

# Nascimentos da Física

José Maria Filardo Bassalo

*Departamento de Física da UFPA*

66075-900 - Belém, Pará

home-page: <http://www.amazon.com.br/bassalo>

Recebido em 26 de Fevereiro, 1998

Neste trabalho, como em nosso **Nascimentos da Física (3500 a.C. - 1900 A.D)** (EDUFPA, 1997), apresentamos em forma de verbetes os principais fatos (*nascimentos*) referentes aos conceitos físicos, surgidos em nosso Século XX. Para isso, basicamente, usaremos os dados que coletamos nos quatro tomos de nossas **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994), nos textos **Twentieth Century Physics: I, II, III** (Edited by L. M. Brown, A. Pais and B. Pippard, Institute of Physics Publishings and American Institute of Physics Press, 1995), **Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World** (A. Pais, Clarendon Press and Oxford University Press, 1995), **The Historical Development of Quantum Theory: Volumes 1, 2, 3, 4** (J. Mehra and H. Rechenberg, Springer-Verlag, 1982) e **Dictionary of Scientific Biography** (Edited by C. C. Gillispie, Charles Scribner's Sons, 1981), e nas referências indicadas em todos esses livros.

In this work, as in our **Nascimentos da Física (3500 a.C. - 1900 A.D)** (EDUFPA, 1997), we present in entries the main events (*births*) concerned to the physical concepts, appeared in our Century XX. For that, basically, we use the data that we gather in our four books **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994), in the books **Twentieth Century Physics: I, II, III** (Edited by L. M. Brown, A. Pais and B. Pippard, Institute of Physics Publishings and American Institute of Physics Press, 1995), **Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World** (A. Pais, Clarendon Press and Oxford University Press, 1995), **The Historical Development of Quantum Theory: Volumes 1, 2, 3, 4** (J. Mehra and H. Rechenberg, Springer-Verlag, 1982) and **Dictionary of Scientific Biography** (Edited by C. C. Gillispie, Charles Scribner's Sons, 1981), and in the references therein.

## IDADE CONTEMPORÂNEA: ELETRODINÂMICA CLÁSSICA E QUÂNTICA

### Primeira Década do Século XX (1901-1910)

Em 13 de outubro de 1901, o engenheiro elétrico italiano Giovanni Giorgi (1871-1950) apresentou na *Associazione Italiana de Engenharia Elétrica* o sistema de unidades intitulado MKSA, no qual foi incluída a unidade de intensidade de corrente elétrica (**ampère**) como unidade básica e sem o fator  $4\pi$ , removendo, com isso, a distinção entre as unidades eletrostáticas e eletromagnéticas.

Em 1901, o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918) publicou um trabalho nos *Annalen de Physique Leipzig 4*, no qual usou dados experimentais sobre a radiação do corpo negro para obter a **constante de Boltzmann k**, encontrando:

$$k = 1,34 \times 10^{-16} \text{ erg/K.}$$

De posse desse valor e do da **constante universal dos gases R**, obteve o **número de Avogadro N** por intermédio da expressão  $R = N k$ . Por fim, de posse de **N** e da **lei da eletrólise de Faraday -  $N = F e$** , encontrou para a carga do elétron **e** o seguinte valor:

$$e = 4,69 \times 10^{-10} \text{ esu.}$$

Ainda nesse trabalho, Planck encontrou o seguinte valor para a sua constante **h**:

$$h = 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$$

Em 1901, o físico irlandês Sir John Sealy Edward Townsend (1868-1957) publicou um trabalho na *Philosophical Magazine 1*, no qual descreveu suas experiências relacionadas com a determinação da carga de "íons negativos", usando uma técnica que ele havia desenvolvido em 1897. Para essa determinação, Townsend usou íons que se formavam nos gases produzidos

por eletrólise, e analisados em uma **câmara de Wilson** por intermédio da **fórmula de Stokes**.

Em 1901, o físico alemão Carl Victor Eduard Riecke (1845-1915) apresentou na *Physikalische Zeitschrift 3* o resultado de uma experiência na qual confirmou a hipótese formulada pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), em 1900 (*Rapports présentées au Congrès du Physique 3*, sobre a constituição das cargas vítrea (+) e resinosa (-).

Em 1901, Thomson melhorou a sua técnica, desenvolvida em 1898, para determinação da carga iônica. Desta vez, obteve o valor de  $3.3 \times 10^{-10}$  esu.

