

Razão carga-massa q/m

Introdução

Enquanto a razão massa-carga m/q de alguns íons já era conhecida por intermédio de métodos eletroquímicos, a razão m/q do elétron foi obtida apenas em 1897. O autor deste feito foi *Joseph John Thomson* que, além de determiná-la experimentalmente, demonstrou que o elétron: era uma partícula (com massa e carga muito bem definidas), e era cerca de 2000 menor que o íon de hidrogênio H^+ [1]. Em seu experimento, *Thomson* determinou a razão m/q de um feixe de raios catódicos a partir da comparação da deflexão deste quando sujeito à ação de campos externos (magnético ou elétrico) [2]. O aparato assim concebido também permitiu-lhe determinar a razão m/q de vários íons e seu princípio de funcionamento deu origem àquilo que hoje chamamos de espectrômetro de massa. Em função dos seus trabalhos, a *Thomson* é creditada a descoberta do elétron e dos isótopos, bem como a invenção do espectrômetro de massa. *Thomson* foi agraciado com vários prêmios importantes, dentre eles o Prêmio Nobel de Física de 1906, “em reconhecimento de suas investigações teóricas e experimentais sobre a condução de eletricidade em gases” [3].

A razão m/q é uma quantidade física amplamente utilizada em eletrodinâmica de partículas carregadas – tal como aquela envolvendo a óptica de elétrons e íons. Tão importante é a importância desta quantidade que, em 1991, ficou estabelecido que a unidade da razão m/q seria nomeada de thomson (Th), em reconhecimento àquele que primeiro a determinou. Em alguns casos, no entanto, o inverso da razão m/q é adotado e o seu valor aceito atualmente é $q/m = 1.759 \times 10^{11}$ C/kg [4].

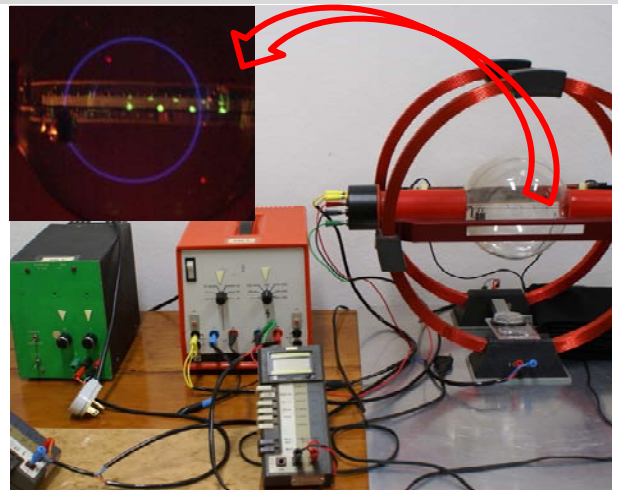
Dada a relevância científica-tecnológica da razão q/m do elétron, este roteiro refere-se à sua determinação experimental. Seguem algumas informações para a sua realização.

Objetivos

- ☞ Verificar a dependência da trajetória de um feixe de elétrons quando sujeito a diferentes potenciais de aceleração e intensidades de campo magnético.
- ☞ Determinar experimentalmente a razão q/m do elétron.
- ☞ Determinar experimentalmente a intensidade do campo magnético terrestre local.
- ☞ Comparar os resultados obtidos com aqueles esperados, e discuti-los.

Equipamentos

- 1 tubo (ou ampola) de raios catódicos – *Leybold* ou *Phywe*
- 1 suporte do tubo acoplado a um par de bobinas de *Helmholtz*
- 1 fonte DC para acelerar o feixe de elétrons
- 1 fonte DC (15 V / 2 A) para as bobinas
- 1 bússola
- 2 multímetros
- Fios para conexão, réguas, etc.



Descrição do Experimento

Um feixe de elétrons é produzido por um filamento aquecido e é acelerado por uma diferença de potencial entre um cátodo e um ânodo. Este feixe (filiforme e colimado) emerge de um furo circular existente no centro do ânodo. O conjunto todo (filamento+cátodo/ânodo+colimador) encontra-se no interior de uma ampola contendo gás hidrogênio sob baixa pressão. Ao saírem do ânodo, os elétrons energéticos colidem com os átomos de hidrogênio induzindo nestes um processo chamado de fluorescência. Como resultado, temos um “rastros” visível da trajetória descrita pelo feixe de elétrons.

