Tube de Thomson

ÉTUDE DE LA DÉVIATION D'ÉLECTRONS DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

- Etude de la déviation d'un faisceau électronique dans un champ magnétique.
- Étude de la déviation d'un faisceau électronique dans un champ électrique.
- Montage d'un filtre de vitesse d'un champ électrique et d'un champ magnétique croisés.
- Évaluation de la charge spécifique de l'électron.

UE3070500

04/24 UK/UD

NOTIONS DE BASE GÉNÉRALES

Dans le tube de Thomson, les électrons traversent horizontalement un diaphragme à fente placé en aval de l'anode et rencontrent un écran luminescent qui, placé de biais dans la marche du rayon, rend le faisceau visible. Derrière le diaphragme se trouve un condensateur à plaques, dans le champ électrique vertical duquel les électrons sont déviés verticalement. Par ailleurs, les bobines de Helmholtz permettent de créer un champ magnétique horizontal perpendiculaire au sens du faisceau, dans lequel les électrons sont également déviés verticalement :

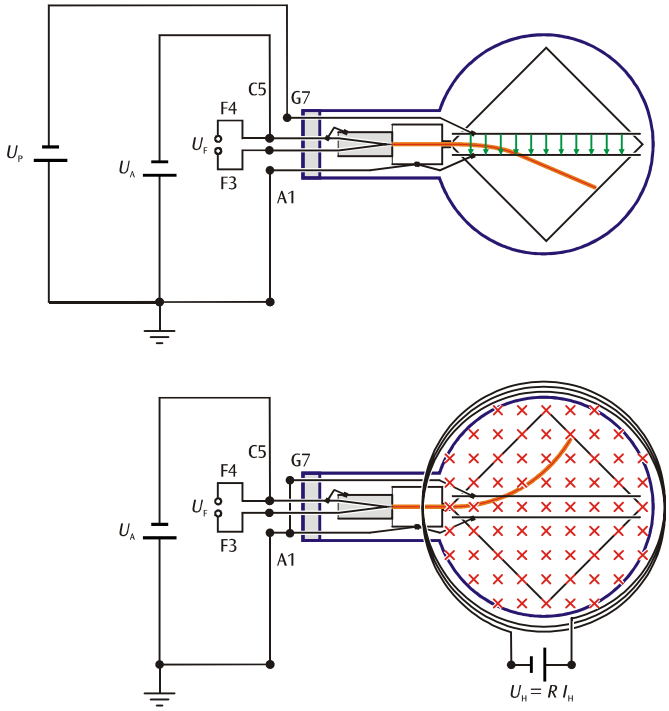

Fig. 1 : Représentation schématique du tube Thomson. Déviation dans le champ électrique (en haut) (dans le champ magnétique, en bas)

La force de Lorentz agit sur un électron qui bouge à la vitesse $\boldsymbol{v}$ à travers un champ magnétique $\boldsymbol{B}$

$$\boldsymbol{F} = -e \cdot \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \qquad (1)$$

e : charge élémentaire

perpendiculaire au plan résultant du sens de mouvement et du champ magnétique. La déviation est verticale lorsque le sens du mouvement et le champ magnétique se situent dans le plan horizontal (cf. Fig. 1, en bas). Si le sens du mouvement est perpendiculaire au champ magnétique homogène, les électrons sont forcés sur une trajectoire circulaire dont la force centripète est imposée par la force de Lorentz.

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

m : masse électronique, r : rayon de la trajectoire circulaire.

La vitesse des électrons dépend de la tension anodique U_A. On a l'équation suivante :

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

Le rayon de la trajectoire circulaire permet de déterminer la charge spécifique de l'électron, dans la mesure où le champ magnétique homogène B et la tension anodique U_A sont connus. (2) et (3) permettent d'établir la charge spécifique de l'électron :

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

Le rayon de courbure r peut être déterminé à partir du point de sortie du faisceau dévié à l'écran. Le champ magnétique B des bobines de Helmholtz résulte du courant de bobine I_H (voir évaluation).