Em 1901, o físico alemão Woldemar Voigt (1850-1919) mostrou no *Göttingen Nachrichten* o resultado de uma experiência na qual observou que, para um campo eletrostático de  $300 \frac{\text{volt}}{\text{cm}}$ , as perturbações elétricas sobre a frequência das linhas espectrais de emissão e de absorção de alguns elementos químicos poderiam ser de somente  $\frac{1}{20.000}$  da separação entre as linhas D do sódio e, portanto, inobserváveis.

Em 12 de dezembro de 1901, o físico e inventor italiano Guglielmo Marconi (1874-1937; PNF, 1909) transmitiu de Poldhu (Inglaterra) para Newfoundland (Canadá), lugares separados por uma distância de 2.720 km, a letra S (...) em **código Morse**.

Em 1902, Voigt apresentou nos *Annales de Physique Leipzig 9* um estudo do efeito de um campo magnético externo sobre um conjunto de elétrons, igualmente espaçados, que se movimentavam em um círculo, com velocidade uniforme e em torno de um centro comum. Com isso, demonstrou que se uma substância possui uma distribuição uniforme de tais sistemas, a sua magnetização seria nula. Portanto, seria impossível explicar o magnetismo das substâncias, admitindo que seus átomos contêm elétrons circulando em órbitas fechadas e periódicas, sob a ação de forças centrais. Para contornar essa dificuldade, Voigt admitiu que o diamagnetismo ou o paramagnetismo decorriam do impacto mútuo entre os elétrons orbitais sempre que, imediatamente após o impacto, esses elétrons tivessem um excesso médio de energia potencial ou cinética. Contudo, além da complexidade dessa explicação, esse modelo atribuía ao dia e ao paramagnetismo a mesma origem, o que, no entanto, contradizia a **lei de Curie** (1895).

Em 1902, o físico alemão Carl David Tolmé Runge (1856-1927) publicou trabalhos no *Astrophysical Journal 15, 16*, nos quais analisou as séries de tripletos do magnésio (Mg), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg), e as séries de dupletos do cobre (Cu), prata (Ag), alumínio (Al), tálio (Tl) e sódio (Na). Dessa análise, observou que, em todos os casos das linhas correspondentes, elas apresentavam o mesmo número de componentes magnéticos com a mesma diferença de frequências

( $\Delta\nu$ ).

Em 1902, o físico e meteorologista escocês Balfour Stewart (1828-1887) publicou um artigo na *Encyclopaedia Britannica, 16* no qual formulou uma teoria para explicar a variação diária do campo magnético da Terra. Em vista disso, apresentou a hipótese de uma possível camada condutora na alta atmosfera terrestre capaz de permitir a propagação de ondas eletromagnéticas.

Em 1902, o físico inglês Oliver Heaviside (1850-1925) e, independentemente, o físico indu-norte-americano Arthur Edwin Kennely (1861-1939) apresentaram, respectivamente, na *Encyclopaedia Britannica, Volume 33* e na *Electrical World Engineering 15*, a teoria sobre a camada refletora em torno da Terra - a hoje conhecida **camada de Kennelly-Heaviside** ou **região E** - através da qual houve a transmissão transatlântica de ondas eletromagnéticas feita por Marconi, em 1901.

Em 1902, o engenheiro elétrico canadense Reginald Aubrey Fessenden (1866-1932) usou o **princípio heteródino** para converter sinais de rádio de alta para baixa frequência. Esse princípio diz respeito à interferência de ondas de frequências diferentes produzindo pulsações (batimentos).

Em 1902, o físico inglês Owen Williams Richardson (1879-1959; PNF, 1928) publicou um trabalho nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 11*, no qual considerou que os elétrons livres de um metal obedecem à **estatística de Maxwell-Boltzmann** e, com isso, calculou a seguinte expressão para a **corrente termo-iônica J**:

$$J = A' \sqrt{T} e^{-\frac{e\phi}{k_B T}},$$

onde **A'** é uma constante determinada experimentalmente para cada material, e  $\phi$  é a sua **função trabalho**, e relaciona-se com a energia necessária para arrancar um elétron de um átomo por intermédio do **efeito fotoelétrico**.

