

O descobrimento do elétron ou Elétron, o destronador do átomo

Valdir Aguilera

Baseado em palestra dada na Universidade de Londrina em 2006

Agosto 2010

1 Introdução

Em 1997 comemorou-se o centésimo aniversário do descobrimento do elétron. Em quase todos os centros de pesquisa do planeta apresentaram-se palestras, conferências, seminários, enfim, toda classe de evento para festejar aquela descoberta. Nossa contribuição a esse evento é este pequeno trabalho.

“Por que dois títulos?” o leitor pode estar se perguntando. É preciso justificar. Por um lado, trata-se de comemorar a descoberta do elétron, por outro, devemos comemorar, igualmente ou até com mais regozijo, a consequente queda do império do átomo como entidade indivisível. Este reinou ditatorialmente sobre o pensamento científico e filosófico durante milênios. Esse reinado longamente incontestado foi responsável pelo nosso atraso na compreensão mais detalhada da estrutura da matéria. Como veremos, o conceito de *átomo* (como elemento último da matéria, sem estrutura portanto) teve um domínio tão forte sobre a Ciência e a Filosofia que muitos cientistas de calibre não ousaram contestá-lo. Foram necessárias a coragem de um Joseph John Thomson para terminar com aquele domínio, e um elétron para destronar o átomo, libertando de seus grilhões cientistas (e filósofos) para se atreverem em direções mais promissoras para o progresso do conhecimento humano.

Esse progresso levou a importantes conquistas tanto científicas como tecnológicas. Quem ainda não ouviu alguma frase parecida com esta *o progresso científico e tecnológico dos últimos cem anos foi maior do que o havido em toda a história da humanidade* ? É inegável que esse progresso nos trouxe mais conhecimentos, mais conforto, mais segurança. Encontrou-se a cura para muitas enfermidades, outras foram erradicadas, aumentando, assim, a vida média dos seres. Infelizmente, por outro lado, trouxe, também, o desemprego e a destruição. A humanidade, hoje, dispõe de poderes para destruir o planeta!

Em consequência desse quadro, geraram-se duas posturas opostas frente à Ciência, produzindo dois sentimentos diferentes: um otimismo ingênuo e um pessimismo insensato. Ingênuo otimismo porque alimenta a esperança de que na Ciência encontra-se a panacéia para todos os males, conhecidos ou desconhecidos. Insensato pessimismo porque atribui à Ciência a causa de males conhecidos. Afinal, não foi a Ciência que proveu o ser humano com recursos para construir bombas dizimadoras e máquinas que roubam o trabalho humano?

É evidente que ambas essas posturas esquecem-se de examinar a questão com mais amplitude e menos paixão. Entretanto, não é objeto deste trabalho examinar as causas e conseqüências desses dois sentimentos conflitantes, mesmo porque o autor não é psicólogo, sociólogo e muito menos psiquiatra.

Vamos, portanto, deter-nos no tema mais tranquilo do desenvolvimento dos trabalhos que levaram ao descobrimento do elétron. Veremos, *en passant*, em muitos episódios aqui relatados, que a História sempre tem lições para nos dar, e que insistimos em continuar a não querer aprender.

2 A saga do átomo

Podemos dizer que o conceito do átomo nasceu, na Grécia, há aproximadamente 2500 anos. Os seus atributos foram objetos de especulação de muitos filósofos e cientistas que não pouparam imaginação para descrevê-los. Parte dessa história será contada, abreviadamente, nesta Seção.

Sec. 5 a. C. - Demócrito (460-361 a. C.)

É atribuída a Demócrito a teoria de que toda substância é constituída por partículas indivisíveis. Daí o nome de *átomo* dado por ele a essas partículas. Ainda de acordo com Demócrito, os átomos são partículas rígidas e perenes. São sua forma e seu tamanho que determinam as qualidades das diversas substâncias. É curioso notar, como um parênteses, que Demócrito criou, também, uma teoria atômica da alma. Esta seria formada por partículas esféricas e extremamente leves.

