EXPERIÊNCIA DE MILLIKAN

I. OBJETIVOS

- Verificar a natureza quântica da carga elétrica;
- Determinar a carga do elétron;
- Analisar o método de medida;
- Identificar os fatores experimentais que interferem na experiência.

II . MATERIAL DISPONÍVEL

- Suporte tripé com condensador de placas paralelas, fonte de luz, microscópio e chave inversora;
- Fonte de tensão continua;
- Voltímetro;
- Cronômetro;
- Paquímetro;
- Nebulizador com óleo;
- Nível de Bolha;
- Escala graduada para calibração da escala na ocular.

III. INTRODUÇÃO

Devido à importância histórica desse experimento, é de interesse para o aluno ler com atenção a descrição circunstanciada dos fatos[(1)] e das personalidades envolvidas.

A verificação experimental da natureza quântica da carga elétrica, bem como a determinação do seu valor mínimo, é de realização conceitualmente simples. Quando efetuada pela primeira vez, em 1910, por Fletcher e Millikan, causou um impacto sobre os conceitos até então vigentes em física atômica a ponto de render a Millikan o prêmio Nobel[(2)]. Logo a seguir, foram publicados mais quatro trabalhos discutindo diversos aspectos sobre a mesma série de experimentos[(3-6)]. Para um estudo dos fundamentos teóricos dessa experiência, o aluno deverá selecionar textos da literatura, entre os quais citamos algumas referências[(7-10)]. Algumas discussões e relatos de experimentos específicos, ainda relacionados com o mesmo assunto, foram publicados em artigos recentes [(11-15)] mostrando que sempre é possível desenvolver aspectos ainda inexplorados em uma questão qualquer. A criatividade não tem limites.

A experiência consiste em determinar a carga elétrica de uma gota de óleo eletrizada, medindo seu movimento de descida e de subida entre as placas de um condensador posicionado horizontalmente.

Em primeiro lugar, vamos desenvolver um método para determinar o raio da gota a partir de medidas dos tempos de descida td e de subida ts decorridos para percorrer uma trajetória delimitada por dois traços de referência, previamente escolhidos. Deve-se utilizar um mesmo potencial, tanto para a descida como para a subida da gota, cujo valor seja tal que os tempos medidos durem aproximadamente 10 segundos. Fica a cargo do estudante fazer um esboço de todas as forças envolvidas (assumir que a gota se movimenta em equilíbrio dinâmico) e escrever a equação do movimento. A partir das equações de movimento e utilizando a correção no coeficiente de viscosidade do ar (vide Apêndice B), mostre que o raio da gota é dado pela relação:

$$a = \frac{b}{2p} + \sqrt{\frac{b^2}{4p^2} + \frac{9\eta(v_d - v_s)}{4(\rho_o - \rho_{ar})g}}$$

onde:

a = Raio da gota;
b = Constante = 6.17.10-4 (cm de Hg)cm;
p = Pressão atmosférica;
η = Coeficiente de viscosidade à temperatura ambiente (vide Apêndice B);
ρ = Densidade do óleo;
ρar = Densidade do ar;
g = Aceleração da gravidade;
V_d = Velocidade da descida da gota;
V_s = Velocidade da subida da gota

Mostre, também, que a carga elétrica da gota é dada pela expressão:

$$q = \frac{3\pi\eta ad}{V}(Vs + Vd)$$

Onde:

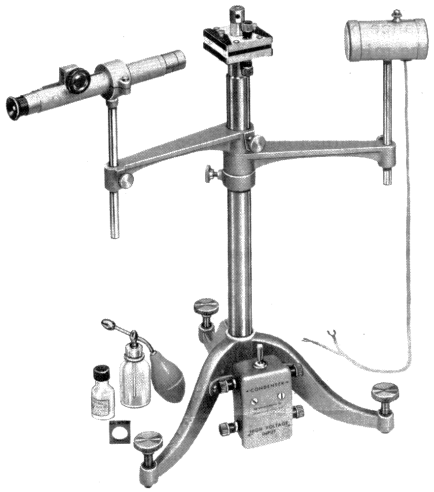
$$\eta = \eta_0 \left[1 + \frac{b}{pa}\right]^{-1} \quad (\textit{vide Apêndice B})$$

V = Potencial aplicado às placas do condensador;
d = Distância entre as placas do condensador;

As velocidades vd e vs devem ser obtidas utilizando dez vezes a expressão $V = \ell / t$, calculando-se em seguida o valor médio $\bar{v}$ e o desvio padrão da média $\sigma_{\bar{v}}$. Tome cuidado para não confundir $\sigma_{\bar{v}}$ com o desvio padrão das velocidades!

