

História da Física e Ciências Afins

A carga específica do elétron. Um enfoque histórico e experimental

(*The specific charge of the electron. A historical and experimental approach*)

Luiz Cezar Mendes da Silva, Wilma Machado Soares Santos¹ e Penha Maria Cardoso Dias

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 14/12/2009; Aceito em 14/2/2010; Publicado em 21/3/2011

Neste trabalho, apresentamos uma proposta para determinar a razão $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$ do elétron para estudantes do ensino médio. A teoria é introduzida por um texto apropriado de história; usamos *The Discovery of Subatomic Particles*, de Steven Weinberg. Então, os estudantes realizam quatro experimentos acessíveis a alunos da terceira série do ensino médio, nos quais eles interagem com o equipamento, participando desde a montagem experimental. Os experimentos e os resultados obtidos se encontram descritos.

Palavras-chave: carga/massa do eletron, história da ciência, experimentos.

In this paper, we present a proposal to teach the ratio $\frac{\text{charge}}{\text{mass}}$ of the electron to high school students. The theory is introduced using an appropriate text in the history of science, namely, Steven Weinberg's *The Discovery of Subatomic Particles*. Students perform four experiments appropriate to this level of teaching. They interact with the equipment and participate in the set up of the experiments. We describe the experiments and present their results.

Keywords: electron charge/mass, history of science, experiments.

1. Introdução

De acordo com os princípios propostos pela lei de Diretrizes e Bases, LDB [1], assim como pelos Parâmetros Curriculares PCN-EM do MEC [2], é recomendada a inserção de conteúdos de física moderna ou contemporânea no ensino médio. Tal aprendizagem tem importância crucial para os alunos, tendo em vista que a física moderna estabelece o contato dos alunos com as idéias que mudaram a ciência no século XX.

Neste trabalho, apresentamos uma proposta de ensino-aprendizagem que utiliza a compreensão de conceitos físicos, a partir do entendimento da construção desses conceitos, utilizando para tal a história da física. A história da física é um recurso inesgotável ao ensino da física. Entendemos que, revivendo os problemas que deram origem a um conceito, com os mesmos argumentos da época em que foi estabelecido, o estudante terá uma melhor compreensão do conceito, pois vai entender porque o conceito existe, ao saber os argumentos que realmente convenceram aos cientistas. Este trabalho segue a mesma linha de outros, nos quais a produção de material instrucional, apresenta alternativas, diferentes das tradicionais, para o ensino de temas em que os alunos usualmente apresentam dificuldade de compreensão, devido à abstração envolvida [3, 4].

Tem-se revelado eficiente ao aprendizado [5, 6]: 1.

O uso de atividades experimentais relacionadas à teoria e ao cotidiano, na construção do conhecimento pelo aluno; 2. a experimentação como ferramenta importante na obtenção de informações (observações e medidas) e na produção de idéias que constituem uma das bases de apoio no processo de formação do saber; 3. A análise e a interpretação dos resultados experimentais como auxiliares na evolução conceitual e na introdução aos modelos teóricos e seus significados.

Um tema bastante interessante para ser abordado no ensino médio é a espectroscopia de massa, que foi iniciada com o trabalho experimental realizado pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940), no Laboratório Cavendish, da Universidade de Cambridge. A pesquisa de Thomson, que levou à descoberta do elétron, em 1897, também produziu o primeiro espectrômetro de massa. Thomson notou que os íons se moviam na presença de campos elétricos e magnéticos e em trajetórias parabólicas e determinou, com seu experimento, a razão $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$ do elétron. A descoberta de Thomson concedeu-lhe o Prêmio Nobel de Física, em 1906 [7]. Atualmente, assim como as impressões digitais são usadas para identificar pessoas, a espectroscopia de massa é usada para identificar substâncias. Além da espectroscopia de massa, o elétron tem uma importância única para a química, física e biologia, devido à sua le-

¹E-mail: wilma@if.ufrj.br.

veza, carga e estabilidade. Uma corrente elétrica em um fio não é nada mais que um fluxo de elétrons. Elétrons participam de reações nucleares que produzem o calor do sol. Cada átomo no universo consiste de um caroço denso (o núcleo), rodeado por uma nuvem de elétrons. As diferenças químicas entre um elemento e outro dependem quase inteiramente dos números de elétrons no átomo.

