

Laboratório de Mecânica Quântica

Petrucio Barrozo



São Cristóvão/SE
2012

Laboratório de Mecânica Quântica

Elaboração de Conteúdo

Petrucio Barrozo

Projeto Gráfico

Neverton Correia da Silva

Nycolas Menezes Melo

Capa

Hermeson Alves de Menezes

Copyright © 2012, Universidade Federal de Sergipe / CESAD.
Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização por escrito da UFS.

FICHA CATALOGRÁFICA PRODUZIDA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Barrozo, Petrucio
B278l Laboratório de Mecânica Quântica / Petrucio Barrozo. --
São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2012.

1. Mecânica quântica. 2. Física - Manuais de laboratório. I Título.

CDU 530.145

Presidente da República

Dilma Vana Rousseff

Ministro da Educação

Fernando Haddad

Diretor de Educação a Distância

João Carlos Teatini Souza Clímaco

Reitor

Josué Modesto dos Passos Subrinho

Vice-Reitor

Angelo Roberto Antonioli

Chefe de Gabinete

Ednalva Freire Caetano

Coordenador Geral da UAB/UFS**Diretor do CESAD**

Antônio Ponciano Bezerra

coordenador-adjunto da UAB/UFS**Vice-diretor do CESAD**

Fábio Alves dos Santos

Diretoria Pedagógica

Clotildes Farias de Sousa (Diretora)

Diretoria Administrativa e Financeira

Edélzio Alves Costa Júnior (Diretor)

Sylvia Helena de Almeida Soares

Valter Siqueira Alves

Coordenação de Cursos

Djalma Andrade (Coordenadora)

Núcleo de Formação Continuada

Rosemeire Marcedo Costa (Coordenadora)

Núcleo de Avaliação

Hérica dos Santos Matos (Coordenadora)

Carlos Alberto Vasconcelos

Núcleo de Serviços Gráficos e Audiovisuais

Giselda Barros

Núcleo de Tecnologia da Informação

João Eduardo Batista de Deus Anselmo

Marcel da Conceição Souza

Raimundo Araujo de Almeida Júnior

Assessoria de Comunicação

Edvar Freire Caetano

Guilherme Borba Gouy

Coordenadores de Curso

Denis Menezes (Letras Português)

Eduardo Farias (Administração)

Haroldo Dorea (Química)

Hassan Sherafat (Matemática)

Hélio Mario Araújo (Geografia)

Lourival Santana (História)

Marcelo Macedo (Física)

Silmara Pantaleão (Ciências Biológicas)

Coordenadores de Tutoria

Edvan dos Santos Sousa (Física)

Geraldo Ferreira Souza Júnior (Matemática)

Ayslan Jorge Santos de Araujo (Administração)

Priscila Viana Cardozo (História)

Rafael de Jesus Santana (Química)

Gleise Campos Pinto Santana (Geografia)

Trícia C. P. de Sant'ana (Ciências Biológicas)

Laura Camila Braz de Almeida (Letras Português)

Lívia Carvalho Santos (Presencial)

NÚCLEO DE MATERIAL DIDÁTICO

Hermeson Menezes (Coordenador)

Marcio Roberto de Oliveira Mendoza

Neverton Correia da Silva

Nycolas Menezes Melo

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Cidade Universitária Prof. "José Aloísio de Campos"

Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze

CEP 49100-000 - São Cristóvão - SE

Fone(79) 2105 - 6600 - Fax(79) 2105- 6474

SUMÁRIO

Aula 1: Experimento de Millikan	7
1.1 Introdução	8
1.2 Descrição do experimento	9
1.3 Procedimento Experimental	13
RESUMO	19
PRÓXIMA AULA	19
AUTO-AVALIAÇÃO	22
LEITURA COMPLEMENTAR	22
Aula 2: Experimento de Frank-Hertz	23
2.1 Introdução	24
2.2 Descrição do experimento	27
2.3 Procedimento Experimental	30
RESUMO	37
PRÓXIMA AULA	37
AUTO-AVALIAÇÃO	38
LEITURA COMPLEMENTAR	39
Aula 3: Efeito Fotoelétrico	41
3.1 Introdução	42
3.2 Revisão	42
3.3 Procedimento Experimental	46
RESUMO	48
PRÓXIMA AULA	49
AUTO-AVALIAÇÃO	49
LEITURA COMPLEMENTAR	49

