

Laboratório de Física Moderna

Marco Antonio Morales Torres

marco.morales@ufrn.br

2022-II

Avaliações:

Teremos 3 unidades com 3 avaliações escritas e 3 médias de relatórios.

Média da unidade = $0,4 \cdot MRx + 0,6 \cdot Px$

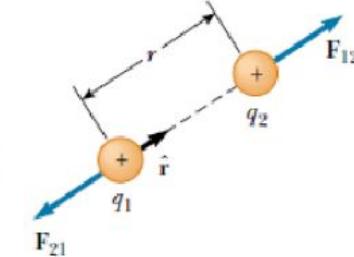
Teremos 15 atividades

ATIVIDADE 1

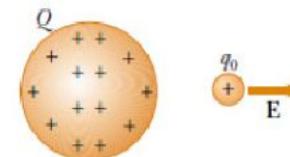
Atividade 1

Força Eletrostática

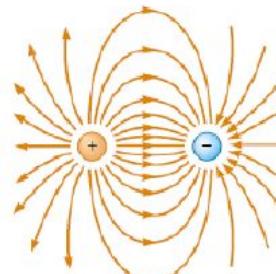
$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$



Campo Elétrico



$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}_e}{q_0}$$

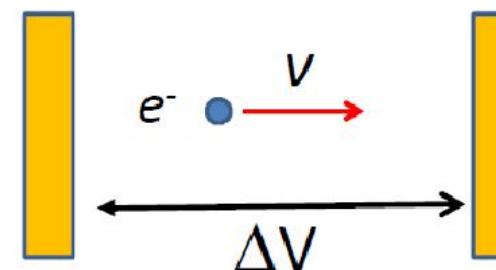


$$\mathbf{F}_e = q \mathbf{E}$$

$$\Delta V = 2000 \text{ Volts}$$

$$E = 2000 \text{ eV} = m_e v^2 / 2$$

$$v = \{4000/m_e\}^{1/2}$$



Ruptura dielétrica do ar - Moléculas ionizadas

-A ruptura da rigidez dielétrica do ar ocorre para um campo elétrico de $E \approx 3 \times 10^6 \text{ V/m}$

Rigidez dielétrica: mede o campo elétrico máximo que um meio isolante suporta antes de tornar-se condutor. Quando isso acontece, dizemos que houve ruptura da rigidez dielétrica do material

-Ions do ar acelerados podem ionizar moléculas durante colisões

-O efeito avalanche

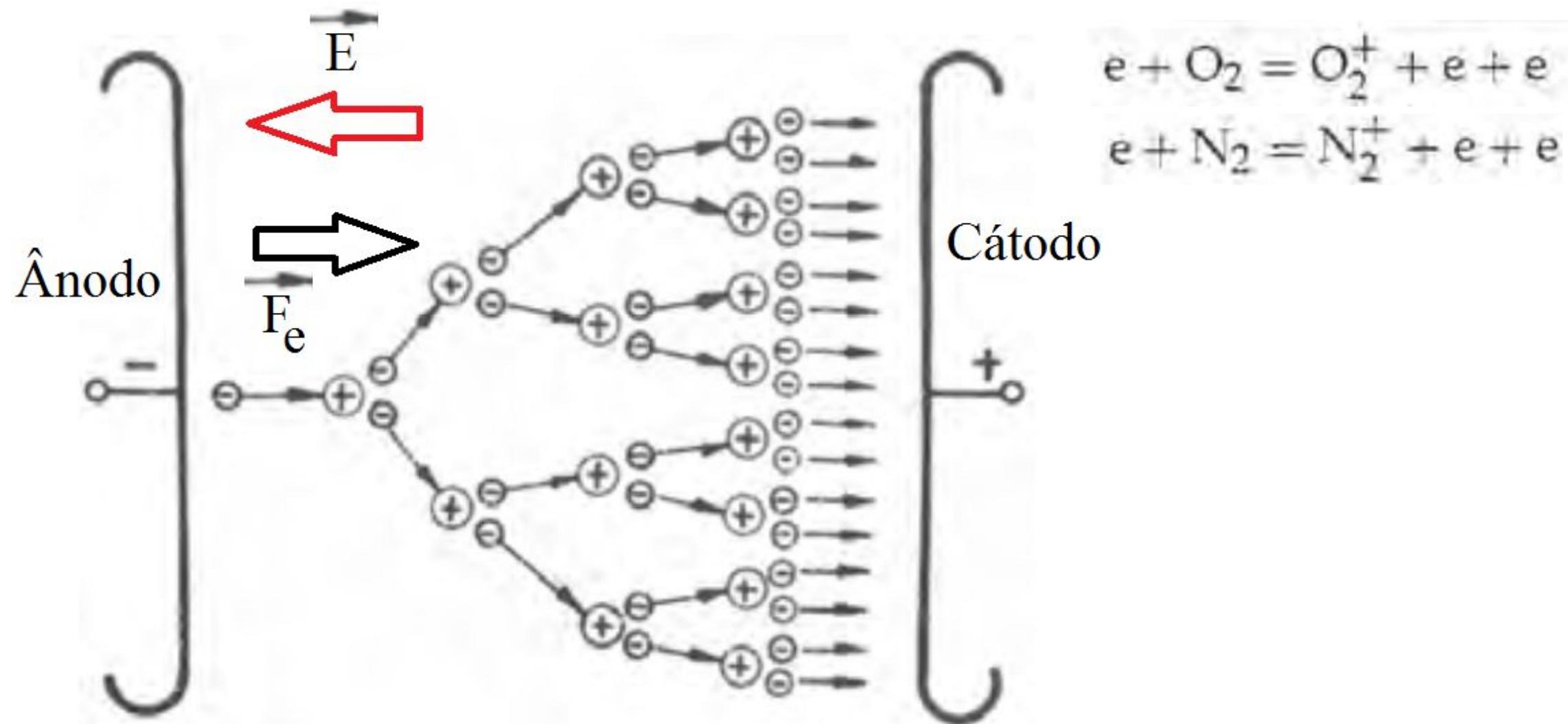
-O ar tem uma pequena percentagem de moléculas ionizadas

Qual a velocidade de 1 elétron submetido a uma $\Delta V = 2000 \text{ Volts}$
 $1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, massa de repouso do elétron $\approx 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$v = (2 \times 2000 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} / 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})^{0,5}$$

$$v = 26,05 \times 10^6 \text{ m/s}$$

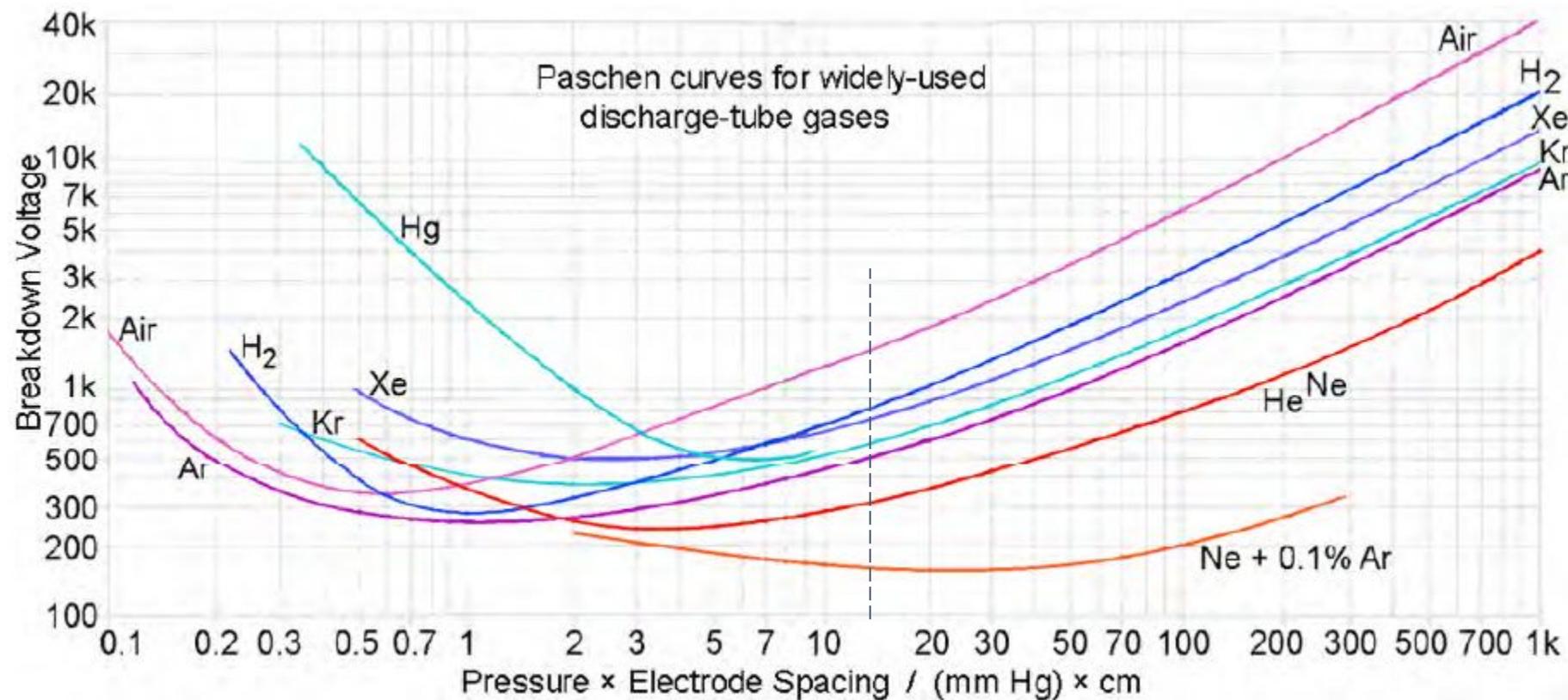
Avalanche de elétrons devido a colisões entre elétrons e átomos



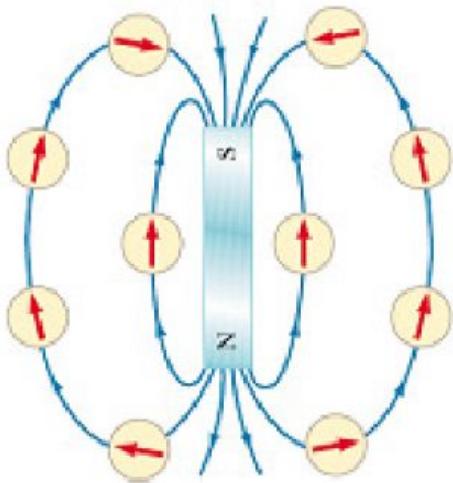
Tensão de ruptura dielétrica

1mbar=0,75 mm Hg

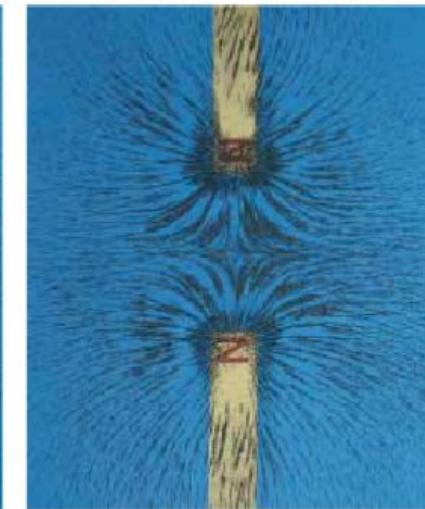
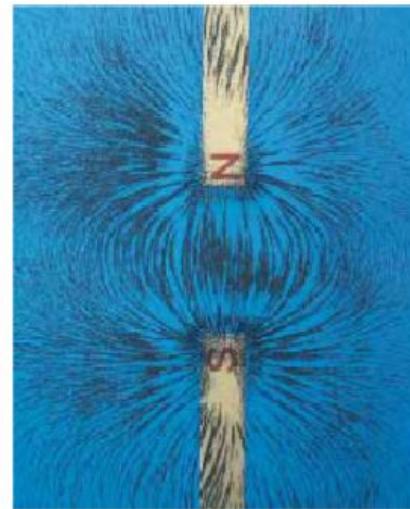
Se considerarmos uma pressão de 1 mbar e separação entre os eletrodos= 18,3 cm (novo experimento), então a : **pressão x separação_eletrodos= 13,725 mmHgxcm**



Campo Magnético

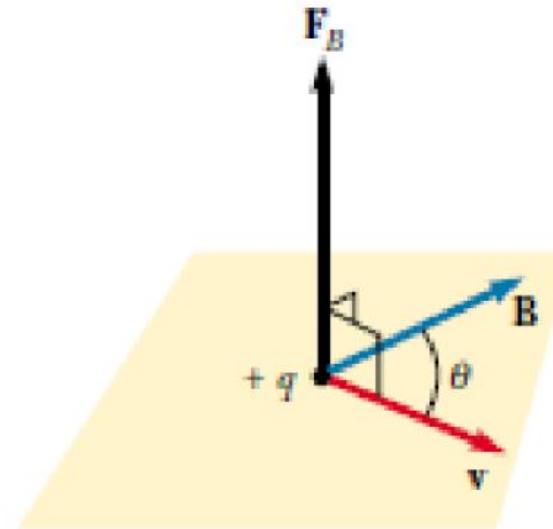


- Campo gerado por materiais magnéticos
O momento magnético num material tem duas contribuições :
1- momento de spin (s) ; $S = \sum s_i$
2- momento orbital (l) ; $L = \sum l_i$
 $J = S + L$
- Campo magnético gerado por correntes elétricas em fios condutores



Força Magnética

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



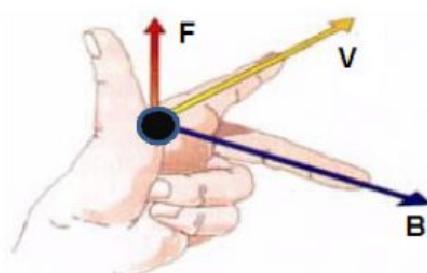
Unidades (SI):

$$1\text{N} = 1 \text{ CTm/s}$$

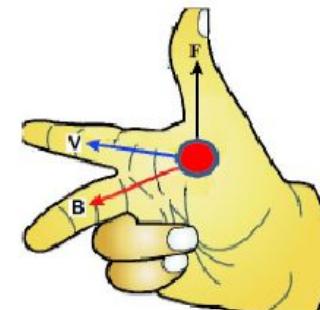
N= Newton

C=Coulomb

T=Tesla



Cargas negativas:
Regra da mão
esquerda

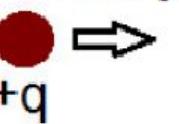


Cargas positivas:
Regra da mão
direita

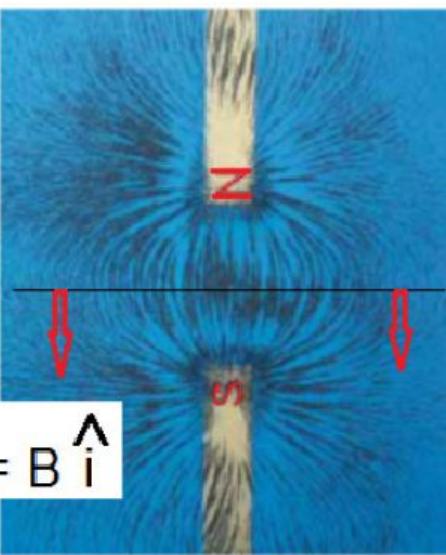
Exemplo:

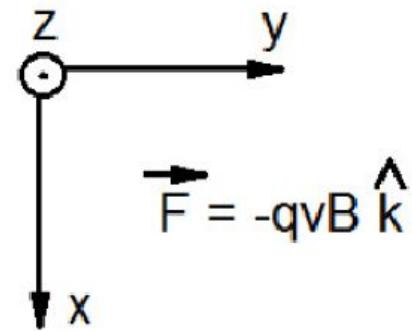
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{v} = v \hat{j}$$



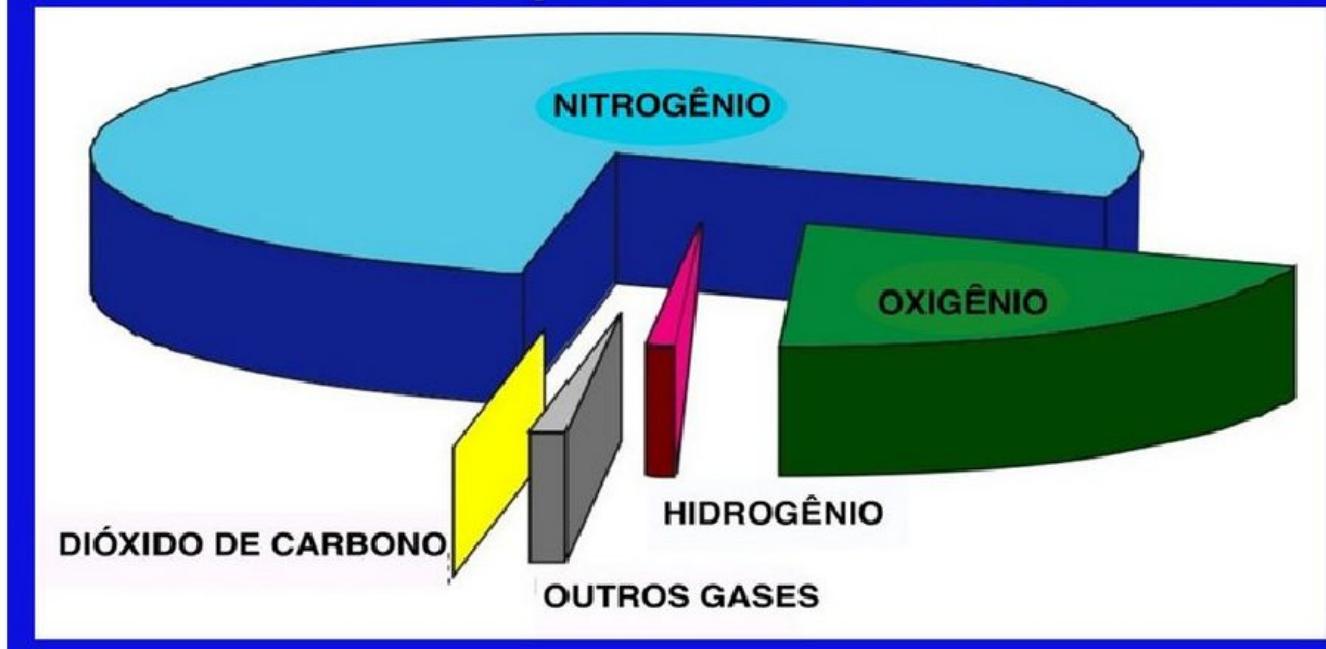
$$\vec{B} = B \hat{i}$$




$$\vec{F} = -qvB \hat{k}$$

AR

COMPOSIÇÃO NATURAL DO AR



Composição do ar atmosférico seco (constante até 100km acima)

Componentes	%
Oxigênio	20,95
Dióxido de carbono	0,03
Nitrogênio	78,09
Argônio	0,93
Total	100,00

Todo ar atmosférico contém vapor d'água em quantidades bastante variáveis + outros gases nobres (He, Ne, Kr, Xe) + CH₄ + poluentes

Unidades de Pressão

$$1\text{Atm} = 10^5 \text{ Pascal}$$

- O ar contém de maneira natural uma pequena concentração de íons

Contexto histórico – Tubos de Crookes

Michael Faraday (1791-1867; 1831 “Law of induction”): Experimentalista, descobriu a indução eletromagnética.

James Clerck Maxwell (1831-1879; 1865 “A dynamical theory of the electromagnetic field”): Formulou à teoria moderna do eletromagnetismo, que une a eletricidade, o magnetismo e a óptica.

