

Cien años de teoría cuántica

Andoni Garritz

En diciembre del año 2000 la teoría cuántica habrá cumplido cien años de existencia. Su nacimiento tuvo lugar en la década que va de 1895 a 1905, en la que ocurrió una abrupta e inesperada transición en la historia de la física y la química debido al descubrimiento de los rayos X, la radiactividad, el electrón, la aparición misma de la teoría cuántica y de la teoría especial de la relatividad, al igual que la explicación einsteniana del efecto fotoeléctrico. No deja de ser sorprendente el hecho de que en un tan corto intervalo de tiempo hayan ocurrido acontecimientos tales que modificaron de raíz nuestra concepción del universo.

En vista de la gran trascendencia que ha tenido la ya centenaria teoría cuántica, resulta pertinente revisar sus primeros estadios para rendir tributo y reconocimiento al que hizo posible su advenimiento, Max Planck, y aquilatar su estado actual, con base en su repercusión en el entendimiento de multitud de fenómenos físicos y químicos.

El reto de Kirchhoff y la solución de Max Planck

El hecho de que el calor puede transferirse en forma de radiación era un fenómeno conocido desde principios del siglo XIX, hace ya dos siglos. Hoy nos basta una parrilla eléctrica y el tacto para detectar el calor emitido en forma de radiación. Este fenómeno tiene lugar aunque entre la fuente de radiación y el detector no exista más que el vacío, es decir, se elimine el aire, que pudiera suponerse como el medio transmisor.

En 1860, Gustav Kirchhoff demostró un teorema concerniente a la emisión y absorción de radiación por un cuerpo caliente y lanzó un reto a los teóricos y experimentadores de su tiempo.

La respuesta al reto de Kirchhoff condujo a la teoría cuántica, por lo cual resulta interesante plantearlo desde ahora. Cualquier sólido absorbe cierta fracción de la radiación de cada longitud de onda, a_λ , que incide sobre su superficie y refleja el resto. Esta a_λ se conoce como el coeficiente de absorción del sólido y depende del material en cuestión y las características de su superficie. Kirchhoff estaba interesado en el estudio de sistemas donde los cuerpos estuvieran en equilibrio con la radiación a cierta temperatura, T . Dicho equilibrio implicaba que la radiación absorbida fuera idéntica a la emitida, en el mismo tiempo, manteniéndose el cuerpo a la temperatura T .

Con respecto a la emisión, denominaremos E_λ a la energía radiante emitida por unidad de área, de tiempo y de intervalo de longitud de onda. Desde un punto de vista matemático más formal, $E_\lambda d\lambda$ corresponde a la energía radiante emitida por unidad de área y de tiempo como

radiación con longitudes de onda entre λ y $\lambda + d\lambda$.

Pues bien, el teorema de Kirchhoff indica que el cociente

$$\frac{E_\lambda}{a_\lambda} = J(\lambda, T)$$

donde $J(\lambda, T)$ se denomina potencia emisiva total a la longitud de onda λ y la temperatura T , y no depende en absoluto de las características del cuerpo emisor. En 1860, Kirchhoff escribió “encontrar esta función, J , es una tarea sumamente importante. Existen grandes dificultades en el camino de su determinación experimental. Sin embargo, existen razones para esperar que pueda ser determinada por el experimento ya que, sin duda, debe tener una forma simple como la de todas las funciones que no dependen de las propiedades particulares de los cuerpos con las que nos hemos topado hasta la fecha”.

Kirchhoff se percató de que la búsqueda de J sería mucho más sencilla para un cuerpo con $a_\lambda = 1$, que sería uno en el que la totalidad de la energía incidente sería absorbida, para cualquier longitud de onda, un llamado “cuerpo negro”, pues no reflejaría nada de la radiación incidente, toda la cual sería absorbida, dándole esto un color negro característico. El reto de Kirchhoff fue replanteado de la siguiente manera: encuéntrese E_λ para un cuerpo negro y esa función corresponderá a la $J(\lambda, T)$.

En efecto, las dificultades experimentales para esta determinación fueron brutales. En 1879, casi veinte años después del planteamiento de Kirchhoff, Josef Stefan encontró experimentalmente que

$$J_t = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma T^4$$

que corresponde a la potencia emisiva total, la suma de todas las potencias emisivas a cada una de las longitudes de onda, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Cinco años más tarde, Ludwig Boltzmann demostró que la conjetura de Stefan era cierta sólo para un cuerpo negro. Por ello, la ecuación anterior, en la que J_t es la energía total irradiada por el cuerpo por unidad de área y tiempo y σ es una constante de proporcionalidad ($\sigma = 5.6728 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) se conoce como ley de Stefan-Boltzmann. Ya se sabía cuanto valía la integral de E_λ para el cuerpo negro, lo cual fue un adelanto singular para su determinación.

