

## DETERMINAÇÃO DA CARGA ELEMENTAR: EXPERIÊNCIA DE MILLIKAN

### I- Objetivos

A experiência tem como principal objetivo a verificação do caráter discreto da carga elétrica. O método utilizado baseia-se na ação de um campo elétrico em uma gotícula de óleo eletrizada. A experiência conduzida por Millikan em 1909, ref. (1) mostrou que qualquer carga  $q$  é sempre um múltiplo inteiro,  $k$ , de uma carga elementar; ou seja, a menor carga existente: a carga de um elétron. (Importante salientar estudos sobre elétron fracionário) ref. (2).

### II- Fundamentos Teóricos

A experiência de Millikan consiste em se pulverizar gotículas de óleo no espaço entre as placas de um condensador de placas paralelas. Com o auxílio de um feixe de luz focalizado sobre as gotículas e um microscópio pode-se visualizar aquelas gotículas, e medir-se suas velocidades (fig. 1).

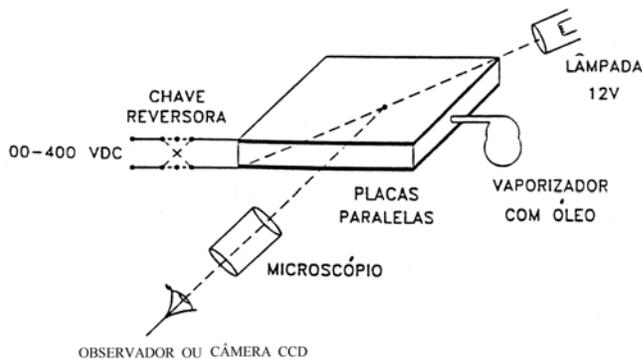


Figura 1:

Normalmente, ao serem produzidas, as gotas adquirem algumas cargas eletrônicas e a aplicação de um campo elétrico permite a gota adquirir diferentes velocidades. Ajustando-se adequadamente o valor desse campo, é possível observar-se uma gota particular por longos períodos de tempo.

Em geral, uma gotícula estará submetida às seguintes forças ref. (3) (ver fig. 2):

- 1- Força elétrica,  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ , onde  $q = ne$ .
- 2- Força gravitacional  $\vec{F}_g = m\vec{g} = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho\vec{g}$

3- Força viscosa ou de Stokes,  $\vec{F}_s = 6\pi a\eta\vec{v}$

4- Empuxo hidrostático, devido ao fato de a gota estar imersa no ar:  $\vec{F}_h = -\frac{4}{3}\pi a^3\sigma\vec{g}$  onde  $\sigma$  é a densidade do ar. É, em geral, desprezível.

O campo elétrico é dado pela razão:  $E = V/d$ , onde  $V$  é a diferença de potencial aplicada às