Lorsqu'une tension U_P est appliquée au condensateur à plaques, les électrons sont déviés verticalement dans son champ électrique vertical $\boldsymbol{E}$ avec la force

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

e : charge élémentaire

également déviée perpendiculairement (cf. Fig. 1). Aussi le champ électrique peut-il être choisi de manière à ce qu'il compense juste la déviation dans le champ magnétique :

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

Dans ce cas, il est aisé de déterminer la vitesse des électrons. On a l'équation suivante :

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

Un agencement de champs électrique et magnétique croisés, dans lequel la déviation des électrons est compensée à zéro, est appelé un filtre de vitesse.

Le rapport entre la vitesse *v* et la tension d'accélération U_A résulte de la comparaison entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique. On a l'équation suivante :

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

LISTE DES APPAREILS

1	Tube de Thomson S	1000617 (U18555)
1	Support-pour tube S	1014525 (U185002)
1	Paire de bobines de Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Alimentation haute tension 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
ou		
1	Alimentation haute tension 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Alimentation CC 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
ou		
1	Alimentation CC 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multimètre numérique P1035	1002781 (U11806)
1	Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm	1002843 (U138021)

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

Les tubes thermoioniques sont des cônes en verre à paroi mince sous vide. Manipulez-les avec précaution : risque d'implosion !

- N'exposez pas le tube Thomson à des charges mécaniques.

La tension appliquée au tube Thomson peut être dangereuse au contact :

- Pour les connexions, utilisez uniquement des câbles d'expérimentation de sécurité.
- Ne procédez à des câblages que lorsque le dispositif d'alimentation est éteint.
- Ne montez et ne démontez le tube Thomson que lorsque le dispositif d'alimentation est éteint.

MONTAGE

Montage de la paire de bobines de Helmholtz et du tube Thomson dans le porte-tube :

- Placez les deux bobines de Helmholtz au milieu de la fente des bobines (les douilles de connexion étant tournées vers l'extérieur) et glissez-les vers l'extérieur.
- Insérez le tube Thomson dans le porte-tube. Veillez à ce que les contacts du tube s'encochent complètement dans les orifices prévus à cet effet dans le porte-tube. La tige de guidage centrale du tube doit dépasser légèrement de l'arrière du porte-tube.
- Glissez les deux bobines de Helmholtz vers l'intérieur jusqu'au repère. L'écart moyen entre les deux bobines s'élève alors à 68 mm.

Connexion de la tension de chauffage et d'accélération :

- Laissez l'alimentation haute tension éteinte et tournez le diviseur de tension en butée gauche.
- Reliez les douilles F3 et F4 du porte-tube à la sortie de la tension de chauffage (douilles bleues) de l'alimentation haute tension au moyen de câbles d'expérimentation de sécurité (cf. Fig. 1).
- Reliez la douille C5 du porte-tube au pôle négatif (douille noire) de l'alimentation haute tension au moyen de câbles d'expérimentation de sécurité (les connexions C5 et F4 sont reliées entre elles dans le tube).
- Reliez la douille A1 du porte-tube au pôle positif (douille rouge) de la sortie haute tension et le pôle positif à la douille de terre jaune-vert.

Connexion des bobines de Helmholtz :

- Laissez l'alimentation CC éteinte et tournez tous les diviseurs de tension en butée gauche.
- Reliez la douille A de la première bobine au pôle négatif et la douille Z au pôle positif de la sortie 12 V.
- Branchez la seconde bobine parallèlement à la première en reliant les douilles opposées.
- Raccordez en série l'ampèremètre aux deux bobines de Helmholtz.

Connexion de la tension de déviation :

- Reliez la douille G7 du porte-tube au pôle négatif de la sortie 500 V.
- Reliez le pôle positif de l'alimentation CC à la douille de terre jaune-vert du dispositif haute tension.

Note : si les déviations ont lieu dans le champ électrique ou magnétique dans le sens opposé, inversez les connexions de l'alimentation CC correspondante.

