

Le tube de Thomson « e/m »

01598



Le tube monté sur le support avec les bobines de Helmholtz réf. 01589.

1. PRESENTATION DU PRODUIT

Ce tube vous permettra d'étudier des trajectoires électroniques et leur déviation, soit par un champ électrostatique, soit par un champ magnétique créé par un jeu de bobines de Helmholtz.

Ce tube doit être utilisé avec le support réf.01589, il est équipé d'un écran luminescent gradué qui peut être observé sur deux faces.

- Caractéristiques techniques :

Chauffage : 6.3 V alternatif - Tension accélératrice (d'anode) : 1,5 à 5 kV courant continu - Echelles graduées de 80 mm - Tension déviatrice 0-350 V courant continu - Matière verre très fragile

Le tube de Thomson « e / m » comprend un « canon à électrons » qui produit un faisceau d'électrons dans une ampoule en verre transparent, vide d'air. Ce faisceau d'électrons intercepte un écran plat en mica recouvert d'une substance luminescente sous l'impact des électrons; la trajectoire du faisceau dans l'ampoule de verre est ainsi rendue visible. L'écran est maintenu légèrement incliné par rapport à l'axe du faisceau par les deux plaques déviatrices séparées de 8 mm. La plaque inférieure est reliée à l'anode cylindrique du « canon » et donc à la broche A1 du support; la plaque supérieure est raccordée à la broche G7. La source du faisceau d'électrons est un filament en tungstène en forme « d'épingle à cheveu » dont une connexion est reliée à la fois à la broche F4 et à l'anneau de garde (broche C5), l'autre extrémité du filament étant reliée à la broche F3.

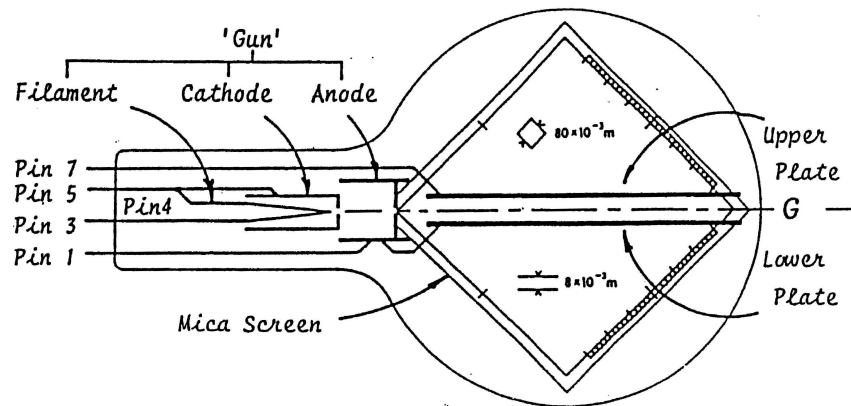


Figure 01 : Schéma du tube de Thomson e/m, ref. 01598

Caractéristiques :

Tension du filament	(V_F)	6.0 V ac/dc (8.0 V max)
Tension de l'anode	(V_A)	2000-5000 V dc (6000V max)
Courant d'anode	(I_A)	0.2 mA à 4000 V
Potentiel de la plaque déviatrice	(V_P)	50 - 350 V dc

Le tube est fixé sur le support universel avec les bobines de Helmholtz, réf. 01589 espacées au maximum; le tube de Thomson peut être tourné de $\pm 5^\circ$ pour optimiser l'interception du faisceau d'électrons par l'écran.

Précautions d'installation : attention, toutes les hautes tensions doivent être à zéro avant toute manipulation, le filament seul sera allumé, attendre 1 minute avant d'augmenter progressivement les haute et très haute tensions.

2. QUELQUES RAPPELS THEORIQUES

Les manipulations avec le tube de PERRIN montrent que les faisceaux émis par une cathode peuvent être considérés comme un flux de charges négatives qui accélérées par une différence de potentiels se déplacent avec une vitesse uniforme. Cette expérience met également en avant la nature de la particule : **l'électron**.

Comme un électron est une particule de charge finie $-e$, et de masse m , il obéira aux lois de conservation de la quantité de mouvement et d'énergie.

2.1 -THEORIES SUR L'EQUILIBRE DES CHAMPS DE THOMSON :

En 1897, J. J. THOMSON a modifié le tube de Perrin en améliorant le vide de façon à réduire l'influence des ions positifs; il a ainsi montré l'effet d'un champ magnétique sur un faisceau d'électrons; il a pu aussi montrer la déviation des électrons dans un champ électrique; il a utilisé ce tube pour concevoir son expérience classique sur « l'équilibre des champs » et évaluer les propriétés physiques de l'électron.

