

A Descoberta do Elétron*

Sérgio Joffily

Instituto de Cosmologia, Relatividade e Astrofísica (ICRA-BR), Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150, 22290-180, Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: joffily@cbpf.br

1 Introdução

O elétron, a mais abundante e a mais antiga de todas as partículas elementares, forma a camada externa dos átomos e responde por fenômenos físicos tais como a eletricidade, o magnetismo e a criação da luz.

Nesta apresentação, procuramos realçar a importância da descoberta do elétron na transformação do “Modelo Padrão” do século XIX, em que se atribuía a fluidos elásticos e imponderáveis as causas dos fenômenos de eletricidade, magnetismo, calor e luz, no “Modelo Padrão” atual da física de partículas e suas interações.

Como a história é feita no presente, com linguagem e conceitos de hoje, organizamos a exposição como segue: no capítulo 2, uma breve apresentação do Modelo Padrão atual, com o objetivo de precisar os conceitos e mostrar o papel de destaque ocupado pelo elétron neste modelo onde a natureza da matéria e suas interações é atribuída às partículas elementares interagindo entre si pela troca de partículas mediadoras, descrevendo os quatro tipos de forças: eletromagnética, fraca, gravitacional e forte. Em seguida, no capítulo 3, discutimos a eletricidade e o magnetismo no Modelo Padrão do início do século XIX, onde a unidade deste modelo de fluidos, como causa dos fenômenos observados na física, não era a de uma substância mas sim a de uma analogia. Em seguida, no capítulo 4, descrevemos a descoberta do elétron, em 1897, no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, pelo físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940), que vinha pesquisando o comportamento dos raios catódicos na presença de forças elétricas e magnéticas. Na opinião dos físicos alemães da época (Heinrich Hertz, entre outros), esses raios seriam uma espécie de fluidos através do éter. A eletricidade negativa fluía para fora do catodo e a positiva entrava no catodo. Thomson mostrou que esses raios eram corpúsculos com carga elétrica negativa, todavia não utilizou o nome elétron já introduzido pelo físico irlandês George Johnstone Stoney, desde 1891, na designação da unidade de carga encontrada nos experimentos de eletrólise. Para concluir, no capítulo 5, descrevemos a experiência de Millikan verificando a natureza corpuscular da eletricidade ao medir a menor carga elétrica que um corpo pode ganhar ou perder, ou seja, a carga do elétron.

2 O elétron no Modelo Padrão atual

A física das partículas elementares no estudo da natureza da matéria e suas interações teve sua origem em 1897, com a descoberta da primeira partícula elementar: o elétron. O nome elementar é reservado a um constituinte da matéria (p.ex.: elétron) ou da radiação (p.ex.: fóton) que não é composto de constituintes mais elementares. Todavia, várias

*Publicado em “Partículas elementares: 100 anos de descobertas”, F. Caruso et al. – EDUA, Manaus, 2005

partículas tidas de início como elementares revelaram-se compostas, como o caso do átomo e do próton. O elétron é a única partícula elementar centenária. Acredita-se, atualmente, que a matéria é composta de dois tipos de partículas: os quarks, que constituem os hadrons, como os prótons e nêutrons que fazem parte do núcleo atômico; e os léptons, dos quais o exemplo mais familiar são os elétrons que orbitam em torno do núcleo atômico.

As partículas subatômicas, que não são elementares, possuem estrutura interna e dimensão de $\sim 10^{-13}$ cm. As chamadas elementares, com dimensão menor do que 10^{-17} cm, não possuem estrutura interna conhecida. Elétrons e quarks são partículas elementares existentes na matéria do cotidiano, mas não são as únicas. Existem outras partículas elementares na natureza, por exemplo, os múons e neutrinos na atmosfera e no espaço estelar. Outras partículas elementares, tais como o tau e outros quarks, podem ser artificialmente criados.

As partículas elementares interagem entre si e algumas vezes se transformam em outros tipos de partículas. As interações entre os constituintes básicos da matéria são mediadas pela troca de outras partículas, denominadas partículas mediadoras: fótons para o eletromagnetismo, bósons W e Z para a força fraca e glúons para a força forte. A idéia de força como uma interação via troca de partículas é um conceito da mecânica quântica. Estas interações se dão através de quatro tipos diferentes de forças: eletromagnética, fraca, forte e gravitacional (para a gravidade foram postulados os grávitons, mas o Modelo Padrão não inclui a força da gravidade).

