

# 100 ANOS DA DESCOBERTA DO ELÉTRON<sup>1</sup>

**José Maria Filardo Bassalo**

Departamento de Física da UFPA  
66075-900, Guamá, Belém, Pará  
e-mail: <http://www.amazon.com.br/bassalo>

RESUMO: Neste artigo, vamos mostrar o desenvolvimento histórico sobre os fenômenos elétricos, desde as primeiras observações sobre os mesmos feitas por Tales de Mileto, no Século VII A.C., até 1897, quando Joseph John Thomson descobriu a partícula elementar - o ELÉTRON - responsável por esses fenômenos.

---

<sup>1</sup>Este artigo é em homenagem ao centenário de nascimento de meu pai ELÁDIO BASSALO (1897-1980).

Comemora-se neste ano de 1997 o primeiro centenário da descoberta da primeira partícula elementar: o **elétron**. Neste artigo<sup>1</sup>, vamos apresentar a crônica dessa descoberta.

Uma das primeiras observações sobre um fenômeno elétrico foi realizada pelo filósofo grego Tales de Mileto (624-546) ao atritar um bastão de âmbar (**elektron** ( $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ ), em grego) com um pedaço de lã, e notar que o mesmo atraía corpos leves em sua proximidade.<sup>2</sup> Por sua vez, o filósofo e botânico grego Teofrasto de Ereso (c.372-c.287) relacionou, em sua descrição sobre jóias, os nomes de alguns minérios que apresentavam o mesmo comportamento do âmbar, quando atritados. Esse comportamento do âmbar também foi registrado pelo monje inglês Beda, O Venerável (673-735), em um tratado, composto de cinco livros, que foi completado entre 731 e 732 A.D.<sup>3</sup> Apesar dessas observações, foi somente no Século XVI que o matemático italiano Girolamo Cardano (1501-1576) fez, pela primeira vez, a diferença entre os fenômenos elétricos e magnéticos.

Essa diferença foi confirmada pelo médico inglês William Gilbert (1544-1603) ao realizar novas experiências envolvendo fenômenos elétricos e magnéticos, registradas em seu famoso tratado *De Magnete*, publicado em 1600.<sup>4</sup> Nessas experiências, ele mostrou que esses dois fenômenos eram diferentes, ao examinar o comportamento do âmbar quando atritado, e o do ferro quando se aproximava de um ímã. Ainda nessas experiências, Gilbert observou que o cristal de rocha e uma grande variedade de pedras preciosas, apresentavam o mesmo comportamento do âmbar, isto é, atraíam corpos leves quando atritados. Como o âmbar tem o significado grego de **elektron**, conforme vimos antes, Gilbert denominou de **elétricos**, os corpos que se comportavam como o âmbar; às substâncias que não conseguira “eletrizar” (como, por exemplo, os metais), denominou-as de **não-elétricas**. Por outro lado, ao estudar a eletrização dos corpos por fricção, Gilbert achava que tal eletrização decorria da remoção de um fluido, ou **humour** (substância etérea e imaterial) desses mesmos corpos, deixando um **effluvium elétrico**, ou atmosfera, em seu arredores.

Muito embora a atração elétrica fosse conhecida desde a Antiguidade, segundo vimos acima, as primeiras observações sobre a repulsão elétrica só foram registradas no Século XVII pelos físicos, o italiano Niccolo Cabeo (1586-1650), em 1629,<sup>5</sup> e o alemão Otto von Guericke (1602-1686), em 1663. Ainda neste ano, Guericke inventou o primeiro **gerador eletrostático** constituído de uma esfera de enxofre que era posta em rotação por intermédio de uma manivela, e que se eletrizava quando a mesma era freada com as mãos. Usando esse gerador, Guericke descobriu, em 1672, o fenômeno da **triboluminescência** (luminescência causada por fricção) ao perceber que a superfície da esfera de enxofre de seu dispositivo reluzia ao se carregar de eletricidade.

Novas experiências sobre a **triboluminescência**, bem como sobre a **triboeletricidade** (eletricidade estática causada por fricção) foram realizadas pelo cientista inglês Francis K. Hauksbee (c.1666-1713), entre 1703 e 1709, por intermédio de um dispositivo que ele próprio havia inventado, composto de uma pequena esfera oca de vidro, montada em um eixo e que podia girar com grande velocidade. Com esse aparelho, realizou a seguinte experiência: retirou ar do interior da esfera (usando a bomba de vácuo que havia construído em 1703) e colocou-a em rotação em uma sala escura. Ao pará-la com as mãos, observou que havia uma luz púrpura e brilhante. Ao repetir essa mesma experiência com a esfera cheia de ar, a luz desapareceu. Analisando esses resultados, Hauksbee concluiu que esse comportamento

da esfera era devido a efeitos “elétricos”.

Além das experiências referidas acima, Hauksbee realizou outras com tubos ocios e bastões de vidro. Assim, ao friccionar tubos ocios abertos, ele não percebeu nenhuma luminosidade em seu interior. No entanto, acompanhado por um fraco estalido, observou que uma luz parecia se fixar sobre as proximidades dos objetos, tais como sua mão ou pedaços de ouro, latão, marfim ou madeira. Por outro lado, ao colocar leves pedaços de latão no interior desses tubos ocios e ao atritá-los, observou que os mesmos eram violentamente repelidos; e, também, ao friccionar esses tubos ocios (ou mesmo bastões) e ao aproximá-los de seu rosto, sentiu um leve “vento elétrico”. Para estudar esses fenômenos, Hauksbee construiu o primeiro **gerador triboelétrico** (uma versão mais aperfeiçoada do gerador eletrostático que havia sido inventado Guericke, em 1663), assim como construiu, também, o primeiro **eletroscópio de lâminas** composto de dois pedaços de palha suspensos lado a lado da extremidade inferior de uma lâmina metálica. Com esses dispositivos, estudou o comportamento do **luminosus effluvia**, bem como verificou se um corpo estava ou não eletrizado. Essas experiências foram relatadas por Hauksbee em um livro publicado em 1709.<sup>6</sup>

Um novo aspecto dos fenômenos elétricos, qual seja, o de que os condutores elétricos (metais) se tornavam luminosos quando esquentados, foi observado pelo físico holandês Willem Jacob’s Gravesande (1688-1742) e registrado em um livro publicado em 1720.<sup>7</sup> Em vista dessa observação, ele inferiu que cada substância possuía uma fonte natural de corpúsculos, que eram expelidos na medida que a substância era esquentada até se tornar incandescente.