Dependendo da orientação do tubo de raios catódicos frente ao campo magnético gerado pelas bobinas de *Helmholtz*, a trajetória pode ser circular ou helicoidal (ver fotos do início do roteiro). Além disto, o raio da trajetória assim descrita depende da diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo, bem como da intensidade do campo magnético. Isto ocorre devido à força de *Lorentz* ($\vec{F} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_{mag}$ onde $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$ e $\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$), a qual determina uma força centrípeta a partículas carregadas em movimento quando sujeitas à ação de um campo magnético. Desta forma, o campo magnético gerado pelas bobinas de *Helmholtz* faz com que o cada elétron individual do feixe seja defletido tal que

$$qvB = m \frac{v^2}{R}, \quad (1)$$

onde: q ($= e$) e m correspondem à carga e à massa do elétron movendo-se com velocidade v , B é a intensidade do campo magnético aplicado, e R é o raio da trajetória descrita pelo feixe. Como os elétrons possuem uma velocidade determinada pela ddp V entre o cátodo e o ânodo, podemos escrever que

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

Combinando as Eqs. (1) e (2) vemos que a razão e/m pode ser determinada a partir de:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2R^2}. \quad (3)$$

Nesta expressão, as quantidades V (potencial de aceleração dos elétrons) e R (raio da trajetória) são medidas diretamente, enquanto a intensidade do campo magnético B pode ser determinada a partir da corrente elétrica I que alimenta as bobinas de *Helmholtz*. Mais especificamente, o campo magnético B_1 produzido por uma única espira circular de raio r – ao longo do seu eixo principal, a uma distância x – quando por ela flui uma corrente I é dado por:

$$B_1 = \mu_0 I \frac{r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

com μ_0 sendo a permeabilidade do vácuo. Assim sendo, o campo produzido pelas bobinas de *Helmholtz* (duas bobinas coaxiais, com N espiras cada, e separadas por uma distância igual ao seu raio r), em seu ponto médio ($x = r/2$), será dado por:

$$B = 0.716\mu_0 \frac{N}{r} I. \quad (5)$$

Confirme a validade desta expressão no sistema SI. Além disto, sua aplicação requer a verificação das características das bobinas de *Helmholtz* utilizadas (se do fabricante *Leybold* ou *Phywe*) – consulte o manual disponível na sala para certificar-se do número de espiras N e do raio das mesmas.

Combinando as Eqs. (3) e (5) teremos o valor da razão e/m como sendo dado por:

$$\frac{e}{m} = 2V \left(\frac{1}{0.716\mu_0} \frac{r}{NIR} \right)^2. \quad (6)$$

Procedimento Experimental

A montagem experimental está representada esquematicamente na Figura 1.

Antes de mais nada, é recomendável orientar o tubo de modo a minimizar o efeito do campo magnético terrestre. Isto é conseguido com o auxílio de uma bússola, orientando as bobinas de *Helmholtz* tal que o seu campo seja ortogonal ao campo terrestre local.



Faça com que todos os equipamentos estejam desligados-desenergizados para não afetar a leitura da bússola.

Com a ampola devidamente orientada e com as conexões elétricas verificadas, aplique uma tensão de 6.3 V (~ 1 A) para alimentar–focalizar o feixe de elétrons. Imponha uma tensão de aceleração para os elétrons entre 200–300 V.



Certifique-se que as conexões elétricas sejam consistentes com aquelas indicadas na Fig. 1, observando atentamente as polaridades indicadas.

