

## 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.

UE307050

06/06 UK

### 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:

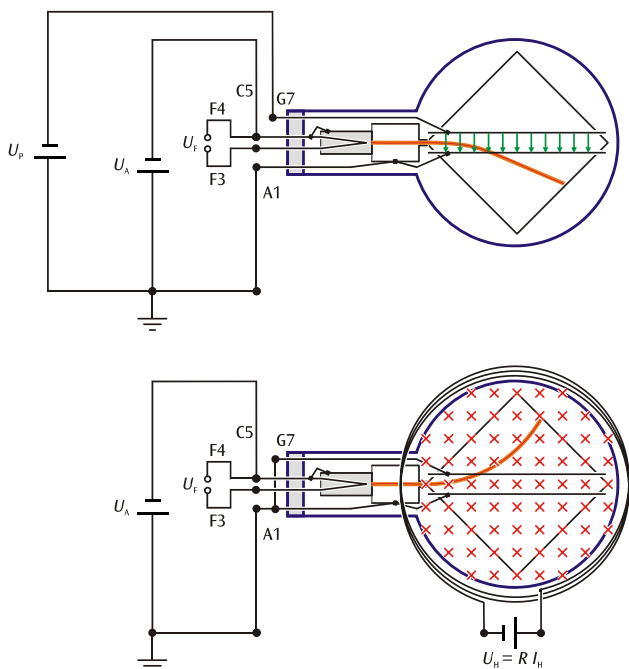


Fig. 1: representação esquemática do tubo de Thomson. Desvio no campo elétrico (acima), abaixo, no campo magnético.

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

$$\mathbf{F} = -e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

$e$ : 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 um percurso circular cuja força centrípeta é dada pela força de Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

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

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

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

Assim pode-se determinar a carga específica do elétron a partir do raio 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:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \quad (4)$$

O raio 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  $I_H$  (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

$$F = -e \cdot E \quad (5)$$

$e$ : carga elementar

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

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

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

$$v = \left| \frac{E}{B} \right| \quad (7)$$

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 válido

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ ou também } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

## LISTA DE APARELHOS

1	tubo de Thomson S	U18555
1	suporte para tubo S	U185001
1	par de bobinas de Helmholtz S	U185051
1	Aparelho de alta tensão, 6 kV	U33010
1	Aparelho de alimentação, 0-500 V	U33000
1	Amperímetro DC, 3 A, por ex.	U17450
1	conjunto de 15 cabos de segurança para experiências	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 início.
- 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 verde-amarelo 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  $2 I_H$ , até que o feixe de elétrons na beira da tela luminescente passe pelo meio da escala (veja fig. 3).
- Selecionar uma tensão  $U_p$  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  $U_p$  novamente a zero  $U_p$ .
- Repetir a medição para  $U_A = 3,0$  e  $4,0$  kV.

- Ajustar tensão anódica  $U_A = 3$  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  $2 I_H$  e a tensão  $U_p$ .
- Repetir a operação para  $2 I_H = 0,4$  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  $2 I_H$  (compensar o desvio a zero) e placa de tensão  $U_p$  em função da tensão anódica  $U_A$ .

$U_A$ / kV	$2 I_H$ / A	$U_p$ / 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°	$2 I_H$ / A	$U_p$ / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

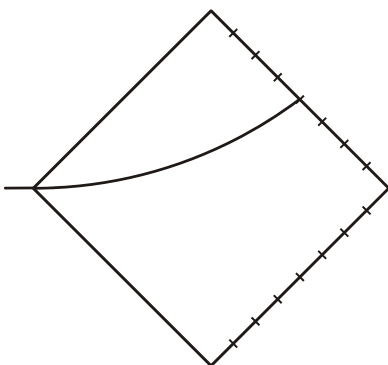


Fig. 3: desvio do feixe de elétrons pelo meio da escala à beira da tela luminescente

**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  $R = 68 \text{ mm}$  e do número de espiras  $N = 320$  para cada bobina:

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

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

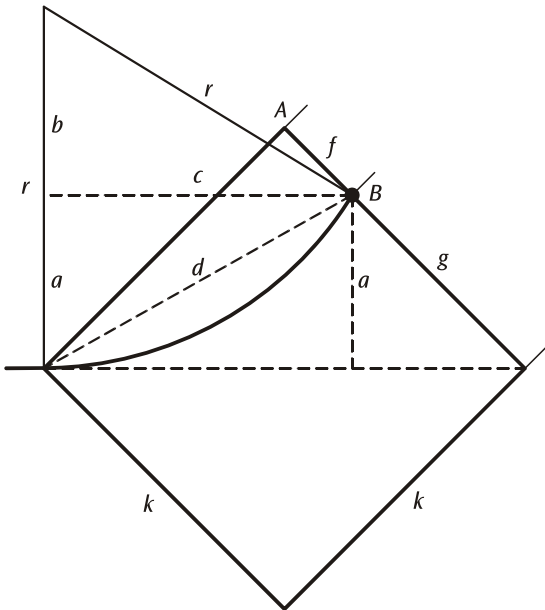


Fig. 4: representação do cálculo do raio de curvatura  $r$  do percurso dos elétrons a partir da distância  $f$  entre o ponto de saída B e o ponto angular A

Segundo Pitágoras:

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

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

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

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

Se o ponto B se encontra no meio da escala, então  $f = 40 \text{ mm}$ . 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  $U_p$  e da distância  $d = 8 \text{ mm}$ :

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

d) Para a estimativa da carga específica do elétron calcula-se o campo magnético  $B$  a partir dos valores dados na tab. 1 para 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  $I_H$  calculados da tab.1, valores medidos  $B$  e  $B^2$  em função da tensão anódica  $U_A$ .