Ainda na primeira metade do Século XVIII, a observação da atração elétrica em várias substâncias levou os físicos à idéia de que a eletricidade não era uma propriedade intrínseca dessas substâncias, e sim, que ela, a eletricidade, era devida a uma certa espécie de “fluido elétrico” que exibia uma “virtude elétrica”. Assim, entre 1727 e 1729, o eletricista inglês Stephen Gray (1696-1736) realizou várias experiências sobre a condutibilidade (“virtude”) desse “fluido elétrico” nos corpos. Em uma dessas experiências, um tubo de vidro tampado com uma rolha de cortiça em uma de suas extremidades era atritado com um pedaço de lã e, em conseqüência disso, a rolha passou a atrair corpos leves. Em outra experiência, Gray observou que o comportamento da rolha de cortiça seria o mesmo se ela estivesse ligada ao tubo de vidro por intermédio de um fio longo de cânhamo. De outra feita, em vez de pendurar a corda verticalmente, ele a manteve na posição horizontal, pendurada no teto por meio de várias fitas de seda. Contudo, um certo dia partiu-se uma dessas fitas e ele a substituiu por um fio de cobre. Em virtude disso, Gray observou que a rolha de cortiça não mais se eletrizava. No prosseguimento dessas experiências, Gray observou ainda que alguns materiais não possuíam “virtude elétrica”. O resultado dessas experiências o levou a formular os conceitos de **condutibilidade** e o de **fluido elétrico**.

É interessante observar que Gray chegou ao conceito de “fluido elétrico” ao interpretar o resultado da experiência referida acima, na qual, conforme dissemos, o fio de seda fora substituído pelo fio de cobre. *Em vista disso*, Gray inferiu que se em uma tubulação horizontal de água fosse feito um pequeno tubo, a água escoaria através do mesmo e, em conseqüência, pararia o fluxo de água através da tubulação. No caso da experiência realizada por Gray, o fio de cobre representava o furo na “tubulação” que conduzia o “fluido elétrico”

através do fio de cânhamo.

A “virtude elétrica” de Gray foi objeto de pesquisa por parte do físico francês Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739) (que era também jardineiro de Luís XV (1710-1774), Rei de França). Com efeito, entre 1733 e 1734, ele realizou experiências nas quais mostrou a existência de duas espécies de “virtude elétrica”, ao observar que um bastão de vidro, quando atritado com um pedaço de seda, repelia uma bolinha de sabugueiro suspensa por um fio isolante de seda, caso a mesma fosse eletrizada por um bastão de vidro atritado com seda, ou atraía essa mesma bolinha caso a mesma fosse eletrizada por um bastão de resina friccionada com pele de gato. A esses dois tipos de “virtude elétrica”, Du Fay denominou de **eletricidade vítrea** e **eletricidade resinosa**, respectivamente.

Muito embora Du Fay haja observado que “eletricidades de mesmo nome se repelem e que as de nome contrário se atraem”, foi o físico russo G. Rijman (1711-1753) quem primeiro se preocupou em realizar experiências sobre a eletricidade, com o objetivo de “pesar” a ação elétrica exercida por um corpo eletrizado. Nessas experiências, conduzidas em 1735, ele observou que essa ação diminuía na medida em que se afastasse do mesmo. Por outro lado, em 1739, o físico anglo-francês John Theophilus Desaguliers (1683-1744) realizou experiências com o objetivo de saber como os corpos se comportavam com relação à condução do “fluido elétrico”. Essas experiências levaram-no a empregar, provavelmente pela primeira vez, os termos **condutores** e **insuladores** (da palavra latina **insula**, que significa ilha) para, respectivamente, os corpos que conduzissem o “fluido elétrico”, e para os que apenas isolavam esse mesmo fluido na região em que eram atritados.

Evidenciada a “virtude elétrica” de certos corpos, uma outra questão que começou a preocupar os cientistas do Século XVIII, foi a de saber se era possível “armazená-la”. Com esse objetivo, em 1745, o médico e físico holandês Pieter van Musschenbroek (1692-1761), da Universidade de Leiden, realizou uma experiência na qual tentou eletrizar água em uma jarra (garrafa), introduzindo nesta a ponta de um fio de cobre, e a outra extremidade fixou-a numa barra de aço ligada por uma corrente de metal a um **gerador Guericke**. Em outra ocasião, e ainda em 1745, com a ajuda de seu irmão Jan Musschenbroek, tampou com rolha de cortiça uma garrafa de vidro comum, com suas paredes internas e externas revestidas de uma delgada folha de prata, e encheu-a até a metade de água. Atravessou a rolha com uma haste metálica e mergulhou-a até a água. Desse modo, os Musschenbroek haviam construído um dispositivo para armazenar o **fluido elétrico**, e que ficou conhecido como a **garrafa de Leiden**. Ainda em 1745, o pastor e físico polonês Ewald Georg von Kleist (1700-1748) construiu, independentemente, um aparelho semelhante ao de Musschenbroek e apresentou-o à Sociedade Científica de Danzig.

