presenciamos la transición del átomo desde un nivel alto de energía a otro inferior, mientras que en los procesos de absorción nos encontramos en general con el tránsito del átomo desde su estado fundamental, con el mínimo contenido de energía, a uno de sus estados excitados."¹⁹⁷

Más adelante, argumentaba que de su teoría se podía explicar la constante de la fórmula de Rydberg –la constante de Rydberg-, "con ayuda de la teoría, puede explicarse de forma sencilla que la constante K de la fórmula de Rydberg es la misma para todas las sustancias."¹⁹⁸ Bohr había conseguido por fin encontrar la explicación de la configuración del espectro de líneas del hidrógeno, algo que habían perseguido denodadamente los físicos durante cerca de treinta años. "Bohr había demostrado, en definitiva, que saltos entre diferentes órbitas estacionarias producían radiación de frecuencias diferentes, y, en consecuencia, líneas espectrales. La multitud de líneas observadas en el espectro de un elemento se originaban en los saltos... que podían tener lugar entre los... diferentes niveles energéticos atómicos en los que se podían situar los electrones existentes en las capas externas al núcleo... En suma. La espectroscopia se

196 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, p. 9, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 169.

197 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 46.

198 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, p. 12, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 172.

reducía a la física atómica¹⁹⁹. Pero su contribución rebasaba con mucho tal logro.

Inmediatamente a continuación sostenía: *"La fuerza sobre el electrón, cuando está a gran distancia del núcleo y de los electrones anteriormente enlazados, será casi la misma que en el anterior caso del enlace de un electrón con un núcleo de hidrógeno. La energía correspondiente a uno de los estados estacionarios será, por lo tanto, para un valor grande τ casi igual a la dada por la expresión (3) en la p. 5 [$W = \frac{2\pi^2 me^2 E^2}{\tau^2 h^2}$, $\omega = \frac{4\pi^2 me^2 E^2}{\tau^2 h^3}$, $2a = \frac{\tau^2 h^2}{2\pi^2 meE}$], si hacemos $E = e$. Por consiguiente, para τ grandes obtenemos $\lim(\tau^2 \cdot F_1(\tau)) = \lim(\tau^2 \cdot F(\tau)) = \dots = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}$ en conformidad con la teoría de Rydberg.*²⁰⁰

Bohr introducía por vez primera la argumentación que desembocaría poco después en su formulación del *principio de correspondencia*, por el que en la zona de los grandes números cuánticos las leyes de la física clásica y la teoría cuántica podían encontrarse, fue *"un primer ejemplo de un artificio que el físico danés emplearía repetidamente, convirtiéndolo en una especie de guía heurística en la búsqueda de una dinámica cuántica. Me estoy refiriendo al "principio de correspondencia", la idea de que para los números cuánticos grandes se deben recuperar los resultados de la física clásica.*²⁰¹

Bohr concluía el artículo con *"En cualquier sistema molecular que conste de núcleos positivos y electrones, en el que los núcleos estén en reposo uno respecto del otro y los electrones se muevan en órbitas circulares, el momento angular de cada electrón alrededor del centro de su órbita será en el estado estable del sistema igual a $\frac{h}{2\pi}$, donde h es la constante de Planck"* (las cursivas en el original)²⁰².

199 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 283.

200 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, p. 12, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 172.

201 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 284.

202 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 151, July 1913, pp. 24-25, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 184-185.

En la tercera parte de *"Sobre la constitución de átomos y moléculas"* Bohr recapitulaba los resultados alcanzados por sus tres trabajos. *"La teoría de Planck se ocupa de la emisión y absorción de la radiación de un átomo que vibre a una frecuencia constante, independiente de la cantidad de energía que posea el sistema en el momento considerado. La asunción de esa vibración, sin embargo, implica la asunción de fuerzas cuasi elásticas por lo que es incompatible con la teoría de Rutherford, según la cual todas las fuerzas entre las partículas de un sistema atómico deben variar inversamente al cuadrado de la distancia. Con el fin de aplicar los resultados básicos obtenidos por Planck es necesario introducir, por tanto, nuevas hipótesis en cuanto a la emisión y absorción de radiación por un sistema atómico. Los principales supuestos utilizados en el presente trabajo son los siguientes: - 1. Que la energía radiada no es emitida (o absorbida) de forma continua como supone la electrodinámica ordinaria [clásica], sino sólo durante el tránsito de los sistemas entre los diferentes estados "estacionarios". 2. Que el equilibrio dinámico de los sistemas en los estados estacionarios se rige por las leyes de la mecánica ordinaria [clásica], mientras que estas leyes no son válidas para el tránsito de los sistemas entre los diferentes estados estacionarios. 3. Que la radiación emitida durante la transición de un sistema entre dos estados estacionarios es homogénea, y que la relación entre la frecuencia ν y la cantidad total de energía emitida E viene dada por $E = h\nu$, donde h es la constante de Planck. 4. Que los diferentes estados estacionarios de un sistema sencillo que consta de un electrón rotando alrededor de un núcleo positivo están determinados por la condición de que la relación entre la energía total, emitida durante la formación de la configuración, y la frecuencia de la revolución del electrón es un múltiplo entero de $\frac{h}{2}$. Suponiendo que la órbita del electrón es circular, este supuesto es equivalente con la hipótesis de que el momento angular de los electrones alrededor del núcleo es igual a un múltiplo entero de $\frac{h}{2\pi}$. 5. Que el estado "estable" de cualquier sistema atómico –por ejemplo, el estado en que la energía emitida es máxima- es determinado por la condición de que el momento angular de cada electrón alrededor del centro de su órbita es igual a $\frac{h}{2\pi}$. Está demostrado que, con la aplicación de estas hipótesis al modelo de átomo de Rutherford, es posible dar cuenta de las leyes de Balmer y Rydberg que relaciona la frecuencia de las diferentes líneas del espectro de un elemento.*²⁰³

203 BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules. Part III.- Systems containing Several Nuclei", *Philosophical Magazine*, S. 6, vol. 26, nº 155, November 1913, pp. 874-875, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-

Bohr había logrado resolver la dificultad del modelo atómico de Rutherford, explicando el por qué el átomo no emite radiación de forma continua y los electrones no se precipitan sobre el núcleo, sino que permanecen en órbitas estacionarias. Para ello, eso sí, tuvo que arrojar por la borda la teoría clásica y recurrir al cuanto de acción de Planck. En otras palabras, Bohr elaboró un nuevo modelo atómico, basado en la teoría cuántica del átomo, que exigía renunciar a la física clásica en el nivel atómico y, con ello el modelo de Rutherford quedaba seriamente corregido. Como contrapartida se obtenía una teoría del átomo que no contenía en sí misma elementos que la hiciesen inviable y, además, daba una respuesta muy satisfactoria del comportamiento y de las propiedades del átomo de hidrógeno, ejemplo sobre el que basó su teoría, proponiendo una estructura del mismo que iluminaba uno de los más oscuros problemas de la física de aquellos años. *"En el caso más sencillo del espectro del hidrógeno, los términos vienen dados con gran precisión por la fórmula $T_n = \frac{R}{n^2}$, donde n es un número entero, y R , la constante de Rydberg. Así, la interpretación indicada conducía a una sucesión de valores decrecientes para la energía de ligadura del electrón en el átomo de hidrógeno, lo que sugiere un proceso escalonado por el cual el electrón, inicialmente situado a gran distancia del núcleo, pasa por transiciones radiactivas a estados estacionarios de ligadura progresivamente más firme, caracterizado por valores cada vez más bajos de n , hasta llegar al estado fundamental especificado por $n = 1...$ Sobre la base del modelo atómico de Rutherford, esta idea sugería también inmediatamente una explicación de la aparición de la constante de Rydberg en los espectros más complejos de otros elementos. De esta forma, se llegaba a la conclusión de que nos hallábamos ante procesos de transición entre estados excitados del átomo, en los que uno de los electrones sale de la región ocupada por los restantes electrones ligados al núcleo, y queda así expuesto a un campo de fuerzas semejante al creado por la carga unidad. El establecimiento de relaciones más íntimas entre el modelo atómico de Rutherford y los datos espectrales planteaba sin duda intrincados problemas. Por una parte, la propia definición de la carga y masa del electrón y del núcleo descansaba por entero en un análisis de los fenómenos físicos hecho a base de los principios de la mecánica y del electromagnetismo clásicos. Por otra parte, el postulado cuántico que afirma que cualquier cambio en la energía intrínseca del átomo consiste en una transición completa entre dos estados estacionarios, excluía la posibilidad de explicar sobre principios clásicos los procesos radiactivos, o cualquier otra reacción basada en la estabilidad del átomo."*²⁰⁴

New York-Oxford, 1981, pp. 232-233.

