Tubo de feixe de elétrons



# **Tubo de Thomson**

# ESTUDO DO DESVIO DE ELÉTRONS EM CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

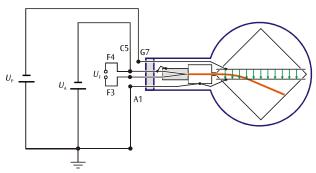
- Pesquisa do desvio de um feixe de elétrons num campo magnético.
- Pesquisa do desvio de um feixe de elétrons num campo elétrico.
- Montagem de um filtro de velocidade a partir de campos elétricos e magnéticos cruzados.
- Estimação da carga específica do elétron.

UE3070500

04/24 UK/UD

#### **FUNDAMENTOS GERAIS**

No tubo de Thomson, os elétrons passam por um diafragma de fenda em direção horizontal por trás do ânodo e encontram-se numa tela posicionada obliquamente ao percurso do feixe, sobre a qual o percurso do feixe torna-se visível. Atrás do diafragma em fenda encontra-se um condensador de placa, no campo elétrico vertical do mesmo os elétrons são desviados verticalmente. Adicionalmente, pode-se criar com bobinas de Helmholtz um campo magnético horizontal perpendicular à direção do feixe, no qual os elétrons são desviados também verticalmente:



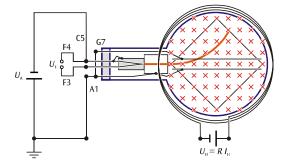


Fig. 1: Representação esquemática do tubo de Thomson. Desvio no campo elétrico (acima), abaixo, no campo magnético.

A força de Lorentz age sobre um elétron que se move com a velocidade  ${\it v}$  através de um campo magnético  ${\it B}$ 

$$\mathbf{F} = -\mathbf{e} \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \tag{1}$$

e: carga elementar

perpendicularmente à direção do movimento e do plano criado pelo campo magnético. O desvio ocorre em direção vertical quando tanto a direção do movimento como também o campo magnético se encontram no plano horizontal (veja fig. 1). Se direção do movimento é perpendicular ao campo magnético homogêneo, então os elétrons são forçados a seguir uns percurso circular cuja força centrípeta é dada pela força de Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{B} \tag{2}$$

m: massa do elétron; r: raio do percurso circular.

A velocidade dos elétrons depende da tensão anódica  $U_A$ . É válido:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_{A}} \tag{3}$$

Assim pode-se determinar a carga específica do elétron a partir do rádio da órbita quando o campo magnético homogêneo B e a tensão anódica  $U_A$  são conhecidos. De (2) e (3) decorre a carga específica do elétron:

$$\frac{\mathbf{e}}{m} = \frac{2 \cdot U_{\mathsf{A}}}{(\mathbf{B} \cdot \mathbf{r})^2} \tag{4}$$

O rádio de curvatura r pode ser determinado a partir do ponto de saída do elétron desviado na tela. O campo magnético B da bobina de Helmholtz resulta da corrente de bobina  $I_{\rm H}$  (veja análise).

Se é produzida uma tensão  $U_P$  no condensador de placa, então os elétrons são também desviados verticalmente no seu campo elétrico vertical E com a força

$$\mathbf{F} = -\mathbf{e} \cdot \mathbf{E}$$
 (5)

e: carga elementar

(veja fig. 1 acima). O campo elétrico, portanto, pode ser escolhido para que apenas compense o desvio no campo magnético:

$$\mathbf{e} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{e} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{0} \tag{6}$$

Neste caso é fácil determinar a velocidade dos elétrons. É válido:

$$V = \left| \frac{E}{B} \right| \tag{7}$$

Uma ordenação de campos elétricos e magnéticos cruzados na qual o desvio dos elétrons é reduzido a zero por compensação é chamada de filtro de velocidade.