Novas experiências com a **garrafa de Leiden** foram realizadas pelo cientista e estadista norte-americano Benjamin Franklin (1706-1790), entre 1747 e 1750. Como resultado de tais experiências, Franklin fez as seguintes observações:

1. Existe somente uma espécie de eletricidade, e que ela se encontra presente em todos os corpos, porém, em quantidades moderadas;
2. O vidro friccionado atrai eletricidade da borracha e torna-se “eletrizado positivamente”

ou **plus (mais (+))**, ao passo que a borracha se torna “eletrizada negativamente”, ou **minus (menos (-))**;

3. Os corpos que possuem uma quantidade de eletricidade inferior à comum repelem-se uns aos outros, do mesmo modo que os que possuem mais;
4. Um globo de enxofre, empregado em vez de vidro na máquina elétrica, carrega-se de eletricidade negativa;
5. Um recipiente metálico isolado não consegue reter eletricidade em sua parte interna;
6. Um corpo que possui apenas a quantidade média de “fogo elétrico” pode receber uma centelha de um corpo carregado positivamente e emitir outra centelha para um corpo carregado negativamente;
7. O “fogo elétrico” coincide com o relâmpago;
8. Um ou mais corpos devem ganhar “fogo elétrico” de corpos que perdem-no.

Observe-se que esta última afirmação é hoje conhecida como a **lei de conservação da carga elétrica**:

**A soma líquida das cargas elétricas dentro de uma determinada região é constante.**

Registre-se que, para Franklin, o “fogo elétrico” era considerado como:

**Um elemento difundido no meio da matéria e que podia ser atraído por outra matéria, particularmente pela água e metais.**

Ainda com relação às experiências com a **garrafa de Leiden**, Franklin explicou o seu funcionamento mostrando que a mesma se carregava internamente com “fogo elétrico” positivo e, externamente, com “fogo elétrico” negativo, nas mesmas quantidades, e que não havia passagem desse “fogo” através da parede de vidro da garrafa. Essas experiências foram reunidas por Franklin, no livro intitulado *Experimentos e Observações sobre a Eletricidade, realizados em Filadélfia na América*,<sup>8</sup> publicado em 1751.

A idéia dos dois fluidos elétricos proposta por Du Fay, em 1733, foi confirmada por experiências realizadas pelo físico inglês Robert Symmer (c.1707-1763), em 1759. Nessas experiências, Symmer observou que pares de meias de seda, de mulher, um branco e um preto, depois de serem vestidas em uma mesma perna e posteriormente retiradas, eram fortemente atraídas quando separadas a uma certa distância. Concluiu, então, que todo corpo neutro tinha uma quantidade igual de cada um de dois fluidos elétricos de sinais opostos. Portanto,

um corpo eletrizado teria excesso de um deles sobre o outro. Contudo, essa concepção de Symmer diferia da de Du Fay, já que para este, as duas eletricidades (“vítrea” e “resinosa”) apresentavam o mesmo sinal.

A natureza da força elétrica entre os “fluidos elétricos” começou a ser estudada pelo químico inglês Joseph Priestley (1733-1804) no livro intitulado *A História e a Situação Atual da Eletricidade*, publicado em 1767. Nesse livro, ele apresentou a hipótese de que aquela força elétrica varia com o inverso do quadrado da distância, de maneira semelhante à força de gravitação.<sup>9</sup>

Logo depois, em 1769, o físico escocês John Robison (1739-1805) realizou experiências para testar a lei do quadrado do inverso da distância da força elétrica ( $F \propto \frac{1}{r^2 \pm q}$ ), sugerida por Priestley. Assim, usando um eletrômetro (que havia projetado e construído), Robison encontrou  $q = 0,06$ , para o caso da força elétrica ser repulsiva; no caso dessa força ser atrativa, encontrou a potência de  $r$  (na fórmula acima), ligeiramente menor do que 2. Essa lei de Priestley recebeu, em 1770, novas comprovações experimentais por parte dos físicos, o inglês Henry Cavendish (1731-1810),<sup>10</sup> e o suíço Daniel Bernoulli (1700-1782). Por outro lado, em 1773, Cavendish realizou experiências na qual mediu o potencial entre duas esferas condutoras concêntricas e isoladas uma da outra. Nessas experiências, ao supor que a força elétrica entre elas fosse do tipo  $F \propto \frac{1}{r^2 \pm q}$ , Cavendish encontrou  $q = \frac{1}{50}$ .

A questão do tipo de lei que rege as forças elétricas foi, também, objeto de estudo por parte do físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806), em trabalho publicado em 1785,<sup>11</sup> no qual registrou o resultado de suas experiências sobre aquelas forças. Assim, usando uma balança de torção (construída por ele, em 1784), Coulomb demonstrou que:<sup>12</sup>

**A força de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas é diretamente proporcional ao produto de suas quantidades de cargas elétricas, inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa seus centros, e se situa na mesma direção da reta que une seus centros.**

Ainda como resultado dessas experiências, Coulomb observou que a carga elétrica se situa na superfície externa de um condutor e que sua distribuição estática depende de sua curvatura; e mais ainda, que o ar não era um isolante ideal.<sup>13</sup>

A partir de 1785, o médico holandês Martin (Martinus) van Marum (1750-1837) realizou experiências com as **garrafas de Leiden**, nas quais procurou confirmar a teoria de Franklin sobre a existência de um único fluido elétrico. Essas experiências, nas quais van Marum concluiu pela existência desse do fluido frankliano, foram registradas em uma obra composta de três volumes, e concluída em 1795.<sup>14</sup>

Até aqui, vimos a ação estática da carga elétrica. Agora, vejamos o seu efeito dinâmico, que ficou conhecido como a **corrente elétrica**. Em 1786, o fisiologista italiano Luigi Galvani (1737-1798) observou que os músculos dissecados dos membros inferiores das rãs, pendurados em ganchos de cobre, retesavam-se quando ficavam em contacto com outro metal (o ferro, por exemplo), como se estivesse sob a ação de uma descarga elétrica. Em vista disso, atribuiu esse efeito à **eletricidade animal**. A partir daí, continuou investigando esse fenômeno, e o resultado dessas investigações foi apresentado em um livro publicado em

