

LNLS: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (feixe de elétrons).

Constituintes do átomo - O elétron

1. Introdução

No capítulo anterior nós vimos que a hipótese atomística e a teoria cinética dos gases permitem explicar completamente a Lei dos Gases Ideais a partir de princípios mecânicos. Também vimos que a teoria cinética leva a uma importante interpretação molecular (microscópica) dos conceitos de pressão e temperatura absoluta. Esse foi um grande passo na consolidação da teoria atômica da matéria, mas ainda não nos permite dizer nada a respeito da estrutura interna do átomo.

A próxima questão passa a ser: como é o átomo a nível microscópico? Ou seja, do que ele é feito e com o que ele se parece? Será que ele é mesmo uma pequena esfera rígida e indivisível, como imaginava Dalton, ou será que teria uma estrutura interna (partes menores)?

Questões como essas motivaram uma série de experimentos importantes, que culminaram com a determinação dos constituintes do átomo e suas propriedades. De fato, como sabemos hoje, os átomos são compostos por partículas menores: os elétrons, prótons e nêutrons. Neste e nos próximos dois capítulos, veremos como se chegou a essas conclusões. Começaremos pela descoberta do elétron.

2. A descoberta do elétron: os raios catódicos

Uma das mais importantes descobertas do final do século XIX está ligada ao estudo dos chamados **raios catódicos**. Esses raios são observados nas descargas elétricas em gases rarefeitos, produzindo um efeito luminoso colorido.

Neste tipo de descarga, utiliza-se uma ampola evacuada (com um gás em baixa pressão), onde se aplica uma grande diferença de potencial elétrico (alta voltagem) entre dois eletrodos: o catodo (negativo) e o anodo (positivo). Quando a tensão elétrica é suficientemente alta, há condução de corrente elétrica entre os eletrodos e pode-se observar uma luminosidade esverdeada no vidro da ampola.

Essa luminosidade sugeria a presença de raios provenientes do eletrodo negativo (catodo), que deu origem à denominação de raios catódicos. Esses raios podem ser bloqueados se um obstáculo for colocado no seu caminho. Além disso, também pode-se observar a projeção de uma imagem com o formato do contorno do obstáculo, ao final do tubo (após o anodo), conforme ilustra a figura 3.1.

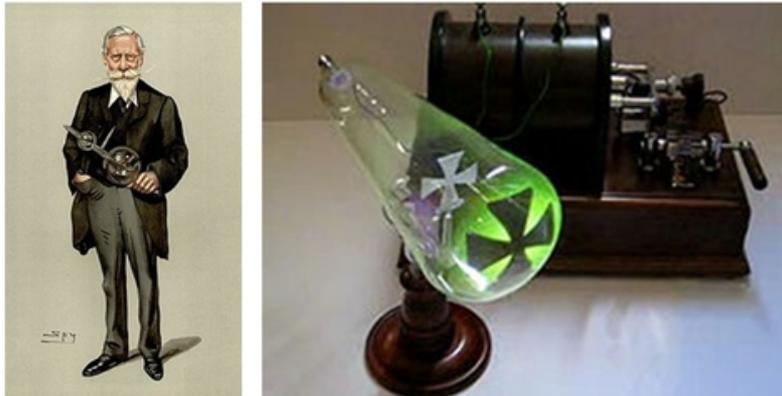


Figura 3.1: Sir William Crookes e seu tubo de raios catódicos.

William Crookes, por volta de 1870, foi um dos principais responsáveis por desenvolver os tubos (ampolas) de vácuo onde os experimentos com raios catódicos eram realizados. Por conta disso, os tubos de Crookes são também frequentemente chamados de Tubos de Raios Catódicos (TRC).

Crookes fez uma série de experimentos que, junto com as observações de outros cientistas da época, sugeriam que esses raios eram compostos por partículas massivas de carga elétrica negativa. A carga foi inferida a partir de experimentos de deflexão (desvio) dos raios por campos magnéticos.

