



## Max Planck, o Pai da Física Quântica

José Carlos Teixeira de Oliveira

*Departamento de Física, Universidade Federal de Roraima, Campus do Paricarana, Av. Cap. Ene Garcez, 2413, Bairro Aeroporto, 69310-000, Boa Vista-RR. E-mail: jose.oliveira@ufrr.br*

### Abstract

*In this article, we present German physicist Max Planck's revolutionary solution to the blackbody radiation problem through energy quantization. For this contribution, he was considered the father of quantum physics, receiving the Nobel Prize in Physics in 1918.*

**Keywords:** Max Planck; Quantum Physics; Blackbody Radiation; Energy Quantization; Photons.

### 1. INTRODUÇÃO

No final do século XIX, a maioria dos cientistas acreditava que os principais conceitos e a estrutura teórica da Física, denominada, hoje, de Física Clássica (baseada na Mecânica de Newton, no Eletromagnetismo de Maxwell, e nas Leis da Termodinâmica), estavam praticamente prontos. Com essa estrutura era possível explicar todos os fenômenos físicos conhecidos da época [1,2].

Mas, coube ao físico e matemático britânico William Thomson (1824-1907), mais conhecido como Lorde Kelvin, na introdução de uma palestra, em abril de 1900, afirmar que a Física só não estava encerrada devido a duas questões ainda não resolvidas [1,2].

A primeira delas relacionava-se com a natureza do meio através do qual a luz deveria se propagar.

A segunda questão levantada por Kelvin era ampla, pois envolvia a explicação de pelo menos três fenômenos: (i) As raias espectrais emitidas por fontes luminosas gasosas quando submetidas a descargas elétricas; (ii) A emissão de elétrons por parte de certos materiais quando sobre a sua

superfície incide radiação; e (iii) A emissão de radiação eletromagnética por corpos aquecidos [1].

Resolvidas essas questões, segundo Lorde Kelvin, no campo da Física não haveria fenômenos sem explicação, nem novas descobertas a serem feitas [1].

No entanto, a realidade mostrou-se muito diferente daquela prevista pela maioria dos cientistas. Ao tentarem resolver essas questões levantadas por Kelvin, eles depararam-se com aspectos completamente novos e teorias até então inconcebíveis [1].

### 2. RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Voltando-se agora à segunda questão levantada por Lorde Kelvin quanto à emissão de radiação eletromagnética por corpos aquecidos.

Em meados do século XIX, na Alemanha, a indústria siderúrgica desenvolveu-se rapidamente, período chamado, às vezes, de segunda revolução industrial. Foram construídas muitas instalações modernas, e enormes esforços foram feitos para produzir aço de melhor qualidade. O fator mais

importante na produção de aço de primeira qualidade é o controle delicado da temperatura dos altos-fornos. Evidentemente, não podem ser usados os termômetros comuns para a medição de temperaturas tão altas. A fim de contornar esse problema, pesquisas foram feitas no sentido de determinar as temperaturas usando as cores das radiações térmicas emitidas, isto é, mais concretamente, foram analisadas as luzes provenientes dos altos-fornos às diversas temperaturas [3,4].

### 2.1. Radiação Térmica

A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada de radiação térmica. Todos os corpos, independentemente dos materiais que os formam, e à temperatura ( $T > 0$  K), irradiam energia para o ambiente que os cercam e também absorvem energia que é transportada através das ondas eletromagnéticas, numa grande diversidade de comprimentos de onda. Essa energia é associada às radiações que se originam nas acelerações e desacelerações que acontecem durante a vibração de átomos e moléculas [5].

### 2.2. Corpo Negro

Em 1859, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) realizou experimentos relacionados com a absorção e emissão de energia radiante. Nesses estudos, ele descobriu que, quando um corpo absorve certa quantidade de energia, através da incidência de ondas eletromagnéticas, ele a emite em igual quantidade, ou seja, a capacidade ou poder de absorção e emissão são iguais para cada temperatura. A partir desse conhecimento, Kirchhoff introduziu o conceito de emissor e absorvedor ideal, ao qual atribuiu o nome de corpo negro ou radiador ideal [6].

Um corpo negro pode ser idealizado com elevado grau de aproximação, considerando-se um recinto fechado (cavidade) dotado de minúsculo orifício através do qual a radiação entra e fica praticamente aprisionada, sofrendo várias reflexões e absorções nas paredes da cavidade e acaba por ser completamente absorvida (ver Figura 1).