1791.<sup>15</sup>

Essa experiência de Galvani foi repetida pelo físico italiano Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), em 1794. Porém, ao usar apenas metais, observou que a corrente elétrica que supostamente provocara a contração dos músculos das pernas das rãs aparecia quando dois metais, soldados um no outro, eram mergulhados em uma solução de sal e água. A esse fenômeno, puramente inorgânico, Volta chamou de **galvanismo**. Prosseguindo com esse tipo de experiência, Volta idealizou uma série de recipientes contendo salmoura, nos quais mergulhou placas de zinco e cobre e, ao ligá-los através de arcos metálicos, conseguiu produzir uma corrente elétrica contínua. Assim, em março de 1800, Volta comunicou à *Royal Society of London* o resultado dessas experiências relacionadas à descoberta da **pilha** ou **bateria elétrica**, conhecida como **coluna de Volta**, e que von Marum deu o nome de **pilha voltaica**.<sup>16</sup>

Ainda em 1800, o químico inglês William Nicholson (1753-1815) e o fisiologista inglês Anthony Carlisle (1768-1840) construíram uma pilha voltaica e, ao fazerem passar a corrente elétrica gerada pela mesma em um recipiente contendo água, observaram o desprendimento de gases de hidrogênio e de oxigênio e, com isso, realizaram a primeira **experiência eletroquímica**.

A ação química da corrente elétrica evidenciada pela experiência de Nicholson e Carlisle acima referida, constitui-se no processo básico usado pelos cientistas para a produção de elementos químicos. Assim, em 1803, o químico e físico inglês William Hyde Wollaston (1766-1828) - o primeiro a demonstrar a origem elétrica da corrente produzida nas baterias - isolou o elemento químico **paládio (Pd)** e, logo depois, em 1804, isolou o **ródio (Rh)**. Por sua vez, em 1807, o químico inglês Sir Humphry Davy (1778-1829) isolou o **potássio (K)** e **sódio (Na)**, em 1808, isolou o **bário (Ba)**, o **estrôncio (Sr)**, o **cálcio (Ca)**, e o **magnésio (Mg)** e, em 1809, isolou os metais alcalinos-terrosos.

Além da ação química da corrente elétrica observada pelos cientistas do começo do Século XIX, eles procuraram, também, se a mesma apresentava uma ação magnética. Logo em 1802, o jurista italiano Gian Domenico Romagnosi (1761-1835) realizou uma experiência na qual observou uma relação entre o “fluido galvânico” e o magnetismo. Logo depois, em 1805, os franceses, o químico Charles Bernard Desormes (1777-1862) e o físico Jean Nicolas Hachette (1769-1834) realizando experiências distintas, tentaram, sem êxito, verificar se uma pilha voltaica, isolada e suspensa livremente, seria orientada pelo magnetismo terrestre, como acontece com uma bússola. Porém, foi o físico dinamarquês Hans Christiaan Oersted (1777-1851) quem conseguiu os primeiros resultados positivos sobre o fenômeno do **eletromagnetismo**. Vejamos como.

No inverno europeu de 1819-1820, Oersted ministrou na Universidade de Copenhague, um curso sobre *Eletricidade, Galvanismo e Magnetismo*. Durante esse curso, Oersted realizou uma série de experiências. Por exemplo, na realizada no dia 15 de fevereiro de 1820, Oersted procurou encontrar uma relação entre eletricidade e magnetismo, examinando o que acontecia com uma agulha magnética ao ser colocada perpendicularmente ao fio condutor do circuito galvânico utilizado. No entanto, não registrou nenhum movimento perceptível da agulha. Porém, ao término de uma aula noturna daquele curso, no começo de abril de 1820,

ocorreu-lhe a idéia de colocar o fio condutor paralelamente à direção da agulha; aí, então, percebeu uma razoável deflexão dessa agulha, e a procurada relação entre o magnetismo e o galvanismo estava então descoberta. Esse fato foi relatado ao físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), em carta escrita por Hansteen, então assistente de Oersted. Em julho de 1820, Oersted comunicou à Academia Francesa de Ciências, os resultados dessas experiências e de outras,<sup>17</sup> e que foram reunidos em um livro, publicado ainda em 1820.<sup>18</sup>

Os efeitos magnéticos da corrente elétrica que haviam sido descobertos por Oersted, foram estudados em França pelos físicos franceses Dominique François Jean Arago (1786-1853) e André Marie Ampère (1775-1836). Arago,<sup>19</sup> por exemplo, realizou experiências, que foram comunicados à Academia Francesa de Ciências, nos dias 4, 11 e 25 de setembro de 1820, nas quais constatou que um fio de cobre, no qual circulava uma corrente galvânica (voltaica), atuava como um ímã, já que era capaz de atrair limalhas de ferro não imantadas. Além disso, notou que esse mesmo tipo de corrente podia imantar uma agulha de aço, bem como amortecer as oscilações de uma agulha imantada quando esta se situava sob um fio de cobre no qual circulava uma corrente galvânica.

Por seu lado, em suas experiências, Ampère percebeu a distinção clara entre **tensão elétrica**, responsável por efeitos eletrostáticos, e **corrente elétrica**, responsável pelos efeitos magnéticos observados por Oersted. Além disso, dessas experiências, Ampère obteve importantes resultados, tais como:

1. **A existência da força entre fios condutores paralelos, que é atrativa se os mesmos conduzem correntes no mesmo sentido, e repulsiva, se forem de sentidos contrários;**
2. **O comportamento de uma bobina circular de fio metálico como se fosse um ímã comum, sempre que por ela circulasse uma corrente elétrica;**
3. **O comportamento de um fio enrolado na forma de espiral como se fosse uma barra imantada, ao qual deu o nome de *solenóide*.**

O resultado dessas experiências foi comunicado à Academia Francesa de Ciências, nos dias 18 e 25 de setembro de 1820. Ampère continuou realizando novas experiências com circuitos elétricos e o resultado dessas experiências foram reunidas em um livro publicado em 1827.<sup>20</sup>