Porém, os primeiros experimentos tentando observar a deflexão desses raios na presença de campos elétricos foram mal sucedidos, e pareciam contestar a presença de carga elétrica. Afinal, se esses raios eram compostos por partículas eletricamente carregadas, essas deveriam também sofrer ação da força elétrica. Coube a **Joseph J. Thomson** resolver o dilema, graças ao desenvolvimento de técnicas de vácuo melhores, que lhe permitiram usar uma ampola com vácuo ainda melhor (pressão menor) do que aquelas usadas por Crookes. Isso, aliado a sua criatividade e conhecimentos de física, o permitiram fazer as principais determinações sobre a natureza dos raios catódicos, levando a descoberta do elétron.

3. Experimento de Thomson

Atribui-se ao inglês Joseph John Thomson a **descoberta do elétron**, em 1897, pelo que lhe foi concedido o **prêmio Nobel** de física de 1906. Thomson, assim como muitos outros cientistas daquela época estavam interessados em estudar a condução de eletricidade em gases. Esse interesse o levou a fazer vários experimentos com raios catódicos e, eventualmente, à confirmação de que o feixe de raios catódicos era mesmo composto por partículas que tinham massa e carga negativa.

Ele demonstrou isso, de forma muito convincente e engenhosa, através da deflexão de um feixe de raios catódicos por campos elétricos e magnéticos. Essa deflexão do feixe era consistente com o esperado para um feixe de partículas com carga negativa.

Na verdade, esse experimento já havia sido tentado originalmente pelo alemão H. Hertz, mas os primeiros resultados de Hertz haviam sido negativos. O próprio Thomson, nas primeiras versões do seu experimento também não observou a deflexão esperada, porém, outros experimentos feitos por Crookes e

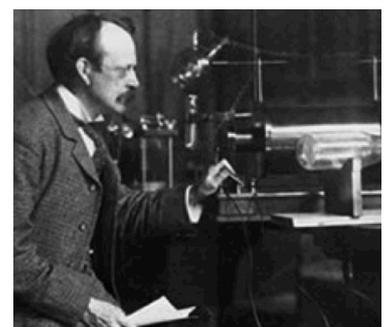


Figura 3.2: J. J. Thomson.

Perrin o haviam convencido de que os raios catódicos eram partículas de cargas negativas, e assim ele procurou uma maneira de demonstrar isso de forma definitiva. No final, a principal diferença entre os experimentos de Hertz e Thomson era mesmo o vácuo (baixa pressão) da ampola, que no caso de Thomson era bem melhor. Isso permitia evitar o efeito de blindagem provocado pelo gás ionizado, quando há uma concentração (densidade) muito grande de gás na ampola, que tende a minimizar o efeito de deflexão do campo elétrico. A figura 3.3 mostra uma representação artística de um tubo de raios catódicos, com um conjunto de placas de deflexão, similar ao usado por Thomson.

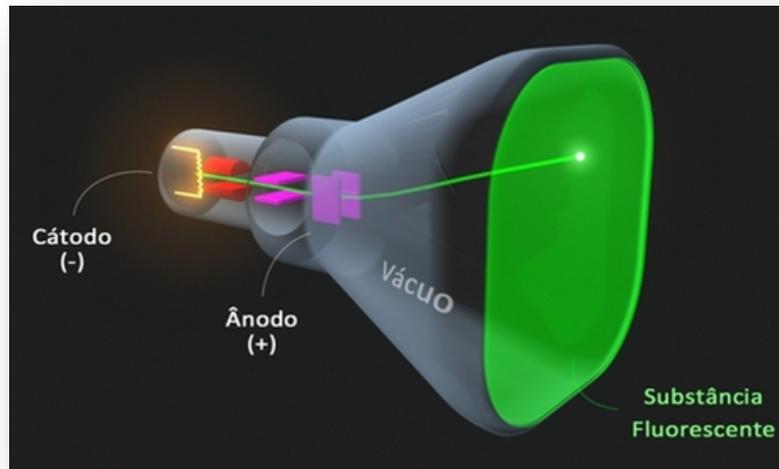


Figura 3.3: Sistema para observação da deflexão de feixes eletrônicos. Essa é uma versão mais moderna, similar aos tubos de imagem dos televisores, monitores de computador e osciloscópios antigos.