204 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, pp. 46-47.

La relación existente entre el modelo atómico de Rutherford y los datos espectrales encontró importantes obstáculos que debieron ser resueltos por Bohr. Pickering había observado a finales del siglo XIX una serie de rayas en los espectros de las estrellas lejanas cuyas longitudes de onda presentaban una estrecha relación con el espectro ordinario del hidrógeno, por lo que fueron asimiladas al espectro del mismo. Tanto Rydberg como Alfred Fowler se mostraron de acuerdo con dicha interpretación, lo que provocó una notable complicación del espectro del hidrógeno, al no aparecer en la fórmula de Rydberg a menos que se introdujeran valores semienteros en el número n de la expresión de los términos espectrales. *"Cuando en marzo de 1913 escribí a Rutherford, incluyendo una copia de mi primer trabajo sobre la teoría cuántica de la constitución atómica, subrayé la importancia de resolver la cuestión del origen de las rayas de Pickering"*²⁰⁵.

El problema fue resuelto en los meses posteriores a la publicación del trabajo de Bohr en el *Philosophical Magazine*, la solución del mismo se mostró en plena concordancia con la teoría de Bohr. *"Durante los meses siguientes [a marzo de 1913] la discusión acerca del origen de las rayas espectrales asignadas a los iones de helio cobró un aspecto dramático. En primer lugar, Evans pudo producir las rayas de Fowler en descargas a través de helio de extrema pureza, sin que aparecieran trazas de las rayas corrientes del hidrógeno. Sin embargo, Fowler no quedó convencido y subrayó la forma espúrea en que pueden aparecer los espectros en las mezclas gaseosas. Observó, sobre todo, que sus precisas medidas de las longitudes de onda de las rayas de Pickering no coincidían exactamente con las calculadas a partir de mi fórmula para $Z = 2$. Fue fácil, sin embargo, hallar una respuesta para este último punto... Teniendo en cuenta esta corrección, la relación predicha entre los espectros del hidrógeno y del helio ionizado concordaba perfectamente con todas las medidas. Este resultado fue por fin aceptado por Fowler, quien aprovechó la oportunidad para señalar que, en los espectros de otros elementos, se habían observado también series en las cuales la usual constante de Rydberg tenía que multiplicarse por un número próximo a cuatro."*²⁰⁶

Las dificultades de la teoría cuántica del átomo defendida por Bohr no se detenían en este problema de la confusión inicial en la interpretación de las rayas espectrales del helio ionizado. Mayores dificultades teóricas planteaba la

205 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 50. Carta de Bohr a Rutherford del 6 de marzo de 1913, reproducida en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 581-583.

206 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 52.

introducción del cuanto de acción para explicar las transiciones energéticas del electrón en el modelo de Rutherford. Como señalaba el propio Bohr, en su teoría de 1913 *"el postulado cuántico... afirma que cualquier cambio en la energía intrínseca del átomo consiste en una transición completa entre dos estados estacionarios"*, esto significaba que las transiciones entre los diferentes estados energéticos del átomo se producían mediante *saltos discontinuos* regidos por el cuanto de acción de Planck, algo que resultaba absolutamente incompatible con la teoría clásica que postulaba transiciones continuas de un estado de energía a otro.

La dificultad se veía agravada por el recurso en la misma teoría a los principios de la mecánica y del electromagnetismo clásicos a la hora de la definición de la carga y de la masa del electrón y del núcleo. La utilización dentro de la misma teoría de dos teorías, la clásica y la cuántica, incompatibles entre sí generaba enormes dificultades teóricas que no fueron resueltas hasta la formulación de la mecánica cuántica a mediados del decenio de los años veinte, para solventar dicho problema Bohr recurrió al establecimiento del *principio de correspondencia* que posteriormente desembocó en el *principio de complementariedad*. Rutherford en su contestación a Bohr, después de recibir el manuscrito original del artículo de 1913, ya lo puso de manifiesto el 20 de marzo de 1913. *"He recibido su escrito [se refiere al original del artículo de 1913] y lo he leído con gran interés... Sus ideas sobre el origen del espectro del hidrógeno son muy ingeniosas y parecen funcionar bien; pero la mezcla de los conceptos de Planck con la vieja mecánica hace muy difícil formarse una idea física de lo que haya en la base de todo ello. Se me presenta una grave dificultad en su hipótesis, que estoy seguro conoce usted perfectamente: ¿cómo decide un electrón a qué frecuencia va a vibrar cuando pasa de un estado estacionario a otro? Me parece que usted debería suponer que el electrón sabe de antemano en dónde va a pararse."*²⁰⁷

La respuesta de Rutherford hacía referencia al problema central que la teoría de Bohr planteaba, la solución se demoró durante más de dos lustros hasta que el desarrollo de un nuevo formalismo matemático por Born, Heisenberg y Jordan abandonó el concepto de órbita electrónica en 1926. *"Como sabemos hoy, la solución de tales problemas exigió el desarrollo de un formalismo matemático cuya adecuada interpretación implicó una revisión radical de los fundamentos para el uso inequívoco de los conceptos físicos elementales y el reconocimiento de las relaciones de complementariedad entre los fenómenos observados en*

207 Carta de E. Rutherford a Niels Bohr fechada el 20 de marzo de 1913, citada en BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 50, reproducida en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 583-584.

condiciones experimentales diferentes. Sin embargo, en aquella época se pudo hacer ya algún progreso utilizando modelos físicos clásicos para la clasificación de los estados estacionarios basados en las hipótesis originales de Planck respecto a los estados energéticos de un oscilador armónico... De hecho, igual que en el caso del oscilador armónico, un cálculo sencillo demostraba que, para cada uno de los estados estacionarios del átomo de hidrógeno, la acción integrada sobre un período orbital del electrón podía identificarse con el producto nh , condición que en el caso de órbitas circulares equivale a una cuantización del momento cinético en unidades $\frac{h}{2\pi}$. Esta identificación implicaba fijar la constante de Rydberg en función de la carga e y masa m del electrón, así como la constante de Planck, de acuerdo con la fórmula $R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}$ lo que coincidía con el valor empírico dentro de la precisión de las medidas disponibles de e , m y h . Aunque este acuerdo ofrecía una indicación del alcance del uso de modelos mecánicos para representar estados estacionarios, está claro que se mantenían las dificultades implicadas en cualquier combinación de las ideas cuánticas con los principios de la mecánica ordinaria [clásica]. Resultó, por tanto, muy tranquilizador comprobar que el tratamiento de los problemas espectrales cumplía la exigencia obvia de abarcar en el límite la descripción física clásica, cuando el valor correspondiente de la acción es suficientemente grande para hacer posible desprestigiar el cuanto individual. Tales consideraciones ofrecían ciertamente la primera indicación del llamado principio de correspondencia, expresando el propósito de presentar la descripción esencialmente estadística de la física cuántica como una generalización racional de la descripción física clásica.²⁰⁸

La cuantización de los niveles de energía en el átomo resulta incompatible con la teoría corpuscular clásica de la materia. Para esta última, la energía en un sistema de corpúsculos clásicos es una magnitud continua. Toda solución que implique una distribución discontinua de la energía, mediante valores discretos de la misma a través del cuanto de acción, resultaba incompatible con los postulados de la mecánica clásica. "En 1913, Bohr obtiene un esquema general de explicación de los espectros completando la hipótesis de los cuantos de luz con un nuevo postulado incompatible con las nociones clásicas, el de la cuantificación de los niveles de energía de los átomos. Según Bohr, el átomo no se comporta como un sistema clásico susceptible de intercambiar energía de manera continua. No puede existir más que en un cierto número de estados estacionarios o estados cuánticos teniendo cada uno una energía determinada. Se dice que la energía del átomo está cuantificada. No puede variar más que por

208 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, pp. 47-48.