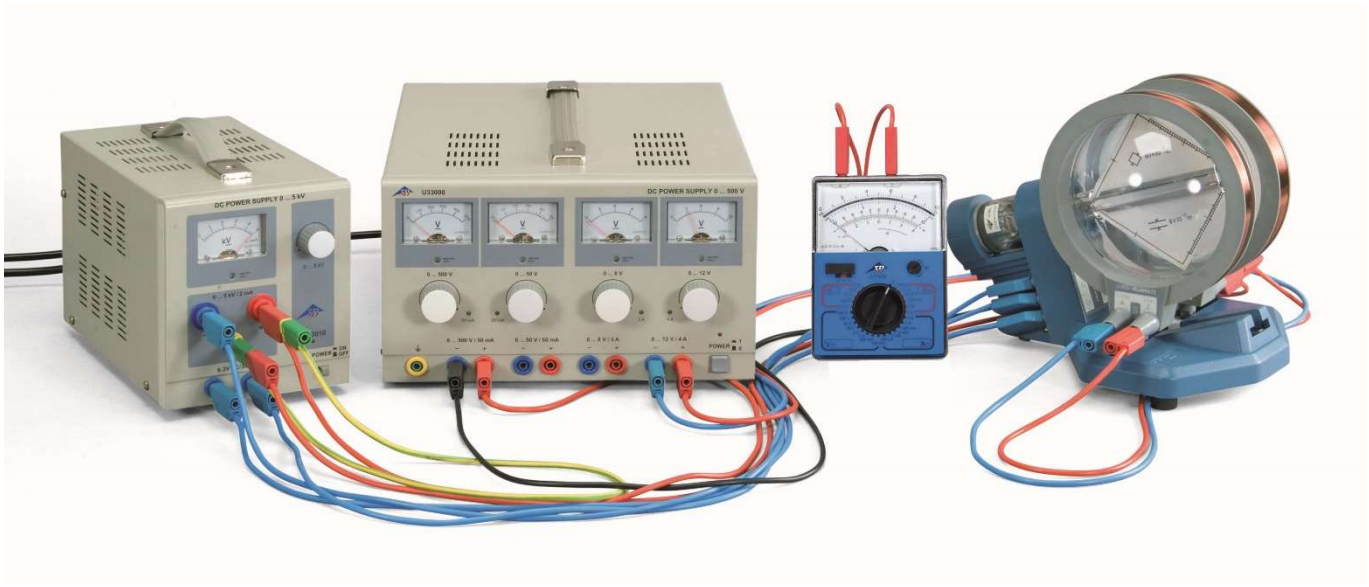

Fig. 2 : Structure expérimentale pour l'étude de la déviation d'électrons dans un champ électrique et magnétique.

RÉALISATION

- Mettez l'alimentation haute service en service. Le filament se met immédiatement à rougir.
- Réglez la tension d'accélération U_A = 2,0 kV et observez l'allure « horizontale » du faisceau électronique à l'écran.
- Allumez l'alimentation CC, 0-500 V.
- Augmentez lentement le courant 2 I_H traversant les deux bobines de Helmholtz, jusqu'à ce que le faisceau électronique au bord de l'écran passe au milieu de la graduation (cf. Fig. 3).
- Sélectionnez une tension U_P sur les plaques de manière à ce que la déviation du faisceau soit compensée à zéro.
- Notez l'intensité du courant 2 I_H et, le cas échéant, la tension U_P.
- Ramenez la tension U_P à zéro.
- Répétez la mesure pour U_A = 3,0 et 4,0 kV.

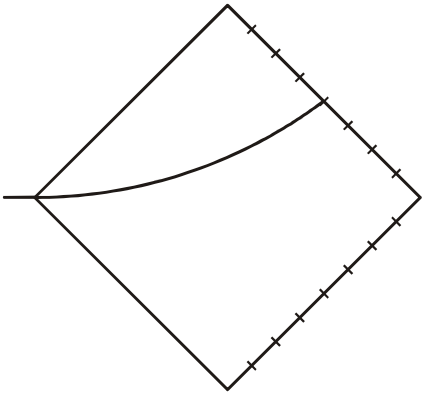

Fig. 3 : Déviation du faisceau électronique par le milieu de la graduation au bord de l'écran

- Répétez la tension anodique U_A = 3 kV.
- Sélectionnez 2 I_H = 0,2 A et réglez la tension de plaques U_P de manière à ce que la déviation du faisceau soit compensée à zéro.
- Notez l'intensité du courant 2 I_H et la tension U_P.
- Répétez la procédure pour 2 I_H = 0,4 A, 0,6 A et 0,8 A.

