



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**UNICAMP**

**Relatório Final de Instrumentação para o  
Ensino**

**Determinação da Razão Carga-Massa do**  
**Elétron**



*Tiago Freire Carneiro Leão - RA: 019332*

*Orientador: Varlei Rodrigues – DFA*

*IFGW, UNICAMP*

*Campinas, 17 de Novembro 2006.*

## **RESUMO**

Neste trabalho demonstraremos como medir a razão carga-massa do elétron através de um método que explora os conceitos básicos de magnetismo e eletrostática. Este método consiste em produzir elétrons através do efeito termiônico e então acelerá-los usando um arranjo de lentes eletrostáticas, produzindo um feixe de elétrons. Um campo magnético uniforme, criado por uma bobina de Helmholtz, é então aplicado na direção perpendicular ao feixe de elétrons fazendo com que o feixe seja defletido e passe a descrever uma órbita circular cujo raio está relacionado com a razão  $e/m$  <sup>[1],[2]</sup>. Conhecendo o valor do potencial de extração no canhão de elétrons, da corrente elétrica aplicada na bobina de Helmholtz e do raio da trajetória pode-se inferir o valor da razão carga-massa do elétron.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram para o desenvolvimento e realização desse projeto. Agradeço ao Professor Varlei Rodrigues pela sugestão do projeto, pela paciência e atenção. Gostaria também de enfatizar que se não fosse pela colaboração dos funcionários da Oficina Mecânica Central do IFGW, em especial a do Jorge Luiz Pires, a realização desse projeto não teria sido possível.

## 1. INTRODUÇÃO

Antes do artigo de J.J. Tompson em 1897 sobre experimentos com raios catódicos, muitos cientistas imaginavam que os raios catódicos não eram partículas, mas sim algum tipo de fenômeno ondulatório no Éter. Thompson mostrou que os raios catódicos são na verdade partículas carregadas negativamente, sendo então chamadas de elétrons <sup>[3]</sup>.

Depois da descoberta de que os raios catódicos eram partículas carregadas, Thompson disse, “A questão que surge é: o que são essas partículas? São elas átomos ou moléculas, ou ainda matéria em um estado mais fino de subdivisão? Para iluminar esse ponto, eu tenho realizado uma serie de medidas da razão carga-massa dessas partículas” <sup>[4]</sup>.

Em seu experimento, Thompson usou um campo magnético para defletir raios catódicos e direcioná-los a uma fenda estreita para atingir um alvo cilíndrico. O alvo que ele bombardeou sempre ficava carregado, não importando o quanto os raios catódicos fossem inclinados, provando assim que as partículas carregadas eram inseparáveis dos raios catódicos.

No experimento apresentado, elétrons produzidos pela passagem de corrente elétrica num filamento de Tungstênio são acelerados na direção do anodo por uma diferença de potencial conhecida entre o filamento e o anodo, adquirindo assim uma energia cinética igual à carga do elétron,  $e$ , multiplicada pela diferença de potencial,  $V$ .

Alguns desses elétrons escapam pelo orifício circular no anodo e entram numa câmara de vácuo na qual uma pequena quantidade de gás nitrogênio é injetada. A colisão do feixe de elétrons com as moléculas de nitrogênio as promove para um estado de maior energia, fazendo com que as mesmas emitam radiação eletromagnética na região do espectro visível após decaírem para os seus estados fundamentais, possibilitando assim, a visualização da trajetória do elétron <sup>[1]</sup>.

Então um campo magnético uniforme é aplicado perpendicularmente à direção de movimento do feixe de elétrons fazendo com que este percorra uma trajetória circular. Tal campo é criado por uma bobina de Helmholtz, que é composta de duas bobinas coaxiais com número de espiras,  $N$ , idêntico; e separados por uma distância igual aos seus raios (Figura 1).

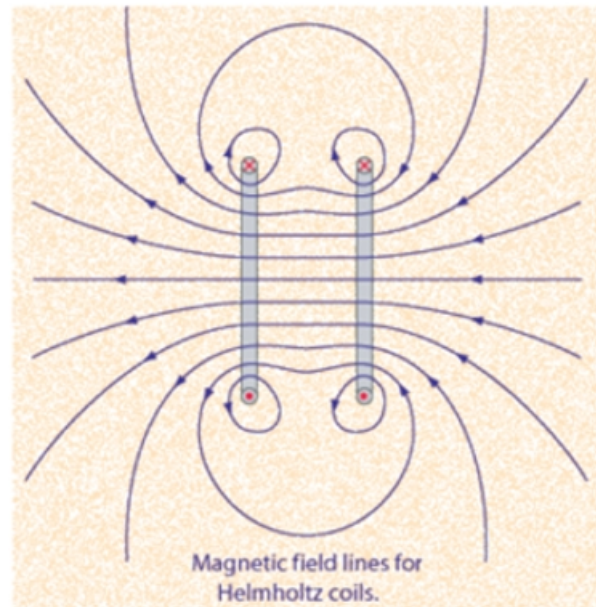


Figura 1: Linhas de campos produzidas por uma Bobina Helmholtz [5]

De fato, a força magnética numa carga  $Q$ , que se move com velocidade  $v$  num campo magnético  $B$ , é [2]:

$$\vec{F}_{mag} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Esta também é conhecida como *força de Lorentz*. Na presença de ambos os campos magnético e elétrico, a força em  $Q$  é:

$$\vec{F} = Q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})]$$

A energia cinética dos elétrons quando acelerados pelo potencial elétrico  $V$  é dada, de acordo com a lei da conservação de energia, por:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (1)$$

O movimento típico de uma partícula carregada movendo-se num plano perpendicular a um campo magnético uniforme é circular <sup>[2]</sup>, com a força magnética gerando uma aceleração centrípeta. Pela segunda lei de Newton podemos escrever:

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

E como a única força que age sobre os elétrons é a magnética, temos que:

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F = evB \quad (3)$$

Combinado as equações (2) e (3), temos:

$$\frac{mv^2}{r} = Bev \quad (4)$$

Que pode ser reescrita da seguinte forma::

$$v = \frac{Ber}{m} \quad (5)$$

Substituindo a equação (5) na equação (1) e rearranjando os termos, obtemos:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2} \quad (6)$$

Além disso, a intensidade do campo magnético no centro da bobina de Helmholtz pode ser calculada por <sup>[2]</sup>.

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{R(5)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

Portanto:

$$B = \frac{0,72\mu_0 NI}{R} \quad (8)$$

Onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ;  $N$  = número de espiras;  $I$  = corrente pela espira; e  $R$  = raio da espira.

Assim, combinando as equações (6) e (8) obtemos o valor de  $(e/m)$  em função de  $V$ ,  $I$  e  $r$ , pela seguinte relação:

$$\boxed{\frac{e}{m} = \frac{3,86VR^2}{\mu_0^2 N^2 I^2 r^2}} \quad (9)$$

No próximo tópico temos em detalhe a dedução do campo magnético produzido por uma bobina de Helmholtz.

