



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### A Teoria do Elétron de Lorentz .

O físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) defendeu sua Tese de Doutorado na Universidade de Leiden, em 1875, recebendo o grau: **suma cum laude approbatur**. Seu trabalho de tese versou sobre a Teoria Eletromagnética, desenvolvida pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e apresentada em seu famoso livro intitulado **A Treatise on Electricity and Magnetism**, publicado em 1873. Lorentz tratou de certos aspectos não abordados naquela teoria, como, por exemplo, a maneira pela qual a onda eletromagnética Maxwelliana se refletia ou se refratava.

Um dos grandes sucessos da Teoria Maxwelliana foi a identificação da luz como sendo uma onda eletromagnética e que se propaga, em um meio homogêneo, com a velocidade  $V = c / \sqrt{\mu K}$  (em unidades gaussianas), onde  $\mu$  e  $K$  são, respectivamente, a **permeabilidade magnética** e a **capacidade indutiva específica** desse meio, e  $c$  é a velocidade da luz no "éter luminífero cartesiano". Esse resultado foi apresentado por Maxwell na *Philosophical Magazine* 29, p. 152, em 1865. Registre-se que Maxwell, ao usar os valores de  $\mu$  e  $K$ , que haviam sido medidos experimentalmente pelos físicos alemães Rudolph Hermann Arndt Kohlrausch (1809-1858) e Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), em 1856, encontrou  $V = 310.740 \text{ km/s}$ . Por outro lado, como o físico francês Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), em 1850, encontrara que a velocidade da luz naquele "éter" era da ordem de  $V = 298.360 \text{ km/s}$ , então, em vista do resultado obtido, Maxwell confirmou a conjectura que havia feito em 1861-1862, qual seja: **A luz é uma onda eletromagnética**. É interessante notar que a escolha da letra  $c$  deriva da palavra latina *celeritas* (que significa velocidade), conforme nos contam os físicos brasileiros Francisco Caruso (n.1959) e Vítor Oguri (n.1951), no livro **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (Elsevier/Campus, 2006).

Segundo a Teoria Ondulatória da Luz desenvolvida pelo físico francês Augustin Jean Fresnel (1788-1827), em seus trabalhos realizados nas décadas de 1810 e 1820, a velocidade da luz ( $V$ ) em um meio homogêneo e isotrópico, de índice de refração  $n$ , é dada por  $V=c/n$ . Usando o resultado acima, Maxwell obteve, para meios dielétricos ( $\mu \approx 1$ ),  $n^2 = K$ , expressão essa que passou a ser conhecida como relação de Maxwell. Para confirmar essa expressão, Maxwell precisava apenas comparar com os resultados experimentais de  $n$ . Assim, de posse do valor de  $n$ , medido pelo químico inglês John Hall Gladstone (1827-1902), em 1858, Maxwell observou que havia uma discrepância entre  $n_e=1,422$  e o valor calculado por sua fórmula:  $n_t=1,405$ . Estando essa diferença fora dos erros experimentais, ele ponderou que as teorias sobre a estrutura dos corpos deveriam ser melhoradas para que as suas propriedades ópticas pudessem ser deduzidas por intermédio de suas propriedades eletromagnéticas.

Em 1887 (*Annalen der Physik* 31, p. 421), o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) publicou um trabalho no qual registrou as experiências que realizou com osciladores e, com os mesmos, produziu radiações eletromagnéticas, hoje conhecidas como **microondas** ou **ondas Hertzianas**. Ele chegou a medir o seu comprimento de onda: 66 cm. No entanto, apesar desse sucesso experimental da Teoria de Maxwell, esta era incapaz de explicar a **dispersão da luz**, segundo a qual os raios de luz ao atravessarem um pedaço de vidro ou gotículas de água (como no arco-íris), são diferentemente desviados conforme a sua cor (violeta, por exemplo, é mais

fortemente refratada do que a vermelha). Ora, conforme a **lei de Snell-Descartes** nos ensina, o desvio de um raio luminoso em um certo meio está relacionado com o seu índice de refração  $n$  ( $\text{sen } i / \text{sen } r = n$ ). Porém, na Teoria de Maxwell, conforme vimos acima,  $n^2 = K$ , com só dependendo do material de que é feito o meio e não do tipo de luz que o atravessa. Portanto, para explicar a decomposição da luz era necessário relacionar  $K$  com a frequência ( $\omega$ ) da luz. Essa relação foi obtida por Lorentz, conforme veremos a seguir.

Se a luz é uma "onda provocada por oscilações de cargas elétricas", conforme previsão de Maxwell e confirmação de Hertz, onde estavam as cargas elétricas responsáveis por essas oscilações, indagou Lorentz? Para responder a esta indagação, Lorentz começou, em 1892 (*Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* 25, p.363), a formular sua Teoria dos Elétrons, tendo como fundamento teórico o eletromagnetismo Maxwelliano. Desse modo, Lorentz se propôs a formular sua teoria a partir dos seguintes postulados:

- 1) *Todas as ações eletromagnéticas acontecem por mediação de um éter imóvel;*
- 2) *A eletricidade possui uma estrutura corpuscular - os "elétrons" (qualquer partícula carregada positiva ou negativamente) -, que são os constituintes dos corpos ponderáveis, e são, por sua vez, os vínculos entre a matéria e o éter;*
- 3) *O campo eletromagnético tem sua origem nos "elétrons" e atua somente neles próprios;*
- 4) *O campo eletromagnético obedece às equações de Maxwell escritas em relação a um sistema de referência em repouso em relação ao éter;*
- 5) *A força que o campo eletromagnético exerce sobre a unidade de volume da matéria eletricamente carregada com densidade  $\rho$  é dada por (na notação atual):*

$$\vec{F} = \rho(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{H}),$$

onde  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  são, respectivamente, os campos elétrico e magnético, e  $v$  é a velocidade de um ponto qualquer da matéria dotada de carga elétrica.