EXEMPLE DE MESURE

Tab. 1 : Courant (nécessaire à la déviation magnétique par le milieu de la graduation) traversant la paire de bobines de Helmholtz 2 I_H et tension de plaque (compensant la déviation à zéro) U_P en fonction de la tension anodique 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 : Courant des bobines de Helmholtz 2 I_H et tension de plaques de compensation UP à tension anodique fixe 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

ÉVALUATION

a) Le champ magnétique B dans une paire de bobines de Helmholtz est proportionnel au courant I_H traversant une seule bobine. Le facteur de proportionnalité k peut être calculé à partir du rayon de la bobine R = 68 mm et du nombre de spires N = 320 par bobine :

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

b) Le rayon de courbure r du faisceau dévié peut être déterminé dans la Fig. 4 à partir du point de sortie B.

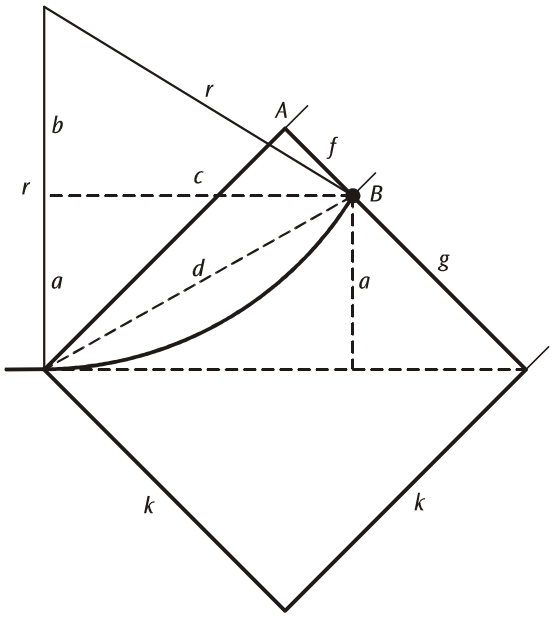

Fig. 4 : Représentation pour le calcul du rayon de courbure r du faisceau électronique à partir de l'écart f entre le point de sortie B et le point angulaire A

D'après le théorème de Pythagore :

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

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

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

Ainsi $r = \dfrac{c^2 + a^2}{2a} = \dfrac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k-f)}$

Si le point B est au milieu de la graduation, f = 40 mm. Dans ce cas, on calcule :

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

L'équation (4) peut être transformée : $\dfrac{e}{m} = \dfrac{U_A}{0{,}1\text{m}^2 \cdot B^2}$

c) Le champ électrique dans le condensateur à plaques peut être calculé à partir de la tension U_P et de l'écart des plaques d = 8 mm :

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

d) Pour évaluer la charge spécifique de l'électron, on calcule le champ magnétique B à partir des valeurs indiquées dans le tableau 1 pour le courant I_H et on obtient les valeurs indiquées dans le tableau 3.

La Fig. 5 illustre une représentation graphique du rapport entre la tension anodique U_A et le carré du champ magnétique B^2 pour les valeurs du tableau 3.

La pente de la droite d'origine dessinée s'élève à

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

Il en résulte $\dfrac{e}{m} = \dfrac{U_A}{0{,}1\text{m}^2 \cdot B^2} = 1{,}7 \cdot 10^{11} \dfrac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Valeur empirique : $\dfrac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11} \dfrac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tab. 3 : Valeurs B et B^2 déterminées à partir des mesures I_H du tableau 1 en fonction de la tension anodique 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

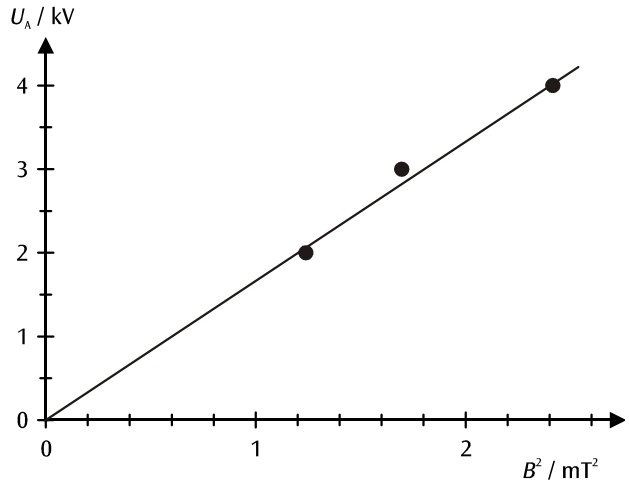

Fig. 5 : Représentation graphique du rapport entre U_A et B^2 avec un rayon de courbure constant r = 141 mm

e) Pour confirmer l'équation (7), on calcule avec les valeurs de mesure du tableau 2 les paires de valeurs *B* et *E*, pour lesquelles la déviation du faisceau est compensée à zéro (cf. tableau 4), puis on représente le résultat dans un diagramme *E*-*B* (cf. Fig. 6).