Dans le tube de Thomson (réf. 01598), l'étude des effets des champs électrique et magnétique sur des électrons en mouvement permet d'évaluer la vitesse v à la sortie de l'anode et la charge spécifique e/m de l'électron ou m/e , la forme courante de Thomson. Pour cela, il convient d'annuler la déflexion des électrons en opposant les effets du champ électrique uniforme à ceux du champ magnétique uniforme; les plaques de déviation ont été dessinées pour compenser les perturbations liées à la non uniformité du champ magnétique (c'est à dire à environ 90 mm).

Un électron de charge e se déplaçant dans un champ magnétique uniforme d'intensité \mathbf{E} est soumis à une force \mathbf{F} dans la direction du champ où

$$F = e \cdot E$$

En supposant que toutes les autres forces agissant sur l'électron (gravité et forces inter-électroniques) sont négligeables devant la force électrique \mathbf{E} , l'électron sera uniformément accéléré et donc

$$F = m \cdot a = e \cdot E$$

Entre les plaques déviateuses du tube réf. 01598, un électron subira une accélération le long de la direction « y » égale à

$$a_y = \frac{eE}{m}$$

L'équation générale pour un mouvement uniformément accéléré est

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad 02.11$$

Dans la direction « y » en tenant compte des conditions initiales $y_0 = 0$ et $v_0 = 0$ on obtient :

$$y = \frac{1}{2} a_y t$$

et donc

$$y = \frac{eE}{2m} t^2 \quad 02.12$$

Dans la direction « x », en négligeant les effets de bords de plaques où $x_0 = 0$ et le long de l'axe de symétrie du système où $a = 0$, on obtient à partir de 02.11, $x = v_x t$.

En combinant cette équation avec 02.12, on montre que la trajectoire d'un électron dans un champ magnétique est parabolique

$$y = \frac{e E x^2}{2m v_x^2} \quad 02.13$$

Des six paramètres, seuls e , m et v_x ne peuvent être mesurés directement donc Thomson a combiné e et m dans un seul terme et équilibré le champ électrique avec le champ magnétique pour quantifier v_x .

2.2 - L'EQUILIBRE DU CHAMP MAGNETIQUE

Un électron de charge e , se déplaçant dans un champ magnétique uniforme \mathbf{B} avec une vitesse \mathbf{v} perpendiculaire à \mathbf{B} est soumis à une force \mathbf{F} qui est à la fois perpendiculaire à \mathbf{B} et \mathbf{v} dont l'intensité est

$$F = e v B \quad 02.21$$

Quand ce champ magnétique est imposé pour annuler la déviation de cet électron provoquée par un champ électrique on a

$$eE = F = e v B$$

et la vitesse v_x peut être déterminée à partir de

$$v_x = \frac{E}{B} \quad 02.22$$

En remplaçant cette expression dans 02.13, on obtient

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{x^2 B^2}{E}$$

Puisque $E = \frac{V_p}{d}$ où V_p est le potentiel à travers la paire de plaques déviateuses séparées d'une distance d et $d = 2y$ (voir figure 03), on obtient

$$\frac{e}{m} = \frac{V_p}{x^2 B^2} \quad 02.23$$

Le terme e/m est la charge spécifique de l'électron (on utilise plus couramment le terme de Thomson m/e) et a une valeur acceptée de :

$$(1.75888 \pm 0.00004) \times 10^{11} \text{ coulomb par kilogramme}$$

3. EXPERIENCES

EXPERIENCE 3.1 – ETUDE PRATIQUE DE L'EQUILIBRE DES CHAMPS

Temps - 40 min

V_H ; = Alim. Pierron réf 04851 + rhéostat réf; 04036

V_P = Alim. Pierron réf.04533

V_A, V_F = Alim. Pierron réf.04863

Connecter le tube 01598
comme indiqué dans le
circuit ci-contre :