## 2. BOBINA DE HELMHOLTZ <sup>[6],[7]</sup>

O campo magnético produzido por uma espira circular percorrida por uma corrente  $I$  pode ser calculado a partir da Lei de Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{\rho}}{\rho^3} \quad (10)$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo,  $\vec{\rho}$  é o vetor do elemento condutor  $d\vec{l}$  ao ponto de medida do campo  $\vec{B}$ , e  $d\vec{B}$  é perpendicular a ambos os vetores  $\vec{\rho}$  e  $d\vec{l}$ , como mostra a figura 2.

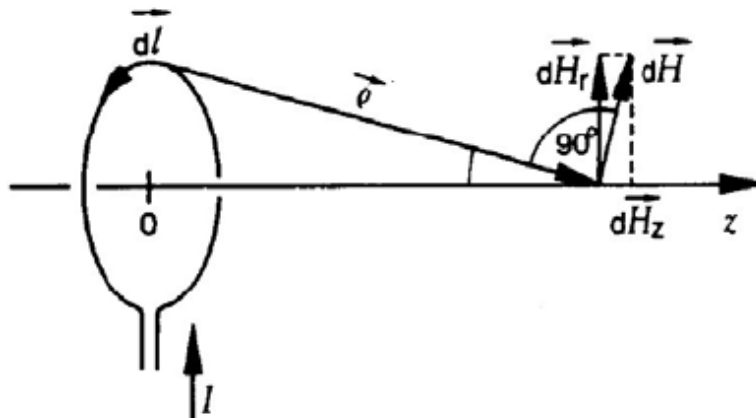


Figura 2: Desenho esquemático de uma espira circular.

Como o vetor  $d\vec{l}$  é perpendicular aos vetores  $\vec{\rho}$  e  $d\vec{B}$ , e ainda perpendicular ao plano da figura enquanto que os outros dois vetores estão no plano, a equação (10) pode ser reescrita como:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi \rho^2} dl = \frac{I}{4\pi} \frac{\mu_0 dl}{R^2 + z^2} \quad (11)$$

Senso z a distância do centro da espira ao ponto onde estamos calculando o campo. Para qualquer elemento  $d\vec{l}$  que escolhermos na espira a componente  $dB_z$  do campo terá sempre a mesma direção, podendo, portanto serem somadas. Já as componentes de  $dB_r$  se anulam aos pares. Sendo assim, o campo na direção radial é nulo:

$$B_r = 0 \quad (12)$$

E o campo na direção z (axial) é dado por:

$$B = B_z = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{2R} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (13)$$

O campo magnético de uma bobina circular de N espiras é então obtido multiplicando-se o número de espiras pela equação (13). Assim o campo ao longo do eixo das duas bobinas idênticas a uma distância "a" do centro das bobinas é:

$$B(z, r = 0) = \frac{\mu_0 IN}{2R} \left[ \frac{1}{(1 + A_1^2)^{3/2}} + \frac{1}{(1 + A_2^2)^{3/2}} \right] \quad (14)$$

Sendo  $A_1 = \frac{z - a/2}{R}$  e  $A_2 = \frac{z + a/2}{R}$ . Quando  $z = 0$ , o campo magnético tem um valor máximo para  $a < R$  e mínimo para  $R > a$ . A dependência de B com a posição ao longo do eixo axial das bobinas é uniforme para o intervalo  $-R/2 < z < R/2$ , quando  $a = R$ .

O campo B no ponto médio entre as bobinas quando a separação "a" entre elas for igual ao raio R é:

$$B(0,0) = \frac{\mu_0 IN}{2R} \frac{2}{\left(\frac{5}{4}\right)^{3/2}} = 0,72 \mu_0 N \frac{I}{R} \quad (15)$$

Onde escolhemos a origem do sistema de coordenadas o ponto médio entre as bobinas sobre o eixo axial.

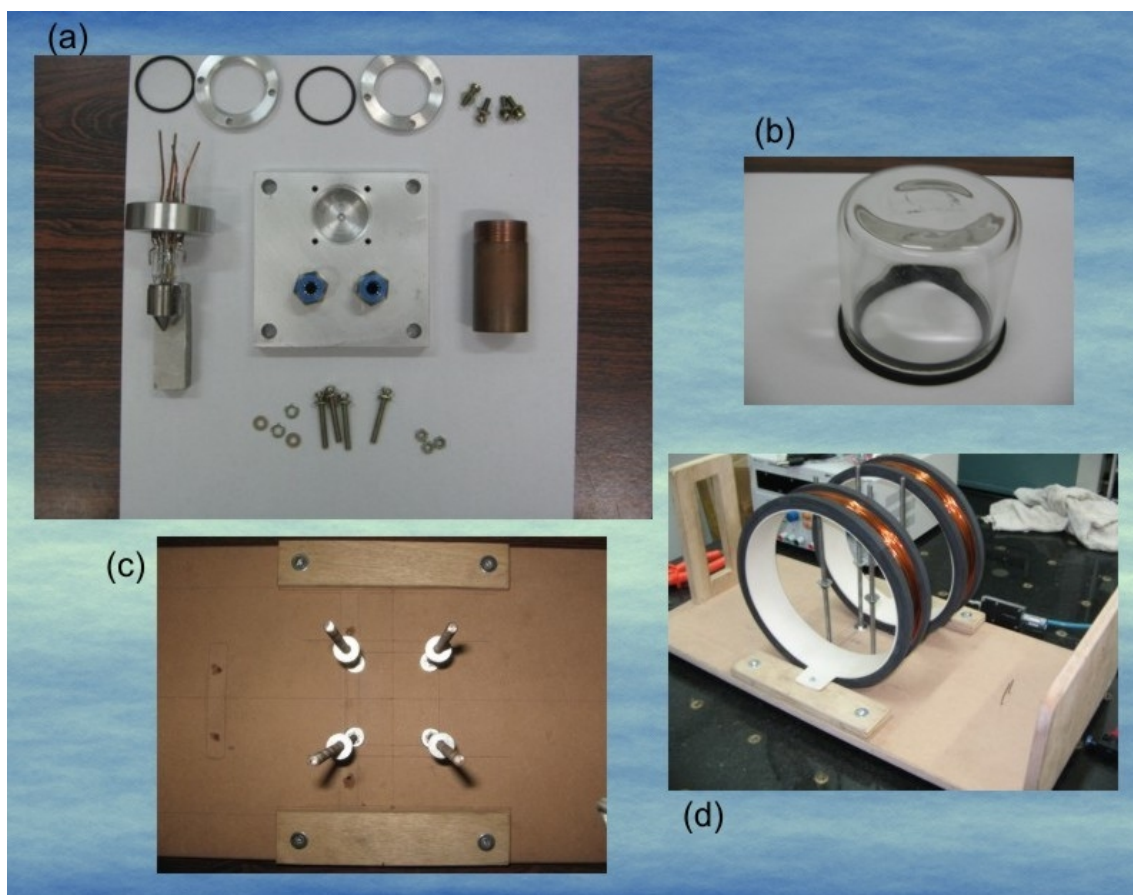
Como podemos ver a equação (15) confere com a (8).