*saltos sucesivos, correspondiendo cada salto a una transición de un estado a otro. Este postulado permite precisar el mecanismo de absorción o de emisión de luz por cuantos. En presencia de radiación luminosa, un átomo de energía E_i puede realizar una transición a un estado de energía superior $E_j (>E_i)$ absorbiendo un fotón $h\nu$ con tal de que la energía total se conserve, o sea $h\nu = E_j - E_i$ igualmente, puede efectuar un paso a un estado de energía inferior $E_k (<E_i)$ emitiendo un fotón $h\nu$ cuya frecuencia satisface la relación $h\nu = E_i - E_k$. Si el átomo se halla en un estado energético más bajo (estado fundamental) no puede irradiar y permanece estable. Así queda explicada la existencia de espectros de rayas características de cada átomo que satisfacen la regla de combinación de Rydberg-Ritz: los términos espectrales son iguales, salvo el factor h , a las energías de los estados cuánticos del átomo.*²⁰⁹

A finales de 1913 Johannes Stark descubrió lo que después sería conocido como *efecto Stark*, Rutherford llamó inmediatamente la atención a Bohr: *"Sólo una nota para llamar su atención sobre el reciente descubrimiento de Stark, de que un campo eléctrico produce una separación de las líneas de hidrógeno y helio muy similar al efecto Zeeman... hice algunos cálculos aproximados, y me parece que usted debe ser capaz de explicar el efecto con su teoría y deducir su magnitud. Creo que ahora le corresponde a usted escribir algo sobre los efectos Zeeman y eléctrico, y si es posible conciliarlos con su teoría.*"²¹⁰

Los efectos Stark y Zeeman, desdoblamiento de las líneas espectrales a consecuencia de la presencia de un campo eléctrico o magnético, respectivamente, trataron de ser explicados en 1914 desde la teoría de Bohr por Emil Warburg²¹¹ y el propio Bohr²¹², sin embargo la solución correcta desde la primera teoría cuántica llegó en 1916, tras haber introducido Sommerfeld las reglas de cuantización, por Paul Epstein²¹³ y Karl Schwarzschild²¹⁴. *"Pero también*

209 MESSIAH, A.: *Mecánica Cuántica*, 2 vols., Madrid, Tecnos, 1983; I vol., p. 20-21.

210 Carta de E. Rutherford a N. Bohr de 11 de diciembre de 1913, en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, p. 589.

211 WARBURG, E.: "Bemerkungen zu der Aufspaltung der Spektrallinien im elektrischen Feld", *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 15, 1913, 1.259-1.266.

212 BOHR, N.: "On the Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines", *Philosophical Magazine*, 27, 1914, pp. 506-524, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 350-368, también reproduce una nota inédita sobre el efecto Stark dirigida al *Philosophical Magazine*, pp. 370-371.

213 EPSTEIN, P.: "Zur Theorie des Starkeffekts", *Physikalische Zeitschrift*, 17, 1916, pp. 148-150.

214 SCHWARZSCHILD, K.: "Zur Quantenhypothese", *Sitzungsberichte der Königlich-*

se encontraban desdoblamientos sin que existiese ningún agente externo, es decir, en los espectros de átomos no perturbados. El primero en conocerse fue la denominada "estructura fina" del espectro del hidrógeno atómico: el hecho de que cuando se examinaban las líneas espectrales de Balmer con una resolución suficientemente elevada, se observaban dos, un "doblete". Posteriormente, llegaron otras estructuras todavía más complejas, con "tripletes", "cuartetos", "quintetos" y, finalmente, "multipletes", grupos que no solo incluían líneas que se separaban en varias, sino conjuntos de líneas de carácter similar²¹⁵. El fenómeno de los multipletes fue descubierto por el físico español Miguel A. Catalán en 1921, según relata él mismo: "En 1921 descubrió [Catalán] que los espectros [en el caso del manganeso] estaban integrados por grupos complejos de líneas que denominó multipletes y que mediante la observación de éstos se podía llegar al descubrimiento de los niveles de energía atómicos"²¹⁶. El fenómeno de la "estructura fina" del espectro del hidrógeno era conocido desde 1887, cuando Albert Michelson y Edward Morley observaron el desdoblamiento de una línea del espectro del hidrógeno, aunque entonces no se le dio mayor importancia²¹⁷.

Los trabajos de James Franck y Gustav Hertz de 1913 sobre la ionización del helio y el mercurio²¹⁸ terminaron por arrojar nuevas evidencias a favor del modelo de Bohr²¹⁹, una vez corregidos los desajustes de las mediciones con las predicciones de la teoría, Bohr en "La teoría cuántica de radiación y la estructura

Presussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1916, pp. 548-568. Sobre esta cuestión ver MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 223-228.

215 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, pp. 305-306.

216 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 332, sobre la aportación de Catalán a la física cuántica ver SÁNCHEZ RON, *Historia de la física cuántica...*, pp. 330-336, y SÁNCHEZ RON, J. M.: *Miguel Catalán. Su obra y su mundo*, Madrid, Fundación Ramón Menéndez Pidal-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1994.

217 MICHELSON, A. y MORLEY, E.: "On a method of making the wavelength of sodium light the actual and practical standard of length", *Philosophical Magazine*, 24, 1887, pp. 463-466.

218 FRANCK, J. y HERTZ, G.: "Messung der Ionisierungsspannung in verschiedenen Gasen", *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 15, 1913, pp. 34-44. FRANCK, J. y HERTZ, G.: "Über Zusammenstöße zwischen Gasmolekülen langsamen Elektronen", *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 15, 1913, pp. 373-390. FRANCK, J. y HERTZ, G.: "Über Zusammenstöße zwischen langsamen Elektronen und Gasmolekülen II", *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 15, 1913, pp. 613-620. FRANCK, J. y HERTZ, G.: "Über die Erregung der Quecksilberresonanzlinie 235.6 μm durch Elektronenstöße", *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 16, 1914, pp. 512-517.

219 MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume I. Part 1. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 197-200.

del Átomo" de 1915 sostenía que si las correcciones por él introducidas eran correctas, entonces si " *las consideraciones anteriores son correctas se verá que las mediciones de Hertz y Franck dan un apoyo muy fuerte a la teoría considerada en el presente trabajo.*"²²⁰

Las reglas de cuantización Bohr-Sommerfeld.

La cuantización de los niveles de energía de los átomos constituye una propiedad de la materia muy general, tal como quedó demostrado por el trabajo experimental de Frank y Hertz sobre los choques inelásticos entre los electrones y los átomos, incompatible con la física clásica. La introducción de la discontinuidad en la Física aparecía a la altura de 1913, después de los trabajos de Planck, Ehrenfest, Einstein y Bohr, como una cuestión central de la Física que entraba en contradicción frontal con los postulados fundamentales de la física clásica. Fue entonces, en 1915, cuando Planck, Arnold Sommerfeld²²¹, Jun Ishiwara²²² y William Wilson²²³ aplicaron una idea introducida por Planck en 1911 en el primer Congreso Solvay referente a la " *descomposición del espacio de fases en áreas de valor igual a h* "²²⁴, Sommerfeld fue el que más lejos llevo el asunto al " *generalizar las condiciones cuánticas (...) de Planck, para que incluyesen sistemas de más de un grado de libertad*"²²⁵. En un artículo posterior²²⁶ Sommerfeld " *introdujo la relatividad especial einsteniana en la formulación de Bohr de 1913; substituyendo, en particular, la masa, m_0 , del electrón que gira entorno al núcleo del hidrógeno, por la correspondiente*

220 BOHR, N.: "On the Quantum Theory of Radiation and the Structure of the Atom", *Philosophical Magazine*, 30, 1915, pp. 393-415, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, pp. 391-413, p. 411.

221 SOMMERFELD, A.: "Zur Theorie der Balmerischen Serie", *Sitzungsberichte der (Kgl.) Bayerischen Akademie der Wissenschaften (München), mathematisch-physikalische Klasse*, 1915, pp. 425-458.

222 ISHIWARA, J.: "Die universelle Bedeutung des Wirkungsquantums", *Tokyo Sugaku Buturiggakkakiwi Kizi*, 8, 1915, pp. 106-116.

223 WILSON, W.: "The Quantum Theory of Radiation and Line Spectra", *Philosophical Magazine*, 29, 1915, pp. 795-802.

224 MEHRA, J. y RECHENBERG, H: *The Historical Development of Quantum Theory. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundations and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*", 2 vols., New York, Springer-Verlag, 1982, vol. I, pp. 206-219.

225 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 307.