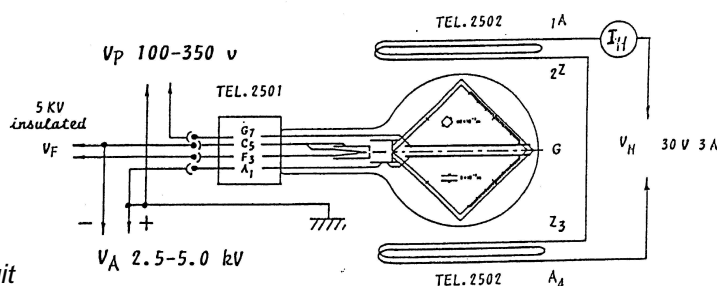
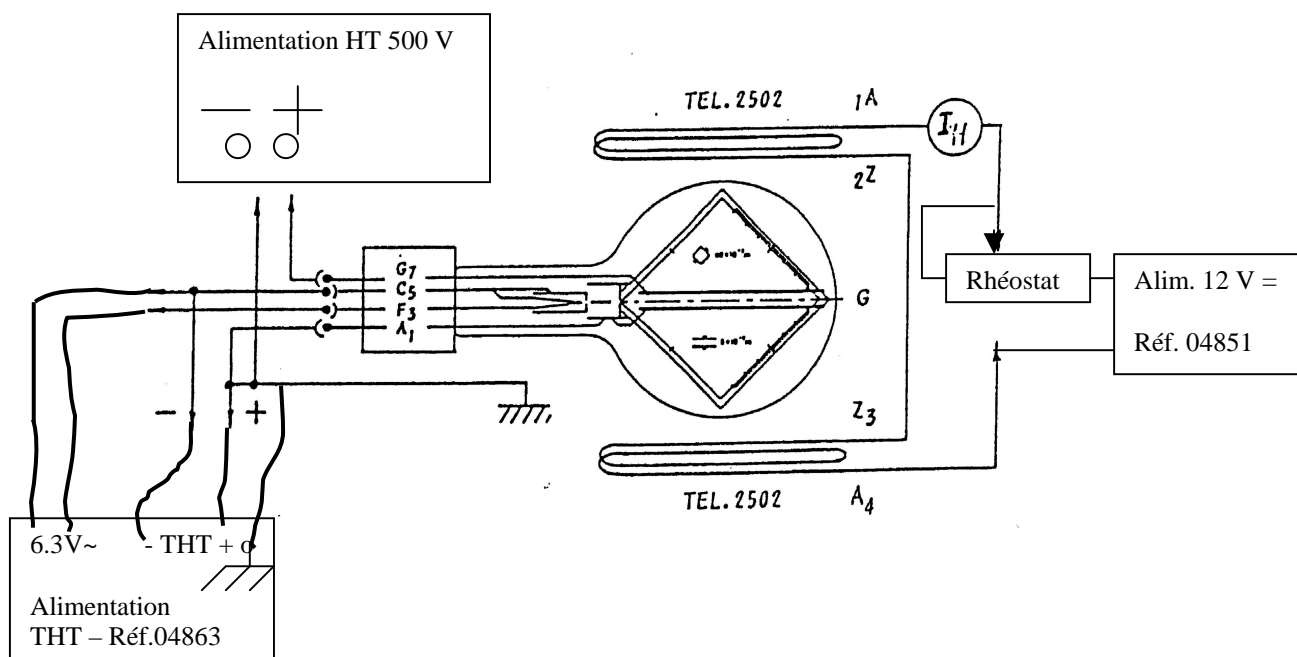


Figure 02 : Schéma du circuit

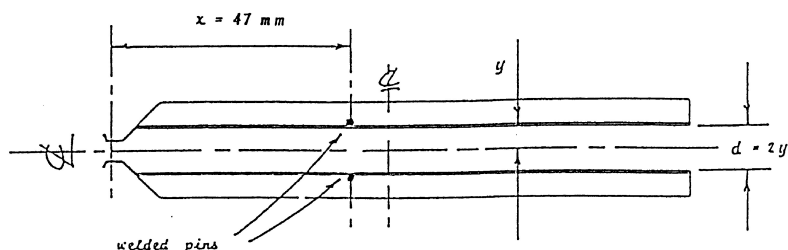
Montage à effectuer :



Sur le support réf. Pierron 01589 (TEL.2501), pour un maximum de sécurité l'anode A1 doit être mise au potentiel de la terre; pour que la cathode C5 soit polarisée à un potentiel négatif de l'ordre du kilovolt, il faut que le potentiel du filament soit au moins de 5 kV.

Figure 03 : Définitions de x , y et d

Une petite broche a été soudée près du milieu de chaque plaque qui coupe la déviation du faisceau d'électrons.



Les bobines de Helmholtz réf. Pierron 01589 (TEL 2502) ont un diamètre de 138×10^{-3} m et sont espacées d'une distance égale à leur rayon. En configuration de Helmholtz, le champ magnétique est donné par l'équation

$$B = \mu_0 H \quad \text{webers par mètre carré}$$

$$B = (4.17 \times 10^{-3}) I_H$$

Donc

$$B^2 = 17.39 \times 10^{-6} I_H^2$$

où I_H est le courant traversant les bobines de Helmholtz branchées en série (voir les instructions pour les bobines de Helmholtz réf. Pierron 01589).