 **Antes de começar a aplicar tensões-correntes, garanta que as fontes encontrem-se zeradas.**

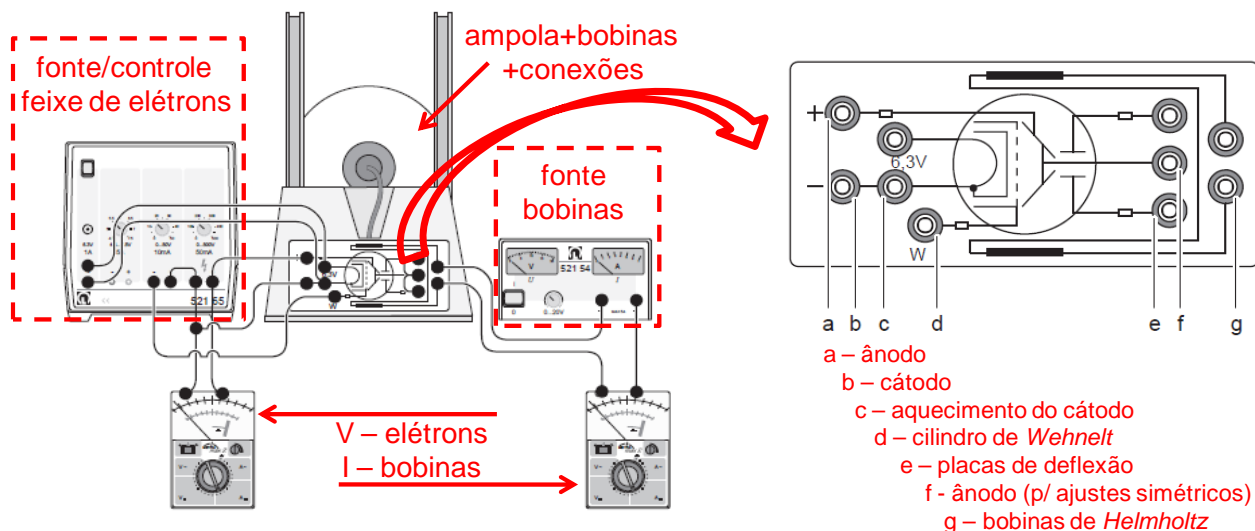


Figura 1 – Diagrama da montagem para a determinação da razão e/m , e detalhe das conexões elétricas.

Após um pré-aquecimento (~ 1 min) para estabilizar o feixe de elétrons, podemos começar a variar a tensão entre o cátodo e o ânodo, e aplicar corrente nas bobinas de *Helmholtz*. Escurecendo-se a sala (e, eventualmente, cobrindo a ampola com um pano preto) o feixe de elétrons torna-se visível e pode ser defletido à medida que variamos a corrente que percorre as bobinas de *Helmholtz*. Caso seja necessário, ajuste a qualidade (foco) do feixe de elétrons por meio da voltagem do cilindro de *Wehnelt* – quanto mais definido o feixe, melhor. Nesta etapa do experimento, procure explorar as características do sistema (variando a energia dos elétrons, a intensidade do campo magnético das bobinas, a orientação relativa da ampola, etc.) para familiarizar-se com os recursos disponíveis e, principalmente, acostumar-se com a visualização do feixe de elétrons.

Para determinar a razão e/m com precisão, dois aspectos são muito importantes: (1) fazer com que o plano definido pela trajetória dos elétrons seja perfeitamente paralelo ao plano das bobinas de *Helmholtz*, e (2) minimizar os erros de paralaxe envolvidos na medida dos diâmetros das trajetórias observadas. Neste último caso, o conjunto ampola+bobinas dispõe de um sistema de marcadores de posição e espelho para auxiliá-lo.

De posse destas informações e tendo concluído as etapas anteriores, passemos à aquisição dos dados experimentais.

1 – Determinação da razão e/m

Neste caso, mediremos o raio da trajetória definida pelos elétrons em função de algumas das quantidades envolvidas na Eq.(6).

Campo constante – fixe a intensidade do campo magnético ($I \sim 1.5$ A) e varie a ddp de aceleração dos elétrons até ~ 300 V. Meça os diferentes raios das trajetórias descritas pelos elétrons para cada valor de V . Obtenha entre 7–10 valores experimentais e, a partir de uma representação gráfica de V versus R^2 , determine o valor da razão e/m .

