



## SEARA DA CIÊNCIA

### CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



#### Radiação Térmica.

O Homem, desde que surgiu em nosso planeta, fazia apenas a distinção entre o **quente** e o **frio**, já que experimentava sensações térmicas diferentes, com a presença ou a ausência, primeiro do Sol, e depois com a descoberta do **fogo**. Parece haver sido o ***Homem de Pequim*** (“Homo Erectus”), que habitou as cavernas cerca de 500.000 anos atrás, quem primeiro utilizou o **fogo** para esquentá-lo quando sentia frio, e para orientá-lo em suas caminhadas na escuridão. Mais tarde, o Homem foi dominando o **fogo**, quer para protegê-lo dos animais, quer para cozer seus alimentos. Contudo, na medida em que foi descobrindo com o **fogo**, o ponto de fusão dos metais e cozendo as cerâmicas, passou, assim, a construir utensílios e armas, a edificar cidades, dando então seguimento às diversas revoluções civilizatórias historicamente definidas. [Darcy Ribeiro, **O Processo Civilizatório** (Vozes, 1978)]. Apesar desse domínio do **fogo**, o Homem não entendia a razão pela qual tanto o calor do Sol, quanto o calor de uma fogueira, lhe provocava sensações de queimadura. E, mais ainda, ele não conseguia entender como sentia essa sensação sem tocar na fonte e, também, não conseguia distinguir entre a quantidade desse calor e a sua qualidade (intensidade). Somente a partir do Século 17 é que ele desenvolveu instrumentos cada vez mais precisos para medir essas duas características do calor, instrumentos esses conhecidos, respectivamente, como ***termômetros*** e ***calorímetros***. Apesar desse entendimento, restava uma questão: como o calor se propagava.

Muito embora o físico francês Edmé Mariotte (1620-1684), em 1679, haja observado que o calor de uma lareira a carvão é diferente do calor do Sol [observação essa mais tarde confirmada pelo físico francês Charles François Du Fay (1698-1739), em 1726] e que o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em 1701, haja se preocupado com o problema do ***arrefecimento*** dos corpos (havendo inclusive nessa ocasião formulado uma equação para descrever o fenômeno), as primeiras experiências para estudar a transmissão do calor de radiação – a ***radiação térmica*** – bem como o estudo de suas propriedades ondulatórias, só foram realizadas a partir do Século 18.

Com efeito, em 1773 (*Philosophical Transactions* **63**, p. 40), o físico inglês Richard Watson (1737-1816) descreveu uma experiência na qual demonstrou que um termômetro pintado de preto e exposto à luz do Sol indicava maior temperatura do que quando não estava enegrecido [W. E. K. Middleton, **A History of the Thermometer and Its use in Meteorology** (The Johns Hopkins Press, 1966)]. Mais tarde, em 1800 (*Philosophical Transactions* **90**, p. 255; 284; 293; 437), o astrônomo alemão Sir William (Friedrich Wilhelm) Herschel (1738-1822) ao determinar, com um termômetro enegrecido, as temperaturas das cores do espectro solar, observou que a temperatura aumentava na medida em que se aproximava da extremidade vermelha do espectro, sendo que a temperatura mais alta se encontrava além do vermelho, observação essa que levou à hipótese dos ***raios infravermelhos***. Em suas experiências Herschel observou ainda existir raios caloríficos que eram refletidos e refratados como se fossem luminosos.

Por sua vez, em 1804 (*Philosophical Transactions* **94**, p. 77), o físico anglo-norte-americano Sir Benjamin Thompson, Conde de Rumford (1753-1814) fez, também, uma série de experiências sobre a **radiação térmica**. Por exemplo, para demonstrar que o calor se propaga no vácuo, colocou um termômetro no interior de um balão rarefeito, e levou-o, fechado, a um recipiente com água quente. Ao submergi-lo, observou uma pequena alteração na temperatura do termômetro. Ainda por essa mesma ocasião, Rumford observou que a temperatura de um corpo enegrecido se relacionava com a intensidade da radiação solar, e que as superfícies que irradiam o calor mais fracamente são aquelas que refletem mais intensamente. Independentemente de Rumford, o físico e matemático escocês Sir John Leslie (1766-1832), ainda em 1804, no livro intitulado **Experimental Inquiry into the Nature and Propagation of Heat**, registrou experiências com a **radiação térmica** e fez observações semelhantes às de Rumford. [A. Kistner, **História de la Física** (Editorial Labor, 1934); Middleton, op. cit.]