### 3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem consiste essencialmente de um canhão de elétrons, uma bobina de Helmholtz e uma câmara de vácuo. Além disso, foi feito um suporte de madeira para todo o sistema e uma estrutura metálica pela qual o feixe de elétrons faz contato com o compartimento onde a trajetória do feixe é visualizada, servindo também como suporte para a campânula de vidro.

Todo o material utilizado pode ser visto na figura 3, exceto as fontes de tensão e de corrente e as bomba de vácuo.



*Figura 3: Material utilizado para a montagem do experimento. (a) mostra na parte superior o conjunto de anéis metálicos e rings de borracha para vedação, na região central a plataforma metálica com as duas válvulas de ar e uma conexão com o tubo de cobre (à direita) dentro do qual o canhão de elétrons (à direita) é inserido. (b) Campânula de vidro e borracha de vedação que são constituintes da câmara de vácuo. (c) Suporte de madeira com 4 pinos de aço para sustentação da plataforma metálica. (d) Bobina de Helmholtz posicionada no suporte de madeira.*

O projeto dessas peças pode ser visto nas figuras 4 e 5.

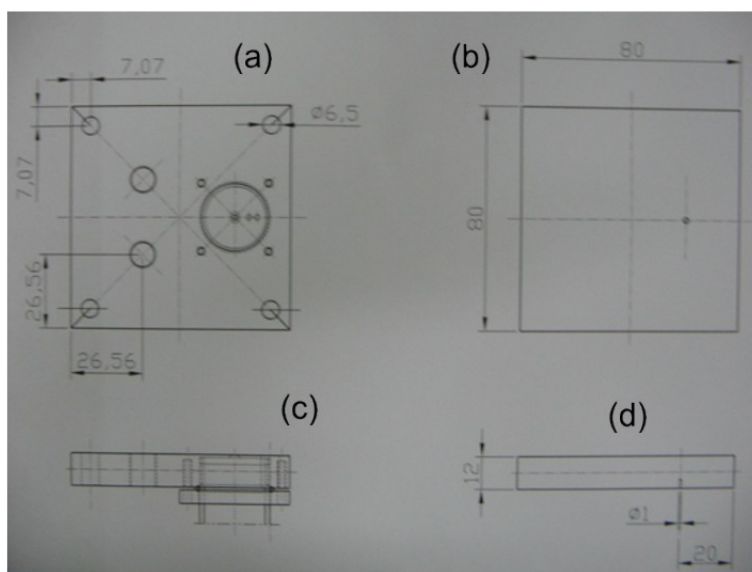


Figura 4: (a) Projeto da plataforma metálica. Temos quatro furos nos cantos para suporte; Duas válvulas de ar à 26,56 mm da extremidade; Um encaixe para o tubo de cobre com um orifício no centro pelo qual o elétron passará. (b) vista superior da plataforma. (c) Encaixe do compartimento do canhão com a plataforma. (d) vemos que o orifício pelo qual o feixe passará está posicionado à 20mm da extremidade.

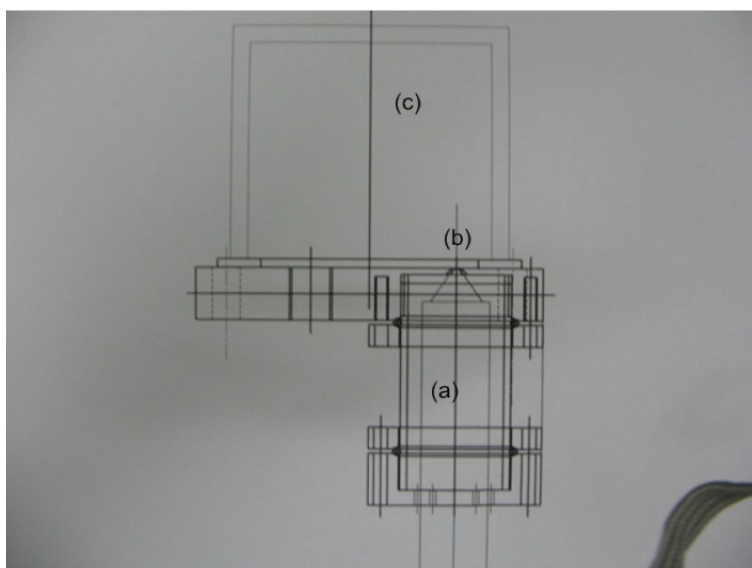


Figura 5: Projeto da junção do compartimento do canhão de elétrons com a base metálica que serve como suporte para a campânula de vidro. Os elétrons serão produzidos no interior de (a), serão acelerados na direção de (b) e emergirão para a região onde serão defletidos e visualizados.

O canhão de elétrons é um componente que produz um feixe de elétrons com energia cinética bem definida, sendo usado em televisores e monitores que usam tecnologia de tubos de raios catódicos, e em outros instrumentos como, por exemplo, microscópios eletrônicos e aceleradores de partículas [9],[10]. O canhão de elétrons é formado de diversas partes: um catodo quente (neste caso um filamento de Tungstênio) que é aquecido devido à passagem de corrente elétrica para gerar elétrons livres com pouca energia via efeito termiônico; eletrodos que geram um



campo elétrico a fim de focalizar o feixe; e por fim um anodo que acelera os elétrons. Os elétrons são ejetados por um pequeno orifício no anodo com uma energia cinética final determinada pela diferença de potencial aplicada entre o catodo e o anodo [9],[10],[11]. O canhão de elétrons utilizado em uma primeira tentativa e seu esquema estão mostrados na figura 6 e 7, respectivamente.

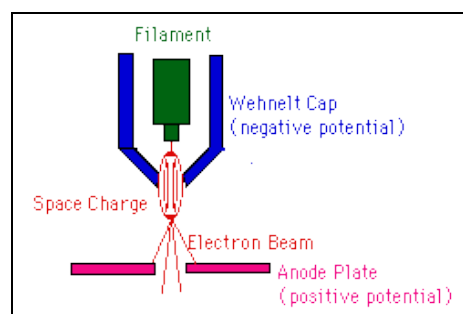
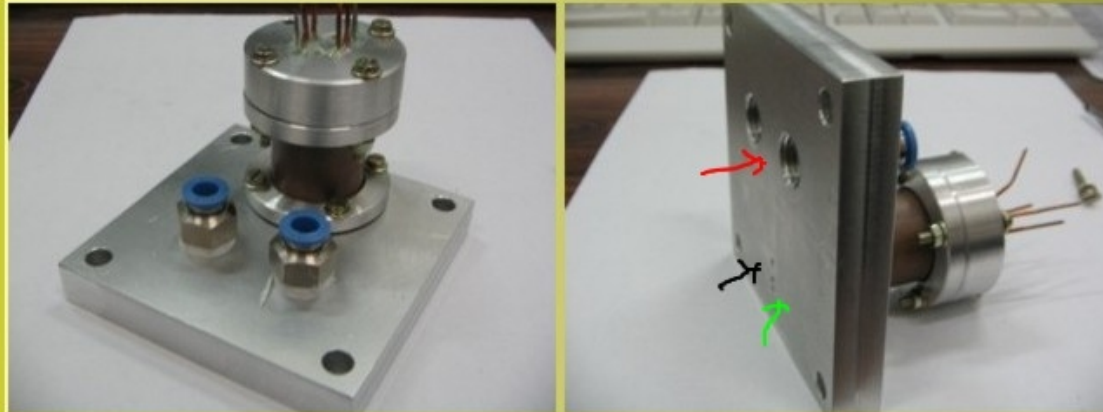


