

Tubo di Thomson

ANALISI DELLA DEVIAZIONE DEGLI ELETTRONI NEL CAMPO ELETTRICO E MAGNETICO

- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo magnetico.
- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo elettrico.
- Struttura di un filtro di velocità da un campo elettrico e magnetico incrociato.
- Valutazione della carica specifica dell'elettrone.

UE3070500

04/24 UK/UD

BASI GENERALI

Nei tubi di Thomson, gli elettroni passano in direzione orizzontale attraverso un diaframma a fessura dietro l'anodo e colpiscono uno schermo fluorescente inclinato nel percorso dei raggi luminosi, sul quale risulta visibile l'andamento del fascio. Dietro al diaframma a fessura è montato un condensatore a piastre, nel cui campo elettrico verticale gli elettroni vengono deviati in direzione verticale. Inoltre, con le bobine di Helmholtz viene generato un campo magnetico ad andamento orizzontale in posizione verticale rispetto alla direzione del fascio, in cui gli elettroni vengono deviati anch'essi in direzione verticale:

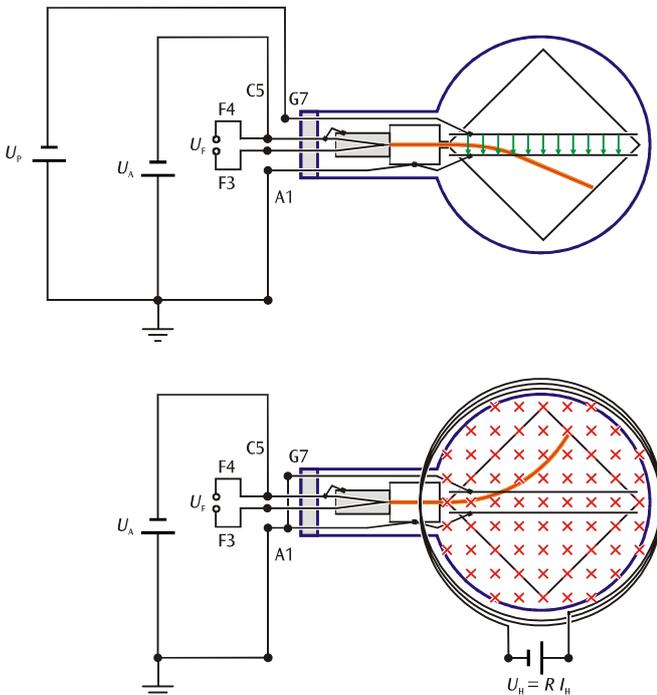


Fig. 1: rappresentazione schematica dei tubi di Thomson. Deviazione nel campo elettrico (in alto), (nel campo magnetico in basso)

Su un elettrone che si sposta nel campo magnetico B alla velocità v agisce la forza di Lorentz

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

e : carica fondamentale

verticalmente rispetto alla direzione del movimento e al piano creato dal campo magnetico. La deviazione avviene in direzione verticale, se sia la direzione del movimento che il campo magnetico si trovano nel piano orizzontale (vedere la Fig. 1 in basso). Se la direzione di movimento è verticale sul campo magnetico omogeneo, gli elettroni vengono forzati su una guida circolare, la cui forza centripeta è data dalla forza di Lorentz.

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

m : massa elettronica, r : raggio della guida circolare.

La velocità degli elettroni dipende dalla tensione degli anodi U_A . Vale:

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

In questo modo, dal raggio della guida circolare è possibile determinare la carica specifica dell'elettrone se il campo magnetico omogeneo B e la tensione anodica U_A sono noti. Sulla base di (2) e (3), per la carica specifica dell'elettrone ne consegue:

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

Il raggio di curvatura r può essere determinato mediante il punto di uscita del fascio elettronico deviato sullo schermo. Il campo magnetico B delle bobine di Helmholtz deriva dalla corrente di bobina I_H (vedere la valutazione).

Se sul condensatore a piastre è presente una tensione U_p , nel campo elettrico verticale E con la forza

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

e : carica fondamentale

gli elettroni vengono deviati anch'essi verticalmente (vedere la Fig. 1 in alto). Il campo elettrico può quindi essere scelto in modo che la deviazione nel campo magnetico si compensi già:

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

In questo caso, la velocità degli elettroni può essere facilmente determinata. Vale:

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

Una disposizione del campo elettrico e magnetico incrociato in cui la deviazione degli elettroni viene compensata rispetto allo zero viene pertanto definita come filtro di velocità.