DICA:

Você pode ler as notas da aula (“Nobel lecture”) apresentada por J.J. Thomson [clikando aqui](#). O texto original está em inglês, mas se você tiver dificuldades para ler a versão original, você pode usar ferramentas de tradução como o [tradutor Google](#) (que, embora imperfeito, é bem prático). Basta copiar e colar o texto a ser traduzido na caixa indicada!

3.1. Deflexão elétrica

A seguir vamos descrever o experimento mais importante de Thomson, que consiste em fazer o feixe de raios catódicos de uma ampola de Crookes passar através de regiões onde existem campos elétricos e magnéticos. A ideia é fazer com que a força elétrica e/ou magnética que atuam sobre partículas carregadas em movimento modifiquem a trajetória do feixe de uma forma observável (e mensurável) numa tela fosforescente, sensível às partículas presentes nos raios catódicos. Assim, dependendo do tipo de deflexão e forças observadas no feixe, é possível estabelecer uma relação entre os campos aplicados e as propriedades das partículas do feixe. O objetivo de Thomson era determinar uma relação entre a carga e a massa das partículas presentes no feixe de raios catódicos.

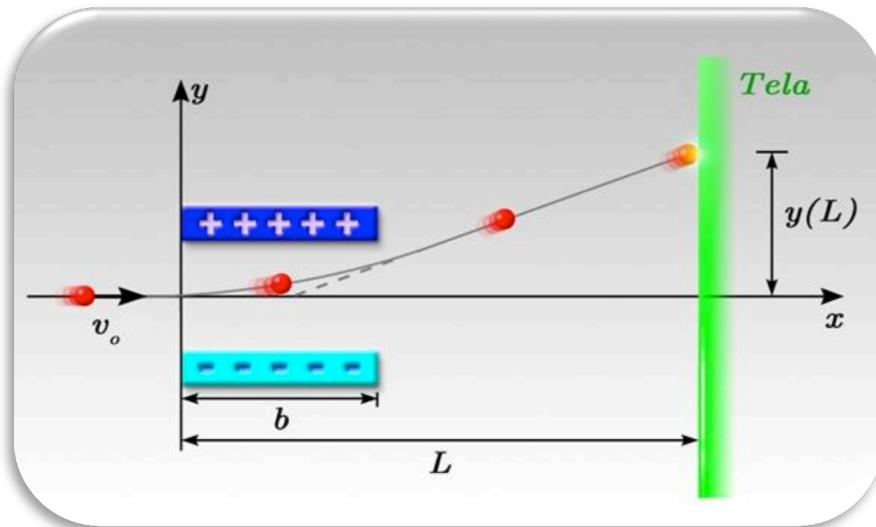


Figura 3.4: Trajetória do elétron no experimento de Thomson.

Para entender como isso funciona, considere o arranjo mostrado na figura 3.4, onde o feixe catódico passa pelo interior de um capacitor de placas paralelas (placas metálicas paralelas onde se acumulam cargas elétricas opostas). Nesta configuração, se um feixe de partículas com carga elétrica penetrar no interior do capacitor, de comprimento b e campo elétrico E , as partículas são defletidas pelo campo, devido à força elétrica sobre as cargas. O campo atuará sobre tais partículas enquanto elas permanecerem no interior do capacitor. Ao saírem da região do capacitor ($x > b$), isto é, da região de interação das partículas com o campo elétrico, seu movimento continua retilíneo e uniforme até atingir a tela, no final da ampola. Na tela existe uma camada de um material fosforescente que revela a posição de impacto do feixe, permitindo observar o efeito do campo aplicado sobre o mesmo (ver figura 3.4).