Neste trabalho, apresentamos uma proposta instrucional para determinar a razão $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$ do elétron. A capacitação teórica é introduzida pelo uso da história, apresentando as etapas realmente seguidas por Thomson, suas dificuldades e as soluções encontradas. Não é o objetivo deste artigo apresentar pesquisa original em história da física e o enfoque histórico segue a abordagem de Weinberg [7], um livro confiável também em seu aspecto histórico; assim, a seção 2 apresenta uma tradução (nem sempre *ipsis litteris*) de partes do livro, adaptadas às necessidades de nosso artigo e às circunstâncias. Após a capacitação teórica, os estudantes realizaram quatro experimentos acessíveis a alunos da terceira série do ensino médio, nos quais interagem com o equipamento, influenciando resultados; a idéia é que eles participem desde a montagem experimental. A viabilidade desta proposta depende do uso de equipamento específico com o qual os experimentos foram realizados. No primeiro experimento, mostra-se que um feixe de elétrons é produzido, quando uma tensão é aplicada entre o catodo e o anodo. No segundo experimento, os alunos aplicam corrente em uma bobina e observam o efeito de um campo magnético sobre o feixe. No terceiro experimento, os alunos observam o efeito produzido no feixe com a variação do ângulo entre o feixe e o campo magnético. Finalmente, no quarto experimento, usando um feixe circular, os alunos fazem medidas de corrente e tensão, representam esses resultados em um gráfico e do gráfico obtêm o valor da relação $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$ do elétron.

O trabalho foi aplicado no Colégio Santo Inácio, da rede particular de ensino do Município do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos pelos alunos e a análise desses resultados são apresentados de forma detalhada nas seções 3.2.4 e 3.2.5.

2. O experimento de Thomson (uma tradução adaptada de *The Discovery of Subatomic Particles*)

2.1. Raios catódicos

Descargas elétricas em tubos de vidro contendo um gás a baixa pressão (Fig. 1) eram estudadas desde 1709. Nessas descargas, o interior do tubo fica iluminado e a cor da luz depende do gás; sabe-se, hoje, que as luzes são emitidas na ionização das moléculas do gás, quando colidem com elétrons provenientes do catodo. Se o vácuo for muito bom, ocorrem menos colisões, o que resulta em um feixe bem colimado dos elétrons do

catodo. Na época de Thomson, a natureza da eletricidade não era conhecida e descargas em tubos de vidro eram um instrumento de investigação da natureza da eletricidade; o que distinguiu a pesquisa de Thomson foi que, diferentemente de outros pesquisadores, ele conseguiu obter um bom vácuo e um “bom feixe”, o que lhe permitiu observar desvios do feixe por forças elétricas e magnéticas.

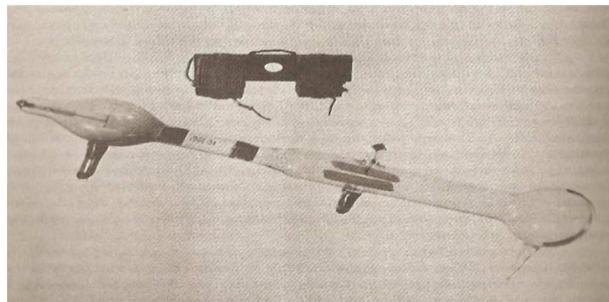


Figura 1 - Tubo de raios catódicos utilizado por Thomson [7]. Esse tubo foi um precursor dos tubos de imagem usados em receptores de TV, osciloscópios, telas de radar e monitores de computador.

O funcionamento do tubo de raios catódicos está representado esquematicamente, na Fig. 2.

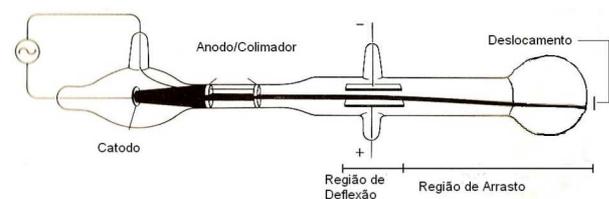


Figura 2 - Visão esquemática do aparelho de Thomson [7]. “Raios” repelidos pelo catodo são atraídos pelo anodo e alguns passam pelo colimador, formando um feixe. Esse feixe é defletido por placas ligadas a uma bateria, de modo a formar um forte campo elétrico entre elas; depois, move-se em uma região livre de forças, até bater na parede do tubo, produzindo um ponto de luz.