Cronologia:

1855 – Heinrich Geissler inventou a bomba de vácuo e construiu os tubos de Gleisser

1858 – Julius Plücker mostrou que os raios catódicos gerados no tubo de Geissler interagem com o campo magnético

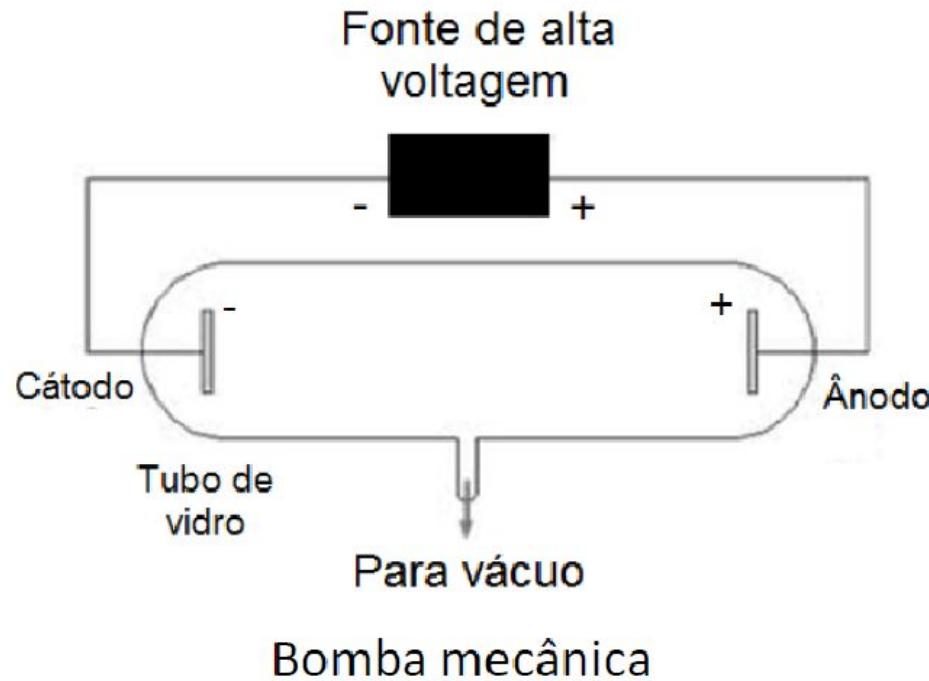
1865 - Johann Hittorf observou que os raios catódicos viajavam em linha reta do catodo para o anodo

1879 - William Crookes montou as primeiros experimentos em alto vácuo. Todos os trabalhos realizados antes dele foram refeitos e aprimorados. Foi um dos primeiros cientistas a investigar a física de plasmas

1886 - Eugen Goldstein observou que além dos raios catódicos são produzidos certos raios viajando em sentido oposto, isto é do anodo para o catodo

1897 – Joseph Thomson usando tubos de raios catódicos na presença de campos elétricos e magnéticos demonstrou que os raios catódicos erão elétrons.

☐Tubos de Crookes

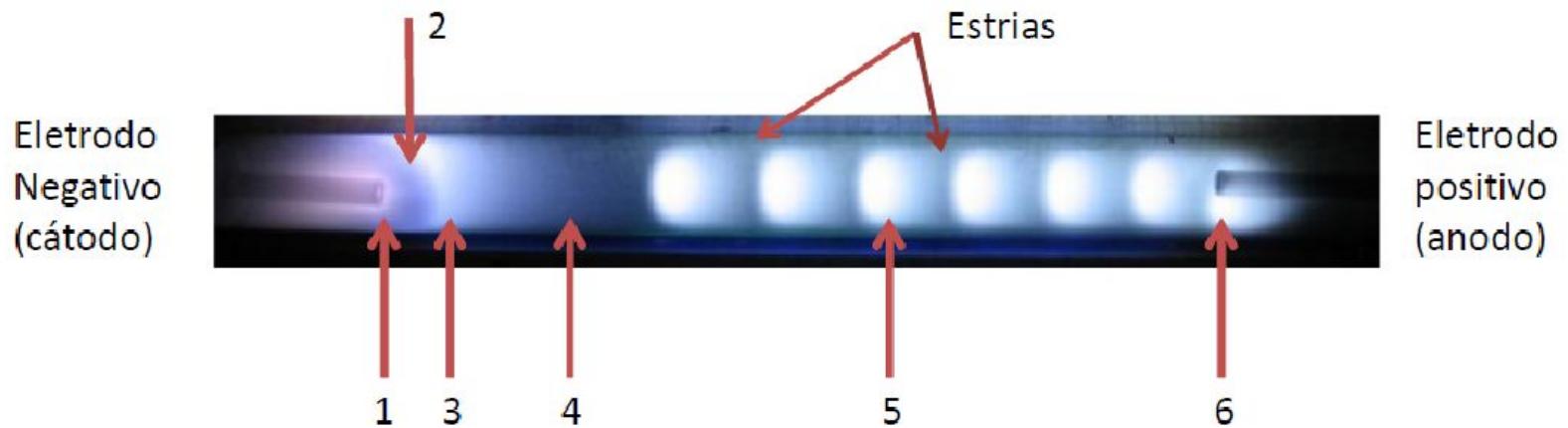
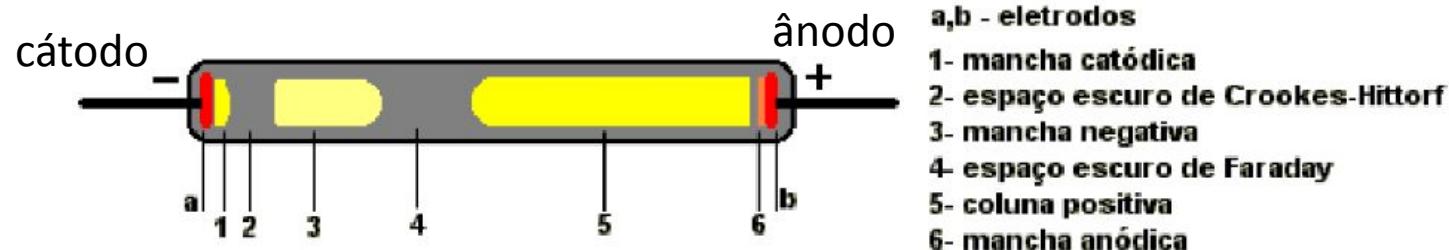


Características

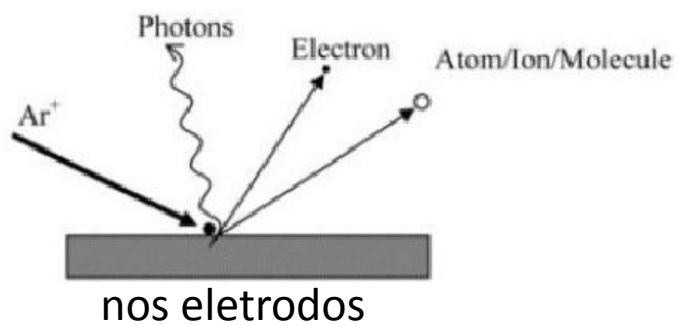
- Inventado pelo físico químico inglês William Crookes
- Conhecido como tubo de cátodo frio
- É um tubo de descarga, parcialmente no vácuo, pressão de ar residual entre 1,0 - 0,005 Pascal
- Inicialmente íons residuais são **acelerados** (eq 1),
e iniciam o processo de ionização
onde: q é carga; d é distância entre os eletrodos;
 m_q é a massa do íon, ΔV é tensão aplicada
 a é aceleração
- Elétrons são gerados pela ionização do ar residual devido ao elevado valor de ΔV ,
a aceleração dos elétrons (m_q é m_e eq. 1) gera novos eventos de ionização (que formam o plasma)
- **Raios catódicos** são gerados quando os íons colidem com o cátodo
- Os raios catódicos são um feixe de elétrons.

$$a = \frac{q \Delta V}{dm_q}$$

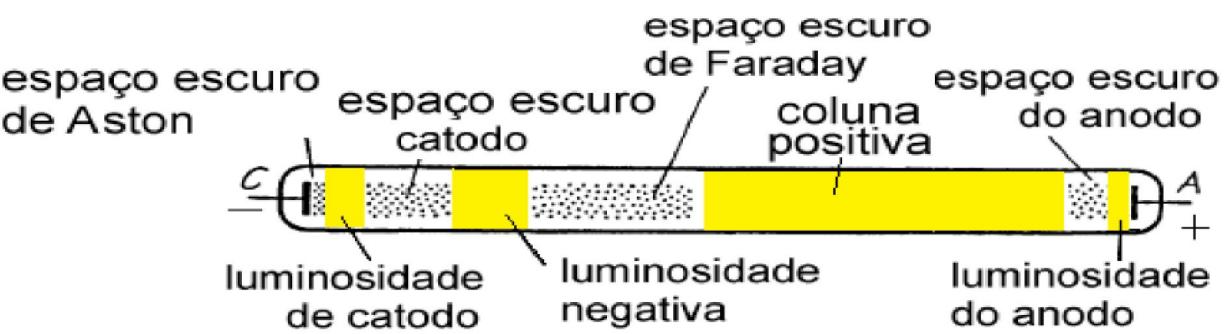
Distribuição da luminosidade no tubo de Crookes



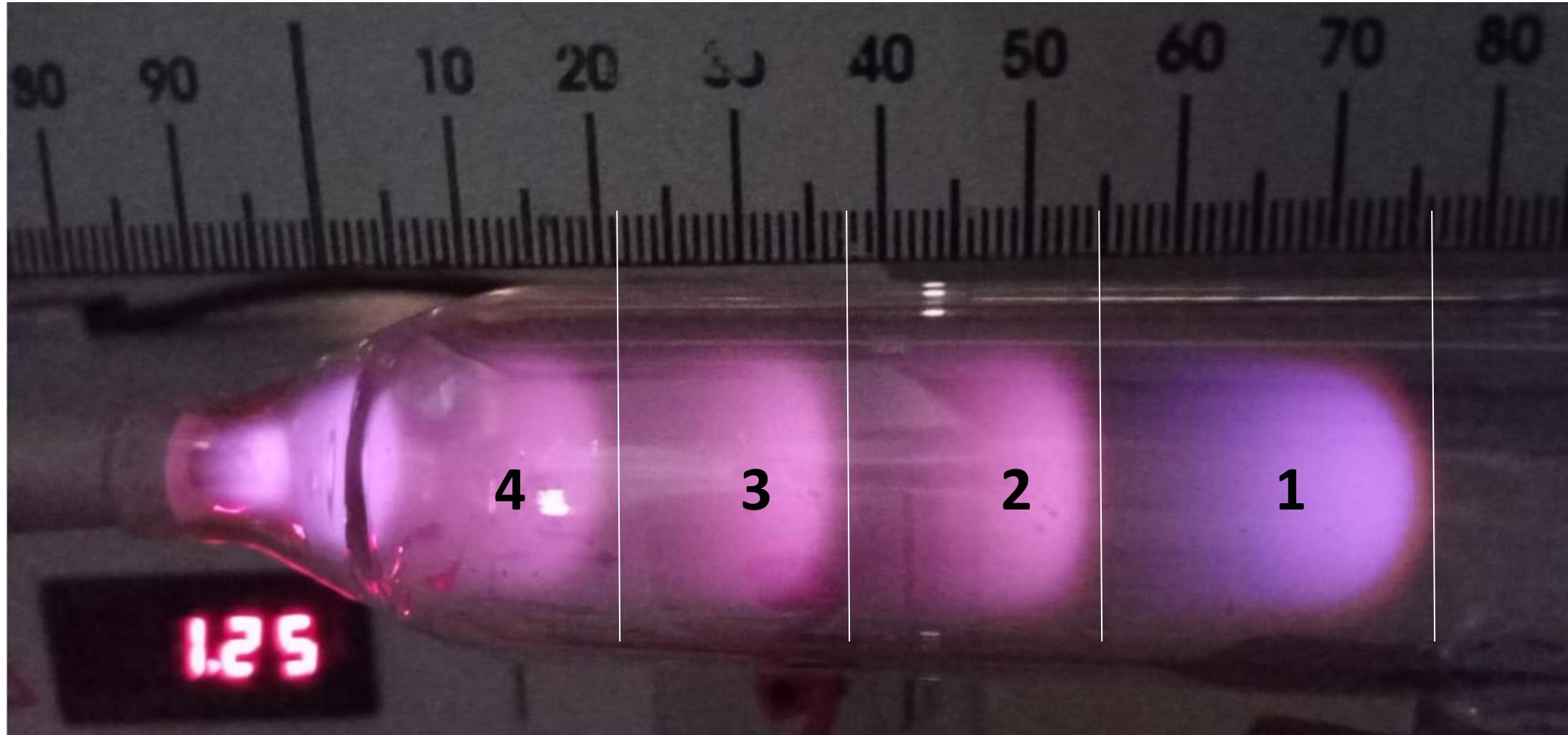
- Os raios catódicos são invisíveis,
- As fontes de luz são as transições eletrônicas que ocorrem nos átomos devido às colisões: íon-átomo, elétron-íon , elétron-átomo



- **Espaço Escuro de Aston:** Região fina que está na vizinhança do catodo, uma particularidade no espaço escuro de Aston é a alta intensidade do campo elétrico \vec{E} . É nesta região onde os elétrons são acelerados para entrar na descarga. No entanto a densidade de elétrons é muito baixa para exitar o gás, por este motivo é uma região escura.
- **Luminosidade do Catodo:** A principal característica da luminosidade do catodo é a alta densidade de íons, tais íons colidem com o catodo fazendo o processo de geração de elétrons secundários. Seu comprimento depende do tipo de gás e da pressão.
- **Espaço Escuro do Catodo:** Possue um campo elétrico \vec{E} moderado comparado com a região de Aston. Existe uma predominância de íons nesta região.
- **Luminosidade Negativa:** Entre o Espaço Escuro do Catodo e o Espaço Escuro de Faraday, a Luminosidade Negativa é região mais brilhante de toda a descarga. Seu campo elétrico \vec{E} é relativamente baixo, seu comprimento é longo comparado a luminosidade do catodo. Os elétrons provenientes da região do catodo são desacelerados ao chegarem aqui, isso explica a luminosidade.



- **Espaço Escuro de Faraday:** Nesta região a energia dos elétrons é baixa em consequência das interações com os íons. A densidade de elétrons diminui por causa da recombinação com íons, a carga líquida no espaço é muito baixa e o campo elétrico é relativamente pequeno.
- **Luminosidade Positiva:** Na Luminosidade Positiva a densidade de carga líquida é quasi neutra, e é o que Irving Langmuir teve em mente quando definiu o plasma. Uma de suas características é que o campo elétrico \vec{E} é pequeno, tipicamente 1 V/cm.
- **Luminosidade do Anodo:** A Luminosidade do Anodo é uma região brilhante na extremidade do anodo, ligeiramente mais intensa do que a coluna positiva e nem sempre presente.
- **Espaço Escuro do Anodo:** possui uma carga espacial negativa devido aos elétrons que atravessam a luminosidade positiva. Possui um campo elétrico \vec{E} mais elevado que a coluna positiva.



Para Voltagem=1,25 kV formam-se 4 estrias, suas larguras são:

- 1) 2,1 cm ; 2) 1,8 cm ; 3) 1,6 cm

Questão

1- Usar a equação de Goldstein-Wehner, considere as estrias formadas na coluna positiva no tubo de Crookes e determine a pressão (em Torr) dentro do tubo de Crookes

Geometria do tubo:

Raio interno: $R=1,4\text{ cm}$

Separação entre os eletrodos = $18,3\text{ cm}$

OBS:

Pressão atmosférica = 760 Torr

$C = 1,2 \text{ (Torr}^*\text{cm})^{0,32}$ (para o ar), $n=0,32$

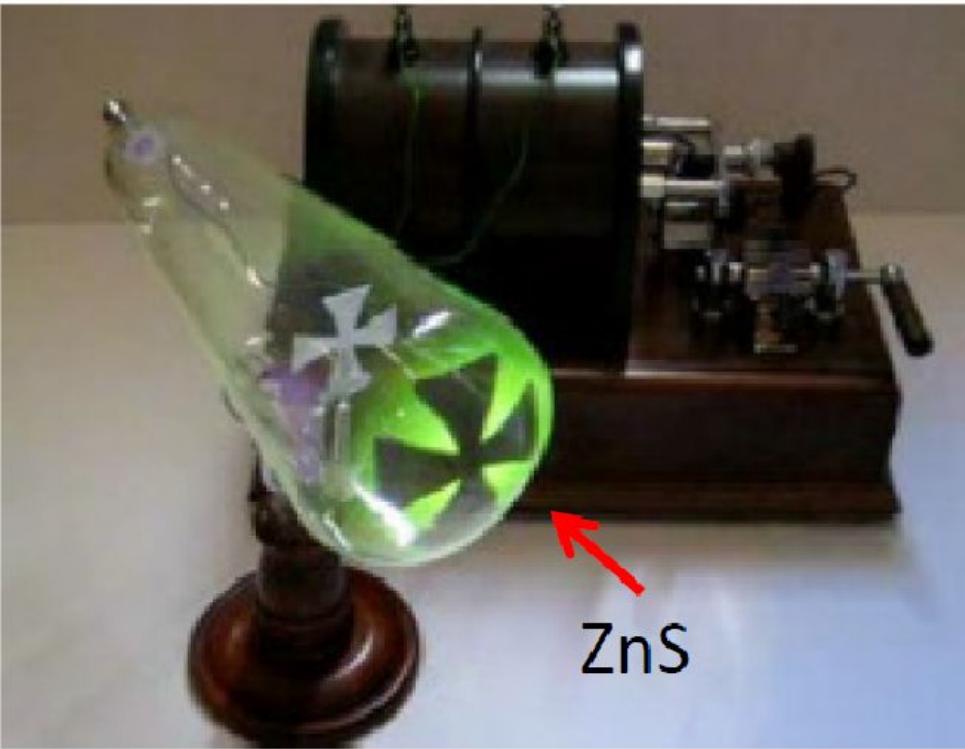
d_1 é a largura da primeira estria

$$\frac{d_1}{R} = \frac{C}{(PR)^n}$$

OBS: d_1 e R devem ter a mesmas unidade

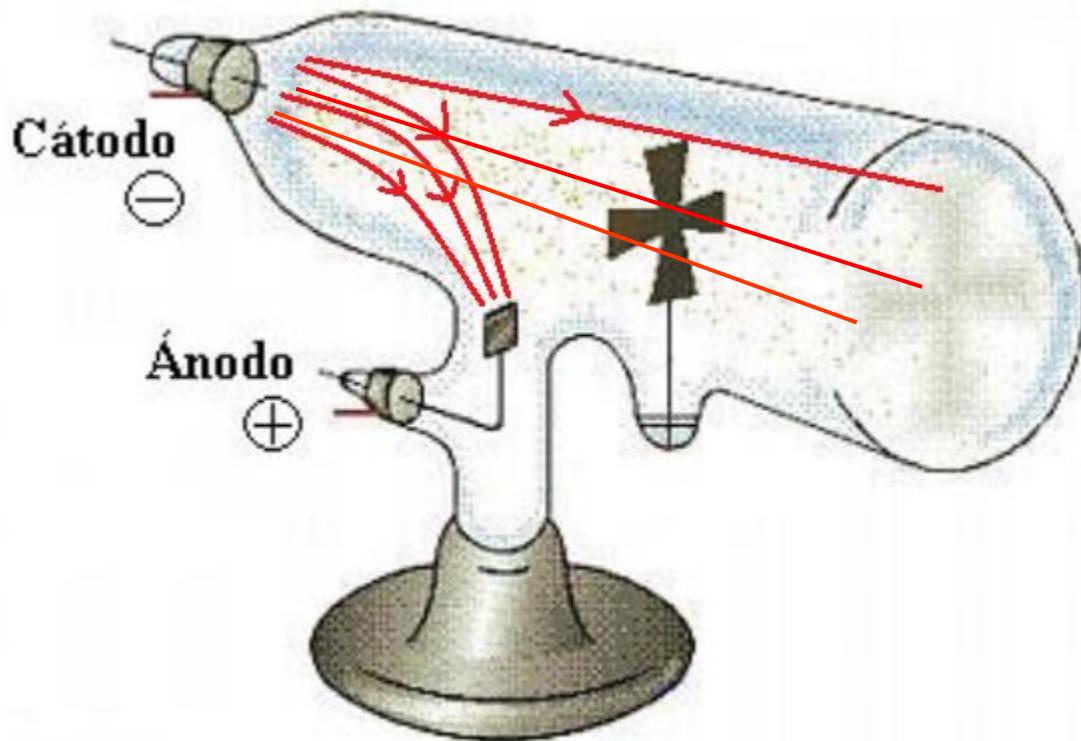
2- A pressão dentro do tubo é menor que a pressão atmosférica? Quantas vezes?