Quanto ao movimento no interior do capacitor, se v_0 for a velocidade inicial das partículas, e $(-q)$ sua carga, a partícula estará sujeita a uma força elétrica de módulo (magnitude) $|\vec{F}_e| = qE$, como é mostrado na figura 3.5.

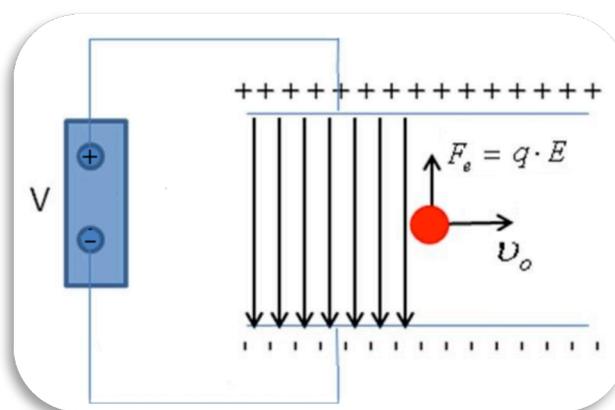


Figura 3.5: Força elétrica atuando sobre a partícula no interior das placas do capacitor da figura 3.4.

É instrutivo mostrar como Thomson usou campos (elétricos e magnéticos) externos para controlar a trajetória do feixe de partículas carregadas, e determinar os parâmetros importantes das partículas do feixe. Esse é um ótimo exemplo de investigação científica, onde se utiliza efeitos conhecidos para descobrir coisas novas. A análise envolve alguns conceitos de mecânica e eletricidade/magnetismo, normalmente vistos no ensino médio. Mas, se você ainda não viu algum desses conceitos, não se preocupe com todos os detalhes, pois você os verá mais adiante no seu curso (Dinâmica e Eletromagnetismo). Depois você poderá usar esses cálculos para referência futura. Aqui, neste momento, nós estamos mais interessados nos resultados e conclusões finais, que levaram Thomson a propor a existência do elétron.

Assim, usando a relação da segunda Lei de Newton, $F = ma$, e comparando com a expressão da força elétrica, $F = qE$, podemos determinar a aceleração, a , das partículas em termos da relação entre a carga e a massa, q/m . Note que nas expressões acima, m e q são respectivamente a massa e a carga da partícula, e E é o campo elétrico aplicado entre as placas do capacitor¹.

$$a_y = \frac{q}{m} E \quad (3.1).$$

Desse modo, através de uma análise cinemática (mecânica) do movimento, conclui-se que o movimento vertical é uniformemente acelerado e que a posição vertical da partícula é dada por:

$$y(t) = \frac{1}{2} a_y \cdot t^2 \quad (3.2).$$

Ao mesmo tempo, o movimento horizontal é uniforme (velocidade constante), e a posição nessa direção é expressa abaixo, onde v_0 é a velocidade inicial, na direção do eixo x .

$$x(t) = v_0 \cdot t \quad (3.3).$$

Da combinação destas equações, e eliminando a dependência temporal (variável tempo), tiramos a trajetória parabólica do feixe. Isto é, a posição vertical (y), em função apenas da coordenada de posição horizontal (x), e dos parâmetros desconhecidos.

$$y(x) = \left(\frac{q}{m}\right) \frac{x^2}{v_0^2} E \quad (3.4).$$

Após algum cálculo, levando em conta a trajetória das partículas após deixarem o capacitor, é possível chegar a uma expressão para o deslocamento vertical total do feixe. Isto nos permite relacionar a posição do feixe na tela, com o campo aplicado e os parâmetros que se busca determinar.

$$y(x) = \left(\frac{q}{m}\right) \frac{b \cdot E}{v_0^2} \left(x - \frac{b}{2}\right), \quad \text{para } x = L \rightarrow y(L) = \left(\frac{q}{m}\right) \frac{b \cdot E}{v_0^2} \left(L - \frac{b}{2}\right) \quad (3.5)$$

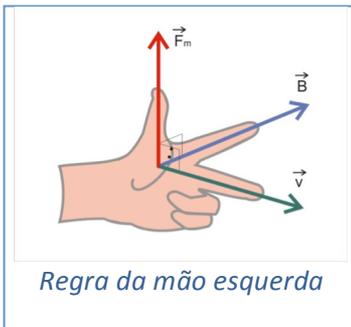
Note que esse resultado já quase determina a relação dos parâmetros q/m , exceto pela velocidade v_0 , que também é desconhecida. Para determinar a velocidade inicial, Thomson utilizou outro recurso experimental interessante, como veremos a seguir.

