

Laboratório de Introdução à Física Experimental

Experiência de Thomson

Determinação experimental da relação q/m do electrão

2023

Objetivos

Pretende-se com este trabalho determinar a relação entre a carga e a massa (q/m) do electrão. Para esse fim, vamos estudar a deflexão de um feixe de raios catódicos sob o efeito de um campo eléctrico e de um campo magnético.

1 Conceitos fundamentais

Os raios catódicos foram descobertos em 1879 por William Crookes (1832–1919), mas foi Sir J. J. Thomson¹ (1856–1940) que, em 1897, relatou as experiências por si realizadas e que permitiram determinar o valor daquela relação. Além disso, estas experiências provaram que os raios catódicos são constituídos por partículas de carga negativa, desde então designadas por eletrões. Neste trabalho iremos reproduzir aproximadamente a experiência de Thomson.

1.1 Campo eletrostático

Define-se como sendo o campo elétrico criado por uma distribuição de cargas que *não evolui no tempo*. Considere-se por exemplo o par de cargas q_1 e q_2 imersas no vácuo, à distância r_{12} , e situadas respetivamente em P_1 e P_2 , conforme ilustrado na Fig. ?? . A força elétrica que sofre q_1 no ponto P_1 devido a q_2 em P_2 à distância r_{12} é

$$\vec{F}_{P_1,q_1}(q_2, r_{12}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{r,P_1} = -\vec{F}_{P_2,q_2}(q_1, r_{12}) \quad (1)$$

em que ϵ_0 é designada por constante dielétrica ou permissividade elétrica do vácuo ($\epsilon_0 \simeq 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m e \vec{u}_{r,P_1} é o *versor* da distância r_{12} no ponto P_1 (vetor unitário dirigido de P_2 para P_1 , ver figura).

Dada uma carga q_1 e um ponto P a uma distância r , define-se o *campo elétrico* \vec{E} em P como a força elétrica por unidade de carga exercida sobre uma carga de prova ou teste, suposta unitária e positiva, colocada em P :

$$\vec{E}_P(q_1, r) = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_{r,P} \quad (2)$$

As unidades do campo elétrico são o newton/coulomb (N/C) ou, mais habitualmente, o volt/metro (V/m).

As linhas de força elétrica geradas por q_1 são radiais e dirigidas para o exterior, se $q_1 > 0$, ou para a origem, se $q_1 < 0$. Se se colocasse em P a carga q , a força elétrica a que esta carga ficaria submetida devido a q_1 seria $\vec{F}_{P,q}(q_1, r) = q\vec{E}$, ou mais simplesmente:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3)$$

A expressão "campo elétrico" também define a região do espaço onde se fazem sentir as acções elétricas.

¹ Prémio Nobel da Física de 1906, em reconhecimento dos seus trabalhos teóricos e experimentais na condução da eletricidade em gases.

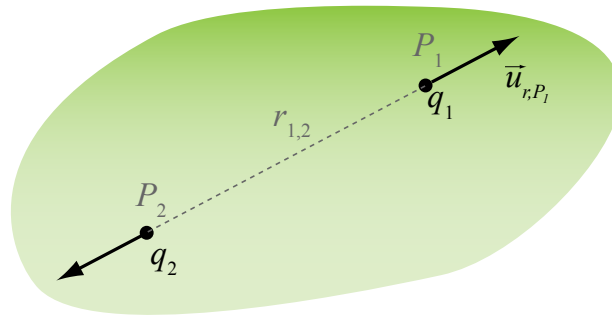


Fig. 1: Definição dos termos para a geometria de duas cargas.

1.2 Potencial elétrico

O campo elétrico e a força elétrica, que são entidades vetoriais, podem também ser calculadas a partir de uma função capaz de descrever o campo mas de natureza escalar, o *potencial elétrico* V . Para a situação referida acima, o potencial elétrico criado no ponto P à distância r da carga q_1 é calculado por:

$$V_P(q_1, r) = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (4)$$

No caso de uma distribuição de n cargas elétricas q_i à distância r_i do ponto P onde se pretende calcular o campo elétrico e o potencial, tem-se:

$$\vec{E}_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_{r_i, P} \right)$$

$$V_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{r_i} \right)$$

Recorde-se que se se considera uma única carga q_1 positiva, as linhas de força elétricas são radiais e dirigidas para o exterior. Essas linhas de força são perpendiculares às *superfícies equipotenciais*, que são esféricas ($r = \text{c.te}$ na equação ??) e concêntricas com as cargas. Atendendo a (??) para dois raios r_1 e r_2 tal que $r_2 > r_1$ temos $V(r_2) < V(r_1)$, e portanto as linhas de força dirigem-se para os potenciais decrescentes.

