

LA TEORIA DE LA RADIACION DEL CUERPO NEGRO

Roberto Martínez

*Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia*

Resumen

Se expondrán las ideas fundamentales que permitieron a Planck encontrar la teoría correcta para explicar el espectro de energía radiada por un cuerpo negro al calentarse como una función de la temperatura e independientemente de la naturaleza y la forma de éste; las dificultades que tuvo Planck para aceptar la teoría atómica y los desarrollos de Ludwing Boltzmann de la segunda ley de la termodinámica, la ley de la entropía, los cuales fueron los pilares para desarrollar la teoría de los cuanta. La elaboración de este esquema teórico empezó con su tesis de doctorado sobre la segunda ley de la termodinámica presentada en 1879 y culmina en 1900 con el cuanto de acción expresado por la constante h que lleva su nombre. Se presentarán los desarrollos posteriores que permitieron a la comunidad científica de principios de siglo acoger la nueva teoría que reformaba toda la concepción clásica y mecanicista de finales del siglo pasado. Los trabajos de Einstein sobre los cuanta de la radiación y las dificultades que tuvieron las autoridades científicas de la época, como Lorentz, para aceptar la nueva teoría.

En 1878 Max Planck escogió la termodinámica como su tema de investigación. Su profesor le desaconsejó una carrera de físico argumentando que en los principios de la termodinámica concluían

las estructuras de la física teórica. La tesis de Planck examinaba los dos principios de la termodinámica: el primero sobre la conservación de la energía y el segundo orientaba el tiempo y definía la entropía.

Rudolph Clausius (1822–1889) y William Thompson (1824–1907) presentaron el segundo principio de la termodinámica de forma independiente. Este se puede expresar de la forma siguiente: el calor no puede pasar de forma independiente de un cuerpo frío a uno más caliente, permaneciendo inmutable el resto del Universo. Planck se preguntaba cómo varía la entropía con el tiempo a medida que el sistema evolucionaba aislado térmica y mecánicamente en el entorno. En su tesis doctoral escribe la expresión para la entropía $S' - S \geq 0$. Es decir, ésta aumenta o permanece constante en el tiempo.

En su primer trabajo original, consagrado a los estados de equilibrio de los cuerpos isotrópicos, extrajo resultados verificables de los dos principios de la termodinámica sin hacer hipótesis sobre la estructura interna de la materia. Sólo partía del hecho de que se llega al estado de equilibrio cuando la entropía es máxima. Planck insistió mucho sobre la importancia de la termodinámica sin hacer referencia a la hipótesis atomista. La presentación que hizo ante la sociedad Alemana de física del segundo principio no fue un éxito. Presentó un trabajo sobre electrolitos el cual estaba basado en resultados experimentales y él lo consideraba de mucha importancia, pero nadie hizo un comentario. Dicho resultado era muy importante para el problema que iba a enfrentar Planck durante muchos años de su vida, la distribución de la energía radiada por un cuerpo negro como una función de la temperatura.

Un cuerpo negro se define como una sustancia ideal que absorbe toda la energía radiante que llega a él. Por las leyes de la termodinámica éste, además, tiene que ser un emisor perfecto de radiación. La distribución de la energía radiada del cuerpo negro depende de la temperatura absoluta y no de su naturaleza interna o estructura, ley de Kirchhoff.

El espectro solar es el resultado de la descomposición de la luz

blanca. Cuando ésta atraviesa un prisma, se produce un espectro de bandas coloreadas que se extiende sobre la pantalla desde el rojo hasta el violeta. En el caso de la radiación del calor existe una situación similar. Sir William Herschel mostró en 1800 que el espectro solar no se limita a la parte visible desde el rojo hasta el violeta sino que también hay rayos solares infrarrojos que no se pueden observar a simple vista, pero se manifiestan en forma de calor. Colocando un termómetro en la región abajo del rojo, es decir, en la región del infrarrojo, descubrió que el calor estaba distribuido desigualmente en el espectro solar y que era mayor en la zona por debajo del rojo. De esta manera se estableció que el calor es una onda electromagnética del mismo carácter que la luz visible.

