



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Einstein, a Emissão Estimulada e o Princípio do Laser.

Segundo vimos em verbetes desta série, no final do Século 20, a **radiação térmica do corpo negro** era explicada pela **fórmula de Wien-Paschen**:

$$I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp[-C_2 / (\lambda T)],$$

onde λ representa o comprimento de onda da radiação térmica emitida pelo **corpo negro** [substância que absorve toda a radiação recebida, conforme conceituou o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), em 1860] na temperatura absoluta T . Ela foi obtida, em 1896, em trabalhos independentes dos físicos alemães Louis Carl Henrich Friedrich Paschen (1865-1940) (*Annalen der Physik* **58**, p. 455) e Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928; PNF, 1911) (*Annalen der Physik* **58**, p. 662).

Contudo, em junho de 1900 (*Philosophical Magazine* **49**, p. 98; 539), o físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904) observou que ela só se aplicava a pequenos λ (altas frequências ν). Assim, ao considerar a intensidade da **radiação térmica** como sendo proporcional aos tons normais de vibração dos osciladores moleculares, Rayleigh obteve, uma nova expressão:

$$I(\lambda, T) = C'_1 T \lambda^{-4} \exp[-C_2 / (\lambda T)],$$

conhecida como **fórmula de Rayleigh**.

Por sua vez, usando argumentos físicos diferentes dos usados por Wien, ou seja, considerando a entropia dos osciladores harmônicos, o físico alemão Max Planck (1858-1847; PNF, 1918) re-obteve a **fórmula de Wien-Paschen**. 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 até então conhecida. No entanto, como não encontrou nenhum erro nos cálculos de Rayleigh, Planck utilizou então a interpretação probabilística proposta pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), em 1877 (*Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien* **75**; **76**, p. 373; 62), para o cálculo da entropia dos osciladores moleculares, de frequência ν .

Porém, para fazer esse cálculo, teve de admitir a hipótese (parece, sugerido pelo próprio 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 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**.

Em 1916 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **18**, p. 318; *Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft zur Zürich* **16**, p. 47) e 1917 (*Physikalische Zeitschrift* **18**, p. 121), o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1922) realizou trabalhos nos quais tratou a radiação eletromagnética sob o ponto de vista mecânico-estatístico. Nesses trabalhos, ele examinou um **corpo negro** em equilíbrio térmico contendo, além da radiação, átomos simples com apenas dois níveis de energia (E_n, E_m), sendo que a passagem de um nível para o outro seria por intermédio da **emissão** ($m \rightarrow n$) ou da **absorção** ($n \rightarrow m$) de um **quantum de luz** (“lichtquantum”) de frequência dada por: $\nu = |E_m - E_n|/h$. Além do mais, considerou ainda Einstein que o átomo e a radiação se mantinham em equilíbrio estatístico, quando o número de átomos que passa de um nível para o outro permanece o mesmo. Desse modo, ele obteve relações importantes entre as probabilidades de **emissão** e de **absorção** de radiação de densidade $\rho(\nu, T)$, ocasião em que introduziu as famosas constantes A_{mn} e B_{mn} (B_{nm}), sendo A_{mn} relativa à **emissão espontânea**, B_{nm} relacionada com a **absorção** e B_{mn} com a **emissão** de radiação, sendo que estas duas últimas são radiações **estimuladas**. Usando essas definições e considerando que:

$$B_{mn} = B_{nm}; A_{mn} = (8 \pi h^3/c^3) B_{mn},$$

Einstein demonstrou a hoje conhecida **equação de Planck-Einstein**:

$$\rho(f, T) = (A_{mn}/B_{nm}) / [\exp(h f/kT) - 1],$$

com k sendo a **constante de Boltzmann**. Este era um resultado teórico em busca de uma aplicação prática, que somente aconteceu na década de 1950 (ver verbete nesta série). [Abraham Pais, **‘Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein** (Oxford University Press, 1983)].



ANTERIOR

SEGUINTE