Tubo de Crookes com Cruz de Malta

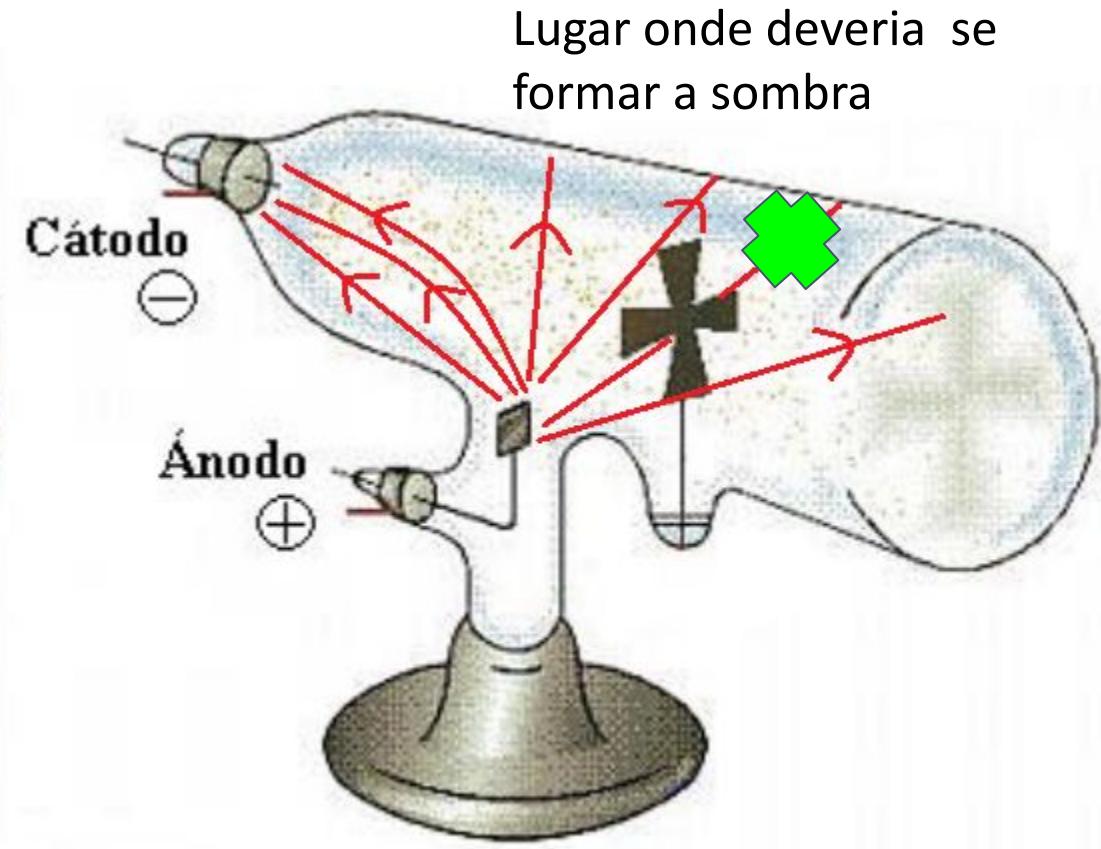


Experimento de Julius Plucker mostrou que os raios catódicos viajam em linha reta.

A Sombra é formada devido às cargas geradas no cátodo ou às cargas geradas no ânodo ?

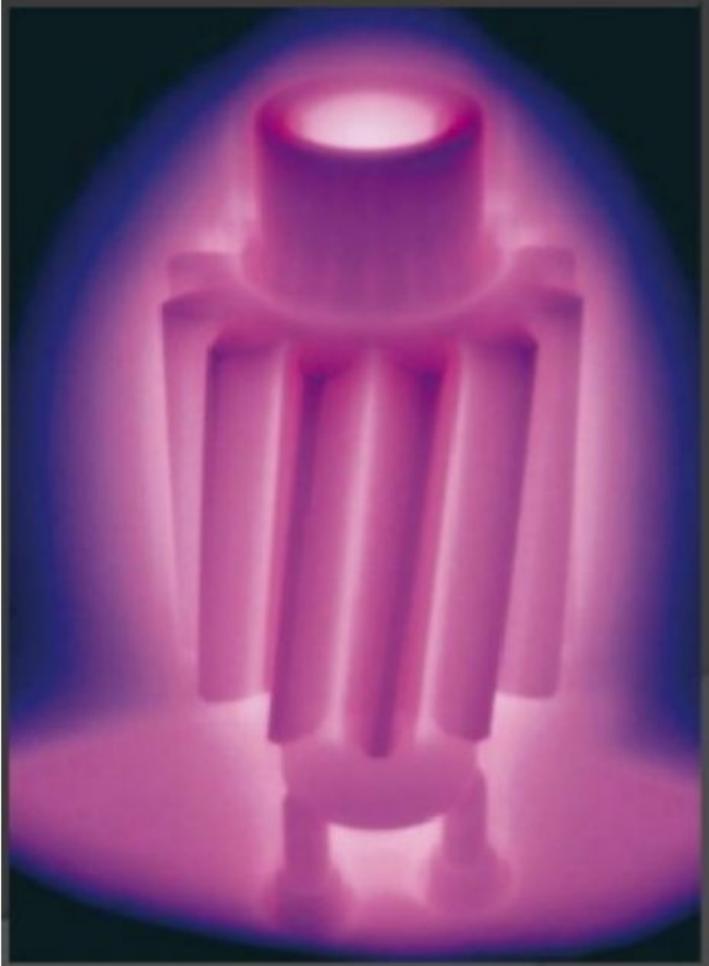


As cargas são negativas e tendem a movimentar se em linha reta



Isto não ocorre experimentalmente

nitretação a plasma



A cor do plasma observado no tubo de Crookes é devido principalmente ao gás de Nitrogênio.

Esse plasma é observado na nitretação de superfícies metálicas:

O processo de nitretação consiste de uma descarga elétrica em um gás contendo nitrogênio (N) à baixa pressão promovendo o bombardeio de íons N⁺ e de espécies neutras N⁰ sobre superfícies metálicas.

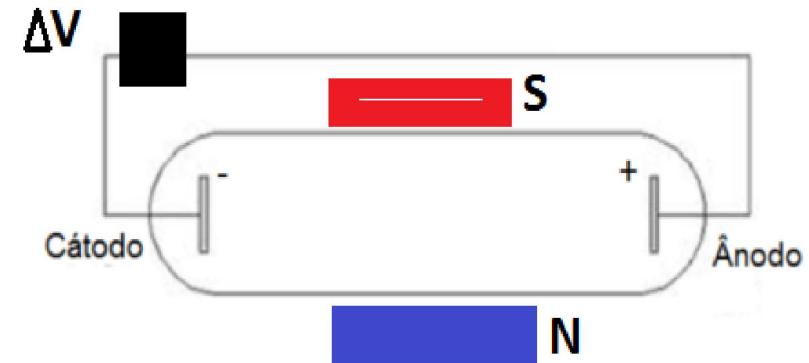
Devido a este bombardeio os átomos que são arrancados da superfície da amostra, reagem com as espécies ativas do plasma e os produtos da reação voltam à superfície metálica por redeposição.

http://www.nitriondobrasil.com.br/serv_nitretacao.html

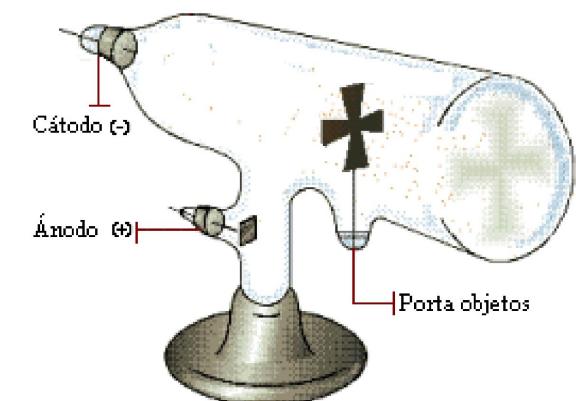
CONTINUAÇÃO QUESTÕES:

3-Calcule a velocidade de um elétron submetido a uma diferença de potencial de $\Delta V=2500$ Volts

4-Na figura, tem-se um tubo de crookes submetido a uma diferença de potencial ΔV . **O plasma já se formou.** Os pólos N e S de um ímã estão indicados. Estude e desenhe as trajetórias dos íons e dos elétrons.



5- Os eletrodos estão submetidos a uma diferença de potencial ΔV . A força sobre os raios catódicos é $F=q_e E$. A) Desenhe as linhas de campo elétrico entre os eletrodos. B) Desenhe a trajetória dos raios catódicos. C) Explique a formação da imagem da cruz de Malta.



6- Explique o fenômeno da produção de um plasma em um tubo de Crookes.

ATIVIDADE 2

- $1 \text{ Pa} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ Atm}$
- Crookes explicou que as palhetas se movem devido às colisões dos fótons sobre elas

Atividade 2- Moinho de luz (Radiômetro de Crookes)



- Crookes construiu o radiômetro em 1873 como um dispositivo para investigar o efeito da radiação infravermelha sobre o elemento químico Tálio, recém descoberto por ele próprio
- Ampola de vidro em vácuo, pressão < 10 Pa
- Consiste de quatro palhetas presas em braços que podem girar em torno de um pino vertical com atrito muito pequeno
- Cada palheta têm uma das suas faces de tom claro (prateado) e a outra escura (preto)
- Elas começam a girar quando luz de qualquer natureza (solar, artificial ou até mesmo radiação infravermelha produzida pelo calor da mão) incidem em sua superfície.
- O moinho de luz gira com a face da palheta clara fugindo da face escura.

• J.P. Rino, N. Studart, *O enigma do moinho de luz, Física na Escola, v. 8 (2007) n. 1*

V. THE BAKERIAN LECTURE.—*On the Illumination of Lines of Molecular Pressure,
and the Trajectory of Molecules.*

By WILLIAM CROOKES, F.R.S., V.P.C.S.

Received December 5,—Read December 5, 1878.

CONTENTS.

	Par.		Par.
The induction current through rarefied gases	486	Projection of molecular shadows	524
Dark space round the negative pole	486	Phosphorescence of thin films	533
Illumination of lines of molecular pressure ..	498	Mechanical action of projected molecules....	541
Electrical radiometers	502	Magnetic deflection of lines of molecular force	545
Convergence of molecular rays to a focus....	508	The trajectory of molecules.....	551
Green phosphorescent light of molecular impact	510	Alteration of molecular velocity.....	555
Focus of molecular energy	514	Laws of magnetic deflection	557
Nature of the phosphorescent light	519	Focus of molecular heat of impact.....	561
		An ultra-gaseous state of matter	585

1878

Artigo do Crookes
explicando o efeito
radiômetro

CONDUCTION OF ELECTRICITY
THROUGH GASES

BY

J. J. THOMSON, D.Sc., LL.D., Ph.D., F.R.S.

FELLOW OF TRINITY COLLEGE, CAMBRIDGE

CAVENDISH PROFESSOR OF EXPERIMENTAL PHYSICS, CAMBRIDGE
AND PROFESSOR OF NATURAL PHILOSOPHY AT THE ROYAL INSTITUTION, LONDON

CAMBRIDGE:
AT THE UNIVERSITY PRESS

1906

1906

Thomson apontou que
Crookes estava errado !

-A luz possui natureza dual: onda-partícula. A luz sofre fenômenos como refração, dispersão e polarização, característicos das ondas. No entanto, no efeito fotoelétrico deve-se considerar que a luz é composta por partículas denominadas de fótons

-Fótons têm **quantidade de movimento ou momento** proporcional a sua frequência (ou inversamente proporcional ao seu comprimento de onda), e seu momento pode ser transferido quando um fóton colide com a matéria (como uma bola de bilhar em movimento transfere seu momento para outra bola).

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c} \qquad E = hf$$

p é a quantidade de movimento do fóton,

h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s ou $4,14 \times 10^{-15}$ eV.s)

c é a velocidade da luz ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s)

λ e f são o comprimento de onda e a frequência da radiação eletromagnética.

➤ Crookes, atribuiu à pressão da radiação eletromagnética como a causa da rotação (choque de fôtons sobre as hélices)

➤ No entanto, uma observação **singela** contrariava a explicação baseada no efeito da pressão da radiação. A luz incidindo no lado escuro das hélices seria absorvida, enquanto que luz incidente sobre o lado claro deveria ser refletida. Assim, deveria haver uma pressão de radiação duas vezes maior no lado claro em relação ao lado escuro. Neste caso, o moinho de luz deveria girar na direção contrária da observada. **Crookes estava errado!**

Conservação do momento linear

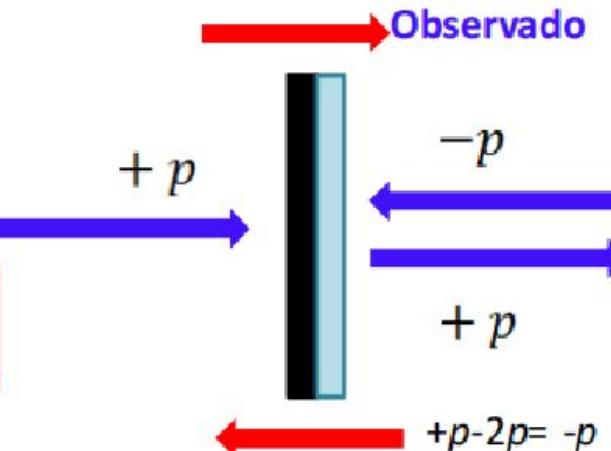
$$p_i + p_i^p = p_f + p_f^p$$

INDICA QUE O LADO CLARO FUGE DO LADO ESCURO

Analizando o lado escuro:

$$p + p_i^p = 0 + p_f^p$$

$$\Delta p^p = p_f^p - p_i^p = +p$$



Analizando o lado claro:

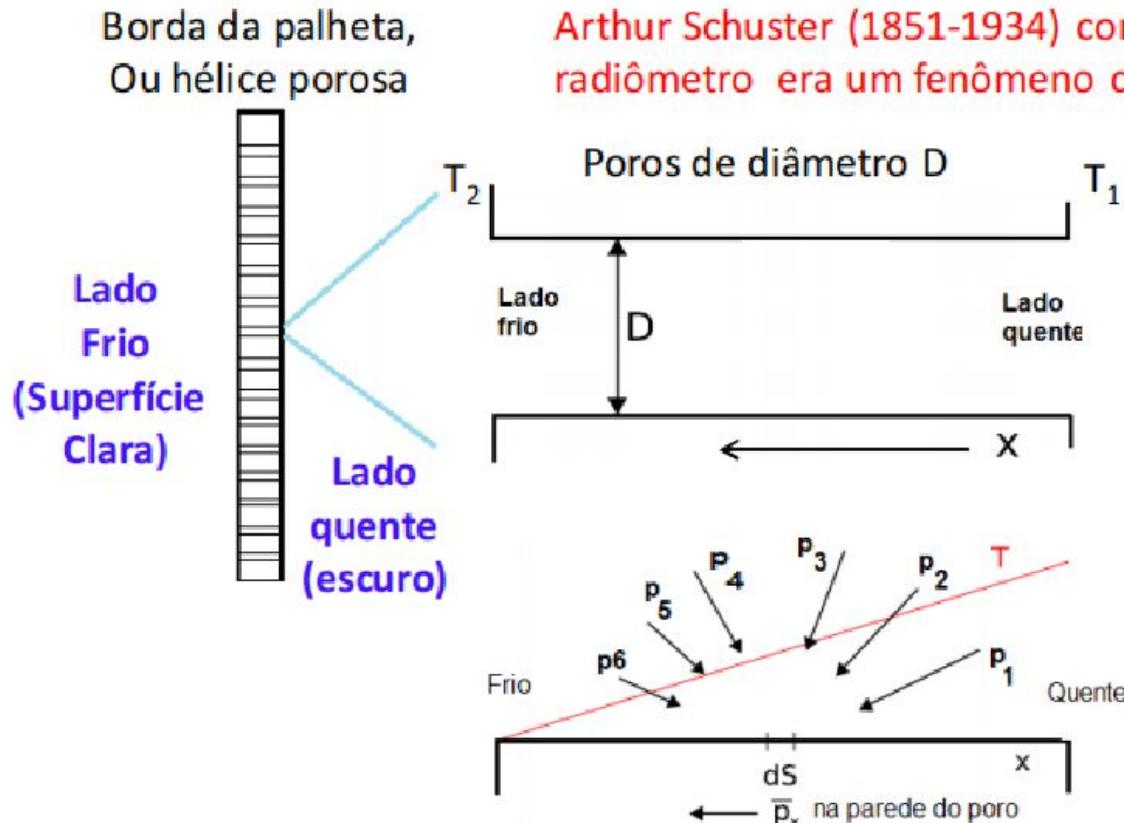
$$-p + p_i^p = p + p_f^p$$

$$\Delta p^p = -2p$$

INDICA QUE O LADO ESCURO FUGE DO LADO CLARO

p_i^p , p_i momento linear **inicial** da palheta e do fóton, respectivamente

Transpiração térmica (Osborne Reynolds, 1879)



➤ O efeito da transpiração térmica em uma palheta explica o efeito radiômetro de Crookes

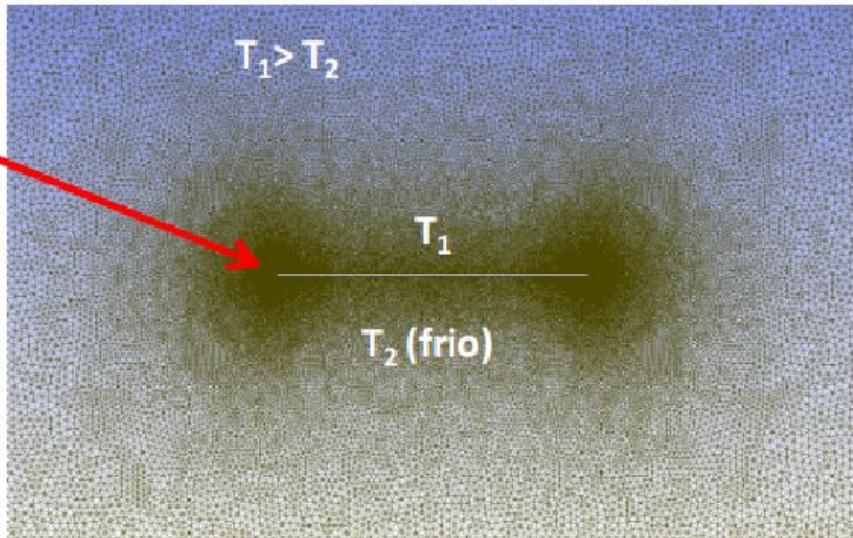
Moléculas vindas do lado quente tem momento maior

- Devido ao vácuo, as moléculas interagem muito pouco entre elas
- Suas velocidades dependem do lugar de procedência (por exemplo: $p_1 > p_6$)
- Quando colidem com a parede do poro (ou borda da palheta), as moléculas transferem ao poro (borda da palheta) um momento linear médio total de p_x , sentido do lado frio
- Por conservação do momento linear, as moléculas ganham $-p_x$, fluxo efetivo de moléculas no sentido do lado quente

Simulações feitas para uma hélice de 2cm x 2cm e espessura de 0,015cm

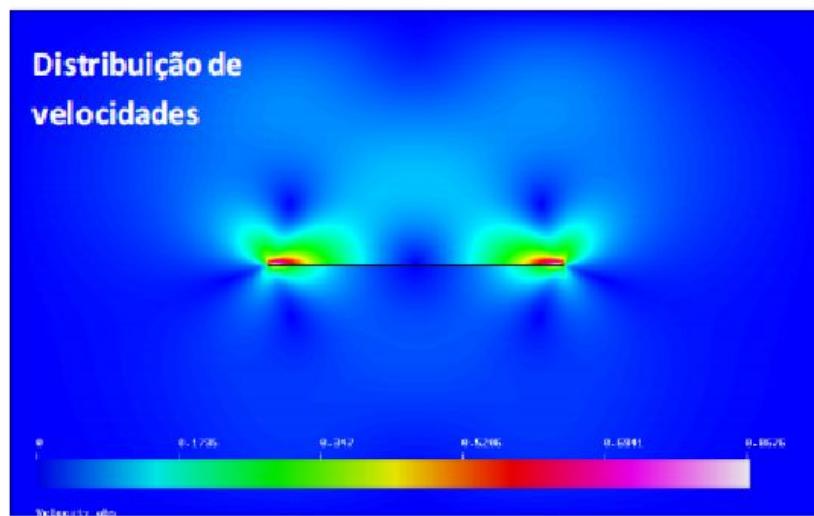
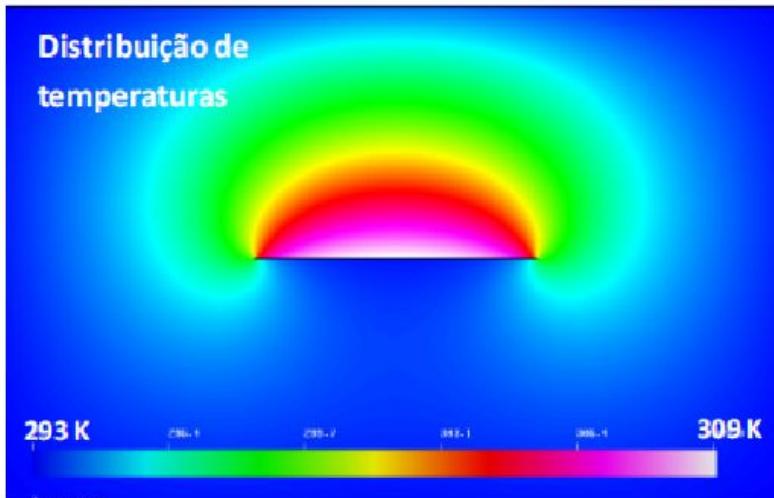
➤ Elevada concentração de moléculas nas bordas

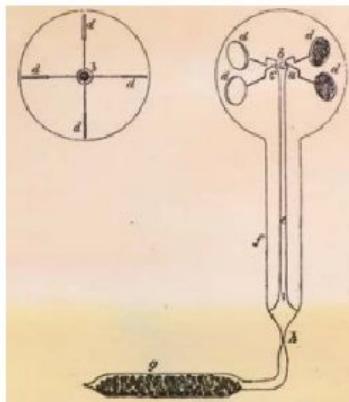
➤ Mostra a difusão de moléculas para o lado quente



Simulação de rastejamento térmico em moinhos de vento
"Simulation of thermal creep in light mills" Moritz Nadler
Tese de mestrado

moritz-nadler.de/studium/tctalk.pdf





O enigma do moinho de luz



José Pedro Rino
(djpr@df.ufscar.br)

Nelson Studart
(studart@df.ufscar.br)
Departamento de Física
Universidade Federal de São Carlos
São Carlos, SP, Brasil

Introdução

O radiômetro de Crookes, também conhecido como moinho de luz, foi originalmente projetado como um medidor de radiação, mas hoje pode ser considerado apenas um instrumento atraente para alunos e curiosos, podendo ser usado para demonstração em sala de aula. Consiste de quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um pino vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro e o gás é parcialmente evacuado por uma bomba, como mostrado na Fig. 1. As hélices têm tons claros (prateado) e escuros (preto) dispostas alternadamente. Elas começam a girar quando luz de qualquer natureza (solar, artificial ou até mesmo radiação infravermelha produzida pelo calor da mão)

Crookes, atribuía à pressão da radiação eletromagnética a causa do efeito. Aqui entre nós, é curioso observar que muitos físicos ainda hoje pensam que sabem como o radiômetro funciona, mas uma grande maioria desconhece seu funcionamento devido a sutilezas que esperamos elucidar neste artigo.