Un cuerpo moderadamente calentado desprende una radiación invisible donde la frecuencia de las ondas son demasiado bajas para actuar sobre el ojo humano, pero se manifiesta en forma de calor. Cuando un trozo de hierro se calienta, la luz al comienzo es un rojo suave, luego un rojo más brillante pasando por toda la gama del visible hasta el violeta, y finalmente se hace blanco resplandeciente, cuando se va aumentando la temperatura, como se puede observar en una parrilla eléctrica. El problema de la radiación de un cuerpo negro consiste en determinar cómo cambia la intensidad de la energía radiada de las diferentes frecuencias con la temperatura. Por ejemplo, a una temperatura dada, cómo varía la cantidad de energía radiada en el rojo con respecto a la energía radiada en otras frecuencias como el naranja, azul, violeta etc.

Planck suponía que el espectro de radiación de un cuerpo negro se debía a una situación de equilibrio termodinámico y era un proceso irreversible, el cual está de acuerdo con el segundo principio. El problema lo planteaba de la siguiente forma: si se inyecta una distribución inicial arbitraria de energía en una cavidad aislada, la distribución de energía tenderá al equilibrio a medida que la energía es absorbida y reemitida por cualquier mota de material negro. La aproximación al equilibrio es irreversible y, por tanto, la entropía tiene que aumentar al llegar al equilibrio termodinámico entre la

radiación y la materia. Una de las ideas que tenía Planck en mente era conciliar el segundo principio con la mecánica, por esta razón toma el problema de la radiación del cuerpo negro.

Se pensaba que el espacio vacío entre las moléculas de gas estaba lleno de calórico, sin embargo, después de 1820 empezaron a proponerse modelos de gases en los cuales las moléculas viajaban cierta distancia en línea recta entre dos choques sucesivos. Tras descubrirse la convertibilidad de calor y trabajo aparecieron muchos artículos. El primero fue publicado por Clausius en 1857. En él muestra que si la presión de un gas se debe al impacto mecánico de las moléculas contra las paredes del recipiente, entonces PV es proporcional a la energía cinética de las moléculas. Además, utilizando la ley de Charles-Boyle, Clausius señala que la temperatura es proporcional a la energía cinética de traslación de las moléculas.

En un segundo artículo introduce el concepto de recorrido libre medio y radio de acción de la molécula, y los utiliza para explicar la difusión de los gases. Dichos trabajos fueron de importancia para Clerk Maxwell (1831-1879), quien, usando teoría de errores, introduce conceptos estadísticos sobre la distribución de velocidades moleculares en el gas. En esa época poca gente estaba interesada en la termodinámica, sólo Boltzmann intentó elaborar una teoría estadística de la entropía, pero dicho trabajo fue ignorado por los demás teóricos, hasta que Planck lo resucitó en 1900, a raíz de sus investigaciones sobre la distribución de energía de cuerpo negro.

Aunque Planck no siguió de cerca la teoría de los gases conocía los desarrollos. Ayudó a editar el libro *Teoría cinética de los gases* de Clausius, y editó póstumamente el libro de Kirchhoff *Lecciones sobre la teoría del calor*. Planck era un adepto de la mecánica o la visión mecanicista de la naturaleza. Decía que: “uno debería utilizar todos los medios a su alcance para extraer las consecuencias últimas de la visión mecánica en todas las áreas de la física, química, etc.” Decía, además, “quienquiera que haya estudiado las obras de Maxwell o Boltzmann difícilmente escapará a la impresión de que la notable intuición física y habilidad matemática desplazada en la conquista de estos problemas están precariamente recompen-

sadas por la fertilidad de los resultados obtenidos.”