La dipendenza della velocità v dalla tensione di accelerazione U_A deriva dal confronto tra energia potenziale e cinetica. Vale

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

ELENCO DEGLI STRUMENTI

1	Tubo di Thomson S	1000617 (U18555)
1	Portatubo S	1014525 (U185002)
1	Coppia di bobine di Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
o		
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Alimentatore CC 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
o		
1	Alimentatore CC 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multimetro digitale P1035	1002781 (U11806)
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843 (U138021)

NORME DI SICUREZZA

I tubi catodici incandescenti sono bulbi in vetro a pareti sottili, sotto vuoto. Maneggiare con cura: rischio di implosione!

- Non esporre i tubi di Thomson a sollecitazioni meccaniche.

Ai tubi di Thomson viene applicata una tensione che in determinate condizioni rende pericoloso il contatto.

- Per i collegamenti utilizzare esclusivamente cavi di sperimentazione di sicurezza.
- Eseguire i collegamenti soltanto con gli apparecchi di alimentazione disinseriti.
- Montare e smontare i tubi di Thomson soltanto con gli apparecchi di alimentazione disinseriti.

MONTAGGIO

Montaggio della coppia di bobine di Helmholtz e dei tubi di Thomson nel portatubi:

- Inserire le due bobine di Helmholtz al centro del relativo scomparto con i jack di collegamento rivolti verso l'esterno e traslarle completamente verso l'esterno.
- Inserire i tubi di Thomson nel portatubi, accertandosi che gli spinotti di contatto del tubo s'innestino completamente nelle apposite aperture di contatto del portatubi. Lo spinotto di guida centrale del tubo deve sporgere leggermente sulla parte posteriore del portatubi.
- Spingere le due bobine di Helmholtz verso l'interno fino al contrassegno. La distanza centrale delle due bobine di Helmholtz ammonta quindi a 68 mm.

Collegamento della tensione di riscaldamento e di accelerazione:

- Lasciando l'alimentatore ad alta tensione disinserito, ruotare il regolatore di tensione completamente verso la battuta sinistra.
- Collegare i jack F3 e F4 del portatubi con l'uscita tensione di riscaldamento (prese blu) dell'alimentatore ad alta tensione mediante cavi di sicurezza per esperimenti (vedere anche la Fig. 1).
- Collegare il jack C5 del portatubi al polo negativo (presa nera) dell'alimentatore ad alta tensione (le connessioni C5 e F4 sono unite fra loro all'interno del tubo) mediante un cavo di sicurezza per esperimenti.
- Collegare il jack A1 del portatubi al polo positivo (presa rossa) dell'uscita per l'alta tensione e il polo positivo alla presa di terra giallo-verde.

Collegamento delle bobine di Helmholtz:

- Lasciando l'alimentatore a corrente continua disinserito, ruotare tutti i regolatori di tensione completamente verso la battuta sinistra.
- Collegare il jack A della prima bobina con il polo negativo e il jack Z con il polo positivo dell'uscita da 12 V.
- Collegare la seconda bobina parallelamente alla prima e a questo scopo allacciare di volta in volta i jack opposti.
- Collegare l'amperometro in serie rispetto alle due bobine di Helmholtz.

Collegamento della tensione di deviazione:

- Collegare il jack G7 del portatubi con il polo negativo dell'uscita da 500 V.
- Collegare il polo positivo dell'alimentatore a corrente continua con la presa di terra giallo-verde del dispositivo di alta tensione.

Nota: se le deviazioni nel campo elettrico o magnetico avvengono in direzione opposta, scambiare i collegamenti sul rispettivo alimentatore a corrente continua.

