

El nacimiento de una constante

Juan Carlos Mendoza Santos*
Hiram Hernández Sánchez**

Resumen

En este trabajo presentamos la historia del nacimiento de la llamada "Nueva Física". Abordamos el problema de la radiación del cuerpo negro como principio de la investigación, problema que preocupaba a los físicos de principios del siglo XX por la falta de una fórmula que describiera correctamente el espectro de radiación correspondiente. Comenzamos con algo de historia sobre los primeros trabajos que intentaron plantear una solución confiable, hasta las aportaciones de notables físicos como Boltzmann con su interpretación estadística de la Segunda Ley de la Termodinámica, las distribuciones de Wien y Rayleigh que describen el comportamiento de la radiación en distintas frecuencias, etc.

Partiendo de la Ley de Wien, presentamos una deducción de la constante de Planck complementada con fragmentos de su autobiografía, los cuales nos dan una idea de los pensamientos del reconocido científico en esos cruciales momentos de su vida y del desarrollo posterior de sus ideas por otros físicos, especialmente por Einstein con su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico, que marcó el nacimiento de la Mecánica Cuántica.

Incluimos también tres apéndices en los que se habla sobre la interpolación de Newton-Raphson, sobre la forma de construir un cuerpo negro y sobre lo que es una constante.

Introducción

No hay ni puede haber más de dos caminos para la investigación y el descubrimiento de la verdad: uno, que parte de la experiencia y se remonta enseguida a los principios más generales y, en virtud de esos principios que adquieren una autoridad incontestable, juzga y establece las leyes secundarias; otro, que de la experiencia y los hechos deduce las leyes, elevándose progresiva y continuamente hasta los principios más generales que alcanza en último término.

Francis Bacon, Novum Organum, aforismo 19.

El presente trabajo es una recopilación que trata de abarcar, de una manera sencilla y con un sencillo lenguaje también, la importancia de la labor de Max Planck. Como se verá, para Planck todo su trabajo resultó ser una revolución, una "molesta" revolución. El

* Jefe del Centro de Física y Matemáticas de la UTM

** Profesor-investigador de tiempo completo de la U.T.M

Abstract

In this study, we present the history of the origins of the so called "New Physics." We will address the problem of Black Body Radiation as a principle of research. This is a problem that plagued physicists at the dawn of the twentieth century due to lack of a formula to describe correctly the spectrum of corresponding radiation. We will begin with some of the history of the first studies that tried to describe a dependable formula for Black body Radiation. We will further explore the contributions of notable physicists such as Boltzman with his statistical interpretation of the Second Law of Thermodynamics and the distributions of Wien and Rayleigh who described the behavior of radiation in distinct frequencies.

Based on the Law of Wien, we present a deduction Planck's constant complemented with fragments from his autobiography. This work gives us an idea of the thoughts of the renowned scientist at crucial moments of his life, and of the development of those thoughts by later scientists, especially of Einstein and his work on the photoelectric effect, which marks the birth of Quantum Mechanics.

We will also include three appendices: one which discusses the interpolation of Newton-Raphson and a second and third which discuss the way of constructing a black body and the make up of what is known as a constant, respectively.

era un físico arraigado con las ideas de la llamada Física clásica (totalmente diferente a Einstein), que desde su educación básica cuestionaba las teorías que le enseñaban. Entonces imaginemos lo que le significó dar la pauta para el nacimiento de una "nueva" Física sin desprenderse de la clásica.

Ahora sabemos que la obra de Planck fue un paso gigantesco dentro de la Física, pero en su época no lo podían ver así, es decir, no obstante no haber sido un desafío directo a la teoría ondulatoria de la luz, rompió rotundamente con las ideas aceptadas. Su *constante* era demasiado pequeña para ser descubierta por los instrumentos de medición. En ese entonces, los físicos se ocupaban de acontecimientos del tamaño de un péndulo, pero ahora tendrían una nueva herramienta (la *constante* de Planck) para empezar a sondear más pro-

fundo: la composición molecular de la materia. Así pues, hallaron señales de que al reducirse la escala, la naturaleza no se atenía a lo esperado. Pero la Física se podía seguir usando donde antes. No había por qué tomar discontinuidades diminutas de energía con el fin de comprender el movimiento de un péndulo o del planeta. Al revelar algo nuevo, la obra de Planck no había demolido lo viejo, sólo había demostrado que esto último tenía limitaciones. Y eso fue lo que precisamente la hizo revolucionaria. Sugirió que la comprensión representada por la Física clásica pudiera, después de todo, no ser la última palabra.

Después de mucho tiempo, podemos hacer una comparación: la labor de Planck es, en cierta medida, comparable con la labor de Newton; ambos fueron físicos que revolucionaron las ideas sobre las que se establecía la ciencia y fundaron una nueva manera de interpretar y modelar matemáticamente el mundo en que vivimos.

2. Un poco de Historia...

Quien origina un nuevo concepto...encuentra por regla general mucho más difícil averiguar por qué los demás no lo entienden, que descubrir las nuevas ideas.

Hermann Von Helmholtz

La historia se remonta al año de 1859 cuando el físico alemán Gustav Kirchhoff¹ presentó un trabajo a la Academia de Ciencias de Berlín que trataba de la emisión y absorción de calor y luz. Kirchhoff demostró, como consecuencia de investigaciones sobre las propiedades de la luz que nos llega del sol, que si los rayos de luz de frecuencia fija inciden sobre un cuerpo, éste absorbe parte del haz incidente. La fracción absorbida por el cuerpo se llama "poder de absorción". Dependiendo de los materiales de que esté compuesto, cada cuerpo tendrá su valor particular del poder de absorción. Distintos cuerpos tienen, en general, distintos valores de esa cantidad. Además, el poder de absorción tiene distintos valores sobre distintas frecuencias de las ondas de luz que inciden sobre él.

1. Eliezer Braun, *Una faceta desconocida de Einstein*, pág. 47.

Por otro lado, un cuerpo dado que esté a cierta temperatura emite luz. La mayor parte de ella es invisible para el ojo humano, porque tiene ondas de muchas frecuencias (Figura 1). La fracción de la energía emitida a una frecuencia fija se llama "poder de emisión". Al igual que con el poder de absorción, el poder de emisión de un cuerpo, a una frecuencia dada, depende de las características del mismo. Distintos cuerpos tienen distintos poderes de emisión y para un mismo cuerpo sus poderes de emisión son distintos para distintas frecuencias de luz.

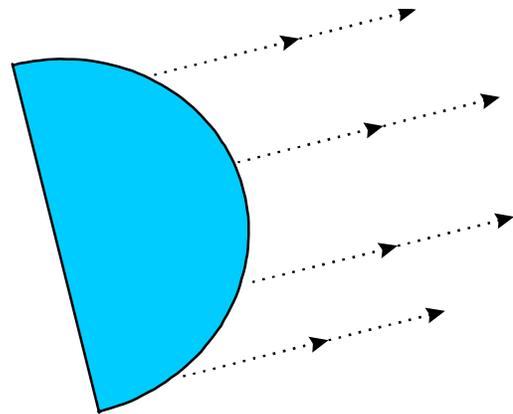


FIGURA 1. UN CUERPO EMITE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA FIJA DE DIFERENTES FRECUENCIAS.

Si tomamos a $|^2$ y $|^3$ como los poderes de absorción y emisión de un cuerpo a la frecuencia f , respectivamente. Kirchhoff demostró en su trabajo de 1859⁴ que el cociente de estas dos cantidades, o sea a $|/e|$, tiene el mismo valor para todos los cuerpos que están en equilibrio a la misma temperatura. Esto significa que si tenemos dos cuerpos a la misma temperatura, pero hechos de distintos materiales y de distintas formas, entonces el cociente arriba indicado (con una frecuencia f) para cada uno de ellos tiene un valor. Kirchhoff demostró que estos valores numéricos son iguales. Además, que el valor del cociente arriba mencionado solamente depende de la frecuencia y de la temperatura. Este cociente es una cantidad universal

2. Fracción de un haz incidente de luz absorbida por un cuerpo.

3. Fracción de energía (luz) emitida por un cuerpo a una frecuencia fija.

4. Eliezer Braun, op. cit., pág. 48.

a causa de que es el mismo para todas las sustancias. A este resultado se le llama Ley de Kirchhoff.

En tiempos de Kirchhoff se conocía solamente la luz visible; sin embargo, existen otras ondas que tienen frecuencias que no son visibles para el ojo humano. Esta radiación es llamada invisible y consiste en ondas ultravioletas, infrarrojas, etc. Se ha podido demostrar que la Ley de Kirchhoff es también válida para las ondas de radiación invisible.

Consideremos ahora un cuerpo muy particular, que es el llamado "cuerpo negro". Este es un absorbedor perfecto de radiación tanto visible como invisible a cualquier temperatura. Se usa la palabra "negro" para denotar una sustancia que absorbe toda la luz que llega y no refleja nada de ella, por ejemplo, el carbón. Del trabajo de Kirchhoff se desprende que si un cuerpo es un absorbedor perfecto de radiación a cualquier temperatura, entonces será un emisor perfecto de radiación.

Apliquemos ahora la Ley de Kirchhoff a un cuerpo negro. En este caso, como el cuerpo absorbe toda la radiación que le llega, el poder de absorción es igual a $a_{\lambda} = 1$. En consecuencia, el cociente arriba mencionado es igual a e_{λ} . Por lo tanto, el poder de emisión de un cuerpo negro es igual a la cantidad universal ya antes señalada. Es justamente por ese motivo que se usa el cuerpo negro. Si se tratara de obtener esa cantidad universal usando cualquier otro cuerpo, se tendrían que obtener otras dos propiedades: los poderes de absorción y emisión. Para un cuerpo negro esta última es igual a 1.

Un ejemplo de cuerpo negro (Figura 2) es el formado por una cavidad cuyas paredes se encuentran a una temperatura fija. Las paredes interiores de la cavidad son negras. Este cuerpo tiene una pequeñísima abertura. Cualquier radiación que pueda entrar por la abertura es dispersada en el interior y absorbida por reflexiones repetidas, con la consecuencia de que nada de ella puede volver a salir. Es decir, esta cavidad absorbió toda la radiación incidente, con lo cual es un perfecto absorbedor y, por lo tanto, un cuerpo negro. En consecuencia, uno intentaría

encontrar el poder de emisión de esta cavidad. Esta cantidad depende solamente de la frecuencia y la temperatura.

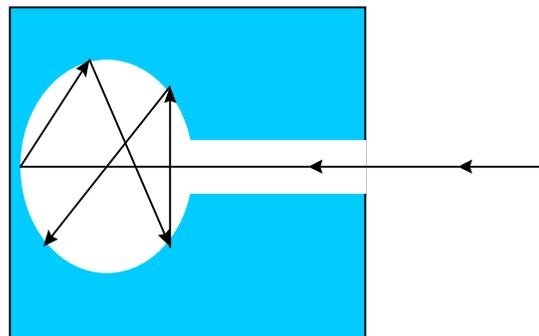


FIGURA 2. UNA CAVIDAD PUEDE SER UN CUERPO NEGRO.

Si ahora sumamos todas las energías que corresponden a cada una de las frecuencias de radiación que está dentro de la cavidad, se obtendrá la energía total. De acuerdo con la Ley de Kirchhoff, la energía total contenida dentro de la cavidad que se encuentra a una temperatura fija, solamente dependerá de la temperatura y será independiente de la pared.

Por otra parte en 1865, John Tyndall⁵ (en Inglaterra) llevó a cabo una serie de mediciones sobre la emisión total de un alambre de platino a distintas temperaturas al hacer pasar una corriente eléctrica. Al calentarse el alambre emite radiación. Se puede considerar a esa radiación como de cuerpo negro. Tyndall encontró que a 1200°C (1473°K) el platino emitía 11.7 veces más energía que cuando estaba a la temperatura de 525°C (798°K). A los 525°C el platino emite una coloración rojiza, mientras que a 1200°C es completamente blanco. En Viena, Josef Stefan conoció estos resultados y se dio cuenta que el cociente de 1473 entre 798 elevado a la cuarta potencia es aproximadamente igual a 11.7, es decir:

$$(1473/798)^4 = 11.61$$

5. Ibidem, pág. 50.

6. Unidad de temperatura de la escala que tiene 100 divisiones entre la temperatura de fusión del hielo y la de ebullición del agua.