¹ No capacitor, não há contato elétrico entre as placas, e a presença das cargas produz um campo elétrico entre elas.

3.2. Deflexão magnética

Na época de Thomson já se sabia que correntes elétricas produzem campos magnéticos, e também que essas correntes, na presença de um campo magnético externo, sofrem ação da força magnética. Como correntes elétricas são cargas em movimento, podemos dizer que as cargas elétricas do feixe irão sofrer uma força magnética, de módulo (magnitude) $F_m = |\vec{F}_m|$, na presença de um campo externo \vec{B} .

$$F_m = |q \vec{v} \times \vec{B}| = q v B \text{ sen}(\theta) \quad (3.6).$$



A equação (3.6) é uma expressão vetorial que relaciona a força magnética (no sistema de unidades SI²) com a velocidade e a carga da partícula. Trata-se de uma operação matemática chamada de produto vetorial (que será visto em detalhe no curso de Dinâmica), entre os vetores velocidade e campo magnético. O importante aqui é notar que a direção da força resultante é sempre perpendicular à direção de ambos os vetores, e o sentido é dado pela Regra da Mão Esquerda (ver figura ao lado).

Isso é um pouco mais complicado do que no caso da força elétrica, onde a força é sempre na mesma direção do campo elétrico. Ainda assim, não é difícil, basta se acostumar com a linguagem vetorial e as convenções usadas para definir a direção da força.

Portanto, o módulo, isto é, a intensidade da força magnética depende da carga, da velocidade, do valor do campo magnético e do seno do ângulo (θ), entre os vetores velocidade e campo magnético.

Se esse ângulo for noventa graus ($\theta = \frac{\pi}{2}$), isto é, se o campo magnético aplicado for perpendicular à velocidade inicial das partículas, o seno do ângulo será igual à unidade: $\text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$, e a expressão simplifica-se para:

$$F_m = q v B \quad (\text{força magnética para } \theta = \pi/2) \quad (3.7).$$

Note que a força magnética é diretamente proporcional à velocidade da partícula, e sempre perpendicular a ela (isto é, nunca altera o valor da velocidade naquela direção). Assim, se escolhermos apropriadamente a direção do campo magnético externo, é possível usá-lo para contra balancear a força elétrica produzida pelo campo elétrico externo, até cancelar o deslocamento do feixe na tela do tubo. Como veremos a seguir, Thomson usou esse fato para determinar o valor de q/m .

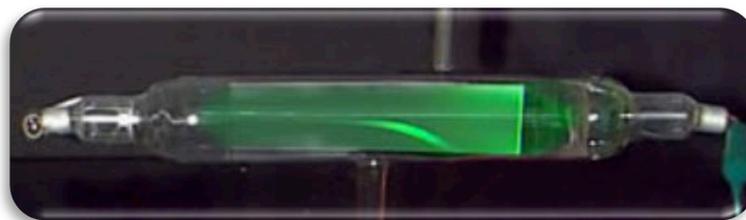


Figura 3.6: Feixe de raios catódicos sendo defletido (para baixo) por um campo magnético externo.

² No sistema de unidades CGS (centímetro-grama-segundo), a expressão da força magnética é: $F_m = |q/c \vec{v} \times \vec{B}|$.