Ainda em 1820, porém no dia 30 de outubro, os físicos franceses Jean Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841) comunicaram à Academia Francesa de Ciências a descoberta experimental que fizeram sobre a lei que permite calcular a intensidade do campo magnético criado por uma corrente elétrica que circula em um fio condutor. Segundo Biot e Savart, a ação experimentada por um pólo magnético ('austral' ou 'boreal') quando colocado a uma certa distância de um fio no qual circula uma corrente voltaica, pode ser expressa da seguinte maneira:

**Desenhe a partir do pólo considerado uma perpendicular ao fio; a força sobre esse pólo é perpendicular a esta linha e ao fio, e sua intensidade é proporcional ao inverso da distância.**

Esse resultado, mais tarde conhecido como **lei de Biot-Savart**,<sup>21</sup> foi logo analisado, sendo então verificado que a força sobre o pólo magnético podia ser considerada como dividida em constituintes, cada um dos quais foi considerado ser devido a um particular elemento de corrente no qual circula a corrente  $I$ . Na atual linguagem, essa força elementar (ou o campo magnético  $\vec{H}$ ) é calculada pela expressão:

$$d\vec{F} = CI \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3},$$

onde a constante  $C$  depende do sistema de unidades escolhido, e  $\vec{r}$  é a distância do elemento de corrente  $d\vec{s}$  ao ponto onde é calculada a força elementar.

Os “circuitos galvânicos” também foram objeto de estudo por parte do físico alemão Georg Simon Ohm (1787-1854) em uma série de experiências realizadas a partir de janeiro de 1825, e cujos resultados foram reunidos em um livro publicado em 1827.<sup>22</sup> Nesse livro, Ohm apresentou a hoje conhecida **lei de Ohm**:

**A diferença de potencial (V) entre as extremidades de qualquer parte de um circuito é igual ao produto da intensidade da corrente elétrica (I) e da resistência (R) daquela parte do circuito:  $V = IR$ .**

Ainda nesse livro e como conseqüência de suas experiências, Ohm afirmou que a resistência  $R$  de um fio condutor dependia diretamente de seu comprimento  $L$  e do tipo de material, traduzido por sua resistividade  $\rho$ , inversamente de seu diâmetro  $D$ , isto é:

$$R = \rho \frac{L}{D}.$$

Conforme vimos até aqui, as experiências de Oersted, Arago e Ampère mostravam que as correntes elétricas produziam efeitos magnéticos. Será que fenômenos inversos não poderiam acontecer? Ou seja, será que o magnetismo não poderia produzir correntes elétricas? Uma resposta afirmativa a essa pergunta foi dada por Faraday, em 1831,<sup>23</sup> ao realizar uma experiência na qual mostrou que uma corrente elétrica aparecia em um fio condutor, quando um ímã se deslocava em sua proximidade. Observou mais ainda que uma corrente elétrica variável, passando por uma bobina, provocava o aparecimento de uma corrente transitória em uma bobina colocada nas imediações da primeira. A esse fenômeno Faraday deu o nome de **indução eletromagnética**.<sup>24</sup> Logo depois, em 1832, Henry descobriu o fenômeno de **auto-indução**, isto é, uma corrente elétrica variável em uma bobina pode criar uma corrente em si mesma. Esse fenômeno foi confirmado por Faraday, em 1834.

O fenômeno da indução eletromagnética também foi estudado pelo físico germano-russo Heinrich Friedrich Emil (Emil Khristianovich) Lenz (1804-1865), numa série de experiências realizadas a partir de 1831. Mais tarde, em 29 de novembro de 1833, ele comunicou à Academia de Ciências de São Petersburgo um resultado interessante que havia observado naquelas experiências, qual seja, o de que a corrente de auto-indução (observada por Henry, em 1832) tem sentido contrário àquela que a criou, ou seja, que os efeitos de uma corrente induzida por forças eletromagnéticas sempre se opõem a essas mesmas forças. Esse resultado é hoje conhecido como a **lei de Lenz**.<sup>25</sup>

Ainda na década de 1830, Faraday realizou outras experiências nas quais obteve resultados importantes. Assim, em 1833, ao estudar a passagem de uma corrente elétrica através de soluções de nitrato de prata, sulfeto de cobre e cloreto de alumínio, Faraday observou que os metais de tais soluções se depositavam nas barras metálicas colocadas nas mesmas.<sup>26</sup> A esse novo efeito, Faraday deu o nome de **eletrólise** e, ainda em 1833, enunciou suas leis:

**1. A massa da quantidade de metal depositada nas barras metálicas e a quantidade de eletricidade que passa por cada solução, são proporcionais;**

**2. A massa de uma substância liberada por uma certa quantidade de eletricidade é proporcional ao peso atômico do elemento liberado e inversamente proporcional à sua valência.**

Ainda nesse mesmo ano de 1833, Faraday foi um dos primeiros a fazer experiências sobre descarga elétrica nos gases rarefeitos, nas quais observou que:

**A rarefação do ar favorece extremamente fenômenos de incandescência.**

Mais tarde, em 1838, Faraday observou a figura formada por limalhas de ferro numa folha de papel ou lâmina de vidro, sob a qual colocava um ímã (figura que havia sido observada por Petrus Peregrinus, em 1269).<sup>27</sup> Para explicar essa figura, Faraday passou a visualizar as forças magnéticas e elétricas como uma espécie de “tubos de borracha” que se estendiam a partir dos fios condutores, ou de ímãs, ou de corpos eletrizados, tubos esses que receberam dele a denominação de **linhas de força**, cujas primeiras idéias sobre as mesmas ele as havia tido em 1821. No caso das forças magnéticas, a visualização dessas linhas poderia ser feita através das limalhas de ferro, porém, no caso das forças elétricas, a visualização era mais difícil de ser realizada experimentalmente. Para Faraday, essa visualização seria através da “polarização elétrica” do meio. Como essas linhas deveriam encher completamente o espaço, este, segundo Faraday, passava a constituir-se um **campo de forças**. Assim, segundo essa idéia de linhas e de campos, Faraday explicou o aparecimento de uma corrente elétrica induzida toda a vez que um tubo de força magnética cortava um fio condutor e, inversamente, que o movimento de tubos de força elétrica fazia aparecer **campos magnéticos**. (Esse termo só recebeu essa denominação, por parte de Faraday, em 1845.) Desse modo, Faraday completou a grande síntese matemática newtoniana, substituindo a **ação à distância** pela **ação de campo**.