Figura 7: Esquema elétrico do canhão de elétrons [12]. A Capa de Wehnelt está num potencial negativo pequeno em relação ao filamento enquanto que a diferença de potencial entre o filamento e o anodo é o potencial acelerador.

O filamento de Tungstênio foi extraído de uma lâmpada comercial de 50 W e 12 V.

O compartimento para o canhão de elétrons foi desenvolvido de forma independente do restante da montagem, para que seja possível desconectá-lo em caso da necessidade de substituí-lo ou mesmo de uma apresentação visual de seu interior. Sua conexão com plataforma metálica pode ser vista na figura 8.



*Figura 8: Conexão do compartimento do canhão de elétrons com a plataforma metálica*

A seta vermelha indica as entradas de ar. A seta preta indica o orifício pelo qual o feixe de elétrons emerge. A seta verde indica uma passagem pela qual o ar que se encontra dentro do compartimento do canhão de elétrons seja bombeado quando a bomba de vácuo for ligada.

É muito importante que o experimento seja realizado num ambiente de vácuo por duas razões. A primeira delas se refere ao filamento de Tungstênio que pode atingir elevadas temperaturas oxidando-se na presença de moléculas de oxigênio. A segunda se relaciona com o livre caminho médio entre as moléculas do meio. Quanto menor o livre caminho médio (pressão mais alta) maiores serão as colisões entre os elétrons e as moléculas antes mesmo deles atingirem energias suficientes para ionizá-las, não havendo assim a formação do feixe de elétrons.

Como pode ser observado tanto nas figura 3, 5 e 8, uma associação entre anéis metálicos e rings de borracha foi feita para promover uma melhor vedação nas regiões de conexão entre as peças.

A câmara de vácuo possui uma campânula de vidro com base circular cujas dimensões são:

- 70 mm de diâmetro externo;
- 3,5 mm de espessura;
- 50 mm de altura;

O material escolhido para a campânula foi o vidro devido à sua transparência, permitindo assim a visualização do feixe de elétrons. Também pode ser observado que existem duas válvulas para entrada e saída de ar. Por uma delas o ar atmosférico será bombeado e pela outra será injetado uma quantidade pequena de gás nitrogênio.

Para produzir um campo magnético uniforme que seja capaz de defletir o feixe de elétrons numa trajetória circular, com diâmetro compatível com as dimensões da montagem e com energia suficiente para sobreviver ao impacto com as moléculas de nitrogênio, tínhamos previsto que seria necessário, construir uma bobina de Helmholtz com as seguintes características<sup>[8]</sup>:

- 200 mm de diâmetro;
- Número de espira em cada bobina igual a 100;
- Corrente elétrica aplicada a bobina variando entre 1 e 2 ampères;

Os materiais necessários para a construção dessa bobina foram:

- Um retalho de tubo de PVC com 200 mm de diâmetro;
- 138 m de fio de cobre esmaltado AWG 17;
- 5 m de borracha adesiva;

O tubo de PVC serviu como suporte as espiras de fio de cobre esmaltado. Sua escolha foi devido a sua forma, a sua fácil obtenção e também ao fato de



resistir ao aumento de temperatura causado pelo fluxo de corrente elétrica pelas espiras (Figura 9).

A montagem passo a passo do experimento pode ser vista da figura 10.

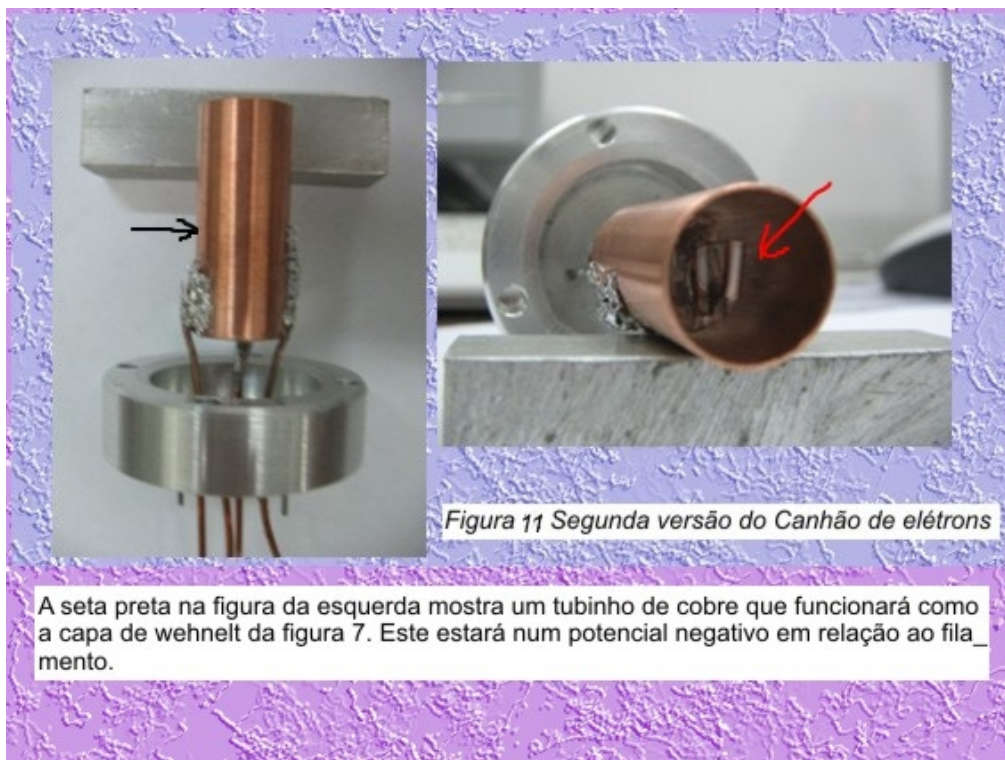


O funcionamento de cada constituinte do equipamento foi testado. Primeiramente, com o auxílio de uma agulha magnetizada, constatamos que de fato é produzido um campo magnético uniforme na direção axial das bobinas quando uma corrente elétrica é aplicada em ambas as bobinas no mesmo sentido, pois a agulha se apontou para a direção axial da bobina.