7. Unidad fundamental de temperatura que equivale a la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (temperatura triple del agua = 273.16 K) o $\text{K} = -273.16\text{ C}$

En 1879 concluyó que la energía total de la radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta T .

Fue Ludwig Boltzmann quien presentó en 1884⁸ una justificación teórica del resultado de Stefan. Boltzmann hizo la demostración con ayuda solamente de razonamientos termodinámicos. A este resultado se le llama la Ley de Stefan-Boltzmann. La energía a la que se refiere esta ley es la energía total que emite el cuerpo. En particular, hay que darse cuenta que dicha ley no dice nada acerca de las propiedades de la radiación a distintas frecuencias. Por otro lado, en 1895 Otto Lummer y Willy Wien construyeron por primera vez una cavidad que sirvió de fuente de radiación de cuerpo negro.

En 1886 W. Wien⁹ publicó un trabajo en el que obtuvo la distribución de la energía en la radiación de cuerpo negro, es decir, la energía según la frecuencia de radiación y de su temperatura. Para ello utilizó una sugerencia propuesta en 1887 por el físico norteamericano V. A. Michelson que utilizó la distribución de velocidades que había obtenido Maxwell. Así, Wien obtuvo los resultados mostrados en la Figura 3. Aquí se muestran varias distribuciones para distintas temperaturas. Note que estas curvas tienen la forma general de una campana. Posteriormente, entre 1879 y 1899, Max Planck presentó una derivación más rigurosa que los resultados de Wien.

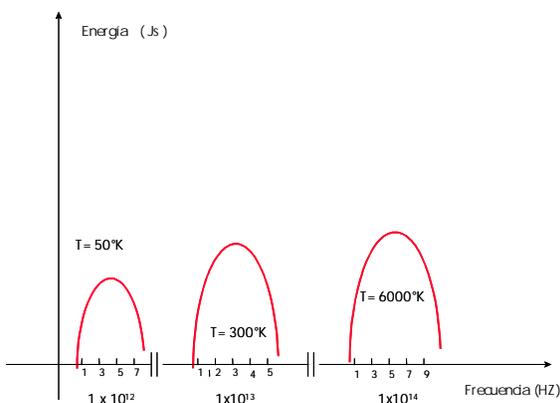


FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE WIEN PARA DISTINTAS TEMPERATURAS.

El valor de la frecuencia f_m para el cual la distribución adquiere un máximo, es diferente para distintas temperaturas. Vemos que al aumentar la temperatura aumenta este valor máximo de f_m . Esto constituye lo que se llama Ley de desplazamiento de Wien. En 1879 Lummer y Pringsheim confirmaron experimentalmente este desplazamiento para temperaturas del cuerpo negro entre 100°C y 1300°C.

Hacia fines de siglo, se realizaron experimentos para valores de las frecuencias mucho menores que las visibles y se concluyó que la Ley de radiación de Wien dejaba de ser válida en esos rangos. De hecho, para frecuencias muy bajas había discrepancias muy fuertes con los resultados experimentales.

En Junio de 1900 apareció un trabajo del notable físico inglés Lord Rayleigh¹⁰, en el que aplicaba el teorema de equipartición de la energía de la Teoría cinética a la radiación electromagnética. Su argumento fue muy sencillo: calculó el número de ondas que había en un intervalo muy pequeño de frecuencias y, de acuerdo con el teorema de la equipartición, a cada una de ellas le asignó la misma energía. Así, obtuvo una distribución de frecuencias. A esta ley se le ha llamado Ley de la radiación de Rayleigh-Jeans. Al comparar los resultados experimentales, resulta que la ley de Rayleigh concuerda en la región de muy bajas frecuencias, justamente donde la Ley de Wien falla. En las altas frecuencias, es la ley de Rayleigh la que falla, ya que la distribución crece sin cesar, hecho que no es aceptable. Pero es en la región de altas frecuencias donde la Ley de Wien concuerda con la realidad. Es importante recalcar que hasta la última mitad de 1900 se sabía que las leyes de Wien y Rayleigh no podían describir los resultados experimentales obtenidos para la distribución de la radiación de cuerpo negro. Se ve que en cierta forma son complementarias. Lo único que hacía falta era una ley que para frecuencias grandes concordara con la Ley de Wien, mientras que para frecuencias bajas concordara con la Ley de Rayleigh. En la Figura 4 se muestra la distribución de Rayleigh.

8. Eliezer Braun, op. cit., pág. 51.

9. Eliezer Braun, op. cit., pág. 52.

10. Ibidem, pág. 53.

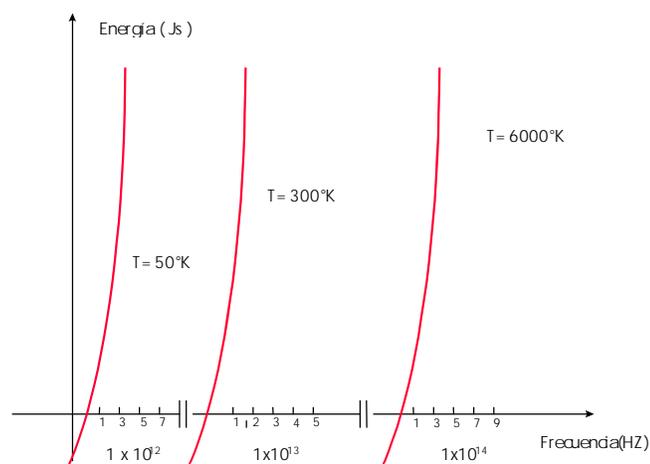


FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH PARA DISTINTAS TEMPERATURAS.

3. Algunas herramientas fundamentales...

Una de las más penosas experiencias a lo largo de toda mi vida científica ha sido que muy raramente (más bien decir que nunca) logré obtener el reconocimiento universal para un nuevo hallazgo, cuya validez pudiera demostrar de una forma concluyente, aunque sólo fuera de carácter teórico.

Max Planck

En su esfuerzo, Planck, por encontrar una explicación teórica de su descubrimiento, hizo uso de algunas teorías y postulados de otros científicos, en especial de la 2da. Ley de la entropía de Boltzmann. A continuación daremos un repaso a ésta y a otras herramientas utilizadas por el científico.

Como físico, Planck era un hombre de ciencia, enérgico, trabajador y dedicado. A sus 17 años, cuando ingresó en la universidad, Planck buscó al jefe del departamento de Física y le expuso sus ambiciones. La respuesta no fue animadora: "La Física es una rama del conocimiento que casi está completa", dijo el profesor. Todos los descubrimientos importantes han sido hechos, ya casi no vale la pena dedicarse a la Física¹¹.

Las observaciones desanimadoras de la primera autoridad en Física a quien se dirigió, no lo disuadieron de

estudiar dicha ciencia, pues se dedicó a una parte de ella, la Termodinámica¹² que ya no le interesaba a otros, que la creían ya completa y acabada. No era el propósito de Planck perderse en la obscuridad, muy al contrario, esperaba hacer época en la ciencia.

Esta parte de la Física se ocupa de las relaciones entre el calor y la acción mecánica (trabajo), y como el calor es un factor en todo sistema físico, el alcance de la Termodinámica es excepcionalmente amplio. De sus leyes no sólo se deducen los principios de las máquinas, sino hasta de meteorología, química, geología y aun las ciencias de la vida. El hecho que las leyes de termodinámica, sencillas y contadas explicasen tanto, le quería decir a Planck que eran verdades absolutas las que expresaban lo que había en la naturaleza de sencillo, inmutable y eterno. Planck deseaba dedicar su vida a estas leyes, a explorar sus consecuencias en varios dominios de la ciencia, a demostrar en un problema tras otro su aplicabilidad inagotable.

Así, Planck se puso a estudiar Termodinámica, a leer publicaciones originales al respecto, muchas de ellas de sus dos profesores, Kirchhoff y Von Helmholtz. En sus estudios, Planck concibió la idea de la "entropía" que es parte esencial de la Segunda Ley. La Primera Ley de la Termodinámica afirma que la energía siempre se conserva; no puede ser creada ni destruida. Este es un enunciado muy general y hoy sigue exponiéndose casi de la misma manera en que Planck la estudió en el Gymnasium. No ocurre lo mismo con la Segunda Ley; en un principio estuvo íntimamente ligada a una cuestión práctica: ¿cuánto trabajo puede obtenerse del calor? La Segunda Ley afirmaba que en el curso natural de los hechos, cierta cantidad de energía se tornaba inaprovechable para posteriores usos. Hoy es entendida de manera más profunda y general, y el "trabajo" es sólo una de las muchas caras. Planck fue uno de los primeros en atisbarlo cuando en sus estudios en Berlín se encontró con los escritos de Rudolf Clausius, autor de una versión de la Segunda Ley que difería de la aceptada.

11. Barbara Lovett, *Los creadores de la nueva física*, pág. 52.

12. Barbara Lovett, op. cit., pág. 52.

La versión de la Segunda Ley de Classius explica que es imposible convertir en trabajo toda la energía calorífica. La medida que hace posible esto se llama "entropía" y es una magnitud puramente matemática, una relación (razón fija) entre magnitudes, que mide los cambios de la naturaleza en un sólo sentido, tendiendo a aumentar: "cuando ocurre un cambio natural, la entropía aumenta o, en el menor de los casos, permanece la misma".

Luego de descubrir la obra de Classius, Planck inició su primer artículo científico que renunciaba y pulía las ideas de Classius. Planck trabajó en él con entusiasmo; cuando terminó, lo presentó como tesis doctoral y fue publicado. Con apenas una o dos excepciones a nadie le interesaba la entropía cuando Planck se encontró con ella. Como veremos más adelante, el estudio de las moléculas daría un nuevo significado a la "tendencia de la entropía a aumentar". El efecto del trabajo de Planck sobre la comunidad científica puede considerarse nulo en esa época. Cuando fuera apreciada la obra de Classius, también lo sería la suya. Tenía razón, salvo en una cosa: ignoraba que otro teórico (Josiah Willard Gibbs¹³, de la Universidad de Yale) seguía la misma línea de pensamiento y el trabajo de Gibbs había sido publicado un poco antes, de modo que cuando por fin fue apreciada la idea de la entropía, fue Gibbs y no Planck quien recibió el crédito retrasado.

En Berlín, como en Munich y en Kiel, Planck había continuado sus investigaciones sobre la Segunda Ley en formulación de Classius y la había defendido por carta con otros científicos; pero se queja en su autobiografía: "Todos mis argumentos cayeron en oídos sordos". Dijo que en toda su carrera científica no tuvo la satisfacción de convencer a nadie que sus ideas eran correctas. Siempre tuvo que esperar que otra persona llegase y demostrase con argumentos muy diferentes que él tenía razón. En el caso de la Segunda Ley de la Termodinámica esa persona, según Planck, fue el físico austriaco Ludwig Boltzmann¹⁴.

Boltzmann, basándose en el movimiento molecular, dedujo la Segunda Ley de la Termodinámica. Era casi la for-

ma en que Classius había dado a la ley; su razón, la entropía, la identificó Boltzman como una medida del desorden. Boltzman, al demostrar que su ley tenía un mayor significado, demostró algo más: que no representaba un absoluto.

El trabajo de Boltzman era estadístico. No era posible medir el movimiento exacto de cada una de las incontables moléculas de un sistema. De esta manera, tuvo que basar su labor en supuestos acerca del movimiento molecular por término medio, en supuestos estadísticos. Las deducciones que seguían también eran estadísticas: la entropía aumentaba, pero sólo en promedio. En un caso particular, la entropía podría disminuir y aunque esto no era algo imposible, era sumamente improbable.

A pesar de su devoción al incremento de la entropía tomado en sentido absoluto, Planck acabó aceptando la interpretación estadística de la entropía de Boltzmann y en persona demostró su acierto.