Em 1903, Fessenden patenteou a invenção de um detector eletrolítico que era mais sensível do que os primitivos detectores de radiotelegrafia.

Em 1903, o físico inglês Harold Albert Wilson (1874-1964), aluno de Thomson, explicou na *Philosophical Transactions of the Royal Society A202* o **efeito termo-iônico** através de um mecanismo semelhante ao da evaporação, usando para isso a **equação de Clapeyron (1834) - Clausius (1850)**.

Em 1903, Wilson publicou na *Philosophical Magazine 5* o resultado de sua experiência na qual melhorou a técnica de Townsend(1897)-Thomson(1898) para a determinação da carga iônica, introduzindo um campo elétrico na mesma direção do campo gravitaci-

onal. Com essa melhoria, encontrou o valor de  $3.09 \times 10^{-10}$  esu para a carga iônica.

Em 1903, o físico alemão Ernst Georg Pringsheim (1859-1917) publicou um artigo nos *Archiv der Mathematik und Physik* 7, no qual afirmou que a equação do corpo negro deduzida por Planck, em 1900, representa uma expressão matemática da função de Kirchhoff.

Em 1903, Thomson publicou dois trabalhos na *Philosophical Magazine* 5. No primeiro deles, apresentou o cálculo da carga iônica, e no segundo, apresentou um modelo semelhante ao de Voigt (1902) para explicar o dia e o paramagnetismo.

Em 1904, Fessenden fez as primeiras tentativas no sentido de detectar objetos em profundidade, usando a emissão, reflexão e recepção de pulsos de oscilações produzidos por dispositivos de radiotelegrafia.

Em 1904, o engenheiro elétrico inglês Sir John Ambrose Fleming (1849-1945) inventou o **diódo a vácuo** ou **válvula termoiônica** com o objetivo de melhorar a recepção de sinais telegráficos feita por coesores. Para essa invenção, tomou um tubo rarefeito e inseriu no mesmo duas placas metálicas, que funcionavam como catodo e anodo. Ao aquecer o catodo à incandescência, os elétrons arrancados dessa placa (por **efeito Edison**) eram emitidos em um feixe contínuo para o anodo. Ao inserir esse tubo, também conhecido como **kenotron**, no circuito de uma antena receptora de telegrafia sem fio, o anodo tornava-se, alternadamente, positivo e negativo devido aos sinais de rádio de alta frequência recebidos. Em vista disso, os elétrons eram atraídos ao anodo no ciclo positivo e eram repelidos no ciclo negativo. Assim, essa **válvula termoiônica** (nome dado por Fleming) funcionava como um retificador e, também, como um detector de radiofrequência. Observe-se que o **tubo de Fleming** apresentava uma vantagem em relação ao **tubo de Crookes** pois, neste, a emissão de elétrons é devida ao **efeito de campo**, para a qual é necessária uma voltagem alta (da ordem de kilovolts). Contudo, no **tubo de Fleming**, a emissão de elétrons ocorre por **efeito Edison**, para a qual se necessita, apenas, de uma voltagem baixa (da ordem de volts).

Em 1904, o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) publicou nos *Annales de Physique Leipzig* 14 um trabalho ele discutiu as flutuações de energia da radiação eletromagnética próximo do equilíbrio térmico. É nesse trabalho que a **constante de Planck**  $h$  é mencionada pela primeira vez.

Em 1904-1905, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) publicou uma série de artigos nos *Koninklijke Akademie von Wetenschappen te Amsterdam* 7, nos quais elaborou um modelo para explicar a relação entre as condutividades elétrica e

térmica de um metal. Nesse modelo, admitiu que os átomos de um metal eram fixos e que os elétrons se deslocavam rapidamente entre seus interstícios. Além do mais, desprezou as colisões desses elétrons com os átomos fixos, os quais considerou como esferas elásticas e fixas. Admitindo, ainda, que as velocidades dos elétrons eram descritas pela **estatística de Maxwell-Boltzmann**, deduziu para a **lei de Wiedemann-Franz** a seguinte expressão:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = 2 T \left( \frac{k_B}{e} \right)^2.$$