En 1893, Wilhelm Wien encuentra, también experimentalmente, que E_λ es una función que toma un valor máximo para una longitud de onda inversamente proporcional a la

temperatura

$$\lambda_{\max} = \frac{\beta}{T}$$

(con $\beta = 2.898 \times 10^{-3}$ mK) con esto se sabía que en el punto donde la derivada de E_λ valía cero tenía que ser válida esta relación. Con estas dos propiedades de la función E_λ , una para su integral y otra para su derivada, Wilhelm Wien propone en 1896 la siguiente solución para el reto de Kirchhoff:

$$E_\lambda^W = c_1 I^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}}$$

función que cumple rigurosamente con las propiedades requeridas para su integral y para su derivada. En ese mismo año Friedrich Paschen hizo experimentos conclusivos para longitudes de onda entre 1 y 8 μm , a temperaturas entre 390 y 1397K, que fueron perfectamente compatibles con la distribución de Wien.

Parecía que Wien había resuelto el reto de Kirchhoff, pero tres años más tarde se demostró que la potencia emisiva de Wien era incorrecta.

En junio de 1900, unos meses antes de la aparición de la relación de Max Planck, lord Rayleigh propuso una teoría acerca de la emisión de radiación por el cuerpo negro. Rayleigh asumió que las ondas de radiación eran el producto de las vibraciones de las partículas cargadas que conformaban el cuerpo negro y aplicó el principio de equipartición de la energía a los diversos modos de vibración de dichos osciladores, como lo había hecho Boltzmann tantas veces en sus tratamientos de termodinámica estadística. Rayleigh alcanzó la expresión, la cual fue ratificada por James H. Jeans, por lo que lleva el nombre de ambos

$$E_\lambda^{RJ} = \frac{2\pi kT}{c\lambda^4}$$

donde k es la constante de Boltzmann ($k = 1.38066 \times 10^{-23}$ J/K) y c la velocidad de la luz ($c = 2.997925 \times 10^8$ m/s). La distribución de Rayleigh y Jeans resulta de un impecable tratamiento teórico de los osciladores del cuerpo negro, pero se torna incompatible con la evidencia experimental, pues diverge conforme la longitud de onda tiende a cero. No cumple tampoco con la ley de Stefan-Boltzmann, pues su integral se vuelve infinita.

A este defecto de la distribución de Rayleigh-Jeans se le conoce como la catástrofe del ultravioleta, pues a bajas longitudes de onda la potencia emisiva se vuelve monstruosamente grande, lo que iba en desacuerdo con los resultados experimentales de Wien, para los cuales ya mencionamos la

presencia de un máximo para la función a una longitud de onda intermedia.

Fue en octubre de 1900 cuando Max Planck encuentra la función E_λ de Kirchhoff. Planck se encontraba dirigiendo el instituto del Kaiser Guillermo, donde un par de grupos de investigación llevaban a cabo mediciones de la E_λ . En el primero de ellos Otto Lummer y Ernst Pringsheim exploraban la región entre 12 y 18 μm , a temperaturas entre 287 y 1772 K. Sus resultados en 1900 indicaban que la expresión de Wien fallaba sobre todo a alta temperatura, siendo la expresión de Rayleigh mucho más aproximada a sus resultados. El segundo grupo, compuesto por Heinrich Rubens y Ferdinand Karlbbaum trabajaba a mayores longitudes de onda (24 a 51 μm) y a temperaturas entre 85 y 1773 K, llegando también a la misma conclusión, en 1900.

Planck alcanza su función para E_λ

$$E_\lambda^P = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

al entender que a baja longitud de onda y baja temperatura la expresión correcta es la de Wien, mientras que a alta longitud de onda y alta temperatura es más correcta la expresión de Rayleigh-Jeans. Su denominador tiende a $c_2/\lambda T$ a alta longitud de onda y alta temperatura, por lo cual bajo estas condiciones tiende al valor de la distribución de Rayleigh y Jeans con la cuarta potencia de la λ .

La expresión de Planck para la potencia emisiva era perfectamente compatible con la de Wien, pero seguía más bien los resultados a alta longitud de onda y alta temperatura recién obtenidos.

El nacimiento de la teoría cuántica

Cuando Max Planck ingresó en la Universidad de Munich, en 1875, no estaba seguro de si estudiaría física, música o idiomas. Un profesor le sugirió que evitara la física puesto que ya nada nuevo podía ser descubierto, ¡qué equivocado estaba dicho profesor!

Entre octubre y diciembre de 1900. Max Planck ideó una teoría cuyo resultado fuera la distribución de energía E_λ que reproducía los resultados experimentales de la ley de Kirchhoff, alcanzando el siguiente resultado

$$E_\lambda^P = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

En el camino a la deducción de esta fórmula Planck postula que la energía vibrante estaba repartida entre los osciladores del cuerpo negro en porciones finitas, de magni-

tud ε . Y obtiene que dicha magnitud es proporcional a la frecuencia de la radiación emitida, ν , con la constante de Planck, considerada hoy con el valor $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js, como constante de proporcionalidad.

$$\varepsilon = h\nu$$

Esto es lo sorprendente de la derivación de Planck, que haya que suponer que los osciladores sólo pueden intercambiar energía con la radiación en porciones de magnitud finita, ε . Ésta es la razón por la cual la expresión de Planck no diverge, como la de Rayleigh y Jeans. Decimos entonces que la energía que intercambian los osciladores en equilibrio térmico con la radiación del cuerpo negro está cuantizada, sólo puede valer un número de veces el cuanto (o cantidad) fundamental $h\nu$.