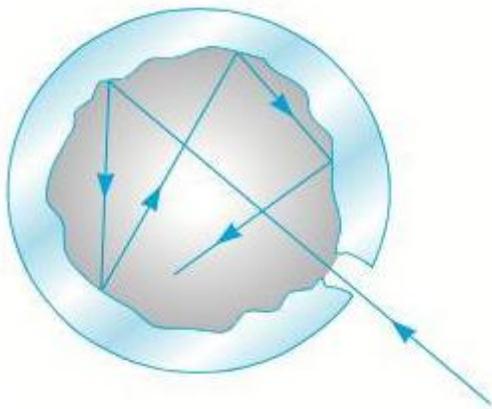


Figura 1: Representação esquemática de um corpo negro. Fonte: Ref. [7].

Suponhamos agora que as paredes da cavidade estejam uniformemente aquecidas a uma temperatura  $T$ . Então, há emissão de radiação pelo orifício da cavidade. Portanto, o orifício atua como um emissor de radiação térmica. Como ele deve ter as propriedades da superfície de um corpo negro, a radiação emitida por ele deve ter um espectro de corpo negro.

### 2.3. Radiância Espectral de um Corpo Negro

A distribuição espectral da radiação de corpo negro é especificada pela quantidade  $R_T(\lambda)$ , chamada radiância espectral, que é definida como sendo a energia emitida, por unidade de tempo e de área, à temperatura absoluta  $T$  e comprimento de onda  $\lambda$  [5].

Com base nos dados experimentais, os cientistas puderam traçar o gráfico da energia irradiada  $I$  ou radiância  $R_T(\lambda)$ , por unidade de tempo e de área da superfície emitente, em função do comprimento de onda  $\lambda$ . O resultado é mostrado na Figura 2, para um corpo negro em três temperaturas diferentes ( $T_1 > T_2 > T_3$ ).

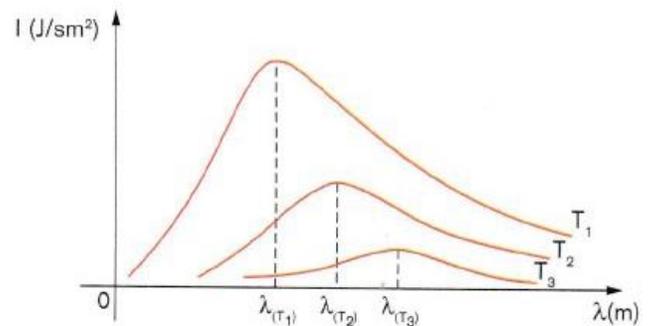


Figura 2: A energia irradiada  $I$  de um corpo negro em função do comprimento de onda  $\lambda$ , para três temperaturas diferentes. Fonte: Ref. [1].

Através da Figura 2, observa-se que as formas das curvas experimentais são semelhantes, evidenciando que a energia irradiada máxima em cada curva é maior em temperaturas mais elevadas e comprimentos de onda menores.

## 3. LEIS FORMULADAS COM A TENTATIVA DE EXPLICAR A DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO DE UM CORPO NEGRO

Na época, de posse do gráfico da energia irradiada por um corpo negro em função do comprimento de onda, obtido através dos dados experimentais, os físicos teóricos se esforçaram com o objetivo de ajustar os citados dados experimentais a uma fórmula matemática que expressasse toda a energia emitida em termos dos comprimentos de onda da radiação.

### 3.1. Lei de Stefan-Boltzmann

Como foi visto na seção 2.3, a radiância espectral  $R_T$  cresce rapidamente com o aumento da temperatura. De fato, esse resultado é chamado de Lei de Stefan, e foi anunciado pela primeira vez, pelo físico austríaco Josef Stefan (1835-1893), em 1879, sob a forma da seguinte equação empírica:

$$R_T = \sigma T^4 \quad (1)$$

onde  $\sigma$  é uma constante de proporcionalidade, e  $T$  é a temperatura da cavidade. Naquele mesmo ano, tal equação receberia uma explicação teórica, por parte do também físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), sendo até hoje reconhecida por Lei de Stefan-Boltzmann [3,4,8].

### 3.2. Lei do Deslocamento de Wien

Em 1893, o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) encontrou uma expressão matemática que descrevia a maneira como a emissão de luz por um corpo negro variava com a temperatura. Ele verificou que, ao aumentar-se a temperatura do corpo negro, o comprimento de onda correspondente ao brilho máximo da luz emitida pelo mesmo, deveria torna-se cada vez mais curto, deslocando-se para a parte violeta do espectro [4,5].

