

Experimento de Millikan

Introdução

À parte as discussões envolvendo a autoria e a análise dos resultados do “experimento da gota de óleo” [1,2], as contribuições científicas feitas pelo físico norte-americano *Robert Andrews Millikan* são inegáveis. Tanto isto é verdade que, em reconhecimento aos seus trabalhos sobre a “carga elétrica elementar e efeito foto-elétrico”, *Millikan* recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1923 [3]. Estritamente relacionado ao experimento da gota de óleo, e que será objeto desta prática, vale mencionar como suas principais características: a precisão na determinação da carga elétrica elementar, e a demonstração de que esta é quantizada. A realização deste experimento permitiu a determinação da carga do elétron a qual, aliada aos trabalhos de *Thomson* (acerca da razão q/m), possibilitou obter os valores da massa do elétron e da constante de *Avogadro* [4].

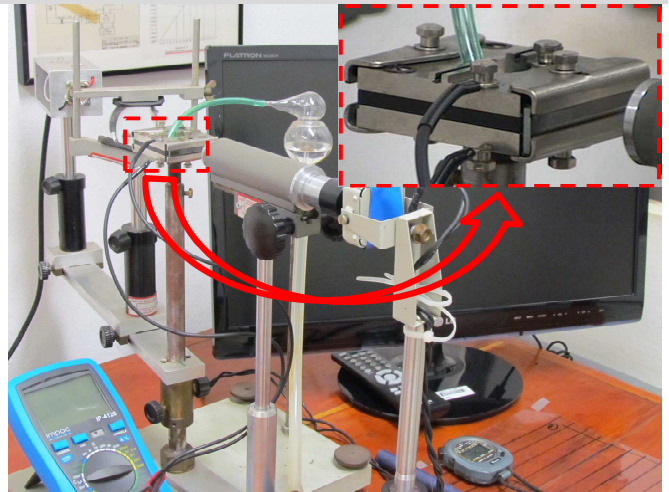
Conforme veremos, o experimento é bastante simples e consiste em medir o tempo de vôo de gotículas de óleo, previamente eletrizadas, em três situações distintas: sujeitas apenas à influência da força da gravidade, e sob a ação de um campo elétrico externo a favor e contra a força da gravidade.

Objetivos

- ☞ Determinar experimentalmente o valor da carga elementar do elétron.
- ☞ Verificar o caráter discreto da magnitude da carga elétrica.
- ☞ Analisar a distribuição de cargas elementares presentes nas gotículas de óleo investigadas.
- ☞ Analisar e discutir criticamente as principais fontes de erro do experimento, tendo em mente o valor atualmente aceito para a carga elementar do elétron.

Equipamentos

- 1 montagem para experimento de *Millikan* (suporte + óleo e pulverizador + luneta + capacitor [em detalhe na foto])
- 1 retículo micrométrico para calibração
- 1 fonte DC (0–1000 V)
- 1 chave reversora de polaridade
- 1 multímetro
- 1 cronômetro
- 1 fonte de luz branca (LEDs)
- 1 câmera CCD acoplada a monitor de vídeo
- Fios para conexão, etc.



Descrição do Experimento

O atrito experimentado pelas gotículas de óleo, ao longo do trajeto reservatório-borrifador-capilar-capacitor, faz com que estas fiquem naturalmente eletrizadas (ganho ou perda de carga elétrica). Uma vez eletrizadas e no interior do capacitor, podemos ajustar a velocidade e a direção do movimento (ascensão ou queda) das gotículas, mediante a aplicação de um campo elétrico externo. O ajuste adequado deste campo externo faz com que seja possível observar uma mesma gotícula por longos períodos de tempo. A Figura 1 a seguir ilustra as três principais situações em que uma gotícula de óleo pode se encontrar.

