

Radiação de Corpo Negro

Autor: Silvio L. S. Cunha

No problema conhecido como *radiação de corpo negro* buscava-se entender as propriedades e origem da energia emitida na forma de radiação pelos corpos quentes, em função de sua temperatura. Este fenômeno, que está presente em quase todas as manifestações da natureza, teve no século XIX, como tem até hoje, importantes implicações tecnológicas. Como exemplos podemos citar a determinação da temperatura nos fornos siderúrgicos, bem como das estrelas, ou a eficiência da iluminação artificial baseada em lâmpadas incandescentes. A sua relevância tecnológica e o interesse acadêmico levaram vários dos mais ilustres cientistas na segunda metade do século XIX a se ocuparem em tentar explicá-lo. Uma explicação consistente deste fenômeno foi apresentada somente em dezembro de 1900 por Max Planck, numa reunião da Sociedade Alemã de Física. Nesta proposta Planck abandonava alguns conceitos arraigados da Física Clássica e postulava que a troca de energia na natureza se daria sempre de forma quantizada. Este trabalho deu a Planck o prêmio Nobel de Física em 1918 e é considerado como o nascimento da Teoria Quântica. Anteriormente as contribuições de Willhelm Wien para o entendimento da radiação de corpo negro lhe renderam o prêmio Nobel de Física de 1911. Os vários aspectos teóricos e experimentais da radiação de um corpo negro são descritos em vários textos didáticos que tratam da Física Moderna^{1,2}. No volume 22, no. 4 da Revista Brasileira de Ensino de Física o leitor encontrará uma tradução dos dois primeiros artigos de Planck que tratam da radiação de um corpo negro^{3,4}, juntamente com um ensaio retrospectivo sobre estes trabalhos⁵.

Planck mostrou no seu trabalho que a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro ideal, num intervalo de comprimento de onda entre λ e $\lambda+d\lambda$, obedece a fórmula

$$R(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

onde $R(\lambda, T)$ é a radiância espectral do corpo negro ideal, em $[W/m^3]$, $h = 6,260755 \times 10^{-34} Js$ é a constante de Planck, $k = 1,3806568 \times 10^{-23} JK^{-1}$ é a constante de Boltzmann e $c = 2,99792458 \times 10^8 ms^{-1}$ é a velocidade da luz. Integrando-se este resultado sobre todo o espectro obtêm-se a lei de Stefan-Boltzmann, descrita pela relação

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (2)$$

onde $R(T)$ é a potência total irradiada por unidade de área de um corpo negro ideal à temperatura T , sendo $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ a constante de Stefan. Da fórmula de Planck também se pode obter a lei do deslocamento de Wien, dado por

$$\lambda_m T = 2,898 \times 10^{-3} mK \quad (3)$$

onde λ_m é o comprimento de onda onde se observa a máxima intensidade emitida por um corpo negro ideal à temperatura T . Para temperaturas não muito altas, como são as que são

normalmente encontradas em condições de laboratório e comprimentos de onda próximos da região espectral visível, o termo exponencial em $R(\lambda, T)$ será muito maior que 1 e a fórmula de Planck coincide com a expressão de Wien para a radiância espectral

$$R_w(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{hc/\lambda kT}} \quad (4)$$

Nenhum sistema físico real se comportará exatamente como um corpo negro ideal, no entanto muitos sistemas de interesse prático podem ser tratados aproximadamente como corpos negros e importantes informações sobre estes sistemas podem ser obtidas com auxílio dos resultados da teoria de Planck para a radiação de um corpo negro ideal. O filamento de tungstênio de uma lâmpada comum é um sistema encontrado em qualquer ambiente e que pode ser tratado aproximadamente como um corpo negro. Para os sistemas físicos reais a intensidade de radiação emitida para qualquer comprimento de onda será sempre menor que a correspondente intensidade emitida por um corpo negro ideal. A radiância espectral de um sistema físico real $R_f(\lambda, T)$ se relaciona com a radiância espectral do corpo negro ideal $R(\lambda, T)$, por

$$R_f(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) R(\lambda, T) \quad (5)$$

onde $\varepsilon(\lambda, T) < 1$ é a emissividade espectral. Um sistema em que $\varepsilon(\lambda, T)$ varie pouco e suavemente com a temperatura e com o comprimento de onda irradiará aproximadamente como um corpo negro ideal, sendo chamado de corpo cinza. A potência total irradiada por unidade de área por um corpo cinza será dada pela expressão

$$R_f(T) = \varepsilon_{ef}(T) \sigma T^4 \quad (6)$$

onde $0 < \varepsilon_{ef} < 1$ é a emissividade efetiva do corpo cinza que depende do material constituinte do corpo. Para um intervalo não muito grande de temperatura, $\varepsilon_{ef}(T)$ pode ser aproximada por um valor constante característico de cada material.