Um pouco de história

Sir William Crookes (1832-1919) desenvolveu seu radiômetro em 1873 como um dispositivo para medir a energia radiante do calor (infravermelho) e da luz solar ao investigar o efeito da radiação infravermelha sobre o elemento

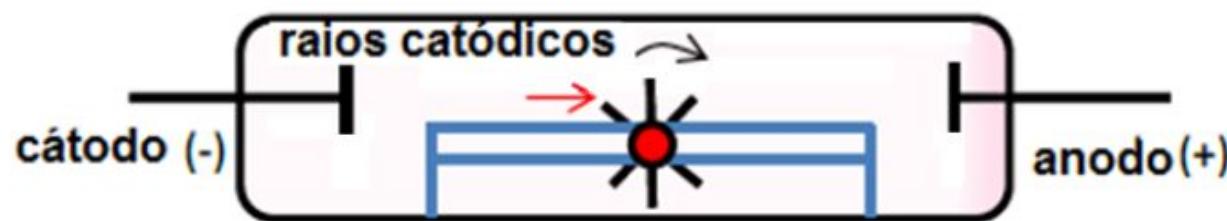
Uma explicação sedutora – mas equivocada – para o moinho de luz é aquela que aponta a rotação das palhetas como devendo-se ao choque de fótons incidentes sobre elas

químico tálio, recém-descoberto por ele próprio. A Fig. 2 mostra um diagrama esquemático do radiômetro original de Crookes, de 1876. O fenômeno atraiu a atenção de grandes nomes da ciênc-

Questões

- 1- O fenômeno observado no moinho de luz não se deve à pressão da radiação electromagnética. Porque?
- 2- Qual o comprimento da radiação electromagnética da luz (espectro visível) que provocará uma rotação mais rápida das palhetas.
- 3- Quando o radiômetro está sob a ação de um feixe de luz, então a pressão do ar é homogênea em toda a superfície da palheta?
- 4- O modelo da transpiração térmica de Reynolds considera uma superfície porosa. As palhetas do radiômetro de Crookes não têm poros. Como podemos utilizar esse modelo no moinho de luz?
- 5- Como será o movimento das palhetas se for retirado ‘**todo**’ o ar na ampola do radiômetro de Crookes?

Atividade 3- Ampola de Crookes contendo um torniquete



O torniquete tem 6 palhetas, o eixo de rotação está repousando sobre dois tubos finos de vidro.

Os raios catódicos colidem apenas sobre as faces superiores das palhetas.

O torniquete gira devido à transferência de momento linear dos elétrons para as palhetas ($p=m_e v$) ou devido ao efeito Radiômetro?

T. Humphrey, V. Calisa The Physics Teacher Vol. 52, 142, Março 2014

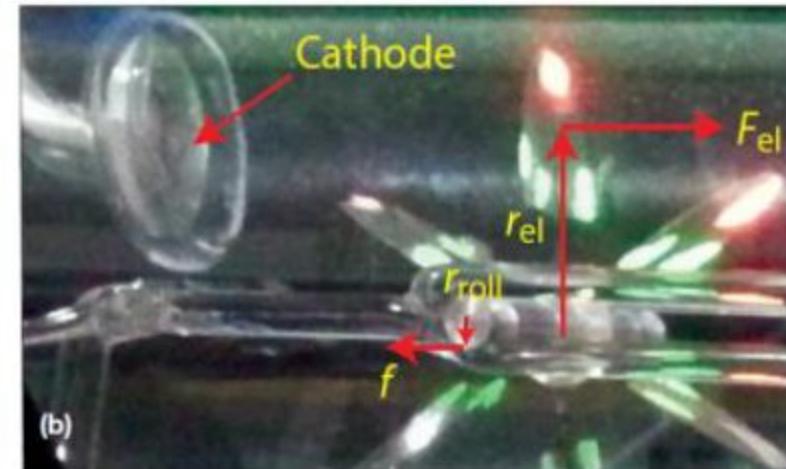
A Century-Old Question: Does a Crookes Paddle Wheel Cathode Ray Tube Demonstrate that Electrons Carry Momentum?

T. E. Humphrey, Fathoming Physics, Sydney, Australia

Vaishnavi Calisa, North Sydney Girls High School, Sydney, Australia

THE PHYSICS TEACHER ♦ Vol. 52, MARCH 2014

O tubo de Crookes contendo um torniquete demonstra que os elétrons têm momento linear?



Com relação aos elétrons:

Nossa abordagem consiste em calcular o maior momento linear que o elétron transfere para as palhetas do torniquete. Consideraremos uma colisão elástica entre os elétrons e as palhetas.

Para o elétron com momentum inicial : $p_i = m_e v$

Seja a colisão elástica dos elétrons com a palheta. Da lei de conservação: $p_i + P_i = p_f + P_f$

p_i, p_f, P_i, P_f : são o momento inicial e final do elétron e da palheta

A variação do momentum da palheta será: $\Delta P = P_f - P_i$

A máxima variação de momento do elétron que fornece o maior momento linear para a palheta ocorre quando $p_f = -p_i$

Dessa maneira $\Delta P = 2p_i = 2m_e v$

A força máxima que esses elétrons aplicarão às palhetas é : $F_{el} = 2p_i * i/e = 2m_e vi/e$

Onde i é o fluxo de elétrons, e é a carga elétrica do elétron, m_e é a massa em repouso do elétron.

Segundo Humphrey e Calisa: $i = 2 \times 10^{-5} A$ e $v = 5 \times 10^7 m/s$

Com relação as palhetas:

o movimento das palhetas é devido a forças e torques:

$$\sum \text{Forças} = Ma_{cm} \quad (1) \quad \text{e} \quad \sum \text{Torques} = I^*\alpha \quad (2)$$

onde M é a massa do sistema de palhetas, a_{cm} é a aceleração de deslocamento, α é a aceleração angular, I é o momento de inércia do conjunto de palhetas.

Se as palhetas não deslizam, então: $a_{cm} = \alpha^*r$

r é o rádio **do eixo** das palhetas = 1,08 mm,

R é o rádio da palheta = 11,6 mm

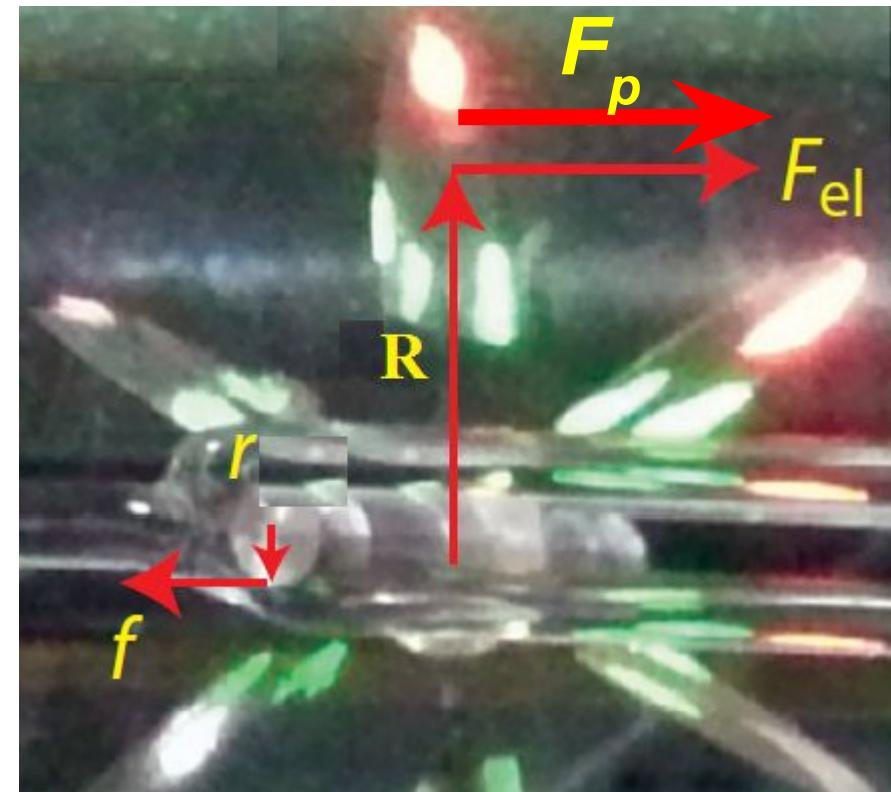
M é a massa do sistema de palhetas = 0,7 g

F_p é a força aplicada sobre as palhetas,

f é a força de atrito estático

$$\text{de (1)} : F_p - f = Ma_{cm}$$

$$\text{de (2)} : F_p R + fr = Ia_{cm} / r$$



Eliminando f nas equações anteriores

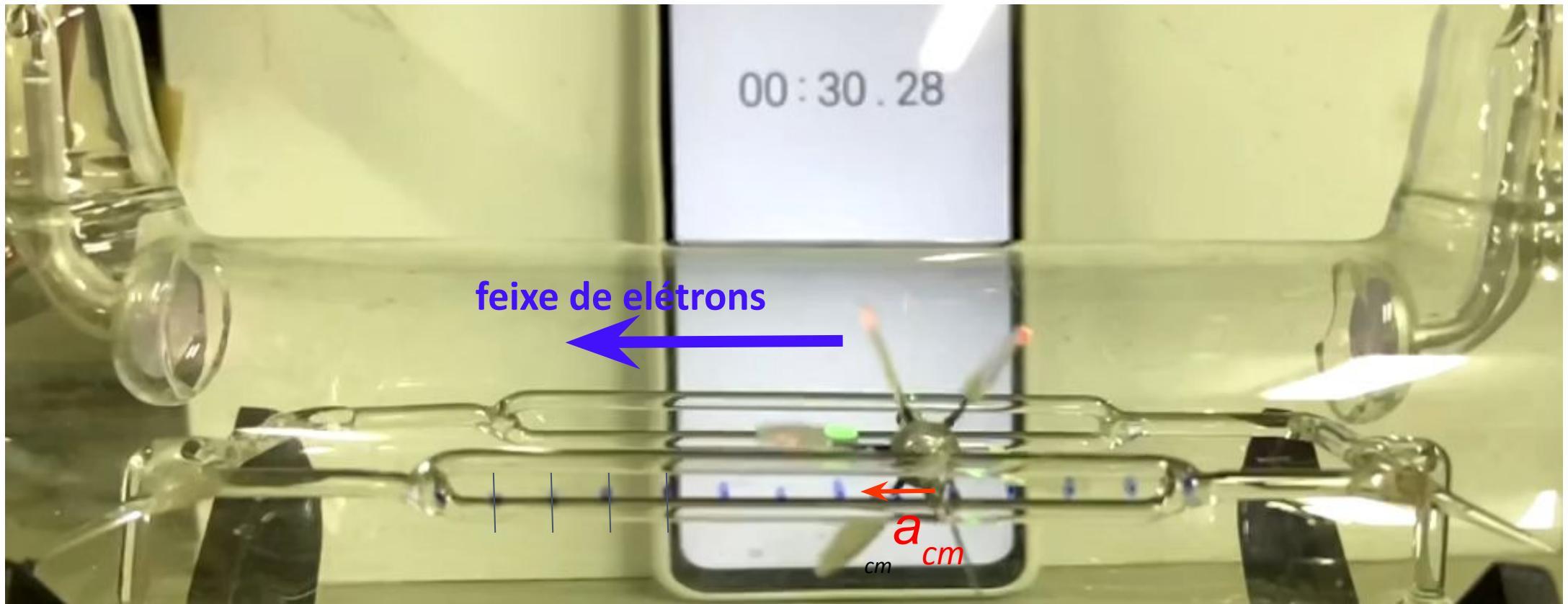
$$F_p = a_{cm}(I + Mr^2)/(Rr + r^2)$$

ou

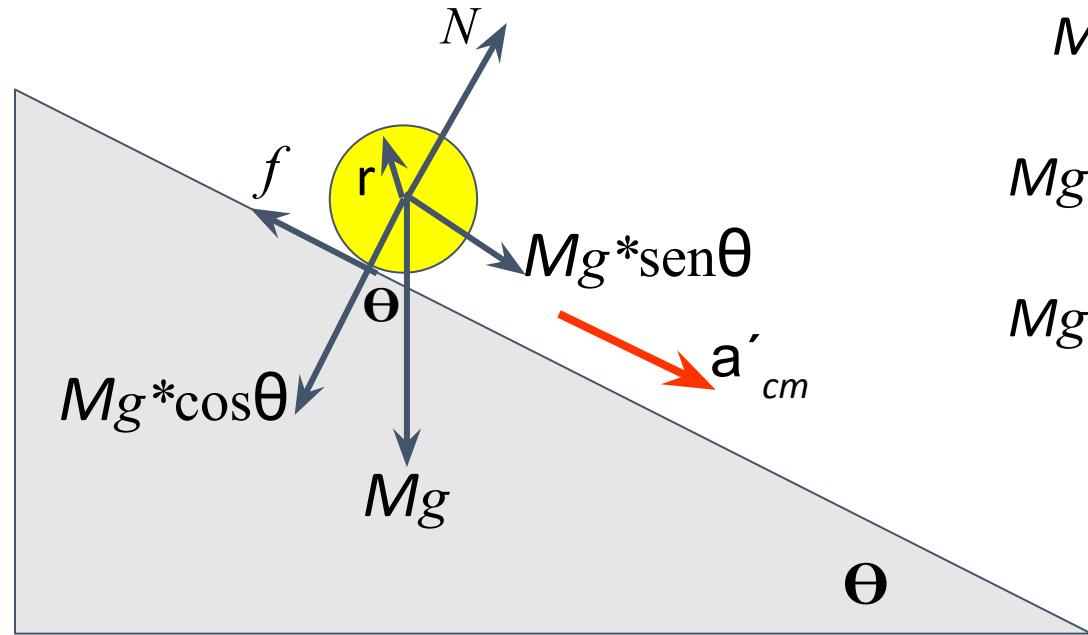
$$F_p = a_{cm}[(I + Mr^2)/r^2] * [r/(R + r)]$$

- a_{cm} podemos determinar a partir do gráfico de X vs t
- A expressão $r/(R + r)$ é conhecida a partir dos valores de r e R
- Para calcular F_p precisamos conhecer $(I + Mr^2)/r^2$
- Vamos obter experimentalmente : $(I + Mr^2)/r^2$

- Filmar em câmera lenta o movimento do torniquete. Coloque um celular no modo cronômetro na parte posterior para sinalizar o tempo. A escala azul tem espaçamento de 5 mm.
- Fazer uma tabela de deslocamento (X) do eixo do torniquete em função do tempo (t).
- Gráfique X versus t, utilize uma linha de tendência polinomial de segundo grau e determine a aceleração do centro de massa a_{cm} (OBS: pode derivar duas vezes o polinômio de segundo grau).