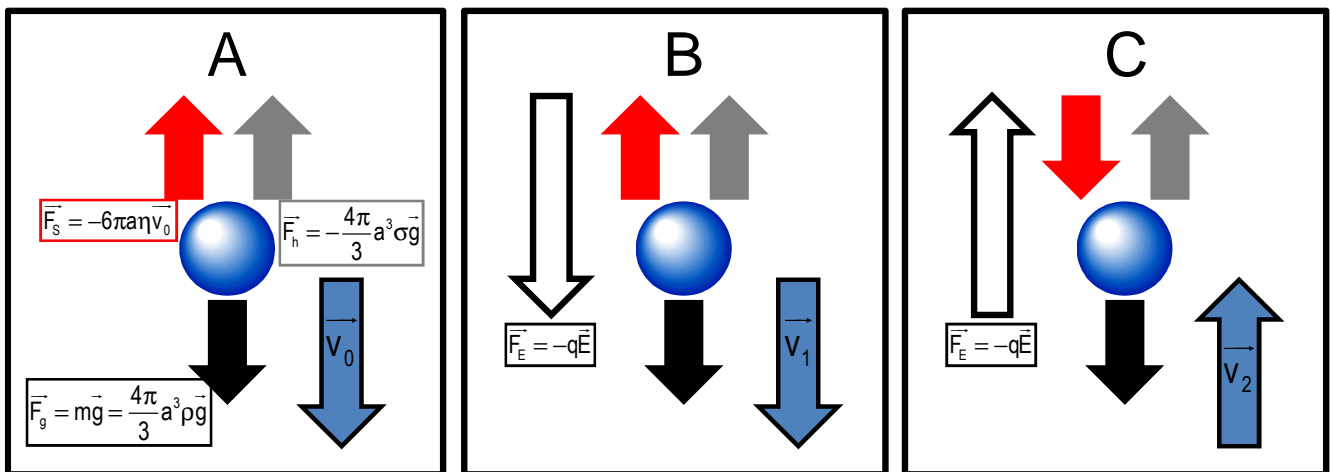


Figura 1 – Esquema das forças atuantes em uma gotícula de óleo, em três situações distintas: **A** – em queda livre ($\vec{E} = 0$), **B** – com campo elétrico anti-paralelo ao gravitacional ($\vec{E} \parallel -\vec{g}$), e **C** – com campo elétrico paralelo ao gravitacional ($\vec{E} \parallel \vec{g}$).

De acordo ao representado na Fig. 1, uma gotícula de óleo, movendo-se com velocidade v , estará sujeita às seguintes forças:

- 1 – Força gravitacional (gotícula de massa m , raio a , e densidade ρ):

$$\vec{F}_g = m\vec{g} = \frac{4\pi}{3}a^3\rho\vec{g}, \quad (1)$$

2 – Força de *Stokes* ou viscosa (com η = viscosidade do ar):

$$\vec{F}_s = -6\pi a\eta\vec{v}, \quad (2)$$

3 – Força de empuxo hidrostático (com σ = densidade do ar):

$$\vec{F}_h = -\frac{4\pi}{3}a^3\sigma\vec{g}, \quad (3)$$

4 – Força elétrica (com q = ne e onde assumimos que temos apenas elétrons):

$$\vec{F}_E = -q\vec{E}. \quad (4)$$

No experimento em questão, a intensidade do campo elétrico é dada pela razão $E = V/d$, onde V corresponde à diferença de potencial aplicada às placas do capacitor separadas pela distância d . Além disto, o sentido do campo elétrico pode ser alterado por intermédio da chave reversora.

Para as situações representadas na Fig. 1, podemos escrever as seguintes equações, tal que $\vec{F}_g + \vec{F}_s + \vec{F}_h + \vec{F}_E = 0$:

Em queda livre –
$$\frac{4\pi}{3}a^3(\rho - \sigma)g = 6\pi a\eta v_0, \quad (5)$$

Campo elétrico anti-paralelo –
$$qE - \frac{4\pi}{3}a^3(\rho - \sigma)g = 6\pi a\eta v_1, \quad (6)$$

Campo elétrico paralelo –
$$qE + \frac{4\pi}{3}a^3(\rho - \sigma)g = 6\pi a\eta v_2, \quad (7)$$

as quais, após alguma álgebra e levando-se em conta que $\rho \gg \sigma$, tal que $(\rho - \sigma) \rightarrow \rho$:

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_1 + v_0) \sqrt{\frac{9\eta^3 v_0}{2\rho g}}, \quad e \quad (8)$$

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_2 - v_0) \sqrt{\frac{9\eta^3 v_0}{2\rho g}}, \quad (9)$$

Na realização do experimento original, *Millikan* notou que o valor da carga das gotículas parecia depender do raio destas e da pressão atmosférica. Sua suspeita estava relacionada à validade da lei de *Stokes* para as gotículas muito pequenas. De fato, quando o diâmetro da gotícula é comparável ao seu livre caminho médio, a viscosidade η (Eq. 2) deve ser corrigida tanto pela temperatura quanto pela pressão local.