226 SOMMERFELD, A.: "Zur Quantentheorie der Spektrallinien", *Annalen der Physik*, 51, 1916, pp.1-94.

expresión relativista $\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ ²²⁷

Con ello Sommerfeld lograba explicar la existencia de los desdoblamientos de las líneas espectrales por los efectos relativistas. *"Por esta razón, la separación en las rayas espectrales es solo leve y únicamente se puede detectar por los medios espectroscópicos más refinados"*²²⁸, quedaba así explicada la "estructura fina" del espectro de los átomos. El trabajo de Sommerfeld fue interpretado como una prueba a favor de la teoría cuántica del átomo de Bohr y, a su vez, como una validación de la relatividad especial de Einstein, cuando ésta todavía no había sido universalmente aceptada por los físicos²²⁹. *"El éxito de la teoría Bohr-Sommerfeld para la estructura fina de las líneas de Balmer no hizo sino reforzar entre la comunidad científica el interés por este tipo de estudios teóricos de los problemas cuánticos... Einstein... comenzó a creer realmente en la teoría de Bohr cuando conoció los resultados de Sommerfeld de 1916."*²³⁰ Y, sin embargo, la teoría de Bohr-Sommerfeld era incorrecta y desconocía la existencia del espín, introducido en 1925 por George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit²³¹, a pesar de lo cual los resultados para el hidrógeno resultaban correctos, fue *"una de las coincidencias más afortunadas en la historia de la física"*²³². Sobre las reglas de cuantización Sommerfeld escribió años después, en 1923, *"seleccionan de entre la variedad continua de todas las posiciones posibles de las órbitas en el espacio un número discreto de órbitas que obedecen a ciertas condiciones cuánticas"*²³³. El asunto no dejaba de tener bastante de artificial, hasta el punto de que el propio Sommerfeld reconocía que *"parece casi como magia"*, pero años después,

227 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 306.

228 SOMMERFELD, A.: "Zur Quantentheorie der Spektrallinien", *Annalen der Physik*, 51, 1916, citado en SÁNCHEZ RON, p. 312.

229 KRAGH, H.: "The fine structure of hydrogen and the gross structure of the physics community, 1916-1926", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 15 (2), 1985, pp. 67-125.

230 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 314.

231 UHLENBECK, G. y GOUDSMIT, S.: "Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons", *Naturwissenschaften*, 13, 1925, pp. 953-954.

232 KRONING, R.de L.: "The turning point", en FIERZ, M. y WEISSKOPF, V. F. (eds.): *Theoretical Physics in the Twentieth Century. A Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, New York, Interscience Pub., 1960, (pp. 5-39), p.8, citado en SÁNCHEZ RON, p. 314.

233 SOMMERFELD, A.: *Atomic Structure and Spectral Lines*, London, Methuen, 1923, p. 242, versión en inglés de la 3ª edición de *Atombau und Spektrallinien*, 1922, citado en SÁNCHEZ RON, p. 315. Sobre las reglas de cuantización Bohr-Sommerfeld ver MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 1. Part I. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundations and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*, New York, Springer-Verlag, 1982, pp. 213-224.

en 1922, Walther Gerlach y Otto Stern ofrecieron "*la prueba experimental directa de la cuantización direccional en un campo magnético*"²³⁴.

La primera teoría cuántica se configuró como un método general de cálculo de las magnitudes cuantizadas basadas en la hipótesis de Bohr y en el *principio de correspondencia*. En esencia se aceptaba que los sistemas de partículas materiales obedecían a las leyes de la mecánica clásica; a lo que se añadía el postulado de que de todas las soluciones de las ecuaciones del movimiento sólo debían ser consideradas aquellas que satisfacían ciertas reglas *ad hoc* de cuantización. Se seleccionaba así una familia discontinua de movimientos, que eran por hipótesis los únicos movimientos reales. Cada uno de estos movimientos tenía un valor determinado de energía, la serie discontinua de los valores de energía correspondientes representaba el espectro de los niveles de energía cuantizados, obteniéndose un espectro discreto de valores posibles para cualquier otra constante del movimiento.

La determinación de las *reglas de cuantización* constituía, pues, el problema central de la teoría. La solución al mismo se obtenía mediante un proceso intuitivo, se postulaban determinadas reglas y se comparaban los espectros de magnitudes cuantizadas con los resultados experimentales. A través de este proceso era posible determinar las trayectorias posibles del espacio de fases y las energías cuantizadas correspondientes. *"Sin embargo es una teoría incompleta [se refiere a la primera teoría cuántica]. Las reglas de Bohr - Sommerfeld no se aplican más que a sistemas periódicos y multiperiodicos. No existe ningún método de cuantificación de los movimientos aperiódicos. Así, el mecanismo de un experimento tan fundamental como el Frank y Hertz carece totalmente de explicación: la teoría de Bohr-Sommerfeld da los niveles de energía cuantificados del blanco atómico, pero no existe ningún tratamiento teórico que indique la trayectoria seguida realmente por el electrón y que describa con detalle el choque inelástico entre el electrón y el átomo que hace de blanco. Por regla general todos los fenómenos de choque se salen del cuadro de la teoría. Incluso en el cálculo de los términos espectrales, el éxito de la teoría se limita a los sistemas más simples; en cuanto se trata de plantear rigurosamente el problema de la cuantificación de los átomos complejos se presentan múltiples dificultades; existen incluso casos de desacuerdos flagrantes, como el del espectro del helio (no ionizado) o el del efecto Zeeman anormal. Además, la teoría no está exenta de ambigüedad o de contradicciones... Pero las dificultades de la Antigua Teoría de los Cuantos son aún más graves que todas estas lagunas y contradicciones. Las reglas de*

234 GERLACH, W. y STERN, O.: "Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung", *Zeitschrift für Physik*, 9, 1922, (pp. 349-352), p. 352.

*cuantificación son restricciones puramente formales impuestas a las soluciones de las ecuaciones clásicas del movimiento; han sido determinadas de modo totalmente empírico. Esta cuantificación de las trayectorias clásicas carece completamente de justificación profunda. De hecho, la noción misma de trayectoria es difícilmente compatible con el fenómeno de la cuantificación. E implica que la partícula posea en cada instante una posición y un impulso bien definidos y que estas cantidades varíen de manera continua, a lo largo del tiempo... y, por tanto, es necesario renunciar a la idea de intercambio de energía, por cuantos, con un átomo como blanco, en otras palabras, renunciar a la cuantificación de los niveles de energía del átomo que actúa como blanco. Inversamente, postular esta cuantificación viene a ser como abandonar la idea (clásica) de una trayectoria concreta del electrón y, lógicamente, la idea de trayectoria en general... De todos modos nos vemos obligados a renunciar a las ecuaciones clásicas del movimiento; en estas condiciones, nos planteamos qué sentido físico se puede dar a las soluciones de estas ecuaciones del movimiento que son las trayectorias cuantificadas de los átomos.*²³⁵

Einstein y el carácter probabilístico de la teoría cuántica.

En 1916 Einstein en sus artículos "Emisión y absorción de radiación en teoría cuántica" y "Sobre la teoría cuántica de la radiación" se ocupó de la teoría de Bohr de 1913, en el segundo afirmaba: "La ecuación $[\varepsilon_m - \varepsilon_n = h\nu]$ constituye, como es bien sabido, la segunda regla principal en la teoría de Bohr de los espectros, y tras haber sido completada por Sommerfeld y Einstein, se la puede considerar como una parte establecida de nuestra ciencia"²³⁶ en el primero Einstein desarrolló una ley estadística para explicar la emisión y absorción de la radiación atómica a partir de la formulación de Bohr²³⁷, "fue entonces cuando las consideraciones probabilísticas entraron en la física cuántica... con su contribución de 1916 (cuyos resultados han desafiado el paso del tiempo, manteniéndose en sus puntos y planteamientos básicos en la actualidad), Einstein dio un paso adelante... Bohr, es cierto, había introducido la noción de transiciones entre niveles energéticos atómicos... pero no había dicho nada acerca de cuando se producían realmente estas transiciones, esto es, acerca de su dinámica temporal"²³⁸.

235 MESSIAH, A.: *Mecánica Cuántica*, 2 vols., Tecnos, Madrid, 1983, vol. I, pp. 36-37.

236 EINSTEIN, A.: "Zur Quantentheorie der Strahlung", *Physikalische Gesellschaft Zürich, Mitteilung*, 18, 1916, (pp. 47-62), p. 53, también publicado en *Physikalische Zeitschrift*, 18, 1917, pp. 121-128, citado en SÁNCHEZ RON, p. 286.

237 EINSTEIN, A.: "Strahlungs –Emission und –Absorption nach der Quantentheorie", *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, 18, 1916, pp. 318-323.

238 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 322.