A dependência da velocidade v da tensão de aceleração  $U_A$  resulta da comparação entre a energia potencial e a energia cinética. É

$$\mathbf{e} \cdot U_{\mathbf{A}} = \frac{m}{2} v^2 \text{ ou também } v^2 = 2 \cdot \frac{\mathbf{e}}{m} \cdot U_{\mathbf{A}}$$
 (8)

## LISTA DE APARELHOS

1	Tubo de Thomson S	1000617 (U18555)

Fonte de alimentação de alta tensão 5 kV (@230 V) 1 1003310 (U33010-230)

Fonte de alimentação de alta tensão 5 kV (@115 V) 1 1003309 (U33010-115)

Fonte de alimentação DC 0 - 500 V (@230 V) 1

1003308 (U33000-230)

ou

ΩU

Fonte de alimentação DC 0 - 500 V (@115 V) 1

1003307 (U33000-115)

1 Multímetro digital P1035 1002781 (U11806)

Conjunto de 15 cabos de segurança para experiências, 75 cm 1002843 (U138021)

## INDICAÇÕES DE SEGURANÇA

Tubos catódicos incandescentes são ampolas de vidro de paredes finas evacuadas. Manusear com cuidado, há perigo de implosão!

Não submeter o tubo de Thomson a qualquer esforço mecânico.

No tubo de Thomson é produzida uma tensão que pode ser perigosa ao contato:

- Utilizar sempre cabos de segurança para experiências.
- Só efetue conexões com o aparelho de alimentação elétrica desligado.
- Só desmontar ou montar os tubos de Thomson com o aparelho de alimentação elétrica desligado.

#### **MONTAGEM**

#### Montagem do par de bobinas de Helmholtz e do tubo de Thomson no suporte para tubo:

- Colocar ambas bobinas de Helmholtz no meio do encaixe para bobinas com as conexões viradas para fora empurrar totalmente para fora.
- Inserir o tubo de Thomson no suporte para tubos. Ao fazê-lo, prestar atenção para que os pinos de contato estejam completamente encaixados nos orifícios de contato da tomada previstos para tal. O pino do meio deve sobressair levemente do suporte.
- Empurrar ambas bobinas de Helmholtz para dentro até a marca. A distância do meio entre ambas bobinas de Helmholtz é então de 68 mm.

#### Conexão da tensão de aquecimento e da tensão de aceleração:

- Deixar o aparelho de alta tensão desligado e levar o botão de ajuste da tensão até ele travar à esquerda.
- Ligar os conectores F3 e F4 do suporte para tubos com a saída de tensão de aquecimento (conector azul) do aparelho de alta tensão por meio de cabos de segurança para experiências (veja também a fig. 1).
- Ligar o conector C5 do suporte para tubos com pólo negativo (conector preto) do aparelho de alta tensão por meio de cabos de segurança para experiências (os conectores C5 e F4 estão conectados entre si por dentro do tubo).
- Ligar o conector A1 do suporte para tubos com pólo positivo (conector vermelho) do aparelho de alta tensão com o conector terra verde-amarelo.

#### Conexão das bobinas de Helmholtz:

- Deixar desligada a fonte de alimentação DC e virar todos os reguladores de tensão totalmente para da esquerda até o inicio.
- Conectar o conector A da primeira bobina com o pólo negativo, e o conector Z com o pólo positivo da saída de 12 V.
- Conectar a segunda bobina em paralelo com a primeira, para tal, conectar as tomadas que se encontram frente a frente.
- Ligar o amperímetro em fila às duas bobinas de Helmholtz.

#### Conexão da tensão de desvio:

- Conectar o conector Z do suporte de tubo com o pólo negativo da saída de 500 V.
- Conectar o pólo positivo do aparelho DC com o conector verdeamarelo de terra do aparelho de alta tensão.

Observação: Caso os desvios nos campos elétrico ou magnético ocorram em direções contrárias, então deve-se inverter as conexões em cada aparelho de alimentação DC.



Fig. 2: Montagem experimental para a pesquisa do desvio em campos elétricos e magnéticos.