Do ponto de vista da Eletrodinâmica Quântica (QED) dois elétrons em interação, sujeitos à lei de Coulomb, um sente a presença do outro devido à troca de fótons (partícula mediadora da força eletromagnética). O fóton é o quantum do campo eletromagnético. Como não podemos detectar estes fótons, porque são emitidos por um elétron e absorvidos pelo outro, eles são chamados de virtuais. Neste processo, a conservação de energia é garantida dentro da relação de incerteza da Mecânica Quântica.

O mecanismo de troca é visualizado, esquematicamente, como a criação e emissão de partículas mediadoras por uma partícula de matéria e sua subsequente aniquilação ou absorção pela segunda partícula da matéria.

Dentre as propriedades atribuídas às partículas, as três quantidades mais básicas são: carga (q), massa (m) e spin (s), que no caso do elétron assume os valores: $q = -1$, $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$, $s = 1/2$. O spin, ou momento angular intrínseco, funciona como um pequeno magneto. A gravitação afeta o elétron porque ele tem massa. Possuindo carga elétrica, o elétron é afetado pela força eletromagnética. O elétron também sente a força nuclear fraca, que é de curto alcance. A única força fundamental que não atua sobre o elétron é a força nuclear forte, responsável por manter o núcleo atômico coeso.

O elétron é uma das poucas partículas estáveis; sendo a mais leve das partículas carregadas, a conservação da carga impede seu decaimento. Normalmente, toda vez que temos um fenômeno físico novo, criamos uma palavra nova. Algumas vezes, o fenômeno, ou objeto, sofre uma ligeira evolução e às vezes o nome primitivo permanece. Se após sucessivas modificações o nome original permanecer, deparamo-nos com dois objetos distintos, com o mesmo nome. É o caso da carga elétrica. De início, a carga elétrica de um objeto era a medida da quantidade de eletricidade contida no objeto. Semelhante à massa do objeto em relação à gravidade, sendo que a carga pode ser positiva (+) ou negativa (-). A carga, em escalas atômicas, é medida em múltiplos de carga do elétron, e em escalas macroscópicas, em Coulombs. No Modelo Padrão atual, pela Cromodinâmica Quântica (QCD), carga é um número quântico associado a uma partícula que determina

se ela pode participar do processo de interação. Uma partícula com carga elétrica possui interação eletromagnética e uma partícula com carga de cor (uma propriedade quântica dos quarks) participa da interação forte. Cada quark carrega um dos três tipos de carga de cor (vermelho, verde e azul).

Na interação forte, as partículas com carga de cor interagem pela troca de glúons (bósons de massa nula, partícula mediadora da interação forte). Os quarks e glúons estão confinados, formando sistemas neutros em carga de cor, conhecidos coletivamente como hadrons (sistemas brancos), sendo os nucleons (nêutrons e prótons) que formam o núcleo atômico os exemplos mais comuns.

Apesar de os nêutrons e prótons não terem cargas de cor, eles sofrem uma interação forte residual atrativa que mantém o núcleo coeso; como a interação eletrostática residual, responsável pela formação de moléculas, com átomos neutros de carga elétrica.

O elétron, além de ocupar um lugar de destaque no Modelo Padrão atual, é muito importante por suas aplicações tecnológicas. Sendo a partícula mais leve, estável e facilmente acelerado por um campo elétrico, também é usado como sonda nas pesquisas do microcosmo.

3 A Eletricidade e o Magnetismo no Modelo Padrão do século XIX

O Modelo Padrão do início do século XIX atribuía a fluidos elásticos e imponderáveis a causa dos fenômenos da Eletricidade, Magnetismo, Calor e Luz. No caso da eletricidade e do magnetismo, existia a teoria dos dois fluidos: todos os corpos possuíam dois fluidos elétricos, um positivo e outro negativo, onde os fluidos de mesma espécie se repeliam e os de espécie diferente se atraíam. Um corpo estaria eletrizado positiva ou negativamente na medida em que existisse um excesso de fluido em relação ao outro. Eram fluidos imponderáveis, capazes de penetrar todo o espaço e fluir através das substâncias.

A verificação experimental de Charles Augustus Coulomb, em 1785, de que a auto-repulsão dos fluidos elétricos seguia a mesma lei matemática equivalente à da lei da gravidade, como o inverso do quadrado das distâncias, foi um suporte ao Modelo Padrão da época, sendo que a unidade deste Modelo Padrão não estava numa substância única e fundamental, mas numa analogia. Na primeira metade do século XIX, a teoria eletrodinâmica consistia num grupo de diferentes leis elementares, tendo como modelo a teoria da gravitação de Newton, que postulava a ação à distância. Segundo Fresnel, a luz era uma espécie de vibração do éter, representado por um “meio elástico”, suporte das ondas luminosas, que preenchia todo o universo cósmico.