A pressão no interior da câmara de vácuo atingiu a ordem de  $10^{-5}$  mbar quando conectada a uma bomba de vácuo turbo.

Infelizmente, por motivos não conhecidos, não foi possível produzir um feixe de elétrons com o canhão de elétrons apresentado acima. Para verificar a presença do feixe, uma cerâmica fotoluminescente foi posicionada de forma que fosse possível observar a sua luminescência em caso do feixe colidir com ela. No entanto, esse efeito não foi observado. Então, um segundo esquema foi montado com o intuito de detectar o feixe de elétrons. Esse esquema consistiu em posicionar um fio condutor na possível trajetória dos elétrons e então, através de um amperímetro, medir se houve a passagem de corrente ou não. Novamente, nem um sinal do feixe foi obtido.

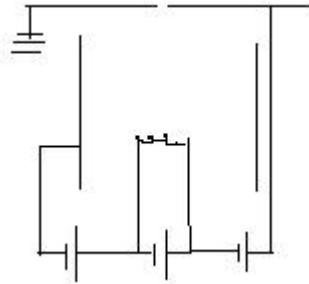
Chegando a conclusão de que o problema estava realmente no canhão de elétrons e em virtude da falta de tempo, um novo e mais simples canhão foi construído (Figura 11).



Um potencial negativo em relação ao filamento será aplicado no tubinho de cobre com o intuito de focalizar os elétrons de baixa energia que serão produzidos pelo filamento quando uma corrente elétrica passar por ele. Como a base metálica onde esse compartimento será conectado estará aterrada, os

elétrons sentirão um potencial acelerador nessa região e emergirão através de um orifício muito pequeno que pode ser visto na figura 8.

A seguir, podemos ver o esquema elétrico desse novo sistema.



*Figura 12: Esquema elétrico da segunda versão do canhão.*

*O tubinho de cobre estará num potencial negativo em relação ao filamento e tem a função de focalizar os elétrons. Como pode ser visto a base metálica funcionará como o anodo. Apesar da base estar aterrada, os elétrons sentirão um potencial acelerador, pois eles estão num potencial negativo em relação a base metálica.*

#### **4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO**

- Ligar a bomba de vácuo e esperar até que o vácuo necessário para o funcionamento do filamento seja atingido;
- Ligar a fonte de tensão e aplicar uma corrente no filamento da ordem de 3 à 4 ampères;
- Ligar a fonte de tensão e ajustar a voltagem no anodo em 40 V para que energia cinética seja dada aos elétrons; Já que queremos que os elétrons tenham energia cinética fixa, a voltagem do anodo não deve ser alterada até o final do procedimento;
- Abrir a válvula de entrada de gás e deixar um pouco de gás nitrogênio entrar até que o feixe seja visualizado;
- Ligar a fonte de corrente conectada a bobina e ajustar a corrente até que o feixe assuma uma trajetória circular;



- Varie o campo magnético variando a corrente elétrica que passa na bobina e para cada uma delas anote os respectivos diâmetros da trajetória;
- Com esses dados trace um gráfico de acordo com a equação (9).

## **5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Em função da complexidade do projeto e principalmente pela falha no funcionamento do primeiro canhão utilizado, não foi possível realizar o procedimento proposto acima. Apesar de já ter sido construído um novo canhão de elétrons (Figura 11), ainda não foi possível testá-lo porque o prazo para a entrega do experimento está terminado.

## **6. CONCLUSÃO**

Tendo em vista os objetivos da disciplina, os quais englobam não somente fatores técnicos, mas também o aprendizado e o desenvolvimento pessoal do aluno durante esse período, pode-se dizer que a oportunidade de poder projetar, desenvolver e executar a atividade proposta pela disciplina trouxe um crescimento ao aluno. Isso se deve ao fato de o aluno ter tido que se defrontar com novas experiências, que vão desde a procura por um tema de interesse e aceitação do desafio de desenvolvê-lo dentro do objetivo proposto, até a necessidade de procurar por auxílio de colaboradores mais experientes que lhe deram a direção de como fazer algo nunca feito anteriormente pelo aluno.

Com relação ao projeto e levando em conta sua complexidade, pode-se dizer que, exceto pelo funcionamento do primeiro canhão de elétrons, a montagem experimental ficou muito legal. Sem contar que as perspectivas são boas para que o objetivo central, que é calcular a razão carga-massa do elétron, seja alcançado, pois já existe um canhão de elétrons substituto.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] <http://phoenix.phys.clemson.edu/labs/cupol/eovem/>

[2] Griffiths, David J. **Introduction to Electrodynamics** – 3° ed. Capítulo 5, p. 205 e 249 , Editora: Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.

[3] Morris H. Shamos, **Great Experiments in Physics**, (New York, Holt, 1959)

[4] Dean S. Edmonds, **Ciofari's Experiments in College Physics**, (Lexington, MA), DC. Heath and Co., 1983, pp. 373-377.

[5] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

[6] H.M. Nussensweig, **Curso de Física Básica**, Vols. 3 e 4, Editora Edgard Blücher, 1997.

[7] J.R. Reitz, F.J. Milford, R.W. Christy, **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**, Editora Campus Ltda., 1982.

[8] Tiago F.C. Leão, **Relatório Parcial da Disciplina F 809**, Campinas, 2006.

[9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_gun](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_gun)

[10] [http://www.matter.org.uk/tem/electron\\_gun/electron\\_gun\\_simulation.htm](http://www.matter.org.uk/tem/electron_gun/electron_gun_simulation.htm)

[11]

<http://physics.csustan.edu/java/tutorials/EM/ElectronGun/ElectronGun.htm>

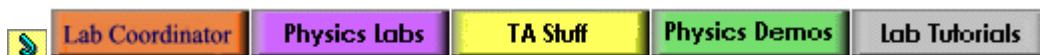
[12] <http://www.unl.edu/CMRAcfem/gun.htm>

# APÊNDICE

## Referência [1]



CUPOL: Electron Charge to Mass Ratio (e/m)



[CUPOL Home](#)



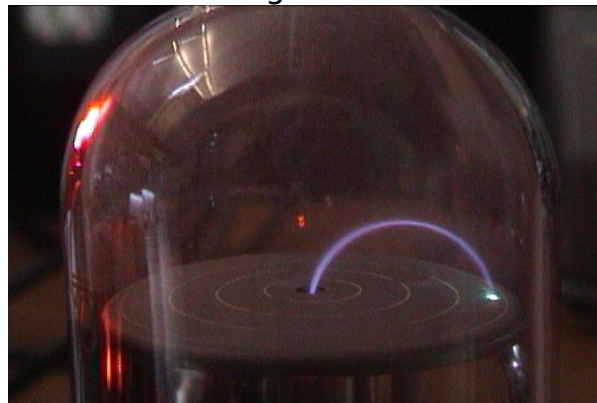
[What do these icons mean?](#)

This lab experiment calls upon various laboratory techniques that may be unfamiliar to some students. Students needing additional help should consult our tutorials:

[Plotting experimental data](#) | [Creating a graph](#) | [Using MS Excel](#) | [Error analysis](#)

## Objective

Figure 1.