Para Planck el segundo principio era incompatible con la teoría atómica. Para él era necesario sustituirla por una teoría del continuo, no era la mecánica sino la hipótesis atomista la que chocaba con el segundo principio. Si una persona permite pasar las moléculas más rápidas de un recipiente A a otro B y las moléculas más lentas del recipiente B hacia el recipiente A, no habría trabajo realizado, sin embargo, la temperatura de A disminuye y la de B aumenta, en contradicción con el segundo principio, diablillo de Maxwell. Maxwell decía que la verdad del segundo principio era una verdad estadística porque depende del hecho de que los cuerpos que manejamos contienen millones de moléculas. De ahí que el segundo principio se viole para un grupo pequeño de moléculas. Planck estaba convencido de que el principio del aumento de la entropía era válido en todos los procesos, como el principio de la conservación de la energía, mientras que Maxwell y Boltzmann lo consideraban como una ley probabilística, y por tanto estaba sujeto a excepciones. Mientras Planck mantuvo esta idea no pudo aceptar el tratamiento estadístico.

No era claro cómo se podía derivar del cálculo de probabilidades el estado final de un sistema que inicialmente era prácticamente desconocido. Decía que éste no venía determinado por leyes de probabilidades sino por la mecánica. Se preguntaba Planck si las probabilidades por sí solas podían determinar la dirección en que evoluciona un sistema. La respuesta negativa pudo ser la razón por la cual no pudo aceptar la versión estadística del segundo principio.

Se pueden hacer varias conjeturas de por qué Planck siempre recurrió a la hipótesis del continuo y no a la teoría atómica para explicar los procesos irreversibles. Una de ellas es justamente el diablillo de Maxwell, el cual aparentemente estaba en contradicción con la entropía, en cambio el continuo podría explicar por qué no era posible que existiera un diablillo que se burlara del segundo principio, ya que toda la materia está correlacionada, y cuando se abre la compuerta, ésta deja pasar energía.

La forma como inicialmente abordó el problema de la radiación

de energía de un cuerpo negro, era suponer que cuando entra la radiación a la cavidad, ésta empieza a interactuar con los resonadores, los cuales a su vez reemiten la energía hasta llegar a un estado de equilibrio. Dicho proceso era irreversible y por ende el segundo principio jugaba un papel fundamental. Para ello Planck suponía un resonador en el interior de la cavidad el cual absorbía una onda plana que reemitía en forma de onda esférica. Pero el problema era cómo escribir las ecuaciones para el campo emitido de tal manera que éstas fueran irreversibles, teniendo en cuenta que las ecuaciones de Maxwell son reversibles. Planck introdujo un término de tal forma que produjera un amortiguamiento del resonador, pero esta idea no era del todo adecuada debido a la ley de Kirchhoff la cual decía que el espectro de emisión era independiente del material. Por lo tanto Planck pensó que la irreversibilidad debería estar en las ecuaciones del campo de la radiación.

Wien había demostrado que la radiación del cuerpo negro debía satisfacer la ley

$$u = \nu^3 \Phi \left(\frac{\nu}{T} \right) .$$

Usando argumentos puramente termodinámicos no se podía avanzar más en esta dirección. Había que introducir hipótesis de cómo interactuaba la radiación con la materia. Para ello era necesario aventurarse en el terreno de las hipótesis atómicas. Rayleigh encontró, usando la teoría clásica, que la densidad de la energía radiada crecía monótonamente con la frecuencia, en cambio la experiencia predecía que después de alcanzar un máximo para cierta frecuencia, disminuye indefinidamente cuando la frecuencia aumenta. Según lo que encuentra Rayleigh, la densidad total de la radiación del cuerpo negro para una temperatura dada debería ser infinita, este resultado se conoció como la catástrofe del ultravioleta. Jeans demostró que la ley de Rayleigh podía reencontrarse contando el número de ondas estacionarias en una cavidad.