A ideia de que o calor radiante é essencialmente da mesma natureza que a luz (inicialmente aceita por Herschel, porém, mais tarde a rejeitou) foi cada vez mais sendo aceita, na medida em que novas experiências foram sendo realizadas no decorrer da primeira metade do Século 19. Assim é que o físico francês Jacques Étienne Bérard (1789-1869), em 1813 (*Annales de Chimie* **85**, p. 309), demonstrou que a polarização dos “raios caloríficos” luminosos mais não a dos escuros. Mais tarde, em 1818-1819 (*Abhandlungen der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, p. 305), o físico russo-alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831) repetiu a experiência de Herschel e observou que a maior temperatura da radiação calorífica se encontrava na região **infravermelha**, quando o espectro solar era produzido por um prisma de *flint-glass*. Porém, ela se encontrava no vermelho, quando usava um prisma de *crown-glass* para produzir o mesmo espectro.

Uma primeira tentativa de explicar teoricamente a **radiação térmica** foi apresentada, em 1832 (*Annalen der Physik* **26**, p. 161), pelo físico francês André-Marie Ampère (1775-1836). Vejamos como. Em 1814 (*Annales de Chimie* **90**, p. 43), ele havia formulado um modelo geométrico para o átomo, segundo o qual os átomos dos elementos químicos eram compostos de partículas subatômicas [Jagdish Mehra e Helmut Rechenberg, **The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1** (Springer Verlag, 1982)]. Desse modo, baseado nesse modelo atômico, Ampère demonstrou que o calor e a luz deveriam ser considerados como ondas no mesmo éter. Mais tarde, em 1835 (*Philosophical Magazine* **7**, p. 349), o físico escocês James David Forbes (1809-1868) descreveu uma experiência sobre a polarização dos “raios infravermelhos”. Em 1837 (*Annales de Chimie* **65**, p. 5), o físico italiano Macedônio Melloni (1798-1854) relatou as experiências sobre o caráter ondulatório do **calor radiante**. Nessas experiências, usando uma pilha termoelétrica que inventara, observou a reflexão, refração, interferência e polarização da **radiação infravermelha**. Em 1848, o físico alemão Karl Herrmann Knoblauch (1820-1895) realizou uma experiência na qual obteve a dupla-refração e a difração da **radiação infravermelha**. É oportuno registrar outras experiências sobre o **calor radiante** foram realizadas pelos físicos franceses Armand-Hyppolyte Fizeau (1819-1896) e Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868), em 1847 (*Comptes Rendus* **25**, p. 447); por de la Provotaye e Desains, em 1849 (*Annales de Chimie* **27** p. 109); e pelo físico irlandês John Tyndall (1820-1893), que as descreveu em seu livro **Heat Considered as a Mode of Motion**, publicado em 1862 [Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951)].

Paralelamente ao problema de se conhecer a natureza do **calor radiante**, os físicos procuraram, também, medi-la. Para isso, uma propriedade importante a conhecer era a relação entre a temperatura (intensidade ou qualidade do calor) e a cor da radiação calorífica emitida pelo corpo radiante. Conforme vimos anteriormente, o problema do **arrefecimento** dos corpos já havia sido objeto de estudo por parte de Newton, em 1701. Contudo, foi o físico suíço Pierre Prévost (1751-1839), em seu livro intitulado **Recherches Physico-Mécaniques sur la Chaleur** publicado em 1792, afirmou que *um corpo deve receber tanto calor quanto ele pode irradiar*. Essa afirmação,

mais tarde conhecida como a **lei das trocas de Prévost**, ele a fez depois de observar que um corpo esquentado ao rubro começava a se esfriar ao emitir **radiação calorífica** ou **radiação térmica** (RT).