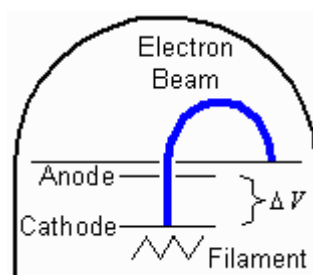


[\[Click on image to enlarge it.\]](#)

The objective of this experiment is to determine the electron's charge to mass ratio (e/m).

To meet this objective we will use a vacuum tube capable of producing a visible beam of electrons as shown in Figure 1. (The beam is visible because it excites the low-pressure gas contained in the tube.) When immersed in a magnetic field perpendicular to the beam, the negatively charged electrons will be deflected according to the magnetic force,  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ .

In this experiment, we will be able to determine the e/m ratio by measuring the electrons' potential energy and amount of deflection, and the strength of the magnetic field. Once we have determined e/m, we will use Millikan's value for the electron charge to calculate the electron's mass.



### he Vacuum Tube

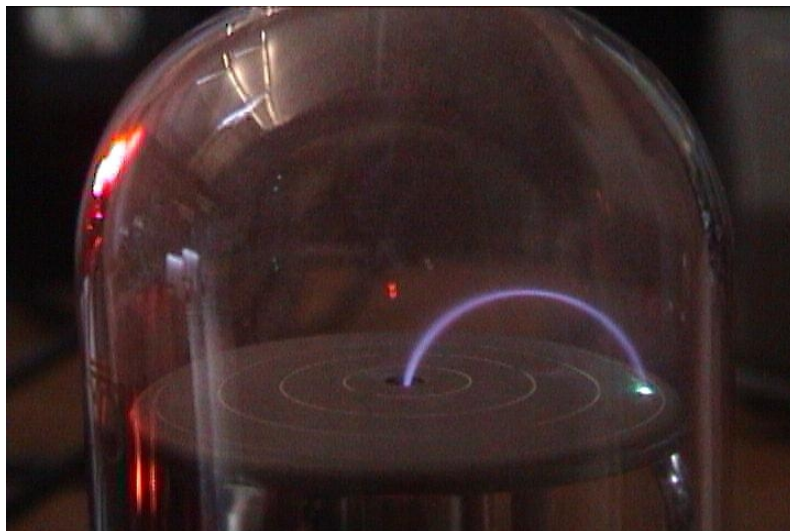
The vacuum tube is connected to a **power supply** and the electron beam is formed in the following way:

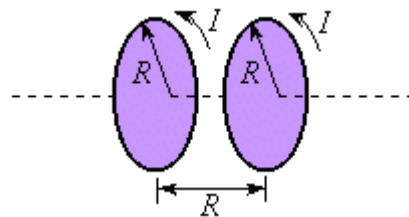
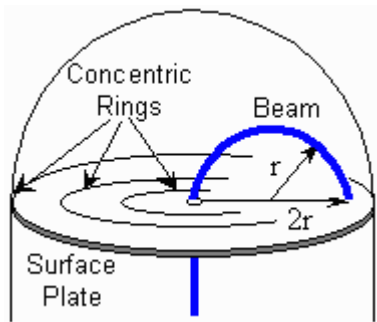
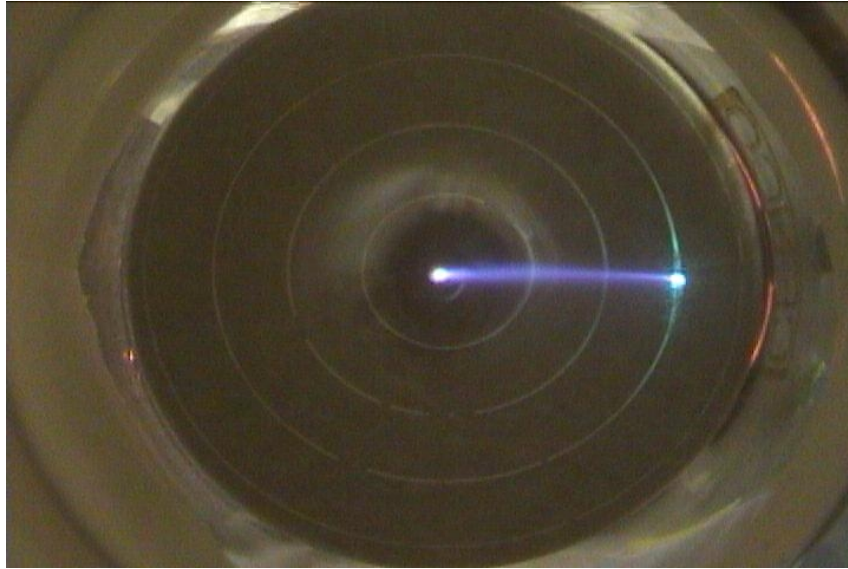
An electric current is applied to the tube's filament and electrons are released from the filament. (By increasing the current, more electrons are "burned off" and the beam becomes brighter.) The electrons are accelerated upward toward the anode plate when a potential difference,  $\Delta V$ , is applied between it and the cathode plate. The same power supply that applies current to the filament also supplies the potential across the anode and cathode. In this experiment the voltage drop is measured by a digital multi-meter (DMM), which is connected across the anode and cathode inputs.

This potential difference imparts a change in the electrons' potential energy,  $\Delta U = e\Delta V$ , where  $e$  is the charge of an electron. Due to the conservation of energy, this causes a change in the kinetic energy,  $\Delta U = \Delta K$ . Since the electrons are at initially rest at the cathode where the potential is zero, the conservation of energy may be written as

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Eq. 1}$$

Here,  $V$  is the anode potential and the equation's right-hand side is the familiar kinetic energy of a particle of mass,  $m$ , and speed,  $v$ . In this experiment the power supply may be used to vary the anode potential, thereby altering the speed of the electrons.





### he Helmholtz Coils

Once the beam is visible in the vacuum tube, the experiment may proceed. The beam is deflected by applying a magnetic field,  $\mathcal{B}$ , perpendicular to the electron beam. Such a field is created by a set of Helmholtz coils. Helmholtz coils are comprised of two coaxial loops of wire, each with an identical number of  $N$  turns. By definition, the coils are separated by a distance equal to their radii.

The coils are connected to a **variable current source** and an electric current is applied to the coils. It is important to note that the current travels in the same direction in each coil. The

current loops create a magnetic field between the coils. This field is oriented perpendicular to the plane of the coils, along their common axis. In the center of the Helmholtz coils (where the vacuum tube is located) the magnetic field is given by the formula,

$$B = \frac{8\mu_0 N I}{R(5)^{3/2}} \quad \text{Eq. 2}$$

where  $I$  is the applied current,  $R$  is the radius of one of the Helmholtz coils, and  $\mu_0$  is constant known as the permeability of free space ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ ).