Sec. 5 a. C. - Empédocles (490-430 a. C.)

De acordo com Empédocles, os átomos se agrupam em quatro classes que chamou de *fogo, terra, água e ar*. É claro que esses nomes não devem ser levados ao pé da letra. Não significam que, para aquele filósofo, há átomos feitos de terra, outros de água, etc. (Parece ridículo fazer esta ressalva, entretanto, o autor já encontrou muita gente que assim pensava!) De acordo com as propriedades de uma substância, haveria predominância de um *tipo* de átomo sobre os outros. É uma diversificação que não havia sido contemplada por Demócrito.

Sec. 4 a. C. - Aristóteles (384-322 a. C.)

Esse notável pensador adotou o modelo de Empédocles e o expandiu acrescentando propriedades aos diversos tipos de átomos. Essas propriedades, ou qualidades, são *quente, frio, seco e úmido*. Afirmava Aristóteles que cada tipo de átomo é dotado de duas dessas qualidades. Um átomo tipo fogo seria quente e seco, por exemplo. A figura mostra como aquelas qualidades são compartilhadas pelos diferentes tipos de átomos.

O prestígio, aliás respeitável e merecido, de Aristóteles “cegou” os cientistas durante quase dois mil anos! Os átomos, como afirma seu próprio nome, *são indivisíveis*, lembrava Aristóteles assinando embaixo. Como duvidar de tão admirável pensador? Até mesmo o grande filósofo

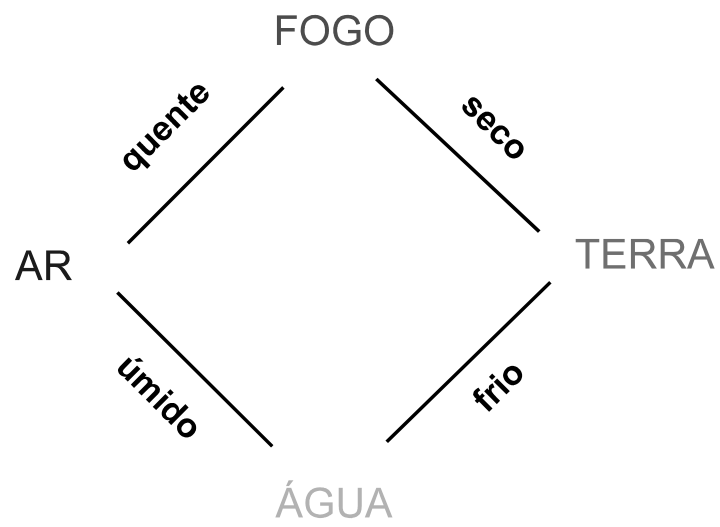


Figure 1: As qualidades dos tipos de átomos, de acordo com Aristóteles

René Descartes (1596-1650), ainda peripatético, afirmava que Deus fez os átomos tão pequenos que não havia poder humano que os pudesse dividir, embora, ele ressalva, não se tenha privado da habilidade de fazê-lo. Ele mesmo, se assim o quisesse. A História tem nos mostrado em inúmeras ocasiões que não devemos curvar-nos cegamente diante das posições assumidas por outros, mesmo que esses estejam cercados do maior prestígio. Não consigo resistir à tentação de lembrar aqui um acontecimento que envolveu o renomado cientista Lavoisier. Quando lhe mostraram alguns meteoritos, tidos como objetos espaciais, ele apontou para o céu e perguntou:

— Vocês estão vendo alguma pedra lá? Nenhuma, não é verdade? Como, então, são tão estúpidos a ponto de acreditar nessa baboseira?

A fama de Lavoisier era tanta que os museus da Europa que exibiam alguns meteoritos trataram de recolhê-los imediatamente. A humanidade ainda vivia os dias do *magister dixit*, dos *gurus*. (Será que não vive ainda?)

Sec. 4 a. C. - Epicurus (341-270 a. C.)