O raio (feixe de partículas) que sai do catodo passa através de uma região (região de deflexão), onde está sujeito a forças elétricas ou magnéticas, aplicadas perpendicularmente à direção original do raio. Em seguida, o raio passa por uma região mais extensa, livre de forças (região de arrasto), onde se move com movimento retilíneo uniforme, até alcançar o fim do tubo. Uma mancha luminosa aparece onde o raio (as partículas do raio) bate na parede do vidro no final do tubo. O experimento de Thomson consistiu em medir o deslocamento produzido pelas forças no raio; o deslocamento é dado pela distância entre a posição da mancha e a direção original do raio (quando não há forças).

No experimento, as forças exercidas nas partículas são perpendiculares ao eixo do tubo, que é a direção inicial de movimento (das partículas) do raio; com referência à Fig. 2, as forças elétricas são aplicadas ao longo da vertical e as magnéticas, entrando ou saindo

do papel. Isto é, são perpendiculares à direção inicial do raio. Assim, quando uma partícula emerge da região de deflexão, ela possui uma componente de velocidade perpendicular ao movimento original, igual ao produto da aceleração pelo tempo que a partícula gasta na região de deflexão (as forças são constantes). Na região de arrasto, não há forças atuando e uma partícula mantém a direção e módulo da velocidade com que emerge da região anterior; assim, o deslocamento do feixe para baixo, é igual à componente, perpendicular da velocidade ao emergir da região de deflexão, multiplicada pelo tempo que a partícula permanece na região de arrasto. Com essa física elementar, Thomson calcula uma expressão para o deslocamento (D) de uma partícula ([7, apêndice B])

$$D = \frac{F_p \times L_d \times L_a}{m \times v^2}, \quad (1)$$

sendo F_p a força sobre a partícula; L_d , o comprimento da região de deflexão; L_a , o comprimento da região de arrasto; m , a massa da partícula e v , sua velocidade. Por exemplo, supondo que a força exercida em uma partícula seja igual a 10^{-16} N, que o comprimento da região de deflexão seja 0,05 m, que o comprimento da região de arrasto seja 1,1 m, que a massa da partícula seja 9×10^{-11} kg e sua velocidade, 3×10^7 m/s, o deslocamento do raio, quando ele chega ao final do tubo, é 0,0068 m ou 0,68 cm.

Na fórmula, os comprimentos das regiões de deflexão e arrasto são quantidades conhecidas, determinadas pelo desenho do tubo do raio catódico. A massa e a velocidade são propriedades das partículas. A força elétrica atuando em uma partícula é proporcional à carga da partícula, bem como a força magnética. Portanto, o deslocamento dado pela fórmula de Thomson envolve variáveis da partícula na forma $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$; quanto à velocidade, é a que acontece no particular tubo que está sendo usado no experimento.

Thomson mediu o deslocamento produzido para diferentes valores das forças elétricas e magnéticas e para vários gases e calculou a razão carga/massa.

As forças elétricas são produzidas pelo campo elétrico entre placas metálicas paralelas, carregadas (Fig. 2). Usando placas cujos comprimentos e larguras são muito maiores que a separação entre elas, o chamado efeito de borda (encurvamento das linhas na borda) pode ser ignorado e o campo é perpendicular às placas até próximo das bordas e é direcionado da placa positiva para a negativa, como na Fig. 3.

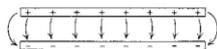


Figura 3 - Linhas de campo elétrico na região de deflexão [7].