Quando analisamos experimentalmente a radiação emitida por um sistema físico real, além das considerações resumidas nas equações 5 e 6 acima, devemos considerar diversos aspectos experimentais que influenciarão os resultados. Devem ser considerados os aspectos de precisão e calibração das medidas realizadas, o desvio das condições experimentais comparado com o modelo teórico e a presença de outros fenômenos não incluídos no modelo e que não podem ser isolados ou desprezados num sistema real. No sistema que estamos tratando, a emissão de radiação de um filamento de tungstênio aquecido, devemos considerar por exemplo, o fato que parte da sua energia será dissipada por difusão térmica, seja pelo gás que o circunda ou pelos pontos de contato dos dois eletrodos que o suportam, que como consequência irá gerar também um gradiente de temperatura ao longo do comprimento do filamento, comprometendo assim a premissa de que a radiação estará em equilíbrio termodinâmico com a superfície do corpo a uma temperatura T bem definida. Também deve ser considerado que o corpo aquecido está imerso em um ambiente com uma temperatura diferente da sua e que apenas

aproximadamente pode ser considerada como uma constante T_0 . Na realização de um experimento para fins didáticos, todas estas considerações, do que poderíamos chamar de dificuldades experimentais, poderão ser exploradas convenientemente para permitir que o aluno adquira novos conhecimentos sobre os conceitos físicos e as técnicas experimentais envolvidas.

No experimento aqui descrito um filamento de tungstênio é aquecido por *efeito Joule*, aplicando-se sobre ele uma tensão V . Medindo a corrente I que passa pelo filamento podemos determinar a sua resistência $R=V/I$. Como a resistividade do tungstênio (resistor ôhmico) varia com a temperatura de forma bem conhecida podemos, a partir do valor determinado da resistência do filamento, encontrar a sua temperatura⁶. A potência total gerada pelo efeito Joule, $P=VI$, deverá ser dissipada através de difusão térmica e por radiação eletromagnética. O termo de difusão térmica depende da temperatura de forma linear, enquanto que a energia irradiada por unidade de área varia de acordo com a *lei de Stefan-Boltzmann* (2), ou seja, com a quarta potência da temperatura: $R(T) = \sigma T^4$. Por outro lado, de acordo com a *teoria de Planck* e a *aproximação de Wien* (4), o registro gráfico do logaritmo da intensidade luminosa para um determinado comprimento de onda, contra o inverso da temperatura, mostrará uma reta cuja coeficiente de inclinação é dado pela expressão $hc/\lambda k_B$.

Uma descrição resumida destas teorias é apresentada na forma de hipertexto junto à página [http://www.if.ufrgs.br/cref/material de apoio/blackbody/site/index.html](http://www.if.ufrgs.br/cref/material%20de%20apoio/blackbody/site/index.html)

1. TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, RALP A., Física Moderna, 3ª. Edição, Rio de Janeiro, LTC Editora S.A., 2001.
2. EISBERG, R.; RESNICK, R., Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas, 7ª. Edição, Rio de Janeiro, Editora Campus, 1988.
3. PLANCK, M., Rev. Bras. de Ens. de Fís., Vol. 22, nº 4, 536-537, 2000; Tradução do artigo publicado em *Verhandlung der Deutschen Phisicalishen Gesellschaft* Bd. 2., 202-204, 1900, (traduzido por STUDART N.)
4. PLANCK, M., Rev. Bras. de Ens. de Fís., Vol. 22, nº 4, (2000)538-542; Tradução do artigo publicado em *Annalen der Physik* 4, 553-563 (1901), (traduzido por MOREIRA, I. C.)
5. STUDART, N., Rev. Bras. de Ens. de Fís., Vol. 22, nº 4, 523-535, 2000.
6. PRESTON, D. W.; DIETZ, E. R., The Art of Experimental Physics, JohnWiley & Sons, New York, 1991.