

Sobre a Lei de Rayleigh-Jeans

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física da Universidade Federal do Pará

66075-900- Belém, Pará bassalo@amazon.com.br

Trabalho recebido em 10 de julho de 1994

Resumo

Neste trabalho vamos mostrar o engano cometido por alguns livros, quer acadêmicos, quer de divulgação, sobre a data da **Lei de Rayleigh-Jeans**.

Abstract

In this work, we show that a mistake is reproduced in many books, either academic, or popular, about the date of **Rayleigh-Jeans law**.

O grande naturalista norte-americano Stephen Jay Gould (1914-) afirma que “uma razão para estudar História da Ciência é ver como, no passado, pessoas muito mais espertas do que você se enganaram”. Neste artigo, vamos mostrar um engano que vem se repetindo em diversos livros, quer acadêmicos, quer de divulgação, sobre a data da famosa **lei de Rayleigh-Jeans**, considerando-a como anterior a também famosa **lei de Planck**, que iniciou a **Era Quântica** na Física.

Em 1858,^[1] o físico e meteorologista escocês Balfour Stewart (1828-1887) descobriu que a razão entre o poder de emissão e o poder de absorção de um corpo é uma função do comprimento de onda (λ) da radiação emitida ou absorvida e da temperatura absoluta T , isto é, ela é traduzida pela função $I(\lambda, T)$. Essa mesma descoberta foi feita, independentemente, em 1859,^[2] pelo físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887). Logo depois, em 1860,^[3] ao estudar detalhes sobre essa função, o próprio Kirchhoff introduziu o conceito de **corpo negro** ou **radiador integral**, definindo-o como um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele.

O problema enfrentado pelos físicos após essa descoberta era o de encontrar a função I . O primeiro passo para obter essa função foi dado pelo físico austríaco Josef Stefan (1835-1893). Com efeito, ao estudar em 1879,^[4] a velocidade com que os corpos se esfriam através da medida das áreas sob as curvas do espectro radiante térmico, Stefan chegou empiricamente à seguinte lei: $R \propto T^4$, onde R representa a intensidade total da radiação (energia por unidade de área e por unidade de tempo) emitida por um corpo a uma dada temperatura T , ou seja: $R = \int_0^\infty I(\lambda, T) d\lambda$. Mais tarde, em 1884,^[5] o físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) demonstrou matematicamente a lei de Stefan, ao considerar como um gás a radiação eletromagnética no interior de um corpo negro, e aplicando a esse gás as leis da Termodinâmica. Desse modo, Boltzmann encontrou o coeficiente de proporcionalidade (σ) entre R e T^4 , conhecido desde então como a **constante de Stefan-Boltzmann**: $R = \sigma T^4$.

O sucesso obtido por Boltzmann levou o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928; Prêmio Nobel de Física (PNF), 1911) a estudar a função $I(\lambda, T)$. As-

sim, ao considerar que a radiação térmica decorria da vibração de osciladores moleculares e que a intensidade dessa radiação era proporcional ao número desses osciladores, Wien obteve em 1896,^[6] o seguinte valor para $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right)$, onde C_1 e C_2 são constantes. Ainda em 1896,^[7] o físico alemão Louis Carl Paschen (1865-1940) obteve empiricamente essa mesma expressão. No entanto, como essa expressão de Paschen-Wien só se aplicava a pequenos λ (altas frequências), o físico inglês John Strutt Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), ao considerar a intensidade da radiação térmica como proporcional aos tons normais de vibração dos osciladores moleculares, obteve em junho de 1900,^[8] uma nova expressão para $I(\lambda, T) = C'_1 T \lambda^{-4} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right)$.

Por sua vez, usando argumentos físicos diferentes dos usados por Wien, ou seja, considerando a entropia dos osciladores moleculares, o físico alemão Max Planck (1858-1947; PNF, 1919) re-obteve a expressão de Wien para $I(\lambda, T)$. No entanto, experiências realizadas pelos físicos alemães Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) em outubro de 1900,^[9] mostraram que a fórmula de Wien falhava quando $\lambda T \gg 1$, enquanto às mesmas se ajustavam à fórmula de Rayleigh. Inteirando-se desse resultado (e antes de seu anúncio oficial), Planck em 19 de outubro de 1900,^[10] apresentou à Sociedade Física de Berlim um trabalho no qual, ao fazer uma interpolação entre essas duas fórmulas chegou, eurísticamente, a uma nova expressão para $I(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)}$ que se reduzia a essas mesmas fórmulas, quando se fizesse $\lambda T \ll 1$ (Wien) e $\lambda T \gg 1$ (Rayleigh).

Planck tentou deduzir teoricamente essa sua expressão usando todos os recursos da Termodinâmica pré-Boltzmann. No entanto, como não encontrou nenhum erro nos cálculos de Rayleigh, Planck utilizou então a interpretação probabilística proposta por Boltzmann, em 1877,^[11] para o cálculo da entropia dos osciladores moleculares, de frequência ν . Porém, para

fazer esse cálculo, teve de admitir a hipótese de que a energia dos osciladores variava discretamente, ou seja: $\epsilon = h\nu$. Planck, contudo, esperava que essa hipótese fosse apenas um artifício de cálculo e que no final do mesmo, pudesse fazer $h \rightarrow 0$. No entanto, para que os seus resultados combinassem com os experimentais era necessário que h tivesse um valor finito. Assim, no dia 14 de dezembro de 1900,^[12] Planck comunicou, também, à Sociedade de Física de Berlim, um trabalho no qual apresentou a famosa **fórmula de Planck**, assim como o valor de $h = 6.55 \times 10^{-27}$ erg.s e que, mais tarde, recebeu o nome de **constante de Planck**.

