



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

O Centenário (1911-2011) da Segunda Teoria de Planck: Quantização Fracionária da Energia.

Segundo vimos em verbete desta série, em 19 de outubro de 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1847; PNF, 1918) apresentou à *Sociedade de Física de Berlim* um trabalho no qual propôs a conhecida **fórmula de Planck**, dada por: $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp [C_2 / (\lambda T) + 1]$, onde $I(\lambda, T)$ representa a intensidade da radiação térmica no intervalo λ e $\lambda + d\lambda$. Para chegar a essa expressão, Planck fez uma interpolação, de maneira eurística, entre a **fórmula de Wien-Paschen**, proposta em 1896: $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp [-C_2 / (\lambda T)]$ e a **fórmula de Rayleigh**, apresentada em junho de 1900: $I(\lambda, T) = C_1 T \lambda^{-4} \exp [-C_2 / (\lambda T)]$, ao observar que sua fórmula se reduzia àquelas fórmulas, quando se fizesse $\lambda T \ll 1$ (Wien-Paschen) e $\lambda T \gg 1$ (Rayleigh).

Encontrada a fórmula, Planck tentou deduzir teoricamente essa sua expressão usando todos os recursos da Termodinâmica até então conhecidos. No entanto, como não encontrou nenhum erro nos cálculos de Rayleigh, Planck utilizou então a interpretação probabilística proposta pelo físico austríaco Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906), em 1877, para o cálculo da entropia dos osciladores moleculares, de frequência ν ($= c/\lambda$). Porém, para fazer esse cálculo, teve de admitir a hipótese (parece, por sugestão de Boltzmann) de que a energia (ϵ) 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 resultados 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 à mesma *Sociedade de Física de Berlim*, um trabalho no qual demonstrou a hoje famosa **fórmula de Planck** vista acima, assim como apresentou um valor para h , ou seja: $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg.s e que, mais tarde, recebeu o nome de **constante de Planck**. Ele também demonstrou que a energia média [$\bar{\epsilon}(\nu)$] de um oscilador de frequência (ν) é da por: $\bar{\epsilon}(\nu) = h\nu / [\exp(h\nu / kT) - 1]$, onde k é a **constante de Boltzmann** e T a temperatura absoluta. Note-se que essa hipótese da **quantização da energia**, também conhecida como **Primeira Teoria de Planck**, iniciou a **Era Quântica da Física**, baseada no fato de que a energia dos osciladores harmônicos variava discretamente, e que seus níveis de energia eram dados por: $\epsilon = n h \nu$, com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Mais tarde, em 1905, o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1925) usou essa ideia planckiana de quantização inteira da energia para explicar o **efeito fotoelétrico**, propondo, também eurísticamente, que uma luz de frequência (ν) era dotada de um pacote de energia (*lichtquantum* – “quantum de luz”): $h\nu$ (vide verbete

nesta série). Registre-se que o nome **fóton** para o **quantum de luz einsteniano** só foi cunhado, em 1926, pelo químico norte-americano Gilbert Newton Lewis (1875-1946). Registre-se também que, ainda em 1905, Einstein demonstrou que a massa (m) de um corpo de massa repouso (m_0), cresce com a sua velocidade (v), segundo a expressão: $m = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Note que, nesta expressão, quando o corpo está em repouso ($v = 0$), então $m = m_0$. Além disso, Einstein demonstrou sua célebre equação: $E = m c^2$ e, portanto, para um corpo em repouso, ele teria uma **energia de repouso**: $E_0 = m_0 c^2$.

A explicação do **efeito fotoelétrico** por parte de Einstein, conforme visto acima, não se coadunava com a interpretação maxwelliana (1865) de ser a luz uma onda eletromagnética. E isso incomodava Planck. Assim, em 1911 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft* **13**, p. 138), ele propôs uma nova hipótese, conhecida como **Segunda Teoria de Planck**. Essa nova hipótese, basicamente, dizia que a emissão de radiação é sempre descontínua, porém, na absorção, ela é sempre contínua. Portanto, a radiação em trânsito pode ser representada por uma onda maxwelliana, e a energia de um oscilador em qualquer instante pode ter qualquer valor, conforme a Física Clássica. Desse modo, nessa nova teoria, havia **continuidade no espaço**, porém, o ato de emissão envolvia uma **descontinuidade no tempo**. Desse modo, Planck alterou sua expressão da $\bar{\epsilon}(v)$ obtida em 1900, para: $\bar{\epsilon}(v) = h\nu [\exp(h\nu/kT) - 1] + h\nu/2$, expressão essa que mostra que, no **zero absoluto** ($T = 0$ K), então: $\bar{\epsilon}_0(v) = (1/2)h\nu$. Essa nova hipótese de Planck criou o conceito de **energia do ponto zero**. Antes, como vimos acima, Einstein havia criado o conceito de **energia de repouso**. [Sir Edmund Taylor Whittaker (1873-1956), em seu livro **A History of the Theories of Aether and Electricity. The Modern Theories: 1900-1926** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1953); F. K. Richtmyer, E. H. Kennard and John. N. Cooper, **Introduction to Modern Physics** (McGraw-Hill Book Company, 1969)].

Concluindo este verbete, é oportuno destacar que, em 1926, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) formulou sua famosa **Equação de Schrödinger** (vide verbete nesta série), cuja solução para as energias do oscilador harmônico é dada por: $E_n = (1/2 + n) h \nu$, com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, reproduzindo, portanto, a **energia do ponto zero planckiana** ($n = 0$).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)