Em 1905, o físico francês Paul Langevin (1872-1946) apresentou no *Journal de Physique Théorique et Appliquée (Paris)* 4 e nos *Annales de Chimie et Physique* 5 o modelo que desenvolveu para explicar o dia e o paramagnetismo. No caso do paramagnetismo, Langevin admitiu que os átomos e moléculas possuíam um momento magnético intrínseco e permanente  $\mu$ , cuja distribuição espacial era determinada pela **estatística de Maxwell-Boltzmann**. Desse modo, demonstrou que a magnetização  $\mathbf{M}$  é dada por:

$$\mathbf{M} = N \mu L(x), \quad \left( x = \frac{\mu H}{k T}, \quad L(x) = \coth x - \frac{1}{x} \right)$$

onde  $\mathbf{N}$  é o **número de Avogadro**,  $\mathbf{H}$  é o campo magnético externo,  $\mathbf{k}$  é a **constante de Boltzmann**,  $\mathbf{T}$  a temperatura absoluta e  $\mathbf{L}(x)$  é a **função de Langevin**. Usando a expressão acima, Langevin observou que, para temperaturas altas ou campos magnéticos fracos ( $x \ll 1 \rightarrow L(x) \sim \frac{x}{3}$ ), a mesma se transformaria na expressão:

$$\mathbf{M} = \frac{N \mu^2}{3 k T} \mathbf{H} = \chi \mathbf{H},$$

que está de pleno acordo com a **lei de Curie** (1895). Para explicar o diamagnetismo, Langevin considerou a **frequência de Larmor** (1897) dos elétrons em torno de um campo magnético externo  $\mathbf{H}$  e, com isso, demonstrou que o acréscimo do momento magnético ( $\Delta M$ ), devido a um particular elétron circulante na mesma, é dado por:

$$\Delta M = - \frac{H e^2}{4 m c^2} \bar{r}^2,$$

onde  $\mathbf{r}$  é a distância do elétron ao núcleo atômico, projetada em um plano perpendicular a  $\mathbf{H}$ ,  $\bar{r}^2$  é a média quadrática estendida às durações de diversas revoluções eletrônicas, e o sinal menos (-) é devido à **lei de Lenz** (1833). Esse resultado concordava com a observação experimental de que a suscetibilidade diamagnética não dependia da temperatura. Contudo, o bismuto (metal diamagnético) apresentava uma exceção, pois sua suscetibilidade diamagnética diminuía linearmente com o aumento da temperatura. Segundo Langevin, essa

anomalia devia-se a elétrons-livres de condução. Tais elétrons haviam sido propostos por Riecke, em 1898.

Por volta de 1906, o físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923) iniciou, na Universidade de Chicago (USA), suas pesquisas para a determinação da **carga elétrica elementar**. Inicialmente, com o estudante Louis Begeman, ele repetiu a experiência realizada por Harold Wilson, em 1903, no *Laboratório Cavendish* (Inglaterra). Nesse tipo de experiência, vapores (nuvens) de gotículas eram produzidas numa câmara de expansão de vapor entre placas paralelas e horizontais de um condensador carregado. Para determinar a carga média  $q$  de cada gotícula, inicialmente eram observadas as camadas superiores das nuvens que caíam lentamente e que continham as menores gotículas. Um grupo caía sob a ação da gravidade  $g$  à velocidade  $v_1$ , e o outro caía mais depressa com a ajuda de um campo elétrico  $E$  estabelecido através do condensador e à velocidade  $v_2$ . Supondo válida a **fórmula de Stokes**, então a carga média  $q$  de cada gotícula será dada por:

$$q = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{9}{2} \frac{\mu}{g} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{g}{E\sqrt{\delta}} (v_2 - v_1) \sqrt{v_1} = n, \quad (n = 1, 2, \dots),$$

onde  $\delta$  é a densidade da gota,  $\mu$  é a viscosidade da nuvem e  $e$  a “carga elétrica elementar”.

Em 1906, o engenheiro elétrico norte-americano Greenleaf Whittier Pickard (1877-1956) descobriu que o contacto entre um fio metálico e a superfície de certos cristais (notadamente o silício (Si)) retificam e demodulam correntes alternadas de alta frequência, tais como as produzidas em uma antena receptora de ondas de rádio.

Em 1906, o físico inglês Charles Glover Barkla (1877-1944; PNF, 1917) apresentou nos *Proceedings of the Royal Society of London A 77* um estudo sobre o espalhamento de raios-X pela matéria. Ao observar que essa radiação poderia ser polarizada, concluiu que a mesma era uma onda transversal.