Aula 4: Absorção de Radiação β	51
4.1 Introdução	52
4.2 Descrição do experimento	57
RESUMO	62
PRÓXIMA AULA	64
AUTO-AVALIAÇÃO	65
LEITURA COMPLEMENTAR	66
Aula 5: Atenuação da radiação	67
5.1 Introdução	68
5.2 Procedimento experimental	70
RESUMO	72
AUTO-AVALIAÇÃO	73
LEITURA COMPLEMENTAR	73

Experimento de Millikan

META:

Determinar o valor da carga elementar do elétron.

OBJETIVOS:

Ao fim desta aula o aluno deverá:

- Compreender o experimento realizado por Millikan e a sua importância para o desenvolvimento da ciência.
- Determinar experimentalmente o valor da carga elementar do elétron.
- Verificar a quantização da carga elétrica.

PRÉ-REQUISITOS

- Curso introdutório de mecânica quântica.

1.1 Introdução

Caros alunos, nesta aula descreveremos o experimento de Millikan. Historicamente, esse experimento é classificado como um dos maiores experimentos da física moderna.

Com este experimento Millikan conseguiu determinar com grande precisão o valor da carga elementar do elétron e mostrou também que ela é quantizada. Os resultados deste experimento rendeu ao Millikan o prêmio Nobel de física em 1923.

A carga elementar do elétron é uma das grandezas fundamentais da natureza

Esta aula será dividida da seguinte maneira: Faremos inicialmente uma breve descrição do experimento montado por Millikan para determinar a carga do elétron, descreveremos as forças que atuam sobre a carga durante seu movimento e por fim será dado um procedimento experimental para a determinação da carga elementar do elétron.



1.2 Descrição do experimento

A experiência de Millikan consiste em analisar o movimento de gotículas de óleo carregadas eletricamente submetidas à ação da gravidade e de um campo elétrico entre as placas de um capacitor plano de placas paralelas, submetido a uma diferença de potencial constante em módulo, mas que pode alternar a polaridade.

A carga elementar do elétron é determinada a partir das medidas da velocidade de subida e de descida da gota de óleo carregada.

Considerando inicialmente que a gota de óleo é:

- Esférica;
- Possui uma carga q ;
- Está em queda sob efeito do campo gravitacional;
- Está sob efeito de um campo elétrico.

As forças que atuam sobre a gota durante seu movimento são: força peso (\vec{P}), força de empuxo (\vec{E}), a força elétrica (\vec{F}_E) e a força devido ao atrito viscoso com o ar (\vec{F}_v) como mostrado na Figura 5.1.

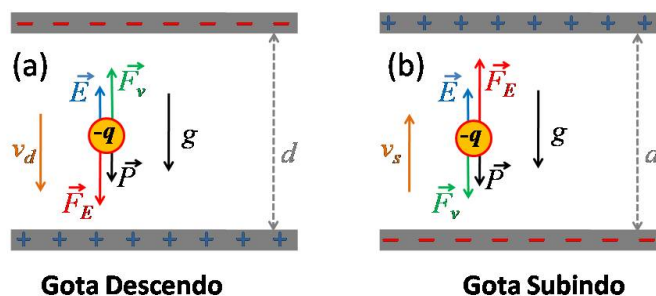


Figura 1.1: Diagrama mostrando as forças sobre a gota de óleo durante o movimento de (a) subida e (b)descida, entre as placas do capacitor, dentro do aparato montado por Millikan.

Nesta situação, usando a relação $\rho = m/V$ a força peso pode ser escrita como:

$$|\vec{P}| = mg = \rho_{\text{óleo}}Vg, \quad (1.1)$$

e a força de empuxo é dada por:

$$|\vec{E}| = \rho_{\text{ar}}Vg, \quad (1.2)$$

onde,

$\rho_{\text{óleo}} = 1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$ é a densidade do óleo de silicone,

$\rho_{\text{ar}} = 1,293 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$ é a densidade aproximada do ar,