Para 1898, Planck sentía que su propósito no se podía completar y comenzó a estudiar los trabajos desarrollados por Boltzmann

para la teoría de los gases usando la teoría atómica. En 1872 Boltzmann había estudiado el problema de la irreversibilidad de los procesos gaseosos usando teoría cinética, mecánica y teoría de probabilidades. Boltzmann desarrolló su teorema H y mostró que el estado de equilibrio para un gas se alcanza cuando H toma un valor mínimo y demostró que

$$\Delta H_{min} = -\frac{\Delta Q}{T} = -\Delta S,$$

donde ΔQ se refiere al calor transferido, T a la temperatura y define la función H como

$$H(t) = \int f \ln f \, dw.$$

f es el número de moléculas por unidad de volumen que en un tiempo t tienen una velocidad entre un rango de w y $w + dw$. Dicha función determina la distribución de velocidades de las moléculas dentro del gas. Haciendo álgebra sencilla se puede demostrar que

$$\frac{dH}{dt} \leq 0,$$

el cual se conoce como el teorema H de Boltzmann.

Planck inició una serie de trabajos en 1897 sobre la interacción de resonadores y campos y el problema de la irreversibilidad. A mediados de 1897, Boltzmann presentó una crítica al trabajo de Planck diciendo que aunque las fórmulas de Planck para la absorción y emisión de un resonador eran de gran valor, el programa para las que estaban concebidas tenía que fracasar. Estén o no presentes los resonadores, tanto las ecuaciones de Maxwell como las condiciones de contorno sobre su solución permiten la inversión del tiempo y por tanto son reversibles. Todos los procesos que las satisfacen pueden ocurrir en ambas direcciones y la unidireccionalidad ha de originarse al elegir condiciones iniciales unidireccionales.

En 1898 comienza anunciando que la explicación de los procesos de radiación irreversibles requiere una hipótesis especial, precisamente el paso que había evitado inicialmente. La hipótesis sobre

la radiación se asemeja a una versión electromagnética del desorden molecular de Boltzmann. En 1898, Planck estudia la versión de Boltzmann del segundo principio y prácticamente abandona la resistencia que tenía a dicho enfoque; no reconoció su cambio de parecer sino hasta dos años después, cuando introdujo la hipótesis de los cuanta.

Sin ningún argumento previo define la entropía de un resonador con frecuencia ν y energía U mediante la ecuación

$$S = -\frac{U}{a\nu} \ln \left(\frac{U}{e\theta\nu} \right).$$

Teniendo en cuenta que la entropía debe tender a un mínimo, Planck encuentra que

$$u = \frac{8\pi\theta}{c^3} \nu^3 \exp \left(-a \frac{\nu}{\theta} \right),$$

la cual es similar a la famosa expresión del corrimiento de Wien (1896), donde la energía de un resonador está relacionada con la energía radiada para el campo mediante la expresión

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu.$$

Podría pensarse que Planck encontró esta expresión para la entropía partiendo de la ley de desplazamiento de Wien; Planck conocía la dependencia de la entropía de la radiación con la energía para altas frecuencias donde valía la ley de Wien. Usando las ecuaciones de la termodinámica

$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T},$$

se puede determinar la relación que existe entre el parámetro θ y la variable de temperatura, $\theta = T$.

Podría pensarse que Planck encontró esta expresión para la entropía partiendo de la ley de desplazamiento de Wien, es decir, al revés. Planck sabía cómo debería depender la entropía de la radiación con la energía para altas frecuencias y poder reproducir los

datos experimentales donde valía la ley de Wien. Además, él sabía cómo debería depender ésta para bajas energías. Planck juntó estas dos expresiones en una forma muy simple y transformó los resultados en una fórmula que relacionaba la energía de la radiación con la frecuencia.