O campo elétrico em um ponto entre as placas não depende das distâncias entre esse ponto e as placas. Isso se segue da interpretação do campo elétrico como

o número de linhas de campo por unidade de área perpendicular às linhas de campo; a Fig. 3 é desenhada com espaçamento uniforme entre as linhas, de modo a ilustrar que há o mesmo número de linhas de campo por unidade de área perpendicular às linhas, em qualquer lugar entre as placas. Então, a força elétrica faz realmente ângulos retos com o eixo do tubo de raios catódicos, com a intensidade $F_e = eE$ onde e é a carga e E , o campo elétrico. Assim, a fórmula de Thomson pode ser usada e o deslocamento devido às forças elétricas é

$$D_e = \frac{e \times E \times L_d \times L_a}{m \times v^2}, \quad (2)$$

onde e é a carga da partícula, E , o campo elétrico, L_d , o comprimento da região de deflexão e L_a , o comprimento da região de arrasto. O campo elétrico pode ser determinado pela voltagem da bateria usada para carregar as placas metálicas e da separação entre elas; esse foi o método usado por Thomson.

As leis do eletromagnetismo, formuladas por Ampère, Faraday, etc, fornecem forças em fios que são atravessados por correntes. Wilhelm Weber (1804-1890) mostrou como calcular a força magnética sobre uma partícula carregada, a partir da força conhecida em uma corrente que atravessa um fio. Pela lei de Ampère, a força sobre um comprimento de fio devido a um campo magnético perpendicular ao fio é o produto do comprimento do fio pela corrente elétrica e pelo campo magnético. Essa expressão pode ser reinterpretada, como se segue. A distância percorrida pela partícula em um fio por onde passa uma corrente elétrica, i , é o produto de sua velocidade, v , pelo tempo transcorrido, t ; assim o comprimento do fio, L_{fio} , é igual ao produto da velocidade das partículas que o atravessam, pelo tempo t que essas partículas levam para atravessar o fio de um lado ao outro: $L_{\text{fio}} = v \times t$; multiplicando esse produto pela corrente elétrica

$$L_{\text{fio}} \times i = v \times t \times i, \quad (3)$$

como corrente é carga por unidade de tempo,

$$L_{\text{fio}} \times i = v \times e. \quad (4)$$

A força magnética atuando sobre o comprimento do fio é, pois, o produto das cargas elétricas, de todas as partículas em movimento do fio, suas velocidades, e o campo magnético. Se todas as partículas têm a mesma carga e a mesma velocidade, elas devem contribuir com a mesma parcela de força para a força total no comprimento do fio. Então, a força magnética F_m sobre qualquer partícula devido a um campo magnético B , perpendicular a sua direção é dada por

$$F_m = e \times v \times B. \quad (5)$$

Por exemplo, para se ter uma noção da ordem de grandeza, partículas lançadas do Sol que colidem, na

atmosfera da Terra, com cargas elétricas de 2×10^{-19} C e velocidade de 5×10^5 m/s, no campo magnético terrestre (cerca de 5×10^{-5} N/(A \times m)) estão submetidas a uma força magnética $F_m = 5 \times 10^{-18}$ N. Essa força é pequena, mas como essas partículas possuem uma massa próxima de 5×10^{-26} kg, elas são aceleradas a 10^8 m/s², ou seja, um valor muito maior que o da aceleração da gravidade, 9,8 m/s².

A força na partícula é menor, se a velocidade da mesma não for perpendicular ao campo magnético e é nula para partículas que se movem ao longo da direção do campo magnético. Uma consequência disso é que partículas carregadas emitidas pelo Sol com altas velocidades chegam à Terra movendo-se ao longo da direção do campo magnético terrestre (as outras são afastadas pela força magnética), colidindo com a Terra, próximo aos pólos magnéticos, e produzindo um festival de luzes no norte e no sul, quando elas entram na atmosfera.

Thomson foi capaz de usar a equação para a força magnética sobre uma partícula em movimento, junto com a Eq. (1), para calcular o deslocamento do raio catódico, devido ao campo magnético perpendicular a sua direção

$$D_m = \frac{e \times B \times L_d \times L_a}{m \times v}. \quad (6)$$

A teoria desenvolvida foi aplicada aos resultados experimentais de Thomson. Primeiro, um campo elétrico ou um campo magnético, perpendiculares entre si e ao feixe dos raios catódicos na região de deflexão, produziram deslocamentos do feixe, dados respectivamente pelas Eqs. (2) e (6). Thomson conhecia os valores dos campos elétrico e magnético no interior do tubo, assim como o comprimento das regiões de deflexão e de arrasto. Ele mediu as deflexões produzidas pelas forças elétricas e magnéticas.