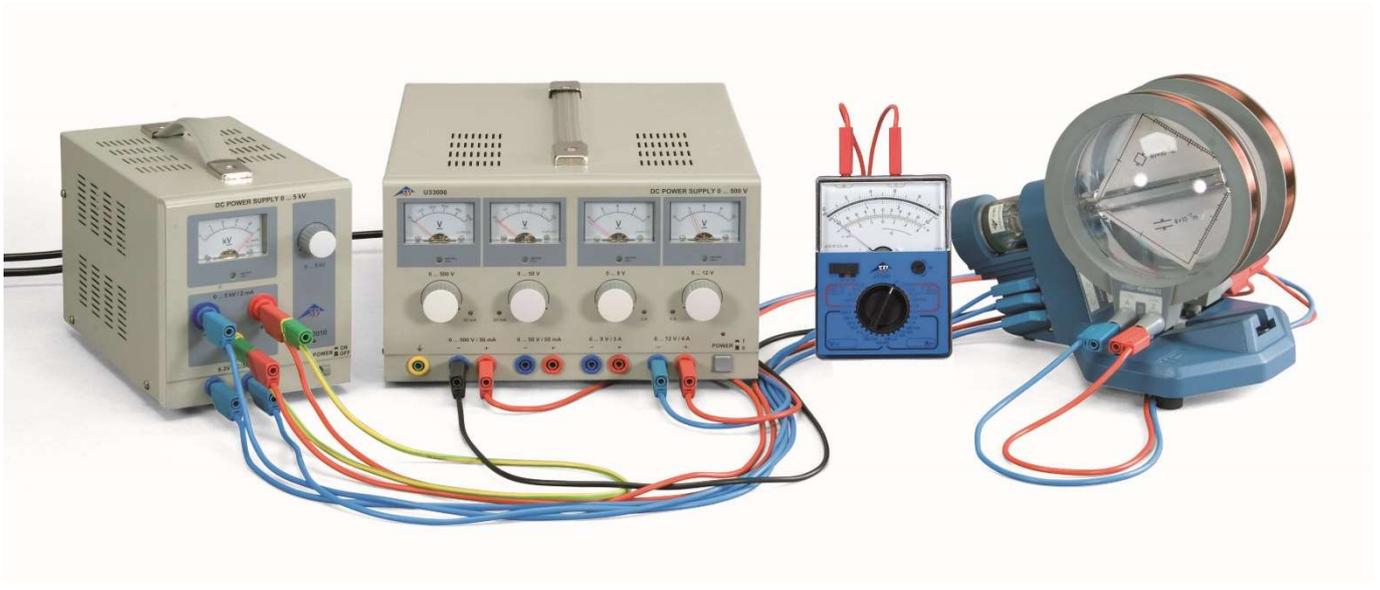


Fig. 2: struttura sperimentale per la verifica della deviazione nel campo elettrico e magnetico.

ESECUZIONE

- Inserire l'alimentatore ad alta tensione. Il filo di riscaldamento diventa immediatamente incandescente.
- Impostare la tensione di accelerazione $U_A = 2,0$ kV e osservare l'andamento "orizzontale" del fascio di elettroni sullo schermo fluorescente.
- Accendere l'alimentatore a corrente continua da 0-500 V.
- Aumentare lentamente la corrente $2 I_H$ con la coppia di bobine di Helmholtz, fino a quando il fascio di elettroni scorre sul margine dello schermo fluorescente attraverso il centro della scala (vedere la Fig. 3).
- Selezionare la tensione U_P sulle piastre di deviazione in modo che la deviazione del fascio di elettroni venga compensata rispetto allo zero.
- Annotarsi l'intensità di corrente $2 I_H$ ed eventualmente la tensione U_P .
- Azzerare la tensione U_P .
- Ripetere la misurazione per $U_A = 3,0$ e $4,0$ kV.

- Impostare la tensione anodica $U_A = 3$ kV.
- Selezionare $2 I_H = 0,2$ A e impostare la tensione delle piastre U_P in modo che la deviazione del fascio di elettroni venga compensata rispetto allo zero.
- Annotarsi l'intensità di corrente $2 I_H$ e la tensione U_P .
- Ripetere la procedura per $2 I_H = 0,4$ A, $0,6$ A e $0,8$ A.