Energia constante – imponha uma certa energia para os elétrons ($V \sim 150$ V, por exemplo) e meça os raios das trajetórias descritas pelo feixe de elétrons para vários (7–10) valores de corrente nas bobinas de *Helmholtz*. Determine o valor da razão e/m a partir de uma representação gráfica de R^{-1} versus I .

Compare os resultados obtidos a partir dos dois métodos utilizados (I const. X V const.). Considerando que a determinação da razão e/m envolve a medida de três quantidades (V , I , e R), quais são as maiores fontes de erros (sistemáticos)? Discuta.

2 – Determinação do campo magnético terrestre

Para a determinação do campo magnético terrestre, vamos assumir que a sua influência é máxima ao alinharmos as bobinas de *Helmholtz* de modo a somar (ou subtrair) a intensidade dos campos. Logo, é possível determinar o campo magnético terrestre posicionando as bobinas de *Helmholtz* com campo resultante paralelo e anti-paralelo ao campo terrestre. Como o valor da razão e/m deve ser o mesmo nas duas situações, a variação observada nos raios das trajetórias descritas pelos elétrons devem-se a diferenças no campo resultante: $B_{\text{par}} = B_{\text{Helm}} + B_{\text{Terra}}$ e $B_{\text{a-par}} = B_{\text{Helm}} - B_{\text{Terra}}$. Subtraindo um resultado do outro, e calculando a sua média aritmética, obtemos uma estimativa da intensidade do campo magnético local.

Discuta o resultado assim obtido e compare-o com os valores médios no Brasil ($B_{\text{hor}} = 0.253$ G e $B_{\text{ver}} = 0.122$ G).

Questões

- ! Por que os elétrons são emitidos do cátodo e como podemos visualizar o feixe eletrônico?
- ! Por que, na determinação da razão e/m , devemos alinhar o campo magnético das bobinas de *Helmholtz* perpendicularmente ao campo terrestre?
- ! Por que, na determinação do campo magnético terrestre, os campos (das bobinas e terrestre) devem ser (anti-) paralelos?
- ! Por que obtemos uma trajetória espiral quando giramos ligeiramente a ampola do experimento?
- ! Discuta a respeito das fotos-figuras apresentadas na primeira página deste roteiro. Você consegue identificá-las todas? O que significam e a que se referem?

Referências

Física Moderna

College Physics (OpenStax College, 2012) <http://cnx.org/content/col11406/latest/>.

Paul Tipler, *Física Moderna* (Guanabara Dois, 1981) – **539^T595f**

Arthur Beiser, *Conceitos de Física Moderna* (McGraw-Hill, 1987) – **539^B423c**

Eletromagnetismo & Física Atômica

R. Reitz, F. J. Milford, e R. W. Christy, *Fundamentos da Teoria Eletromagnética* (Campus, 1982) – **530.141^R379ft**

M. R. Wehr e J. A. Richard Jr., *Física do Átomo* (ao Livro Técnico, 1965) – **539.14^W567f**

T. B. Brown, *The Lloyd William Taylor Manual of Advanced Undergraduate Experiments in Physics* (Addison-Wesley, 1959). – **530.078^L793**

História (conforme apresentadas na Introdução)

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson

[2] <http://www2.pv.infn.it/~franchino/DIDATTICA/Fisichetta/thomson.pdf>

[3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906/

[4] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?esme>

Simulações

<http://www.kcvs.ca/map/java/applets/chargedtomass/applet.html>

http://www.physics.brocku.ca/courses/1P22_Crandles/applets/MassSpectrometer/

http://canu.ucalgary.ca/map/content/force/elcrmag/simulate/exb_thomson/applet.html

Créditos

Ao longo dos anos, este roteiro passou por diversas atualizações e melhorias. Neste processo, tiveram participação ativa os Profs M. A. Aegerter, M. Siu Li, C. E. Munte, R. A. Carvalho, e A. R. Zanatta.

Os diagramas utilizados neste roteiro foram extraídos do catálogo da *Leybold*.

A foto da montagem experimental (com o detalhe do feixe de elétrons) foi feita pelo Prof. M. Siu Li.

As fotos-figuras apresentadas na pg. 1 foram obtidas da *internet*.