Epicurus afirmava que os átomos, embora não possam ser divididos em partes menores por nenhum meio físico, são dotados de estrutura. Que estrutura seria essa, não pôde aclarar. Mas foi um avanço na concepção do átomo. A semente estava plantada, faltava germinar e dar frutos.

1808 - John Dalton (1776-1844)

Substâncias diferentes são formadas por átomos diferentes. A evolução ocorrida com esse modelo é que ele não assume átomos de quatro tipos apenas. Há uma grande variedade de átomos disponíveis na natureza.

1898 - Joseph John Thomson (1856-1940)

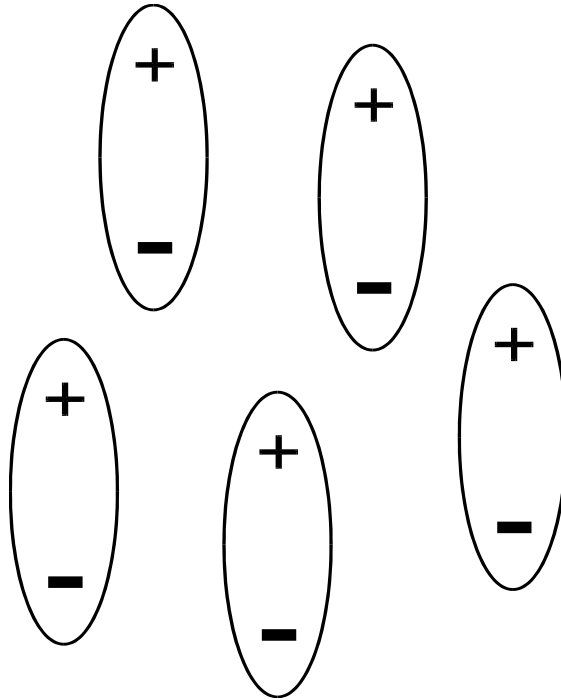
O elétron já era, então, conhecido. Acabava de ser descoberto, um ano antes, por esse notável cientista que também afirmou ser ele parte do

átomo. Destronado, o átomo já não imperava tão poderosamente sobre as mentes dos cientistas, embora a idéia do elétron de Thomson (ou J. J. como era tratado pelos seus colegas) tenha sido redicularizada nada mais nada menos do que pelo famoso Dmitri Mendeleiev (1834-1907). Isso mesmo, o criador da *Tabela Periódica dos Elementos*. Mendeleiev satirizou publicamente a hipótese do elétron. Entretanto, em sua famosa tabela, onde os elementos químicos estão distribuídos em casinhas numeradas pelo número atômico do elemento que a ocupa, ele reservava, sem constrangimento, o lugar 0 para o “éter”...

Em 1898, J. J. Thomson propõe o primeiro modelo para a estrutura dos átomos, que ficou sendo conhecido como *pudim de uvas passas*. De acordo com esse modelo, os elétrons seriam as uvas passas imersas num pudim de cargas positivas.

1903 - Philip Lenard (1862-1947)

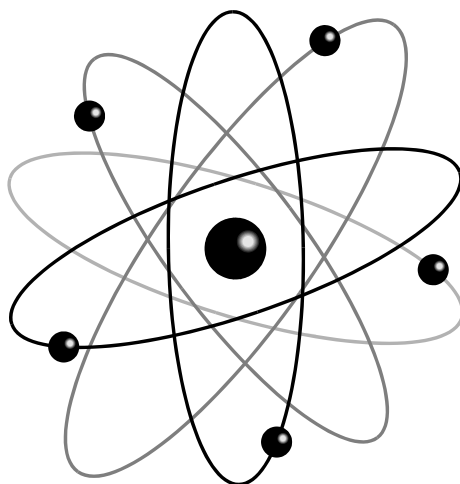
O modelo para descrever a estrutura dos átomos passa por um aperfeiçoamento. Como a matéria é ordinariamente eletricamente neutra, Lenard ponderou que as cargas negativas e positivas que compõem os átomos devem se anular mutuamente. Desta forma, propõe que o átomo seja formado por *pares* de cargas negativas e positivas distribuídas pelo seu interior, conforme ilustra a figura.