$U_A / \text{kV}$	$B / \text{mT}$	$B^2 / \text{mT}^2$
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

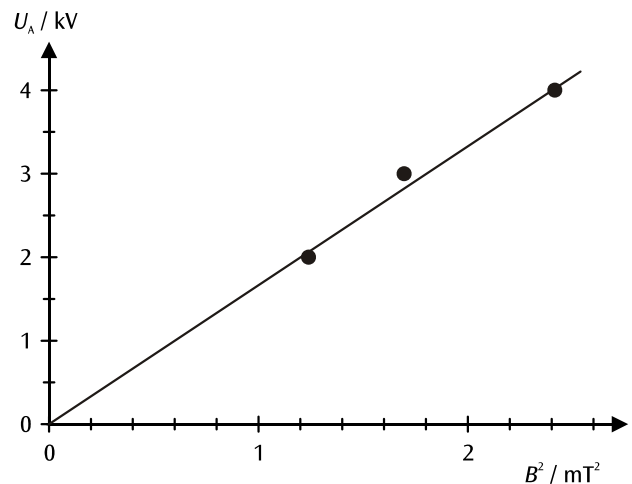


Fig. 5: representação gráfica da relação entre  $U_A$  e  $B^2$  com raio de curvatura constante  $r = 141 \text{ mm}$

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:  $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$  (com  $U_A = 3,0$  kV)

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

Nº	$B / \text{mT}$	$E / \text{V/mm}$
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

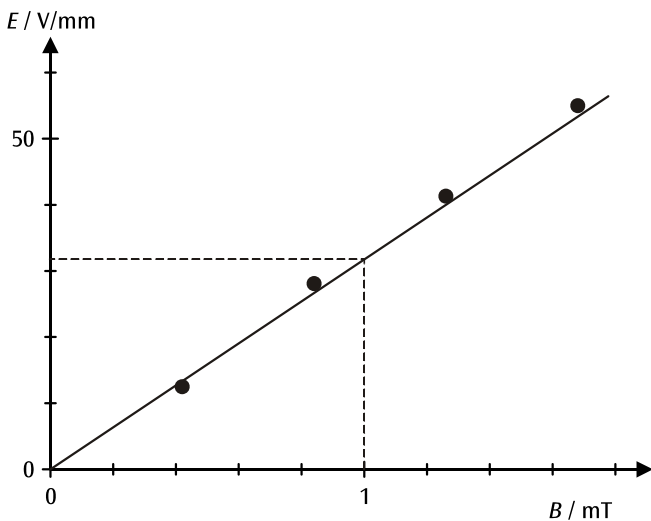


Fig. 6: representação gráfica dos valores de medição da tab. 4

f) Com a ajuda dos valores de medição da tab. 1 pode ser determinada a velocidade  $v$  dos elétrons para diferentes tensões anódicas  $U_A$ . Inserir o resultado na tab. 5.

Tab. 5: a partir dos valores de medição  $I_H$  e  $U_p$  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  $U_A$ .

$U_A / \text{kV}$	$B / \text{mT}$	$E / \text{V/mm}$	$v / \text{m/s}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2,0	1,11	30,0	$2,70 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3,18 \cdot 10^7$	$10,1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

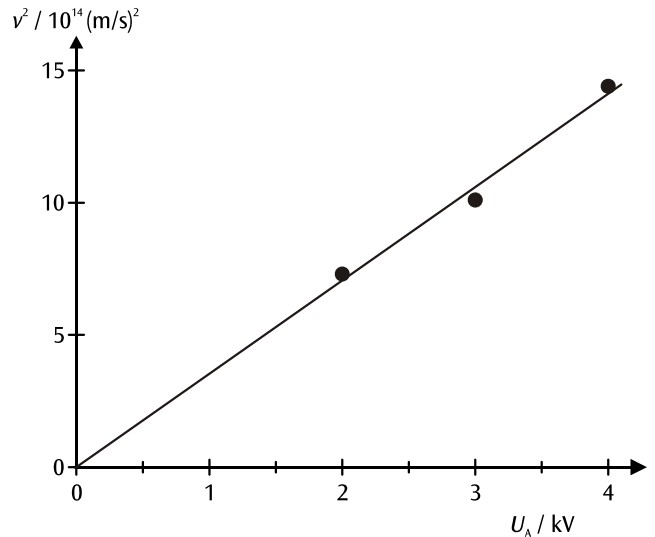


Fig. 7: representação gráfica da relação entre  $v^2$  e  $U_A$

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:  $\frac{e}{m} = \frac{U_A}{2 \cdot v^2} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$

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