No primeiro caso temos que:

$$\eta_0(T) = (17.1 + 0.067T - 0.0004T^2) \times 10^{-6}, \quad (10)$$

onde a temperatura é dada em °C, a viscosidade em Pa.s, e cujo erro é menor que 10^{-7} Pa.s no intervalo de 0–54 °C [CRC Handbook]. E, finalmente:


$$\eta(T,P) = \eta_0(T) \left[1 + \frac{b}{aP} \right]^{-1}, \quad (11)$$

onde P é a pressão atmosférica local (em unidades de cmHg), a = raio da gotícula, e b = const. = 6.17×10^{-4} . Lembre-se que: 1 cmHg = 1333.2 Pa.

Feitas estas correções, a carga de cada gotícula será dada por:

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_1 - v_0) \left[1 + \frac{b}{aP} \right]^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{9\eta^3 v_0}{2\rho g}}, \quad e \quad (12)$$


$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_2 + v_0) \left[1 + \frac{b}{aP} \right]^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{9\eta^3 v_0}{2\rho g}}. \quad (13)$$


 Para a análise dos dados, é conveniente adotar a seguinte sequência: (1) calcular o raio da gota a_0 para uma dada temperatura (Eqs. 10 e 5) tal que $\eta = \eta_0(T)$, e (2) aplicar, na Eq. 11, o a_0 assim encontrado de modo a estabelecer o valor de $\eta(T,P)$ mais adequado para utilização nas Eqs. 12 e 13.


Procedimento Experimental

Partindo de uma montagem semelhante àquela apresentada na foto da página 2, proceda da seguinte forma:

- (a) por intermédio de um paquímetro, meça a separação entre as placas do capacitor,
- (b) garanta que as placas do capacitor encontrem-se alinhadas com o plano horizontal (um nível de bolha deve ser utilizado),
- (c) procure fazer com que os eixos definidos pelo sistema de iluminação e a luneta+CCD estejam à mesma altura e formem um ângulo de $\sim 30\text{--}45^\circ$,
- (d) ajuste a luneta para que o seu foco coincida com o centro do capacitor (para tanto, faça uso de um fio de cobre fino inserido no interior do capacitor),
- (e) posicione o retículo calibrado em um suporte localizado sobre o capacitor e, deslocando verticalmente o conjunto luneta+CCD, determine o fator de correção entre as dimensões “dentro do capacitor” e aquelas indicadas no monitor de vídeo,
- (f) reposicione o conjunto luneta+CCD para visualizar o interior do capacitor sem, contudo, alterar o seu foco – caso isto aconteça, as etapas (c) e (d) devem ser repetidas,
- (g) posicione o conjunto luneta+CCD de forma a obter uma imagem nítida das gotículas, e
- (h) assim que iniciar cada conjunto de medidas experimentais, anote a temperatura da sala e a pressão local. Idealmente, procure realizar o experimento em uma sala climatizada ($T = \text{const}$) e sem correntes de ar.

 Antes de ligar a fonte de tensão DC (0–1000 V), não se esqueça de remover o fio de cobre (utilizado para determinar o foco no interior do capacitor) e o retículo calibrado.

 Durante o experimento, e para minimizar os erros de paralaxe, a gotícula em análise deve sempre estar em foco. Caso necessário, desloque o conjunto luneta+CCD como um todo: jamais altere o foco da luneta!

 Lembre-se que as imagens observadas, tanto na luneta quanto no monitor de vídeo, estão invertidas! Gotículas movendo-se para baixo, na verdade, estão subindo e vice-versa.

 As tensões aplicadas às placas do capacitor são, tipicamente, da ordem de 400–500 V.

O valor da(s) carga(s) contida(s) em cada gotícula será dado por intermédio das Eqs. 12 e 13. Logo, precisamos conhecer as velocidades que a gotícula assume em cada uma das três situações representadas na Fig. 1.

Enquanto o sentido do movimento das gotículas pode ser alterado com o auxílio da chave reversora (campo elétrico desligado, e dirigido para cima ou para baixo), a velocidade das gotículas é definida pelo seu tempo de vôo. Assim sendo, as velocidades serão determinadas a partir da razão do espaço percorrido S (medido indiretamente na tela do monitor de vídeo) pelo correspondente tempo gasto t (medido com um cronômetro).