IV. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O movimento das gotas de óleo será observado para se medir as velocidades de descida e de subida (campo elétrico produzido por uma diferença de potencial V), entre as placas de um condensador, onde são iluminadas e observadas através de um microscópio posicionado na horizontal. O condensador está adaptado a um tripé em conjunto com o microscópio e uma fonte de luz como mostra a figura.



As expressões (1) e (2) contêm os parâmetros a serem medidos para calcular a carga q.

Partículas que se movimentam em meio liquido ou gasoso estão sempre sofrendo choques de moléculas do meio. Devido à existência de flutuações na densidade do fluido, as partículas pequenas (a ≈ 10-5 cm) ficam sujeitas a um movimento aleatório que acarreta uma incerteza na sua posição. Este efeito, que é uma conseqüência da natureza atômica da matéria, é o chamado Movimento Browniano. Demonstra-se[16] que o quadrado da incerteza na posição da partícula é proporcional ao tempo de observação e inversamente proporcional ao raio a:

$$\left\langle \Delta x^2 \right\rangle \quad \alpha \frac{\Delta t}{a}$$

Onde:

Δx = deslocamento da partícula devido ao movimento browniano ou incerteza na posição da partícula;

Δt = tempo de observação;

$\langle \Delta x^2 \rangle$ = desvio quadrático médio da posição x.

Podemos afirmar, então, que a incerteza da posição prevista da gota é tão maior quanto maior for o tempo *t* de descida ou de subida ou quanto menor for o seu raio a. Por outro lado, se $t \leq 5s$, o erro introduzido nas medidas de tempo, devido à limitação no tempo de reflexo do operador, passará a predominar nos resultados.

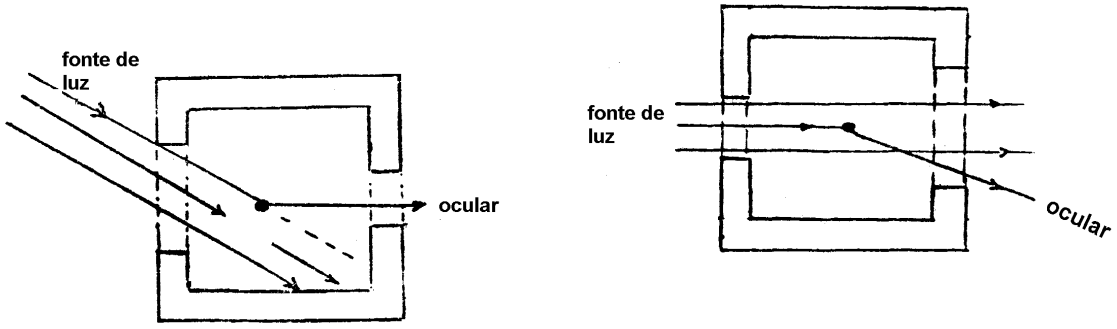
Em um artigo recente[11], a análise deste problema levou à representação gráfica de $\sigma q/q$ x t que passa por um mínimo para $t \approx 10s$. É conveniente, então, a escolha do potencial V tal que $5s \leq (ts \text{ e } td) \leq 30s$ para que se obtenha $\sigma q/q \leq 0{,}10$ (na melhor das hipóteses, espera-se obter $\sigma q/q = 0{,}05$).

O condensador contém, na placa superior, orifícios por onde devem entrar as gotículas de óleo. Ele deve ser bem limpo e os orifícios desimpedidos. Se você tiver dificuldade em observar a gota, evite nebulizar em excesso, pois só irá contribuir para obstruir os orifícios. Ao lidar com a nebulosidade, observe atentamente o processo que se desenvolve em seu interior e procure explicar o principio de seu funcionamento, é muito interessante.

Certifique-se de que as placas do condensador estão bem niveladas. Ao determinar a distância entre as placas lembre-se de efetuar várias medidas em lugares diferentes.