Michael Faraday (1791-1867) imaginou os campos elétrico e magnético de uma forma concreta, como linhas de força. Procurando eliminar a idéia de ação à distância de uma partícula sobre a outra, em lugares diferentes, perguntava sobre a ação do campo em todo o espaço.

As equações de James Clerk Maxwell (1831-1879) mostram como as linhas de força elétricas e magnéticas influenciam-se mutuamente. Uma variação magnética num ponto do campo cria uma força elétrica, e uma variação de corrente elétrica induz linhas de força magnéticas. Maxwell concebeu a idéia de que a luz é um campo eletromagnético variável e calculou a sua velocidade a partir de medidas puramente elétricas. A descoberta experimental das ondas hertzianas em 1887, por Heinrich Hertz, confirmou a idéia de Maxwell,

reunindo em uma mesma síntese a teoria eletromagnética e os fenômenos luminosos. A teoria de campo desviou a atenção sobre a origem das linhas de força para a questão da posição das linhas de força no campo, motivando o estudo da condução de eletricidade nos gases e o desenvolvimento dos tubos de raios catódicos.

Aplicando-se uma diferença de potencial entre dois eletrodos no interior de uma ampola de vidro contendo gás à pressão reduzida ($\sim 10^{-5}$ mm de Hg) observava-se um padrão de fluorescência no interior da ampola. Atribuía-se que o brilho da fluorescência era produzido por algum tipo de raio emitido pelo catodo, por isso chamado de raios catódicos. Existia uma disputa entre os físicos da época sobre a natureza dos raios catódicos. De início, estes raios eram tratados em termo de conceitos ondulatórios, todavia já existiam pontos de vista corpusculares, como a velha disputa entre Newton e Huygens sobre a natureza da luz.

4 A descoberta do elétron

Anteriormente a 1897 vários estudos tinham sido feitos sobre o comportamento dos raios catódicos, na presença de forças elétricas e magnéticas. Os raios catódicos eram desviados pelo campo magnético como se fossem partículas eletrizadas negativamente. Um cilindro de Faraday colocado fora da trajetória normal de um feixe fino de raios catódicos não recebia nenhuma carga de eletricidade, passando a receber quando era desviado por um ímã para dentro do cilindro de Faraday, evidenciando que os raios carregavam eletricidade negativa. Todavia, esses raios, até então, não eram desviados pelo campo elétrico. Hertz chegou a concluir que não eram partículas carregadas. Na opinião dos físicos alemães tratava-se de uma corrente que fluía através do éter. A eletricidade negativa fluía para fora do catodo e a positiva entrava no catodo. Thomson, em 1897, foi o primeiro a observar a deflexão do raio pelo campo elétrico. A razão dada por Thomson foi devido à baixa qualidade do vácuo no interior do tubo, usado nas experiências anteriores, pois os raios catódicos produzem vários íons no gás que passam a atuar como uma blindagem para o campo elétrico.

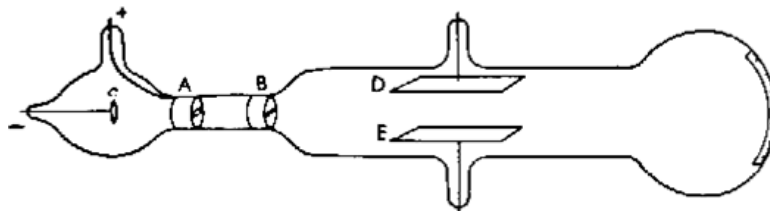


Fig. 4.1: Esquema do aparelho usado para medir a deflexão elétrica e magnética dos raios catódicos. Extraído de J.J. Thomson, *Phil. Mag.* 44, 293 (1897).