Considere-se agora o caso de duas cargas $q_1 > 0$ e $q_2 < 0$. Enquanto estiverem muito afastadas uma da outra, produzem campos radiais, respetivamente divergindo e convergindo. Se forem colocadas suficientemente próximas, as linhas de força vão sofrer a influência de ambas as cargas. Nesse caso, apenas uma única linha de força é linear, dirigida de q_1 para q_2 . Todas as outras, que na vizinhança próxima de cada carga são radiais, acabam por infletir, dirigindo-se de q_1 para q_2 . A figura das linhas de força tem simetria de revolução em torno do eixo que contém q_1 e q_2 e é esquematicamente a indicada na Fig. ??. Se o valor absoluto das duas cargas for o mesmo a figura é simétrica em relação ao plano mediatriz das cargas q_1 e q_2 ².

² Para mais exemplos ver <https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields>

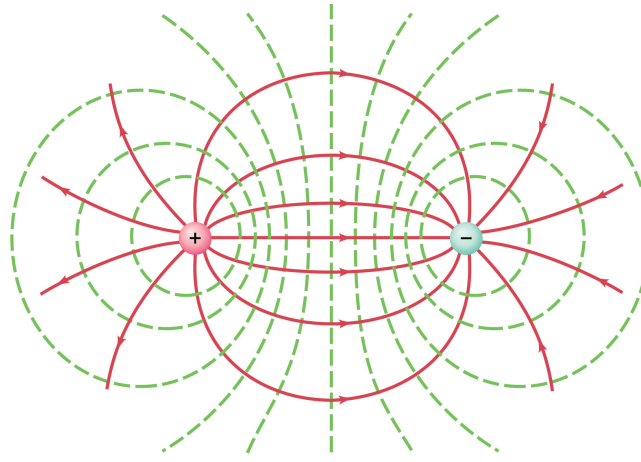


Fig. 2: Linhas de força (a vermelho) e superfícies equipotenciais (a verde) de duas cargas simétricas.

Se se calcular a diferença de potencial entre dois pontos infinitamente próximos P e $P + dP$ devida a uma carga q_1 à distância r e $r + dr$ respetivamente, a variação elementar do potencial V será:

$$\begin{aligned} dV &= V_{P+dP} - V_P = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r} \left(\frac{1}{r+dr} - \frac{1}{r} \right) \\ &\approx \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{dr}{r^2} \right) = -\vec{E} \cdot d\vec{r} \end{aligned} \quad (5)$$

Esta quantidade representa o trabalho elementar (energia) associado ao deslocamento da carga teste ($q_t = 1$ C), de P para $P + dP$. Para $q_1 > 0$, \vec{E} e $d\vec{r}$ são paralelos e $dV < 0$. Isto significa que não será necessário fornecer energia para realizar esse transporte. De facto, afastar a carga teste da carga q_1 (i.e. ir de P para $P + dP$) leva a uma configuração de cargas (q_1 e q_t) energeticamente mais favorável³.

No caso de uma diferença finita de potencial, isto é de uma diferença de potencial entre dois pontos P e Q , ter-se-á que somar um número infinito de contribuições infinitesimais $dV_i = -\vec{E}_i \cdot d\vec{r}_i$ no intervalo de P a Q :

$$\begin{aligned} V_Q - V_P &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n dV_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \underbrace{(-\vec{E}_i \cdot d\vec{r}_i)}_{PQ} \rightarrow \int -\vec{E} \cdot d\vec{r} \\ V_P - V_Q &= \int_{PQ} \vec{E} \cdot d\vec{r} \end{aligned} \quad (6)$$

e porque \vec{E} (campo eletrostático) é um campo conservativo, este integral não vai depender do percurso mas apenas dos pontos extremos, i.e.

$$V_P - V_Q = \int_P^Q \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

No caso particular de E ser homogéneo (por exemplo no interior de um condensador plano)

³ Recorde-se que para um campo conservativo o trabalho realizado (que não depende do percurso mas só dos pontos inicial e final) tem um valor simétrico da variação de energia potencial.

na região onde se situam os pontos P e Q , afastados de uma distância D , obtém-se

$$V_P - V_Q = \vec{E} \cdot \vec{PQ} = E \cdot D \quad (7)$$

Para se compreender o significado físico de V_P , imagine-se que Q é um ponto infinitamente afastado da região em que se faz sentir o campo elétrico \vec{E} . Nesse ponto, $r \rightarrow \infty$ e $V_Q = 0$, obtendo-se $V_P = \int_P^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r}$, que permite a seguinte interpretação:

O potencial elétrico V_P é a energia necessária para transportar a carga-teste, sob acção de \vec{E} , desde o ponto P até uma distância suficientemente grande tal que o campo elétrico não se faça sentir.