Segundo o trabalho de Wien, as grandezas  $T$  e  $\lambda$  eram inversamente proporcionais. Então, chegou-se à equação:

$$\lambda T = \text{constante} \quad (2)$$

a qual é chamada constante de dispersão de Wien, ou simplesmente de constante de Wien, e é igual a  $2,897 \times 10^{-3}$  mK. Assim, para o corpo negro, temos a equação:

$$\lambda T = 2,897 \times 10^{-3} \text{ mK} \quad (3)$$

A Lei de Wien informa que para cada temperatura existe um comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação emitida é máxima [8].

Em 1896, Wien desenvolveu um trabalho na tentativa de encontrar uma equação adequada para fundamentar teoricamente a curva experimental da radiação de um corpo negro. Ele acreditava que a radiação irradiada pelo corpo negro resultava de oscilações dos átomos existentes nas paredes da cavidade, onde os diferentes comprimentos de onda seriam justificados pelas diferentes frequências de oscilação desses átomos. A equação encontrada dava resultados compatíveis com a experiência na região de pequenos comprimentos de onda (ver Figura 3).

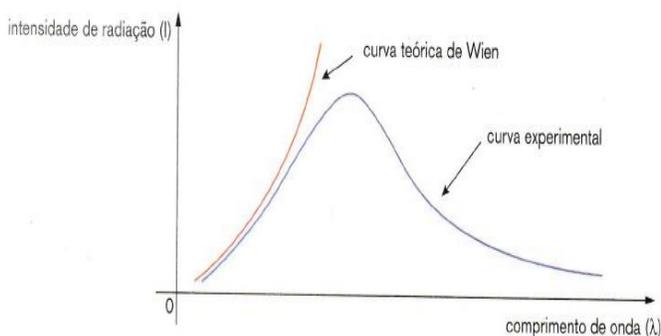


Figura 3: A intensidade de radiação ( $I$ ) de um corpo negro em função do comprimento de onda  $\lambda$ , contendo a curva teórica de Wien e a curva experimental. Fonte: Ref. [1].

### 3.3. Lei de Rayleigh-Jeans

Em 1900, o físico e matemático inglês John William Strutt (1842-1919), mais conhecido como Lord Rayleigh, também desenvolveu um trabalho teórico – posteriormente ajustado em alguns pontos pelo também físico inglês James Hopwood Jeans (1877-1946) – com a finalidade de achar uma equação compatível com a curva experimental da radiância. Eles chegaram à seguinte equação:

$$I(\lambda) = 2\pi ckT / \lambda^4 \quad (4)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz,  $k$  é uma constante de proporcionalidade,  $T$  é a temperatura da cavidade, e  $\lambda$  é o comprimento de onda [4,5].

O resultado foi que essa equação de Rayleigh-Jeans concordava com a experiência para os comprimentos de onda maiores, enquanto para comprimentos menores a sua curva tendia para o infinito, estabelecendo o que ficou conhecido como catástrofe ultravioleta (ver Figura 4).

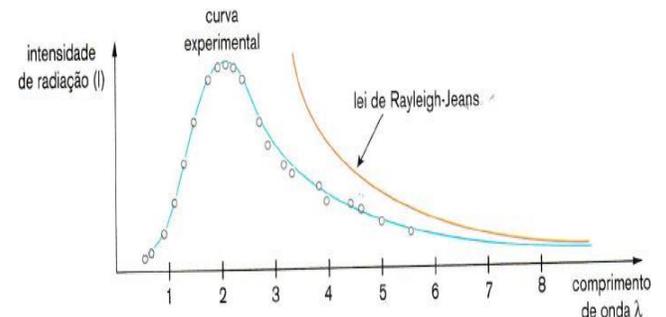


Figura 4: A intensidade de radiação ( $I$ ) de um corpo negro em função do comprimento de onda  $\lambda$ , contendo a curva teórica de Rayleigh-Jeans e a curva experimental. Fonte: Ref. [1].

## 4. A SOLUÇÃO DE MAX PLANCK AO PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO DE UM CORPO NEGRO

A solução do impasse, ou seja, a equação compatível em toda a extensão da curva experimental do espectro de emissão de um corpo negro foi conseguida, em 1900, pelo físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), que vinha tentando resolver o problema desde 1897 (ver Figura 5).