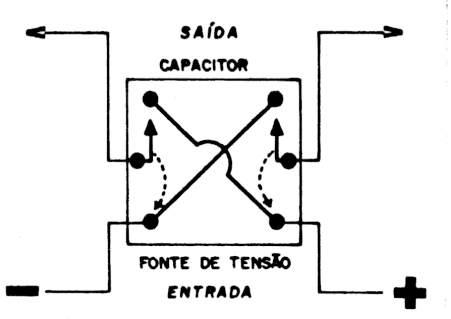
As direções de iluminação e de observação através do microscópio devem ser ajustadas de modo a conseguir a visualização de uma nuvem de gotículas quando se aciona o nebulizador. Estas direções são bastante criticas e importantes para a realização de medidas. A operação de ajustar a iluminação, na qual se deve adquirir um certo treino, é a primeira que deve ser feita.

Note que o condensador é fechado lateralmente e possui duas janelas opostas de tamanhos diferentes que permitirão a observação e a entrada de luz. As duas situações possíveis de montagem estão esquematizadas abaixo. Para se obter o posicionamento inicial do foco do microscópio coloca-se, através de um dos orifícios do condensador, um fio que deverá ser iluminado e observado. Uma situação de iluminação favorável à posterior observação das gotículas é aquela em que o fio aparece com contorno bem brilhante num fundo acinzentado.



Conseguida essa situação, experimente injetar as gotas e melhorar o ajuste. Não se esqueça de retirar o fio antes de ligar o circuito.

A diferença de potencial no condensador será medida por um voltímetro ligado convenientemente à saída da fonte de tensão. Uma chave inversora (que permite alterar a polaridade das placas) estabelecerá a ligação entre a saída da fonte e o condensador. Uma terceira posição da chave, a do meio, não foi indicada na figura por simplicidade e corresponde à interrupção do fornecimento de tensão as placas, ao mesmo tempo em que são ligadas em curto-circuito para que não permaneça qualquer carga residual, o que poderia falsear as medidas efetuadas durante a queda livre da gota.



Na figura está representada uma chave inversora de tensão e sua ligação ao circuito

O valor da diferença de potencial pode ser fixo em um valor localizado entre 100 e 300 V escolhido de tal modo que 5s < ts, td < 30s.

Estabeleça uma diferença de potencial no condensador e observe o movimento das gotículas. A maior parte delas, eletrizadas pelo atrito do óleo com o vidro do nebulizador, tem carga negativa.

A calibração da escala da ocular é feita por comparação com uma escala padrão que se coloca sobre o condensador. Observe essa escala através do microscópio e superponha a sua imagem com a escala da ocular. Faça um gráfico representando os valores da escala da ocular nas abscissas e os da escala padrão nas ordenadas. Você espera obter uma reta nesse gráfico? Por quê?

A medida da temperatura será lida em um termômetro localizado na sala de aula. Esse procedimento poderá introduzir erros nos parâmetros que dependem da temperatura. Lembre-se de que as gotículas são fortemente iluminadas e de que a absorção da luz no interior do condensador certamente irá acarretar um aquecimento (efeito estufa). Procure, de algum modo, minimizar esse problema.

V. ANÁLISE DO PROCEDIMENTO E ESCOLHA DA GOTA

Em primeiro lugar, convém exercitar a viabilidade de se determinar com presteza os valores aproximados do raio *a* e da carga *q* da gota. A partir da expressão (1), com
vc = lc/tc onde vc, lc e tc são, respectivamente, a velocidade, o percurso e o tempo de queda livre (V = 0) (fazendo lc = 1mm, por exemplo) pode-se construir um gráfico de a x tc em papel di-log, ou então aproveitar o Gráfico I do Apêndice A. Em geral como é mais provável encontrar as menores cargas nas menores gotas, o valor de tc poderá ser muito maior do que 30s para tc = 1mm. É recomendável, então, escolher um valor conveniente de lc para evitar tempos de queda longos demais. A velocidade terminal é atingida em $\approx 10^{-6}$ s, pelo que a consideramos constante, bastando usar uma regra de três simples antes de usar o gráfico.