Mais tarde, em maio de 1905,^[13] Rayleigh re-obteve uma nova expressão para a função $I(\lambda, T)$, desta vez, porém, sem o fator exponencial e com $C'_1 = 64\pi k$, sendo k a constante de Boltzmann. Em julho de 1905,^[14] o físico inglês Sir James Jeans (1877-1946) obteve uma nova expressão para $I(\lambda, T)$ corrigindo nessa ocasião, um erro que Rayleigh cometera em seu artigo de 1905. Desse modo, a expressão agora corrigida para $I(\lambda, T) = 8\pi\lambda^{-4}kT$, é hoje mundialmente conhecida como **lei de Rayleigh-Jeans**.^[15] Portanto, como se vê, essa lei é posterior à **lei de Planck**, e não anterior, conforme alguns livros acadêmicos,^[16] e mesmo de divulgação,^[17] têm considerado.

Referências

1. STEWART, B. Trans. Roy. Soc. Edinb., **22**, 1 (1858).
2. KIRCHHOFF, G. R. Monats. Preuss. Akad. Wiss. (Berlin: **662**, 783 (1859).
3. KIRCHHOFF, G. R. Ann. d. Phys., **109** (2), 275; Phil. Mag., **20**(4), 1 (1860).
4. STEFAN, J. Sitz. b. Akad. Wiss. (Wien), **79**, 391 (1879).
5. BOLTZMANN, L. Ann. d. Phys., **22**, 31; 291 (1884).
6. WIEN, W. Ann. d. Phys., **58** (3), 662 (1896).

7. PASCHEN, L. *Ann. d. Phys.*, **58** (3), 455 (1896).
8. RAYLEIGH, J. *Phil. Mag.*, **49** (5), 539 (1900).
9. RUBENS, H. und KURLBAUM, F. *Sitz. ber. Preuss. Akad. Wiss. (Berlin)*, **25**, 929 (1900).
10. PLANCK, M. *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.*, **2**(2), 202 (1900).
11. BOLTZMANN, L. *Sitz. b. Akad. Wiss. (Wien)*, **76**, 373 (1900).
12. PLANCK, M. *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.*, **2** (2), 237 (1900).
13. RAYLEIGH, J. *Nature*, **72**, 52 (1905).
14. JEANS, J. *Nature*, **72**, 293 (1905). (É oportuno registrar que Jeans, neste artigo, considera a hipótese da quantização da energia admitida por Planck, apenas um artifício matemático, sem nenhuma repercussão conceitual na Física.)
15. Para um excelente estudo histórico sobre essa fórmula, veja-se: MEHRA, J. and RECHENBERG, H. 1982. *The Historical Development of Quantum Theory*, Volume 1 (Parts 1, 2). Springer-Verlag; PAIS, A. 1983. 'Subtle is the Lord...' *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press. (Observe-se que neste livro, Pais denomina essa fórmula com o nome de **Lei de Rayleigh-Einstein-Jeans** uma vez que, em março de 1905 (e publicado na *Ann. d. Phys.*, 17 (4): 132, em junho de 1905), o físico alemão Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) já havia chegado a essa mesma fórmula.)
16. Veja-se, por exemplo, os seguintes livros: CH-POLSKI, E. 1977. *Physique Atomique*, Tome 1. Editions de Moscou, pg. 268. EISBERG, R. M. and RESNICK, R. 1974. *Quantum Physics*, John Wiley and Sons, pg. 14; 1979. *Física Quântica*. Editora Campus Ltda., pg. 32. LEIGHTON, R. B. 1959. *Principles of Modern Physics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., pg. 64. LEITE LOPES, J. 1992. *A Estrutura Quântica da Matéria*. Editora da UFRJ e ERCA, pg.10. RICHTMYER, F. K. KENNARD, E. H. and COOPER, J. N. 1969. *Introduction to Modern Physics*. McGraw-Hill Book Company, pg. 133. SPROULL, R. L. and PHILLIPS, W. A. 1980. *Modern Physics*. John Wiley and Sons, pg. 85. WHER, M. R. and RICHARD, Jr. J. A. 1960. *Physics of Atom*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pg. 63;— 1965. *Física do Átomo*. Ao Livro Técnico S. A., pg. 70.
17. Veja-se, por exemplo, os seguintes livros: D'ABRO, A. 1952. *The Rise of the New Physics*, Volume Two. Dover Publications, Inc., pg. 454. LINDSAY, R. B. 1982. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 15. Charles Scribner Sons, pg. 104. PENROSE, R. 1991. *A Mente Nova do Rei*. Editora Campus Ltda., pgs. 253-254. PONOMAREV, L. 1973. *In Quest of the Atom*. Mir Publishers, pg. 42. SINGH, J. 1992. *Abdus Salam, A Biography*, Penguin Books, pg. 15.