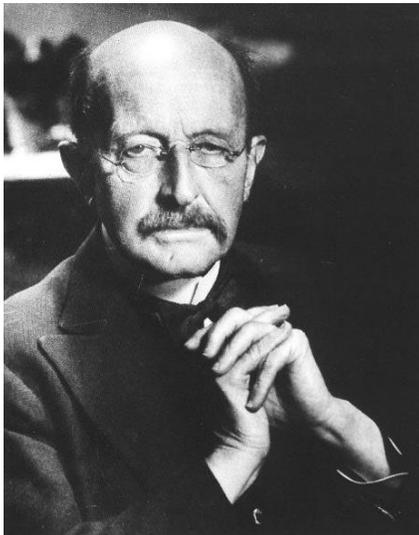


Figura 5: Max Planck. Fonte: Ref. [6].

Na solução do problema, Max Planck introduziu a revolucionária ideia (para a época) de que a energia radiante era emitida proporcionalmente à frequência de vibração dos osciladores eletromagnéticos existentes nas paredes da cavidade do corpo negro, não de maneira contínua (como sugerida pela teoria clássica), mas sim em porções múltiplas de uma quantidade mínima (*quantum*, plural *quanta*) dada por  $hf$ , onde  $h$  é uma constante de proporcionalidade que posteriormente foi denominada *constante de Planck*, cujo valor é dado por  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s, e  $f$  é a frequência de oscilação da radiação [4,5].

Em outras palavras, segundo Planck, os osciladores vibrantes na frequência  $f$  emitem energia  $E$  em quantidades *discretas* ou *quantizadas*. A quantidade mínima de energia emitida, ou seja, o *quantum*, seria um pacote de energia  $hf$ . Os “pacotes de energia” poderiam assumir valores dados por:

$$E = nhf \quad (5)$$

onde  $n$  é um número inteiro positivo (0, 1, 2, 3, 4, ...).

Em 14 de dezembro de 1900, perante à Sociedade de Física de Berlim (Alemanha), Max Planck apresentou o trabalho intitulado: *Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal*, que introduzia a referida solução do problema da radiação do corpo negro [4-6].

A solução encontrada por Planck, ao resolver a questão da radiação do corpo negro, considerando que a energia é *quantizada*, permitiu explicar outros fenômenos físicos a nível microscópico. Por essa razão, a data 14 de dezembro de 1900 é considerada o marco divisório entre a Física Clássica e a Física Quântica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de 1900 ser considerado o ano de nascimento da física quântica, a ideia revolucionária dos *quanta* de energia não despertou nenhuma atenção nos quatro anos seguintes. A ideia só ganhou credibilidade, em 1905, com o trabalho do físico alemão Albert Einstein (1879-1955) introduzindo a hipótese dos *quanta* de luz (fótons) para explicar com sucesso o efeito fotoelétrico (emissão de elétrons por uma superfície, geralmente metálica, quando exposta a uma radiação eletromagnética com certa frequência) [6].

No entanto, só um quarto de século mais tarde, foi que a mecânica quântica moderna, base de nossa concepção atual da natureza, tenha sido desenvolvida pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) e outros.

Vale salientar que a mecânica quântica não se reduz, apenas, à *quantização* da energia; por exemplo, outras quantidades podem ser *quantizadas*, como o momento angular, no modelo atômico do físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962).

Por ter solucionado o problema da radiação do corpo negro, *quantizando* a energia, Max Planck é considerado o pai da física quântica. Ele foi laureado com o Prêmio Nobel de Física, em 1918, em reconhecimento aos serviços que prestou ao avanço da Física com sua descoberta dos *quanta* de energia.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bonjorno, J. R. et al., Física: Eletromagnetismo e Física Moderna, vol. 3, 1ª edição, São Paulo: Editora FTD, 2010.
- [2] Barreto, B. e Silva, C., Física aula por aula: Eletromagnetismo, e Física Moderna, vol. 3, 3ª edição, São Paulo: Editora FTD, 2016.
- [3] Osada, J., Evolução das ideias da física. Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, 1972.
- [4] Rocha, J. F. M. et al., Origens e evolução das ideias da física. Editora da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2002.
- [5] Eisberg, R. e Resnick, R., Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1979.
- [6] Studart, N., A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, n. 4, 523 (2000).
- [7] Schneider, R., Radiação de corpo negro. Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID) – FÍSICA, Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul, 2020.
- [8] Feldens, B., Dias, P. M. C. e Santos, W. M. S., E assim se fez o quantum... Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 32, n. 2, 2602 (2010).