En conformité avec l'équation (7), les valeurs de mesure se situent dans les limites de précision sur une droite d'origine. Sa pente correspond à la vitesse des électrons.

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

Tab. 4 : Champ magnétique B et champ électrique compensant *E* pour une tension anodique fixe 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

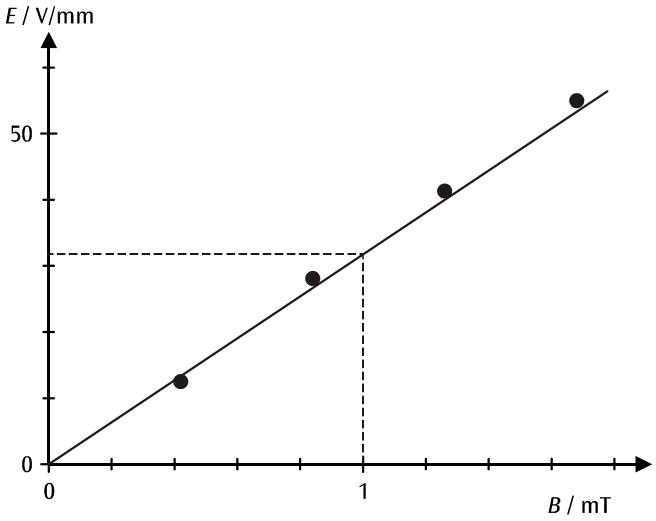

Fig. 6 : Représentation graphique des valeurs de mesure du tableau 4

f) Les valeurs de mesure du tableau 1 permettent de déterminer la vitesse *v* des électrons pour différentes tensions anodiques U_A. Le résultat est inscrit dans le tableau 5.

Tab. 5 : Valeurs *B* et *E* déterminées à partir des mesures I_H et U_P du tableau 1 ainsi que la vitesse *v* qui en résulte et son carré en fonction de la tension anodique U_A.

U_A / kV	*B* / mT	*E* / V/mm	*v* / m/s	v^2 / (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	$3{,}79 \cdot 10^7$	$14{,}4 \cdot 10^{14}$

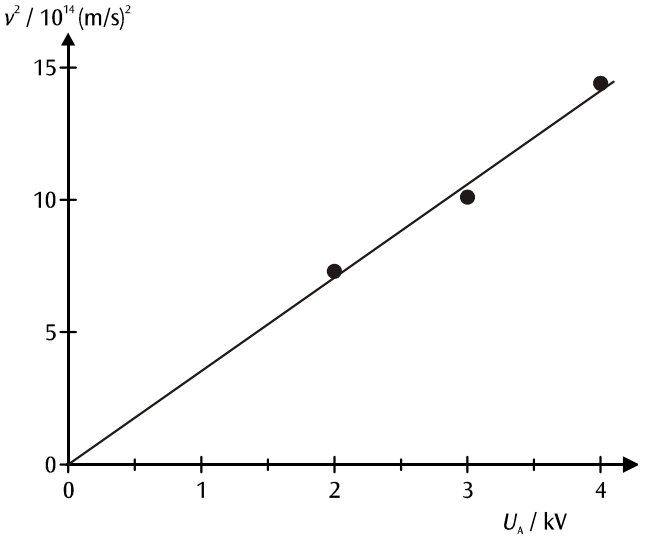

Fig. 7 : Représentation graphique du rapport entre v^2 et U_A

La fig. 7 illustre le rapport entre le carré de la vitesse et la tension anodique. À l'aide de l'équation (8), la pente de la droite d'origine permet également de déterminer la charge spécifique de l'électron.

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

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

© Copyright 2024 3B Scientific GmbH