Determinação de e/m :

A verdadeira natureza dos raios catódicos só foi esclarecida pela experiência de Thomson [*Phil. Mag.* 44, 293 (1897)] medindo a relação carga-massa (e/m) das partículas transportadas pelos raios catódicos. O esquema do aparato utilizado é mostrado na fig.4.1. O tubo de vidro com gás a pressão reduzida contém o catodo C e o anodo A , o qual tem uma pequena fenda através da qual os raios catódicos podem passar. B é um anteparo similar e eletricamente conectado a A . Raios catódicos acelerados de C em direção a A ,

após passarem pela abertura em A se movem com velocidade uniforme e emergem do orifício em B como um pequeno feixe de secção retangular, que causa um pequeno foco luminoso na extremidade direita do tubo de vidro. Quando uma diferença de potencial V é mantida entre as placas paralelas D e E , E sendo positiva, o foco de luz aparece desviado para baixo pelo campo eletrostático [cf. fig.4.2]

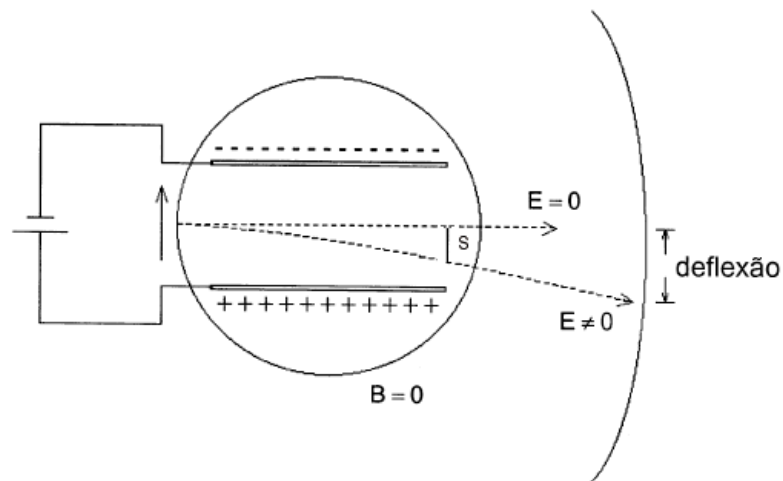


Fig. 4.2

Um par de bobinas de Helmholtz, não mostrado na fig. 4.1, cujos diâmetros são iguais ao comprimento das placas paralelas e colocados um em frente ao outro do lado externo do tubo, de forma a produzirem um campo magnético B perpendicular ao plano da figura, cuja intensidade pode ser determinado pelas dimensões das bobinas e pelas correntes através delas. No caso $E = 0$ e $B \neq 0$ (saindo do plano da figura) existe um desvio do foco de luz para cima [cf. fig.4.3]

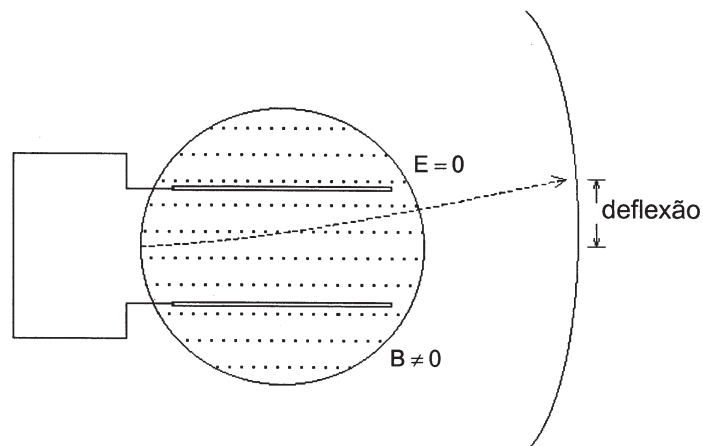


Fig. 4.3

Por meio de duas observações, Thomson determinou a razão carga-massa da partícula. Na primeira, para um dado campo elétrico $E \neq 0$ entre as placas, ajustando-se adequadamente o campo magnético B de forma a anular a deflexão [cf. fig.4.4] tornando a força elétrica sobre a carga igual e oposta à força magnética, $eE = evB$, obtendo-se

$$v = \frac{B}{E}$$

Assim as medidas diretas de E e B determinam a velocidade v das partículas.

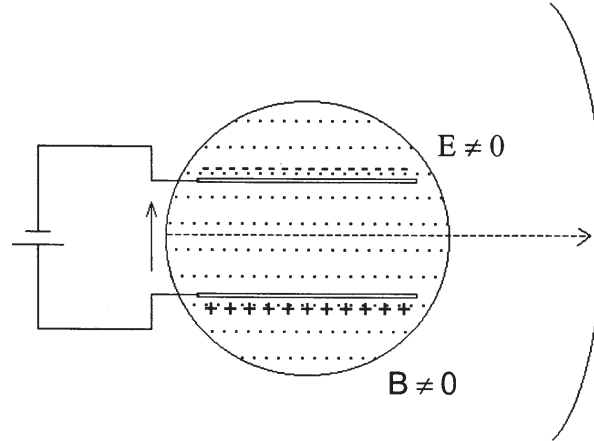


Fig. 4.4

Tendo-se v , obtém-se e/m pela segunda observação feita por Thomson, ao determinar a deflexão S causada apenas pelo campo eletrostático quando $B = 0$ [cf. fig.4.2]. Esta deflexão resulta de uma aceleração uniforme eE/m atuando durante o tempo l/v em que as partículas atravessam o comprimento l das placas. Pelas leis do movimento uniformemente acelerado, obtém-se

$$S = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left(\frac{l}{v} \right)^2$$