Assim, V tem sempre o significado de uma diferença de potencial.

1.2.1 Energia eletrostática

A energia associada a uma configuração de cargas q_1 e q_2 , à distância r , é dada por:

$$W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} = q_1 V_1 = q_2 V_2 = \frac{q_1 V_1 + q_2 V_2}{2} \quad (8)$$

em que V_1 é o potencial no ponto P_1 criado pela carga q_2 , e V_2 é o potencial no ponto P_2 criado pela carga q_1 .

Recordando a definição do potencial criado por n cargas elétricas, podemos generalizar a equação (??) na seguinte forma:

$$W_E = \frac{1}{2} \sum_{i,j(i \neq j)}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \left(\sum_{j \neq i}^n \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i \quad (9)$$

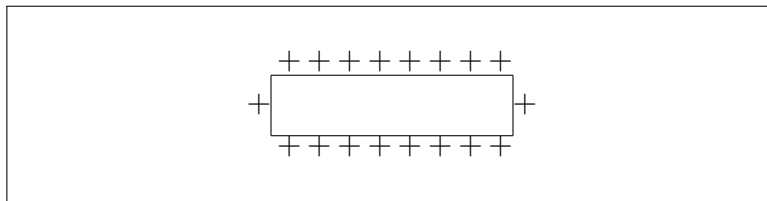
que corresponde à energia necessária para criar a distribuição de cargas q_i . A energia W_E é uma energia potencial porque está associada às posições que as diferentes cargas ocupam, podendo ser recuperada se as cargas se afastarem umas das outras até distâncias $r \rightarrow \infty$.

1.3 Condutores elétricos e dielétricos. Condensador plano

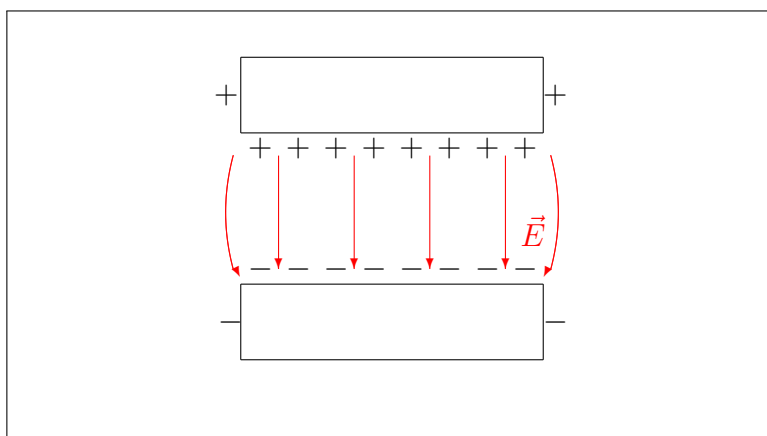
Um material é um *condutor elétrico ideal* se as cargas elétricas do mesmo sinal em excesso (que o carregam) são livres de se movimentarem no seu interior e à sua superfície. Quando pelo contrário isso não acontece, estamos perante um *dielétrico*.

Assim, se carregarmos um condutor com uma carga total Q (se $Q > 0$, significa que se retiram eletrões ao condutor inicialmente neutro) essas cargas, todas do mesmo sinal, vão acomodar-se logo que se atinja o equilíbrio eletrostático, em posições que são o mais afastadas possíveis umas das outras – ou seja, na superfície exterior do condutor, formando uma “folha” de carga. Pode mostrar-se que \vec{E} no interior do condutor é nulo (enquanto que num dielétrico $\vec{E} \neq \vec{0}$), e que a superfície do condutor é uma *equipotencial*: logo, as linhas de força elétricas são-lhe perpendiculares. Quando um material é carregado, a velocidade com que essas cargas se

transferem de todo o volume do condutor para a superfície depende da sua condutividade. Se se considerar um condutor carregado, com geometria plana (uma placa), a carga vai distribuir-se sobre a superfície (ver ilustração em baixo).



Ao colocar-se em frente uma placa idêntica, mas de carga simétrica, haverá uma redistribuição de carga que produz um campo elétrico tal como ilustrado em baixo. Na região central, as linhas de força são paralelas entre si e o campo elétrico é homogêneo. Nas extremidades as linhas de força emergem perpendicularmente à superfície mas encurvam, deixando de ser lineares. Esta geometria e distribuição de carga são características de um *condensador plano*. A diferença de potencial entre as duas placas, afastadas de D , corresponde a $(V_+ - V_-) = E \cdot D$, pois \vec{E} é homogêneo (eq. ??).