Boltzmann expresó la entropía en términos de las posibles distribuciones de configuración y velocidad del sistema compatibles con su energía. En otras palabras, consideremos un gas de partículas (Figura 5a), supóngase que la partícula 1 tiene una velocidad v_1 , que la partícula v_2 tiene una velocidad v_2 , etc. Una vez conocidos los valores de las velocidades, se puede calcular la energía total del gas. Se puede uno imaginar ahora otro gas (Figura 5b) compuesto de las mismas partículas, pero ahora la partícula 1 teniendo la velocidad v'_1 , que tenía la primera partícula en el primer gas. De la misma forma, ahora la partícula 2 tiene la velocidad v'_2 , etc. Calculando la energía total de este segundo gas puede ocurrir que esta energía total sea igual a la energía total del primer gas. Esto quiere decir que cada partícula de un gas tiene una energía distinta a la energía correspondiente en otro gas, pero la suma de todas las energías tiene el mismo valor. Decimos que se tienen dos distribuciones microscópicas de las velocidades de las partículas compatibles con el mismo valor de la energía total. Habida cuenta de que el número de partículas en un gas es muy grande (10^{20} partículas en un centímetro cúbico de gas), es claro

13. *Ibidem*, pág. 65.

14. *Ibidem*, pág. 69.

que hay un número muy grande de distribuciones distintas todas compatibles con el mismo valor de la energía.

En general, Boltzmann encontró que la entropía de un sistema está relacionada con el número total de distribuciones microscópicas que puede tener el sistema y que son compatibles con el mismo valor de la energía total.

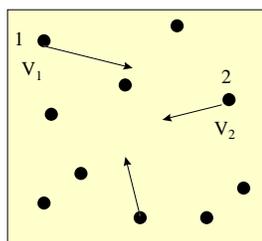


FIGURA 5A

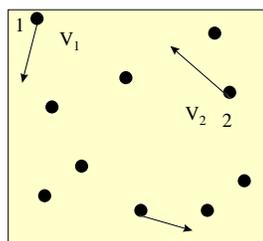


FIGURA 5B

FIGURA 5A Y 5B. DOS GASES PUEDEN TENER DISTINTAS DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD, PERO LA MISMA ENERGÍA TOTAL.

Como ilustración, usemos el ejemplo de una moneda tirada al suelo. Cuando la moneda queda quieta, genera calor igual en magnitud a la energía de movimiento perdida por la moneda. Supóngase ahora que la moneda es calentada hasta que recupere la cantidad exacta de energía que perdió. Esto no hará que la moneda regrese hasta donde estuvo al principio. La moneda no se moverá en absoluto. ¿Por qué? La razón sólo sale a la luz si se tiene en cuenta la composición molecular de la moneda. En todas circunstancias, las moléculas están en movimiento (Figura 5a y 5b), se mueven a diferentes velocidades en distintas direcciones. No hay señal de alineamiento u orden. Sin embargo, al caer la moneda, todas sus moléculas son enviadas con la misma velocidad en la misma dirección. Aunque continúan sus minúsculos movimientos al azar, hay una pauta principal en su movimiento, un orden. Tal orden se pierde en el momento del impacto. Añadiendo calor a la moneda no se restaura la pauta ordenada previa, simplemente se aceleran los movimientos casuales de las moléculas. Las partículas no se alinean de manera que se muevan en una sola dirección: la moneda, pues, no se mueve.

La razón de por qué el calor no puede ser convertido en energía mecánica reside en la tendencia del desorden a aumentar. "Los procesos naturales siguen una dirección hacia un incremento de desorden". Así, Boltzmann, basándose en el movimiento molecular, dedujo la Segunda Ley de la Termodinámica. Era casi la forma que Classius había dado a su ley; su razón, la entropía, la identificó Boltzmann como una medida del desorden.

Intentemos formarnos una idea cuantitativa de qué "significa" la temperatura desde el punto de vista de la microscópica. La idea básica es la siguiente: a medida que la temperatura aumenta, el valor medio de la energía asociada con los movimientos al azar de los constituyentes elementales de un cuerpo microscópico también aumenta. A la temperatura de 0°K cesan todos los movimientos aleatorios y éste es el significado físico de la más baja temperatura posible¹⁵.

Idealizamos las propiedades de un gas acudiendo a un modelo: se supone que el gas está constituido por un gran número de pequeñas partículas idénticas (moléculas) que se mueven al azar y con interacciones mutuas insignificantes. Este modelo nos proporciona una buena descripción de lo que es en realidad un gas enrarecido. Si las partículas en el gas son moléculas monoatómicas, hablamos de un gas monoatómico. Consideremos un recipiente de volumen (ver Figura 5a y 5b) en el que se encuentran N_0 moléculas. Supongamos primero que todas ellas se mueven hacia la derecha con velocidad n . El número de moléculas que chocan con una unidad de área de la pared por unidad de tiempo es:

$$v \left(\frac{N_0}{V} \right)$$

Cada molécula cede una cantidad de impulso $2mv$ a la pared. La presión P' es igual al momento total cedido por unidad de área y por unidad de tiempo y, en consecuencia, tenemos:

$$P' = 2mv^2 \left(\frac{N_0}{V} \right) = 4E_{dn} \left(\frac{N_0}{V} \right).$$

15. Eyvind H. Wichmann, *Física cuántica*, pág. 25.

En realidad, la dirección del movimiento es al azar y la verdadera presión P está ligada con la presión P' por:

$$P = \left(\frac{1}{6}\right) P',$$

lo que conduce a la ecuación para un mol de un gas perfecto:

$$PV = \frac{2}{3} N_0 E_{\text{cin}}$$

donde P es la presión, V es el volumen del recipiente y E_{cin} la energía cinética medida por molécula.

La temperatura absoluta se define de modo que en este modelo expresa simplemente la energía cinética medida de acuerdo con la igualdad:

$$E_{\text{cin}} = \left(\frac{3}{2}\right) kT,$$

donde la constante de proporcionalidad k se conoce con el nombre de la constante de Boltzmann. Por lo tanto, podemos escribir:

$$PV = N_0 kT = RT,$$

donde $R = N_0 k$ es la constante universal de los gases.

La constante de Boltzmann $k = R/N_0$ es la constante de los gases por molécula. Esta constante puede hallarse de tal manera que se conozca N_0 y vale

$$k = 1.380662 \times 10^{-23}.$$

De hecho, k es un factor de conversión para el paso de temperatura a energía; sin embargo, que la temperatura y la energía estén ligadas entre sí de esta manera, no debe llevar a nadie a creer que la energía y la temperatura son "la misma cosa".

Ahora, presentamos otra de las herramientas usadas por Planck. Sabemos que un cuerpo que es calentado a una temperatura elevada emite luz de todas las frecuencias o longitudes de onda. La representación gráfica (Fi-

gura 6) de la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo y área está en función de la longitud de onda; por eso, obtenemos una curva que tiende a cero tanto para longitudes de onda muy largas, como para longitudes de onda muy cortas¹⁶. En general, la curva presentará un solo máximo para cierta longitud de onda λ_{max} que depende de la temperatura. La posición de este máximo y la cantidad total de radiación emitida es más o menos la misma para todas las superficies materiales. En vez de estudiar la radiación procedente de una superficie material, cabe observar la radiación que emerge por un pequeño orificio en la pared de una superficie material mantenida a una temperatura fija. En una medición de este tipo, tenemos un recinto cerrado u horno, construido con un material refractario adecuado y con un pequeño orificio en la pared. Si se mide la energía radiante que emerge del interior del orificio, se encuentra que la intensidad de la radiación procedente del orificio en función de la longitud de onda es una curva lisa que tiende a cero, lo mismo para longitudes de onda muy largas, como para longitudes de onda muy cortas y con un máximo para una longitud de onda λ_{max} que depende de la temperatura T de las paredes de manera muy simple, a saber:

$$\lambda_{\text{max}} T = b = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ m } ^\circ\text{K}$$

La distribución espectral de la radiación emitida es independiente de la forma de la cavidad, como también de la naturaleza del material de las paredes. La constante b de la ecuación anterior, que expresa la Ley del desplazamiento de Wien¹⁷, es una constante universal que describe una notable propiedad de las cavidades en general. Además, la intensidad de la radiación que emerge por el orificio es siempre mayor para cada longitud de onda, que la correspondiente intensidad de emisión por una superficie material mantenida a la misma temperatura que las paredes de la cavidad. Con todo, el orden de magnitud de la intensidad es el mismo.

16.Ibidem, pág. 27.

17.La ley de Wien expresa que la potencia total emitida es proporcional a las áreas limitadas por las curvas y resulta proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Observe cómo la posición del máximo depende de la temperatura.

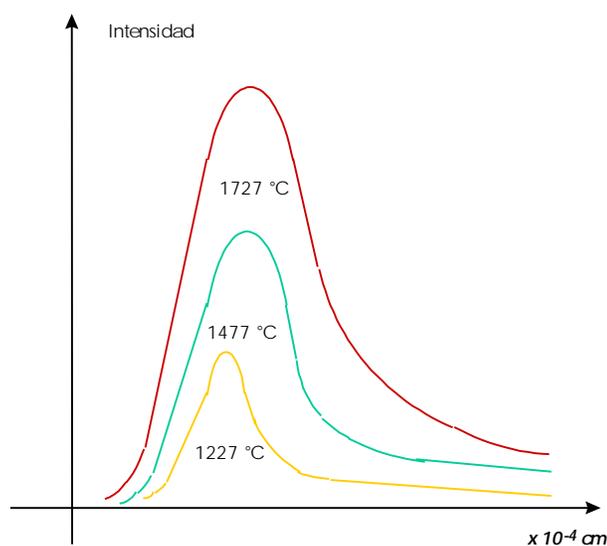


FIGURA 6. GRÁFICOS QUE REPRESENTA LA LEY DE WIEN.

Esta ley establece que los máximos de $E(\lambda, T)$ a diferentes temperaturas T_1, T_2, \dots, T_n ocurren para las longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ tales que

$$\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2 = \dots = \lambda_n T_n$$

Y así, a grandes rasgos, hemos revisado algunas de las herramientas que Planck se vio forzado a utilizar.

4. El gran salto...

Una nueva verdad científica no triunfa porque logre convencer a sus opositores y hacer que vean las cosas con más claridad, sino más bien, porque los opositores acaban por morir y surge una nueva generación que se familiariza con la nueva verdad.

Max Planck

Fue en 1897, nueve años después de reunirse con Von Helmholtz en Berlín¹⁸, cuando Planck empezó a trabajar con intensidad y firmeza en lo que se llamaría "la catástrofe del ultravioleta"¹⁹. El problema condujo a la idea de que la energía no es continua, en contra de las observaciones anteriores y de la ciencia fundada en ellas.

Planck no era el único físico interesado en el problema de la luz y el calor emitidos por el patrón de iluminación conocido como "cuerpo negro". A los físicos les atraía el caso ideal en el que el espectro de la radiación, libre de la influencia de otros factores, dependía sólo de la temperatura; otros trataban de explicar ese caso ideal y así ahondar en la comprensión de los procesos radioactivos en todos los casos (frecuencias).

Ahora bien, se observa una radiación similar a la emitida por un cuerpo negro cuando se calienta cualquier trozo sólido de metal. A bajas temperaturas es emitida una radiación de ondas largas, correspondientes a la región infrarroja del espectro. A medida que aumenta la temperatura, va apareciendo radiación de longitudes de onda más y más cortas, el metal reluce con color rojo, luego se pone anaranjado, hasta que la adición de otros colores causa que aparezca blanca al ojo. Un mayor incremento de la temperatura producirá longitudes de ondas aún más cortas, no visibles ya: las del extremo ultravioleta del espectro. Un ejemplo un poco más común lo podemos encontrar en las brasas de carbón en un anafre o en una fogata. Si hacemos la analogía del metal y el carbón a las distintas temperaturas notaremos que son muy similares.

El espectro del cuerpo negro (o de cualquier otro cuerpo) muestra cómo está distribuida la energía entre las diferentes longitudes de onda, pues algunos colores son más intensos que otros. En los tiempos de Planck ya era posible medir en el laboratorio las energías presentes en un espectro. A distintas temperaturas, las del cuerpo negro eran conocidas experimentalmente. El problema consistía en explicar esta distribución específica de la energía sobre la base del conocimiento general, es decir, sobre la Mecánica clásica o de Newton. En términos generales, así es como los físicos atacaban

luz ha sido absorbida. Si ahora forzamos el proceso inverso, calentando el cuerpo hasta la incandescencia, saldría la luz con todas las longitudes de onda. Si el cuerpo negro emitiera luz en todas las frecuencias por igual, casi toda la energía se iría en radiar a la zona más alta de frecuencia. Ya que la luz de mayor frecuencia en el espectro visible es la violeta, esta conclusión de la Física clásica se llegó a conocer como la "catástrofe del ultravioleta". Tal catástrofe nunca fue observada en el experimento y se constituyó así en la "catástrofe" de la Física clásica.