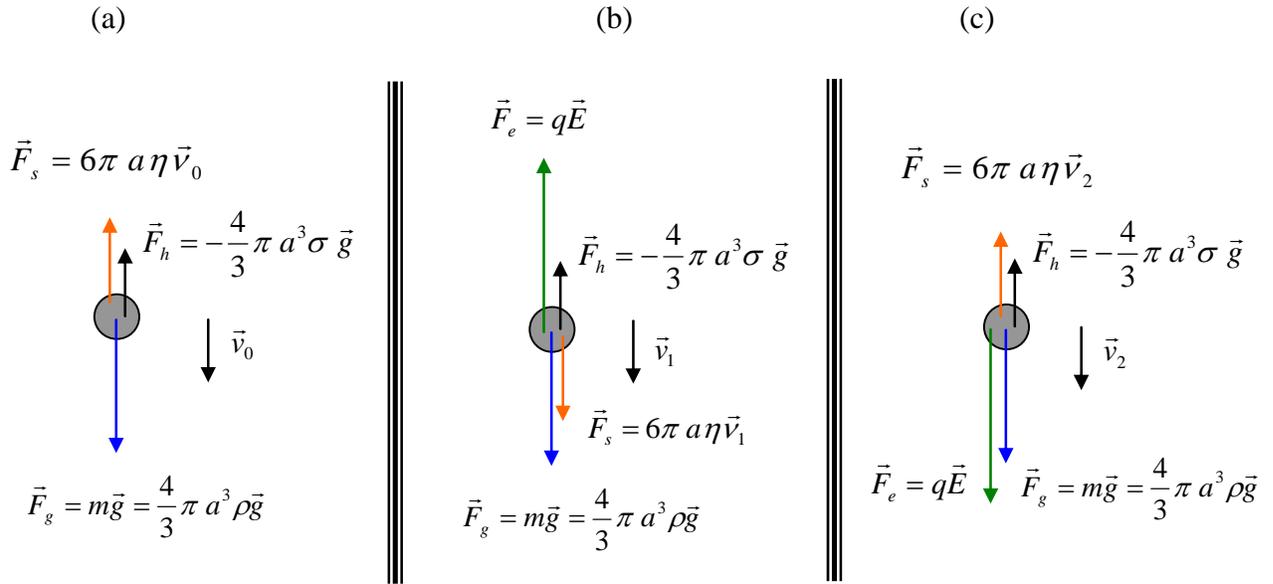


Figura 2: Esquema de forças atuantes na gotícula de óleo. (a) Sem campo elétrico. (b) Com campo elétrico em sentido oposto à gravitacional. (c) Com campo elétrico no mesmo sentido à gravitacional.

placas e  $d$  a separação entre elas.  $\rho$  é a densidade da gota de óleo e  $\eta$  a viscosidade do ar, que depende da temperatura, e  $a$  o raio da gota.

Para as três condições esquematizadas na fig. 2 têm-se as seguintes equações:

$$\frac{4}{3}\pi a^3(\rho - \sigma)g = 6\pi a\eta v_0 \quad (1)$$

$$qE - \frac{4}{3}\pi a^3(\rho - \sigma)g = 6\pi a\eta v_1 \quad (2)$$

$$qE + \frac{4}{3}\pi a^3(\rho - \sigma)g = 6\pi a\eta v_2 \quad (3)$$

Após algumas manipulações algébricas e aproximando  $(\rho - \sigma) \rightarrow \rho$ , encontramos o valor da carga  $q$  para as situações esquematizadas na fig. 2.

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_1 + v_0) \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta^3 v_0}{\rho g}} \quad (4)$$

e

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_2 - v_0) \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta^3 v_0}{\rho g}} \quad (5)$$

Nas experiências realizadas por Millikan, ele observou que o valor da carga parecia depender do tamanho da gotícula e da pressão do ar. Suspeitou que a dificuldade estivesse relacionada com a validade da lei de Stokes, achando que não se verificava para gotas muito pequenas. Na verdade, quando o diâmetro da gota é comparável ao livre caminho médio no ar, a viscosidade (na lei de Stokes) deve ser substituída pela expressão ref. 3:

$$\eta(T) = \eta_0(T) \left[ 1 + \frac{b}{aP} \right]^{-1} \quad (6)$$

onde  $\eta_0(T)$  é a viscosidade do ar seco em função da temperatura  $T$  (veja fig. 3); e  $P$ , é a pressão atmosférica local em  $cm\ Hg$  e  $b = 6,17 \times 10^{-4}$  (constante)