Incline o torniquete e determine a'_{cm}
(não aplique voltagem)



$$\sum \text{Forças} = Ma'_{cm} \quad (1) \quad \text{e} \quad \sum \text{Torques} = I^*\alpha \quad (2)$$

$$Mg * \sin\theta - f = Ma'_{cm}$$

$$f * r = I^*\alpha$$

$$Mg * \sin\theta - Ia'_{cm} / r^2 = Ma'_{cm}$$

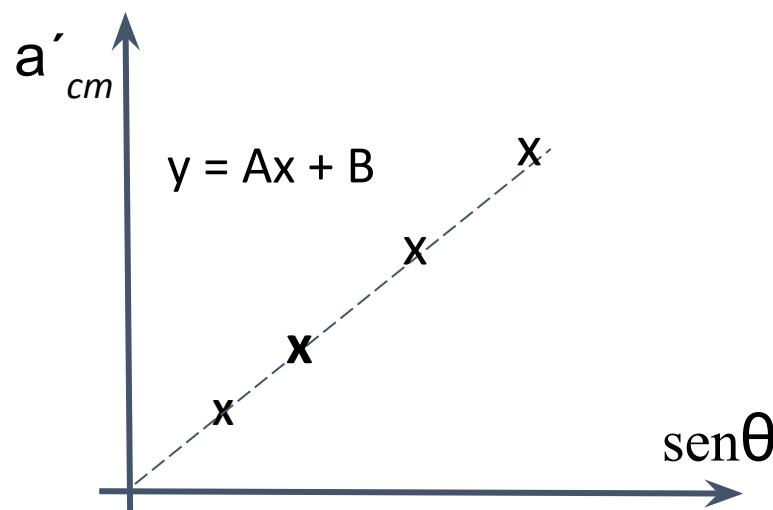
$$\alpha = a'_{cm} / r$$

$$Mg * \sin\theta = (I/r^2 + M)a'_{cm}$$

$$f = Ia'_{cm} / r^2$$

$$a'_{cm} = Mg * \sin\theta / (I/r^2 + M)$$

$$a'_{cm} = Mg * r^2 / (I + Mr^2) * \sin\theta$$



Graficar a'_{cm} versus $\sin\theta$, e utilizar uma linha de tendência linear para determinar o coeficiente angular :

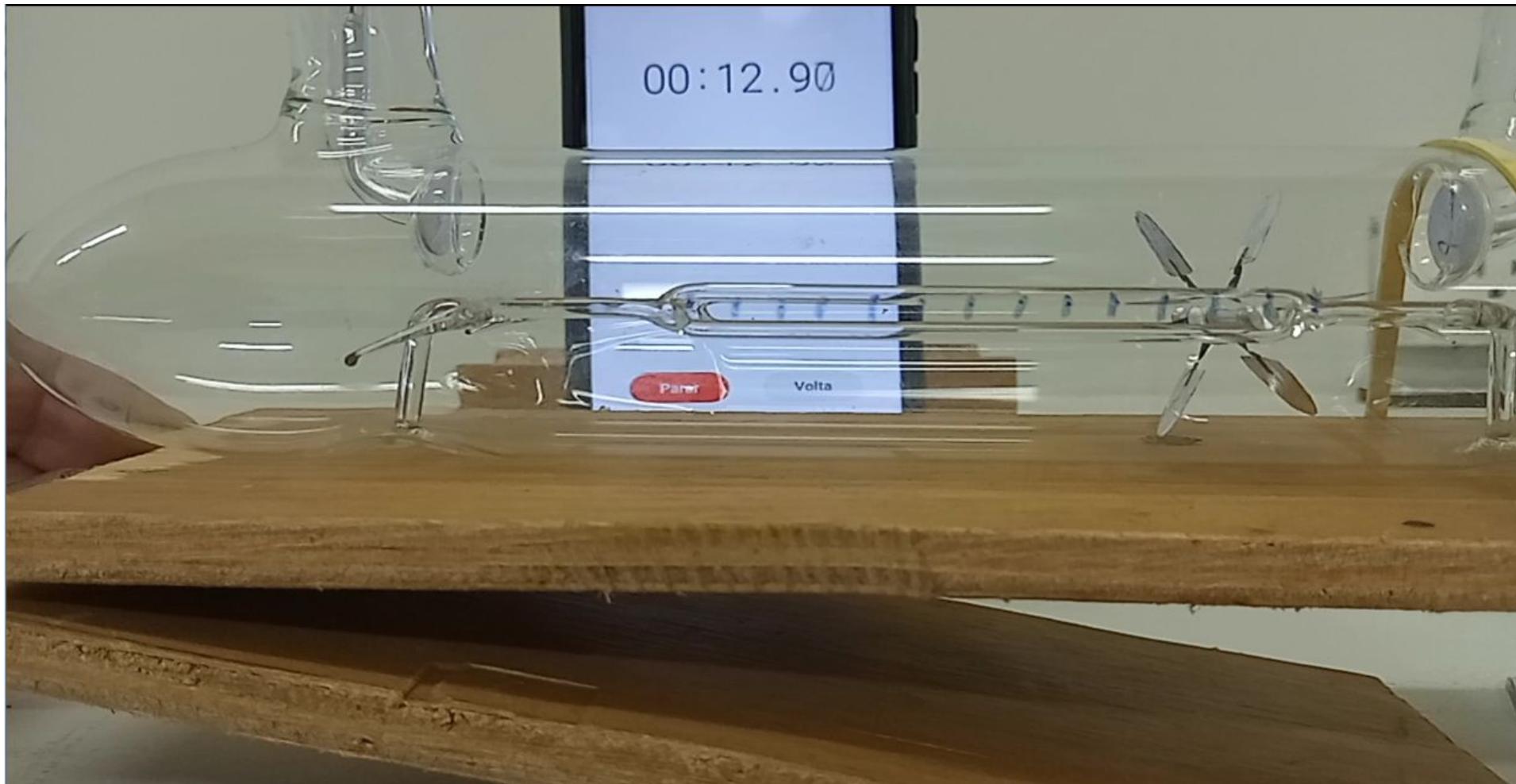
$$Mg * r^2 / (I + Mr^2)$$

OBS: * aqui a aceleração a'_{cm} não tem o mesmo valor quando se aplica voltagem.

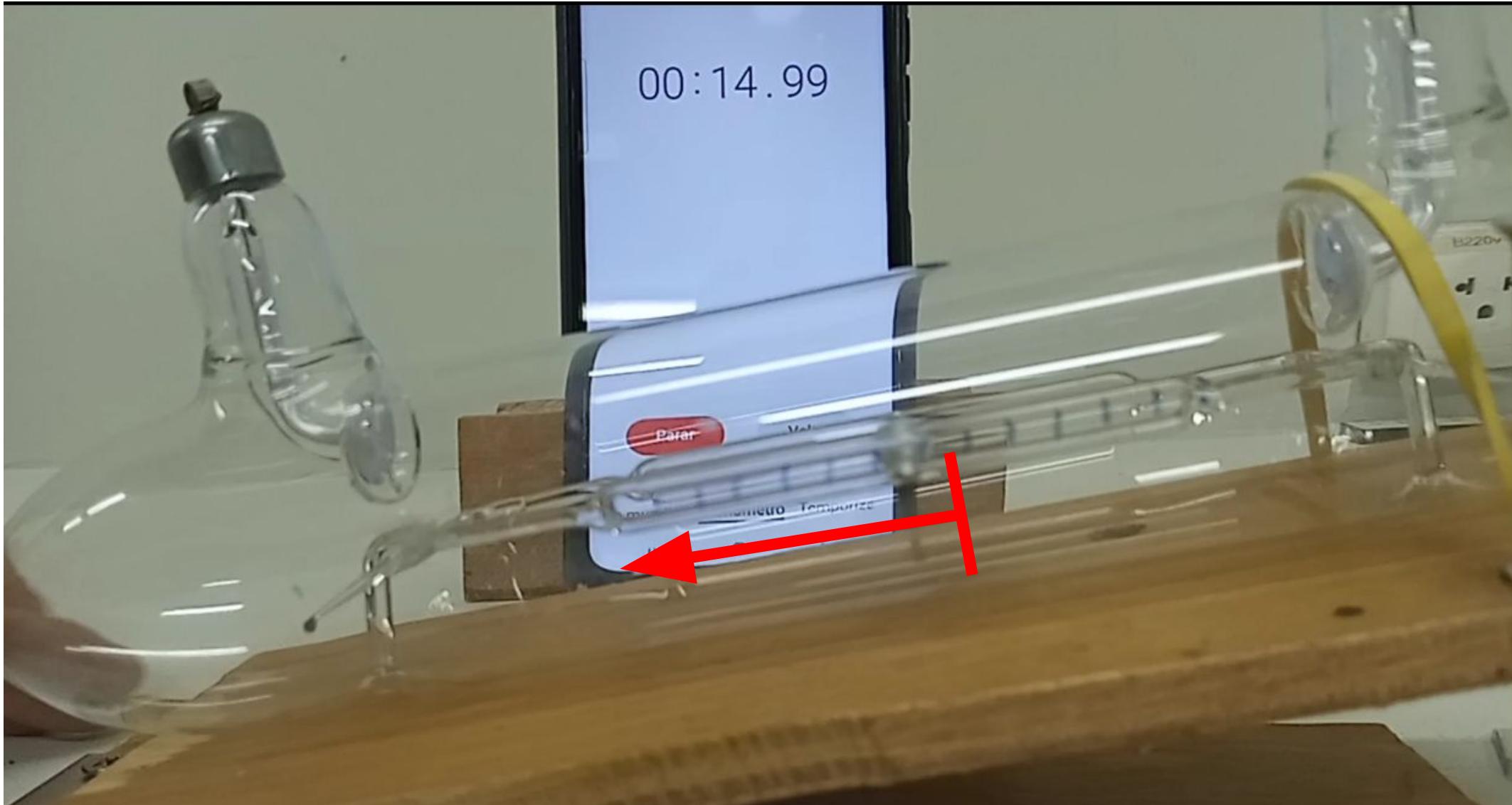
*Para cada valor do ângulo, coletar dados de X versus t. Determine a aceleração através de uma linha de tendência polinomial 2do grau.

*Considerar ângulos de: 3, 5, 7, 9, 11 graus

Não aplique tensão nos eletrodos. Definir o ângulo, o parafuso tem 5 marcações para os ângulos de 3, 5, 7, 9 e 11 graus. Ligue o cronômetro. Inicie a gravação. Baixe a base de madeira



Quando a base de madeira estiver sobre a mesa determinar $X(t)$, considerar os deslocamentos depois da metade da escala.



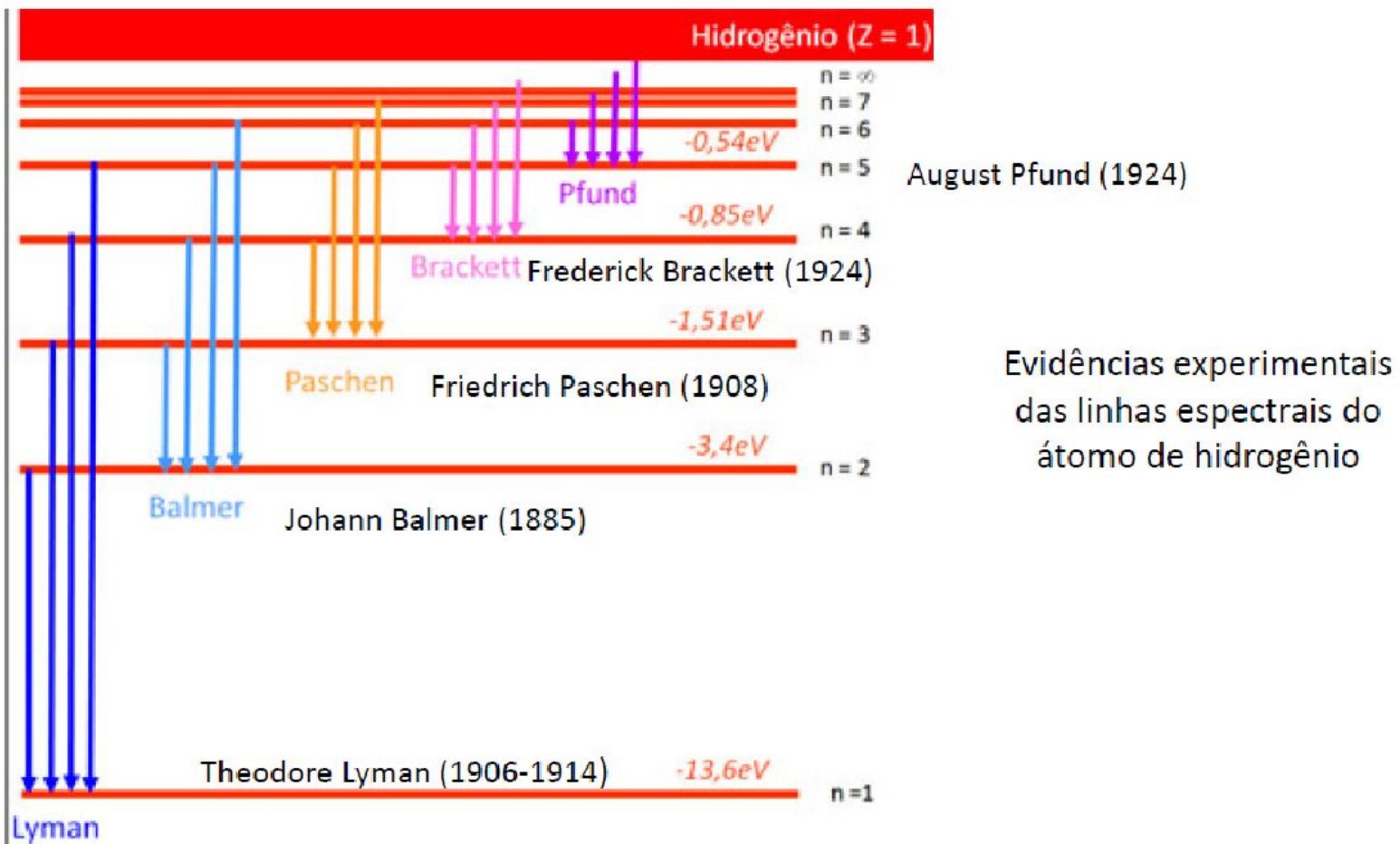
Questões (OBS: Em todas as respostas incluir a memória de cálculo.):

- 1- Desenvolver os modelos físicos necessário para determinar F_{el} e F_p
- 2- Demonstrar as expressões para F_{el} e F_p . Fazer as substituições necessárias e calcule esses valores.
- 3- No experimento aplicando a tensão: apresentar uma tabela com os dados de X e tempo. Fazer um gráfico com os dados dessa tabela e utilizar uma linha de tendência polinomial de segundo grau para determinar a_{cm} . Informe o valor da aceleração.
- 4- No experimento inclinando o torniquete (sem aplicar tensão): apresentar uma tabela com os dados de X e t. Para cada ângulo, apresentar gráficos de X vs t, e usar uma linha de tendência para determinar a aceleração a'_{cm} . Informe os valores da aceleração.
- 5- Apresentar uma tabela com os dados de a'_{cm} e $\sin\theta$. Apresentar gráficos de a'_{cm} vs $\sin\theta$, usar uma linha de tendência linear para determinar o coeficiente angular.
- 6- Qual o valor de: $(I + Mr^2)/r^2$?
- 7- Calcule o valor de F_p .
- 8- Comparar os valores da força elétrica F_{el} e a força que está sendo aplicada sobre as palhetas F_p , discutir esses resultados. A F_{el} é a única força responsável pela aceleração observada? Explique quais outras forças podem estar presentes.

ATIVIDADE 4

Linhas espectrais

- Observar o caráter discreto ou quantizado dos níveis de energia atômicos.
- Analisar as linhas de emissão dos átomos de He e Hg com auxílio de uma grade de difração.
- Identificar às transições atômicas no espectro visível correspondentes aos átomos de He e Hg .



Modelo de Niels Bohr do átomo de hidrogênio (1913)

- 1- Os elétrons que circundam o núcleo atômico em órbitas estacionárias, sem radiar energia.
- 2-A energia total do elétron numa determinada órbita apresenta um valor quantizado.

$$E_n = \frac{-13,6\text{eV}}{n^2}$$

- 3- Quando ocorre o salto de um elétron entre órbitas, a diferença de energia é emitida ou absorvida na forma de radiação eletromagnética

$$hf = E_m - E_n$$

- 4-As órbitas permitidas dependem de valores quantizados do momento angular orbital, L, de acordo com a equação :

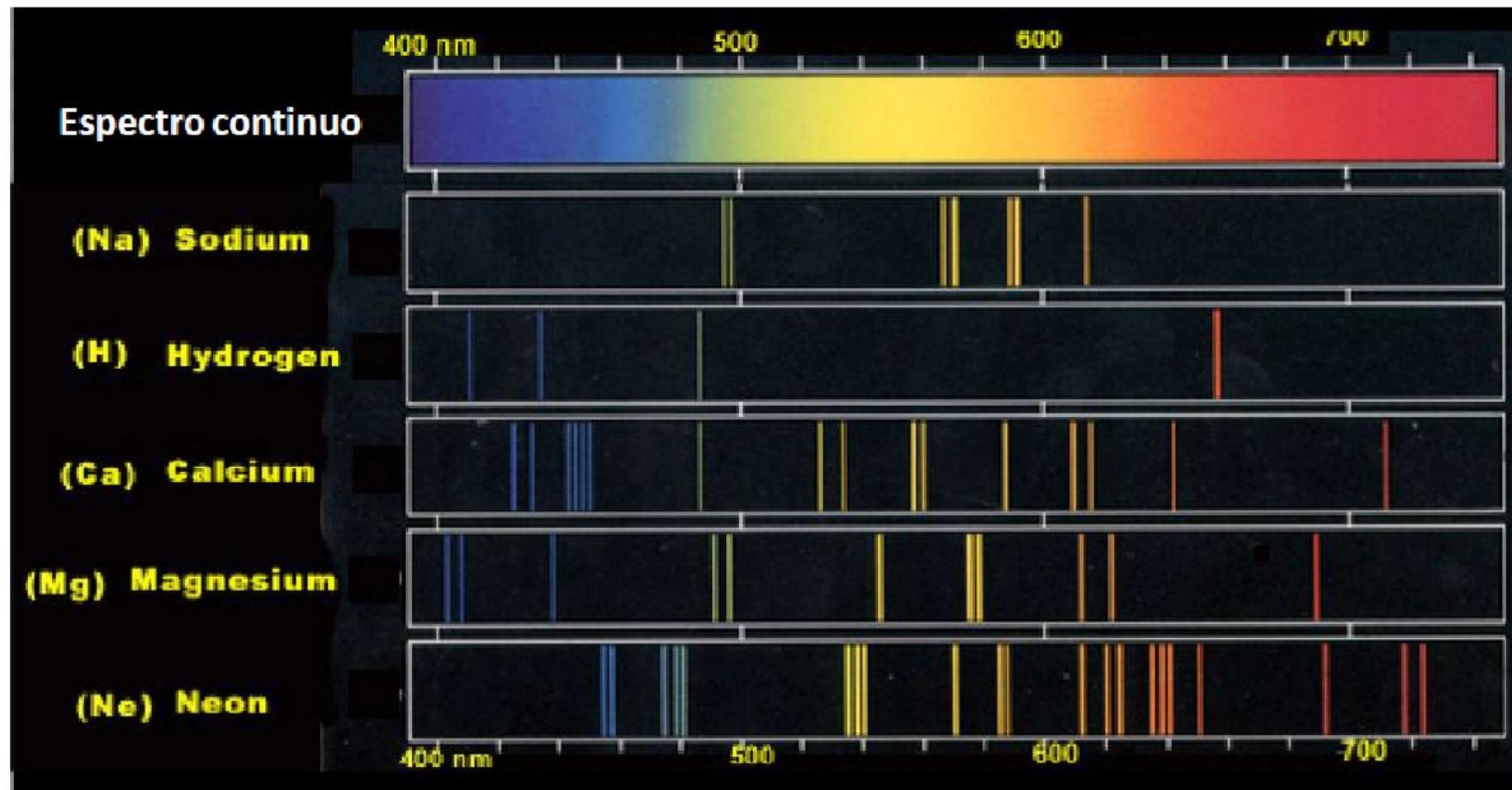
$$L = nh/2\pi$$

onde n = 1, 2, 3, ... são chamados de números quânticos principais

h é a constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34}\text{J.s} = 4,14 \times 10^{-15}\text{ eV.s}$

f é a frequência da radiação eletromagnética.

Exemplos de Linhas espectrais

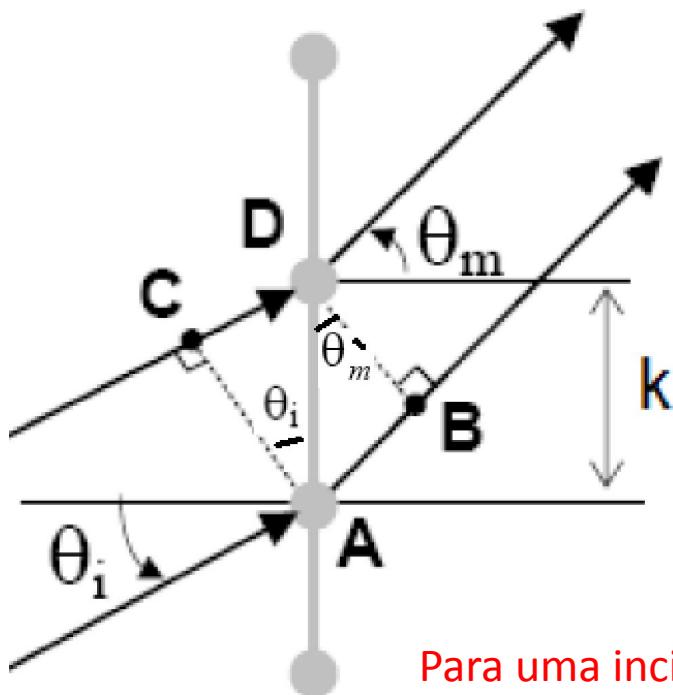


AS CORES NAO TEM UM UNICO COMPRIMENTO DE ONDA !

Grade (rede) de difração:

- Uma grade de difração é um componente óptico que contém uma série de ranhuras, paralelas e muito próximas entre si.
- Dependendo do número de ranhuras por milímetro, haverá uma maior ou menor resolução dos espectros. Instrumentos com melhor resolução espectral terão grades de difração com maior número de ranhuras por milímetro
- Um feixe de luz que incide nesta rede é difratado e os raios provenientes das diversas fendas interferem formando uma figura de intensidade variável.
- Esta figura apresenta máximos de intensidade em diversas posições sempre que a diferença de caminho ótico ($d * \text{sen}\theta$) entre os raios provenientes de duas fendas adjacentes, distantes d entre si, for igual a um número inteiro ($m = 0, 1, 2, \dots$) de comprimentos de onda λ .