Este pasó lo dio Einstein en 1916, cuando supuso que debía existir una determinada probabilidad de que el sistema en el estado estacionario de mayor energía pasara espontáneamente en un intervalo de tiempo a un estado estacionario de energía menor, a la vez que en presencia de radiación existe una cierta probabilidad de pasar de un estado estacionario a otro, de uno de mayor a menor energía y viceversa, probabilidad proporcional a la radiación existente en el entorno del átomo. *"Recientemente, sin embargo, ha logrado EINSTEIN... dar una consistente e instructiva deducción de la fórmula de Planck mediante la introducción de determinadas hipótesis acerca de la probabilidad de transición de un sistema entre dos estados estacionarios y acerca de la manera en que ésta posibilidad depende de la densidad de radiación de la correspondiente frecuencia en el espacio circundante, sugiriendo una analogía con la teoría de la radiación ordinaria [clásica]. EINSTEIN compara la emisión o absorción de la radiación de frecuencia ν , correspondiente a la transición entre dos estados estacionarios, con la emisión o absorción que se espera en la electrodinámica ordinaria [clásica] para un sistema consistente en una partícula que ejecute vibraciones armónicas en esta frecuencia. En analogía con el hecho de que en esta última teoría [electrodinámica clásica] un sistema tal sin estar sometido a excitación externa, emite una radiación de frecuencia ν , EINSTEIN supone, en primer lugar, que según la teoría cuántica habrá una cierta probabilidad $A_{n',n} dt$ de que el sistema en el estado estacionario de mayor energía, caracterizado por la letra n' , en el intervalo de tiempo dt empezará espontáneamente a pasar a un estado estacionario de menor energía, caracterizado por la letra n ... En analogía con este supuesto, EINSTEIN asume en segundo lugar que la presencia de una radiación en el espacio circundante, el sistema según la teoría cuántica, además de la mencionada probabilidad de transición espontánea del estado n' al estado n , posee una cierta probabilidad, en función de esta radiación, de pasar en el intervalo temporal dt del estado n' al estado n , así como del estado n' al estado n "*²³⁹.

Einstein finalizaba su artículo *Sobre la teoría cuántica de la radiación* con las siguientes palabras premonitorias: *"Estos aspectos de los procesos elementales parece que hacen casi inevitable el desarrollo de una teoría propiamente cuántica de la radiación. Su debilidad reside en el hecho de que, de un lado, no nos ofrece conexión más estrecha con los conceptos ondulatorios, y de otro, deja al azar el instante y la dirección de los procesos elementales; no obstante,*

239 BOHR, N.: "On the Quantum Theory of Line Spectra", *København, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Skrifter. Naturvidenskabeling og matematisk Afdeling*, 1918, (pp. 1-36), pp. 6-7, reproducido en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, (pp. 67-102), pp. 72-73.

*tengo plena confianza de que nos encontramos en el buen camino.*²⁴⁰ Lo paradójico del asunto es que Einstein algunos años después se mostró contrario al carácter probabilístico de la teoría cuántica, que él había introducido en sus artículos de 1916.

El principio de correspondencia de Bohr.

Ya hemos señalado que el modelo atómico de Bohr de 1913 conjugaba en un mismo corpus teórico dos concepciones de la física incompatibles entre sí, la mecánica y el electromagnetismo clásico y la teoría cuántica. Dicha incompatibilidad se manifestaba en las concepciones enfrentadas sobre el electrón de una y otra teoría. Según la mecánica y el electromagnetismo clásicos la órbita del electrón debía ser una órbita elíptica alrededor núcleo, que de acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell debería estar cediendo de manera continua energía en el transcurso de su movimiento orbital. Mientras, la teoría cuántica sostenía que el electrón se encuentra en una órbita estacionaria en la que la emisión o absorción de energía se produce en la transición de una órbita estacionaria a otra (de mayor energía si absorbe energía, de menor energía si emite energía), dichas transiciones de energía se producen de forma cuantizada, esto es mediante la absorción o emisión de cuantos de energía.

Como se puede comprobar la incompatibilidad de ambas teorías es manifiesta, sin embargo Bohr se vio obligado a mantener ambas dentro de su modelo atómico al no poder renunciar a la mecánica y el electromagnetismo clásicos. La situación era lo suficientemente contradictoria como para que numerosos físicos no aceptaran en un principio dicho modelo atómico. Sólo cuando las pruebas experimentales, a raíz de los trabajos de Frank y Hertz en 1914, Millikan en 1916 y Compton en 1922, hicieron incuestionable la teoría cuántica de Bohr, el nuevo modelo atómico tuvo que ser admitido, aunque las reticencias y las dificultades no desaparecieron hasta el establecimiento de la mecánica cuántica en 1925-1926. Fue la necesidad de conciliar dos teorías cuyos fundamentos resultaban incompatibles lo que condujo a Niels Bohr a formular su *principio de correspondencia*, que posteriormente, en 1927, reformularía en el *principio de complementariedad*. *"Bohr no solamente reconocía a la perfección la profunda grieta existente en el esquema conceptual de su teoría, sino que estaba convencido de que no se podría progresar en la teoría cuántica a menos que los análisis teóricos dedicasen especial atención a la antítesis entre las concepciones cuánticas teóricas y las concepciones clásicas. El intentaba, por tanto, profundizar tanto como pudiese en la búsqueda de las raíces de esta antítesis.*

240 EINSTEIN, A.: "Quantentheorie der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift*, vol. 18, 1917, pp. 127-128.

Fue durante la búsqueda de estos conceptos fundamentales cuando introdujo la concepción revolucionaria de estados "estacionarios", "indicando con ello que constituyen una especie de zonas de espera entre las cuales tiene lugar la emisión de las diferentes líneas espectrales."²⁴¹

En una comunicación del 20 de diciembre de 1913 a la Sociedad de Física de Copenhague, titulada *Sobre el espectro del hidrógeno*, ya apuntaba Bohr su aproximación que desembocaría en el *principio de correspondencia*: *"Antes de terminar sólo quiero decir que espero haberme expresado con suficiente claridad a fin de que aprecien la extensión con que estas consideraciones están en conflicto con el admirablemente coherente conjunto de concepciones de lo que correctamente se ha denominado la teoría clásica de la electrodinámica. Por otra parte, haciendo hincapié en este conflicto, he tratado de transmitir a ustedes la impresión de que puede ser posible también en el curso del tiempo descubrir una cierta coherencia en las nuevas ideas."²⁴²*

En un principio Bohr confiaba en que fuese posible resolver el conflicto entre ambas teorías, recurriendo al límite en el que los resultados de ambas se confundían, o dicho con otras palabras: *"La Teoría Cuántica debe tender asintóticamente hacia la Teoría Clásica en el límite de los grandes números cuánticos."²⁴³*

Era una esperanza, mediante la cual arbitrar, al menos, una solución provisional para dos teorías incompatibles entre sí pero necesarias para explicar las propiedades del átomo. *"Para órbitas muy grandes del electrón en el átomo de hidrógeno, por ejemplo, los estados estacionarios vecinos permitidos en el modelo de Bohr se juntan mucho. Se puede mostrar con facilidad que sobre la base de las nociones cuánticas una transición entre tales órbitas produce una radiación precisamente de la misma frecuencia que la que sería de esperar para una partícula cargada que describiese órbitas formando parte de una corriente en una antena circular y, además, la frecuencia de radiación sería igual a la*

241 JAMMER, M.: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 1966, p. 87.

242 BOHR, N.: "Om Brintspektret", *Fysisk Tidsskrift*, 12, 1914, p. 97, publicado en inglés como el primero de los tres ensayos de BOHR, N.: "On the spectrum of Hydrogen (1924)", en *The Theory of Spectra and Atomic Constitution*, Cambridge, Cambridge University Press, 1922, (pp. 1-19), p. 19, reproducido en HOYER, U. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 2. *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1981, (pp. 283-301), p. 301. Sobre la cuestión llamó la atención J. Rud Nielsen en la introducción al volumen III, NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, p. 4.