3.3. Determinação de e/m

Observe que as relações anteriores, envolvendo campos elétricos e magnéticos, todas dependiam da relação q/m . Portanto, os parâmetros carga e massa não podem ser determinados individualmente desses experimentos. Mas como havíamos notado na *Equação 3.5*, o experimento de deflexão elétrica dependia também da velocidade inicial da partícula. Assim, para isolar apenas as grandezas intrínsecas das partículas que compunham os feixes catódicos, Thomson teve a ideia de combinar as forças elétricas e magnéticas para eliminar a variável indeterminada de velocidade inicial. Sua ideia foi aplicar um campo magnético externo, perpendicular ao feixe, que exatamente compensasse o efeito do campo elétrico das placas. A figura 3.7 mostra um diagrama com a representação das forças atuando sobre a partícula.

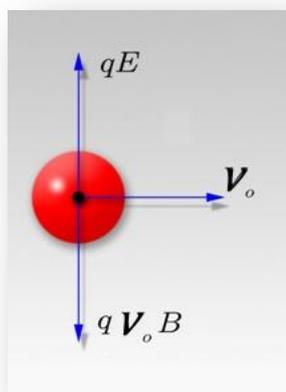


Figura 3.7: Composição de forças: elétrica e magnética.

Dessa forma, ao aplicar um campo magnético na direção apropriada, Thomson podia gerar uma força magnética que se contrapunha exatamente a força elétrica, que originalmente provocava o desvio vertical do feixe de raios catódicos. Deste modo, ao aumentar o valor do campo magnético (através do aumento na corrente elétrica na bobina geradora), ele podia cancelar completamente o deslocamento vertical das partículas, causado pela força elétrica. Nestas condições não há nenhum deslocamento do feixe de raios catódico observável na tela do tubo. Portanto, neste ponto, $F_m = F_e$, de modo que:

$$q E = q v_0 B \quad \rightarrow \quad v_0 = E/B \quad (3.8)$$

Assim, ao substituir o valor da velocidade inicial (determinada pelos valores dos campos externos aplicados), Thomson pôde, então, obter a relação q/m para as partículas do feixe de raios catódicos:

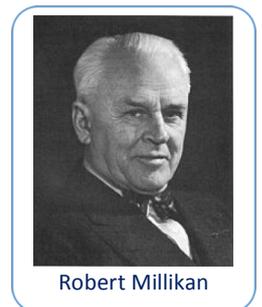
$$\frac{q}{m} = \frac{E}{b \cdot B^2} \left(\frac{y(L)}{L - \frac{b}{2}} \right) \quad (3.9).$$

$$\frac{q}{m} = 1,76 \times 10^{11} \text{ coulomb/kg} \quad (3.10).$$

Para entender completamente a contribuição feita por J. J. Thomson, devemos lembrar que na sua época não se sabia ainda que o átomo era composto de partículas menores (na verdade, nem se sabia exatamente o que era o átomo). Também não se entendia completamente a natureza da eletricidade, isto é, o que de fato eram as cargas e correntes elétricas, por exemplo. Vários experimentos anteriores já haviam demonstrado as propriedades estáticas e dinâmicas das cargas elétricas, e sua capacidade de produzir forças (campos) elétricas e magnéticas, porém, não se sabia o que eram essas cargas.

Além disso, os cientistas da época também conheciam alguns resultados da química (por exemplo: que existiam átomos de diferentes tipos, que se ligavam formando moléculas, obedecendo a certas regras de proporção bem definidas, conservando massa e etc.), e Michael Faraday já havia deduzido seus resultados mais fundamentais de eletroquímica (eletrolise). Tudo isso foi obtido através de experimentos, mas sem compreender exatamente os detalhes por traz daquilo, pelo menos não da mesma forma que entendemos hoje. Ainda assim, não se tinha a menor ideia do que se constituía exatamente o átomo.