# **EXECUÇÃO**

- Ligar o aparelho de alimentação de alta-tensão. O filamento fica imediatamente vermelho incandescente.
- Ajustar a tensão de aceleração em  $U_A$  = 2,0 kV e observar o percurso "horizontal" do feixe de elétrons na tela luminescente.
- Ligar o aparelho de alimentação em rede DC 0–500 V.
- Elevar lentamente a corrente que atravessa o par de bobinas de Helmholtz em 2 I<sub>H</sub>, até que o feixe de elétrons na beira da tela luminescente passe pelo meio da escala (veja fig. 3).
- Selecionar uma tensão U<sub>P</sub> na placa de desvio de modo que o desvio do feixe seja compensado a zero.
- Anotar a força de corrente 2  $I_H$  e caso necessário a tensão  $U_P$ .
- Baixar a tensão U<sub>P</sub> novamente a zero U<sub>P</sub>.
- Repetir a medição para U<sub>A</sub> = 3,0 e 4,0 kV.

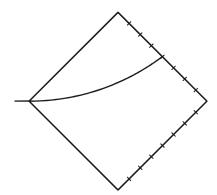


Fig. 3: Desvio do feixe de elétrons pelo meio da escala à beira da tela luminescente

- Ajustar tensão anódica U<sub>A</sub> = 3 kV.
- Selecionar 2  $I_H$  = 0,2 e ajustar a tensão de placa  $U_P$ , de modo que o desvio do feixe de elétrons seja compensado a zero.
- Anotar a força de corrente 2 I<sub>H</sub> e a tensão U<sub>P</sub>.
- Repetir a operação para 2 I<sub>H</sub> = 0,4 A, 0,6 A e 0,8 A.

# EXEMPLOS DE MEDIÇÃO

Tab. 1: (Mais necessário para o desvio magnético pelo meio da escala na aresta) corrente do par de bobinas de Helmholtz 2  $I_{\rm H}$  (compensar o desvio a zero) e placa de tensão  $U_{\rm P}$  em função da tensão anódica  $U_{\rm A}$ .

U <sub>A</sub> / kV	2 I <sub>H</sub> / A	U <sub>P</sub> / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: Corrente de bobina de Helmholtz 2  $I_H$  e tensão de placa compensadora  $U_P$  com tensão anódica fixa  $U_A$  = 3,0 kV

N°	2 I <sub>H</sub> / A	U <sub>P</sub> / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

## **ANÁLISE**

a) O campo magnético B num par de bobinas de Helmholtz é proporcional à corrente  $I_H$  através de uma única bobina. O fator de proporcionalidade k pode ser calculado a partir do raio da bobina R = 68 mm e do número de espiras N = 320 para cada bobina:

$$B = k \cdot I_{H} \text{ com } k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4.2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) O raio de curvatura *r* do feixe de elétrons desviado é determinado na fig. 4 a partir do ponto de saída B.

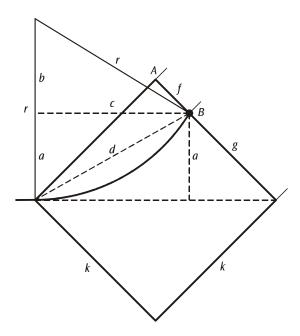


Fig. 4: Representação do cálculo do raio de curvatura *r* do percurso dos elétrons a partir da distância *f* entre o ponto de saída B e o ponto angular A

Segundo Pitágoras:

$$r^{2} = c^{2} + b^{2} = c^{2} + (r - a)^{2} = c^{2} + r^{2} - 2 \cdot r \cdot a + a^{2}$$

$$c^{2} + a^{2} = d^{2} = k^{2} + f^{2} \operatorname{com} k = 80 \operatorname{mm}$$

$$a^{2} = \frac{1}{2} \cdot g^{2} = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^{2}$$

Assim, 
$$r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

Se o ponto B se encontra no meio da escala, então f = 40 mm. Neste caso calcula-se:

$$r = 141 \text{ mm e } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0.1 \text{ m}^2.$$

A equação (4) pode ser assim transformada em:  $\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0.1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$ 

c) O campo elétrico no condensador de placa pode ser calculado a partir da tensão  $U_{\rm P}$  e da distância d=8 mm:

$$E = \frac{U_p}{d}$$

d) Para a estimativa da carga específica do elétron calcula-se o campo magnético B a partir dos valores dados na tab. 1para a corrente  $I_H$  e recebe os valores indicados na tab. 3.