$V = 4/3 \pi r^3 \rightarrow$ é o volume da gota,

$g \rightarrow$ a aceleração da gravidade,

A força de atrito viscoso proporcionado pelo ar no interior do capacitor é dada pela Lei de Stokes,

$$\vec{F}_v = 6\pi\eta r\vec{v}, \quad (1.3)$$

onde,

$\eta \rightarrow$ é o coeficiente de viscosidade do ar,

$r \rightarrow$ é o raio da gota (consideramos que seja esférica),

$v \rightarrow$ é a velocidade da gota,

A força elétrica que atua sobre a gota, com carga q , é dada por:

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (1.4)$$

$$|\vec{F}_E| = q\frac{V}{d}, \quad (1.5)$$

onde o campo elétrico \vec{E} criado por um capacitor de placas paralela, separadas por uma distância d e mantidas a uma diferença de potencial V tem módulo dado por $|\vec{E}| = V/d$.

Podemos observar, que a força de atrito viscoso é proporcional ao módulo da velocidade v , sendo assim à medida que a velocidade da gota aumenta a força viscosa também aumenta e é oposta ao movimento. Isto faz com que após um curto intervalo de tempo (da ordem de 10^{-6} s) a gota atinja uma velocidade constante também chamada de velocidade terminal. Nesta situação a força resultante sobre a partícula é nula.

O sentido do campo elétrico no interior das placas é invertido quando invertemos a polaridade das placas. Esta inversão do campo elétrico é usada para inverter o sentido do movimento da gota na região entre as placas do capacitor como mostrado na Figura 5.1.

Escrevendo a equação para a força resultante sobre a gota para o movimento de subida e para o movimento de descida, temos:

$$\vec{F}_E + \vec{P} - \vec{E} - \vec{F}_v = 0 \quad \text{descida} \quad (1.6)$$

$$-\vec{F}_E + \vec{P} - \vec{E} + \vec{F}_v = 0 \quad \text{subida} \quad (1.7)$$

Substituindo as expressões para as forças e resolvendo estas equações para o raio r e para a carga total q da esfera teremos,

$$r = \left(\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta}{g(\rho_{\text{óleo}} - \rho_{\text{ar}})}} \right) \sqrt{v_d - v_s}, \quad (1.8)$$

onde,

- r é o raio da gota;
- v_s velocidade da gota durante o movimento de subida;
- v_d velocidade da gota durante o movimento de descida;
- η é o coeficiente de viscosidade à temperatura ambiente;
- $\rho_{\text{óleo}}$ é densidade do óleo (ou látex usado neste experimento);
- ρ_{ar} é densidade aproximada do ar.

$$q = \left(\frac{3}{2} \pi d \sqrt{\frac{\eta^3}{g(\rho_{\text{óleo}} - \rho_{\text{ar}})}} \right) \frac{v_d + v_s}{V} \sqrt{v_d - v_s}, \quad (1.9)$$

onde,

- V é o potencial aplicado às placas do capacitor;
- d é a distância entre as placas do capacitor.

1.3 Procedimento Experimental

O equipamento utilizado neste experimento é o padrão da Phywe e pode ser visto na Figura 1.2,