Esta suposición de Planck iba en contra de la física clásica, pues la energía que podía intercambiar un oscilador, desde el punto de vista clásico, podría ser cualquier valor entre cero e infinito y no una cantidad como $n h\nu$, como propone Planck. La cuantización de la interacción de los osciladores con la radiación va en contra de la física clásica.

La interpretación cuántica de Planck fue muy discutida durante la primera década del siglo; se consideraba que su ecuación para E_λ era sin duda la mejor de todas, era la más adecuada matemáticamente, pero de ahí a aceptar la cuantización había un gran trecho. Las reacciones positivas hacia la teoría cuántica empezaron a manifestarse a partir de 1905, cuando Einstein recurre a consideraciones cuánticas para explicar el efecto fotoeléctrico y aparecen de todas a partir de 1913, cuando Niels Bohr cuantiza su modelo atómico y con ello explica el espectro para el átomo de hidrógeno. Así, después de 1913 es raro encontrar artículos "anticuánticos" en las revistas científicas, lo que significaba que los editores estaban convencidos de su validez.

Finalmente, es en 1918 cuando Max Planck recibe el premio Nobel, dieciocho años después de la aparición de su teoría cuántica.

Hoy nadie duda acerca de la validez de la teoría cuántica, a pesar de toda su irracionalidad, la cual se ha complicado una enormidad a partir de la aparición de un modelo corpuscular-ondulatorio para la explicación de la luz y el comportamiento de las partículas, la posterior interpretación probabilística de Max Born, según la cual todo lo que podemos saber acerca de un electrón es la mayor o menor probabilidad de que se halle en alguna u otra parte, y el principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual no podemos conocer con total precisión la posición y la velocidad de un electrón, lo que hace posible el incomprensible efecto túnel.

Esta característica incomprensibilidad de la teoría cuántica

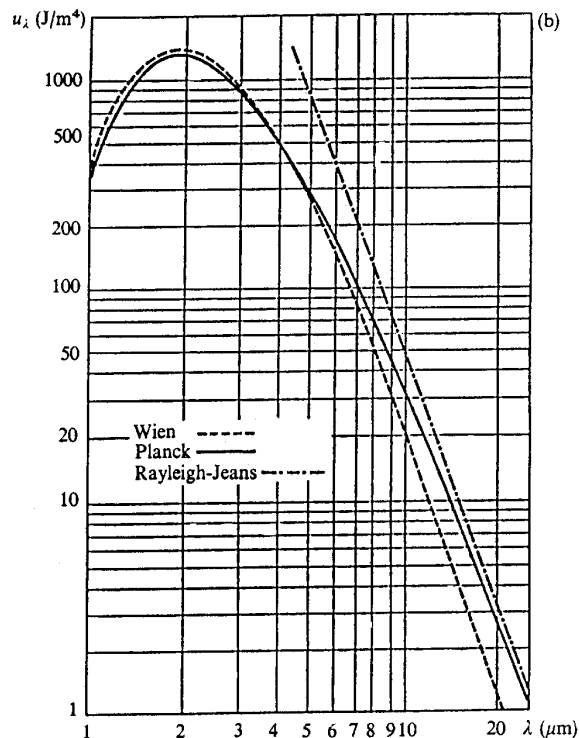


Figura 1. Densidad de energía, $u_\lambda = 4E_\lambda/c$ para Wien, Planck y Rayleigh-Jeans. Nótese cómo la función de Planck sigue a la de Wien a baja longitud de onda, pero se convierte en la de Rayleigh-Jeans a alta longitud de onda.

tica no habla mal de sus resultados, los cuales han sido verificados una enormidad de veces por el experimento. Estamos ante una teoría intachable desde el punto de vista formal, que no nos da explicaciones plenamente satisfactorias a las preguntas de los grandes porqués de la naturaleza. Richard Feynman escribió el siguiente párrafo en 1965:

Hubo un tiempo en el que los periódicos dijeron que sólo doce hombres entendieron la teoría de la relatividad. Yo no creo que nunca haya habido tal tiempo. Debió haber habido un tiempo en el que un solo hombre la entendió, pues ese hombre lo hizo como único antes de escribir su artículo. Pero después de que la gente leyó ese papel, una enorme cantidad de gente entendió la teoría de la relatividad de una manera u otra, sin duda más de doce gentes. Por otro lado, yo pienso que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica.

Hoy podemos decir que a pesar de que nadie entiende la mecánica cuántica, no queda duda de que se trata de una teoría que no falla en sus predicciones sobre la naturaleza, de donde se desprende su gran valor, a pesar de su complejidad estructural. ¡Que viva la centenaria teoría cuántica! ☒