Pode mostrar-se que \vec{E} fica confinado à região entre as placas. Se o condensador fosse infinito (sem extremidades) teríamos três regiões, as duas exteriores ao condensador, onde o campo \vec{E} é nulo, e entre as placas do condensador (também designadas por armaduras), onde o campo seria homogêneo.

1.4 Efeitos da corrente elétrica estacionária criada por uma espira

A passagem da *corrente elétrica estacionária* (i.e. cuja intensidade não varia no tempo) por um condutor cria um campo magnético \vec{B} , além de produzir calor por efeito de Joule. As *linhas de força magnética* produzidas por um fio condutor linear são circulares e concêntricas com o condutor (Fig. ??). O módulo de B num ponto a uma distância r do fio (medida na perpendicular ao fio) é

$$|B_{\text{fio}}| = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad (10)$$

em que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ é a *permeabilidade magnética* do vazio.

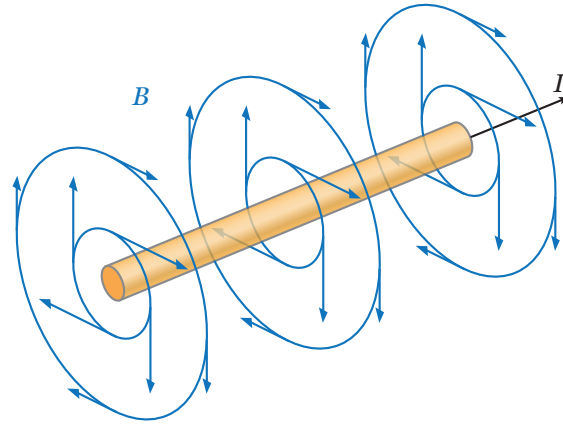


Fig. 3: Campo magnético produzido por um fio onde passa corrente.

No caso de uma espira⁴ circular, é criado um campo magnético cujas linhas de força são curvas fora do seu eixo e lineares apenas ao longo do eixo (Fig. ??). Pode provar-se que o campo magnético criado por uma espira de raio r , percorrida por uma corrente de intensidade I , tem linhas de força fechadas⁵, ao contrário das linhas de força elétricas. Isto coloca em evidência que \vec{B} nos pontos do plano da espira, mas exteriores a esta, é antiparalelo a \vec{B} no eixo da espira (ver figura). O módulo de \vec{B} num ponto do eixo é dado por

$$|\vec{B}_{\text{espira}}| = \frac{\mu_0 I}{2r} \sin^3 \alpha \quad (11)$$

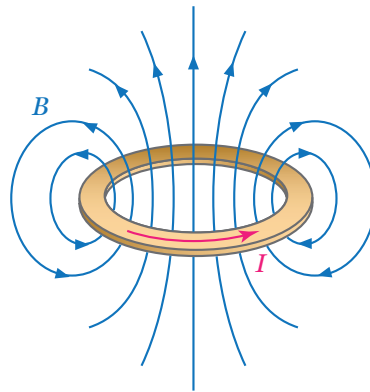


Fig. 4: Campo magnético produzido por uma espira circular onde passa corrente.

1.5 Força de Lorentz

Uma carga q animada de uma velocidade \vec{v} numa região em que existe um campo de indução \vec{B} e um campo elétrico \vec{E} fica submetida a uma força de Lorentz⁶ \vec{F} dada por:

$$\vec{F} = q \vec{E} + q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (12)$$

⁴ Termo que designa um circuito elétrico fechado

⁵ Mesmo aquelas que só *fecham* no infinito

⁶ Se a força for apenas de origem magnética, $\vec{F}_m = q (\vec{v} \times \vec{B})$, pode chamar-se também de *Laplace*

A força de Lorentz resulta da soma vetorial de uma componente elétrica e uma componente magnética, que verificam as seguintes propriedades:

- a força elétrica $\vec{F}_e = q\vec{E}$ tem a mesma direção que o campo elétrico; se a carga for positiva tem o mesmo sentido, se a carga for negativa tem o sentido oposto;
- a força magnética $\vec{F}_e = q(\vec{v} \times \vec{B})$ é perpendicular ao plano definido pelos vectores velocidade (\vec{v}) e campo magnético (\vec{B}), sendo o seu sentido dado pela regra da mão direita para o produto externo de vetores.