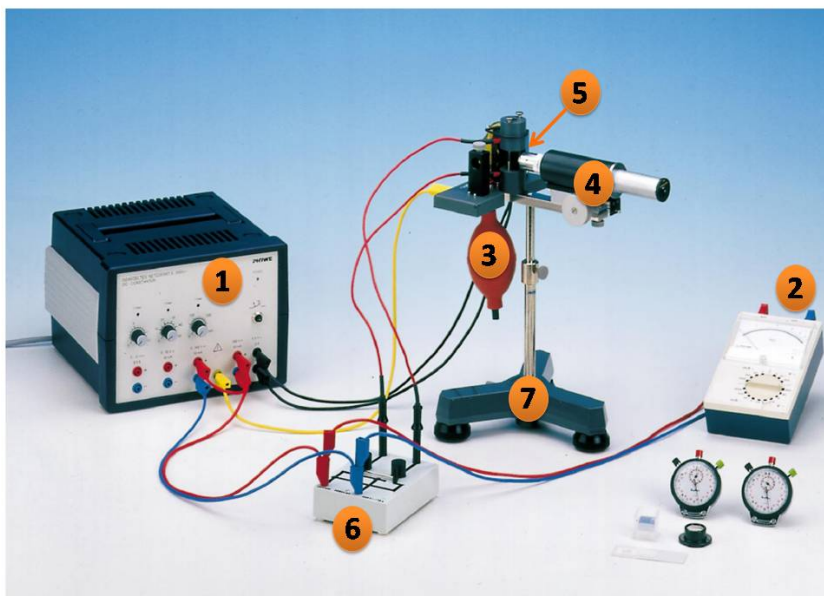


Figura 1.2: Figura mostrando a montagem da Phywe para o experimento de Millikan. 1- Fonte de tensão 300–600V, 2- Multímetro, 3- Borrifador, 4- Microscópio conectado a um monitor com escala graduada, 5- Aparato Millikan capacitor de placas paralelas, 6- Chave de inversão de polaridade, responsável por inverter o sentido com campo elétrico, 7- tripe com suporte.

1. Lista de materiais, utilizado:

- Fonte de 300-600 VDC para aceleração das esferas;
- Fonte de 6.3 VAC para iluminação;
- Chave de inversão de polaridade;

- Multímetros;
- Pulverizador;
- Microscópio;
- Cronômetros;
- Óleo de silicone.

2. Montagem do Experimento

- Montar o experimento conforme a Figura 1.2.
 - Para que se obtenha uma voltagem de aceleração de 600 V DC, duas fontes deverão ser colocadas em série. Uma delas fixa em 300 V DC e a outra variável entre 0 e 300 V DC.
- Antes de aplicar uma voltagem entre as placas do capacitor, borrife o óleo dentro da câmara e procure o posicionamento ideal do microscópio para que possa visualizar com clareza várias esferas simultaneamente.
- Verifique se é possível visualizar a escala graduada.

3. Realização das medidas

- Após montar o experimento, aplique uma voltagem de aceleração com valor entre 300 e 600 V DC. Analise o movimento de uma esfera.
- Procure uma que não tenha um movimento muito rápido e que não se mova na direção x .
- Inverta a polaridade do capacitor e verifique o resultado no movimento das esferas.

- Note que as esferas podem "aparecer" e "desaparecer" subitamente. Na realidade elas apenas entram e saem do plano focal do microscópio.
 - Pode ser necessária a utilização de um pedaço de tecido sobre o aparato para evitar correntes de ar que impulsionam as esferas na horizontal.
- (d) Com a ajuda de seus colegas de grupo, meça com um cronómetro o tempo de subida e descida de uma esfera para uma distância fixa medida através da escala graduada no microscópio.
- (e) Repita este procedimento várias vezes para uma mesma esfera.
- (f) Anote estes valores na Tabela 1.

Tabela 1: Medidas do tempo de subida e descida

	Esfera _____		Esfera _____		Esfera _____		Esfera _____		Esfera _____	
	$\Delta x =$		$\Delta x =$		$\Delta x =$		$\Delta x =$		$\Delta x =$	
	t_s	t_d	t_s	t_d	t_s	t_d	t_s	t_d	t_s	t_d
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
Média										

- (g) Faça a média dos valores do tempo de subida e descida e preencha a Tabela 2.

Tabela 2: Valores médio tempo de subida e descida junto com as respectivas incertezas.

	$\langle t_s \rangle$	$\langle t_d \rangle$	<i>incertesa do tipo A</i>	<i>incertesa do tipo B</i>	<i>incertesa do tipo C</i>		
gota 1						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 2						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 3						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 4						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 5						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 6						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 7						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 8						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 9						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
gota 10						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$
						$t_s = \quad \pm \quad$	$t_d = \quad \pm \quad$

- (h) Com ajuda das equações 1.8 e 1.8, calcule o raio e a carga da esfera e preencha a Tabela 3.

- (i) Utilize os seguintes valores para os parâmetros destas equações:

- $\eta = 1.82 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Tabela 3: Valores do raio e da carga de cada esfera analisada.

	$\langle v_s \rangle$	$\langle v_d \rangle$	$\langle r \rangle$	σ_r	$\langle q \rangle$	σ_q
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

- (j) **OBS:**A escala utilizada no microscópio tem 30 divisões com um comprimento total de 0.89 mm. Obtenha os valores de tempo de subida e descida para pelo menos 10 esferas.