As **linhas de força faradayanas** foram tratadas, matematicamente, pelos físicos escoceses William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), em 1845 e 1851, e James Clerk Maxwell (1831-1879), em 1855. O trabalho de Maxwell é dividido em duas partes. Na primeira delas, estudou a analogia entre as linhas de força e as linhas de fluxo em um fluido incompressível, fazendo uma extensão do trabalho de Kelvin, de 1851. Na segunda parte, Maxwell estudou o eletromagnetismo propriamente dito, desenvolvendo a partir daí a teoria matemática dos fenômenos eletromagnéticos, resumida nas hoje célebres **equações de Maxwell**:

**Primeira Equação:**  $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ ; (Lei de Coulomb (1785))

**Segunda Equação de Maxwell:**  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ; (Ausência de monopólo magnético)

**Terceira Equação de Maxwell:**  $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ; (Lei de Faraday-Henry (1831))

**Quarta Equação de Maxwell:**  $\nabla \times \vec{B} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ , (Lei de Ampère (1820) - Maxwell (1873))

onde  $\vec{E}$  é o campo elétrico,  $\vec{B}$  é o campo de indução magnética,  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente elétrica,  $\rho$  é a densidade de carga elétrica, e  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  são, respectivamente, as permissividades elétrica e magnética do vácuo. O trabalho de Maxwell sobre a teoria eletromagnética foi apresentado em um célebre livro publicado em 1873.<sup>28</sup>

As leis experimentais envolvendo os fenômenos eletromagnéticos, não indicavam se existia uma estrutura elementar que fosse responsável por esses fenômenos. A evidência para uma tal estrutura começaram a acontecer com o estudo da **descarga elétrica nos gases**. Para esse estudo, foi necessário o desenvolvimento da técnica de rarefação através das bombas de vácuo.<sup>29</sup>

Quase dois séculos depois da construção das primeiras incipientes bombas de vácuo, o físico alemão (Johann) Heinrich (Wilhelm) Geissler (1814-1879) inventou, em 1855, uma bomba de vácuo sem partes móveis. Com efeito, movendo uma coluna de mercúrio para cima e para baixo, o vácuo acima da coluna poderia ser usado para aspirar o ar de dentro de um recipiente, pouco a pouco, até que o vácuo obtido no mesmo se aproximasse do vácuo existente sobre a coluna de mercúrio. Com essa bomba, Geissler construiu tubos rarefeitos. Um seu colaborador, o físico alemão Julius Plücker (1801-1868), em 1858, utilizou um **tubo de Geissler** (nome cunhado por ele próprio) para realizar experiências sobre descarga elétrica. Desse modo, observou que “raios” originários do **catodo** eram desviados quando em presença de um campo magnético.

Mais tarde, em 1869, o químico e físico alemão Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914) realizou experiências com tubos de vácuo mais rarefeitos (mais tarde conhecidos como **tubos de Hittorf**), nas quais observou a sombra projetada de um objeto colocado em frente ao catodo desse dispositivo. Com esse resultado, ele confirmou a observação feita por seu mestre Plücker, em 1858, de que o catodo emitia “raios” que, segundo mostrou o físico inglês Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883), em 1871, pareciam ser carregados negativamente.

Novos tubos rarefeitos, desta vez mais aprimorados, foram construídos pelo físico inglês William Crookes (1832-1919), em 1875. Esses tubos, que ficaram conhecidos como **ovos elétricos** ou **ampolas de Crookes**, apresentavam uma pressão interna de 75.000 vezes menor do que a obtida em um tubo de Geissler (1855). Logo em 1876, o físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931) denominou de **raios catódicos (Kathodenstrahlen)** às emanações provindas do catodo desses tubos. Esses “raios” foram denominados por Crookes, em 1879, de **matéria radiante**.

Muito embora as leis da eletrólise de Faraday, enunciadas em 1833, revelassem uma estrutura atômica da eletricidade, esta só teve uma evidência maior com a **teoria iônica** desenvolvida pelo químico e físico sueco Svante August Arrhenius (1859-1927; PNQ, 1903), em sua tese de doutoramento defendida na Universidade de Uppsala, em maio de 1884.<sup>30</sup> Nessa tese, é apresentada a hipótese de que os **eletrólitos** (de **lytos**, palavra grega que significa “próprio para dissolução”) são constituídos de partículas carregadas de eletricidade, os conhecidos **íons** (palavra grega que significa **errante** e que foi cunhada por Helmholtz). Com isso, Arrhenius explicou a dissociação eletrolítica. Assim, por exemplo, a dissolução do cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) na água por efeito da eletrólise, decorria de seu fracionamento em dois átomos carregados de eletricidade: o íon de cloro com carga negativa (o **anion**  $\text{Cl}^-$ ) e o íon de sódio com carga positiva (o **cation**  $\text{Na}^+$ ).<sup>31</sup>

A teoria iônica de Arrhenius serviu de modelo para que o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) formulasse, em 1888, a hipótese de que a condução elétrica nos metais era semelhante à condução de íons nos eletrólitos. No entanto, advertiu que enquanto nos eletrodos os portadores de carga eram constituídos de sais, que se dispersavam na massa inerte do solvente, nos metais a corrente elétrica era composta de uma série de descargas intermitentes, causada pelo rearranjo dos constituintes moleculares. Mais tarde, em 1891,<sup>32</sup> o físico irlandês George Johnstone Stoney (1826-1911) propôs chamar de **elétron** à unidade de eletricidade ganha ou perdida por um átomo ao se transformar em um íon.