Los experimentos de Lummer, Pringsheim, Rubens y Kurlbaum (1900) mostraban que los resultados eran diferentes a los de la ley de distribución de Planck-Wien, la cual sólo era válida para altas frecuencias. Ellos encontraron experimentalmente que para bajas frecuencias el comportamiento de la energía radiada es diferente, proporcional a la temperatura. Planck juntó estas dos expresiones en una forma muy simple y transformó los resultados en una fórmula que relacionaba la energía de la radiación con la frecuencia para los dos rangos, de altas y bajas temperaturas.

Escribiendo la función de distribución de la energía radiada en términos de la energía del resonador como :

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\nu, T),$$

entonces, en los límites extremos de temperaturas o frecuencias, la energía del resonador toma la forma

$$U(\nu, T) \propto \begin{cases} e^{-\beta\nu/T} & \text{para } T \text{ baja y } \nu \text{ alta} \\ T & \text{para } T \text{ alta y } \nu \text{ baja} \end{cases}$$

Una de las ecuaciones que usó Planck para hallar su teoría de la radiación, que le permitía conectar las expresiones para la energía del resonador obtenidas del experimento para diferentes temperaturas con las expresiones de la termodinámica, en particular con la entropía, es

$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}.$$

Diferenciando esta ecuación, se obtiene otra relación importante

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{1}{T^2} \frac{\partial T}{\partial U}.$$

Utilizando la expresión para $U(\nu, T)$ que se conocía de los experimentos para los dos límites de altas y bajas temperaturas, Planck encuentra que

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} \propto \begin{cases} -\frac{1}{U} & \text{para } T \text{ baja y } \nu \text{ alta} \\ -\frac{1}{U^2} & \text{para } T \text{ alta y } \nu \text{ baja} \end{cases}.$$

Planck propuso una expresión para la segunda derivada de la entropía con respecto a la energía que contenía los dos límites, de la forma siguiente:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} \propto -\frac{1}{U(a+U)}.$$

En el límite de altas temperaturas o altas energías, la constante a se desprecia y la segunda derivada se comporta como uno sobre la energía al cuadrado. Para el otro límite, de bajas temperaturas, la energía se desprecia comparada con la constante a y se obtiene el otro límite consistente con la expresión que se deriva de los resultados experimentales.

Realizando algunos pasos matemáticos de integración, se obtiene:

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{a\nu^2}{e^{a/T} - 1}.$$

Si se compara con la ley de Wien, en el límite de bajas temperaturas, la constante a debe ser proporcional a la frecuencia del resonador, $a \propto \nu$. Lo importante de la expresión que obtuvo Planck es que reproduce los límites experimentales obtenidos por Rubens y Kurlbaum.

Planck supuso, además, que la entropía no sólo debía depender de la energía total de los resonadores, sino también de la energía de un resonador. Con esta hipótesis encuentra la ley de distribución para la energía radiada por un cuerpo negro que actualmente conocemos

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Una vez formulada la ley de distribución, Planck trató de dotarla de un sentido físico real, tema que lo llevó a retomar la relación entre entropía y probabilidad con el enfoque de Boltzmann. Cuando habla de la relación entre entropía y probabilidad no está pensando en el enfoque estadístico en el sentido molecular o atómico, sino en la definición de la combinatoria que da Boltzmann al segundo principio para el desorden molecular aplicado al conjunto de resonadores donde la energía se puede distribuir de forma aleatoria. Esta definición sólo aparece en los escritos de Boltzmann y de forma un tanto desordenada. Planck descubre esta definición en el libro de Boltzmann *Teoría de los gases* y parece que era la única persona que conocía su existencia.