L'équation 02.23 se réduit alors à

$$\frac{e}{m} = \frac{V_p}{I_H^2} \times 2.60 \times 10^7 \quad 03.11$$

et donc $I_H^2 = k V_p$ (voir la note à la fin pour la constante k)

03.12 Mettre V_A à environ 4000V. Etablir une tension entre les plaques déviatrices V_P de 200V afin de dévier le faisceau à proximité des broches soudées au milieu des plaques.

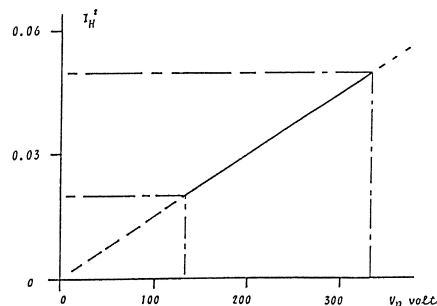
03.13 Ajuster V_A afin que le faisceau se projette sur l'échelle graduée située sur le côté du carré de 80 mm; la trajectoire parabolique passe par le point de coordonnées $x = 47.00 \times 10^{-3}$ m et $y = 4.00 \times 10^{-3}$ m.

NE PAS CHANGER CES REGLAGES JUSQU'A CE QUE I_H AIT ETE MESURE

03.14 Assurez-vous que les connexions des bobines de Helmholtz produisent un champ magnétique opposé à celui du paragraphe 03.13; positionner le bord extérieur du pied de chaque bobine au niveau de la barre du symbole en **H**; ajuster I_H pour annuler la déviation du faisceau à l'extrémité de l'axe de l'écran luminescent, G sur la figure 01 et enregistrer V_P et I_H .

03.15 Faire varier V_P par pas de 50 V, répéter 03.13 et 03.14 et tabuler I_H .

V_P	I_H	I_H^2
VOLTS	AMPS	-
150		
200		
250		
300		
350		



03.16 Remplacer les valeurs pour V_P et I_H^2 dans l'équation 03.11 et évaluer e/m .

03.17 Remplacer les valeurs pour E et B dans l'équation 02.22

$$v_x = \frac{V_p}{d \times I_H \times 4.17 \times 10^{-3}}$$

où $d = 8 \times 10^{-3}$ m. Utiliser le graphe 03.15 pour évaluer v_x (3.5×10^7 ms⁻¹ à $V_P = 200$ V).

03.18 Noter que v_x est proportionnel à V_A puisque V_A est ajusté pour permettre l'intersection à chaque valeur de V_P .

Ceci pouvait être prévu grâce aux lois de conservation de l'énergie .

EXPERIENCE 3.2 – DEVIATION DANS UN CHAMP MAGNETIQUE SEUL

Temps - 35 min

V_H ; = Alim. Pierron réf 04851 + rhéostat réf; 04036

V_A, V_F = Alim. Pierron réf.04863

La loi de conservation de l'énergie nécessite que la somme des variations de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle électrique d'une charge allant d'un point 1 à un point 2 doit être nulle car aucun travail n'est effectué par les forces extérieures.

$$\left(\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2\right) + (e V_2 - e V_1) = 0$$

En appliquant cette relation à un électron traversant le canon du tube de Thomson le terme $(V_2 - V_1)$ correspond à V_A , et $v_1 = 0$, et donc, pour des charges négatives

$$e V_A = \frac{1}{2} m v^2$$

ou

$$\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 V_A}$$

03.19

Si un électron de vitesse v est émis par un canon dans un champ magnétique \mathbf{B} , il subira une force constante qui induira un mouvement suivant une trajectoire circulaire dans un plan perpendiculaire à \mathbf{B} .

La force nécessaire pour maintenir l'électron sur une trajectoire de rayon R est

$$F = \frac{m v^2}{R}$$

et de 02.21, on en déduit :

$$F = \frac{m v^2}{R} = e v B$$

ou

$$v = \frac{e}{m} B R$$

03.20

En substituant cette expression dans l'équation 03.19 on obtient

$$\frac{e}{m} = \frac{2 V_A}{B^2 R^2}$$

ou

$$\frac{e}{m} = \frac{2 V_A}{I_H^2 (4.17 \times 10^{-3})^2 R^2} = \frac{V_A}{I_H^2 R^2} \times 1.15 \times 10^5$$