18. Barbara Lovett, op. cit., pág. 73.

19. Sabemos que un cuerpo negro absorbe todas las ondas que inciden sobre él, sin importar la frecuencia de la radiación. Cuando la luz entra en un cuerpo negro tiene una probabilidad pequeñísima, casi despreciable de volver a salir; de hecho, la

el problema: partían de una hipótesis acerca de la causa de la radiación, hipótesis que parecía razonable de acuerdo con lo conocido de antemano. Tal hipótesis adoptaba la forma de un modelo que ilustraba cómo pudiera originarse la radiación en la materia. Luego, los físicos deducían las energías de radiación que se habrían de dar de acuerdo con el modelo y confrontaban estas deducciones teóricas con las mediciones del espectro de energía real determinado en el laboratorio con la esperanza de confirmar la hipótesis.

Los modelos que se empleaban intentando resolver el problema del cuerpo negro no eran modelos del átomo. Apenas por aquel entonces se empezaban a encontrar testimonios de la existencia del electrón; las especulaciones acerca de la estructura atómica eran cosas para el porvenir. Los físicos trabajaban con supuestos generales toscos sobre la estructura de la materia responsable de la radiación. Postulaban que el cuerpo negro estaba compuesto fundamentalmente de alguna clase de partícula cargada eléctricamente, cuyo movimiento (acelerado por el calor) producía la radiación. A decir verdad, una hipótesis burda de este estilo era adecuada para el problema en cuestión; no eran los supuestos los responsables del fracaso al querer explicar la radiación del cuerpo negro. Los inconvenientes surgían cuando los físicos daban el siguiente paso con el fin de obtener la distribución energética en el espectro, había primero que atribuir energías las partículas responsables de la radiación; tenía que ser distribuida la energía entre ellas de modo que tal o cual movimiento produjese radiación de tal o cual energía. Pero si la energía fuera continua, según se suponía, no podría haber restricciones al respecto que introducirían saltos o cambios bruscos, o sea, el movimiento oscilatorio de las partículas no podía ser restringido: las oscilaciones habían de ser indefinidamente pequeñas.

Pero de esto se sigue sin remedio que la energía de la radiación en el extremo de ondas cortas (altas frecuencias) del espectro sería indefinidamente grande. En términos más técnicos, habría un aumento continuo hasta el infinito al disminuir la longitud de onda. Así, la Física predecía "la catástrofe del ultravioleta", pues sabemos que un

cuerpo material incandescente no irradia una cantidad infinita de energía. Es más, el experimento revela que la mayor parte de la energía aparece en ondas de longitud mediana. La solución es obvia: para evitar "la catástrofe del ultravioleta" y llegar a una descripción adecuada de la radiación del cuerpo negro, hay que limitar la energía posible, de tal manera que no resulte infinita ni se concentre principalmente en las ondas más cortas. Precisamente así supusieron los físicos que la energía no era continua. Que fueron incapaces de resolver el problema con semejante supuesto no hizo que lo pusieran en tela de juicio. Sólo mucho más tarde comprendieron que las leyes y teorías que empleaban descansaban en una idea discutible y que cuanta vez se tratara el problema en términos de calor, mecánica o electricidad, se llegaría a la misma conclusión: "la catástrofe del ultravioleta" y todos los caminos llevan a ella.

Así, Planck confiaba resolver el problema con una idea que contradecía a la Física de su época. A dos cosas se debió precisamente que fuera posible esto: en primer lugar, Planck resolvió el problema en sentido inverso: elaboró una fórmula que describía correctamente las energías de la radiación del cuerpo negro sin entender las cabales implicaciones de esta expresión matemática; en segundo lugar, al averiguar el significado de su fórmula, recurrió a un procedimiento matemático nuevo para él y lo aplicó mal sin darse cuenta de ello por el momento.

Planck llegó a su primera fórmula haciendo un poco de trampa. Entre las diferentes fórmulas²⁰ que se habían propuesto, dos atinaban en parte: una daba correctamente la distribución de la energía en la región espectral de ondas cortas y la otra rendía cuentas con exactitud de la región de ondas largas. Planck²¹ vio un modo sencillo y lógico de combinar las mejores características de las dos expresiones matemáticas. No sabía aún si su nueva fórmula representaría la distribución

20. Como ya se ha mencionado antes, Planck utilizó las fórmulas de las distribuciones de Wien y Rayleigh en su deducción de la fórmula que modelaba el comportamiento de la radiación emitida por un cuerpo negro.

21. Barbara Lovett, op. cit., pág. 73.

exacta en el espectro entero a todas las temperaturas. Veamos cómo explica Planck esos decisivos momentos en su vida²²:

Ciertamente yo habría podido excluir el problema residual de las ondas esféricas que se dirigen hacia dentro, mediante la introducción de una condición específica: la hipótesis de una radiación natural que tiene la teoría de la radiación posee el mismo papel que la hipótesis del desorden molecular en la teoría cinética de los gases y que afianza la irreversibilidad del proceso de radiación; pero los cálculos mostraban en forma cada vez más clara que todavía faltaba un eslabón, sin el cual resultaba imposible atacar con éxito el meollo del problema. No dispuse, pues, de otra alternativa que forcejear nuevamente con dicho problema, esta vez desde el lado opuesto, o sea, el de la Termodinámica que constituía mi terreno familiar y donde sentía que pisaba más seguro. En efecto, mis estudios previos sobre la Segunda Ley de la Termodinámica me fueron ahora muy útiles, porque desde el principio se me ocurrió relacionar no la temperatura, sino la entropía del oscilador con su energía. Se trató de una pesada broma de la suerte el que una circunstancia que en ocasiones anteriores me había parecido molesta, es decir, la falta de interés de mis colegas en el rumbo de mis investigaciones, ahora resultara una franca bendición. Mientras que una hueste de relevantes físicos trabaja en el problema de la distribución espectral de la energía, tanto en el aspecto teórico como en el experimental, todos se esforzaban únicamente en poner de manifiesto la independencia de la intensidad de la radiación con respecto a la temperatura. Por otro lado, yo sospechaba que la conexión fundamental estaba en la dependencia de la entropía respecto de la energía. Como el significado del concepto de la entropía no había sido aún plenamente valorado, nadie puso atención en el método por mí adoptado y pude elaborar plenamente mis cálculos en absoluta calma, en forma completa, sin temor de interferencias o disputas.

Puesto que para la irreversibilidad del intercambio de energía entre un oscilador y la radiación que lo activa tiene una importancia característica el segundo cociente diferencial de su entropía respecto de su energía, yo calculé el valor de esa función bajo el supuesto de que la Ley de distribución de energía espectral de Wien es válida, ley que en aquel entonces personificaba el centro del interés general. Obtuve el notable resultado de que bajo tal supuesto, el recíproco de ese valor que aquí llamaré R , es proporcional a la energía. Esta relación es tan sorprendentemente simple que por un momento pensé que tenía una validez universal y me esforcé por probarlo teóricamente; sin embargo, resultó ser una presunción insostenible a la luz de mediciones posteriores; aunque en el caso de pequeñas energías y las correspondientes

a las ondas cortas, la Ley de Wien seguía siendo confirmada de manera satisfactoria. En el caso de amplios valores de la energía y de las correspondientes ondas largas se hallaron divergencias apreciables. Primero por Lummer y Pringsheim, luego por las mediciones de H. Rubens y F. Kurlbaum en rayos infrarrojos de fluorita y sal de roca, que revelaron un comportamiento si bien totalmente diferente, igualmente simple, por cuanto la función R no es proporcional a la energía, sino al cuadrado de la energía para grandes valores de energía y longitudes de onda.

De este modo, experimentos directos establecieron dos límites simples de la función R : para pequeñas energías, R es proporcional a la energía; para energías mayores, R es proporcional al cuadrado de la energía. Obviamente, así como todo principio de distribución de energía espectral rinde cierto valor para R , igualmente toda fórmula para R lleva a una definida Ley de la distribución de energía. El problema radicaba en encontrar para R una fórmula que diese por resultado una Ley de la distribución de la energía establecida a través de mediciones, por consiguiente, el paso más obvio consistía en dar a R un valor equivalente a la suma de un término proporcional al primer grado de la energía y de otro término proporcional al segundo grado de la energía, de modo que el primero fuera decisivo para los pequeños valores de la energía y, el segundo para valores más altos. De esa manera, se obtuvo una nueva fórmula para la radiación, la cual sometí a examen de la Sociedad de Física de Berlín en su reunión del 19 de Octubre de 1900.

Planck se daba cuenta que había encontrado la solución al problema del cuerpo negro, pero ni él ni nadie sabía qué significaba esa solución. La había obtenido haciendo conjeturas, juntando partes de fórmulas y al hacerlo había cambiado automáticamente los supuestos en que se fundaban aquellas sumas matemáticas. ¿Como habían cambiado? ¿Qué nuevos supuestos había introducido sin notarlos? El único modo de enterarse era ensayar diferentes hipótesis y ver si alguna de ellas conducía a la fórmula. Sólo entonces quedaría claro lo que afirmaba aquella combinación atinada de símbolos acerca del proceso de radiación.

Planck inició sus intentos de trazar una línea lógica de la teoría a los hechos, de manera que no sólo fueran descritos sino también comprendidos. No basó su intento de solución en la teoría eléctrica, lo que hizo fue utilizar termodinámica; quería resolver el problema de la radiación del cuerpo negro y también quería poner de manifiesto el incremento de entropía tomada en sentido

22. Max Planck, *Ensayos científicos. Una autobiografía Científica*, pág. 232.

absoluto. Cuando en 1900 halló la solución correcta, aunque sin base teórica, trató de deducir aquella respuesta en términos del incremento de entropía en cada caso particular. Este camino era imposible, así que tuvo que tomar la última opción: la interpretación estadística de la ley según Boltzmann. Planck nunca había utilizado aquella interpretación, pero se volvió al problema y lo definió otra vez como lo habría hecho Boltzmann en términos de sus movimientos moleculares y de sus probabilidades estadísticas. ¿Podría deducir sobre esta base su propia fórmula correcta? Planck siguió adelante: leyó los artículos en los que Boltzmann había presentado su método estadístico, lo aplicó al problema que traía entre manos y encontró que efectivamente era conducido a su propia fórmula. Con el fin de deducir la fórmula correcta para el cuerpo negro, era necesario seguir un camino estadístico, pero hacía falta algo más: una hipótesis que rompía de plano con la Física del siglo XIX. No aplicando el método de Boltzmann como Boltzmann quería que fuese aplicado, Planck fundó su labor en la hipótesis que la energía no es continua.

En determinado paso para resolver un problema, el método de Boltzmann requería que se tomara la energía como si estuviera dividida en porciones separadas, pues si se trataba de determinar un grado de probabilidad, había que tener algo que contar. Boltzmann y otros familiarizados con su método entendían que esta división de la energía no pasaba de ser una técnica de cálculo. En una etapa posterior de los cálculos, siempre se quitaba uno de encima las porciones mediante otra técnica y se hacía de nuevo la energía²³.