El problema era determinar la distribución de la energía y la entropía de un sistema de N resonadores. Para hallar la expresión tuvo que usar la ley de la combinatoria de la forma siguiente: considérese un sistema de N resonadores, todos con la misma frecuencia, y queremos saber de cuántas maneras posibles la energía total E puede distribuirse entre ellos. Planck divide la energía total en P elementos con una energía ε de tal forma que $E = P\varepsilon$. Un estado se define como el conjunto $\{w_1, w_2, \dots, w_P\}$ donde w_k es el número de resonadores que poseen una energía igual a $k\varepsilon$. Dos distribuciones son diferentes si sus respectivos valores para w_k son diferentes. El sistema se puede encontrar de Z maneras diferentes, donde

$$Z = \frac{N!}{w_1!w_2!\dots w_P!}.$$

La condición de equilibrio corresponde a la configuración que hace que $\ln Z$ sea un mínimo con las restricciones

$$\sum_{k=0}^P w_k = N,$$

$$\sum_{k=0}^P k w_k = P.$$

Esta prueba es similar tanto conceptual como matemáticamente a la que realiza Boltzmann para los gases.

Después Planck considera un sistema que tiene N resonadores con frecuencia ν y energía E , N' resonadores con frecuencia ν' y energía E' , \dots , donde la energía total del sistema de resonadores es E_0 . Para calcular la entropía de una distribución arbitraria, Planck tiene que introducir la combinatoria, y con este fin sigue los mismos pasos de Boltzmann al subdividir el continuo de energía en elementos de tamaño finito ε , ε' , ε'' los cuales, a diferencia de Boltzmann que los introduce como un artificio matemático para poder sumar, son fijos y proporcionales a la frecuencia

$$\varepsilon = h\nu,$$

donde $h = 6.55 \times 10^{-27}$ ergios segundo se conoce como la constante Planck.

El valor que encuentra para la energía de un resonador de frecuencia ν , después de minimizar, es

$$U_\nu = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

el cual coincide con la expresión que buscaba. Planck presentó los resultados de su descubrimiento en una conferencia dada a la Sociedad Alemana de Física el 14 de diciembre de 1900 y su trabajo se titulaba *Sobre la distribución de energía en el espectro normal*.

Los intentos que hizo para demostrar la ley de radiación sin recurrir a la hipótesis de que la energía fuera proporcional a la frecuencia resultaron infructuosos. Desde 1901 hasta 1906 Planck no volvió a publicar nada sobre el problema del cuerpo negro, hasta que aparece su libro *Lecciones sobre la teoría de la radiación térmica*. El libro tiene otras ediciones en 1913 y 1921. En la conferencia que presentó en diciembre de 1900 asocia la entropía con desorden y éste se podía detectar en la irregularidad con que las vibraciones de un resonador cambian de amplitud y de fase, aun en un campo de radiación estacionario. La entropía también podría verse como una consecuencia del desorden con que la energía total está distribuida

entre los resonadores individuales. La concepción que tenía Planck de su teoría, en su libro escrito en 1906, todavía es completamente clásica.

La diferencia que había entre la teoría estadística de la radiación de Planck y la teoría de los gases de Boltzmann es que para el segundo la división del continuo de la energía era un recurso matemático y el tamaño del elemento utilizado no importaba. Para Planck esa división era una necesidad física y el elemento venía fijado por la relación $\varepsilon = h\nu$. En la conferencia de 1900 lo presentó como el punto crucial de su teoría. Decía que un rasgo de este resultado es que choca de inmediato con la introducción de una constante universal h . Hasta que se entienda claramente el significado de la constante h , la termodinámica de la radiación no queda completamente entendida. A dicha constante se le llamó el cuanto de acción. Planck dice además que el enigma planteado por su teoría puede resolverse investigando el detalle microscópico del proceso de emisión, es decir, mediante la teoría de los electrones. En una carta del 6 de julio de 1905 Ehrenfest escribe a Planck: *“la teoría de los resonadores no basta para derivar la ley de distribución de la energía en el espectro normal y la introducción del cuanto de energía finito es una hipótesis adicional, ajena a la teoría de los resonadores.”* Además, decía Ehrenfest que con sólo la carga eléctrica del electrón no se podría explicar la presencia del cuanto de acción, si de darle un tratamiento puramente clásico se tratara.