É imediatamente claro que não havia nenhum modo para Thomson ou outra pessoa usar essas equações para aprender alguma coisa separadamente sobre a carga ou a massa das partículas dos raios catódicos, pois em ambas as equações somente aparece a razão dessas quantidades.

A velocidade das partículas é desconhecida; mas ela pode ser calculada, dividindo D_m por D_e

$$\frac{D_m}{D_e} = \frac{B \times v}{E}, \quad (7)$$

como os campos eram conhecidos e as deflexões correspondentes foram medidas, Thomson pôde calcular a velocidade. Porém as expressões não permitem calcular separadamente a carga e a massa das partículas dos raios catódicos, somente a razão dessas quantidades.

2.2. A hipótese do elétron

Thomson mediu a razão $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$ das partículas que formam os raios catódicos. Então, ele fez a hipótese, se-

gundo a qual as partículas dos raios catódicos são constituintes fundamentais de toda matéria ordinária ([7, p. 66]):

[...] nós temos nos raios catódicos matéria em um novo estado, um estado em que a subdivisão da matéria está levada muito além do que no estado gasoso ordinário: Um estado em que toda matéria - isto é, matéria derivada de diferentes fontes tais como hidrogênio, oxigênio, etc. - é de uma única espécie; essa matéria sendo a substância da qual os elementos químicos são formados.

Thomson baseia sua conclusão na universalidade do valor da razão $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$ das partículas dos raios catódicos, pois o valor parece não depender do gás no tubo e do material do catodo (o que afeta a velocidade das partículas). Mas muitos historiadores, hoje, são cautelosos em atribuir a Thomson a descoberta do elétron; a principal razão é que as medidas de Thomson apresentam grande dispersão. Mas ele foi o primeiro a fazer a hipótese do elétron como parte da constituição da matéria, uma conclusão que ultrapassa o resultado de seus experimentos. O próprio Thomson admitiu que ([7, p. 67]) “inicialmente houve muito poucos que acreditaram na existência destes corpos menores que os átomos”. Para substanciar a conclusão, Thomson também menciona um resultado obtido por Pieter Zeeman (1865-1943). Zeeman obteve uma estimativa da razão $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$ do que quer que seja que transporta a corrente elétrica nos átomos e é responsável pela emissão e absorção da luz. Esses valores são similares aos obtidos por Thomson para os constituintes dos raios catódicos.

A universalidade desta partícula foi logo verificada. A razão $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$ dos chamados raios beta emitidos por substâncias radioativas foi encontrada por métodos similares ao de Thomson e seu valor é o mesmo do das partículas dos raios catódicos. Thomson mostrou, em 1899, que as partículas carregadas negativamente emitidas no efeito fotoelétrico ou emitida por uma superfície metálica incandescente possuem a mesma razão $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$ dos raios catódicos.

A partícula dos raios catódicos recebeu o nome de elétron; esse nome havia sido proposto muito antes por George Stoney, para a unidade de eletricidade ganha ou perdida quando os átomos se tornam íons eletricamente carregados. Na década após o experimento de Thomson essa partícula fundamental tornou-se aceita e foi chamada de elétron.

2.3. Os cálculos do experimento

Quando um elétron de massa m_0 e carga e entra em uma região onde existe um campo elétrico, ele é acelerado pelo potencial elétrico U , adquirindo energia cinética

de mesmo valor de sua energia potencial

$$e \times U = \frac{m_0 \times v^2}{2}. \quad (8)$$

Em um campo magnético de intensidade B , a força magnética F_m sobre um elétron com velocidade v é

$$F_m = e \times v \times B \times \sin \theta, \quad (9)$$

onde θ é o ângulo formado pelo vetor velocidade \mathbf{v} e o vetor campo magnético, \mathbf{B} . Se o campo magnético for uniforme, o elétron descreve uma trajetória em hélice ao longo das linhas de força magnética; a trajetória torna-se um círculo de raio r , se v for ortogonal ao campo B ($\theta = 90^\circ$).