A grande contribuição de Thomson foi perceber que o valor tão alto da relação q/m desviasse à pequena massa dessas partículas, e não a um valor grande da carga! Com isso, ele concluiu (corretamente) que a massa dessas partículas era cerca de 2000 vezes menor do que a massa do átomo de hidrogênio (H), o menor átomo conhecido. Como Thomson sabia que isso não dependia do tipo de metal dos eletrodos, ou do gás usado na ampola, ele concluiu que deveria ser algo presente em todos os átomos. Foi isso que o fez propor que essas partículas, que na época ele chamou de “corpúsculos”, deveriam ser partículas internas do átomo. Mas tarde, esse “corpúsculo” passou a ser chamado de elétron: a primeira partícula subatômica descoberta!



3.4. Experimento de Millikan

Embora o elétron tenha sido descoberto em 1897, somente em 1911 foi possível saber, com precisão, o valor de sua carga elétrica (e conseqüentemente sua massa). Isso ocorreu graças a um meticuloso experimento realizado por Robert Andrews Millikan. O experimento de Millikan consistiu em observar cuidadosamente partículas carregadas (gotículas de óleo ionizadas) movendo-se em um campo elétrico. O resultado desse experimento levou à descoberta da carga elementar do elétron e lhe rendeu o [prêmio Nobel de física em 1923](#).

3.4.1. Descrição do Experimento

Considere o esquema experimental a seguir, em que gotículas de óleo ionizadas (carregadas positivamente com radiação ionizante, que remove elétrons) são colocadas no interior de um capacitor.

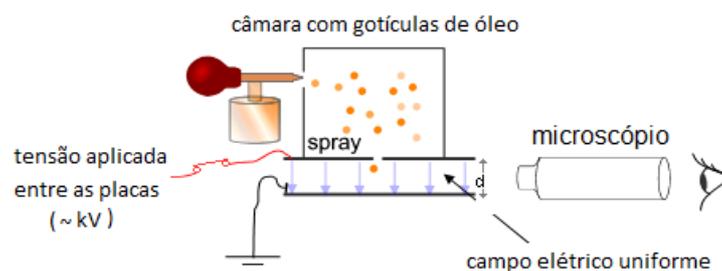


Figura 3.8: Experimento de Millikan simplificado.

Imagine uma gotícula esférica de massa m , carga $+Q$ e raio r no interior de um capacitor. A gotícula sofre a ação de três forças: a força peso (gravitacional), $F_g = mg$; a força elétrica $F_e = Q \cdot E$, e uma força viscosa f (devido à resistência do ar, durante a queda). Veja a figura 3.9.

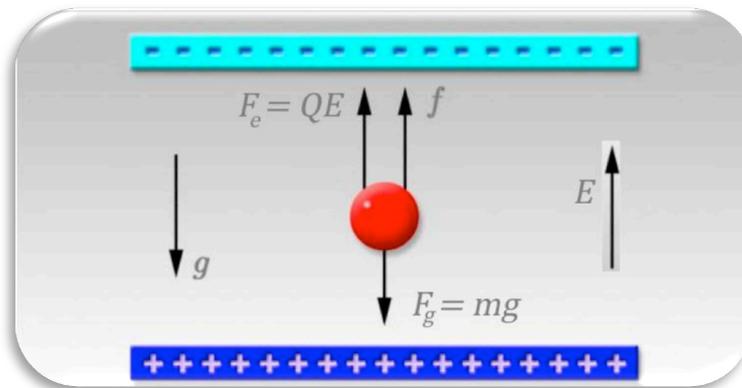


Figura 3.9: Forças que agem sobre a gotícula de óleo.

A seguir veremos como determinar a carga do elétron a partir desse arranjo experimental.

(Como curiosidade, veja o experimento utilizado originalmente por Millikan).

VÍDEOS SOBRE O EXPERIMENTO DE MILLIKAN: (opcional - links do You Tube)

1. [Clique aqui](#) para ver um vídeo divertido, descrevendo o experimento de Millikan!
2. [Aqui](#) está outra descrição, um pouco mais formal.
3. [Imagens](#) de demonstrações do experimento real.
4. Finalmente, [clique aqui](#), para ver imagens de outro experimento real, onde literalmente, os elétrons dançam ao som da música (inclui trilha sonora)!