A fig. 5 mostra uma representação gráfica da relação entre a tensão anódica  $U_A$  e o quadrado do campo magnético  $B^2$  para os valores da tab. 3.

A inclinação das retas originais desenhadas é de

$$\frac{U_A}{B^2} = 1.7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

A partir disto calcula-se

$$\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0.1 \text{m}^2 \cdot B^2} = 1.7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

(Valor teórico: 
$$\frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$
)

Tab. 3: A partir dos valores de medição  $I_{\rm H}$  calculados da tab.1, valores medidos B e  $B^2$  em função da tensão anódica  $U_{\rm A}$ .

U <sub>A</sub> / kV	B / mT	$B^2$ / mT <sup>2</sup>
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

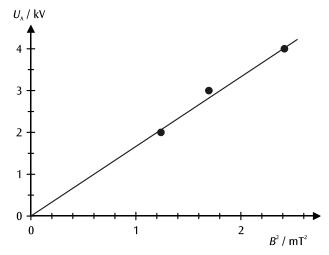


Fig. 5: Representação gráfica da relação entre  $U_A$  e  $B^2$  com rádio de curvatura constante  $r=141~\mathrm{mm}$ 

e) Para a confirmação da equação (7) calcula-se dos valores de medição da tab. 2 os pares de valores *B* e *E*, nos quais o desvio do feixe de elétrons é compensado a zero (veja tab. 4) e representa o resultado de um diagrama *E-B*. (veja fig. 6).

De acordo com a equação (7) os valores de medição se encontram sobre uma das retas originais, dentro da faixa de precisão. A sua inclinação corresponde à velocidade dos elétrons.

Obtém-se: 
$$V = 3.2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (com } U_A = 3.0 \text{ kV)}$$

Tab. 4: Campo magnético B e campo elétrico compensador E com a tensão anódica  $U_A$  = 3,0 kV

N°	B / mT	E / V/mm
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

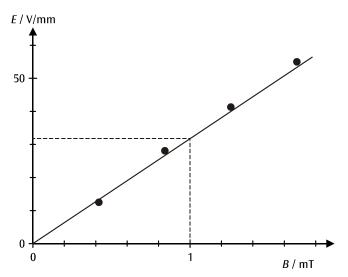


Fig. 6: Representação gráfica dos valores de medição da tab. 4

f) Com a ajuda dos valores de medição da tab. 1 pode ser determinada a velocidade  $\nu$  dos elétrons para deferentes tensões anódicas  $U_{\rm A}$ . Inserir o resultado na tab. 5.

Tab. 5: A partir dos valores de medição  $I_{\rm H}$  e  $U_{\rm P}$  da tab.1 os valores calculados B e E, assim como a velocidade v daí calculada e o seu quadrado em função da tensão anódica  $U_{\rm A}$ .

U <sub>A</sub> / kV	B / mT	E / V/mm	v / m/s	v <sup>2</sup> / (m/s) <sup>2</sup>
2,0	1,11	30,0	2,70·10 <sup>7</sup>	7,3·10 <sup>14</sup>
3,0	1,30	41,3	3,18·10 <sup>7</sup>	10,1·10 <sup>14</sup>
4,0	1,55	58,8	3,79·10 <sup>7</sup>	14,4·10 <sup>14</sup>

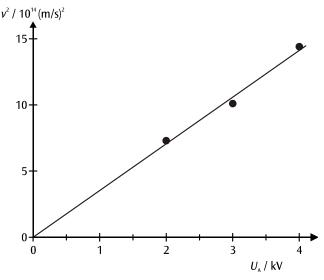


Fig. 7: Representação gráfica da relação entre  $v^2$  e  $U_A$ 

A fig. 7 mostra a relação entre o quadrado da velocidade e a tensão anódica. A partir da inclinação das retas originais inscritas pode-se, conforme a equação (8), calcular também a carga específica do elétron

Obtém-se: 
$$\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1.8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

(Valor teórico: 
$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$
)