No experimento, elétrons são acelerados por um campo elétrico e penetram em uma região com campo magnético perpendicular à direção de movimento e ao campo elétrico. Como a força centrípeta gerada é igual à força magnética

$$\frac{m_0 v^2}{r} = evB \Rightarrow v = \frac{e \times B \times r}{m_0}. \quad (10)$$

Substituindo o valor de v na Eq. (8)

$$\frac{e}{m_0} = \frac{2 \times U}{B^2 \times r^2}. \quad (11)$$

Para o arranjo de Helmholtz de duas bobinas com número de espiras n , o campo B no centro entre as bobinas é dado por

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \times \mu_0 \times n \times \frac{i}{R}, \quad (12)$$

$\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \frac{V \times s}{A \times m}$ é a permissividade elétrica do meio, no caso o vácuo, R é o raio das bobinas e n é o número de espiras.

3. O experimento na escola

3.1. Montagem do experimento

Os materiais utilizados no experimento são: tubo de feixe colimado, par de bobinas de Helmholtz, fonte de tensão de 600 V-DC, fonte de tensão usada como fonte de corrente, amperímetro, voltímetro e fios de conexão (Fig. 4).

Os conteúdos de física aprendidos no último ano do Ensino Médio, como campo elétrico, campo magnético e força magnética necessitam de grande grau de abstração dos alunos, pois o campo elétrico, o campo magnético e a força no elétron em movimento estão em três direções perpendiculares entre si. É notório que esses assuntos são de extrema importância, porém são vistos rapidamente e, devido ao pouco tempo disponível, quase não são realizados experimentos para uma melhor aprendizagem. Portanto, inicialmente, esses conceitos teóricos foram discutidos com os alunos, a partir

do texto histórico. Em seguida foi feita a montagem do experimento, de modo que os alunos participaram desde o início, ajudando a separar os materiais que foram usados, como voltímetros, conexões, etc. Após essa separação, começaram a montar o experimento. Logo surgiram dúvidas, como por exemplo, como colocar o multímetro para ser usado como amperímetro? E as ligações como são realizadas, em série ou em paralelo? Como é, na prática, essa ligação?



Figura 4 - Foto do experimento montado.

3.2. Experimentos

3.2.1. Primeiro experimento: visualização do feixe de elétrons

Após a montagem do experimento, liga-se a fonte de tensão e o feixe de elétrons é formado e pode ser visualizado. Os próprios alunos manuseiam um voltímetro ligado à fonte e podem perceber que, com o aumento da tensão, o feixe fica mais intenso. Neste momento, não há, ainda, um campo magnético formado pelas bobinas, por isso o feixe não sofre nenhum desvio (Fig. 5).



Figura 5 - Feixe de elétrons, produzido pelo campo elétrico.

3.2.2. Segundo experimento: feixe na presença de um campo magnético

A fonte de corrente contínua é ligada e as bobinas produzem um campo magnético, pois, quando um fio condutor é atravessado por corrente elétrica, um campo magnético é produzido. O feixe de elétrons sofre desvio, devido à força magnética que age sobre ele; o feixe e a força magnética formam entre si um ângulo de 90° . Quanto maior a corrente das bobinas, maior o campo magnético e maior o desvio de feixe; isso é constatado pelos alunos, na leitura do amperímetro, que foi ligado pelos próprios alunos, assim como o voltímetro. Nessa etapa, os alunos já sabem que o amperímetro deve ser ligado em série e o voltímetro em paralelo.

O aluno já compreendeu a ação do campo magnético, curvando o feixe (Fig. 6). O campo é, então

desligado e um aluno aproxima do feixe um ímã, observando que ele age como uma bobina; logo o aluno chega à conclusão de que o ímã possui um campo magnético, porém com origem diferente do campo formado pela bobina. Veja esse momento na Fig. 7.



Figura 6 - Foto do feixe de elétron formando um círculo, com velocidade perpendicular ao campo magnético.



Figura 7 - Momento em que os alunos aproximam o ímã do feixe de elétrons.

3.2.3. Terceiro experimento: analisar a relação do ângulo formado pelo campo magnético e o feixe helicoidal

Modifica-se o ângulo formado entre o campo e o feixe, formando, assim, uma hélice, como mostrado na Fig. 8. Com isso, os alunos aprendem a relação entre o ângulo e a força exercida no feixe.



Figura 8 - Foto do feixe de elétron em hélice.