Em 1907, o engenheiro elétrico Lee De Forest (1873-1961) inventou o **triodo a vácuo** com o objetivo de melhorar a recepção de sinais telefônicos. Inicialmente, começou a trabalhar com tubos rarefeitos com dois eletrodos, à semelhança de Fleming, contudo, ao incorporar um terceiro eletrodo (**grade**) entre o catodo (C) e o anodo (A), e, ao conectá-lo com o pólo negativo de uma bateria, observou que ele poderia controlar o fluxo de elétrons entre C e A. Quando De Forest conectou a antena receptora de telefonia sem fio à grade (G) de seu dispositivo (ao qual denominou, na ocasião, de **tubo audion**) observou que o mesmo não só retificava os sinais de rádio de alta frequência recebidos, como também os **amplificava**.

Em 1907, Thomson apresentou o cálculo da absorção do calor de radiação pelos metais.

Em 1907, o físico francês Pierre Ernst Weiss (1865-1940) utilizou no *Journal de Physique Théorique et Appliquée (Paris) 5, 6* o **modelo de Langevin** (1905) para explicar o ferromagnetismo. Segundo Weiss, uma substância ferromagnética era constituída de pequenos dipolos magnéticos, submetidos a um intenso campo magnético interno - o **campo molecular** -  $H_m = qM$ . Assim, considerando que  $x = \frac{\mu(H + qM)}{kT}$ , Weiss demonstrou que:

$$\chi = \frac{N\mu^2}{[3k(T - T_c)]},$$

$$(T_c = \frac{Nq\mu^2}{3k}, q_{exp} \sim 10^3, q_{teo} \sim 4).$$

Com esse modelo, Weiss foi capaz de prever a transição de fase ferromagnetismo-paramagnetismo, já que pela expressão acima se vê que quando  $T = T_c$ ,  $\chi \rightarrow \infty$ . Isso significa dizer que um corpo ferromagnético deixa de sê-lo quando sua temperatura atinge o valor  $T_c$ , o chamado **ponto Curie** (nome dado por Weiss, em 1910). Nesse estudo do ferromagnetismo, Weiss deduziu que numa substância ferromagnética existem regiões maiores do que átomos ou moléculas - os chamados **domínios** - os quais são inerentemente magnéticos, cujos momentos magnéticos são orientados em diferentes posições, de modo que uma parte finita da substância ferromagnética pode não estar magnetizada.

Em 1907, Runge reuniu os resultados referentes ao chamado **efeito Zeeman complexo** com o objetivo de ajustar numericamente as  $\Delta\nu$  entre os componentes magnéticos e relacioná-las com o **efeito Zeeman normal**. Esse ajuste ficou conhecido como **regra de Runge**.

Em 1908, Richardson sugeriu na *Physical Review 26* um tipo de experiência que pudesse comprovar as “correntes amperianas”, medindo, através da mesma, a relação entre o momento angular mecânico  $\vec{L}$  do elétron “amperiano” e seu momento magnético  $\vec{\mu}$ . Assim, imaginou um longo cilindro fino, de ferro, suspenso por uma fibra. Quando o mesmo estivesse desmagnetizado, as “correntes amperianas” apresentavam momento angular nulo, afirmava Richardson. Contudo, ao ser aplicado um campo magnético vertical, os elétrons seriam orientados para o mesmo, e o cilindro, como um todo, sofreria um torque que, ao ser medido, permitiria determinar aquela relação. Apesar de ser engenhosa essa experiência, Richardson não conseguiu medir o torque previsto.

Em 1908, Millikan e Begeman publicaram um trabalho na *Physical Review 26* que havia sido apresentado por Millikan, em janeiro de 1908, na reunião da

*American Physical Society*, em Chicago, contendo os resultados das experiências que realizaram sobre a determinação da carga elétrica de um íon negativo. Nessas experiências, eles usaram o elemento rádio (Ra), em lugar de raios-X, para ionizar o gás úmido, antes da expansão que formava a nuvem de vapor em torno dos íons. Numa série de dez observações, eles encontraram para a carga elétrica de um íon negativo o valor de  $\sim 4,03 \times 10^{-10}$  esu.