O valor da relação e/m é calculado desta equação onde todas as quantidades são conhecidas. Na época, usando este método, Thomson encontrou:

$$\frac{e}{m} \approx 2,3 \times 10^{17} \frac{esu}{g} = 0,8 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Em 1940, Thomson [cf. J.J.Thomson, "Recolections and Reflections", N.Y. The Macmillan Company (1937) p.338] escrevia em sua autobiografia: "Após demorada consideração sobre os experimentos, pareceu-me que não havia como escapar das seguintes conclusões: 1) Que os átomos não são indivisíveis, pois partículas negativamente eletrizadas podem ser arrancadas deles pela ação das forças elétricas... 2) Que essas partículas são todas de mesma massa e carregam a mesma carga de eletricidade negativa, qualquer que seja a espécie de átomo de que derivem, e são constituintes de todos os átomos. 3) Que a massa dessas partículas é menor que a milionésima parte da massa do átomo de hidrogênio. ... No início, denominei essas partículas de corpúsculos, mas agora são chamadas mais apropriadamente de elétrons". Thomson fez a primeira comunicação oficial da existência deste corpúsculo em 27 de abril de 1897, cujo resumo foi publicado no *Electrician*, May 21, 1897. O texto completo foi publicado no *Philosophical Magazine*, Outubro, 1897.

Com este "corpúsculo", diz-se que J.J. Thomson abriu a porta para a física do século XX.

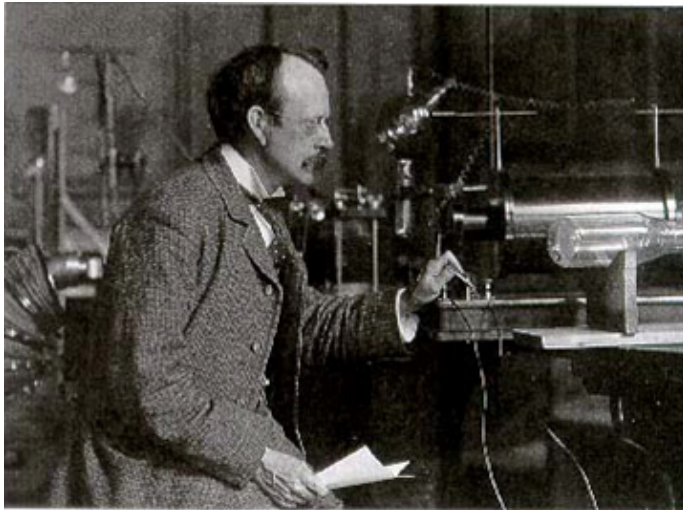


Fig. 4.5: J.J.Thomson em seu laboratório em Cavendish.

5 Determinação da carga do elétron

Após as observações de Thomson de que todos os elétrons têm o mesmo valor da relação carga-massa, ao assumirmos que todos os elétrons tem a mesma massa teríamos como consequência a mesma carga para todos os elétrons. Thomson, logo em seguida, usando uma câmera de Wilson onde o método de condensação permitia a observação de partículas pequenas, obteve inicialmente para o valor da carga do elétron $e = 1.96 \times 10^{-19}$ Coulombs, e em seguida o valor $e = 1.1 \times 10^{-19}$ Coulombs. A medida precisa da carga eletônica só foi obtida em 1911, por Robert Andrews Millikan (1868-1953). A experiência de Millikan, para determinar o valor da carga, consiste no estudo de gotas microscópicas (gotículas) que são colocadas entre duas placas de metal, horizontais, de um condensador. As placas são conectadas a uma fonte de alta tensão para produzirem um campo elétrico atuando sobre as gotículas carregadas, conforme é mostrado no diagrama da fig. 5.1, onde **A**, borrifador através do qual o óleo é pulverizado no tubo cilíndrico **D**. **G**, tanque de óleo para manter a temperatura constante. **M** e **N**, placas de metal paralelas para produzir campo elétrico gerado pela bateria de 10.000 V, **B**. A luz emitida pela lâmpada **a**, após remoção de fluxos de calor pela passagem através de **w** e **d**, penetra a câmera através da janela de vidro **g** e ilumina a gotícula em **p**, situada entre os discos **M** e **N**, que atravessou o furículo em **M**. Íons adicionais são produzidos em **p** por raios-X produzidos no tubo **X**.