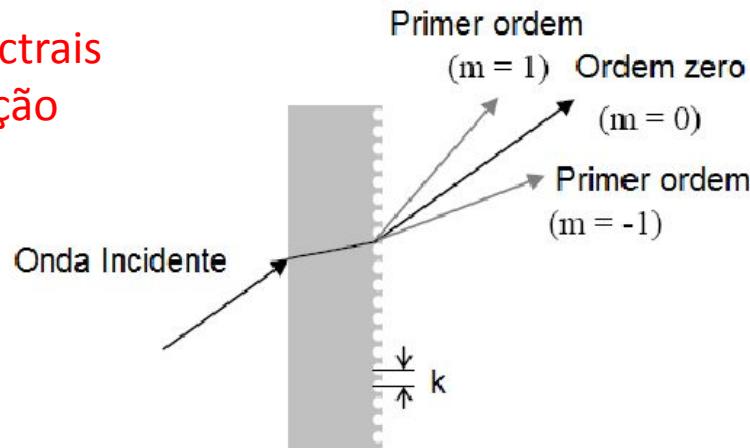
Para observarmos as linhas espectrais necessitamos uma grade de difração



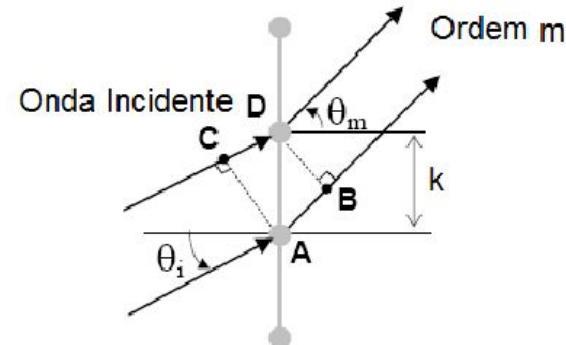
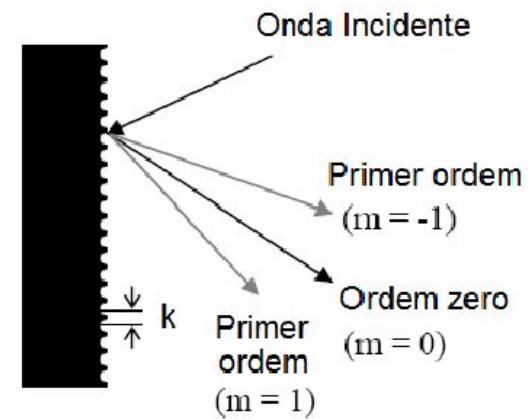
Para uma incidência perpendicular à grade: $\theta_i = 0$

$$AB - CD = m\lambda$$

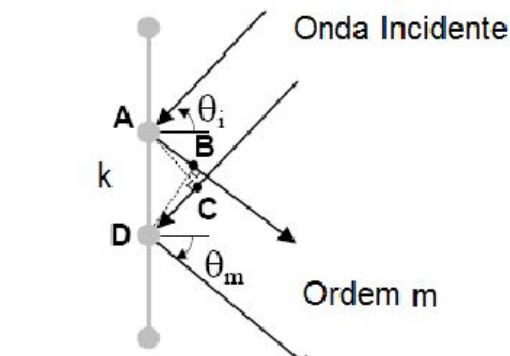
Experimento por transmissão



Experimento por reflexão



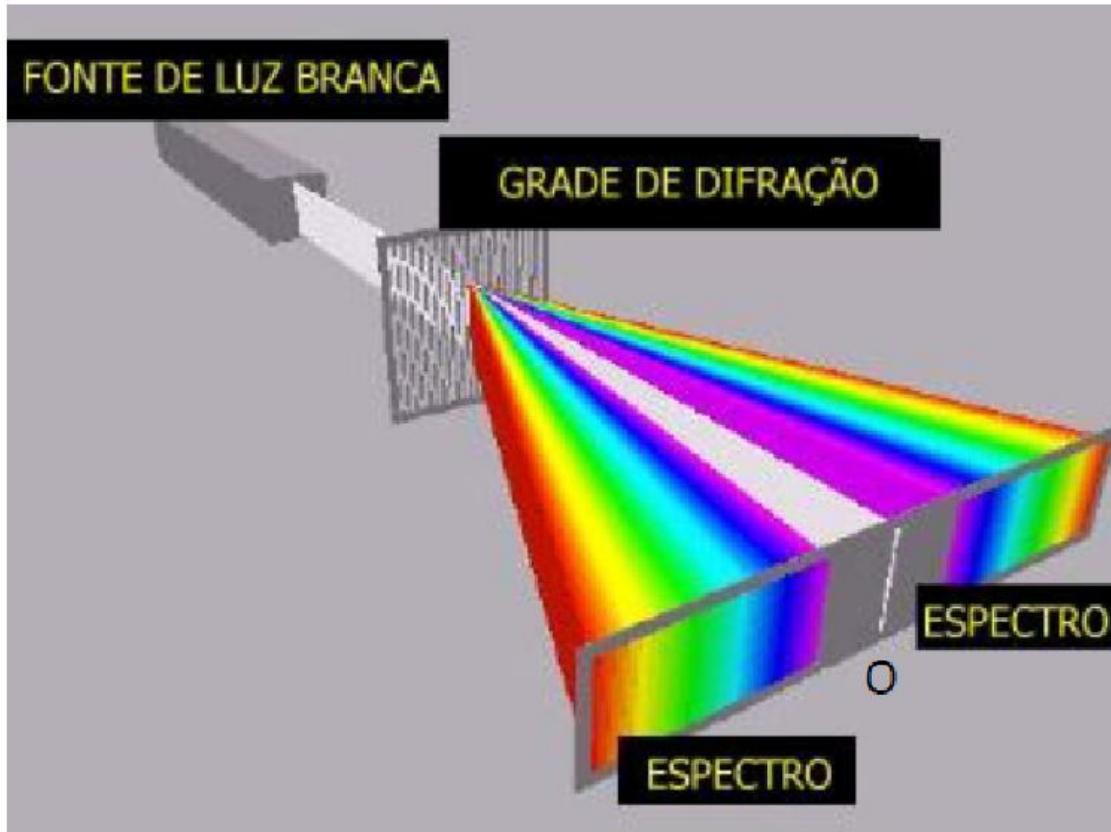
$$AB - CD = k(\sin \theta_m - \sin \theta_i)$$



$$AB - CD = k \sin \theta_m$$

$$\boxed{m\lambda = k \sin \theta_m}$$

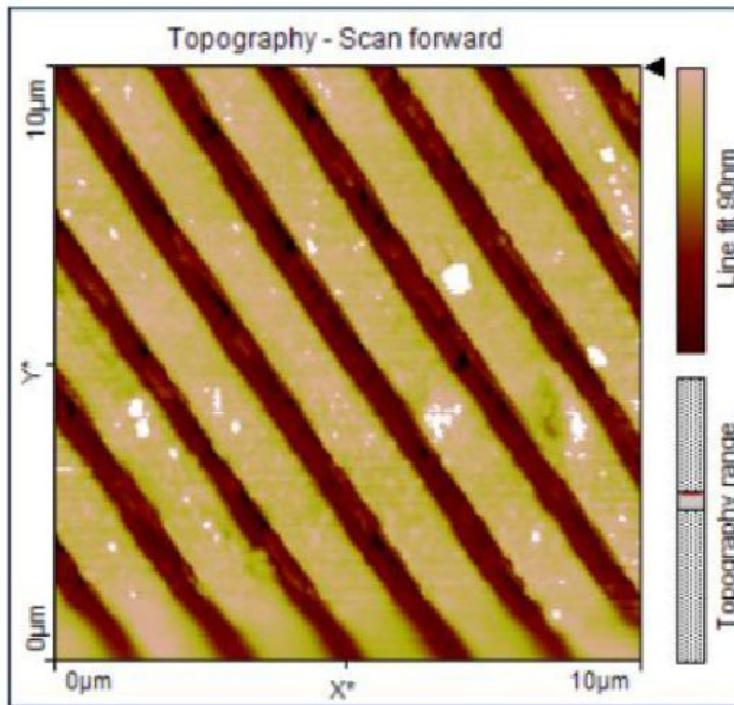
$m=1$ para as linhas de difração de primeira ordem



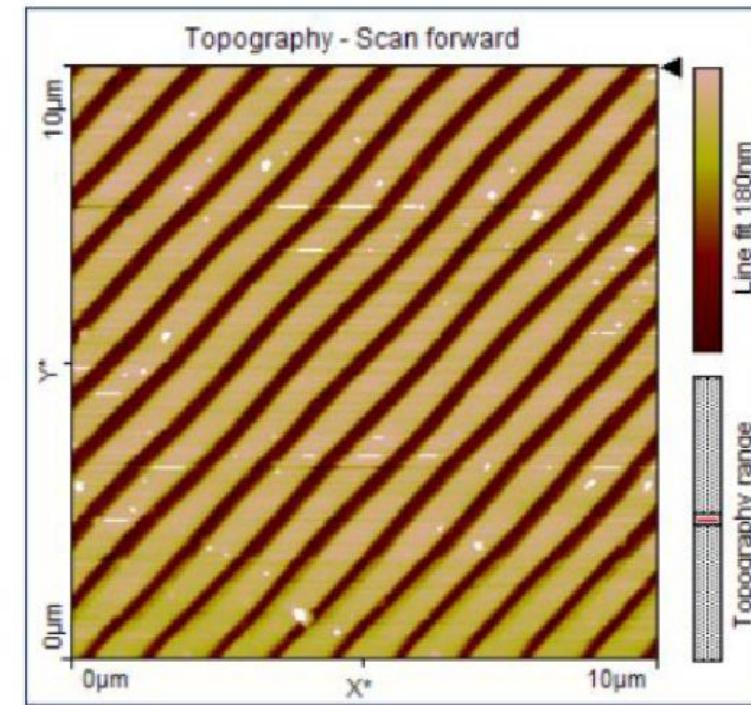
*Notar a formação simétrica de linhas de igual cor com relação ao centro O



Grade que possibilita separar a luz em suas linhas espetrais



CD-Blank



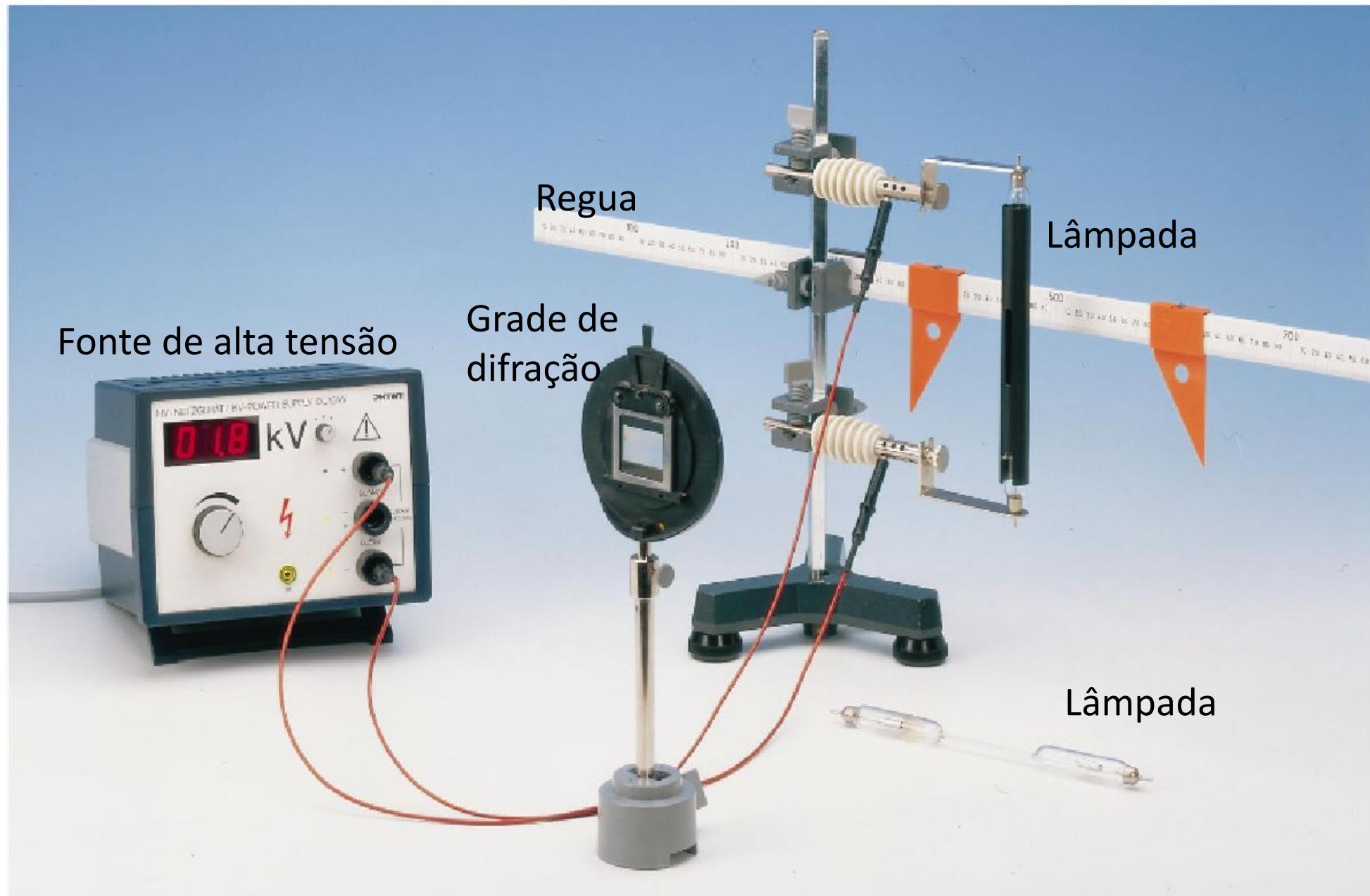
DVD- Blank

Comprimento degrau = **1.57 μm**

Comprimento degrau = **0.780 μm**

➤ Nossa grade tem 600 degraus em 1 mm ; $k=1\text{mm}/600=0,00167\text{ mm}=1,67\text{ }\mu\text{m}$

Fig.1: Experimental set up for measuring the spectra of He and Hg.



Spectrum of mercury.

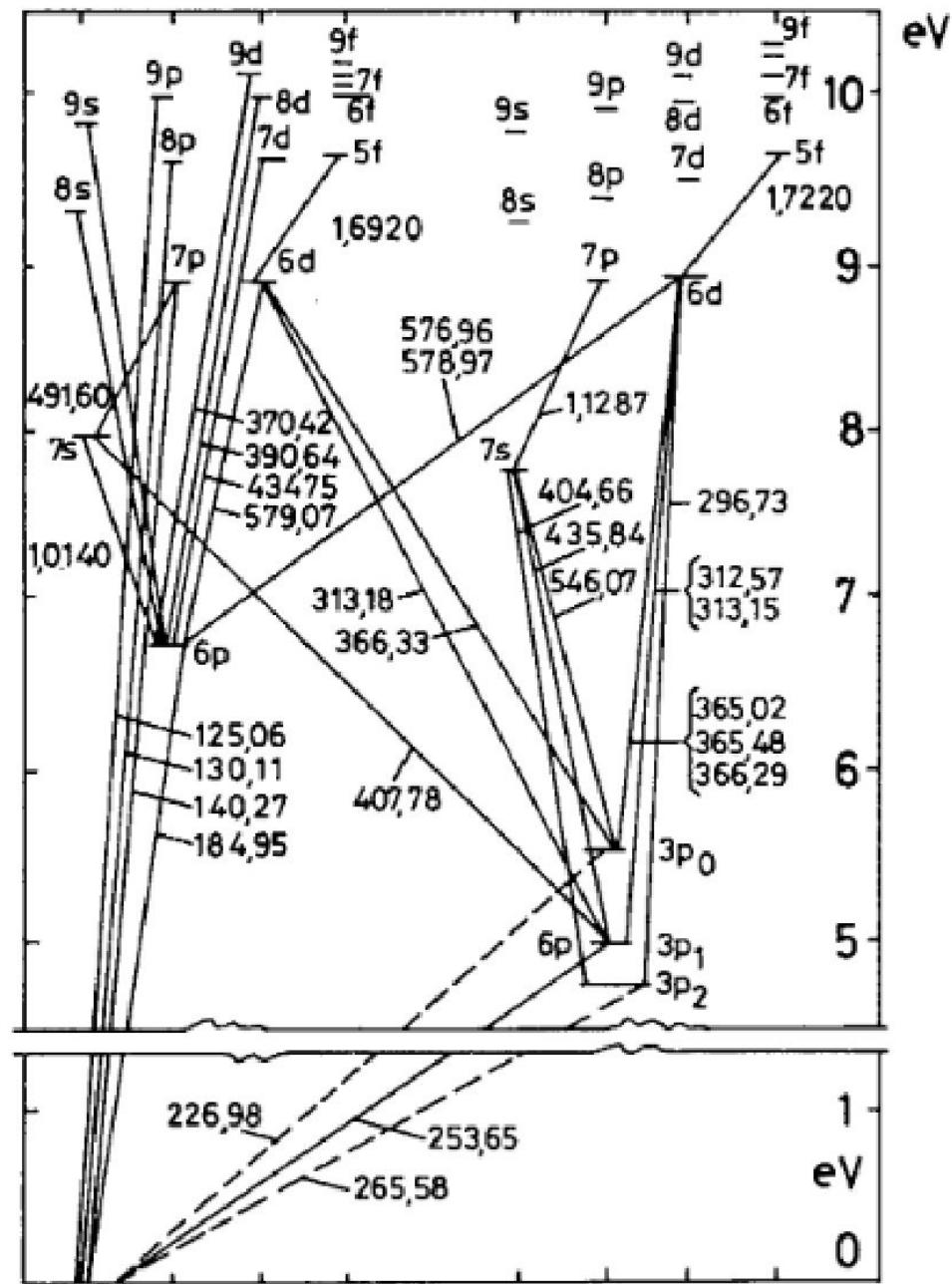


Diagrama de energia e valores dos comprimentos de onda das transições do átomo de Hg

Espectro atômico do Hg

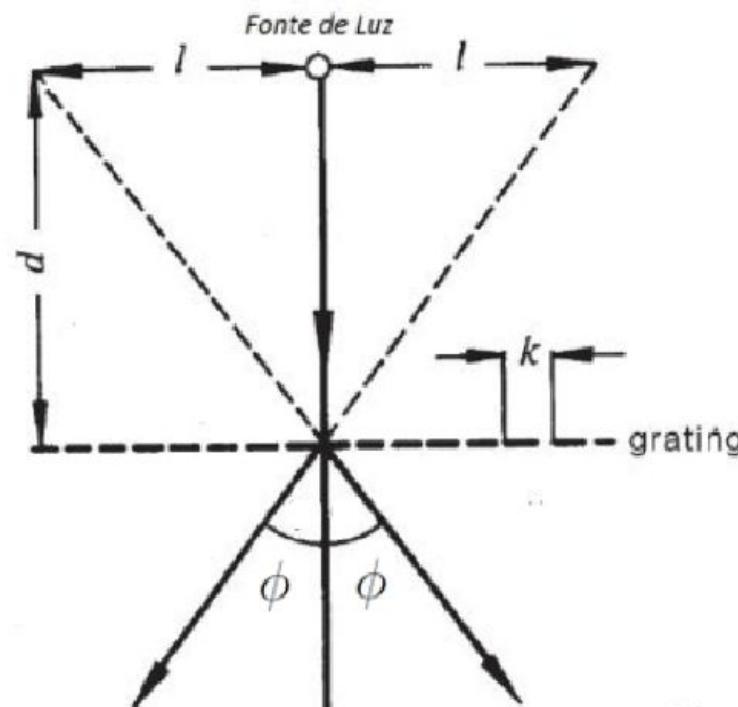
- As linhas de espectro de Hg são examinadas por meio de uma grade de difração.
- Os comprimentos de onda das linhas são determinadas a partir do arranjo geométrico e a constante da grade de difração.
- Se a luz de comprimento de onda λ é difratada pela grade (grade com a constante k). A intensidade máxima da luz ocorre se o ângulo de difração satisfaz a condição:

Condição para as linhas espetrais

$$n \cdot \lambda = k \cdot \sin \phi \quad \sin \phi = \frac{l}{\sqrt{d^2 + l^2}}$$

$$\boxed{\lambda = \frac{kl}{\sqrt{d^2 + l^2}}}$$

$$k = 1,67 \text{ } \mu\text{m}$$



Atividades

- 1- Tem-se uma grade de difração. Fazer 2 figuras e determinar a diferença de caminhos ópticos para que ocorra interferência construtiva quando a grade é usada em um experimento por A) transmissão B) reflexão.
- 2- Considerando a lâmpada de Hg e os dados coletados em nosso experimento, preencher a tabela com todas as distâncias e as distâncias entre a linha espectral de ordem zero e as linhas de primeira ordem (L) (ordem +1). A distância entre a grade e a régua/anteparo (d) onde são observados as linhas espectrais.