Em 1909, o físico norte-americano Samuel Jackson Barnett (1873-1956) apresentou na *Science* 30 a idéia de uma experiência com o objetivo de medir as “correntes amperianas”. Essa idéia consistia em considerar cilindros de ferro, inicialmente com momento magnético nulo, e que se tornavam magnetizados após serem submetidos a uma aceleração angular. Muito embora as primeiras experiências hajam confirmado o **efeito Barnett**, o mesmo não foi reproduzido em experiências subsequentes.

Entre 4 de março e 10 de abril de 1909, o físico austríaco Felix Ehrenhaft (1879-1952) realizou três trabalhos publicados, respectivamente, em *Anzeiger der Akademie der Wissenschaften (Viena)* 7, *Sitzungsberichte Akademie Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaften Klasse (Viena)* 188 e *Physikalische Zeitschrift* 10, nos quais desenvolveu um novo método para medir a carga elétrica e de pequenas partículas e determinar o que ele denominou de **elektrische Elementarquantum (quantum elementar elétrico)**. O método utilizado por Ehrenhaft era bastante semelhante ao usado por Millikan, porém, como ele usou o campo elétrico na horizontal, ao invés da vertical, como usara Millikan, isso o impediu de estimar o valor de  $e$  a partir da observação de uma única partícula; ele tinha que observar várias partículas e depois fazer uma média. Assim, nas experiências realizadas por Ehrenhaft este encontrou o seguinte valor médio para  $e$ :  $4,60 \times 10^{-10}$  esu.

Na primavera-verão de 1909, Millikan e Begeman (provavelmente alertados pelo físico inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) sobre o problema da evaporação) realizaram novas experiências para a determinação de  $e$ . Desta vez, contudo, usaram uma bateria de grande potência (10 kV) para criar um campo elétrico mais forte, agora em oposição ao efeito da gravidade, para imobilizar a camada superior da nuvem de gotículas. Contudo, eles tiveram uma surpresa ao ligar a bateria e observar que a nuvem se dissipou completamente, ao invés de ficar imobilizada. Observações sucessivas levaram Millikan a descobrir que, depois da “explosão” da nuvem, as minúsculas gotículas que ali permaneceram proporcionaram, pela primeira vez, a observação de gotas individuais. Assim, com essa nova

técnica, encontraram para  $e$  o valor de  $4,68 \times 10^{-10}$  esu. Apesar de haver melhorado o valor de  $e$ , Millikan não ficou satisfeito, já que o problema da evaporação continuava. Tentativas para resolver este problema levaram-no ao experimento da gota de óleo.

Em setembro de 1909, Harvey Fletcher (1884-1981) procurou Millikan em busca de um assunto para a sua tese de doutoramento. Um possível assunto para a mesma seria a determinação da carga eletrônica. Contudo, como havia o problema da evaporação, este foi discutido entre os três: Millikan, Begeman e Fletcher. Para contornar aquele problema, foram sugeridas algumas substâncias, inclusive o óleo, por seu fácil manuseio.

Em 1909, Einstein tratou na *Physikalische Zeitschrift* 10 da geração de raios catódicos secundários por intermédio de raios-X.

Em 1909, Millikan publicou na *Physical Review* 29 um artigo mais elaborado do pequeno ensaio que havia apresentado, em 23 de outubro de 1909, na reunião da *American Physical Society*, em Princeton. Esse artigo, que se tornou famoso, relatava a experiência da gota de óleo com a qual determinou a “carga elétrica elementar”:  $4,69 \times 10^{-10}$  esu. Antes, em 9 de outubro, ele enviou esse mesmo trabalho para a *Philosophical Magazine*. É interessante registrar que, embora esse trabalho haja sido realizado com uma contribuição importante de Fletcher (foi ele quem usou um atomizador de perfume para borrificar gotículas de óleo diretamente na placa superior do condensador), Millikan “convenceu-o” de que esse primeiro trabalho só deveria levar o nome do “chefe”, e que o nome de Fletcher e de Begeman seriam incluídos em outros trabalhos. Ironicamente, foi esse trabalho inicial que deu fama a Millikan, inclusive o Prêmio Nobel de Física de 1923. (Em trabalho publicado postumamente (*Physics Today*, junho de 1982), Fletcher apresentou sua versão sobre essa famosa **experiência de Millikan**.)