ESEMPIO DI MISURAZIONE

Tab. 1: (necessario per la deviazione magnetica attraverso il centro della scala marginale) corrente attraverso la coppia di bobine di Helmholtz $2 I_H$ e la tensione delle piastre U_P (compensante la deviazione rispetto allo zero) a seconda della tensione anodica 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 delle bobine di Helmholtz $2 I_H$ e tensione delle piastre compensante U_P a tensione anodica fissa $U_A = 3,0$ 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

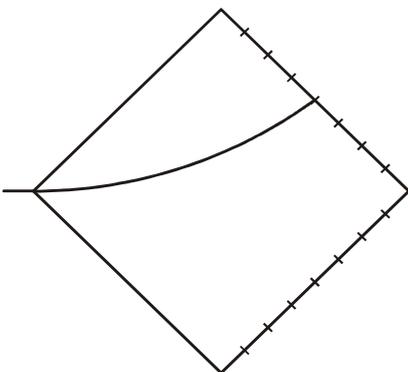


Fig. 3: deviazione del fascio di elettroni attraverso il centro della scala sul bordo dello schermo fluorescente

ANALISI

a) Il campo magnetico B in una coppia di bobine di Helmholtz ed è proporzionale alla corrente I_H attraverso una singola bobina. Il fattore di proporzionalità k può essere calcolato sulla base del raggio della bobina $R = 68 \text{ mm}$ e del numero di spire $N = 320$ per bobina:

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

b) Il raggio di curvatura r del fascio di elettroni può essere stabilito dal punto di uscita B nella Fig. 4.

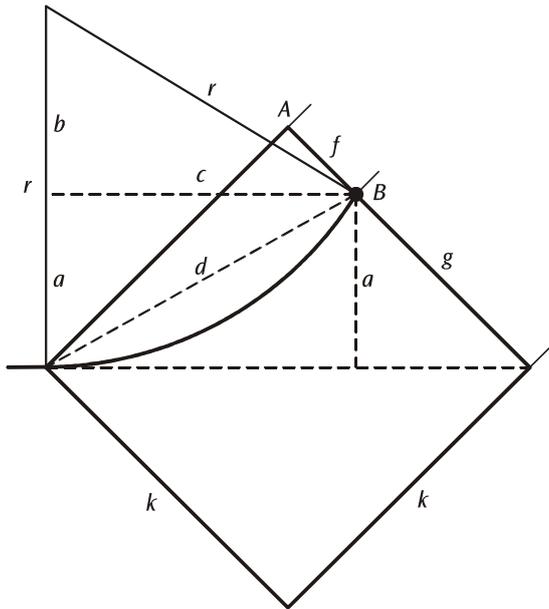


Fig. 4: rappresentazione per il calcolo del raggio di curvatura r dell'orbita degli elettroni dalla distanza f tra il punto di uscita B e il punto angolare A

Per Pitagora vale quanto segue:

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

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

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

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

Se il punto B si trova al centro della scala, si ha $f = 40 \text{ mm}$. Per questo caso si calcola:

$$r = 141 \text{ mm e } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1 \text{ m}^2.$$

L'equazione (4) può quindi essere convertita in:

$$\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$$

c) Il campo elettrico nel condensatore a piastre può essere calcolato sulla base della tensione U_p e della distanza delle piastre $d = 8 \text{ mm}$:

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

d) Per la valutazione della carica specifica dell'elettrone, il campo magnetico viene calcolato sulla base dei valori indicati nella Tab. 1 per la corrente I_H e acquisisce i valori indicati nella Tab. 3.

La Fig. 5 mostra una rappresentazione grafica dell'interazione tra tensione anodica U_A e il quadrato del campo magnetico B^2 per i valori della Tab. 3.

L'incremento delle rette di origine disegnate ammonta a

$$\frac{U_A}{B^2} = 1,7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

$$\text{da cui si calcola } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

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

Tab. 3: valori B e B^2 rilevati dai valori di misura I_H rilevati nella Tab. 1 a seconda della tensione anodica U_A .

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

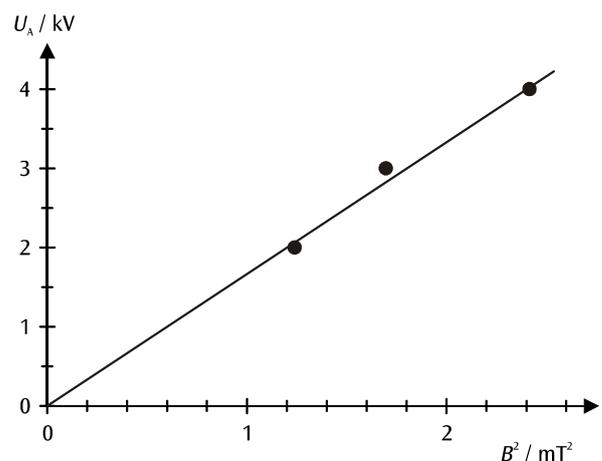


Fig. 5: rappresentazione grafica dell'interazione tra U_A e B^2 a raggio di curvatura costante $r = 141 \text{ mm}$