A partir de 1892, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) começou a desenvolver uma **teoria dos elétrons** tendo como fundamento teórico o eletromagnetismo maxwelliano (1873). 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 (positiva ou negativa) possui uma estrutura corpuscular - os “elétrons” -, 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 ( $\vec{F}$ ) 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  $\vec{v}$  é a velocidade de um ponto qualquer da matéria dotada de carga elétrica.

Com o modelo exposto acima, Lorentz concluiu que são as oscilações dos “elétrons” constituintes dos corpos ponderáveis, as responsáveis pela emissão do espectro luminoso de alguns deles. É mais ainda, que se tais corpos fossem colocados em uma região contendo um campo magnético, as oscilações “eletrônicas” devem sofrer alterações, provocando modificação no espectro luminoso, de tal modo que cada linha espectral emitida na ausência do campo magnético seria decomposta em três por interferência desse referido campo.<sup>33</sup>

A natureza dos “raios catódicos” continuou a ser objeto de pesquisa por parte dos cientistas. Com efeito, em 1892, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) realizou experiências com os mesmos raios catódicos nas quais e concluiu que tais “raios” não eram constituídos de matéria e, portanto, só poderiam ser ondas. Essa opinião foi corroborada por Goldstein, contra a opinião de Crookes, que continuava a admitir o caráter corpuscular desses “raios”. Por sua vez, em 1895, o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926) mostrou que os raios catódicos eram partículas carregadas negativamente.

Por fim, em 1897,<sup>34</sup> Joseph John Thomson realizou uma experiência na qual demonstrou que os raios catódicos são compostos de “carregadores de eletricidade negativa” aos quais denominou de **corpúsculos**.<sup>35</sup> Nessa experiência, estudou o desvio sofrido por um feixe de raios catódicos ao atravessar uma região onde existia um campo elétrico (E) produzido por um condensador, e um campo magnético (H) produzido por um ímã, campos esses ortogonais entre si.<sup>36</sup> Com isso, Thomson determinou a relação entre a carga (**e**) e a massa (**m**) do “carregador de eletricidade negativa”, em função desses campos, encontrando um valor médio de  $1,3 \times 10^{-11} \frac{kg}{C(coulomb)}$ .<sup>37</sup>

Na conclusão deste artigo, é interessante dizer que, em 1900, Thomson formulou pela primeira vez a hipótese de que as cargas vítrea (+) e resinosa (-) representavam diferentes papéis no processo da condução elétrica. Assim, a carga resinosa era constituída de raios catódicos (“carregadores de eletricidade negativa”) e podiam se mover livremente entre os átomos do metal. Por outro lado, a carga vítrea permanecia mais ou menos fixa nos átomos metálicos.

## NOTAS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Neste artigo, basicamente, usamos os seguintes textos:

- BASSALO, J. M. F. 1996. *Nascimentos da Física*, EDUFPA.
- BROWN, L. M., PAIS, A. and PIPPARD, Sir B. (Editors) 1995. *Twentieth Century Physics*, Volumes I, II, III, American Institute of Physics Press.
- CARUSO, F. e SANTORO, A. (Editores) 1994. *Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais*, Associação Internacional dos Amigos da Física Experimental de Altas Energias (AIAFEX).
- CARUSO, F. e OGURI, V. “A eterna busca do indivisível: do átomo filosófico aos quarks e léptons”, (CBPF-CS-008/96), *Química Nova* **30** (3), pp. 324-334 (1997).

- GILLISPIE, C. C. (Editor) 1981. *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Scribner's Sons.
  - SANTOS, C. A. dos (Editor) 1997. *Da Revolução Científica à Revolução Tecnológica: Tópicos de História da Física Moderna*. Instituto de Física da UFRGS, Edição Preliminar.
  - THOMSON, J. J. 1906/1997. *Carregadores de Eletricidade Negativa*. CBPF-CS-007/97. (Tradução e Notas de Ildeu de Castro Moreira.)
  - WEINBERG, S. 1993. *The Discovery of Subatomic Particles*, Penguin Books.
2. Tales também fez observações sobre a propriedade da **magnetita (ímã natural)** de atrair pedaços de ferro. Essa magnetita era oriunda da Tessália, província grega, mais tarde denominada de Magnésia. Observe-se que a atração exercida pelo âmbar quando atritado, também foi registrada pelo filósofo grego Platão de Atenas (c.427-c.347), em seu *Timaeus*.
  3. BEDA, o Venerável 732. *Historia ecclesiastica gentis Anglorum*. (É oportuno registrar que nesse livro, Beda introduziu a notação **Anno Domini - A.D.**, para indicar a **Era Cristã**).
  4. GILBERT, W. 1600. *De magnete magnetisque corporibus, et de magno magnete telluro*.
  5. CABEO, N. 1629. *Philosophia magnetica in qua magnetis natura penitus explicatur, et omnium quae hoc lapide cernuntur, causae propriae afferentur*.
  6. HAUKSBEER, F. K. 1709. *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, Containing an Account of Several Surprising Phenomena Touching Light and Electricity*.
  7. 'sGRAVESANDE, W. J. 1720. *Physices elementa mathematica, experimentis confirmata. Sive, introductio ad philosophiam Newtonianam*.
  8. FRANKLIN, B. 1751. *Experiments and Observations on Electricity, made at Philadelphia in America*.
  9. Essa suposição decorreu do fato de Priestley haver observado que pedacinhos de cortiça colocados no interior de um recipiente metálico não sofriam nenhuma influência elétrica. Para Priestley, essa situação era análoga ao fato de que a força de gravitação no interior de uma superfície esférica era nula, devido à lei do quadrado do inverso da distância, conforme apreendera na edição inglesa (1729) do livro intitulado *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, escrito pelo físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727), em 1687.
  10. É interessante registrar que como ainda não existiam aparelhos para medir correntes elétricas (o **galvanômetro** só foi inventado no Século XIX), Cavendish usava seu próprio corpo, através de choques elétricos recebidos, para avaliar a intensidade das forças elétricas.
  11. COULOMB, C. A. 1785. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec les Mémoires de Mathématiques et de Physique*.