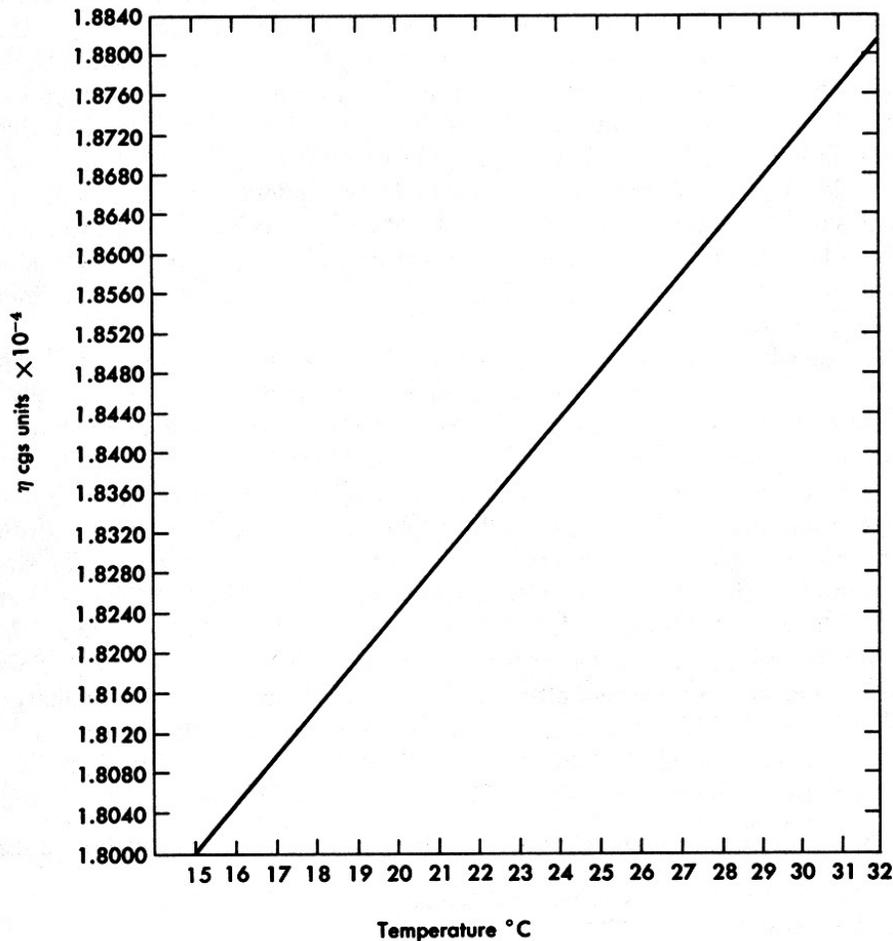


FIG. 1.3 Viscosity of dry air as a function of temperature.

Figura 3: Viscosidade do ar seco em função da temperatura.

a carga da gotícula será então dada pelas expressões:

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_1 + v_0) \left(1 + \frac{b}{aP}\right)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta_0^3 v_0}{\rho g}} \quad (7)$$

e

$$q = 6\pi \frac{d}{V} (v_2 - v_0) \left(1 + \frac{b}{aP}\right)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta_0^3 v_0}{\rho g}} \quad (8)$$

Na análise dos dados, é conveniente calcular inicialmente o valor do raio da gota, como sendo  $a_0$ , fazendo na eq. (1),  $\eta = \eta_0(T)$ , e em seguida, o valor de  $a_0$  é inserido na expressão (6) para obter  $\eta(T)$ , isto é, será obtido um valor mais preciso para  $\eta(T)$ .

O estudante deverá consultar as referências 3 e 4.

### **III- Aparelhagem utilizada**

Ver esquema da figura 1.

- 1- Equipamento para experiência de Millikan (um capacitor de placas paralelas, óleo de silicone, bomba para pulverização do óleo, etc.).
- 2- Uma fonte 0 – 1000 V (DC) para aplicar no capacitor de placas paralelas.
- 3- Lâmpada de 12 V com lente para iluminação da gota.
- 4- Um microscópio.
- 5- Cronômetro.
- 6- Voltímetro com escala adequada (multímetro).
- 7- Chave reversora.
- 8- Estágio micrométrico para calibração da escala da ocular.
- 9- Fonte radioativa (se necessário).
- 10- Câmera CCD se houver disponibilidade.
- 11- Vídeo Cassete para gravar gotícula, se houver disponibilidade.

### **IV- Procedimento**

Faça a montagem esquematizada na fig. 1, buscando a melhor posição para a lâmpada de iluminação das gotículas (os eixos óticos do microscópio e o sistema de iluminação devem fazer um ângulo entre 30° a 45°). **É importante que o foco da lâmpada esteja sobre as gotículas.**

- Ajuste o foco da ocular do microscópio de modo a ter-se uma imagem nítida dos retículos. Focalize a seguir o microscópio para obter uma imagem igualmente nítida da escala (estágio) micrométrica. Este último deve ser colocado sobre o capacitor e cujo plano passa pelo eixo do capacitor. Com esta operação, poderá calibrar a escala do retículo da ocular (ou a escala de seu micrômetro). Doravante, não altere mais a distância entre a ocular e a objetiva; do contrário, a calibração feita antes será alterada!