Quando a velocidade da carga e o campo magnético são mutuamente perpendiculares, a força magnética comporta-se como uma força centrípeta e a carga descreve uma trajetória circular (ver Fig. ??) cujo raio se pode calcular igualando os módulos das duas forças ($|\vec{F}_c| = |\vec{F}_m|$):

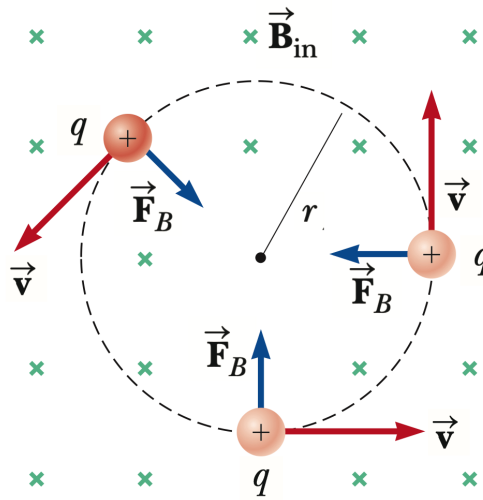


Fig. 5: Trajetória circular para uma carga positiva q com velocidade \vec{v} na presença de um campo magnético \vec{B}_{in} perpendicular.

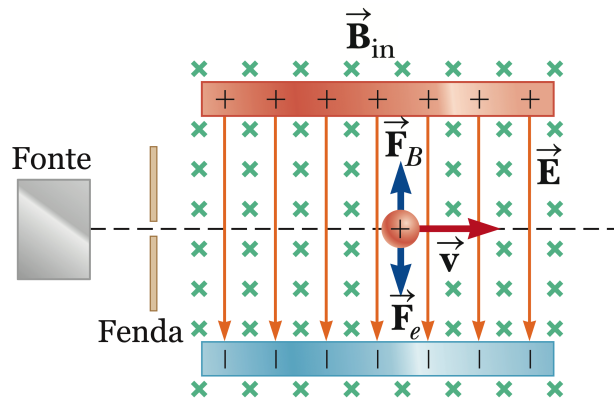


Fig. 6: Carga positiva q com velocidade \vec{v} , na presença de um campo magnético \vec{B}_{in} e um campo elétrico \vec{E} . Os três vetores são mutuamente perpendiculares e estão orientados de modo que as forças têm sentidos opostos.

$$m \frac{v^2}{R} = qvB \rightarrow R = \frac{mv}{|q|B} \quad (13)$$

Um caso particularmente interessante da força de Lorentz verifica-se quando a velocidade da carga é perpendicular tanto ao campo elétrico como ao magnético. Nesse caso, as duas forças têm a mesma direção. Adotando uma configuração como a representada na Fig. ??, as forças elétrica e magnética têm sentidos opostos e podem compensar-se, anulando-se, o que permite que a carga mantenha uma trajetória retilínea.

Nesta repetição da experiência de Thomson iremos utilizar estes dois princípios para determinar a razão q/m . Num primeiro conjunto de medidas, iremos determinar o raio da trajetória de um feixe de raios catódicos na presença de um campo magnético. No segundo conjunto de medidas iremos equilibrar as forças de um campo magnético e um elétrico de modo a que o feixe tenha uma forma aproximadamente retilínea.

2 Figuras dos aparelhos da montagem experimental

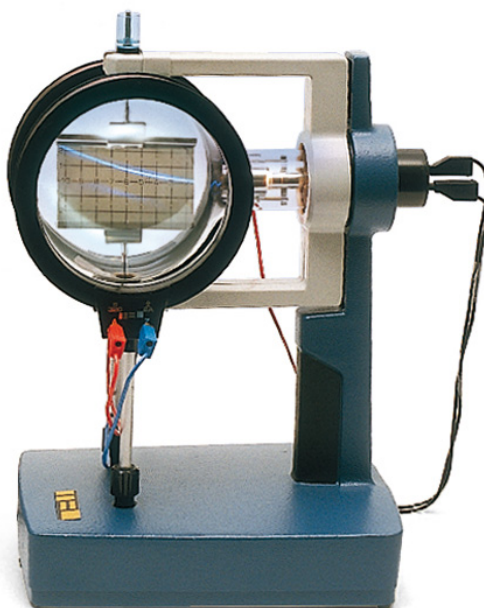


Fig. 7: Montagem da Experiência de Thomson com tubo de raios catódicos, suporte e par de bobinas de Helmholtz.

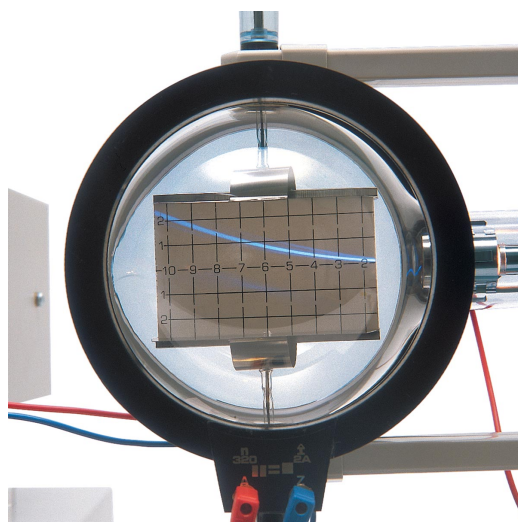


Fig. 8: Trajetória dos elétrons sujeitos a um campo magnético perpendicular.