De posse desses postulados, Lorentz explicou a **dispersão da luz**. Vejamos como. Ele supôs que os "elétrons" no interior dos meios transparentes eram distribuídos de uma certa maneira e livre de oscilarem com uma certa frequência angular própria ( $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ ) em torno de posições fixas. Então, quando sobre eles incidia uma onda eletromagnética monocromática (de frequência angular  $\omega = 2\pi\nu$  bem definida) e portadora de campos elétrico e magnético, transversalmente vibrantes, os "elétrons" sob a ação do campo elétrico vibrarão na mesma frequência da luz incidente e re-emitem. Desse modo, ele demonstrou que (em notação atual):

$$K = n^2 = 1 + \frac{4\pi N e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)},$$

onde  $e$  e  $m$  representam a carga e a massa do elétron, e  $N$  é o número de moléculas na unidade de volume. Registre-se que antes, em 1871 (*Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie* 143, p. 271), W. Sellmeier havia mostrado que  $\nu(\omega)$  em uma substância gasosa.

Além da explicação desse fenômeno luminoso, Lorentz foi capaz, com a sua Teoria dos Elétrons, de prever que, se um átomo radiante fosse colocado em uma região contendo um forte campo magnético ( $H$ ), as oscilações de seus "elétrons" deveriam sofrer alterações, fazendo com que cada linha espectral que esse mesmo átomo emite na ausência do campo magnético, quando excitado, fosse decomposta em três por interferência desse referido campo. E afirmou mais

ainda, quando a observação é feita na direção de , aparecerão apenas duas linhas polarizadas circularmente e em sentido inverso uma da outra; quando a observação é feita perpendicularmente a esse campo, aparecerão as três linhas, sendo a central polarizada linearmente à direção de  $H$  (a conhecida componente  $\pi$ ), e as duas extremas, polarizadas também linearmente, porém perpendicularmente à direção do campo (componente  $\sigma$ ; essa denominação deriva da palavra alemã **senkrecht** que significa perpendicular).

Essas predições teóricas de Lorentz foram confirmadas por seu aluno, o físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943; PNF, 1902), em 1896 (*Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin* 7, p. 128), ao observar que a linha  $D$  do sódio ( $Na$ ), separava-se em três, quando uma amostra desse elemento químico era colocada em uma região de forte campo magnético. Esse é o mundialmente conhecido **efeito Zeeman normal**. Esse efeito foi demonstrado, em 1897 (*Annalen der Physik* 63, p. 278), por Lorentz e, independentemente, pelo físico inglês Sir Joseph J. Larmor (1857-1942), ainda em 1897 (*Philosophical Magazine* 44, p. 503). Eles usaram argumentos distintos. Lorentz, ao considerar que seus "elétrons" estavam preso quase-elasticamente aos átomos, demonstrou que na presença de  $H$ , eles oscilavam na direção desse campo com frequência própria  $\nu_o$ , enquanto giravam em órbitas circulares em planos normais à direção de  $H$  e com frequência dada por:  $\nu = \nu_o \pm eH / 4\pi mc$ . Por sua vez, Larmor considerou, em seu artigo, que o efeito de um campo de indução magnética  $B$  (lembrar que  $B = \mu H$ , e  $\mu \approx 1$  para os dielétricos) sobre partículas carregadas eletricamente que descrevem órbitas circulares, era o de superpor à frequência própria de rotação ( $\nu_o$ ), uma frequência precessional em torno do campo externo - hoje conhecida como **frequência de precessão de Larmor**:  $\nu_L = eB / 4\pi m$  (em unidades eletrostáticas). É oportuno registrar que Larmor, nesse mesmo artigo, demonstrou que uma carga elétrica acelerada irradia energia, a hoje famosa **radiação de Larmor**.

É ainda oportuno registrar que Lorentz, usando sua Teoria de Elétrons, demonstrou o **magnetismo de rotação**, descoberto pelo físico francês Dominique Jean Arago (1786-1853), em 1826 (*Annales de Chimie et de Physique* 32, p. 213), bem como demonstrou que a solução de uma equação de onda não-homogênea satisfeita pelos potenciais elétricos (escalar  $\phi$  ou vetor  $\vec{A}$ ), em um dado ponto do espaço, a uma distância  $r$  das fontes de densidade elétrica (escalar  $\rho$ ) e num instante  $t$ , depende da posição dessas mesmas fontes em um instante anterior  $t' = t - r/v$ , onde  $v$  é a velocidade com que se propaga a onda eletromagnética no "éter". Esses potenciais foram mais tarde estudados pelo físico francês Alfred-Marie Liénard (1869-1958), em 1898 (*L'Eclairage Électrique* 16, pgs. 5; 53; 106), e o pelo geofísico alemão Emil Johann Wiechert (1861-1928), em 1900 (*Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* 5, p. 549), conhecidos hoje como os **potenciais de Liénard-Wiechert**.