243 MESSIAH, A.: *Mecánica Cuántica*, 2 vols., Tecnos, Madrid, 1983, I vol., p. 26

*frecuencia de revolución de la órbita. Por tanto, para "átomos" suficientemente grandes y, recíprocamente, para circuitos suficientemente pequeños reducidos a escala a partir del tamaño normal en que se realizan los experimentos eléctricos, se obtiene una coincidencia o correspondencia entre las predicciones de las dos teorías. De esta manera, la física clásica se convierte en el caso límite de la física cuántica, más compleja: nuestros experimentos más corrientes, a gran escala, no muestran su carácter cuántico inherente simplemente porque las transiciones en este caso tienen lugar entre estados caracterizados por números cuánticos altos. En esta situación, el cuanto de acción con respecto a las energías implicadas en este caso, en lugar de tener un valor finito, es prácticamente cero, y se pierde el carácter discreto de los acontecimientos individuales, debido a su gran número, experimentándose solamente en continuo.*²⁴⁴

Como señaló Louis de Broglie en su obra *La Physique Nouvelle et les Quanta*, publicada en 1937: *"Bohr ha notado que la teoría electromagnética es siempre verificada muy aproximadamente en el dominio de los fenómenos macroscópicos. Ahora bien, desde el punto de vista cuántico, los fenómenos macroscópicos son aquellos en los que intervienen números de cuantos elevados. Esto hace probable que las previsiones de la teoría cuántica deban tender asintóticamente hacia las de la teoría clásica en el dominio de los grandes números cuánticos. Es, pues, en este dominio donde debe operarse la unión entre las dos teorías... Consideremos, pues, en el átomo cuantificado una trayectoria electrónica muy exterior que corresponda a grandes valores de los números cuánticos, y consideremos simultáneamente la misma trayectoria electrónica en el átomo clásico ficticio... Se advierte entonces que cada frecuencia prevista por la teoría clásica para el átomo ficticio, corresponde a una cierta transición del átomo cuantificado dando lugar a la emisión de la misma frecuencia. Así, en el dominio de los grandes números cuánticos, hay coincidencia entre las frecuencias emitidas conforme al mecanismo clásico y las frecuencias que el electrón cuantificado puede emitir al sufrir una transición. Sólo que, mientras que cada átomo clásico emite continua y simultáneamente cada una de las frecuencias en cuestión, el átomo cuantificado no puede emitir más que una sola en cada acto individual. Pero esta diferencia profunda entre los mecanismos de emisión no impide que el resultado global sea el mismo: los dos conjuntos de átomos que comparamos con el pensamiento emiten (en el dominio de los grandes números cuánticos), las mismas rayas espectrales... Si se admite con Bohr que la intensidad de la raya espectral considerada emitida por el segundo conjunto debe ser igual a la intensidad calculada clásicamente de la misma raya espectral para el primer conjunto, se puede evaluar la probabilidad*

244 HOLTON, G.: "Los orígenes de la complementariedad", en HOLTON, G.: *Ensayos sobre el pensamiento en la época de Einstein*, Madrid, Alianza, 1982, pp. 135-136.

de la transición cuántica con ayuda de las fórmulas de la teoría electromagnética. De este modo se resuelve el problema de prever, al menos para los grandes números cuánticos, la intensidad de las rayas espectrales. Lo que faltaba a la teoría primitiva de Bohr para hacer esta previsión, era una manera de evaluar las probabilidades de transición cuántica. La idea de establecer una correspondencia entre cada una de estas transiciones cuánticas y los componentes armónicos de la radiación clásica, conducía en los límites del caso asintótico considerado, a una regla simple y rigurosa para evaluar estas probabilidades de transición... No podemos explicar aquí detalladamente cómo Bohr ha intentado dar una forma precisa a este principio de correspondencia. Diremos solamente que considera una cierta medida de las magnitudes clásicas tomadas sobre el conjunto de los estados (no estacionarios) que son intermedios entre el estado estacionario inicial y el estado estacionario final que corresponden a la raya espectral considerada (Aunque el principio de correspondencia formulado así haya conducido a resultados interesantes y generalmente exactos, se tenía la impresión de que su enunciado conservaba un carácter un poco artificial y que no había podido encontrar en el marco de la antigua teoría de los cuantos su fórmula definitiva),²⁴⁵

El propio Bohr relató años después como surgió el *principio de correspondencia*: "De hecho, la propia idea de estados estacionarios es incompatible con toda regla que fije una elección entre tales saltos [de un nivel de energía a otro], y sólo deja lugar para la noción de probabilidad relativa de los procesos individuales de transición. La única guía para calcular tales probabilidades era el principio de correspondencia, el cual tuvo su origen en el intento de buscar la conexión más íntima posible entre la descripción estadística de los procesos atómicos y las consecuencias de la teoría clásica, que deben resultar válidas en el límite cuando las acciones puestas en juego en todas las fases del análisis del fenómeno sean grandes comparadas con el cuanto universal."²⁴⁶

Si bien Bohr trató de resolver el conflicto entre la teoría cuántica y la teoría clásica desde el momento de la formulación de su teoría, no llegó a formular el *principio de correspondencia* de manera clara y taxativa hasta varios años después, entre 1918 y 1923, aunque ya lo apuntó, como hemos señalado, en su comunicación a la Sociedad de Física de Copenhague de diciembre de 1913. Entre 1918 y 1922 publicó una serie de trabajos bajo el título "*Sobre la teoría*

245 BROGLIE, L. de: *La física nueva y los cuantos*, 1ª ed. en francés 1937; edición en castellano Buenos Aires, Losada, 1965, pp. 136-139.

246 BOHR, N.: "Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica", publicado originalmente en la obra colectiva en homenaje a Einstein SCHILPP, P. A. (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, La Salle, Open Court, 1949, pp. 199-243; reproducido en español en BOHR, N.: *Física atómica y conocimiento humano*, Madrid, Aguilar, 1964, p. 43.

cuántica de líneas espectrales"²⁴⁷ en los que ya apuntaba el principio de correspondencia. "Tal intento ha sido llevado a cabo en este trabajo, y se demostrará que parece posible arrojar cierta luz sobre las dificultades pendientes mediante una analogía lo más estrechamente posible entre la teoría cuántica y la teoría ordinaria [clásica] de la radiación"²⁴⁸.

Más adelante Bohr, tras sacar a relucir el artículo de Einstein de 1916, en el que introducía la probabilidad para describir la transición de un sistema entre dos estados estacionarios, planteaba la utilización de un razonamiento similar para determinar las líneas del espectro de un elemento. "En el siguiente análisis de la aplicación de la teoría cuántica para determinar las líneas del espectro de un determinado sistema, que, al igual que en la teoría térmica de radiación, no sea necesario introducir hipótesis detalladas respecto de los mecanismos de transición entre dos estados estacionarios. Vamos a demostrar, sin embargo, que las condiciones que se utilizarán para determinar los valores de la energía en los estados estacionarios son del tipo de frecuencias calculadas por $E' - E'' = h\nu$, en el límite donde los movimientos en estados estacionarios sucesivos difieren comparativamente muy poco unos de otros, tienden a coincidir con las frecuencias que se esperan en la teoría de radiación ordinaria [clásica] para el movimiento del sistema en los estados estacionarios."²⁴⁹ Llegando a la conclusión de que los resultados clásicos y cuánticos tienden a coincidir para valores grandes de n . "Ésta es una formulación simple del Principio

247 BOHR, N.: *On the Quantum Theory of Line Spectra*, parts I-III, København, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Skrifter. Naturvidenskabeling og matematisk Afdeling, 1918-1922, pp. 1-118, reproducido en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, pp. 67-184. Sobre el desarrollo del principio de correspondencia por parte de Bohr ver el estudio preliminary de J. Rud Nielsen, pp. 3-46. En su conferencia ante la Sociedad Física Alemana de Berlín, pronunciada el 27 de abril de 1920, dedicó un apartado al principio de correspondencia, reproducida en inglés BOHR, N.: "On the Series Spectra of the Elements" en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, pp. 241-282.

248 BOHR, N.: "On the Quantum Theory of Line Spectra", København, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Skrifter. Naturvidenskabeling og matematisk Afdeling, 1918, (pp. 1-36), p. 4, reproducido en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, (pp. 67-102), p. 70.

249 BOHR, N.: "On the Quantum Theory of Line Spectra", København, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Skrifter. Naturvidenskabeling og matematisk Afdeling, 1918, (pp. 1-36), p. 7-8, reproducido en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, (pp. 67-102), pp. 73-74.

de Correspondencia.²⁵⁰

En 1920 utilizó por vez primera el término *principio de correspondencia* en una sesión de la Sociedad Alemana de Física²⁵¹. En el Congreso Solvay de 1921, dedicado a la teoría atómica, bajo el título de *átomos y electrones*, el principio de correspondencia de Bohr fue objeto de una comunicación de Paul Ehrenfest, en la que señalaba que Bohr trataba de establecer “entre los movimientos del átomo y la radiación por él emitida, al menos una correspondencia... Para encontrar esta correspondencia, Bohr se deja guiar por el principio heurístico siguiente: cuando damos a los números cuánticos de un sistema cuántico valores cada vez más elevados, la radiación emitida tiende asintóticamente hacia los valores que el sistema emitiría según las reglas clásicas.”²⁵²

En su artículo “Sobre la aplicación de la teoría cuántica a la estructura atómica. II. Teoría de las series espectrales” de 1923²⁵³, Bohr desarrolló de forma completa la argumentación del *principio de correspondencia*. Entre tanto, el modelo atómico de Bohr había superado las resistencias iniciales y gozaba de la aceptación de la comunidad de físicos, sin que ello supusiera la eliminación de la polémica sobre las consecuencias que para los fundamentos de la física presentaban los presupuestos de dicha teoría. Ello fue posible merced a las

250 SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, p. 324.

251 BOHR, N.: “Über die Serienspektren der Elemente”, *Zeitschrift für Physik*, 2, 1920, pp. 423-469, versión en inglés BOHR, N.: “On the Series Spectra of the Elements. Lecture before the German Physical Society in Berlin (27 April 1920), Essai II, 1922, (pp. 20-60), pp. 27-29, reproducido en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, (pp. 67-102), (pp. 241-282), pp. 249-251.