Each electron in the beam, then, experiences a magnetic force,  $\vec{F}_B = -e\vec{v} \times \vec{B}$ , where  $-e$  is the charge of the electron ( $e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ ). In this experiment the electron velocity is perpendicular to the magnetic field, so the magnitude of  $\vec{F}_B$  becomes

$$F_B = evB \quad \text{Eq. 3}$$

If the strength of the magnetic field is large enough (*i.e.*, enough current is passed through the coils) the electron beam will be bent into a circular path. The radius of the path may be determined by noting where the beam makes contact with the surface plate. Etched onto the plate are four concentric rings centered on the beam's exit hole. Each ring is separated by a distance of 0.50 cm. Note that the distance between the exit hole and the beam's impact point is **twice** that of the beam's radius of curvature.

Electrons moving in a circular path experience a centripetal force equal to the product of its mass,  $m$ , and its centripetal acceleration:

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad \text{Eq. 4}$$

where  $r$  is the radius of the electrons' circular path. Combining Equations 1, 3 and 4 we find

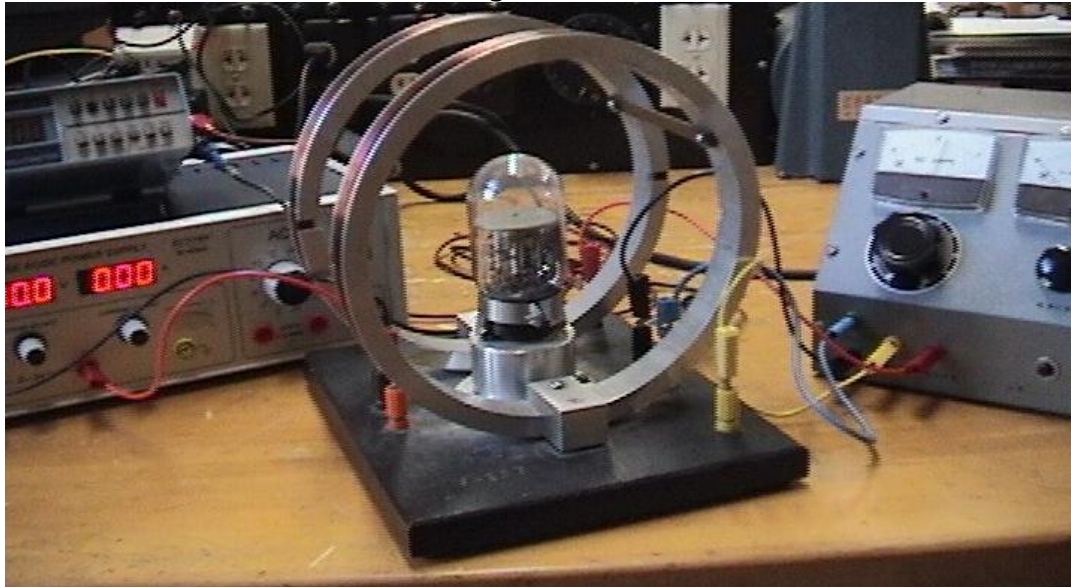
$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{r^2 B^2} \quad \text{Eq. 5}$$

Using a digital multi-meter it is possible to measure the voltage drop,  $V$ , experienced by the electrons. The beam's deflection radius,  $r$ , is measured visually by noting the location of the impact of the beam with the vacuum tube's surface plate. Finally, the magnetic field,  $B$ , is determined from Equation 2 using the geometry of the Helmholtz coils and the current applied to the wires. (The current source is equipped with a panel meter which displays the electrical current, as shown at the right.)



## Procedure

Figure 10.



[Click on image to enlarge it.]

### Exercise 1: Constant kinetic energy, variable magnetic field.

1. The manufacturer of the Helmholtz coils engraves the number of turns of each coil,  $N$ , onto the base of the apparatus. Record this value in the [Data Sheet](#).



[Number of turns,  \$N\$](#)  [0.052 Mb]

2. Measure the diameters of one of the coils and then calculate its radius,  $R$ . Record the value of the radii. In the video below, one of the coils has been removed for clarity purposes only.



[The coil diameter is measured.](#) [0:33, 6.16 Mb]

3. Connect the power supply to the vacuum tube with wire leads being sure to match the colors of the banana jack outlets with those of the vacuum tube apparatus. In the video below, the black wire is connected to ground, red to the anode, blue to the filament. (The yellow wire is connected to the grid, which helps focus the beam, but was not used in this experiment.)

Also connect a digital multi-meter (DMM) across the vacuum tube's anode and ground leads. The DMM will be used in step 5 to accurately measure the anode voltage.



[The wire leads are connected to the vacuum tube.](#) [0:32, 6.58 Mb]



[The digital multi-meter leads are connected across the anode voltage.](#) [0:16, 2.98 Mb]

4. Turn on the power to the vacuum tube power supply and adjust the filament current so that the beam is sufficiently bright. In our example, the filament current is set to 0.6 amps and is held constant throughout this exercise.





[The filament current is set and the beam appears.](#) [0:22, 4.19 Mb]

- Adjust the anode voltage,  $V$ , on the power supply to impart a kinetic energy to the electrons. In this exercise the anode voltage is set to an **arbitrary value of 38.4 volts**. Since we want the electrons to have a fixed kinetic energy, the anode voltage is not adjusted again for the duration of the exercise. You should record the anode voltage in the [Data Sheet](#) below.



[The anode voltage is set.](#) [0:11, 2.22 Mb]



[The DMM displays the anode voltage.](#) [0.047 Mb]

- Connect the Helmholtz coil to the variable current source with wire leads. The polarity of the leads is not an issue. What will happen if the leads are inverted?



[Leads from the current source are connected to Helmholtz coils.](#) [0:15, 2.82 Mb]

- In this step we will use the Helmholtz coils to create the magnetic field that is used to deflect the electron beam. To do so, power up the variable current source and apply enough current to the coils so that the resulting magnetic field is strong enough to bend the beam into a circular path. The magnetic field should be large enough to cause the beam to impact the surface plate. Record the value of the current,  $I$ . Also calculate the magnetic field strength,  $B$ , and record this value in the [Data Sheet](#).

During this step, you must measure the beam's [radius of curvature](#),  $r$ , by carefully noting where the beam impacts the surface plate. Use the concentric circles imprinted on the plate as reference points to help you make the measurements. Recall that the circles are separated by a distance of 0.50 cm, and that the distance between the exit hole and the beam's impact point is **twice** that of the beam's radius of curvature.