O gráfico II do Apêndice A foi construído a partir da expressão (2) com a suposição de que a carga total da gota é um múltiplo do valor da carga elementar. A partir do conhecimento dos tempos de subida e de queda da tensão aplicada entre as placas pode-se estimar o número de cargas elementares contidas na gota.

Os gráficos I e II devem ser considerados apenas como auxiliares para a seleção da gota. Os valores de *a* e *q* deverão ser posteriormente calculados, utilizando todos os parâmetros, cuidadosamente determinados e com os respectivos erros avaliados. As condições da pressão e temperatura deverão ser medidas no inicio e no final da experiência.

A densidade ρ do óleo já foi previamente determinada e o seu valor está afixado em um lugar visível da sala. Os valores da densidade do ar em função da temperatura também estão afixados. A correção para o coeficiente de viscosidade η e a tabela dos valores de η_0 (em unidades cgs, onde a unidade chama-se poise) em função da temperatura aparecem no Apêndice B. Como estamos trabalhando no sistema cgs, convém lembrar que 1volt = 1/300 statvolt.

Discuta com o seu professor sobre os efeitos de fatores secundários que podem introduzir erros sistemáticos nas medidas e procure a melhor forma de controlá-los.

VI. VERIFICAÇÃO DA NATUREZA QUÂNTICA DA CARGA ELÉTRICA

Para se obter a carga do elétron é preciso, antes de tudo, acreditar na sua existência. Convém, portanto, mostrar que a carga q da gota é um múltiplo inteiro de uma carga elementar e, cujo valor pretendemos medir. Essa verificação só é possível através da análise estatística de um número suficientemente grande de dados experimentais. Faça um histograma da freqüência de valores de q nos intervalos dos valores de carga convenientemente espaçados no eixo das abscissas, utilizando o total de dados levantados pela sua classe. Cada grupo deve tentar obter o máximo número de valores de cargas tais que $q\text{max} / q\text{min} \leq 10$. Faça uma análise desse histograma concluindo se foi possível ou não provar a quantização da carga.

VII. DETERMINAÇÃO DA CARGA DO ELÉTRON

Escolha os valores de uma das gotas estudadas pelo seu grupo (de preferência, com o mínimo número de elétrons). Calcule o valor de q baseado nas expressões (1) e (2) e calcule σ_q usando a teoria da propagação de erros. Apresente esses cálculos explicitamente no seu relatório. Compare este resultado com o valor do elétron obtido a partir da média dos resultados de todas as cargas e = q/n medidas pelo seu grupo e determine o respectivo desvio padrão. Observe que para as cargas maiores fica cada vez mais difícil definir com segurança o número de elétrons. Compare também esses resultados com o valor de e hoje aceito.

BIBLIOGRAFIA

1. - H. Fletcher - "My work with Millikan on the oil-drop experiment". Physics Today, June 1982, p. 43 (publicação póstuma).
2. - R-A- Millikan - "The isolation of an ion, a precision measurement of its charge, and the correction of Stoke's Lav". Science, 30 september 1910.
3. - R. A. Millikan & H. Fletcher - "Causes ar apparent discrepancies and recent work on the elementary electrical charge". Phis. Z., January 1911.
4. - H. Fletcher - "Some contributions to the theory of Brownian movements, with experimental applications". Phys. Z., January 1911.
5. - R. A. Millikan & H. Fletcher - "The question of valency in gaseous ionization". Phil. Mag., June 1911.
6. - H. Fletcher - "A verification of the theory of Brownian movements and a direct determination of the value for Negaseous ionization". Phys. Rev., August 1911, and Le radium, 1 July 1911.
7. - Melissinos - "Experiments in Modern Physics".
8. - Harnwell & Livingood - "Experimental Atomic Physics".
9. - R. A. Millikan - "Electrons (positive and negative)".
10. - Enge, Vehr & Richards - "Introduction to Atomic Physics".
11. - Kapusta - "Best measuring time for a Millikan oil drop experiment". American Journal of Physics 43 [91, 799 (1975)
12. - C. N. Wall & F. E. Christensen - "Dual-purpose Millikan experiment with polystirene

spheres". American Journal of Physics 43 [5], 408 (1975).
13. S. La Rue, J. D. Philips & W. H. Fairbank - "Observation of fractional charge of (1/3)e on matter". Phys. Rev. Letters 46 [15], 967 (1981).
14. - W. H. Fairbank, Jr. & S. Franklin - "Did Hillikan observe fractional charges on oil drops?". American Journal of Physics, 50 [51, 394 [1982).
15. - Y. W. Kim & P. D. Fedele - "Evldence for failure of Hillikan's law of particle fali in gases". Phys. Rev. Letters, 48 [61], 403 (19821.
16. - Apostila do Laboratório de Estrutura da Matéria e Física Moderna (2° semestre de 1986) - "O Movimento Browniano". P. 35 e referências.
17. - Helene, O. A. M. & Vanin, V. R. - "Tratamento estatístico de dados em Física Experimental".