3.2.4. Quarto experimento: obtenção de dados em um feixe circular

Variando-se o campo magnético (corrente) e a velocidade dos elétrons (tensão), o raio (r) da órbita do feixe de elétrons foi ajustado para que coincidissem com um valor pré estabelecido (no trabalho 0,03 m). Na Tabela 1 encontram-se os valores medidos.

Tabela 1 - Dados obtidos para $r = 0,03$ m

#	Tensão (V)	Corrente (A)	Corrente ao quadrado A^2
1	150	1,71	2,92
2	165	1,81	3,28
3	180	1,91	3,65
4	195	2,00	4,00
5	210	2,14	4,58
6	225	2,17	4,71
7	240	2,32	5,38

As incertezas associadas às medidas são 1 V para a tensão e 0,01 A para a corrente. Para determinar a incerteza da corrente ao quadrado, foi usada a propagação de erros $2i\delta i$; os valores variam entre $0,02 A^2$ e $0,05 A^2$.

3.2.5. Análise de dados e determinação da razão carga/massa do elétron

Os dados experimentais da tabela acima foram utilizados em um gráfico *tensão vs. corrente ao quadrado*. A curva formada corresponde a uma função polinomial de primeiro grau ($y = a + b \times x$) (Fig. 9).

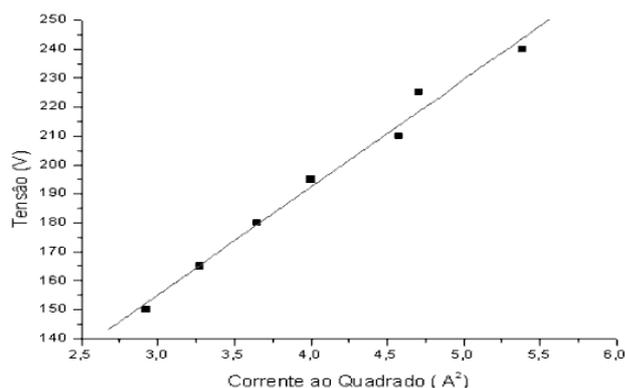


Figura 9 - Gráfico para obtenção da razão carga/massa.

Usando as Eqs. (11) e (12), a relação $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$ do elétron é dada por

$$\frac{e}{m_0} = \frac{2 \times U}{K \times i^2}, \quad (13)$$

onde $K = \left(\frac{4}{5} \times \mu_0 \times \frac{n}{R}\right)^2 \times r^2$, $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6}$ (V \times s) / (A \times m), $n = 154$ e $R = 0,02$ m.

O coeficiente angular da reta obtida no gráfico é igual a $\frac{U}{I^2}$. O valor obtido por um ajuste linear foi $37,11 \pm 0,6$ V/ A^2 . Substituindo o valor encontrado na Eq. (13), obtém-se o valor da razão $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$

$$\frac{e}{m_0} = 1,727 \times 10^{11} \frac{C}{kg},$$

a discrepância percentual em relação ao valor teórico, $1,759 \times 10^{11}$ C/kg, é 1,8%.

Agradecimentos

Agradecemos as sugestões relevantes do professor Marcos Gaspar. Agradecemos ao professor Sergio Tobias, que, além das sugestões, e por ter acompanhado a aplicação do trabalho em sala de aula.

Referências

- [1] LDB - Leis de Diretrizes e Bases da Educação Nacional. LEI No. 9394, de 20 de dezembro de 1996, D.O.U. de 23 de dezembro de 1996.
- [2] Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, MEC, 2002.
- [3] M.F. Magalhães, W.S. Santos e P.M.C. Dias, Revista Brasileira de Ensino de Física **24**, 326 (2002).
- [4] P M.C. Dias, W.M.S. Santos e M.T.M. de Souza, Revista Brasileira de Ensino de Física **26**, 257 (2004).
- [5] R.C.Ferreira, W.M.S.Santos e P.M.C.Dias, Física na Escola **9**(1), 37 (2008).
- [6] L.C.Mendes da Silva, W.M.S. Santos, P.M.C.Dias e M.B.Gaspar, in: *XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, CO-25, 2009.
- [7] S. Weinberg, *The Discovery of Subatomic Particles* (Penguin Books, London, 1993).