A estrutura atômica conforme Philip Lenard

1911 - Ernest Rutherford (1871-1937)

Inspirado pelos resultados de suas notáveis experiências com espalhamento de partículas alfas por átomos de ouro, Rutherford propõe que os elétrons circulam em torno de um núcleo pesado formado por cargas positivas. Esse modelo nos lembra os planetas orbitando ao redor do Sol e é, ainda, bastante popular entre os não especialistas.



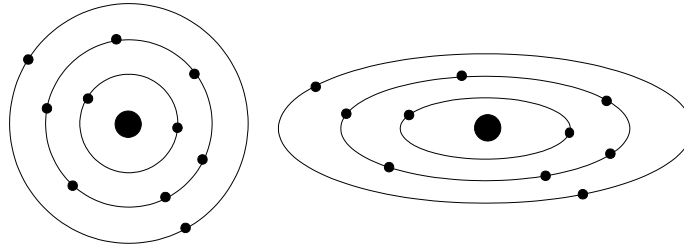
O modelo atômico de Rutherford

1913 - Niels Bohr (1885-1962)

Niels Bohr aprimorou o modelo de Rutherford para atender demandas experimentais e teóricas. Os elétrons não podem mover-se em qualquer órbita ao redor do núcleo. Eles devem estar em determinadas órbitas circulares, com raios bem estabelecidos.

1915 - Arnold Sommerfeld (1868-1951)

Sommerfeld trocou as órbitas circulares de Bohr por órbitas elípticas. Com esse procedimento, deu mais flexibilidade para os cálculos teóricos explicarem fenômenos atômicos observados. A figura mostra os modelos de Bohr e de Sommerfeld.



Os modelos atômicos de Bohr e de Sommerfeld

Hoje

Nos dias atuais, preferimos pensar que os átomos são constituídos por um núcleo de carga elétrica positiva mergulhado numa nuvem de elétrons. E basta de falar tanto em átomos. Vamos voltar ao personagem principal desta história: o elétron.

3 A saga do elétron

Houve uma época em que *eletricidade e magnetismo* eram coqueluches em quase todos os laboratórios do mundo. Para estudar esses fenômenos, muitos aparelhos foram idealizados, construídos e até mesmo emprestados diretamente da natureza. Não existia na época quem ainda não havia provocado um trimilique em pernas de pobres rãs dissecadas.

Um dentre aqueles aparelhos foi de vital importância para o descobrimento do elétron: o tubo, ou ampola de Crookes, onde eram produzidos os então misteriosos *raios catódicos*. Estes eram observados como raios que dispararam do catodo num tubo de Crookes. Até hoje conservamos o nome que era dado a esses tubos: os *CRT* da televisão e dos monitores de computadores. *CRT* é a sigla em Inglês para *cathod rays tube* (ou, aqui na terrinha, tubo de raios catódicos).

Os cientistas não se entendiam quanto à natureza desses raios catódicos. Para os alemães, por exemplo, eram meras vibrações do éter; para os ingleses, por outro lado, eram algum tipo de corpúsculo.

Para complicar a situação, essas duas hipóteses conflitantes recebiam forte apoio experimental. Mas, eram experiências mal conduzidas ou mal interpretadas.

Vamos, agora, ao desenvolvimento do romance do elétron.

Michael Faraday (1791-1867)

O primeiro passo na direção certa para a identificação do elétron foi dado pelo notável cientista Faraday. Com base em suas cuidadosas experiências, enunciou que a quantidade de eletricidade depositada no anodo por um *mol* de íons monovalentes é uma constante universal dada por $F = Ne$. Não disse, porém, que coisa seria aquele e .

George Johnstone Stoney (1826-1911)

Estimou, por primeira vez, um valor para a quantidade e que aparece na fórmula de Faraday. O valor encontrado por Stoney era cerca de 20 vezes menor do que o valor correto conhecido atualmente. Sua estimativa, entretanto, não era tão ruim assim, dadas as condições experimentais de sua época. Em 1891, batizou a quantidade fundamental de carga elétrica dando-lhe o nome de *elétron*.