Tabela 1: linhas espectrais de primeira ordem:

$$d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}$$

Cor	$2L$	L	$\text{Sen}(\theta)$	$\lambda(\text{m})$	$f(\text{seg}^{-1})$	Energia (eV)	Transição

- 3- Calcule as posições (L) onde devem ocorrer as linhas espectrais de terceira ordem (+3) e anote seus resultados na tabela 2:

Cor	L	Energia (eV)	Transição

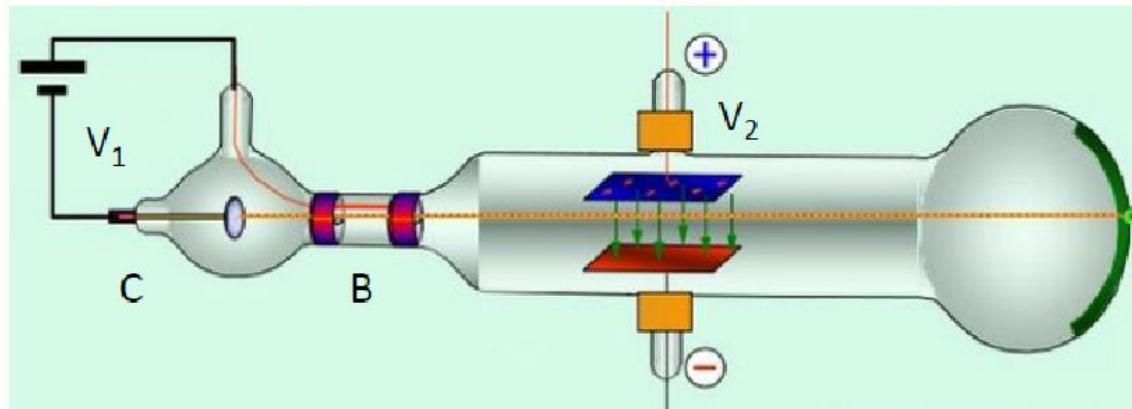
- 4- Tem-se uma lâmpada que emite luz com uma linha espectral de $\lambda = 700 \text{ nm}$, a lâmpada+anteparo (régua) estão localizados a $1,732 \text{ m}$ da grade, o ângulo de observação é de 30 graus. A) Determine a distância onde se formará a linha espectral, B) a quantidade de ranhuras por mm que a grade tem.

- 5- Tem-se uma lâmpada que emite luz monocromática com uma linha espectral com $\lambda = 650 \text{ nm}$, a luz da lâmpada é projetada perpendicularmente à grade. O anteparo é uma régua com comprimento máximo de 1 metro. Determine o menor valor da constante da grade (k) para que seja observada a linha espectral de segunda ordem.

ATIVIDADE 5

Experimento para determinar e/m

Aparato experimental usado por Thomson, 1897



➤ 1897, Joseph John Thomson construiu um tubo de raios catódicos para estudar o efeito dos campos elétricos e magnéticos sobre a trajetória desses raios.

$$e/m = 1,758819 \times 10^{11} \text{ C/Kg}$$

➤ Em 1911 o físico americano Andrews Millikan descobriu o valor da carga do elétron com sua experiência da gota de óleo,

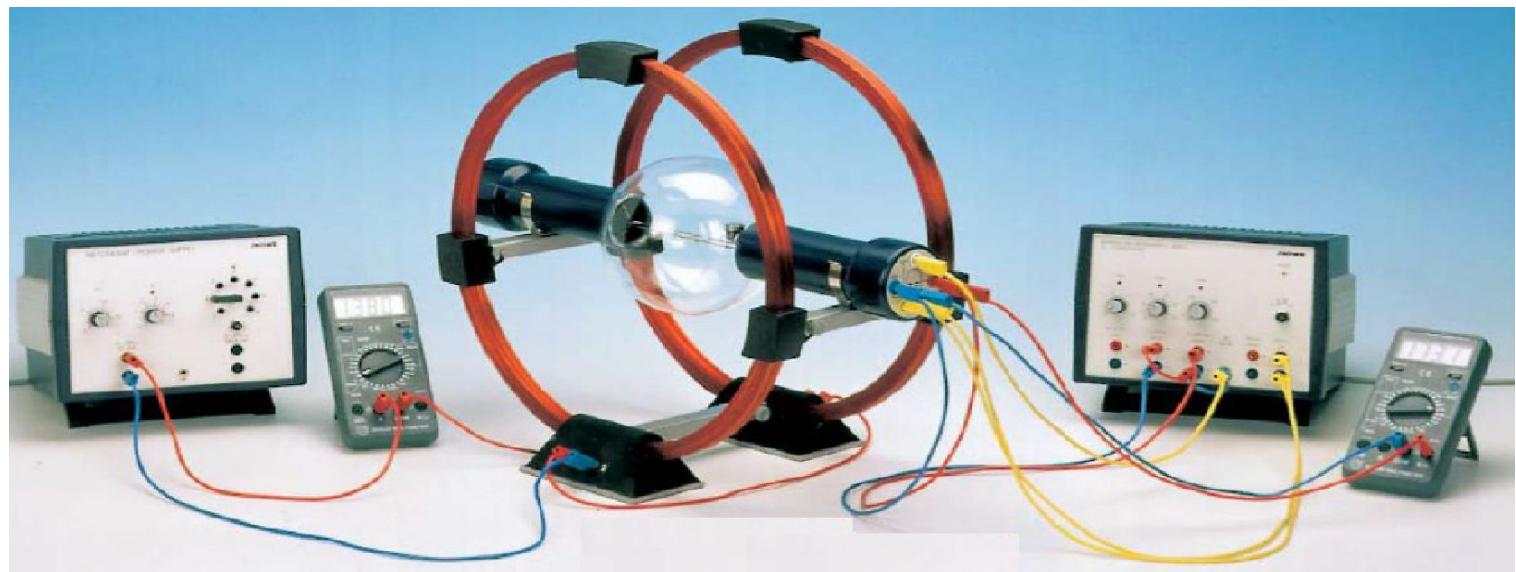
$$e = -1,60217 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Determinação da razão – e/m_0

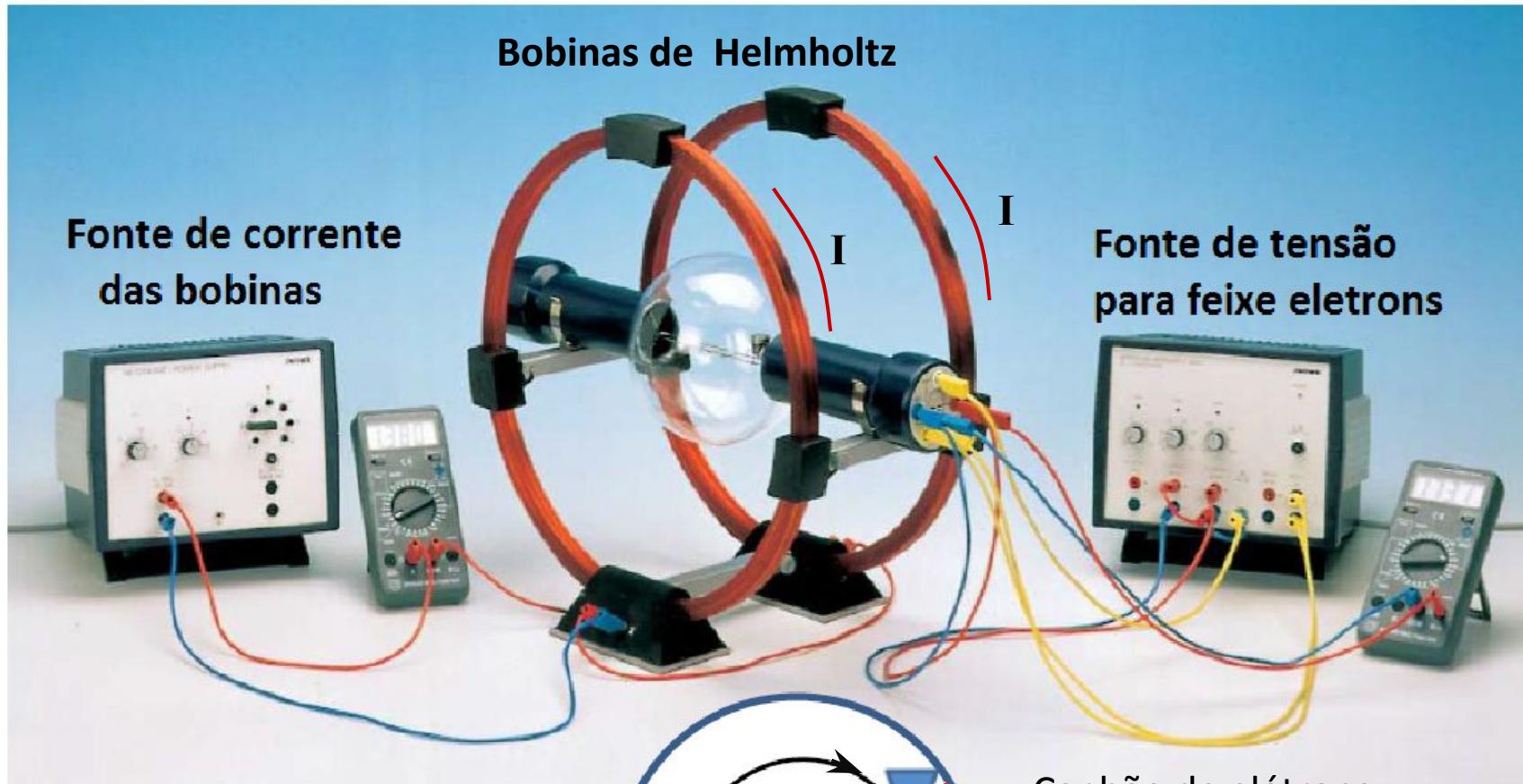
Se a polaridade do campo magnético for correta, uma trajetória curva luminosa será visível em uma sala escurecida. Variando-se o campo magnético (corrente) e a velocidade dos elétrons (potencial de foco e acelerador) pode-se ajustar o raio da órbita de modo a fazê-lo coincidir com os raios pré-definidos da escala de hastes metálicas. Quando o feixe eletrônico coincide com uma das hastes da escala, somente metade do círculo é observada. Os valores pré-definidos na escala são 2, 3, 4, e 5 cm.

A trajetória helicoidal do feixe é indicação de que os elétrons não estão sendo projetados perpendicularmente ao campo magnético. Isto pode ser corrigido rodando-se o tubo em torno de seu eixo longitudinal.

Equipamento PHYWE



Aparato experimental para determinar e/m :



Equipamento PHYWE

Campo magnético

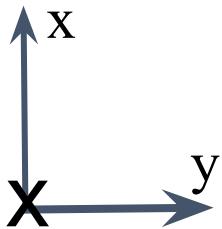
x	x	x
x	x	x
x	x	x



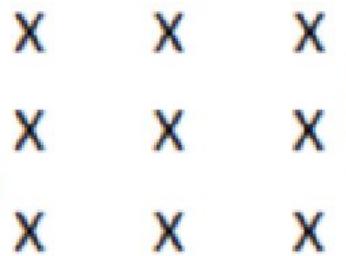
B

x	x	x
x	x	x
x	x	x

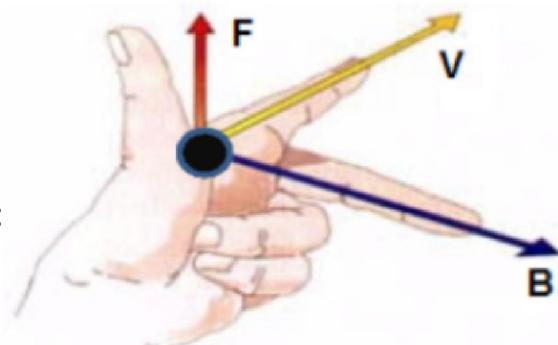
Trajetória do feixe de elétrons



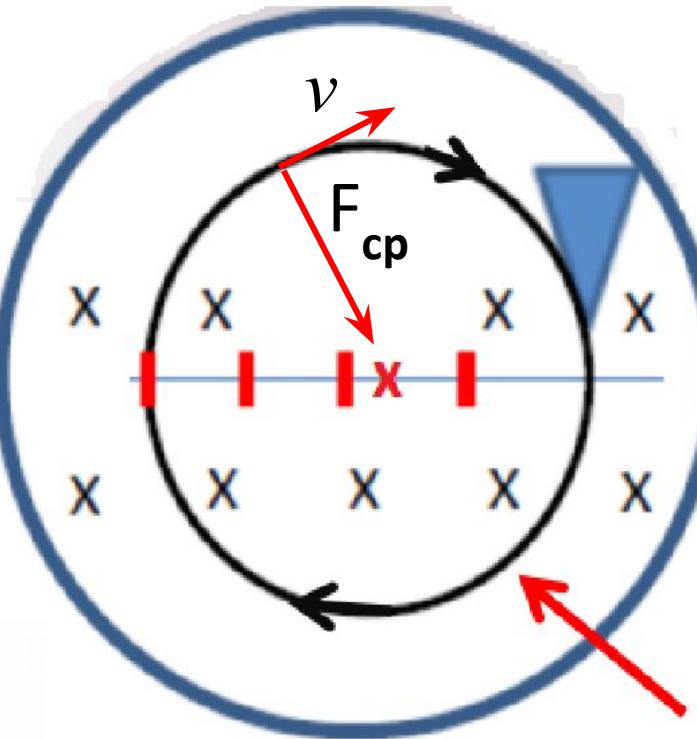
Campo magnético



Exemplo:

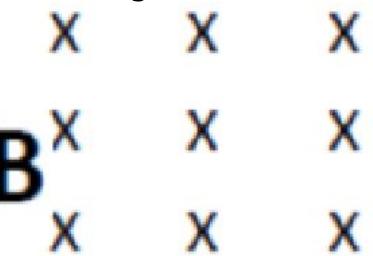


Cargas negativas:
Regra da mão
esquerda



Velocidade tangencial: v
Aceleração centrípeta
 $a_{cp} = v^2/r$

Força centrípeta : $F_{cp} = mv^2/r$



Trajetória do feixe de elétrons

➤ Raio catódico submetido a um campo magnético perpendicular ao feixe

Se um elétron de massa m e carga e é acelerado por uma diferença de potencial V , então sua energia cinética será:

A força devido ao campo magnético da bobina é igual à força centripeta:

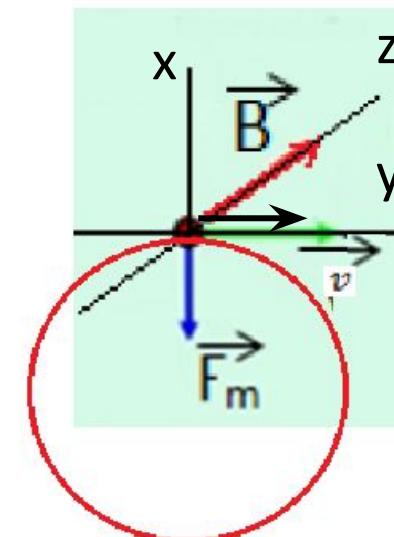
$$\vec{F} = e \vec{v} \times \vec{B} = \frac{mv^2}{r} \hat{r}$$

Se o campo magnético é perpendicular ao vetor velocidade instantânea

$$v = \frac{e}{m} Br \dots \dots \dots (2)$$

Igualando as equações 1 e 2, temos que:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \frac{e}{m} Br$$



Colocando em evidência e/m:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(Br)^2}$$

Bobina de Helmholtz

$$B_z = \mu_0 \cdot I \cdot R^2 \left\{ \left(R^2 + \left(z - \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{3/2} + \left(R^2 + \left(z + \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{3/2} \right\}$$

onde $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

R = raio da bobina

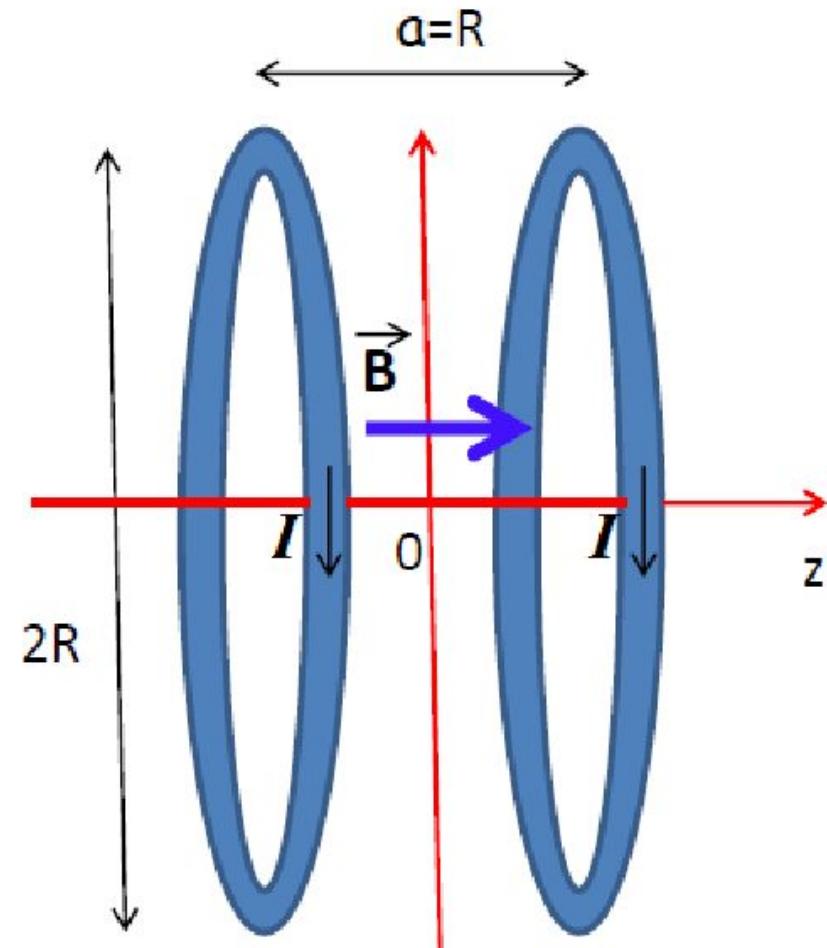
Para uma bobina de Helmholtz: $a=R$ e o numero de espiras n . O campo no centro e entre as bobinas

$$B = \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \cdot \mu_0 \cdot n \frac{I}{R}$$