Una corriente de energía ininterrumpida es infinitamente divisible. Si Planck hubiera aplicado el méto-

23. A veces se sigue un procedimiento parecido al resolver problemas en que está involucrada una figura curva, por ejemplo, un círculo. En vez de calcular su circunferencia completa, es más fácil, aritméticamente hablando, recurrir a una estimación burda. El matemático representa el círculo lo más precisamente posible mediante diminutos segmentos rectos de igual longitud (proceso de derivación). Para los fines de cálculo, la longitud total de estos segmentos rectos puede tomarse por la circunferencia. Cuando es más conveniente, el matemático obtiene la magnitud exacta de la circunferencia haciendo que aumente sin límite el número de líneas rectas. De esta manera, restaura la curva sin quebraduras (proceso de integración).

do de Boltzmann como su autor quería que se hiciera y luego de calcular con porciones de energía, hubiese vuelto a reunir las permitiéndoles crecer sin límite, habría obtenido la fórmula que llevaba a "la catástrofe del ultravioleta". Esto era inevitable, sin importar qué camino se tomara²⁴. Durante todos los años que Planck llevaba trabajando sobre el problema, siempre había tenido la fortuna de evitar dicha fórmula, sus métodos no indicaban la consecuencia desastrosa de la Física clásica. Cuando al fin llegó el paso decisivo, el procedimiento que empleaba era nuevo para él. No reunió las porciones de energía. Precisamente en aquel punto se dio cuenta que había un modo de alcanzar la respuesta correcta: la fórmula que tenía delante. Esto significaba que evitaba "la catástrofe del ultravioleta", pues la energía tratada en porciones no es infinitamente divisible y por lo tanto la energía radiante tampoco se hace infinita. Lo que es más, haciendo desiguales las porciones, la energía puede ser distribuida de tal modo que no se concentre sobre todo en las ondas más cortas. Y así, en su autobiografía Planck intenta dar una explicación sencilla de su fórmula, probablemente de algo que ni su mismo creador comprendía. Es válido tomar en cuenta que esta autobiografía fue escrita casi en el ocaso de su vida. De ahí la sencillez de su explicación y la claridad de sus conceptos al relatar, por ejemplo, cómo fue que decidió que la energía era discontinua. En palabras de Planck²⁵:

Aun admitiendo la validez absolutamente de la fórmula de radiación, mientras siguiera teniendo el carácter de una ley descubierta por una intuición afortunada, no podía esperarse que su significado pasase a ser un significado formal. Con base en ello, el mismo día que formulé esta ley, empecé a dedicarme a la tarea de investigar su verdadero significado físico, planteamiento que me condujo automáticamente al estudio de la interrelación de la entropía y la probabilidad, es decir, a seguir la línea de pensamiento iniciada por Boltzmann. Puesto que la entropía S es una magnitud resultante de una suma y la probabilidad W lo es de una multiplicación, yo simplemente postulé que

24. Einstein demostró en 1905 que la yuxtaposición de las porciones de energía habría restaurado la "catástrofe del ultravioleta". En realidad, Einstein puso de manifiesto que cualquier tratamiento clásico del problema conduce a dicha catástrofe.

25. Max Planck, op. cit., pág. 233.

$S = k \log W$, donde k es una constante universal, luego investigué si la fórmula para W , la cual se obtiene cuando se sustituye S por el valor que le corresponde según la ley de radiación antes mencionada, podía ser interpretada como medida de la probabilidad. Como resultado descubrí que ello era verdaderamente posible y que dentro de esta relación k representaba la constante absoluta de los gases, referida no a molécula (gramo o mol), sino a moléculas reales. Esta constante es frecuentemente llamada "constante de Boltzmann"; sin embargo, hay que señalar que Boltzmann nunca la expuso o por lo menos nunca pensó en investigar su valor numérico. De haberlo hecho, habría tenido que examinar el problema del número de átomos reales, tarea que dejó a su colega J. Looschmidt, mientras él en sus cálculos propios siempre tuvo presente la posibilidad de que la teoría cinética de los gases pudiera representar sólo una descripción mecánica. Por eso se conformó con detenerse ante los átomos (gramos). El signo k fue siendo aceptado gradualmente. Varios años después aún se acostumbraba calcular con el número L de Looschmidt.

En cuanto a la magnitud W , descubrí que para efecto de interpretarla como probabilidad, era necesario introducir una constante universal que yo llamé " h ". Puesto que representaba la medida de la acción (energía \times tiempo), le dí el nombre de "quantum elemental de la acción". De este modo, la naturaleza como medida de la probabilidad, en el sentido apuntado por Boltzmann, quedó también establecida en la esfera de la radiación. Lo anterior aparecía con especial claridad en una proposición, de cuya validez me convencí en numerosas conversaciones mi más cercano discípulo, Max von Laue. Es decir, que la entropía de dos haces de luz coherentes es menor que la suma de las entropías de los haces individuales, lo que coincidía con la proposición de que la probabilidad de que ocurran dos reacciones mutuamente dependientes, es diferente a la probabilidad de que se produzcan las reacciones individuales.

En tanto que el significado del quantum de acción para la interrelación de entropía y probabilidad había quedado establecido concluyentemente, el papel que tenía esta nueva constante en la sucesión regular de los procesos físicos seguía siendo una pregunta abierta. Por eso traté de ensamblar el quantum elemental de acción " h " dentro del armazón de la teoría clásica; pero la constante se mostraba reacia a tales intentos. Mientras se la pudiera considerar infinitesimalmente pequeña, es decir, mientras se tratara de energías más altas y espacios de tiempo más largos, todo estaba en perfecto orden; pero las dificultades surgían en uno u otro punto, dificultades que se hacían más notorias cuando se tomaban en cuenta frecuencias más altas. El fracaso sufrido en todos los intentos de vencer este obstáculo, hizo bien pronto evidente que el quantum elemental de acción tiene un papel elemental en la física atómica y que su formalización había abierto una nueva era en las ciencias naturales.

Veamos ahora parte del proceso matemático que realizó Planck para crear la fórmula que lo llevó a encontrar la constante " h ". Tomemos la siguiente fórmula²⁶:

$$E(\lambda, T) = \left(\frac{8\pi hc}{\lambda^5} \right) \left(e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

Donde $E(\lambda, T)$ es la densidad de energía radiante en la cavidad por unidad de longitud de intervalo de longitud de onda, para la longitud de onda λ y la temperatura T . La constante k es la constante de Boltzmann y c es la velocidad de la luz. Tenemos así que la intensidad de la radiación emitida por un pequeño orificio en la pared de la cavidad es proporcional a la densidad de la energía dentro de la misma y, por lo tanto, la fórmula matemática anterior es la representación de la Figura 6. Para hallar la posición del máximo de $E(\lambda, T)$ consideramos como función de λ y T como constante.

Hacemos el siguiente cambio de variable²⁷:

$$x = \frac{hc}{\lambda kT} \quad \lambda = \frac{hc}{xTk}$$

y sustituimos en (1):

$$E = \left(\frac{8\pi hc}{\left(\frac{hc}{xTk} \right)^5 Tk} \right) (e^x - 1)^{-1}$$

Simplificando:

$$E = \left(\frac{8\pi x^5 T^4 k^4}{h^4 c^4} \right) (e^x - 1)^{-1},$$

y despejando las constantes:

$$E = \left(\frac{8\pi T^4 k^4}{h^4 c^4} \right) \left(\frac{d}{dx} (x^5 (e^x - 1)^{-1}) \right)$$

e igualando su primera derivada a cero tenemos que:

$$-x^5 (e^x - 1)^{-2} e^x + 5x^4 (e^x - 1)^{-1} = 0'$$

simplificando:

$$-\frac{x^5 e^x}{(e^x - 1)^2} + \frac{5x^4}{e^x - 1} = 0$$

26. Eyvind H. Wichmann, *Física cuántica*, pág. 30.

27. *Ibidem*, pág. 10.

y factorizando términos comunes:

$$\left(5 - \frac{xe^x}{e^x - 1}\right) \left(\frac{x^4}{e^x - 1}\right) = 0,$$

tenemos que:

$$\frac{5(e^x - 1) - xe^x}{e^x - 1} = 0,$$

$$5e^x - xe^x - 5 = 0.$$

Finalmente se escribe como:

$$\frac{1}{5}x + e^{-x} - 1 = 0.$$

Igualamos la ecuación anterior a f(x):

$$f(x) = \frac{1}{5}x + e^{-x} - 1.$$

Derivamos con respecto a x:

$$f'(x) = \frac{1}{5} - e^{-x}.$$

Por el método de interpolación de Newton-Raphson²⁸:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{f'(x)},$$

interpolamos:

| n | x _{n+1} | f(x) | f'(x) |
|---|------------------|-----------------|-------------|
| 0 | 2 | -0.464664716 | 0.064664716 |
| 1 | 9.18575353 | 0.837253195 | 0.19989751 |
| 2 | 4.99734122 | 6.22412955x10-3 | 0.193022974 |
| 3 | 4.965132583 | 3.54129x10-6 | 0.193022974 |
| 4 | 4.965114232 | 0 | 0.193022846 |

obtenemos:

$$x = 4.9651142232,$$

aplicamos el inverso y encontramos:

$$\lambda = \frac{1}{x} = 0.201405235.$$

Ahora, de la siguiente ecuación²⁹:

$$\lambda T = b = \frac{hc}{4.9651142232 k} = 2.8978 \times 10^{-3},$$

donde b se denomina constante del desplazamiento de Wien y, dado que conocemos c, que es la velocidad de la luz y k la constante de Boltzmann, podemos despejar h, entonces

$$h = \frac{b \cdot 4.9651142232 k}{c},$$

sustituimos valores de las constantes antes mencionadas y dado que conocemos todos los valores, podemos conocer h, entonces

$$h = 6.626196668 \times 10^{-34}.$$

Esta es una manera para encontrar la constante de Planck y es de la forma en que yo la pude demostrar. Hay otras maneras de hacerlo, por ejemplo, ya que conocemos el valor de I lo podemos sustituir en la ecuación 1. El problema es que no conocemos algunos valores para la temperatura y la energía, que deberían ser datos experimentales y es la manera en que Planck hizo la demostración de su constante.

La ley de la radiación de Planck reza en todo su esplendor:

Un oscilador de frecuencia natural u puede tomar o ceder energía únicamente en porciones de magnitud hu, donde h es una nueva constante fundamental de la naturaleza³⁰.

Fue así como Planck descubrió la sencilla pero extraña regla que residía detrás de su primera fórmula y que constituye la base de la Teoría cuántica. La regla enuncia una relación entre una porción de energía que Planck llamó "cuanto" ("quantum", usando la palabra latina que significa "qué cantidad") y la frecuencia de una onda relacionada con su longitud. Para que su resultado fuera consistente con la Ley de Wien (que es un resultado de la Termodinámica y por ello independiente de los detalles

28. Notas de clase. 10-30-97. Métodos Numéricos.

29. Alonso y Finn, *Mecánica cuántica*, pág. 10.

30. Eyvinda H. Wichhann, op. cit., pág. 29.

del modelo empleado), Planck tuvo que suponer que la energía E es proporcional a la frecuencia ν , multiplicada por un número fijo, la constante " h "³¹:

$$E = h\nu.$$

La regla de Planck era extraña porque consignaba una igualdad entre la energía concebida como discontinua (E) y (en vista de que la frecuencia añade fenómenos ondulatorios) la energía concebida como continua. Tuvo que pasar mucho tiempo hasta que no fuera apreciado todo el alcance de esta ecuación, al demostrar que la luz podría entenderse como una corriente de granos de energía o cuantos. El problema del cuerpo negro se refería a la emisión y absorción de luz, no a la estructura de la radiación. El trabajo de Planck imponía un límite sólo a la energía de las partículas eléctricas que componen la materia: podían moverse sólo de ciertas maneras, de suerte que fuese emitido o absorbido un cuanto entero $h\nu$. Si la luz sale de la materia en porciones y vuelve a ella en porciones, parecería seguirse que la luz debe existir en forma de partículas. Pero en 1900 no había la menor señal de que la luz pudiera tener semejante estructura, en tanto que sus propiedades ondulatorias habían sido puestas fuera de duda. La mayor extensión de $E = h\nu$ llegaría más tarde cuando hubiera un testimonio de la estructura discontinua de la luz. Mientras tanto, las discontinuidades anunciadas por la ecuación de Planck fueron atribuidas sólo al emisor, no a lo que era emitido.