Herman von Helmholtz (1821-1894)

Ponderou, este cientista, que da mesma forma que a matéria é constituída de átomos, também a eletricidade pode ser decomposta em porções elementares que se comportam como átomos de eletricidade. Os europeus, principalmente, passaram a mencionar o *quantum elementar de Helmholtz* quando queriam se referir à hipotética quantidade fundamental de eletricidade, mesmo depois de a palavra *elétron* já ter sido cunhada por Stoney.

William Crookes (1832-1919)

Crookes foi um dos primeiros a propor que os raios catódicos eram algum tipo de partícula carregada negativamente. Interpretou esses raios como sendo um *quarto estado da matéria*, a ser acrescentado à lista: sólido, líquido e gasoso.

Eugen Goldstein (1850-1930)

Refutou as idéias de Crookes. Se os raios formam um quarto estado da matéria, deveriam se comportar diferentemente para cada substância, como ocorre com os gases, por exemplo. Mostrou, entretanto, que as propriedades dos raios não dependiam do metal usado nos pólos do tubo. Foi ele quem introduziu o nome *raio catódico*.

Philip Lenard (1862-1947)

Propôs (e acertou) que os raios catódicos eram menores do que a matéria comum, ou seja, menores do que um átomo.

Jean Baptiste Perrin (1870-1942)

Perrin foi um dos que quase venceram a corrida pela descoberta do elétron. Faltou-lhe, apenas, efetuar as medições que Thomson fez.

Walter Kaufmann (1871-1947)

Quase que simultaneamente com Thomson, chegou aos mesmos resultados deste. Kaufmann pertencia ao *Círculo de Viena*, que era composto de cientistas e filósofos adeptos da doutrina lógico-positivista de Ernst Mach (1838-1916). De acordo com Mach, *é anticientífico propor a existência de algo que não pode ser observado*. Dominado por essa postura, Kaufmann não ousou afirmar ter descoberto *partículas* menores do que o átomo. Escorregou na filosofia e perdeu a chance de ser o descobridor do elétron. Podemos afirmar que perdeu a corrida por fanatismo filosófico. Outra lição da História: círculos, escolas, correntes e quejandos invariavelmente geram posturas dogmáticas que atrofiam o

raciocínio e tolhem a liberdade de pensamento. Não obstante, insistimos em não aprender! Não temos hoje a famosa *Escola de Copenhagen* que nos diz como devemos interpretar a *Mecânica Quântica*?

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)

Lorentz propôs que a matéria é composta de partículas positivas e negativas. Adotou o nome de *elétrons* para as negativas (proposto por Stoney, como dissemos acima). Afirmou, também, que a corrente elétrica é um feixe de elétrons que se desprendem da matéria. Desenvolveu uma *Teoria do Elétron* (1892) que foi fundamental para que Thomson propusesse a existência dessa partícula.

Emil Wiechert (1861-1928)

Outro que quase chegou lá. Fez as mesmas medições de Thomson um mês antes. Chegou a afirmar que os *corpos elétricos*, em sua nomenclatura, eram menores do que o átomo. Entretanto, não achou (e se achou não disse) que esses corpos elétricos eram constituintes da matéria. Perdeu a corrida por uma falha de interpretação.

4 A contribuição de Thomson

Vamos deslocar-nos no espaço e voltar no tempo, até o dia 30 de abril de 1897, em Londres. Na *Royal Society* acontece uma palestra. O orador, Joseph John Thomson, em consequência de seus trabalhos com raios catódicos anuncia:

- o o átomo é divisível, formado por *corpúsculos* de carga negativa;
- o os corpúsculos têm sempre a mesma massa e carga elétrica, independentemente do tipo de material que os emite;
- o essas partículas sub-atômicas eram cerca de mil vezes menores do que o átomo de hidrogênio.