Um dos primeiros cientistas a se preocupar com a medição da RT, foi o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), já que, em 1823, sugeriu que os **pares termoelétricos**, descobertos por Seebeck, em 1821 (vide verbete nesta série), poderiam ser usados para aquela medição. No entanto, somente em 1858 (*Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **22**, p. 1), o físico e meteorologista escocês Balfour Stewart (1828-1887) retomou as experiências de Prévost e, ao estudar a absorção e emissão da RT por uma placa de sal de rocha, concluiu que *o poder emissor de cada espécie de substância é igual ao seu poder absorvor, para cada espécie de raio (comprimento de onda) do calor radiante*. [Armand Gibert, **Origens Históricas da Física Moderna** (Fundação Calouste Gulbenkian, 1982); Mehra e Rechenberg, op. cit.; Whittaker, op. cit.]

Independentemente de Balfour, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), em 1859 (*Monatsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* **662**, p. 783) fez a mesma descoberta, isto é, que a razão entre o poder de emissão ( $e$ ) e o poder de absorção ( $a$ ) é uma função da temperatura ( $T$ ) e do comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação emitida ou absorvida:  $(e/a)_\lambda = I(\lambda, T)$ . Com isso, demonstrou que a mesma poderia ser usada na Química do Sol e das estrelas, explicando, então, por exemplo, as linhas escuras (cerca de 576 riscas, hoje conhecidas como **raias de Fraunhofer**) do espectro solar observadas pelo físico alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826), em 1814-1815 (*Denkschrift der Königlichen Akademie Wissenschaften zu München* **5**; p. 193). É oportuno destacar que, nessa observação, Fraunhofer inventou um dispositivo – o **espectroscópio** – um aparelho constituído de uma fenda estreita e alongada, uma lente colimadora, um prisma e uma luneta ocular. Dentre aquelas linhas, estava a famosa linha D do sódio (Na). Em 1860 (*Annales Chimie et de Physique* **110**, p. 160), Kirchhoff e químico alemão Robert Wilhelm Eberhard Bunsen (1811-1859), usando o espectroscópio de Fraunhofer e o famoso **bico de Bunsen**, descobriram que o Sol apresentava aquele elemento químico.

Ainda em 1860 (*Annalen der Physik* **109**, p. 275; *Philosophical Magazine* **20**, p. 1), ao estudar com mais detalhes a relação  $(e/a)_\lambda$ , Kirchhoff apresentou o conceito de **corpo negro** ou **radiador integral**, definindo-o como um corpo que absorve toda a radiação que incide nele, ou seja:  $(e/a)_\lambda = 1$ . A partir daí, duas questões surgiram para os físicos: os teóricos em busca de uma expressão para  $I(\lambda, T)$ , e os experimentais procurando construir um **corpo negro**.

A primeira tentativa para obter teoricamente a função  $I(\lambda, T)$  foi realizada pelo físico alemão Eugen Lommel (1837-1899), em 1878 (*Annalen der Physik* **3**, p. 251), usando um modelo mecânico descrevendo as vibrações de um corpo sólido. O primeiro passo para obter aquela função foi dado pelo físico austríaco Josef Stefan (1835-1893), ao estudar em 1879 (*Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenchaften zu Wien* **79**, p. 391), 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:  $R \propto T^4$  - a **famosa lei de Stefan** -, 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 absoluta  $T$ . Mais tarde, em 1884 (*Annalen der Physik* **22**, p. 31; 291), o físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) demonstrou matematicamente aquela lei, ao considerar como um gás a radiação eletromagnética no interior do **corpo negro**, e aplicando a esse gás as leis do **ciclo de Carnot** (1824), cuja pressão envolvida nessas leis foi calculada pela teoria eletromagnética Maxwelliana (1867) (vide verbete nesta série), como sendo considerada a pressão da **radiação térmica** (RT), que funciona como o material de trabalho daquele ciclo. Desse modo, Boltzmann encontrou o coeficiente de proporcionalidade ( $\sigma$ )

entre  $R$  e  $T^4$ . Desse modo, foi encontrada a famosa **lei de Stefan-Boltzmann**, traduzida pela expressão:  $R = \sigma T^4$ .