3 Procedimento Experimental

3.1 Material

1. Ampola (tubo) de raios catódicos (TRC), modelo TEL 525.
2. Fonte de alimentação do TRC, que inclui alimentação de alta tensão contínua (até 5000 V) aplicada aos elétrodos (cátodo e ânodo) do TRC e alimentação de baixa tensão (6.3 V AC) para o filamento do TRC.
3. Par de bobinas que envolvem a parte esférica do TRC na configuração de Helmholtz (para criar um campo magnético aproximadamente homogêneo na região central entre as bobinas, de raio médio r , e afastadas de r uma da outra).
4. Fonte de alimentação de corrente **contínua** (em modo DC) para as bobinas.
5. Multímetro (como amperímetro) a instalar em **série** no circuito das bobinas.

O tubo TRC tem um filamento alimentado por 6.3 V (em modo AC). Este filamento emite elétrons por efeito termiônico. Entre o ânodo e o cátodo do tubo estabelecem-se diferenças de potencial $(V_+ - V_-) = U_a$. Os elétrons são acelerados entre o cátodo e o ânodo e a sua velocidade à saída do ânodo é função de U_a .

Ao entrarem na parte esférica do tubo, os elétrons podem ser defletidos por *campos magnéticos* provocados por correntes que percorrem as bobinas de Helmholtz e/ou por *campos elétricos* devidos à aplicação de tensão entre duas placas paralelas ligadas aos pontos 1 e 2 do diagrama (Fig. ??).

O campo de indução magnética B devido às bobinas de Helmholtz é aproximadamente uniforme na região central entre as bobinas, e para uma corrente I é dado por⁷:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{\mu_0 n I}{r} = \frac{32\pi n}{5\sqrt{5}} \cdot \frac{I}{r} \cdot 10^{-7} \text{ Weber/m}^2 \quad \begin{array}{l} n = 320 \text{ espiras} \\ r = 0.068 \text{ m} \\ r = d/2 \end{array} \quad (14)$$

⁷ No sistema SI, a unidade de campo magnético é o Tesla (T), sendo $1 \text{ T} = 1 \text{ Weber/m}^2$.

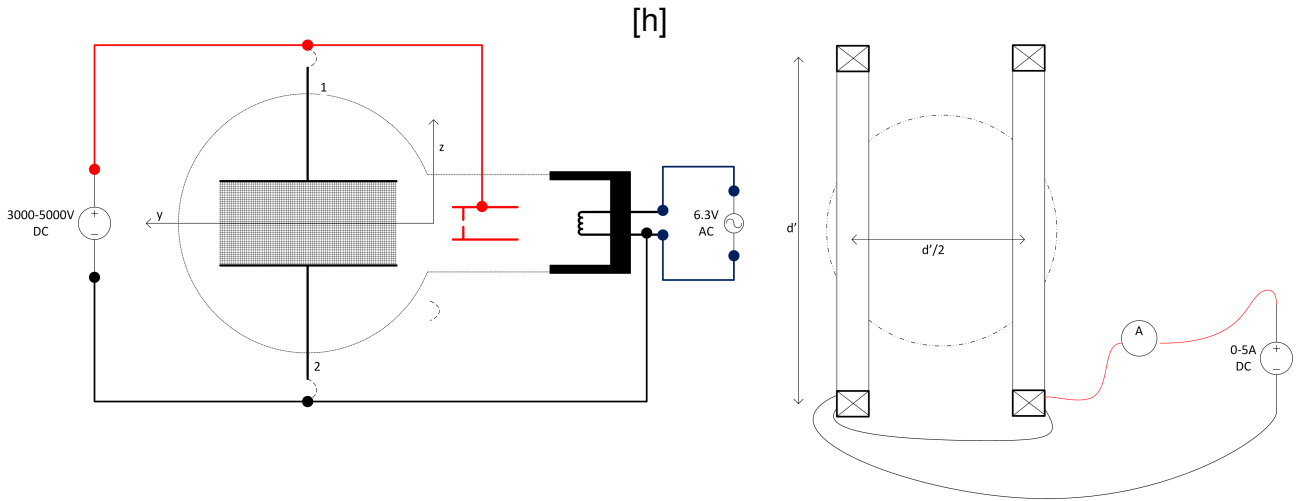


Fig. 9: Diagrama do tubo utilizado e geometria das bobinas de Helmholtz. Esquerda: vista lateral, com ligações elétricas do filamento e da tensão de aceleração. Direita: vista frontal, com ligações das bobinas de Helmholtz.