Estava descoberto o elétron, o átomo perdia seu trono, e nascia a *Física das Partículas Elementares*.

Antes de descobrir o elétron, Thomson (1856-1940) já havia mostrado que os raios catódicos podiam ser encurvados por um campo magnético. Pouco depois, havia mostrado que eles podiam ser encurvados também por um campo elétrico.

Calculou a massa do elétron e mostrou que era menor do que a do átomo de hidrogênio. Foi a primeira descoberta de uma partícula subatômica.

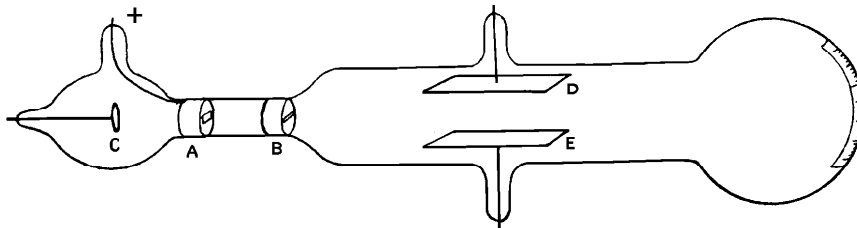
Embora o nome *elétron* já tivesse sido cunhado por Stoney, e usado por muitos outros cientistas, Thomson preferiu usar o termo *corpúsculo*, que abraçou até o término de sua vida.

Embora imperfeito, como vimos, seu modelo do átomo serviu de base para que mais tarde, Rutherford propusesse outro mais satisfatório.

Foi agraciado com o prêmio Nobel de Física, em 1906, *em reconhecimento pelos grandes méritos das suas pesquisas teóricas e experimentais sobre a condução de eletricidade em gases*, conforme consta da Ata correspondente.

5 A experiência de Thomson

Thomson usou um tubo de Crookes como o mostrado na figura, que é uma cópia da que aparece em seu trabalho publicado no *Philosophical Magazine*, Ser. 5, Vol. 44, Número 269, 1897, p. 293.



São palavras do próprio Thomson:

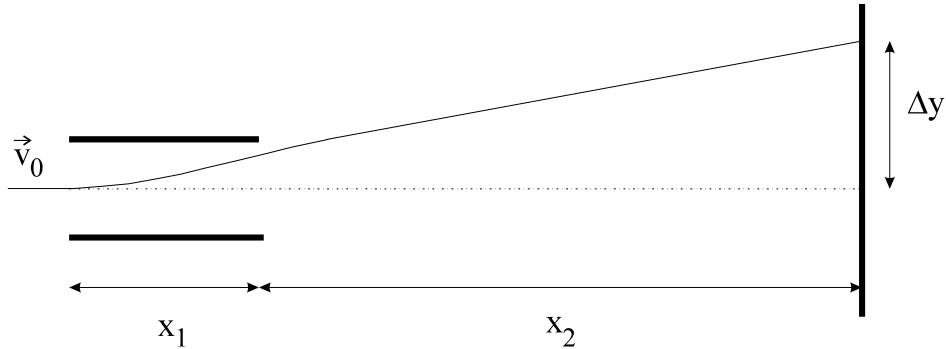
Os raios do catodo C passam através de uma fresta feita no anodo A que é um plug metálico ajustado perfeitamente no tubo e aterrado.

Após passar por uma segunda fresta feita em outro plug metálico aterrado B, eles passam entre duas placas paralelas de alumínio de cerca de 5 cm de comprimento por 2 de largura separadas por uma distância de 1,5 cm.

Em seguida, caem na extremidade do tubo produzindo um ponto fosforescente estreito e nítido.

Uma escala disposta no lado externo do tubo serve para medir a deflexão desse ponto.