Después de que la fórmula de Planck fue aceptada, se hizo un intenso trabajo experimental para verificarla en un amplio rango de frecuencias. Así, la fórmula de Planck fue confirmada en experimentos realizados por L. Holborn y S. Valentiner hasta temperaturas de 1600°C, por W.W. Coblentz para frecuencias altas, por E. Waburg, etc. Todos llegaron a la conclusión de que la distribución obtenida por Planck describía perfectamente la realidad. A continuación vemos en la gráfica una comparación de las distribuciones obtenidas por Wien, Rayleigh y por Planck a la misma temperatura (Figura 7):

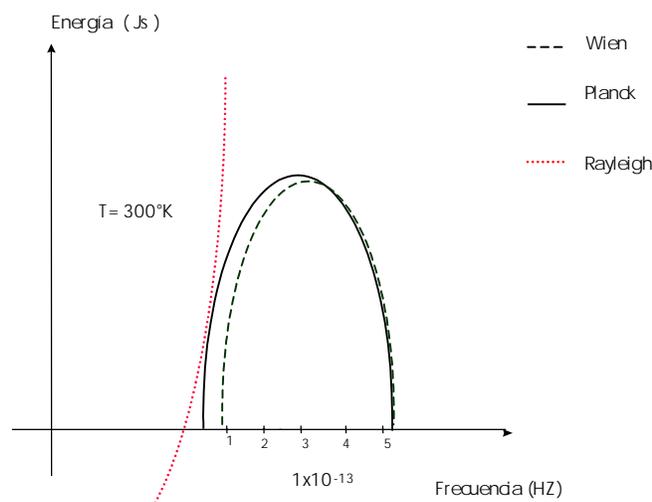


FIGURA 7. COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE WIEN, RAYLEIGH Y PLANCK A LA MISMA TEMPERATURA.

5. Y así nace la nueva Física...

Se trató de una pesada broma de la suerte, el que una circunstancia que en ocasiones anteriores me había parecido molesta, es decir, la falta de interés de mis colegas en el rumbo de mis investigaciones, ahora resultara una franca bendición.

Max Planck

En los años siguientes al trabajo de Planck, prácticamente nadie le puso atención. Se pensó que su hipótesis no tenía mayores consecuencias físicas. De hecho, de manera inconsciente se esperaba que alguien justificara satisfactoriamente la distribución obtenida, pero en forma congruente con los principios de la mecánica de Newton.

Imaginemos qué clase de físico habría sido capaz de tomar en sus manos el desafío representado por la obra de Planck. No estaría interesado en la aplicación de las leyes físicas, sino en la estructura que hay detrás de ellas. Su actitud contra esta estructura sería crítica, deseosa de alimentar las ideas que fueran contra ella. Tendría que desear adentrarse hasta la raíz de las cosas. Albert Einstein era precisamente un científico así.

A fines del siglo pasado se consideraba que cuando la luz (visible o ultravioleta) cae sobre una superficie metá-

31. Niels Borh, *Científico, Filósofo y Humanista*, pág. 23.

lica, ésta emite electrones³² (Figura 8). El fenómeno no es en sí sorprendente, pues sabemos que la luz es radiación electromagnética y cabe esperar que el campo eléctrico de la onda luminosa puede ejercer una fuerza sobre los electrones en la superficie metálica y provocar la emisión de algunos de ellos. Sin embargo, lo que sí es sorprendente es hallar que la energía cinética del electrón emitido es independiente de la intensidad de la luz, pero depende de la frecuencia de manera muy simple: aumenta linealmente con ella. Si aumentamos linealmente la intensidad de la luz, aumentamos únicamente el número de electrones emitidos por unidad de tiempo, pero no su energía. Es muy difícil entender esto desde el punto de vista de la Física clásica, ya que deberíamos esperar que cuando aumenta la intensidad de la onda luminosa y, por consiguiente, la amplitud del campo eléctrico en la misma, los electrones deberían ser acelerados alcanzando mayores velocidades.

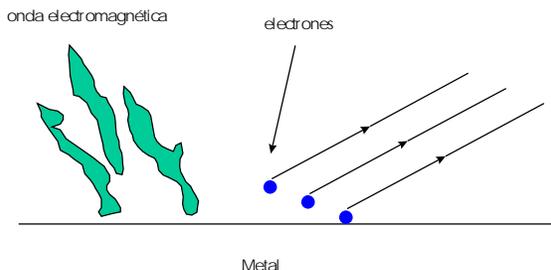


FIGURA 8. AL INCIDIR RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA SOBRE LA SUPERFICIE DE UN METAL SE EXPULSAN ELECTRONES; ÉSTE ES EL EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Estos hechos habían quedado establecidos antes de 1905 por P. Lenard y otros investigadores. Mediciones precisas entre la frecuencia de la luz y la energía de los electrones emitidos no se llevaron a cabo hasta 1916, cuando este tema fue estudiado por R. A. Millikan.

En 1905, Albert Einstein³³ sugirió una explicación de estos fenómenos. De acuerdo con esta explicación, un haz de luz monocromática llega en porciones de mag-

nitud $h\nu$, donde ν es la frecuencia; este cuanto de energía puede transferirse por completo a un electrón. En otras palabras, el electrón adquiere la energía $E=h\nu$ mientras se encuentra en reposo en el metal. Si ahora suponemos que hay que realizar un trabajo W para extraer del metal el electrón, éste saldrá con una energía cinética

$$E_{\text{cin}} = E - W$$

o bien

$$E_{\text{cin}} = h\nu - W$$

Se supone que la cantidad W , conocida como trabajo de extracción del material, es una constante característica del metal independiente de la frecuencia ν .

La ecuación es la célebre ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico. La energía de los electrones emitidos aumenta linealmente con la frecuencia, pero es independiente de la frecuencia de la luz. El número de electrones emitidos, claro está, es proporcional al número de cuantos incidentes y, por consiguiente, proporcional a la intensidad de la luz que incide. De esta manera, Einstein explicó los aspectos cualitativos del efecto fotoeléctrico.

Einstein llegó a esta idea observando que ciertos aspectos de la extraña Ley de la radiación del cuerpo negro de Planck podrían entenderse atribuyendo propiedades corpusculares de la radiación electromagnética en la cavidad, es decir, admitiendo que la energía radiante está constituida por cuantos de magnitud $h\nu$. Hemos hecho notar aquí que el significado real de la hipótesis de Planck se encontraba por aquel entonces oculto en la obscuridad y la nueva visión del fenómeno de la radiación del cuerpo negro que ofrecía Einstein fue, por consiguiente, un importante paso adelante. Con todo, el aspecto más notable de todo esto fue que Einstein pudo aplicar su interpretación del fenómeno de la radiación del cuerpo negro a una situación física nueva: el efecto fotoeléctrico.

32. Este fenómeno lo podemos observar de manera cotidiana cuando la luz del sol (cualquier haz de luz) es reflejada por un metal, por ejemplo, las defensas cromadas de los autos en las calles "destellan" cuando reflejan los rayos solares.

33. Eyvind H. Wichmann, op. cit., pág. 32.

La ecuación anterior era una predicción teórica precisa y, como tal, susceptible de contrastaciones experimentales cuantitativas. Además, ofrecía la oportunidad para una nueva medición de la constante de Planck, suponiendo que las ideas de Einstein fueran correctas. Millikan encontró, después de una serie de mediciones precisas y elegantes, un completo acuerdo con la ecuación de Einstein.

El método de Millikan³⁴ se ilustra en la Figura 9. La luz monocromática incide sobre una superficie metálica, generalmente de un metal alcalino y provoca la emisión de fotoelectrones. Un electrodo colector que se puede mantener a un potencial arbitrario (V respecto del fotocátodo), se coloca cerca de la superficie sensible a los fotones y se mide la corriente de fotoelectrones. Si suponemos ahora que todos los electrones se emiten con la misma energía cinética E_{cin} dada por la ecuación anterior, es claro que ninguno de ellos puede alcanzar el electrodo colector si $eV > E_{cin}$. En consecuencia, podemos observar que la corriente en función del potencial de frenado V y si V_0 es el menor valor del potencial para el que la corriente se anula, tenemos:

$$V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{W}{e}$$

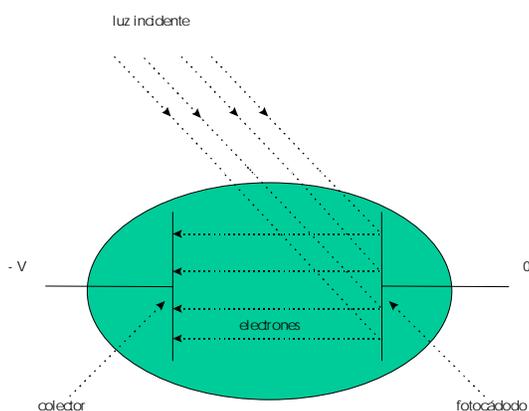


FIGURA 9. FIGURA ILUSTRATIVA DEL EXPERIMENTO DE MILLIKIAN.

Se emiten electrones con una energía:

$$E_{cin} = h\nu - W$$

donde W es el trabajo de extracción característico del material del cátodo, cuando la luz de frecuencia ν incide sobre el fotocátodo. La corriente eléctrica dirigida hacia el colector cesará cuando el potencial de frenado:

$$V > \frac{(h\nu - W)}{e}$$

La observación de cómo varía el potencial de frenado crítico:

$$V_0 = \frac{(h\nu - W)}{e}$$

en función de ν proporciona la constante:

$$\frac{h}{e}$$

Los rasgos cualitativos de la emisión de fotoelectrones que se habían descubierto antes de 1905 eran ciertamente notables; aunque fue necesaria la penetración mental de Einstein para apreciar por completo el significado de estos fenómenos. Si en aquel tiempo se hubieran podido disponer de los resultados cuantitativos de Millikan, no hay duda que se habría reconocido en ellos de un modo más general un importante desafío a las ideas clásicas.

El punto esencial de la cuestión es la extraña relación:

$$\frac{E}{\nu} = X_2$$

donde E es la energía que ha de ceder a un electrón un haz de luz monocromática de frecuencia ν y donde X_2 es una constante independiente de la intensidad de la luz, independiente de la frecuencia de la misma e independiente del material en que estén inmersos los electrones. Que los electrones escapen con una energía cinética menor que W no se habría considerado más misterioso en 1905 que ahora: el trabajo de extracción W representa, simplemente, la energía de enlace de los electrones en el material. La comprensión de una relación como la anterior apoyándose en una base clásica habría sido posible, pero expresarla en una fórmula que dé la misteriosa constante X_2 en términos de las constantes fundamentales de la Física clásica, resultaría en verdad una tarea sin esperan-

34.Ibidem, pág. 33.

za. La constante X_2 tiene las dimensiones de una acción, la cual puede encontrarse con constantes básicas, a saber:

$$\frac{e^2}{c} \cong \frac{h}{860}$$

Sabemos ahora que $X_2 = h$ y el orden de magnitud de la cantidad:

$$\frac{e^2}{c}$$

no es el correcto, resulta unas mil veces más pequeño, lo que no es alentador. Sin embargo, presentar de esta manera argumentos dimensionales no nos conduce a ninguna parte, a menos que podamos presentar un mecanismo clásico que conduzca la ecuación anterior. Nadie ha podido hacerlo y los hechos concernientes al efecto fotoeléctrico apoyan fuertemente la idea de Einstein de que la energía está cuantificada.

La ecuación anterior expresa uno de los principios fundamentales de la Física cuántica, que la energía y la frecuencia están universalmente ligadas por la igualdad:

$$E = hu$$

Esta relación es enteramente extraña a la Física clásica y la misteriosa constante $X_2 (= h)$ es una manifestación de insospechados secretos en la naturaleza.

Ahora abordaremos a algunos físicos que gracias a su trabajo y al apoyo en las ideas de Planck y Einstein comenzaron con la construcción de la llamada Física cuántica³⁵: Niels Borh, físico danés, aplicó las ideas cuánticas para entender el espectro del átomo de hidrógeno, en particular de la serie de Balmer; el físico y noble francés Louis De Broglie propuso que a toda partícula debe asociarse una onda, cuya longitud es inversamente proporcional a su velocidad; finalmente en 1924, el físico austriaco Schrödinger, desarrolló la mecánica ondulatoria y estableció su ecuación y Werner Heisenberg creó la llamada "mecánica de matrices" y postuló el fundamental principio de "incerti-

dumbre". Con la interpretación probabilística de Max Born, la formulación del principio de "exclusión" por Wolfgang Pauli en 1925 y los intentos de Dirac para unir la nueva mecánica con la teoría especial de la relatividad, la concepción cuántica de la naturaleza quedaría esencialmente completa y lista para ser aplicada a una casi inimaginable variedad de fenómenos.

6. Biografía

No habría yo de tener en absoluto la satisfacción de salirme con la mía.

Max Planck



Culver Pictures, Inc.