APENDICE A

APÊNDICE B

CORREÇÃO PARA O VALOR DA VISCOSIDADE DO AR η

Tendo em vista que o diâmetro da gota é comparável com seu caminho livre médio no ar (em relação às gotículas de óleo) não se pode desprezar a não homogeneidade do fluido. Desta maneira requer-se efetuar uma correção no coeficiente de viscosidade do ar:

$$\eta = \eta_0 \left[1 + \frac{b}{pa} \right]^{-1}$$

p = pressão atmosférica
η = coeficiente de viscosidade à temperatura ambiente
$b = 6{,}17.10^{-4}$ (cm de Hg) cm, quando a pressão for medida em cm Hg
Esta correção na viscosidade implica em correção no raio da gota a ser utilizado para determinação da carga q. Os valores de η_o em função da temperatura estão repre sentados no gráfico abaixo.

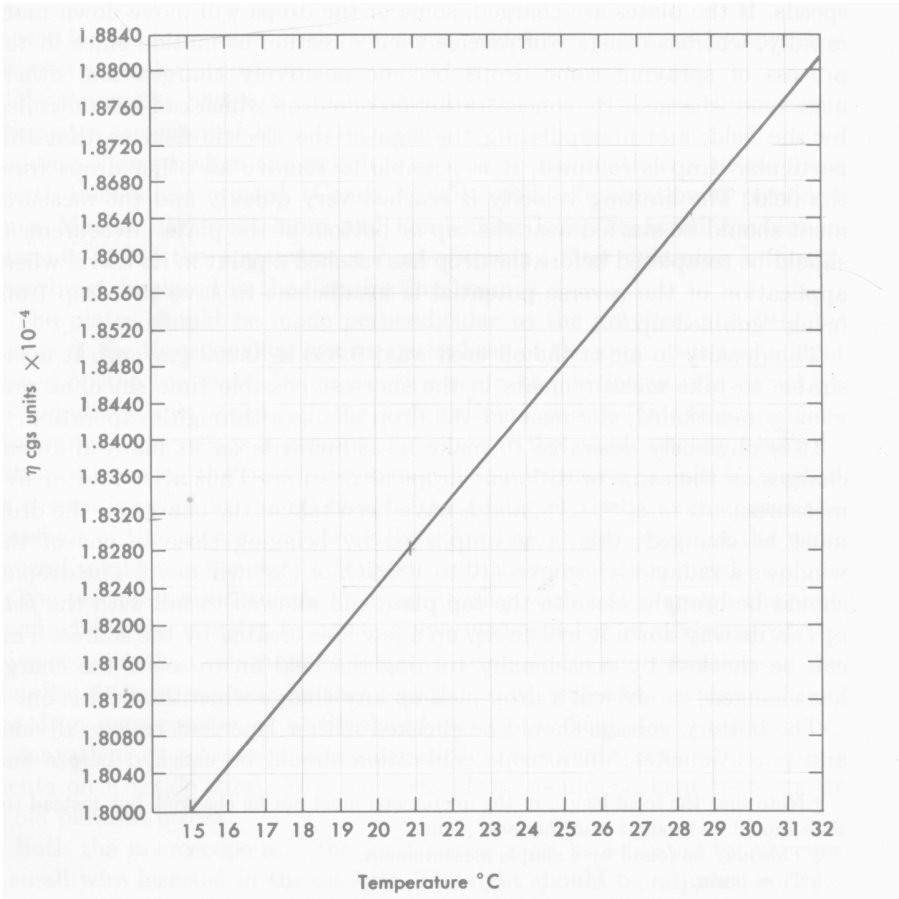


FIG. 1.3 Viscosity of dry air as a function of temperature.