252 EHRENFEST, P.: “Le principe de correspondance”, *Atomes et électrons. Rapports et discussions du Conseil de Physique, tenu a Bruxelles du 1^{er} au 6 Avril 1921, sous les auspices de l’Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars, 1923, pp. 248-261, existe reimpresión en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, (pp. 381-395), p. 381; en el mismo la comunicación de Bohr se tituló BOHR, N.: “L’application de la théorie des quanta aux problèmes atomiques”, pp. 228-254, existe reimpresión en inglés BOHR, N.: “On the application of the quantum theory to atomic problems”, en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, pp. 364-380, donde se refiere al principio de correspondencia, p. 378.

253 BOHR, N.: “Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau. II. Theorie der Serienspektren”, *Zeitschrift für Physikalische*, vol. 13, 1923, p. 117-147, reproducido en inglés en BOHR, N.: “On the Application of the Quantum Theory to Atomic Structure. II. Theory of the Series Spectra”, en NIELSEN, J. R. (ed.): *Niels Bohr. Collected works*, vol. 3. *The correspondence principle (1918-1923)*, ROSENFELD, L. (general editor), Netherlands, North-Holland Pub. Co., Amsterdam-New York-Oxford, 1976, pp. 532-558.

incontestables pruebas experimentales en favor de la cuantización de los niveles de energía en el átomo. Entre ellas destacaban: el descubrimiento, en el otoño de 1913, por Stark del efecto que producen los campos eléctricos en la estructura de las rayas del espectro del hidrógeno; los experimentos de Franck y Hertz, publicados en 1914, sobre la excitación de los átomos por impacto electrónico; la introducción de los números cuánticos en la explicación de los espectros de rayas realizada por William Wilson en 1915, la cuantización del momento cinético y de la acción en el movimiento radial del electrón realizada por Sommerfeld en 1916, que permitió una interpretación detallada de la estructura fina de las rayas observadas en los espectros del átomo de hidrógeno y del helio ionizado; el efecto que producen los campos magnético y eléctrico en el espectro de hidrógeno sobre la base de los métodos de cuantización de sistemas multiperiodicos realizados por Sommerfeld y Epstein; la explicación dada por Hendrik Kramers de las variaciones aparentemente caprichosas en las intensidades de las componentes del efecto Stark de las rayas de hidrógeno; la clasificación realizada por Manne Siegbahn de los estados estacionarios en los átomos constituidos por varios electrones; el trabajo de Einstein sobre el equilibrio radiante publicado en 1917, en el que demostró que la ley de Planck para la radiación térmica podía deducirse simplemente a partir de hipótesis que concuerdan con los fundamentos de la teoría cuántica sobre la constitución atómica; el descubrimiento del efecto Stern-Gerlach en 1922, que proporcionó una fuerte validación a la idea de los estados estacionarios y a la teoría cuántica del efecto Zeeman desarrollada por Sommerfeld, etcétera²⁵⁴.

En este contexto el *principio de correspondencia* se ofrecía como la única alternativa disponible para conciliar la fuerte evidencia experimental, en la que descansaba la teoría atómica de Bohr. *"El principio de correspondencia ha permitido calcular, por lo menos aproximadamente, las intensidades de las diversas rayas espectrales, sea en los espectros normales, sea en los espectros modificados por efecto Stark o Zeeman. El resultado de estos cálculos ha estado, en general, en acuerdo satisfactorio con la experiencia... Cuando se conoce el conjunto de los estados estacionarios, y por consiguiente los términos espectrales de un átomo, se obtiene inmediatamente el conjunto de las rayas*

254 BORN, M.: *Atomic Physics*, 6ª ed., Glasgow, Blackie, 1957; JAMMER, M.: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 1973; MEHRA, J. y RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties: 1900-1925*, 2 vols., New York, Springer-Verlag, 1982; HUND, F.: *The History of Quantum Theory*, London, George G. Harrap, 1974; WHITTAKER, E.: *A History of the Theories of Aether and Electricity*, vol. II: *The Modern Theories, 1900-1926*, Edinburg, Thomas Nelson, 1953, reimpresión en New York, Humanities Press, 1973; RAMUNNI, G.: *Les conceptions quantiques de 1911 à 1927*, Paris, Vrin, 1981.

espectrales que puede emitir el átomo combinando los términos espectrales de dos en dos conforme a la regla de Bohr. Ahora bien, si se compara el cuadro de las rayas así obtenido con la lista de las rayas que figuran realmente en los espectros, se advierte que todas las rayas previstas no son emitidas efectivamente. En otros términos, todas las frecuencias de las rayas espectrales reales pueden ser previstas por la combinación de los términos espectrales; pero lo inverso no es verdad y toda combinación de los términos espectrales no siempre suministra una frecuencia realmente representada en el espectro. La teoría debe, pues, poder suministrar reglas de selección que permitan decir cuáles son, entre las combinaciones de los términos espectrales, aquellas que corresponden a las rayas emitidas efectivamente. Para esto, se interpreta la ausencia en los espectros reales de ciertas rayas previstas por combinación suponiendo que estas rayas, teóricamente existentes son, en las circunstancias usuales, emitidas con una intensidad nula. Lo que confirma esta opinión, es que circunstancias excepcionales, por ejemplo bajo la acción de perturbaciones eléctricas particularmente intensas, el átomo llega a emitir esas rayas habitualmente ausentes de su espectro. El principio de correspondencia permite demostrar que, en las circunstancias usuales, la intensidad de las rayas espectrales ligadas a ciertas transacciones es nula, lo que quiere decir que la probabilidad para que un átomo sufra esta transición es nula. Así, entre los números cuánticos que definen una trayectoria electrónica estable, hay uno que es llamado el número cuántico azimutal. El principio de correspondencia permite mostrar que solamente las transiciones en que este número azimutal varía en una unidad en más o menos, tienen una probabilidad no nula de producirse en las circunstancias usuales... El principio de correspondencia ha prestado un precioso servicio mostrando la significación teórica de estas reglas de selección cuya primera justificación había sido propuesta por otra parte partiendo de otras consideraciones (Rubinovicz)²⁵⁵ [se refiere al trabajo de Adalbert Rubinowicz sobre la regla de selección de los estados inicial y final de los números cuánticos azimutales, k y k']²⁵⁶.

La primera teoría cuántica no dejaba de presentar graves dificultades teóricas, fundamentadas en la necesidad de recurrir alternativamente a dos teorías cuyos fundamentos epistemológicos resultaban incompatibles entre sí. Dificultades que no fueron superadas por el enunciado, por parte de Bohr, del *principio de correspondencia*, que no dejaba de ser un artificio, útil pero artificio al fin y al cabo, para tratar de compatibilizar dos teorías contrapuestas en el caso límite de los grandes números cuánticos. *"Desgraciadamente toda esta notable manera de*

255 BROGLIE, L. de: *La física nueva y los cuantos*, pp. 139-141.

256 RUBINOWICZ, A.: "Bohrsche Frequenzbedingung und Erhaltung des Impulsmomentes", *Physikalische Zeitschrift*, 19, 1918, pp. 441-445.

*poner de acuerdo imágenes en apariencia inconciliables, para llenar las lagunas de la teoría cuántica, sólo era valedera en el dominio de los grandes números cuánticos. Ahora bien, prácticamente, para la teoría del átomo, este dominio es el menos interesante, pues, fuera de ciertos estados de excitación completamente excepcionales, los electrones atómicos son siempre estados estacionarios correspondiendo a valores poco elevados de los números cuánticos, y las rayas espectrales usuales son emitidas cuando ocurren transiciones entre tales estados. No hay ninguna relación simple entre la frecuencia cuántica real y las frecuencias de las que la teoría clásica prevé la emisión para un átomo en estado correspondiente al estado inicial antes de la transición o al estado final después de la transición.*²⁵⁷

La primera teoría cuántica a pesar de sus dificultades teóricas posibilitó, pues, un amplio desarrollo del conocimiento de la estructura atómica y de sus propiedades. *"La Antigua Teoría de los Cuantos... ha permitido hacer progresos considerables en el conocimiento de los espectros, suministrando una valoración correcta de los términos espectrales de un gran número de sistemas atómicos y moleculares. Se puede generalizar fácilmente a los hidrogenoideos (He^+ , Li^{++}) y a los átomos alcalinos el modo de tratar el átomo de hidrógeno. La teoría se aplica igualmente a los espectros de vibración y de rotación de las moléculas, a los espectros X de los átomos y al efecto Zeeman normal. Esta teoría, completada con la teoría semiclásica de la interacción entre materia y radiación, da igualmente las distintas reglas de selección y las probabilidades de los distintos saltos cuánticos posibles"*²⁵⁸.