Um pouco de matemática, envolvendo apenas elementos de física e de geometria plana, nos mostra como Thomson pôde calcular o valor de e/m , isto é, a razão entre a carga do elétron e sua massa. Examinemos a figura, que mostra a trajetória de uma partícula de massa m carregada eletricamente atravessando, com velocidade \vec{v}_0 , um campo elétrico de intensidade E . A força exercida pelo campo elétrico sobre a partícula provoca uma deflexão em sua trajetória de modo que a partícula acaba atingindo o tubo a uma distância Δy da posição que atingiria na ausência do campo elétrico.



O comprimento das placas entre as quais encontra-se o campo elétrico E é x_1 . A distância das placas até o ponto em que a partícula se choca produzindo o ponto fosforescente é x_2 . Dentro da placa a trajetória é curva e fora é descrita por uma linha reta. Um pouco de física elementar nos diz que

$$\Delta y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left(\frac{x_1}{v_0} \right)^2 + \frac{eE}{m} \frac{x_1 x_2}{v_0^2} \quad (1)$$

Nesta equação, são conhecidas as quantidades x_1 e x_2 definidas pela geometria do tubo; a quantidade Δy medida experimentalmente; e , o campo elétrico aplicado E . Se pudermos determinar a velocidade v_0 da partícula, ficaremos com apenas uma incógnita representada pela razão e/m .

Thomson usou a força de Lorentz para determinar v_0 . Como Lorentz nos ensinou, a força que atua numa partícula carregada ao atravessar com velocidade \vec{v} um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} é dada pela composição da força elétrica com a força magnética, isto é,

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

Na situação ilustrada na figura, Thomson aplicou um campo magnético \vec{B} , perpendicular ao campo \vec{E} , e logo após este, provocando um deslocamento adicional do ponto fosforescente. Mantendo \vec{E} constante e variando a intensidade de \vec{B} , Thomson deslocou esse ponto até onde ele estaria se não houvesse o campo elétrico inicial \vec{E} . Em outras palavras, a situação fica sendo a mesma que no caso de ausência de forças atuando sobre a partícula, isto é, como se a força de Lorentz fosse nula. Tomando em conta corretamente o sinal algébrico na relação (2), Thomson deduziu que

$$eE = ev_0B \quad (3)$$

de onde tirou o valor de v_0

$$v_0 = \frac{E}{B} \quad (4)$$

Com este valor de v_0 determinado experimentalmente, Thomson foi capaz de determinar o valor da razão e/m usando a expressão (1). Pouco tempo depois, em outro trabalho publicado na mesma revista, Thomson mostra como determinar e .

6 *Curriculum vitae* do elétron

Para finalizar, apresentamos o *curriculum vitae* do herói de nossa história.

- Nome: *elétron*
- Local e data do descobrimento: Londres, 30 de abril de 1897
- Família: *lépton* (lépido, ligeiro, rápido)
- Massa: 9.1×10^{-28} g (em repouso)
- Carga elétrica: 10^{-15} cm
- Spin: $\hbar/2$
- Vida média: mais de 10^{23} anos (suposta idade do universo : $\sim 10^{10}$ anos)

◦ Atividades: é um dos constituintes da matéria organizada. Determina, em grande parte, as propriedades químicas de átomos e moléculas. Os raios catódicos e os raios betas são feixes de elétrons livres. As correntes elétricas são formadas pelo movimento direcionado de elétrons no condutor. Quando livres, num gás ou no vácuo, os elétrons podem ser tratados como partículas clássicas (que obedecem as leis de Newton), embora suas propriedades ondulatórias sejam importantes quando eles interagem com o núcleo atômico, por exemplo.

Sua anti-partícula, com mesma massa, mesmo *spin*, mas com carga elétrica positiva, chama-se *pósitron*.

7 *Epílogo*

A verdadeira natureza do elétron (e de todas as outras partículas elementares) ainda é um mistério. Há quem adota a postura de que não tem sentido levantar essa questão da *natureza íntima da matéria*. Outros, talvez mais idealistas, esperam que um dia possamos ter um entendimento mais claro da natureza do *espaço-tempo* e, então, penetrar nos domínios onde força (e não energia) e matéria se unificam sob um único princípio.