3.2 Determinação de q/m por deflexão magnética

3.2.1 Trajetórias de partículas carregadas sujeitas a um campo magnético constante

Quando se aplica uma tensão U_a entre o ânodo e o cátodo (sem aplicar tensão entre os pontos 1 e 2 representados na Fig. ??), pode admitir-se que a velocidade final v dos eletrões ao abandonarem o ânodo é dada pela seguinte expressão

$$q U_a = \frac{1}{2} m v^2 \quad (15)$$

em que q é a carga do eletrão e m a sua massa.

Os eletrões entram, com velocidade horizontal, na parte esférica do tubo, onde são defletidos pelo campo magnético \vec{B} (com $\vec{B} \perp \vec{v}$). A sua trajetória passa então a ser circular, com raio R , verificando-se:

$$B q v = \frac{m v^2}{R} \quad (16)$$

As trajetórias dos eletrões podem ser visualizadas numa escala graduada feita de material fluorescente. A origem do reticulado está situada aproximadamente no início da zona sujeita ao campo \vec{B} . Combinando (??) e (??) obtém-se uma expressão para a relação q/m :

$$\frac{q}{m} = \frac{2 U_a}{B^2 R^2} \quad (17)$$

em que:

U_a – impõe-se e mede-se diretamente no voltímetro da fonte de tensão.

B – calcula-se, para uma dada corrente I , a partir da expressão (??).

R – determina-se por leitura no écran fluorescente, das coordenadas de posição y (horizontal)

e z (vertical) de pontos do feixe. Por construção do tubo verifica-se:

$$R = \frac{y^2 + z^2}{2z} \quad (18)$$

3.2.2 Modo de proceder

1. Montar os circuitos elétricos de acordo com a Fig. ???. Note que as ligações das bobinas devem garantir que a corrente elétrica é percorrida no mesmo sentido, em ambas: para isso, deve usar os conetores na ordem $A \rightarrow Z$ numa bobina e na ordem inversa na outra bobina. Chamar o docente para verificação, **antes de ligar os aparelhos**.
2. Verifique qual é o valor máximo da tensão disponível na fonte de alta tensão. Escolha um valor ligeiramente inferior.
3. Ajustar a corrente das bobinas de Helmholtz I_+ de modo a que a circunferência passe por um ponto bem determinado⁸. Calcule R . Inverta o sentido da corrente e determine um novo I_- para o mesmo raio R . Tomando $I_{\text{medio}} = (I_+ + I_-)/2$ calcule o campo magnético B_{medio} . Utilize a semi-diferença, $(I_+ - I_-)/2$, para a estimativa das incertezas δI_{medio} e δB_{medio} .
4. Repita o ponto 2) para quatro novos valores de R .
5. Repetir 1), 2) e 3) e para os mesmos R , para dois valores inferiores de tensão, afastados por exemplo de 500 V entre si.
6. Apresente os valores de q/m para os 15 pares de determinações. Calcule a média desses valores, assim como a incerteza da média.
7. Para um dos pares de pontos, estime a contribuição relativa das incertezas das grandezas que mediu para a incerteza total. Compare este erro assim calculado com a incerteza calculada a partir dos 15 valores calculados. Apresente para cada raio o valor de q/m assim como o erro associado a cada uma das determinações. Compare e comente os resultados.
8. Apresente um valor final para q/m . Estime a precisão e a exatidão obtida nas determinações que realizou.

3.3 Determinação de q/m por deflexão magnética e elétrica quase compensada

3.3.1 Situação de equilíbrio entre as interações elétrica e magnética

Se, na força de Lorentz, os dois termos se equilibrarem – ou seja, se as forças eletrostática e magnética forem de igual módulo e de sentidos opostos – a carga q não é desviada da sua

⁸ Utilize de preferência os maiores valores possíveis para o raio R , de forma a que o feixe se encontre na zona central entre as bobinas.

trajetória. No nosso caso, em que $\vec{B} \perp \vec{v}$, a condição de equilíbrio é dada por:

$$|\vec{E}| = v |\vec{B}| \quad (19)$$

3.3.2 Montagem a efetuar

Aproveitando a montagem já efetuada no ponto anterior, ligue agora os terminais 1 e 2 (Fig. ??) à fonte de alta tensão que gera a tensão U_a , produzindo assim na região do écran fluorescente um campo elétrico. Fazendo com que as bobinas sejam percorridas por uma corrente com intensidade e “sentido” convenientes, podemos obter uma força de origem magnética anti-paralela à provocada pelo campo \vec{E} . Deste modo, a trajetória visualizada no écran será aproximadamente retilínea, sendo a condição de equilíbrio dada por:

$$|\vec{E}| = v |\vec{B}| = \frac{U_a}{d} \quad (20)$$

onde d é a distância entre as placas do écran fluorescente e U_a a tensão entre as mesmas, que é como se disse igual à tensão de aceleração.