Sin embargo, la primera teoría cuántica contenía importantes contradicciones internas que entraban en fuerte conflicto con la noción de teoría física acabada, esto es sin hipótesis *ad hoc* y, sobre todo, sin conflictos internos. La primera teoría cuántica contenía una serie de inconsistencias y lagunas que debían ser resueltas para comprender a fondo los mecanismos y leyes que rigen el nivel atómico. Fue gracias a la misma, y en buena medida a dichas inconsistencias, como se pudieron resolver de una forma satisfactoria las dificultades teóricas en ella contenida, dando lugar al nacimiento de la mecánica cuántica o segunda teoría cuántica, merced a los denodados esfuerzos de un amplio número de físicos que se enfrentaron en los años veinte con las insuficiencias de la *primera teoría de los cuantos*.

De entre todas las dificultades de la primera teoría cuántica, la relativa a la explicación del fenómeno de la dispersión de la luz presentaba enormes

257 BROGLIE, L. de: *La Física nueva y los Cuantos*, p. 138.

258 MESSIAH, A.: *Mecánica Cuántica*, vol. I, p. 35.

problemas para ser interpretado desde la perspectiva cuántica. Tal como se había comprobado experimentalmente el índice de refracción varía en función de la frecuencia de la luz, presentando importantes perturbaciones en la proximidad de ciertas frecuencias críticas que coinciden con las frecuencias de las rayas espectrales del elemento considerado. La teoría clásica daba cuenta con bastante exactitud del índice de refracción, permitiendo explicar el fenómeno de la dispersión. La teoría electrónica de Lorentz conseguía hallar una fórmula de dispersión en perfecto acuerdo con las observaciones experimentales. Por el contrario, en la teoría atómica cuántica de Bohr las frecuencias mecánicas de revolución de los electrones en sus órbitas no tienen ninguna relación simple con las frecuencias ópticas de las rayas espectrales ligadas a las transiciones y no a los estados estacionarios. Debido a ello resultaba muy difícil dar con una explicación satisfactoria por la que la perturbación del estado mecánico del átomo por una onda luminosa exterior fuese origen de un fenómeno de dispersión, en el que el papel esencial es desempeñado por las frecuencias ópticas de sus rayas espectrales y no por las frecuencias mecánicas del átomo. "El primer paso hacia una formulación general del principio de correspondencia lo proporcionó el problema de la dispersión óptica."²⁵⁹

La primera teoría cuántica se encontraba aquí con un problema, que ya había sido planteado en 1905 por Einstein en su artículo sobre el efecto fotoeléctrico²⁶⁰, la dualidad existente entre el comportamiento ondulatorio y corpuscular de la luz, dualismo que se enfrentaba radicalmente con las concepciones dominantes en la física de la época, en las que la teoría ondulatoria de la luz parecía haber descartado definitivamente la naturaleza corpuscular de la misma.

La propuesta de Einstein no fue tomada en consideración por un sector significativo de los físicos, entre los que se encontraba Max Planck, hasta que en 1922 fue descubierto el efecto Compton²⁶¹, que no hacía sino confirmar sin lugar

259 BOHR, N.: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 67.

260 EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 132-148, "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz", en STACHEL, J. (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, pp. 161-178, también en RUIZ DE ELVIRA, A. (trad., introd. y notas): *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 45-71.

261 COMPTON, A. H.: "Secondary radiations produced by X-rays, and some of their applications to physical problems", *Bulletin of the National Research Council*, 4, nº 20, 1922, pp. 1-56, reimpresso en SANCKLAND, R. S. (ed.): *Scientific Papers of Arthur Holly Compton*, Chicago, University Chicago Press, 1973, pp. 321-377. COMPTON, A. H.: "A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements", *Physical Review*, 26, 1923, pp. 483-502, reimpresso en SANCKLAND, R. S. (ed.): *Scientific Papers of Arthur Holly Compton*, Chicago, University Chicago Press, 1973,

a dudas la exactitud de la teoría de Einstein. *"La teoría ondulatoria de la luz, que parecía descansar hacia 1900 sobre bases inquebrantables, conduce a considerar la energía radiante como repartida uniformemente en la onda luminosa. Un electrón golpeado por una onda luminosa recibe, pues, la energía radiante de un modo continuo, y la cantidad de energía que recibe así por segundo es proporcional a la intensidad de la onda incidente y no depende en modo alguno de la longitud de onda. Las leyes del efecto fotoeléctrico parecían, pues, muy difíciles de explicar. Einstein tuvo, en 1905, la idea notable de que las leyes del efecto fotoeléctrico indican la existencia de una estructura discontinua de la luz en que los cuantos intervienen... Pero si esta hipótesis es exacta, aparece como muy probable que esta estructura granular de la radiación, si se manifiesta en el momento de la emisión y en el momento de la absorción, debe también existir en el período intermedio cuando la radiación se propaga... Se sabe que si una radiación golpea un cuerpo material, una parte de la energía de esta radiación es, en general, desparramada en todas direcciones bajo la forma de radiación difusa. La teoría electromagnética interpreta esta difusión diciendo que bajo la influencia del campo eléctrico de la onda incidente, los electrones contenidos en el cuerpo material entran en vibración forzada y se convierten en fuentes de pequeñas ondas esféricas secundarias que difunden así en todas las direcciones una parte de la energía aportada por la onda primaria. Según esta interpretación, la vibración difusa bajo la acción de una onda primaria monocromática debe tener muy exactamente la misma frecuencia que esta onda primaria... Pero un estudio más preciso de la difusión de los rayos X por la materia, ha permitido constatar que al lado de la difusión sin cambio de frecuencia prevista por la teoría electromagnética, se produce una difusión con disminución de frecuencia completamente imposible de prever por el razonamiento clásico... El hecho esencial observado por Compton es que la radiación difusa con disminución de frecuencia tiene una frecuencia variable con el ángulo de difusión, pero independiente de la naturaleza del cuerpo difusor. Compton, y casi al mismo tiempo que él Debye, han tenido la idea de que estas leyes podían interpretarse asimilando la difusión con cambio de frecuencia a un choque entre un fotón incidente y un electrón contenido en la materia. En el momento del choque hay un cambio de energía y de cantidad de movimiento entre el fotón y el electrón, y como el electrón puede en general ser considerado como casi inmóvil en comparación del fotón, es siempre el fotón quien pierde energía en provecho del electrón. Como la frecuencia del fotón es proporcional a su energía, hay disminución de la frecuencia en el momento del choque."*²⁶²

pp.382-401. STUEWER, R. H.: *The Compton Effect. Turning Point in Physics*, New York, Science History Publications, 1975.

262 BROGLIE, L. de: *La física nueva y los cuantos*, pp. 101-104.

Si ya en 1905 Einstein había planteado la dualidad onda-corpúsculo de la luz, a la altura de 1920 este problema se planteaba en toda su crudeza en el seno de la teoría cuántica del átomo. El interrogante planteado podría ser resumido en la siguiente pregunta: ¿cómo conciliar la discontinuidad de la estructura de la luz y del átomo con la teoría ondulatoria, de naturaleza continua por excelencia, cuya aplicación se hacía también necesaria para comprender la naturaleza de la luz y el comportamiento de determinados fenómenos en el interior del átomo, como es el caso del fenómeno de dispersión? La solución a dicho dilema parecía poco menos que imposible, a la vista de la incompatibilidad existente entre los presupuestos epistemológicos de ambas teorías. Ello dio lugar a una intensa polémica entre los defensores de una y otra teoría, entre los que admitían el carácter esencial de dicha dualidad y los que se negaban a considerar tal posibilidad. La solución no vino hasta después de que la segunda teoría cuántica introdujo un nuevo formalismo matemático, la teoría de matrices, y se comprobara su equivalencia con la mecánica ondulatoria de Schrödinger, a pesar de ello la polémica no se apagó y continuó durante largos años hasta que los resultados de la mecánica cuántica resultaron incontestables, y con ello la discontinuidad en la física del siglo XX.