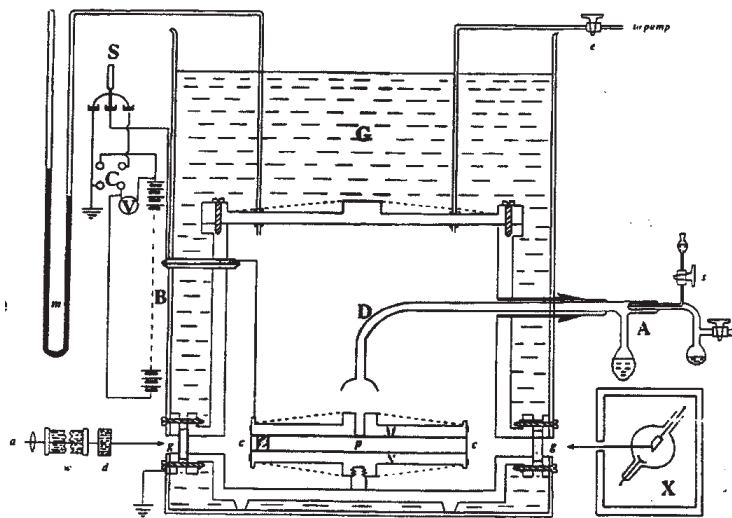


Fig. 5.1 Diagrama do Aparato de Millikan

Na experiência de 1911, Millikan verificava que para diferentes gotas o valor da carga e era diferente. Para gotas pequenas e um gás muito rarefeito o valor de e era maior. Millikan concluiu que a fórmula de Stokes que descrevia bem os corpos se movendo em meios viscosos, num meio contínuo, não era apropriada para um meio gasoso. Millikan propôs, neste trabalho, uma correção para a fórmula de Stokes, dividindo a viscosidade η pelo fator $1 + b/(P \cdot a)$, onde b é uma constante, P a pressão do gás e a o raio da gota.

Fazendo-se a análise das forças que atuam sobre uma gotícula carregada num campo elétrico, conforme mostrado na fig. 5.2, tem-se: $F_g = mg$ (Força gravitacional), $F_e = qE$ (Força elétrica), $F_s = -Kv$ (Força de atrito viscoso) dada pela lei de Stokes, sendo $K = 6\pi\eta a$, onde

- v = velocidade da gotícula de óleo
- a = raio da gotícula
- η = coeficiente de atrito do ar com a gotícula
- m = massa da gotícula
- g = aceleração da gravidade
- $E = V/D$ intensidade do campo elétrico
- $q = ne$ carga transportada pela gotícula

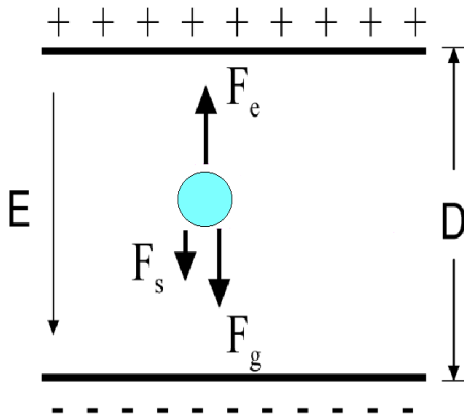


Fig. 5.2a

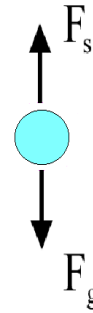


Fig. 5.2b

Na ausência do campo elétrico [Fig. 5.2b] todas as gotículas caem livremente, ao atingirem a velocidade de regime (v_g) podemos escrever $F_g = F_s$, logo $mg = K v_g$. Usando-se a Lei de Stokes e a expressão do volume da esfera, obtém-se para o raio da gotícula:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2g\rho}} \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica aparente do óleo, $\rho = (\rho_{\text{óleo}} - \rho_{\text{ar}})$.

Descrição do aparelho

De forma simplificada esquematizamos o experimento da fig. 5.1 pela fig. 5.3, ou seja, um condensador de placas paralelas circulares, onde a placa superior é perfurada para permitir a passagem das gotículas de óleo. Na placa inferior há um orifício para dar passagem a um bastonete em cuja extremidade está depositada uma fonte de tório-232 (em substituição aos raios-X utilizados por Millikan). As partículas alfa emitidas pelo tório aumentam a concentração de íons na região onde caem as gotas, favorecendo a mudança da carga. O condensador está encerrado em um recipiente cilíndrico que o isola do exterior, não indicado na fig.5.3.