O sucesso obtido por Boltzmann levou o físico alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928; PNF, 1911) a estudar o espectro térmico dos corpos, isto é, a função  $I(\lambda, T)$ , usando, também, a Termodinâmica e o eletromagnetismo Maxwelliano. Assim, em 1893 (*Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, p. 55), Wien demonstrou matematicamente o fato experimental de que os máximos das curvas do espectro térmico se deslocam na medida em que a temperatura aumenta, segundo a expressão:  $T \lambda_{\text{máx}} = \text{constante}$ , lei essa conhecida desde então como **lei do deslocamento de Wien**. Mais tarde, em 1896 (*Annalen der Physik* **58**, p. 662), ao considerar que a RT decorria da vibração de osciladores moleculares e que a intensidade dessa radiação era proporcional ao número de osciladores, Wien obteve a seguinte expressão para  $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp[-C_2 / (\lambda T)]$ , onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes. Antes, e ainda em 1896 (*Annalen der Physik* **58**, p. 455), o físico alemão Louis Carl Henrich Friedrich Paschen (1865-1940) obteve empiricamente essa mesma expressão. No entanto, como essa **fórmula de Wien-Paschen** só se aplicava para pequenos  $\lambda$  (altas frequências  $\nu$ ), o físico inglês Jon William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), ao considerar a intensidade da RT como proporcional aos tons normais de vibração dos osciladores moleculares, obteve, em junho de 1900 (*Philosophical Magazine* **49**, p. 98; 539), uma nova expressão:  $I(\lambda, T) = C_1 T \lambda^{-4} \exp[-C_2 / (\lambda T)]$ .

Por sua vez, usando argumentos físicos diferentes dos usados por Wien, ou seja, considerando a entropia dos osciladores harmônicos, o físico alemão Max Planck (1858-1947; PNF, 1918) re-obteve a **fórmula de Wien-Paschen** acima. No entanto, experiências realizadas pelos físicos alemães Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927), em outubro de 1900 (*Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, **25**, p. 929), mostraram que essa expressão falhava quando  $\lambda T \gg 1$ , enquanto as mesmas se ajustavam à **fórmula de Rayleigh**. Inteirando-se desse resultado, Planck, em 19 de outubro de 1900 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **2**, p. 202), apresentou à *Sociedade Física de Berlim* um trabalho no qual, ao fazer uma interpolação entre essas duas fórmulas, chegou, eurísticamente, a uma nova expressão:  $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp[C_2 / (\lambda T) + 1]$ , que se reduzia àquelas mesmas fórmulas, quando se fizesse  $\lambda T \ll 1$  (Wien-Paschen) 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 (*Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Wien*, **75**; **76**, p. 373; 62), para o cálculo da entropia dos osciladores moleculares, de frequência  $\nu$ . Porém, para fazer esse cálculo, teve de admitir a hipótese (parece, por sugestão de Boltzmann) de que a energia ( $\epsilon$ ) 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 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **2**, p. 237), Planck apresentou, também, à mesma *Sociedade Física de Berlim*, um trabalho no qual demonstrou a hoje famosa **fórmula de Planck** vista acima, assim como apresentou o valor de  $h = 6,55 \times 10^{-27}$  erg.s e que, mais tarde, recebeu o nome de **constante de Planck**. Esse trabalho de Planck iniciou a Era Quântica da Física.

Em maio de 1905 (*Philosophical Magazine* **49**, p. 539), Rayleigh re-obteve uma nova expressão para  $I(\lambda, T)$ , desta vez, porém, sem o fator exponencial e com  $C_1 = 64 \pi k$ , sendo  $k$  a **constante de Boltzmann**. Em julho de 1905 (*Philosophical Magazine* **10**, p. 91), o físico inglês Sir

James Jeans (1877-1946) obteve uma nova expressão para a função  $I(\lambda, T)$  corrigindo, nessa ocasião, um erro que Rayleigh cometera em seu citado artigo de 1905. Desse modo, a expressão agora foi corrigida para  $I(\lambda, T) = 8 \pi \lambda^{-4} k T$ . É oportuno destacar que, como o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), obteve essa mesma expressão em março de 1905 (*Annales de Physique, Leipzig* **17**, p. 132), o físico e historiador da ciência, o holandês-norte-americano Abraham Pais (1918-2000), em seu livro intitulado **‘Subtle is the Lord’ : The Science and the Life of Albert Einstein** (Oxford University Press, 1983), denomina a expressão acima de **Lei de Rayleigh-Einstein-Jeans**.

---



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)