[The beam is bent and the first deflection is measured.](#) [0:41, 7.81 Mb]



[All deflection measurements are played here.](#) [1:32, 17.3 Mb]

- Repeat step 7, varying the strength of the magnetic field by varying the current applied to the Helmholtz coils. **Take great care in measuring the electron deflection and its radius of curvature.** A small error in your deflection measurement, say  $\pm 0.05$  cm, can cause a 10% error in your final calculation of the electron's mass. This measurement is especially sensitive when  $r$  is small.



[All deflection measurements are played here.](#) [1:32, 17.3 Mb]



[The second deflection measurement may be made.](#) [0:08, 1.51 Mb]



[The third deflection measurement may be made.](#) [0:08, 1.57 Mb]



[The fourth deflection measurement may be made.](#) [0:09, 1.81 Mb]





[The fifth deflection measurement may be made.](#) [0:09, 1.87 Mb]



[The final deflection measurement may be made.](#) [0:10, 2.01 Mb]



[All deflection measurements are played here.](#) [1:32, 17.3 Mb]

9. Use the values entered into the [Data Sheet](#) below to determine the ratio  $e/m$ . You can accomplish this in two ways:
- Determine the  $e/m$  ratio using measurements from each trial and then find the average ratio. (Students with little previous laboratory experience may need to use this method.)
  - Or you may graph the appropriate data along the x- and y-axes and then analyze the resulting curve. The graph may be drawn by hand or created by a spreadsheet application like MS Excel, for example. (For additional help, see our tutorials on [Plotting experimental data](#), [Creating a graph](#), and [Using MS Excel](#).)
10. In 1913, Robert Millikan determined from his Nobel Prize-winning oil-drop experiments that the charge of an electron has a value of  $1.60 \times 10^{-19}$  C. Use your experimental results and Millikan's value to determine the electron mass,  $m$ .
11. Calculate the [percent error](#) between your value for the electron's mass and the accepted value of  $m = 9.109 \times 10^{-31}$  kg.
12. For safe keeping, you may e-mail the data directly to yourself or to your TA by entering the data into the form below and then clicking The Send Button.

## Data Sheet

Your name:

Your e-mail address:

Number of coils,  $N$   
 Helmholtz coil diameter  
 Helmholtz coil radius,  $R$   
 Filament current  
 Anode voltage,  $V$

**Current, I**  
**(A)**

**Magnetic Field, B**  
**(T)**

**Radius of Curvature,**  
**r**  
**(m)**

Quantity plotted on x-axis  
 Quantity plotted on y-axis  
 Slope of your graph  
 Experimental value of

Accepted value of $e/m$	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Experimental value of $m$	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Accepted value of $m$	

## Referência [9]

# Electron gun

From Wikipedia, the free encyclopedia

Jump to: [navigation](#), [search](#)



Electron gun from a [cathode ray tube](#)

An **electron gun** is a component that produces an [electron beam](#) that has a precise kinetic energy, being used in all TVs and monitors which use [cathode ray tube](#) technology, and in other instruments, eg. [electron microscopes](#) and at the beginning of linear [particle accelerators](#).

It is formed of several parts: a [hot cathode](#), which is heated to create a stream of electrons via [thermionic emission](#), electrodes generating an [electric field](#) which focus the beam (eg. a [Wehnelt cylinder](#)), and one or more [anode](#) electrodes which accelerate and further focus the electrons.

Most [colour](#) CRTs (such as is used in a colour [television](#) set) are made up of three electron guns, each one producing a different stream of electrons. Each stream travels through a [shadow mask](#) where the electrons will impinge upon either a red, green or blue [phosphor](#) to light up a colour dot of a [pixel](#) of the screen, the resultant colour being a combination of these three [primary colours](#) (including white).

## Referência [11]

An electron gun is used to produce a stream of electrons with a well defined kinetic energy. They are commonly found in all vacuum tube applications such as TV pictures tubes.

There are two parts to an electron gun; 1) a heated filament, and 2) the accelerating region, which is bounded by two electrodes, known as the cathode and the anode. The filament consists of a piece of wire, commonly made of a refractory material such as tungsten, which is heated by an electric current. Electrons leave the surface of the filament by a process known as [thermionic emission](#), but with very little energy. They drift through a small hole in the cathode, into a region where there is an electric field, which accelerates them across the gap to the anode. They then pass through a hole in the anode, with a final energy which is determined by the applied voltage.



The easiest way to understand the electron gun is in terms of conservation of energy. In crossing the gap, the electrons potential energy decreases by an amount equal to  $eV$ . This potential energy appears as the kinetic energy and we can write

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

from which the speed can be calculated.

*In this simulation, the electrons are emitted from the filament. Initially there is no electric field between the cathode and the anode, and the electrons just drift across the gap. You are however provide a means by which you can control the applied voltage, and see the effect on the electrons.*

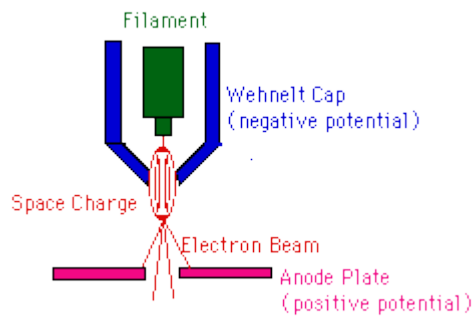
*When you have set the voltage, click on the diagram to start and stop the electron gun. Note that, for the gun to operate, the filament must be heated, and glows red. Note also the direction of the electric field (from right to left). Since the charge of the electron is negative. the electric field must be in this direction in order to provide an accelerating force to the right.*

**Referência [12]**

## **Electron Source (GUN)**



All Electron Microscopes utilize an electron source of some kind with the majority using a Thermionic Gun as shown below:



A Thermionic Electron Gun functions in the following manner

1. An positive electrical potential is applied to the anode
2. The filament (cathode) is heated until a stream of electrons is produced
3. The electrons are then accelerated by the positive potential down the column
4. A negative electrical potential ( $\sim 500$  V) is applied to the Whenelt Cap
5. As the electrons move toward the anode any ones emitted from the filament's side are repelled by the Whenelt Cap toward the optic axis (horizontal center)
6. A collection of electrons occurs in the space between the filament tip and Whenelt Cap. This collection is called a space charge
7. Those electrons at the bottom of the space charge (nearest to the anode) can exit the gun area through the small ( $<1$  mm) hole in the Whenelt Cap
8. These electrons then move down the column to be later used in imaging

This process insures several things:

- That the electrons later used for imaging will be emitted from a nearly perfect point source (the space charge)
- The electrons later used for imaging will all have similar energies ([monochromatic](#))
- Only electrons nearly parallel to the optic axis will be allowed out of the gun area

## COMETÁRIOS FEITOS PELO COORDENADOR DA DISCIPLINA.

**Projeto :** Projeto aprovado. Bom trabalho!      28/08/2006

**Relatório parcial:** Atrasou mas a nova versão demonstra meio caminho andado, nota 9,0      30/10/2006