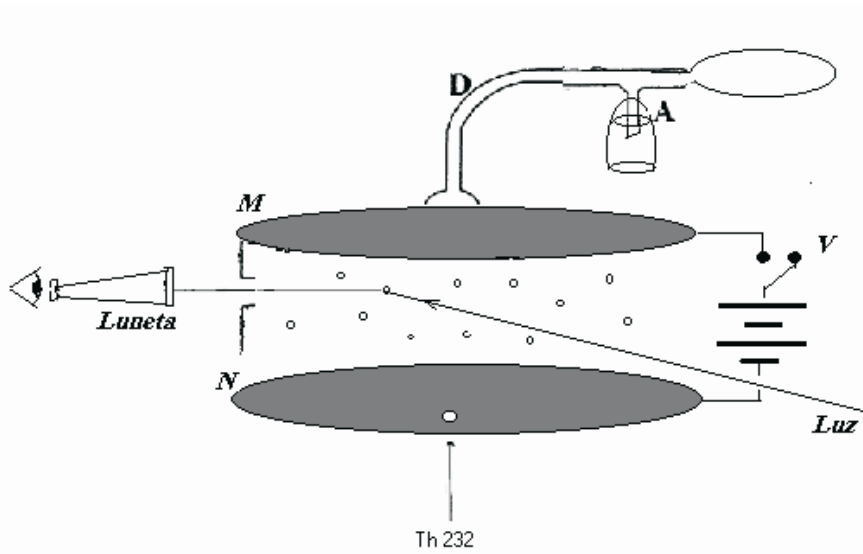


Fig. 5.3

Uma fonte de alta tensão V ligada ao condensador gera o campo elétrico entre as placas, com uma chave especial possibilitando alternar o sinal de cada placa. O dispositivo de iluminação das gotículas é constituído por uma fonte luminosa, cujo feixe é dirigido por um sistema de lentes, de modo a se concentrar na região do condensador onde estão as gotículas.

Procedimento experimental

Inicialmente, pulverizam-se gotas de óleo dentro da câmara superior do condensador e observa-se através da luneta (Fig. 5.3), em cuja ocular existe um reticulado constituído por fios paralelos com distância conhecida.

Na ausência do campo elétrico, todas as gotas caem pela ação da gravidade. Quando ligamos a fonte de alta tensão ao condensador podemos observar gotas subindo, caindo ou em repouso. Para uma gotícula subindo sob a ação do campo elétrico, ao atingir velocidade constante (v_e), podemos escrever $F_e = F_g + F_s$, logo

$$Eq - mg = 6\pi\eta av_c. \quad (2)$$

Para uma mesma gotícula mede-se a velocidade de subida sob a ação do campo elétrico: $v_{e,1}$ quando a carga é q_1 e $v_{e,2}$ quando a carga é q_2 e assim sucessivamente. Então [cf. fig. 5.2a] tem-se:

$$\begin{aligned} E_{q_1} - mg &= 6\pi\eta av_{e,1} \\ E_{q_2} - mg &= 6\pi\eta av_{e,2} \\ &\vdots \\ E_{q_i} - mg &= 6\pi\eta av_{e,i} \end{aligned}$$

portanto,

$$E(q_i - q_{i+1}) = 6\pi\eta a(v_{e,i} - v_{e,i+1}). \quad (3)$$

O que indica que as variações das velocidades ($\Delta v_{ei} = v_{e,i} - v_{e,i+1}$) da gotícula sob a ação do campo elétrico são proporcionais às variações de sua carga ($\Delta q_i = q_i - q_{i+1}$). Como estas variações são múltiplos inteiros da carga do elétron, teremos

$$\Delta q_i = n_i e$$

logo:

$$e = 6\pi\eta a(\Delta v_{e,i})/(n_i E)$$

ou

$$e = 6\pi\eta(D/V)a(\Delta v_{e,i}/n_i). \quad (4)$$

Resultados da experiência

As medidas que se seguem foram obtidas por um estudante de Iniciação Científica do CBPF [Passos, Manuela C., 2001]. Três estados de carga foram medidos para a mesma gota; para cada carga várias medidas foram feitas e as médias estão mostradas nas tabelas abaixo.