e) Per la conferma dell'equazione (7), dai valori di misurazione della Tab. 2 si calcola la coppia di valori B e E , in cui la deviazione del fascio di elettroni viene compensata rispetto allo zero (vedere la Tab. 4) e rappresenta il risultato in uno schema E - B (vedere la Fig. 6).

Conformemente all'equazione (7), i valori di misurazione rientrano nell'ambito della precisione di misurazione su una retta di origine. Il relativo incremento è la velocità degli elettroni.

Si ottiene: $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$ (in cui $U_A = 3,0 \text{ kV}$)

Tab. 4: campo magnetico B e campo elettrico compensante E a tensione anodica fissa $U_A = 3,0 \text{ kV}$

N.	B / 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

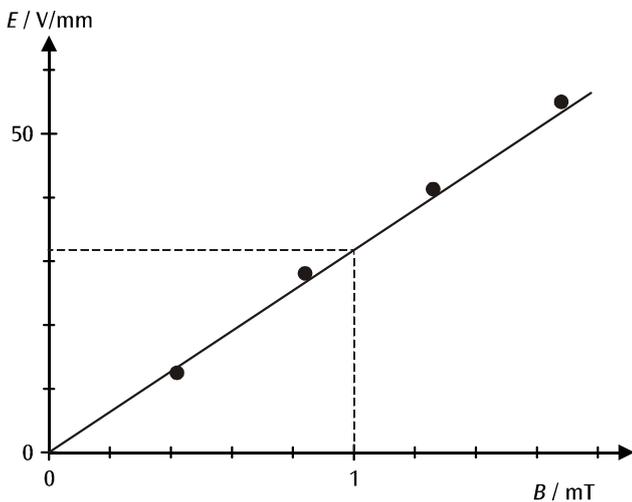


Fig. 6: rappresentazione grafica dei valori di misurazione dalla Tab. 4

f) Mediante i valori di misurazione della Tab. 1 è possibile determinare la velocità v degli elettroni per diverse tensioni anodiche U_A . Il risultato deve essere registrato nella Tab. 5.

Tab. 5: valori B e E rilevati dai valori di misurazione I_H e U_p della Tab. 1, come pure velocità v calcolata da questi e relativo quadrato a seconda della tensione anodica U_A .

U_A / kV	B / 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	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

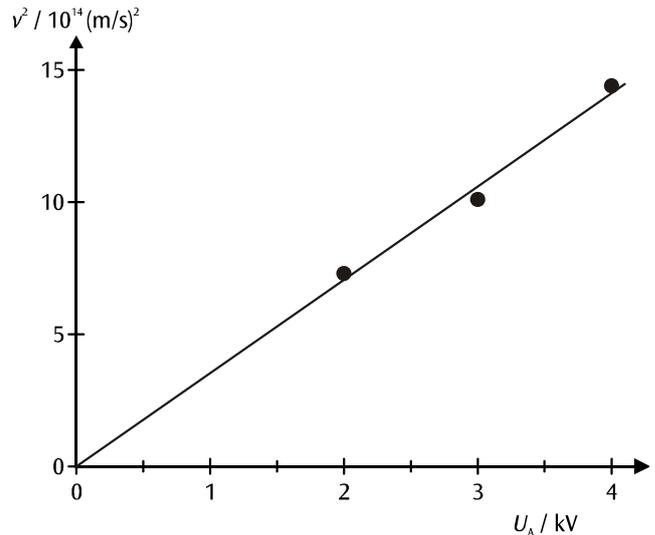


Fig. 7: rappresentazione grafica dell'interazione tra v^2 e U_A

La Fig. 7 mostra l'interazione tra il quadrato della velocità e la tensione anodica. Dall'incremento delle rette di origine disegnate, è inoltre possibile determinare la carica specifica dell'elettrone secondo l'equazione (8).

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

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