La obra de Planck rompía con la tradición clásica y no fue acogida inmediatamente. La teoría del cuerpo negro siguió siendo hasta después de 1906 una teoría esotérica, como lo había sido después de 1900. La obra de Planck comenzó a recibir citas muy lentamente en los siguientes cinco años. En 1902 fue citada en el famoso libro *Tratado de espectroscopía* de Heirich Kayser, en 1904 en la *Termodinámica* de Woldemar Voigt. En 1905 la citó Einstein y se refirió a ella como la mejor fórmula que coincidía con los datos experimentales.

Rayleigh y Jeans dedujeron una ley que explicaba muy bien el espectro para altas frecuencias a partir de argumentos puramente

clásicos. Los físicos estaban convencidos que usando argumentos clásicos no era posible derivar la discontinuidad de la nueva teoría. El mismo Planck tuvo dificultad para aceptar la discontinuidad que predecía su teoría.

Lorentz publicó una serie de artículos de 1901 a 1903 sobre la teoría del cuerpo negro donde se preguntaba cómo explicar la dependencia de la longitud de onda con la temperatura y no del material. Lorentz sabía que con sólo la teoría electromagnética no lo podía explicar porque allí sólo aparecía una constante c , la velocidad de la luz. Pensaba que más bien tenía que ser una característica de la materia. Lorentz derivó una expresión para la radiación del cuerpo negro por medio del movimiento térmico de los electrones y obtuvo para las longitudes de onda grandes la expresión de Rayleigh-Jeans. Durante mucho tiempo estuvo trabajando en el problema del cuerpo negro sin aceptar los resultados obtenidos por Planck. En 1908 en la conferencia de matemáticas en Roma dice Lorentz: *“Si uno compara la teoría de Planck con la de Jeans ellas tienen sus méritos y sus defectos. La de Planck 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 nos obliga a atribuir a la casualidad el acuerdo entre la teoría de Wien y Boltzmann. Cabe esperar que nuevos resultados experimentales nos permitan decidir entre ambas.”*

Cuando Wien se enteró de la conferencia de Lorentz escribió, seis semanas después, una carta muy enérgica a A. Sommerfeld. *“La conferencia de Lorentz me decepciona mucho. El que no expusiera otra cosa que la vieja teoría de Jeans, sin añadir otro punto de vista me parece muy roñoso. Aparte de considerar la teoría de Jeans defendible o no, hay que dirimirla sobre bases experimentales. En mi opinión no es defendible porque muestra divergencias con los resultados experimentales en un intervalo donde la longitud de onda es fácil de controlar en los experimentos. ¿Qué sentido tiene exponer este problema a los matemáticos, si ninguno está preparado para emitir un juicio sobre el problema? Esta vez Lorentz no ha*

demostrado ser un líder de la física.”

A raíz de esta polémica se realizaron experimentos concluyentes donde se demostró que la ley de Jeans era incorrecta. Lorentz escribió: *“ahora se me han hecho claras las notables dificultades con que uno tropieza defendiendo la teoría de Jeans. Sólo puedo concluir que difícilmente se puede derivar la ley de radiación a partir de la teoría de los electrones sin hacer profundos cambios en sus fundamentos. Debo por tanto pensar que la teoría de Planck es sostenible.”* Prosigue Lorentz *“los cuanta elementales de energía proporcionan precisamente un nuevo supuesto de esa especie. En sí no tengo nada en contra suya, incluso estaría dispuesto a adoptar la hipótesis sin reserva si no fuera porque he encontrado una dificultad. Según la fórmula de Planck aquellos resonadores con una longitud de onda menor que un valor mínimo no reciben ni un solo elemento de energía, es decir, muchos de los resonadores no deberían poseer ninguna energía y estarían expuestos a la excitación de las ondas electromagnéticas del éter. Por el momento no quisiera entrar más a fondo en el problema; espero saber muy pronto la postura del profesor Planck.”* En una conferencia que presenta Lorentz en 1909 en Utrech parece aceptar la teoría de los cuanta de energía.