- Proceda a orientar o microscópio até encontrar a posição adequada para ver nitidamente as gotículas. Lembre-se que a imagem observada estará invertida!
- As placas do capacitor devem ser perpendiculares ao campo gravitacional; isto é, conseguido com a ajuda de um pequeno nível de bolha.
- Com o auxílio de um fio de cobre fino inserido num dos furos por onde as gotículas de óleo devem transitar para o interior do capacitor, é possível obter um bom alinhamento de focalização com o microscópio.
- As velocidades serão determinadas medindo-se o tempo de transito entre duas linhas paralelas ao longo do qual as gotículas transitam, utilize um cronômetro. Determine o valor  $S$  da distância percorrida a ser cronometrada.
- A gota deve ser sempre mantida “em foco” para não haver erros de paralaxe. Para este fim, desloque se necessário, todo o microscópio; isto é, não altera a posição da ocular em relação à objetiva. Obtenha o valor da densidade  $\rho$  do óleo.
- A chave reversora que comanda a aplicação da d.d.p. no capacitor possui três posições permitindo:
  - (a) aplicação do campo elétrico no mesmo sentido a  $\vec{g}$ .
  - (b) campo “desligado”.
  - (c) campo com sentido oposto a  $\vec{g}$ .
- Utilize voltagens entre 400 V e 500 V se a separação entre as placas do capacitor for da ordem de 5mm. Meça a distância  $d$  entre as placas.
- Durante a experiência, medem-se várias vezes o tempo que uma mesma gotícula leva para percorrer a mesma distância  $S$  (dada pelo retículo da ocular) e para as três situações anteriormente mencionadas (mudando-se as posições da chave inversora). Às vezes, as gotículas ganham (ou perdem) uma ou mais cargas elementares, devido a colisões com íons já existentes ou criados por uma fonte radioativa (o que pode ser percebido devido a uma mudança brusca na medida dos tempos).
- Construa uma tabela com os dados das situações da figura 2.
- Se uma fonte radioativa for utilizada para alterar-se o valor da carga da gotícula, o campo elétrico deverá ser momentaneamente desligado durante esta operação.
- Na experiência original, Millikan observou mais de 1000 gotas, em mais de 1 ano de trabalho; tendo feito um histograma, das cargas medidas.

Verificou que as cargas adquiridas pelas gotículas eram sempre um múltiplo (inteiro) de uma carga elementar e comprovou empiricamente a quantização ou o caráter discreto ou “granular” da carga elétrica.

Nosso objetivo aqui, porém, consiste no conhecimento da experiência e a observação do caráter discreto da carga das gotículas e a obtenção da carga do elétron, observando-se apenas os tempos de vôo para 50 gotículas distintas ou mais.

Não se esquecer de anotar a temperatura ambiente e a pressão barométrica local.

Para mais detalhes, o estudante deverá consultar a referência (3).

## V- Questionário

- 1- Discuta as razões possíveis porque a lei de Stokes não seja satisfeita para gotículas pequenas.
- 2- Em quanto a correção devida ao princípio de Arquimedes afeta seus cálculos? Faça esta correção para uma das gotículas estudadas.
- 3- Demonstre que a velocidade da gotícula em função do tempo é dada por

$$v = \frac{mg}{6\pi a \eta} \left( 1 - e^{-\frac{6\pi a \eta t}{m}} \right)$$

Determine o tempo necessário para que a gotícula atinja a velocidade terminal, e compare com os tempos de vôo medidos na experiência.

## VI- Bibliografia

- 1- Harvey Fletcher, *My Work with Millikan on the oil-drop experiment*, Physics Today, June 1982.
- 2- Ver edição especial sobre elétron. Physics Today, Oct. 1997.
- 3- Adrian C. Melissinos, *Experiments in Modern Physics*, Academic Press.
- 4- D. Halliday e R. Resnick, *Física*, cap. 27 (1967) (Biblioteca IFSC 530.071 H 188 f2 v1).

Versão atualizada de outras apostilas: M. A. Aegerter, M. Siu Li, C. E. Munte, R. A. Carvalho.