Pressão atmosférica:	$p = 76 \text{ cm de Hg}$
Distância do retículo:	$d = 0.5 \text{ mm} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$
Distância entre as placas do capacitor:	$D = 0.767 \text{ cm} = 7.67 \times 10^{-3} \text{ m}$
Densidade aparente do óleo:	$\rho = 886 \text{ kg/m}^3$
Temperatura:	$T = 25^0$
Viscosidade do ar:	$\eta = 1,847 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$
Tensão entre as placas:	$V = 488 \text{ Volts}$
Aceleração da gravidade:	$g = 9,8 \text{ m/s}^2$
Pressão do gás:	$P = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$
Constante empírica:	$b = 8.20 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$

Na ausência de campo elétrico, mede-se o tempo de queda de uma única gotícula varias vezes:

Distância ($\times 10^{-4} \text{ m}$)	t_g (s)	$\langle t_g \rangle$ (s)	$\langle v_g \rangle$ ($\times 10^{-5} \text{ m/s}$)
3	15.96		
3	18.63		
3	15.51		
3	14.91		
3	15.79	16.54	1.81
3	13.23		
3	17.13		
3	17.13		

Utilizando-se a fórmula (1), tomando a média das velocidades, obtem-se para o raio da gota: $a = 4,162 \times 10^{-7} \text{ m}$.

Com campo elétrico, fig. 5.2a, mede-se o tempo de subida da mesma gotícula várias vezes para os diferentes estados de carga n :

Distância ($\times 10^{-4}m$)	$t_{e,i} \uparrow$ (s)	$\langle t_{e,i} \rangle$ (s)	$\langle v_{e,i} \rangle$ ($\times 10^{-5} m/s$)	$\langle v_{e,i} \rangle$ ($\times 10^{-5} m/s$)	n_i	$\langle v_{e,i} \rangle / n$ ($\times 10^{-5} m/s$)
5	1.41					
5	1.63					
5	1.46					
5	1.61					
5	1.47	1.55	32.22	15.98	2	7.98
5	1.57					
5	1.75					
5	1.47					
5	1.56					
5	1.61					
<hr/>						
5	2.73					
5	3.06	3.87	16.20	8.99	1	8.99
5	3.30					
5	3.03					
5	3.35					
<hr/>						
5	6.85					
5	6.77					
5	7.09					
5	6.67					
5	6.79					
5	7.33					
5	6.67					
5	6.64	6.92	7.22			
5	6.91					
5	7.40					
5	6.59					
5	7.68					
5	7.29					
5	6.72					
5	6.77					
5	7.38					
5	6.69					
5	7.04					
5	6.37					

A determinação do valor de e é feita pela fórmula (4), calculando-se a média para os dois valores da carga medidos, obtém-se

$$e = (e_1 + e_2)/2 = 1.932 \times 10^{-19}C$$

A expressão (1) que utilizamos para calcular o raio da gotícula é incorreta quando este raio é da ordem de grandeza do livre percurso médio das moléculas do gás através do qual caem as gotas. A expressão a adotar é uma forma modificada da lei de Stokes introduzida

por Millikan no trabalho de 1911, onde leva em conta a característica particular do ar, dada por:

$$mg = 6\pi\eta av_g(1 + b/(P \cdot a))^{-1},$$

sendo P a pressão do ar e b um parâmetro determinado experimentalmente, com esta correção o valor da carga corrigida e_c fica:

$$e_c = e \cdot (1 + b/(P \cdot a))^{-1}$$

logo

$$e_c = 1.62 \times 10^{-19}C$$

A discrepância entre a medida da carga quantizada em relação ao valor adotado ($e = 1.602\ 176\ 462 \times 10^{-19}C$) é de 1%. Observamos também que o raio da gota é tão pequeno que a correção da lei de Stokes é considerável ($\approx 20\%$).

Literatura Consultada

- Thomson, J. J., 1897, “Cathode Rays”, Philosophical Magazine, Vol. 44, serie 5, 293.
- F.Close, M. Marten & C. Sutton; The Particle Explosion, Oxford University 1986.
- Jones, R. C., 1995, “The Millikan Oil Drop Experiment: Making it Worthwhile”, American Journal of Physics, 970-977.
- Pasco Scientific Instruction Manual, “Millikan Oil Drop Apparatus”, Roseville, California.
- Millikan, R. A., 1911, “The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stoke’s Law”, Physical Review, 32:349.
- Millikan, R.A., 1913, “On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant”, Physical Review, 2:109.
- Passos, Manuela C., 2001, Trabalhos de Iniciação Científica no CBPF.