Max Karl Ernst Ludwing Planck

Físico alemán, Max Karl Ernst Ludwing Planck, nació en la ciudad de Kiel, Alemania (entonces perteneciente a Prusia). Hijo de Logan Lulius Bilguelm Von Planck, profesor en Derecho Civil y Ema Planck. En la infancia el niño estudió piano y órgano, descubriendo su escondida capacidad musical. En el año de 1867, la familia se fue a Munich y ahí Planck entró al Gimnasio Clásico de Maximiliano³⁶, donde el profesor de Matemáticas despertó por primera vez un interés en él por las Ciencias Exactas y Naturales. Al terminar sus estudios en el Gimnasio en 1874, Planck pensaba estudiar Filología Clásica; intentó crear composiciones musicales; pero después dio su preferencia a la Física.

35.Niels Borh, op. cit., pág. 25.

36.En esa época se le llamaba "gimnasio" a la educación básica que se impartía en Alemania.

Durante tres años (1874-1877), Planck estudió Matemáticas y Física en la Universidad de Munich y un año en la Universidad de Berlín. Uno de sus profesores en Berlín, un físico experimentador (Phillip Von Scholl) resultó ser un mal profeta, cuando aconsejó al joven Planck elegir otra profesión, ya que "no quedaba nada nuevo en la Física que descubrir". Este punto de vista estaba muy difundido en ese tiempo, es resultado de la influencia de los éxitos extraordinarios obtenidos en el siglo XIX. En su vida en Berlín, Planck amplió sus conocimientos en la Física gracias a las publicaciones dadas por los físicos Hermann Von Helmholtz y Gustav Kirchoff, y también a los artículos de Rudolf Classius. Conociendo estos trabajos se despertó su interés y se concentró en la Termodinámica. El título de doctor³⁷ lo obtuvo en 1879 en la Universidad de Munich con la tesis sobre la Segunda Ley de la Termodinámica, la cual asegura que ningún proceso continuo aislado puede pasar el calor de un cuerpo frío a un cuerpo caliente.

Al siguiente año, Planck escribió otro trabajo de Termodinámica, el cual le dio el puesto de asistente menor en la Facultad de Física en la Universidad de Munich. En el año de 1885, le dieron el puesto de Atyiot (el siguiente puesto de asistente menor) de la Universidad de Kiel, el cual aumentó su independencia³⁸, le fortaleció su posición económica y le dio más tiempo para la investigación científica. Los trabajos de Planck de Termodinámica y sus aplicaciones a la Física, Química y Electroquímica le dieron un reconocimiento internacional. En el año de 1888 ya era profesor Atyiot en la Universidad de Berlín y Director del Instituto de Física teórica (puesto especialmente creado para él). Fue profesor hasta 1892.

En el año de 1896, Planck se interesó por las mediciones que realizaban en el Instituto Estatal de Física Técnica en Berlín y por los problemas de la radiación de calor de los cuerpos. Cualquier cuerpo contiene calor y emite radiación electromagnética si está lo suficientemente caliente, por lo tanto, la radiación es visible. Al aumentar la

temperatura del cuerpo, al principio éste comienza a ponerse rojo, después anaranjado con amarillo y finalmente blanco. La radiación emite una combinación de frecuencias (en el diapason de frecuencias visibles la radiación corresponde al calor). No obstante, la radiación del cuerpo no sólo depende de las temperaturas, sino también de las características de la superficie (el color y la estructura, por ejemplo). En calidad de modelo ideal, para la medición y la investigación teórica, en Física aceptaron el cuerpo negro como absoluto ideal. Por definición, se llama "cuerpo negro absoluto" a aquel cuerpo que absorbe toda la radiación que le llega y no refleja nada³⁹. La radiación que emite un cuerpo negro absoluto depende sólo de su temperatura; aunque tal cuerpo ideal no existe, como una aproximación a él, puede ser una cubierta cerrada con un pequeño orificio (por ejemplo, un estufa construida de la manera necesaria para que las paredes y el contenido estén en equilibrio con la mínima temperatura). Una de las demostraciones de las características de un cuerpo negro conduce a lo siguiente:

De la radiación que entra en el orificio, una parte se refleja en la pared y otra se absorbe. Aunque la probabilidad de que la radiación salga a través del orificio es muy poca, podemos decir que la radiación se absorbe. La radiación que sale a través del orificio la podemos suponer como equivalente a la radiación que emite una superficie con las dimensiones del orificio en la superficie del cuerpo negro absoluto. Al prepararse para su investigación, Planck leyó el trabajo de Kirchoff sobre las propiedades del cuerpo negro. La gráfica de la dependencia de la energía (brillantez) con respecto a la frecuencia o la longitud de onda, es una curva característica (ver Figura 6).

Con pequeñas frecuencias (a longitud grande) ésta se desplaza muy cerca al eje de frecuencias y en alguna frecuencia alcanza su pico máximo (un pico con la cresta redondeada) y después con frecuencias más grandes (longitud pequeña) disminuye. Con el aumento de la temperatura la curva conserva su forma, pero se desplaza a las frecuencias más altas. Se estableció entonces una relación

37. En esa época, las universidades no otorgaban títulos de licenciatura, sólo de doctorado.

38. Cabe mencionar que en esa época Planck vivía con sus padres y en su autobiografía comenta que deseaba independizarse.

39. Por ejemplo, un pedazo de carbón.

empírica entre la temperatura y la frecuencia del pico de la curva de radiación del cuerpo negro (Ley de Wien, llamada así en honor a Bilgen Wien) y entre la temperatura y toda la energía emitida (Ley de Stephen-Boltzmann, llamada así por el físico austriaco Yosef Stephen II Boltzmann); pero ninguno de los dos pudo deducir la curva de radiación del cuerpo negro de los principios básicos conocidos en ese tiempo. Wien pudo obtener la fórmula semiempírica que describe bien la curva para frecuencias altas, pero falla para frecuencias bajas. D. W. Strett (Lord Rayleigh) y el físico inglés D. Jeans aplicaron el principio de distribución semejante de energías en frecuencias de las oscilaciones del oscilador que están dentro del espacio del cuerpo negro y llegaron a otra fórmula (Rayleigh-Jeans). Esta reprodujo la curva de radiación de cuerpo negro a pequeñas frecuencias pero diverge a frecuencias altas. Planck, por influencia de la Teoría electromagnética de la naturaleza de la luz de Maxwell (publicada en 1873 y comprobada experimentalmente por Hertz en 1877), se acercó al problema del cuerpo negro desde el punto de vista de distribución de energía entre osciladores eléctricos elementales, cuya forma física no se concretó de ninguna manera. Aunque a primera vista puede parecer que el método que escogió Planck es similar al deducido por Rayleigh-Jeans, Planck negó algunas de sus hipótesis aceptadas por esos científicos. En el año de 1900 después de unos largos e insistentes intentos por crear una teoría que explicara satisfactoriamente los datos experimentales, Planck tuvo la fortuna de deducir una fórmula⁴⁰, la cual (como confirmaron los físicos experimentales del Instituto Técnico Estatal) concordaba con los resultados de las mediciones con excelente precisión. Las Leyes de Wien y Boltzmann también se deducían de las fórmulas de Planck. No obstante, para la deducción de su fórmula tuvo que introducir un concepto radical que iba en contra de todos los principios establecidos. La energía de los osciladores de Planck no cambia en forma continua, como se afirmaba en la Física tradicional y puede tomar sólo valores discretos, los cuales van disminuyendo (o aumentando) en los pasos finales. En cada paso, la energía es igual a una constante (llamada

"constante de Planck") multiplicada por la frecuencia. A las porciones de energía discreta se les llamó "cuantos". Así, la hipótesis de Planck dio origen al nacimiento de la Teoría cuántica, iniciando una gran revolución en la Física. A la Física clásica, en contraposición a la Física moderna, hoy se le conoce como "Física antes de Planck".

Planck no fue un revolucionario, ni él ni otros físicos entendieron el profundo significado del concepto de "cuanto". Para Planck, un cuanto era sólo un medio que le permitía introducir su fórmula, que daba cumplimiento satisfactorio con la curva del cuerpo negro. Planck intentó hacer que su teoría concordara con la Física clásica, pero fue inútil. A pesar de esto, Planck fue el primero en obtener resultados para la Física cuántica. Después de esto, muchos más siguieron su camino. Su teoría tenía incluida otras cantidades fundamentales, tales como la velocidad de la luz y un número conocido con el nombre de la "constante de Boltzmann" y utilizando otra información, Planck pudo calcular el número de Avogadro (número de átomos en un mol). Partiendo del número de Avogadro, Planck pudo calcular con fantástica exactitud la carga del electrón.

La posición de la Teoría cuántica se fortaleció en el año de 1905 cuando Albert Einstein, utilizó el concepto de "fotón", un cuanto de la radiación electromagnética, para la explicación del efecto fotoeléctrico (emisión de electrones de una superficie metálica iluminada por rayos ultravioleta). Einstein supuso que la naturaleza de la luz tiene dos propiedades, que se puede comportar como onda (lo que asegura la Física clásica) y como partícula (lo que asegura el efecto fotoeléctrico). En el año de 1907 Einstein fortaleció más la Teoría cuántica, utilizando el concepto de "cuanto" para explicar la divergencia de la misteriosa moraleja entre la predicción de la teoría y las mediciones experimentales de la capacidad térmica específica de los cuerpos (la cantidad necesaria para elevar un grado de temperatura una unidad de masa de un cuerpo sólido). Otra afirmación de la capacidad potencial de la novedad introducida por Planck apareció en el año de 1913 por parte de Niels Borh, quien aplicó la Teoría cuántica a la construcción del átomo. Según el modelo de Borh, los electrones en el

40. Planck presentó su fórmula a la Sociedad de Física de Berlín el 14 de Diciembre de 1900, donde la llamó "una feliz adivinanza".

modelo del átomo pueden encontrarse sólo en determinados niveles energéticos definidos por las limitaciones cuánticas. El paso de un electrón de un nivel a otro está acompañado de la emisión de la diferencia de energía entre esos dos niveles en forma de fotón, que es igual a la energía de los fotones, dividida entre la constante de Planck. Con eso él obtuvo la explicación cuántica de los espectros de radiación característica emitida por la perturbación de los átomos.

En el año de 1919 le fue concedido a Planck el premio Nobel de Física: "Fue un reconocimiento al desarrollo de la Física gracias a su descubrimiento de la energía en cuantos". Como dijo Agekstrand, miembro de la Academia Real de Ciencias de Suecia en la ceremonia de premiación: "La Teoría de la radiación de Planck es la más brillante de las estrellas viajeras de las investigadas en la Física moderna y va a pasar mucho tiempo antes de que se acaben los tesoros, los cuales fueron obtenidos por su genio". En su clase de Nobel, Planck concluyó en 1920 sus trabajos y reconoció que "la introducción del cuanto, aún no condujo a la creación de la verdadera Teoría cuántica".

Los años 20 fueron testigos del desarrollo de la Mecánica cuántica. E. Schrödinger, V. Heisenberg, P.A.M. Dirac y otros investigadores elaboraron una Teoría cuántica provista de un complicado aparato matemático. A Planck no le gustó la nueva interpretación probabilística y, como Einstein, trató de conciliar las predicciones (basado en el principio de la probabilidad) con las ideas clásicas de la causalidad. Pero sus intentos no tuvieron éxito: la aproximación probabilística continuó. La contribución de Planck a la Física moderna no es nada más el descubrimiento del "cuanto" y la constante que lleva su nombre. Una fuerte impresión causó en él la Teoría de la relatividad de Einstein publicada en el año de 1905. El completo apoyo que dio Planck a la nueva teoría fue determinante para que ésta fuera aceptada por los físicos. Entre sus éxitos se encuentra también la ecuación Fokker-Planck, que describe el comportamiento de sistemas de partículas bajo la acción de pequeños impulsos casuales (Adrian Fokker fue un físico irlandés que mejoró el método y utilizó por primera vez la teoría de Einstein para

describir el movimiento Browniano, un movimiento en zigzag de partículas pequeñas suspendidas en el interior de un líquido).

En el año de 1928, a la edad de 70 años, Planck entró necesaria y legalmente en el retiro, pero no perdió su relación con la Sociedad Fundamental de Ciencia del Káiser Guillermo, de la cual fue presidente a partir del año de 1930. Y cerca de sus 80 años continuó su actividad investigadora.