Una de las dificultades que tuvo Lorentz para aceptar la teoría de los cuanta es que no podía entender cómo el campo electromagnético dejaba de excitar algunos de los resonadores. Planck responde a esta inquietud de Lorentz de la forma siguiente: si un resonador está en un campo de radiación estacionario, el campo lo pondrá en vibración; pero esta excitación no obedece a la sencilla ley del péndulo que conocemos, sino que existe un umbral. El resonador no responde para nada a excitaciones muy pequeñas y sí a excitaciones mayores de tal forma que su energía sea un múltiplo entero de $h\varepsilon$.

En la correspondencia de Planck con Lorentz, éste reconoce que el campo electromagnético también hay que cuantizarlo, además, presenta la idea como original, desconociendo los trabajos de Einstein y Ehrenfest.

Un fenómeno de mucha importancia para aceptar la teoría de los

cuanta fue el efecto fotoeléctrico. Este fenómeno consiste en que un pedazo de materia expuesta a la acción de una radiación de longitud de onda suficientemente corta, suministra electrones en movimiento rápido. La energía de los electrones es función de la frecuencia de la radiación incidente y no depende de la intensidad. Sólo el número de electrones depende de la intensidad de la radiación incidente. Con la teoría clásica, 1900, no era posible explicar este fenómeno. Se esperaba que la energía del electrón fuera proporcional a la intensidad de la onda incidente. En 1905 Einstein explicó este fenómeno usando la teoría de los cuanta. Las leyes del efecto fotoeléctrico indican la existencia de una estructura discontinua de la luz. Si la estructura granular de la radiación se manifiesta cuando se absorbe o se emite, debería manifestarse cuando se propaga. Einstein propuso que toda la radiación monocromática está dividida en granos cuya energía tiene un valor proporcional a la frecuencia. Cuando un electrón en la materia recibe un grano de luz, podría absorber la energía de este grano y salir de la materia, donde la energía del grano de luz debe ser superior al trabajo necesario para que el electrón salga del material,

$$E_{\text{radiacion}} = E_{\text{cinetica}} + E_{\text{funcion-trabajo}} = h\nu.$$

Einstein le llamó la teoría de los cuanta de la luz, actualmente se conoce como la teoría del fotón.

Un estudiante de Planck, Max von Laue, en 1906 escribe a Einstein una carta que dice: *“cuando enuncia su argumento heurístico de que la energía radiante sólo puede ser emitida y absorbida en ciertos cuanta finitos, no se me ocurre qué objetar; sólo que ésta no es una característica de los procesos electromagnéticos en el vacío, sino del material absorbente y emisor. La radiación no consiste de cuanta luminosos, como Ud. lo menciona en el primer artículo, sino que durante el intercambio de la energía con la materia se comporta como si consistiese de ellos.”* En esta época el tema era muy controvertido y las nuevas figuras de la física como Einstein, Ehrenfest y Laue eran muy jóvenes para que sus opiniones fueran tenidas en cuenta.

En 1907 Einstein mostró que la radiación del cuerpo negro no sólo tenía influencia en la vibración de los electrones sino también en los iones cargados. Si estos iones están amarrados a una red sólida, la energía de los vibradores iónicos está restringida a múltiplos enteros de $h\nu$.

Bibliografía

1. T. S. Kuhn, *La teoría de cuerpo negro y la discontinuidad cuántica* (Alianza Editorial, Madrid, 1980).
2. J. L. Heilbron, *The dilemmas of an upright man. Max Planck as spokesman for German Science* (University of California Press, Los Angeles, 1986).
3. W. Meissner, *Max Planck*, *Science* **113**, 75 (1951).
4. J. F. Mulligan, *Max Planck and the black year of German physics*, *Am. J. Phys.* **62**, 1089 (1994).