Durante o experimento, medem-se várias vezes o tempo t que uma mesma gotícula leva para percorrer a distância S , para as três situações indicadas na Fig. 1. Eventualmente, a gotícula considerada pode ganhar (ou perder) carga, devido a colisões com outras gotículas presentes no interior do capacitor. Neste caso, verifica-se uma mudança brusca nos tempos medidos. Durante a coleta de dados experimentais, faça uma tabela que permita identificar a gotícula, e seu tempo de vôo nas situações A, B e C (Fig. 1). A qualidade dos seus resultados vai depender do tamanho da sua amostragem: quanto mais gotículas forem medidas, melhor!

No experimento original, *Millikan* e seus estudantes investigaram mais de 1000 gotículas, em cerca de 1 ano de trabalho. Ao fazerem um histograma dos resultados obtidos, verificaram que as cargas presentes nas gotículas sempre ocorriam como um múltiplo (inteiro) de uma quantidade bem definida. Com isto, foi possível determinar a carga elétrica elementar, bem como ficou demonstrado o seu caráter discreto ou quântico.

Ainda que nossos objetivos sejam mais modestos (familiarização com o experimento da gota de óleo + determinação de q + verificação do caráter discreto de q), espera-se que um mínimo de 50 gotículas distintas sejam medidas e analisadas.

Questões

- ! Enuncie e discuta algumas razões pelas quais gotículas pequenas não obedecem à lei de *Stokes*.
- ! De quanto a correção devida ao princípio de *Arquimedes* afeta os seus cálculos? Faça esta correção para uma das gotículas estudadas.
- ! Demonstre que a velocidade de cada gotícula é dada por
- $$v = \frac{mg}{6\pi a\eta} \left[1 - \exp\left(-\frac{6\pi a\eta}{m} t\right) \right].$$
- ! Determine o tempo necessário para que uma gotícula atinja sua velocidade terminal, e compare-o com os valores medidos.
- ! Discuta a respeito das fotos-figuras apresentadas na primeira página deste roteiro: você saberia identificá-las e dizer do que tratam?

Referências

Física Moderna

College Physics (OpenStax College, 2012) <http://cnx.org/content/col11406/latest/>.

Paul Tipler, *Física Moderna* (5ª Ed., Livros Técnicos e Científicos 2010) – **539^T595f**

Arthur Beiser, *Conceitos de Física Moderna* (McGraw-Hill, 1987) – **539^B423c**

Robert Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica* (Ed. Campus, 1979) – **530.12^E36f**

História (conforme apresentadas na Introdução)

[1] <http://freepdfdb.com/pdf/my-work-with-millikan-on-the-oildrop-experiment-38833068.html>

[2] <http://freepdfdb.com/pdf/an-appraisal-of-the-controversial-nature-of-the-oil-drop-46038732.html>

[3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/

[4] <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/historical1.html>

Experimento da Gota de Óleo & $\eta(T)$

R. A. Millikan, “On the elementary electrical charge and the Avogadro constant”, *Phys. Rev.* **2**, 109 (1913) – http://prola.aps.org/abstract/PR/v2/i2/p109_1

H. Fletcher, “My work with Millikan on the oil-drop experiment”, *Physics Today* **35**, 43 (1982) – <http://freepdfdb.com/pdf/my-work-with-millikan-on-the-oildrop-experiment-38833068.html>

A. C. Melissinos and J. Napolitano, *Experiments in Modern Physics* (Academic Press, 2003) – **539^M523e 2ed**

D. R. Lide (Editor), *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, 2003) – **P530.1441^S769 3ed** – <http://www.holsoft.nl/physics/ocmain.htm>

Simulações

http://webphysics.davidson.edu/applets/pgp_preview/contents/pgp_errata/cd_errata_fixes/section4_5.html

<http://physics.wku.edu/~womble/phys260/millikan.html>

<http://www.dr-sein.com/personal/millikan.html>

Créditos

Ao longo dos anos, este roteiro passou por diversas atualizações e melhorias. Neste processo, tiveram participação ativa os Profs M. A. Aegerter, M. Siu Li, C. E. Munte, R. A. Carvalho e A. R. Zanatta.

A foto da montagem experimental (com o detalhe do capacitor de placas planas) foi feita pelo Prof. M. Siu Li.

As diferentes fotos-figuras apresentadas na pg. 1 foram obtidas da *internet*.