La vida particular de Planck fue subrayada como tragedia. Su primera esposa, que antes de casarse se llamaba María Merk, con la que se unió en matrimonio en el año de 1885, tuvo dos niños y dos hijas gemelas. Ella murió en 1909 y dos años después se casó con su sobrina Margot Von Jesslin, la cual le dio un niño. El hijo mayor de Planck murió en la Primera Guerra Mundial y en los siguientes años sus hijas murieron al dar a luz; el segundo niño del primer matrimonio fue fusilado en el año de 1944 por participar en un infortunado atentado contra Hitler. Como hombre, con un punto de vista determinado y religioso muy seguro, sencillamente un hombre justo, Planck, después de la llegada de Hitler al poder en el año de 1933, públicamente participó en la defensa de los científicos judíos que Hitler expulsó de sus puestos y que tuvieron que emigrar. En una conferencia científica saludó a Einstein, castigado en ese entonces por los nazis. Cuando Planck como presidente de la Sociedad Fundamental de Ciencia del Káiser Guillermo tuvo que hacer una visita oficial a Hitler, intentó aprovechar la oportunidad para eliminar la persecución de los científicos judíos. En respuesta, Hitler empezó a hablar mal de los judíos en general. En lo siguiente, Planck fue más conservador y guardó silencio, aunque sin duda los nazis conocían su punto de vista. Como patriota, él solamente podía rezar porque la raza alemana regresara a una vida normal. El siguió sirviendo en diferentes sociedades de científicos alemanes con la esperanza de conservar una pequeña parte de la ciencia alemana y salvarla de una completa desaparición. Después de que su casa y su biblioteca personal fueron destruidas durante un bombardeo en Berlín, Planck y su esposa intentaron buscar refugio

en la finca Rogest no muy lejos de Brademburgo, donde resultó que estaban los soldados alemanes que huían y los aliados que atacaban. A fin de cuentas, los esposos Planck fueron descubiertos por la parte americana y puestos a salvo en Göttingam.

Planck murió en Göttingam el 4 de Octubre de 1947, seis meses antes de haber cumplido los 90 años. En la lápida solamente escribieron su nombre, su apellido y el valor numérico de "la constante de Planck".

En forma análoga a Einstein, Planck se interesaba profundamente por los problemas relacionados con la causalidad, la ética y la libertad de la voluntad, y participó de estos temas en artículos ante auditorios profesionales y no profesionales. Siguiendo las observaciones de un sacerdote en Berlín, cumplía las obligaciones de un sacerdote no oficial. Planck estaba profundamente convencido de que la ciencia complementa la religión, enseña la verdad y el respeto. A través de toda su vida, Planck tuvo amor a la música, amor que nació en la infancia. Siendo un gran pianista, Planck frecuentemente tocó obras de piano de cámara con su amigo Einstein mientras éste aún no abandonaba Alemania. Planck también gustaba del alpinismo y casi todas sus vacaciones las hacía en los Alpes Bávares.

Aunado al premio Nobel, a Planck le dieron la medalla Coply de la Sociedad Real de Londres (1928) y el premio Gotee en la ciudad de Frankfurt Maine (1946). La sociedad Física Alemana llamó a una medalla "Max Planck" en honor a éste y fue el primero en recibirla (el segundo fue Albert Einstein). En la década de 1980 a un pequeño planeta se le llamó "planckiano" y después de la terminación de la Segunda Guerra Mundial, la Sociedad Fundamental de Ciencias de Káiser Guillermo se le cambió el nombre por el de La Sociedad Max Planck.

Planck fue miembro constante de la Academia de Ciencias Alemana-Austriaca y también de la Sociedad de las Ciencias Académicas de Inglaterra, Irlanda, Finlandia, Grecia, Italia, Unión Soviética, Suecia, Ucrania, E.U., Hungría y Dinamarca.

Finalmente, podemos decir de Planck que siendo la persona más conservadora, introdujo la que ha sido llamada "la idea más revolucionaria que jamás haya sacudido a la Física": la Teoría cuántica.

7. APENDICE 1

El Método de Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson para obtener la raíz de ecuaciones no lineales, nos asegura una convergencia hacia la raíz de la ecuación buscada. Las condiciones de la ecuación para poderle aplicar el método mencionado es que debe ser continuamente diferenciable y poseer una abcisa inicial x_0 .

Partimos de la ecuación para obtener la raíz por el método de la secante:

$$X_{n+1} = \frac{f(X_n)X_{n-1} - f(X_{n-1})X_n}{f(X_n) - f(X_{n-1})}$$

Sumamos cero al numerador:

$$X_{n+1} = \frac{f(X_n)X_{n-1} + f(X_{n-1})X_n + f(X_n)X_n - f(X_n)X_n}{f(X_n) - f(X_{n-1})}$$

En la expresión anterior factorizamos al numerador:

$$X_{n+1} = \frac{(X_n)(f(X_n) - f(X_{n-1}))}{f(X_n) - f(X_{n-1})} - \frac{f(X_n)(X_n - X_{n-1})}{f(X_n) - f(X_{n-1})}$$

Reduciendo términos:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)(X_n - X_{n-1})}{f(X_n) - f(X_{n-1})}$$

Ahora:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{\frac{f(X_n) - f(X_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})}}$$

y cuando el límite del denominador tiende a cero, tenemos la primera derivada de esa función; entonces:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}$$

Y así es como obtenemos la fórmula para la iteración por el método de Newton-Raphson.

8. APENDICE 2

Cómo construir un cuerpo negro

Recordemos que todos los cuerpos emiten radiación electromagnética. Ahora bien, un cuerpo tiene distintas capacidades para absorber o emitir radiación. Un cuerpo negro, como su nombre lo dice, es aquel que su capacidad de radiación es 1; por lo tanto, lo que varía es su capacidad de absorción.

Una manera fácil de construir el cuerpo negro es hacer un cubo con las dimensiones que nosotros creamos convenientes y lo pintamos de negro por dentro y por fuera. Practicamos un pequeño orificio en una de sus paredes y ¡listo! Tenemos ya un cuerpo negro absorbedor de radiación.

Tal vez un ejemplo un poco más trivial sea un pedazo de carbón expuesto a los rayos del sol. Este nunca nos deslumbrará con sus reflejos porque absorbe toda la radiación electromagnética.

Otra manera de construir un cuerpo negro es pintando una vasija de barro (o conseguir una de barro negro), ponerle un tapón del mismo color y practicar un pequeño orificio en uno de sus costados. Para comprobar que está funcionando podemos introducir en el tapón un termómetro con escala de 0°C hasta 100°C y veremos que su temperatura se mantiene constante. Esto es porque la luz (radiación electromagnética) que entra a través del orificio, rebota en las paredes (ver Figura 2) y es muy difícil, casi imposible, que vuelva a salir a través del mismo, es decir, la radiación ha sido absorbida por nuestro cuerpo negro y, por lo tanto, incrementa su temperatura.

APENDICE 3

¿Qué es una constante?

Según la definición de los diccionarios o enciclopedias, una "constante" es una cantidad cuyo valor bajo condicio-

nes específicas nunca cambia. Ellas se mantienen fijas bajo todas las condiciones⁴¹. Otra definición dice que "constante" es una cantidad que guarda valor fijo⁴². Estas definiciones por sí solas no nos dicen nada, necesitamos instalarlas en un plano más comprensible.

En un proceso matemático o físico se manejan ecuaciones y ellas están compuestas por variables. Podemos decir que en esos cálculos hay variables que nunca cambian, o sea, tienen un valor fijo sin importar su ubicación dentro de la ecuación.

Para la programación, una constante es un valor que una vez fijado por el compilador no cambia durante la ejecución del programa. Para algunos compiladores, como el caso del compilador del lenguaje C, una constante puede ser un número, un carácter o una cadena de caracteres⁴³.

Gráficamente podemos representar una constante dentro de la recta numérica asignándole un valor fijo a cualquiera de nuestros ejes coordenados (x , y). Hagamos $y=2$, entonces si hacemos que el eje de las x sea el que va variando, obtenemos una recta desde $-\infty$ hasta $+\infty$, cortando el eje de la y en dos y la gráfica que obtenemos es:

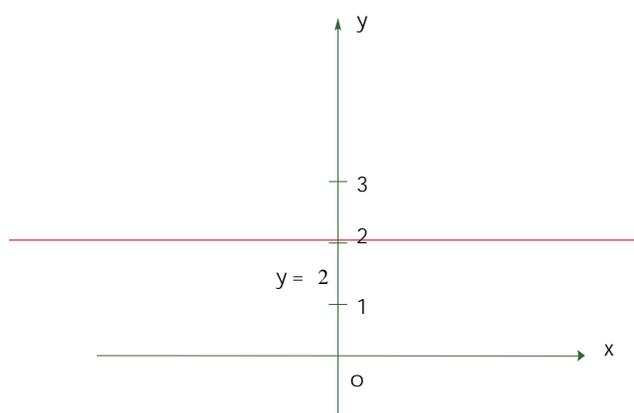


FIGURA 10. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA CONSTANTE.

41. *The Grolier Multimedia Encyclopedia*.

42. *Pequeño Larousse Ilustrado*.

43. Fco. Javier Ceballos, *Curso de programación con C. Macrobit*, pág. 19.

A continuación presentamos algunas de las constantes fundamentales de la física⁴⁴:

| Nombre | Identificador | Valor |
|----------------------------|---------------|---|
| Rapidez de la luz | c | $3. \times 10^8$ m/s |
| Constante gravitacional | G | 9.81 m/s |
| Número de Avogadro | N_A | 6.02×10^{23} mol ⁻¹ |
| Constante de Permittividad | ϵ_0 | 8.85×10^{-12} F/m |
| Constante de Permeabilidad | μ_0 | 1.26×10^{-6} H/m |
| Constante de Planck | h | 6.63×10^{-34} Js |
| Constante de Boltzmann | k | 1.38×10^{-23} J/K |
| Carga elemental | e | 1.60×10^{-19} C |

Los físicos que estudian la física de las partículas elementales⁴⁵ (esa área de la Física que trata de los constitu-

yentes últimos de la materia y de la naturaleza de las fuerzas que actúan entre ellos) han ideado un sistema de unidades que lleva al análisis dimensional hasta casi sus últimas posibilidades. En principio, las tres cantidades dimensionales (longitud, masa y tiempo) son independientes, pero en la práctica la naturaleza nos da relaciones fundamentales entre ellas, esto es, casi todas las constantes se pueden escribir en función de esas tres cantidades dimensionales $\text{\textcircled{T}}$

44.Halliday-Resnick. *Fundamentos de Física*, pág. 1012.

45.Lawrence M. Krauss. *Miedo a la física. Una guía para perplejos*. pag. 65.

Bibliografía

BRAUN Eliezer, *Una faceta desconocida de Einstein*, FCE, México, 1981, 103 p.

LOVETT Barbara, *Los creadores de la nueva física*, FCE, México, 1980, 339 p.

WICHMANN Eyvind H., *Física cuántica*, Berkeley Physics Course Vol.4, Universidad de Berkeley.

GIBBIN Jonh, *En busca del gato de Schodinger*. Biblioteca Científica Salvat, México, 1987.

DE BROGLIE Luis, *Examen de la mecánica cuántica*, UNAM, México, 1980.

BORH Niels, *Científico, filósofo y humanista*, FCE, México, 1986.

ALONSO Marcelo y FINN Edward, *Mecánica Cuántica*, t. III, Fondo Educativo Interamericano, México, 1970.

PLANCK Max, *Ensayos científicos*, CONACYT, México, 1982.

LANNERS Noble prize, And H.W. Wilson. *Biographical Dictionary*, t. II, Ed. The How Wilson Company, N.Y. 1987, 740 p.

KRAUSS Lawrence M., *Miedo a la física. Una guía para perplejos*. Editorial Andrés Bello, México, 1996, 264 p.

CEBALLOS Fco. Javier, *Curso de programación con C. Macrobit*, Macrobit Editores, México, 1990, 494 p.

HALLIDAY-Resnick, *Fundamentos de Física*, Compañía Editorial Continental, México, 1991, 1015 p.

Pequeño Larousse Ilustrado, Ed. Ramón Gcía.-Pelayo y Gross, México, 1991.

The Grolier Multimedia Encyclopedia, CD-ROM, Ed. Apple Computer, 1995.

Microsoft Encarta 96. CD-ROM, Microsoft Corporation, 1996.