4. Verificação da natureza quântica da carga elétrica

Para se obter a carga do elétron é preciso, antes de mais nada, verificar a 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.

- (a) Faça um histograma da frequência de valores de q nos intervalos dos valores de carga convenientemente espaçados no eixo das abcissas, utilizando o total de dados

levantados pela classe, e se necessário usando também os dados obtidos por turmas de períodos anteriores.

- Utilize apenas os valores de cargas onde,

$$q_{max}/q_{min} \leq 10.$$

- (b) Analise o histograma e conclua se foi possível ou não provar a quantização da carga.

5. Determinação da carga do elétron

- (a) Escolha os valores de uma das gotas estudadas pelo seu grupo (de preferência com o mínimo número de elétrons).
- (b) Calcule o valor de q baseado nas expressões 1.8 e 1.9.
- Use a teoria da propagação de erros e apresente esses cálculos explicitamente no seu relatório.
- (c) Compare este resultado com o valor 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.
- (d) Compare também esses resultados com o valor aceito hoje para a carga elementar do elétron.
- (e) O valor hoje mais aceito se enquadra dentro de sua incerteza experimental?

RESUMO

Na aula de hoje, montamos um aparato experimental similar ao usado por Millikan e conseguimos através deste simples instrumento medir o valor da carga elementar do elétron e mostramos que ela é uma grandeza quantizada. Bons estudos.

**PRÓXIMA AULA**

Em nossa próxima aula realizaremos experimentos afim de verificar a existência de estados de energia quantizados na matéria. Com isso verificaremos um dos postulados propostos por Bohr em seu modelo atômico que também foi fundamental para o desenvolvimento da mecânica quântica.





ATIVIDADES

1. Com os dados obtidos no experimento elabore um relatório.

OBS: O relatório aqui elaborado deve ser preciso, claro e objetivo. Deve conter as seguintes seções:

- Resumo,
- Introdução,
- Materiais e métodos,
- Resultados,
- Conclusão,
- Referências.

OBS: Os gráficos devem ser claros, auto-explicativos, com a maior quantidade de informação possível, isto faz com que economizemos espaço e sejamos mais objetivos na construção do relatório.

OBS: No relatório também deverá conter um APÊNDICE onde serão discutidas as questões propostas ao longo do desenvolvimento do experimento.

OBS: Os cálculos referente as Tabelas 2 e 3 deverão ser totalmente explicitado no relatório.

2. As seguintes questões devem ser respondidas ao final do relatório em um apêndice.

Questão 1: Pode haver situações em uma gota, em movimento descendente, continue caindo mesmo após invertermos a direção do campo elétrico entre as placas? Se sua resposta for sim, discuta em que condições este fato pode ocorrer?

Questão 2: Conhecendo as forças que atuam sobre as esferas carregadas demonstre as equações 1.8 e 1.9, que relaciona a velocidade de subida v_s e descida v_d da esfera com o raio e a carga da gota respectivamente.

Questão 3: Discuta um procedimento que seja capaz de cumprir os objetivos propostos para a experiência.

Questão 4: Quais os parâmetros experimentais são fixos e quais podemos variar?

Questão 5: Quais grandezas teriam seus valores alterados caso a carga da gota em estudo sofresse uma variação por consequência de ionização?

Questão 6: Poderíamos ter usado outro tipo de fluido para realizar estas medidas? Caso seja verdadeira a sua resposta quais cuidados devemos ter com relação ao fluido escolhido?

AUTO-AVALIAÇÃO



- Eu sei descrever o aparato experimental usado por Millikan para medir a carga do elétron?
- Eu sei construir o diagrama de corpo livre para a gota durante o seu movimento de subida e descida?
- Eu sei calcular a carga de cada gota?
- Eu sei analisar o dados e mostrar que a carga elétrica é quantizada?



LEITURA COMPLEMENTAR

- [1] VUOLO, J. H.; **Fundamentos da teoria de erros**. 2 ed. São Paulo-SP: Edgar Blücher, 1996;
- [2] Apostila do laboratório de física A, DFI-UFS;
- [3] Notas de aula, curso de laboratório de mecânica quântica e física nuclear, DFI-UFS;
- [4] Manual da Phywe, Elementary charge and Millikan experiment.