Em 1909, R. F. Lattey publicou um trabalho na *Philosophical Magazine* 18, no qual apresentou o cálculo da carga elétrica iônica, e o comparou com o valor calculado por Millikan, concluindo que este não era “tão preciso” quando comparado com o valor obtido por ele próprio  $e$ , também, por Rutherford.

Em 2 de dezembro de 1909, o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) defendeu a tese de mestrado, na Universidade de Copenhague, na qual começou a generalizar o modelo eletrônico dos metais, desenvolvido por Lorentz entre 1904 e 1907. Em sua generalização (completada em sua tese de doutorado, defendida em 1911, nessa mesma Universidade), Bohr considerou a força entre os elétrons e os átomos

como dependendo inversamente de uma potência n-ésima de suas distâncias relativas. Em sua pesquisa, Bohr mostrou que aquele modelo apresentava algumas dificuldades com alguns resultados experimentais. Por exemplo, esse modelo era incapaz de explicar por que em certos metais (por exemplo, o bismuto), o **campo elétrico Hall** é anormalmente alto e aponta em direção oposta ao que ocorre na maioria dos metais, dentre os quais destacam-se o ferro, zinco e chumbo. Ainda nessas teses, Bohr mostrou que o cálculo da absorção do calor de radiação pelos metais, feito por Thomson, em 1907, estava incompleto, pois acreditava Bohr ser o movimento dos elétrons individuais importante para aquele cálculo.

Em 21 de abril e 12 de maio de 1910, Ehrenhaft apresentou à *Academia de Ciência de Viena* novos resultados de suas experiências sobre a determinação do “quantum elementar elétrico”, que foram publicados, respectivamente, em *Anzeiger der Akademie der Wissenschaften (Viena) 10, 13*. Desta vez, usando o campo elétrico na vertical, ele realizou 300 medidas de carga elétrica em partículas de platina e de prata, encontrando valores compreendidos entre  $1,38 \times 10^{-10}$  esu e  $7,53 \times 10^{-10}$  esu. Em vista disso, concluiu que as partículas carregadas não só têm uma carga simples ou dupla, mas também podem ter cargas **entre e abaixo** desses valores. Esses resultados levaram-no a propor a existência de **subelétrons** e, mais ainda, que a carga elétrica indivisível não deveria existir na Natureza, pelo menos ao nível de  $0,9 \times 10^{-10}$  esu. É oportuno destacar que Millikan também encontrou medidas da carga elétrica em torno de 30 por cento menor que o valor da carga elétrica elementar, porém desprezou-as.

Em 23 de abril de 1910, Millikan participou da reunião da *American Physical Society* com um traba-

lho no qual apresentou novo valor para a “carga elétrica elementar”:

$$4,9016 \times 10^{-10} \text{ esu.}$$

Um resumo desse trabalho foi publicado em julho de 1910, na *Physical Review* e em setembro de 1910, na *Science*. É oportuno registrar que, nesse artigo, Millikan observou que o método do atomizador usado para produzir gotas esféricas bem diminutas, cuja autoria foi reivindicada por Fletcher, já havia sido desenvolvido por J. Y. Lee, em janeiro de 1908, em suas investigações sobre o movimento browniano.

Em 1910, K. Przibram apresentou no *Anzeiger der Akademie der Wissenschaften (Viena) 11* o resultado de seus trabalhos sobre a determinação da carga eletrônica. Nesses trabalhos, ao repetir as experiências realizadas por Millikan, obteve os mesmos resultados e, inclusive, alguns valores menores do que o valor médio:  $3 \times 10^{-10}$  esu.

Em 1910, o termo **elétron**, que havia sido proposto pelo físico irlandês George Johnstone Stoney (1826-1911), em 1874, e adotado por Lorentz, em 1899, se tornou de uso geral.

Em 1910, Einstein e o físico alemão Ludwig Hopf (1884-1939) publicaram um trabalho nos *Annales de Physique Leipzig 33*, no qual usaram a Teoria Eletromagnética Clássica para fazer cálculos estatísticos relacionados com a pressão da radiação eletromagnética.

Em 1910, De Forest conseguiu transmitir a apresentação do tenor italiano Enrico Caruso (1873-1921), feita no *Metropolitan Opera Association*, de Nova York.

Em 1910, os físicos alemães Heinrich Rubens (1865-1922) e Ernst Hagen confirmaram experimentalmente que a radiação infravermelha era uma radiação eletromagnética.