$$B = 0,000692 \times I \text{ (tesla)}$$

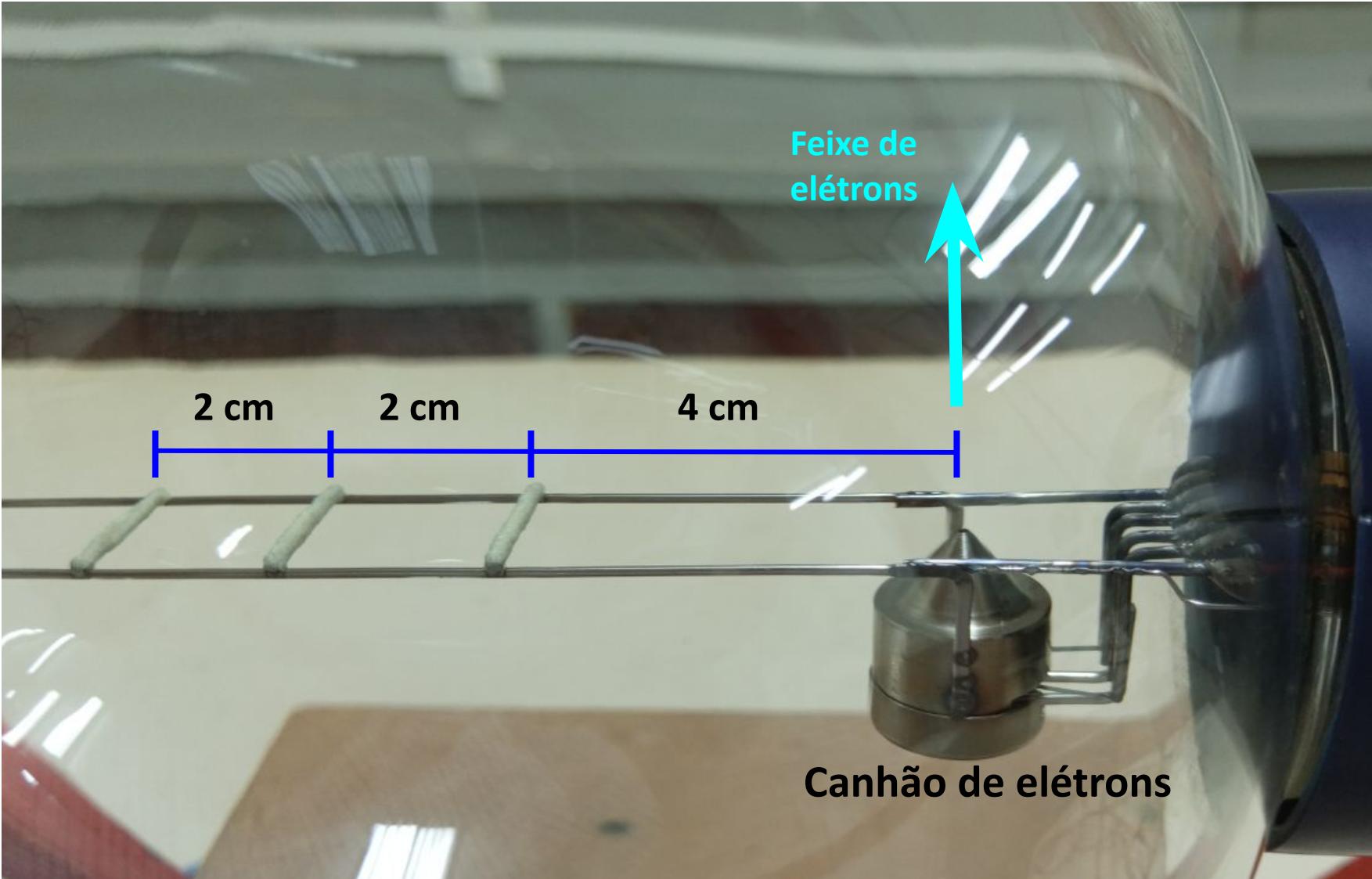
$$R = 0.2 \text{ m}$$

$$n = 154.$$



OBS: Para determinar B medir o valor da corrente I

Geometria do experimento



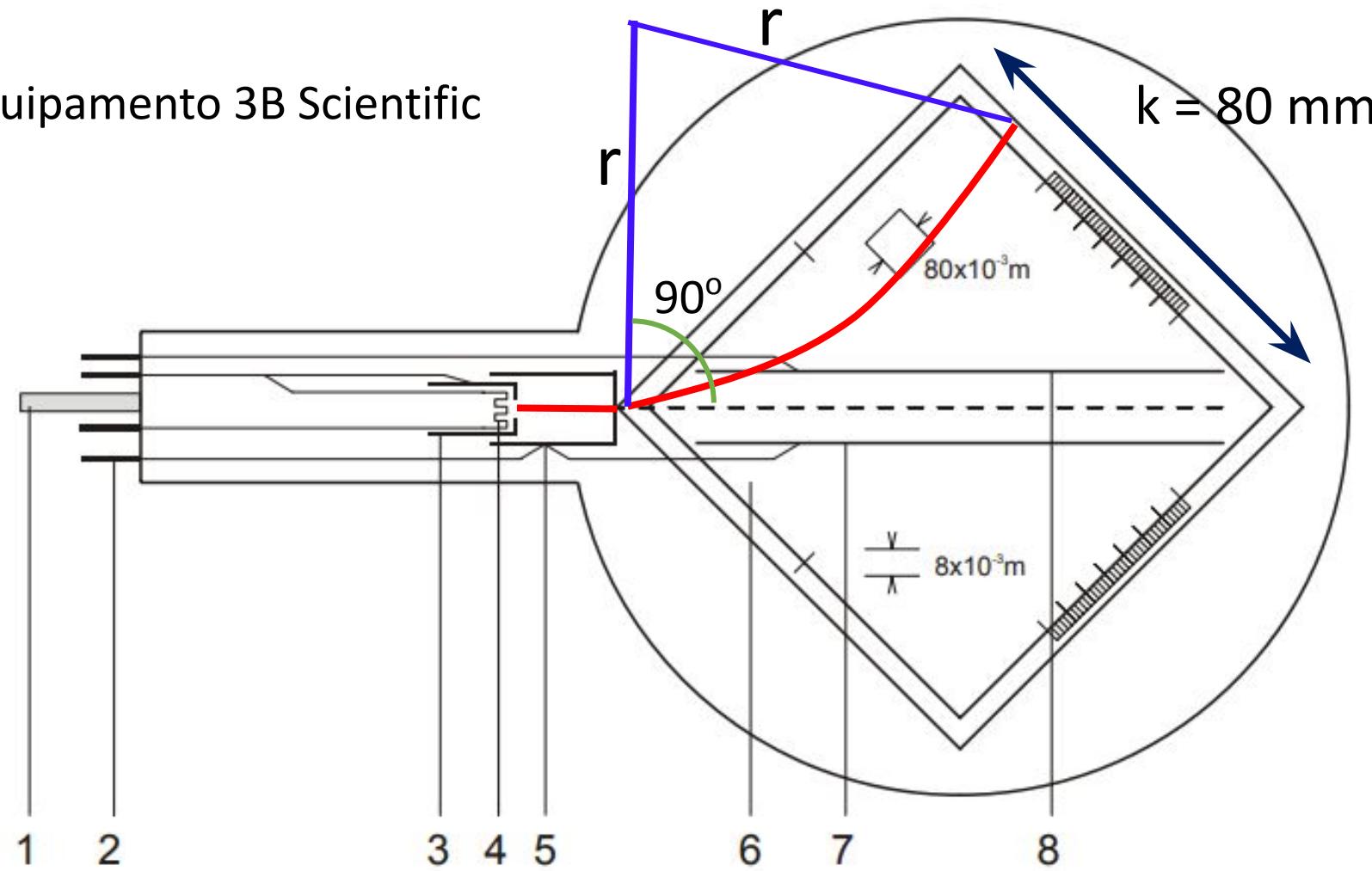
Utilizar

$I=1,5$ e $1,7\text{ A}$ para a bobina de Helmholtz

Determinar as tensões necessárias para formar trajetórias circulares dos elétrons que passem pela escala do equipamento ($0,02$; $0,03$; $0,04$ e $0,05\text{ m}$)

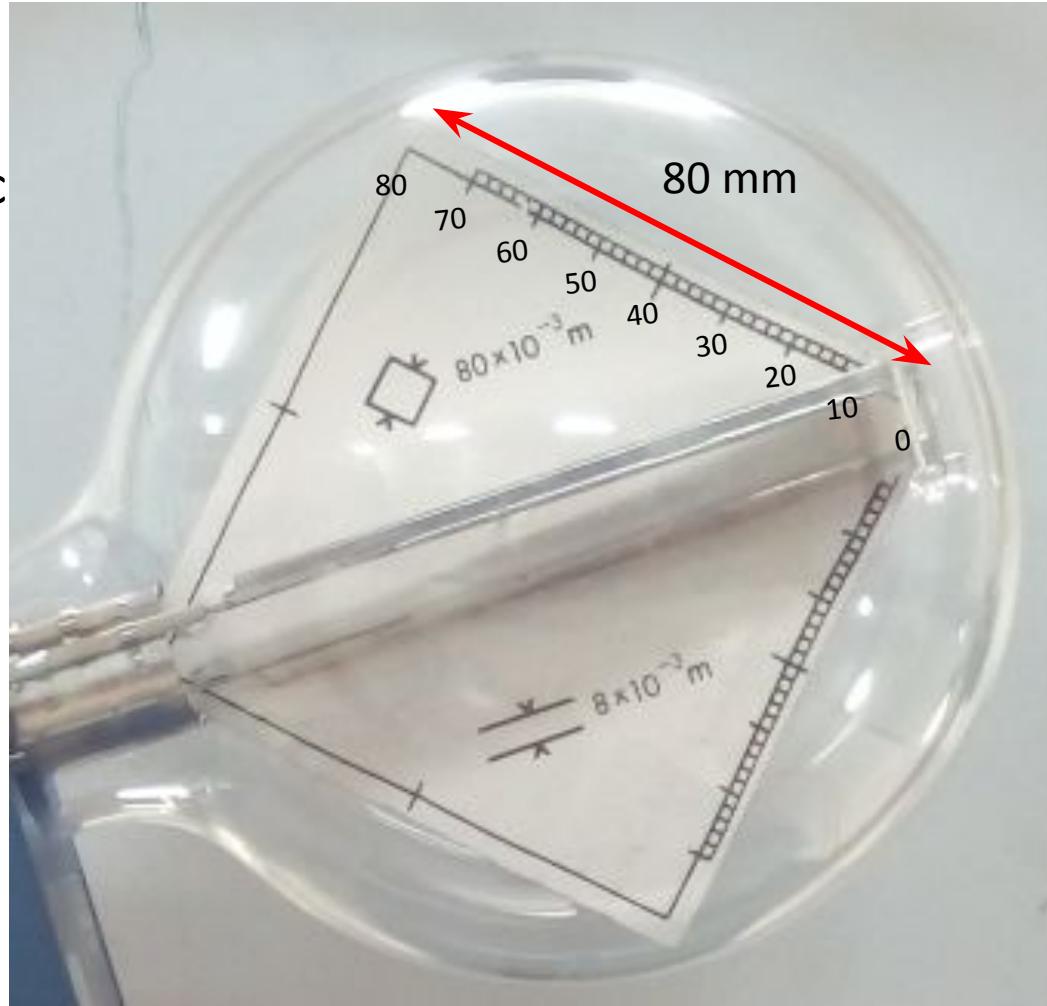
Considere a teoria apresentada e determine a razão e/m utilizando o equipamento a seguir :

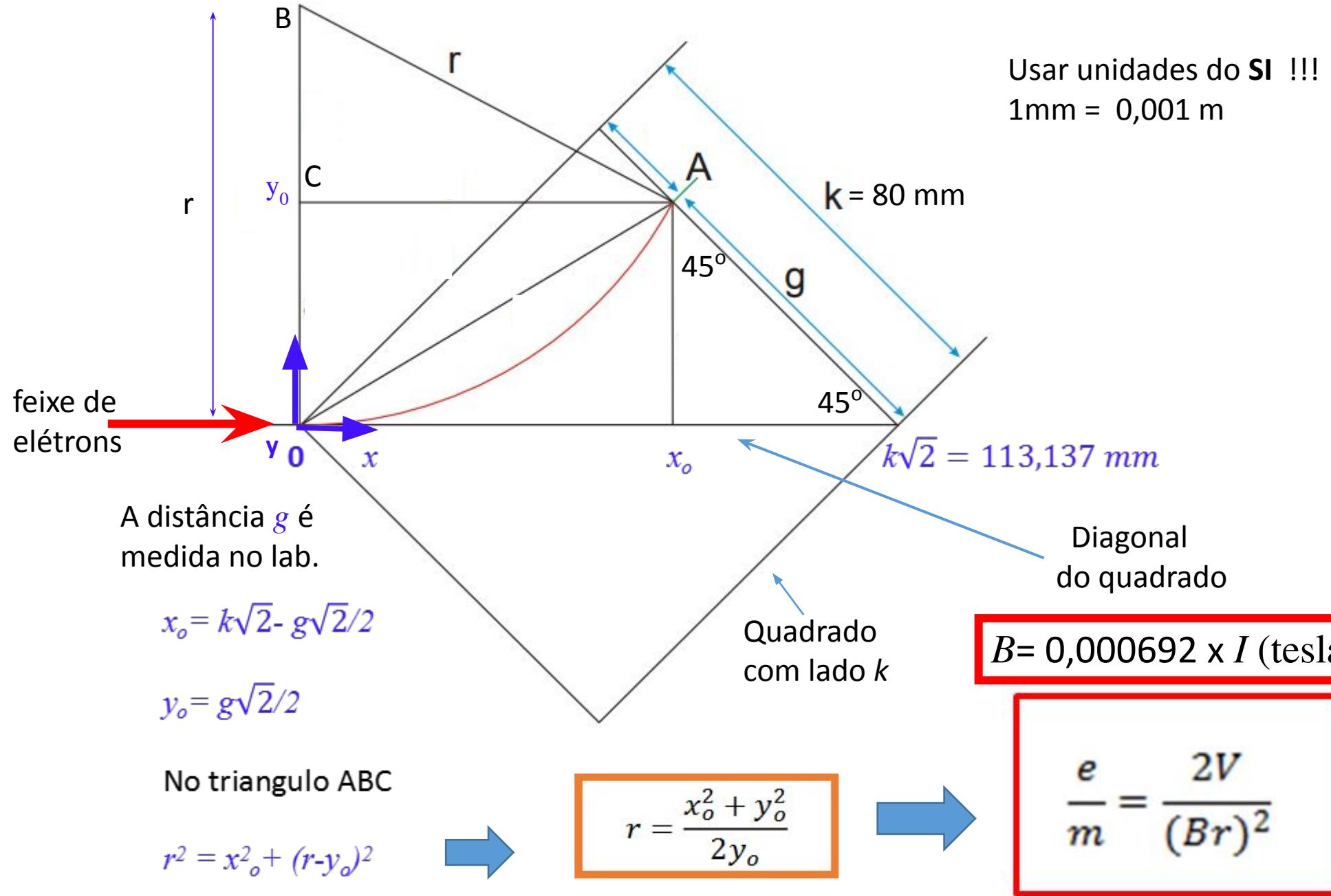
Equipamento 3B Scientific



- 1 Pino de condução
- 2 Contatos de pino
- 3 Cátodo
- 4 Espira de aquecimento
- 5 Ânodo
- 6 Tela luminescente
- 7 Placa inferior de desvio
- 8 Placa superior de desvio

Equipamento 3B Scientific





Utilizar voltagens entre 3,0 ; 3.5 e 4.0 kV para energizar os elétrons.

Determinar as correntes (aplicadas na bobina de Helmholtz) necessárias para formar trajetórias curvas dos elétrons que passem pelas marcas da escala do equipamento

Determinar a razão carga/massa do elétron usando campo magnético.

Apresentar em duas tabelas os dados das medidas e os valores de e/m:

EXPERIMENTO PHYWE

TABELA 1

R (m)	V(volts)	e/m(C/kg)
0,02		
0,03		
0,04		
0,05		
$I(A) =$	<u>média (e/m) =</u>	
$B(T) =$	Erro: $(1 - \text{média}/1,76 \cdot 10^{11}) =$	

EXPERIMENTO 3B-SCIENTIFIC

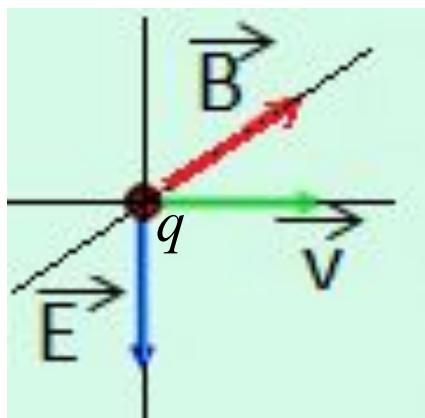
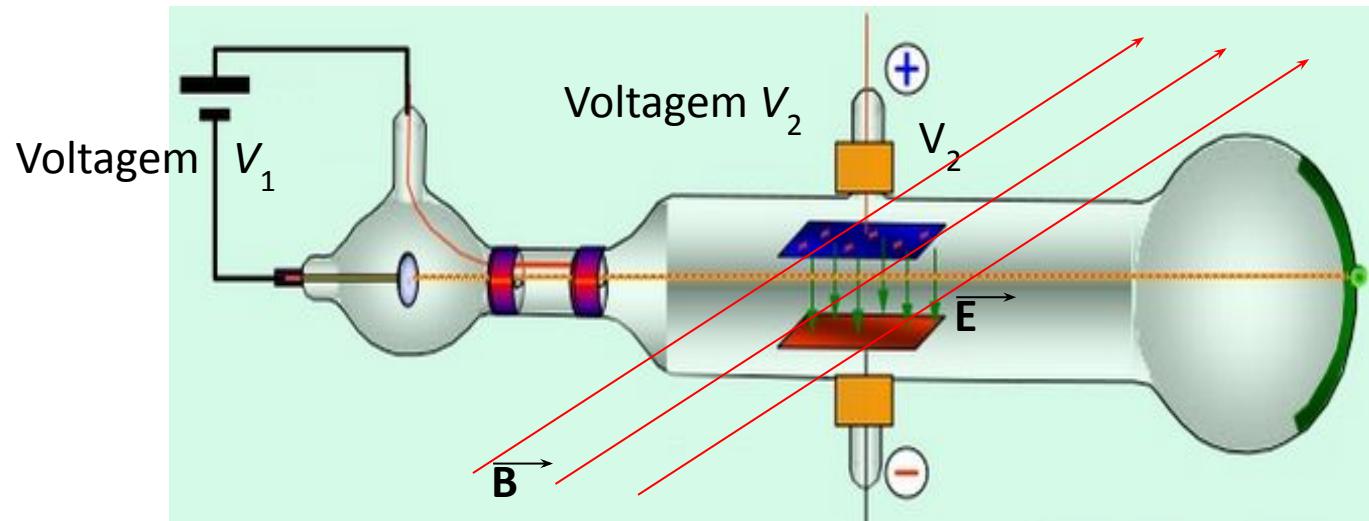
TABELA 2

g (cm)	x_0 (m)	y_0 (m)	r (m)	$V_1 =$	kV	$V_2 =$	kV	$V_3 =$	kV
				I_1 (A)	B_1 (T)	e/m	I_2 (A)	B_2 (T)	e/m
0,01									
0,02									
0,03									
0,04									
0,05									
0,06									
0,07									
				Média=		Média=		Média=	
				Erro=		Erro=		Erro=	

OBS: usar $V_1 = 3,0$ kV, $V_2 = 3,5$ kV e $V_3 = 4,0$ kV

Aparato experimental para determinar e/m usando campo elétrico e magnético

Feixe de elétrons submetido a campos elétrico e magnético perpendiculares ao feixe



Força elétrica

v : velocidade

Força magnética

$$\vec{F}_R = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Se a separação entre as placas do “capacitor” é h
 $V_2 = E \cdot h$ então $E = V_2/h$

Quando: $F_R = 0 \Rightarrow$ aceleração = 0

$$F_e = F_m$$
$$eE = evB$$

$$v = E/B \dots\dots\dots(1)$$

Da energia cinética do elétron:

$$mv^2/2 = eV_1 \dots\dots\dots(2)$$

De (1) e (2) :

$$\frac{e}{m} = \frac{V_2^2}{2h^2B^2V_1}$$

Tabela com os dados para determinar a razão carga/massa do elétron usando campos elétrico e magnético. OBS $h=8\text{ mm}$, trabalhe com as unidades no SI

TABELA 3

V_1 (Volts)	V_2 (Volts)	I_1 (A)	B(T)	Força elétrica (N)	Força magnética (N)	e/m (C/kg)

Questões:

- 1-Apresente as 3 tabelas dos experimentos
- 2- Desenvolver um modelo físico para determinar a razão carga/massa do elétron usando um campo magnético externo
- 3- Desenvolver um modelo físico para determinar a razão carga/massa do elétron usando campo magnético e campo elétrico.
- 4- No experimento para determinar a razão carga/massa do elétron usando campo magnético, obtivemos o valor de $e/m=1,76 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$. Se a tensão usada para acelerar os elétrons foi de 1500 V e a trajetória teve raio de curvatura de 4 cm. A) Determine a corrente aplicada nas bobinas de Helmholtz, B) determine a força centrípeta, C) determine o raio de curvatura se duplicarmos o valor da corrente elétrica.
- 5- Um elétron com velocidade v e massa m entra em uma região entre duas placas carregadas. Devido à ação dos campos elétrico e magnético a carga passa por entre as placas sem sofrer desvios. A) Determine/demonstrar a velocidade do elétron em termos do campo magnético B e do campo elétrico E . B) Expresse os vetores campo elétrico e magnético, forças elétrica e magnética em função dos vetores unitários associados aos eixos x , y e z , veja na figura.