12. Usando essa lei, Coulomb encontrou que para o desvio de  $1^\circ$  da balança de torção, a força correspondente seria (na linguagem de hoje)  $\sim 10^{-11}$  newtons.
13. Em 1799, o físico e matemático francês Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827) publicou o primeiro volume de sua famosa obra *Mécanique Céleste*, na qual afirmou que:

**Se não há cargas no interior de um condutor esférico, a lei da força elétrica deve ser a do inverso do quadrado da distância.**

14. MARUN, M. 1785, 1787, 1795. *Verhandelingen uitgeven door Teyler's tweede Genootschap*, Volumes 1, 2, 3.
15. GALVANI, L. 1791. *De Viribus Electricitatis in Musculari Commentarius*.
16. Em 1801, Volta demonstrou em Paris, para o general francês Napoleão Bonaparte (1769-1821), Imperador da França, o funcionamento da **pilha** ou **bateria elétrica** que havia inventado em 1800. Em consequência dessa demonstração, Napoleão o fez Conde e Senador do reino da Lombardia.
17. Nessas experiências, Oersted observou que a lei de ação e reação newtoniana permanecia válida para explicar a força entre o fio condutor e o ímã.
18. OERSTED, H. C. 1820. *Experimenta circa effectum Conflictus Electrici in Acum Magneticam*.
19. Arago teve conhecimento das experiências realizadas por Oersted quando se encontrava em Genebra, e lá, presenciou experiências análogas realizadas pelos físicos suíços Marc Auguste Pictet (1752-1825) e Auguste de la Rive (1801-1873).
20. AMPÈRE, A. M. 1827. *Théorie Mathématique des Phénomènes Electrodynamiques Uniquement Dédruit de l'Expérience*. É oportuno assinalar que Ampère denominou de **eletrostática** e **eletrodinâmica**, respectivamente, ao estudo das cargas elétricas em repouso e em movimento.
21. BIOT, J. B. et SAVART, F. 1820. *Annales de Chimie et de Physique* 15.
22. OHM, G. S. 1827. *Die Galvanische Kette Mathematisch Bearbeitet*.
23. Foi a partir de 1831, que Faraday começou a escrever seu famoso livro intitulado *Experimental Researches in Electricity* no qual registrou os resultados das experiências que havia realizado até então. Note-se que Faraday levou 23 anos até considerar concluído esse livro.
24. Registre-se que em 1821, Ampère havia observado esse fenômeno sem, contudo, considerá-lo. O mesmo acontecera com o físico norte-americano Joseph Henry (1797-1878), em agosto de 1830.

25. LENZ, E. W. 1833. *Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de Saint-Petersbourg* 2. É oportuno observar que entre 1845 e 1847, o físico alemão Franz Ernst Neumann (1798-1895) trabalhou na formulação matemática da lei da indução eletromagnética. Nesse trabalho, Neumann demonstrou que a **força eletromotriz induzida**  $\epsilon$  em um dado circuito, é igual à variação temporal do fluxo magnético  $\phi$  que o atravessa. Em linguagem atual, a **fórmula de Neumann** é dada por:

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt},$$

onde o sinal menos (–) decorre da **lei de Lenz**.

26. Observe-se que as barras metálicas utilizadas por Faraday foram mais tarde denominadas de **eletrodos: anodo (+) e catodo (–)** pelo filósofo inglês William Whewell (1794-1866), quem cunhou o termo **cientista**, em 1834.
27. PEREGRINUS, P. 1269. *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, Militem, De Magnete*.
28. MAXWELL, J. C. 1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism*.
29. As primeiras experiências relacionadas com a possibilidade de se obter vácuo, foram as realizadas pelos físicos, o italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), em 1643, o francês Blaise Pascal (1623-1662), em 1646, o alemão Otto von Guericke (1602-1686), em 1650, e o inglês Robert Boyle (1627-1691), em 1660.
30. ARRHENIUS, S. 1884. *Untersuchungen über die galvanische Leitfähigkeit der Elektrolyte*.
31. É curioso observar que, como a Banca de Examinadores da Universidade de Uppsala não aceitou essa hipótese revolucionária de Arrhenius, atribuiu-lhe, então, o grau mais baixo: **non sine laude approbatur**, o que lhe impossibilitou de ser Livre-Docente daquela Universidade.
32. STONEY, G. J. 1891. *Transactions of Royal Society, Dublin*, 4, 583.
33. Em 1896, o físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943; PNF, 1902), confirmou experimentalmente as previsões que seu professor Lorentz fizera em 1892, da ação do campo magnético sobre as linhas espectrais. Em sua experiência, Zeeman observou que a **linha D** do Na separava-se em três, quando uma amostra desse elemento químico era colocada na região de forte campo magnético. Este fenômeno, que ficou mundialmente conhecido como **efeito Zeeman normal**, foi confirmado por Zeeman, em 1897, ao observar que a linha de cádmio sob a ação de um campo magnético de 32.000 gauss, se apresentava como um dubleto ou como um tripleto, conforme fosse observada, respectivamente, paralela ou transversalmente ao campo magnético. Nesse mesmo ano de 1897, Lorentz e, independentemente, o físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942) explicaram o **efeito Zeeman normal** (1896).
34. THOMSON, J. J. 1897. *The Philosophical Magazine* 44, 295.

35. É oportuno destacar que o físico alemão Philipp von Lenard (1862-1947; PNF, 1905) chamava esses “carregadores” de **quanta elementares de eletricidade** e que o termo **elétron**, que havia sido adotado por Lorentz, em 1892, só se tornou de uso geral após 1910.
36. Observe-se que meses antes de Thomson, o geofísico alemão Emil Johann Wiechert (1861-1928) realizou uma experiência análoga a essa de Thomson.
37. O valor atual para essa relação é de  $0,56857 \times 10^{-11} \frac{kg}{C}$ .