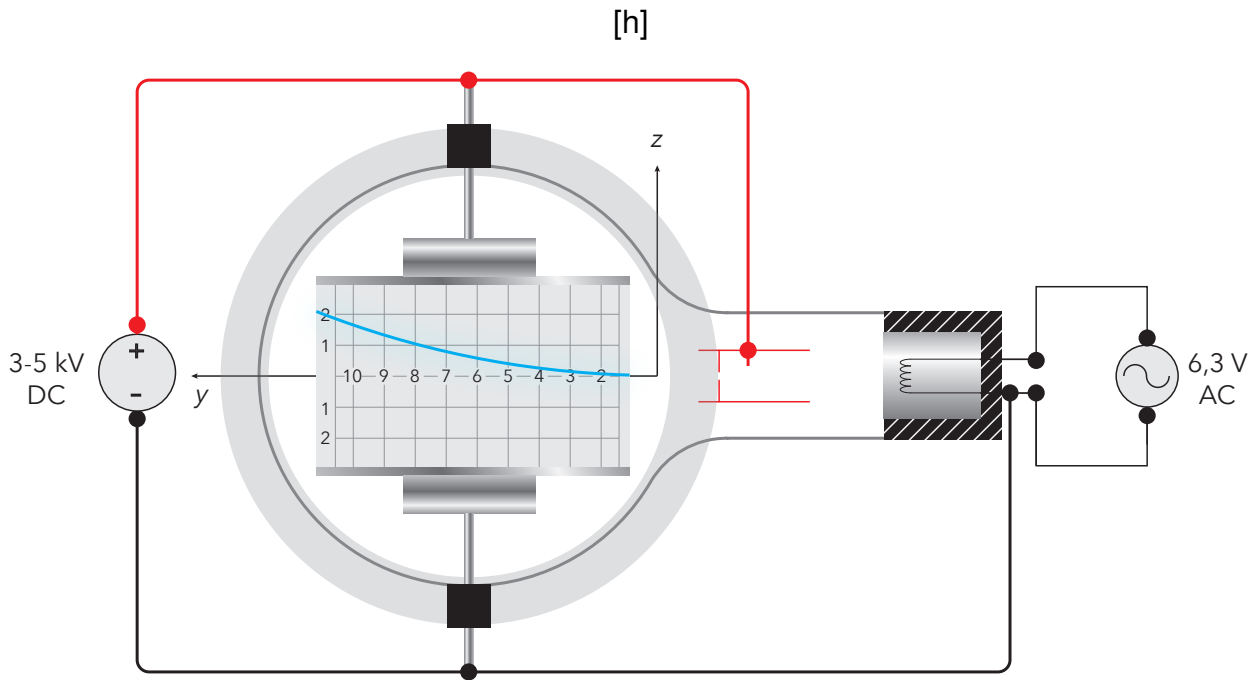


Fig. 10: Deflexão magnética e elétrica quase compensada: ligações elétricas do filamento, da tensão de aceleração e das placas.

A equação (??) permite-nos calcular a velocidade dos elétrons, uma vez que podemos conhecer os valores de todas as outras variáveis aí intervenientes. O conhecimento de v permite-nos calcular q/m tendo em conta que, segundo (??), deverá ser:

$$\frac{q}{m} = \frac{v^2}{2} \frac{1}{U_a}$$

Ou finalmente, por combinação com (??):

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{2} \frac{U_a}{B^2 d^2} \quad (21)$$

3.3.3 Modo de proceder

1. Para cada uma das quatro tensões de trabalho U_a já referidas, aplicadas agora também às placas que produzem o campo elétrico, determine o valor de B (a partir de I) que conduz ao anulamento das forças de origem elétrica e magnética.
2. Inverta o sentido dos campos elétricos e magnéticos e repita a determinação do valor de B .
3. Apresente os valores de q/m . Analise as diferentes contribuições para a incerteza total. Estime o valor da relação carga/massa do eletrão, assim como a precisão e a exatidão obtida nas determinações que realizou.
4. Observe a trajetória quando as forças de origem elétrica e magnética não se compensam. Comente.