3.4.2. Determinação da carga elétrica

Primeiro vamos analisar o que aconteceria com a gotícula de óleo na ausência de campo elétrico. A partir da segunda lei de Newton ($F = ma$), a equação de movimento da partícula corresponde a:

$$ma = mg - k r v_y \tag{3.11}$$

Resolvendo a equação para a velocidade vertical³, v_y , é possível obter a velocidade em função do tempo:

$$v_y(t) = \frac{m g}{k r} \left(1 - \exp\left(-\frac{m}{k r} t\right) \right) \tag{3.12}$$

³ Fica como sugestão, usar seus conhecimentos de mecânica e cálculo diferencial para demonstrar esse resultado.

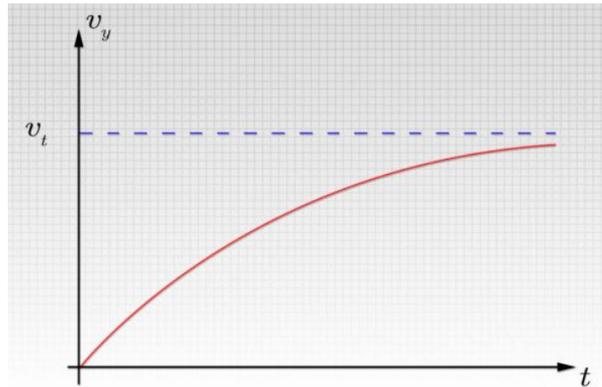


Figura 3.10: Velocidade da gotícula em função do tempo. Devido ao atrito com o ar, a velocidade atinge uma velocidade final constante v_t . Isso é similar ao princípio de funcionamento do paraquedas.

A figura 3.10 mostra como varia a velocidade vertical da gotícula em queda livre, isto é, sem forças externas aplicadas sobre ela (além da gravidade, que a faz cair). Observe que, neste caso, a partícula atinge uma velocidade final constante, v_t . Essa velocidade depende do tamanho (raio, r) da gotícula. Portanto, a partir de v_t , se pode determinar o raio r da gotícula. Em seguida, liga-se o campo elétrico (através da voltagem de uma fonte de alta tensão externa), até que o movimento da partícula cesse, por exemplo. Neste caso, a força peso (gravidade) é exatamente compensada pela força elétrica, cujo valor depende da carga elétrica da gotícula. Se igualarmos as força e isolarmos a variável Q , obtém-se a expressão:

$$Q = \frac{4}{3} \pi \frac{r^3 \rho g}{E_0} \quad (3.13),$$

onde ρ é a densidade do óleo, e E_0 é o campo elétrico externo, produzido entre as placas do capacitor. Escrevendo o raio da gotícula em função de sua velocidade terminal, obtém-se:

$$Q = \sqrt{\frac{3}{4\pi\rho g}} \frac{(k v_t)^{3/2}}{E_0} \quad (3.14).$$

As constantes ρ e k podem ser determinadas experimentalmente, de formas diversas, permitindo a obtenção da carga elétrica Q das gotículas. Millikan e seu assistente Harvey Fletcher fizeram inúmeras medidas, para diferentes valores de Q , com um número muito grande de gotículas diferentes, e perceberam que todos esses valores eram sempre múltiplos de um valor comum: $e = 1,6 \times 10^{-19}$ coulombs. Ou seja, $Q = e N_e$; onde N_e é o número de elétrons. Isso significa que todas as cargas Q observadas eram múltiplos inteiros dessa quantidade e , denominada carga elementar do elétron. Conhecendo-se o valor de e , podemos usar o resultado de Thomson para determinar, finalmente, a massa do elétron:

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (3.15).$$

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (3.16).$$

Note que esse último valor confirma que a massa do elétron é, de fato, muito menor que a massa do átomo de hidrogênio, como supôs Thomson. Portanto, toda a massa do átomo está concentrada noutro lugar. Além disso, onde estão as cargas positivas? Veremos mais sobre isso no próximo capítulo... Até lá!