03.21

et en réarrangeant l'expression, $I_H^2 = k \frac{V_A}{R^2}$

03.22

Application du théorème de Pythagore au carré de 80 mm : détermination de R^2

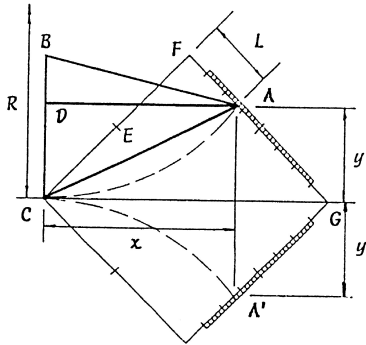


Figure 04 : Détermination de R^2

$$AB^2 = BC^2 + AC^2 - 2BC \cdot DC$$

$$R = BC = AB = \frac{AC^2}{2 \cdot DC}$$

$$R = \frac{x^2 + y^2}{2y}$$

Le long de CF (=80) $x = y$ et $R^2 = y^2$

Le long de FG (=80)

$$R_A^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{80^2 + L^2}{80 - L} \right]^2 \dots \dots 03.23$$

ainsi $R_{80}^2 \rightarrow \infty$, $R_{40}^2 = 20.000$, $R_0^2 = R_F^2 = 3.200$, $R_E^2 = 800$ tous en $\times 10^{-6} \text{ m}^2$

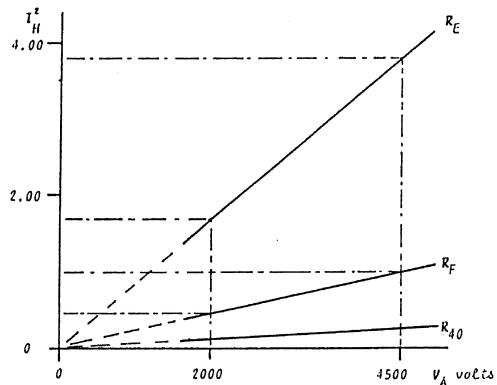
03.24 Connecter la plaque supérieure G7 à la terre pour qu'il n'y ait pas de déviation électrique.

03.25 Mettre V_A à 4500V.

03.26 Assurez-vous que les bobines de Helmholtz soient correctement positionnées sur la barre du symbole **H** ; ajuster le courant I_H de sorte que le faisceau circulaire passe précisément par le point **F** sur le carré de côté 80 mm pour obtenir $R_F^2 = 3.200 \times 10^{-6}$.

03.27 En ajustant I_H pour que le faisceau passe toujours par le point **F**, enregistrer I_H en fonction de V_A et tracer la courbe correspondante.

V_A	I_H	I_H^2
VOLTS	AMPS	-
2000		
2500		
3000		
3500		
4000		
4500		



03.28 Remplacer les valeurs pour V_A , I_H^2 et R^2 dans l'équation 03.21 et évaluer e/m et v à partir de l'équation 03.19.

La même expérience peut être réalisée pour différentes valeurs de R_E et R_{40} .

EXPERIENCE 3.3 –EQUILIBRE DES CHAMPS AVEC LE MINIMUM D'APPAREILS

Temps - 40 min

V_H ; = Alim. Pierron réf 04851 + rhéostat réf; 04036

V_P = Alim. Pierron réf.04533

V_A, V_F = Alim. Pierron réf.04863

Certains auteurs se sont demandés pourquoi Thomson avait essayé de mesurer avec précision les coordonnées x et y d'un point du faisceau d'électrons dans le champ électrique puisqu'il savait que de tels paramètres étaient vraisemblablement fortement influencés par les «effets de bord» des plaques; l'utilisation de l'équation du "champ électrique" lui permit de s'affranchir de la mesure de V_A , valeur très difficile à déterminer avec précision à cette époque.

L'expérience qui consiste à mesurer le déplacement du faisceau d'électrons dans le champ magnétique au lieu d'annuler cette déviation (par superposition d'un champ électrique au champ magnétique) sans avoir à mesurer V_A donne aussi une très bonne valeur pour e/m .

03.29 Combiner l'équation 02.22 et 03.20 pour obtenir :

$$\begin{aligned} \frac{e}{m} &= \frac{V_P}{B^2 R d} = \frac{V_P}{I_H^2 (4.17 \times 10^{-3})^2 R (8 \times 10^{-3})} \\ &= \frac{V_P}{I_H^2 R} \times 7.19 \times 10^6 \qquad \qquad \qquad 03.30 \\ I_H^2 &= k \frac{V_P}{R} \end{aligned}$$

03.31 Mettre V_A à environ 2500V.

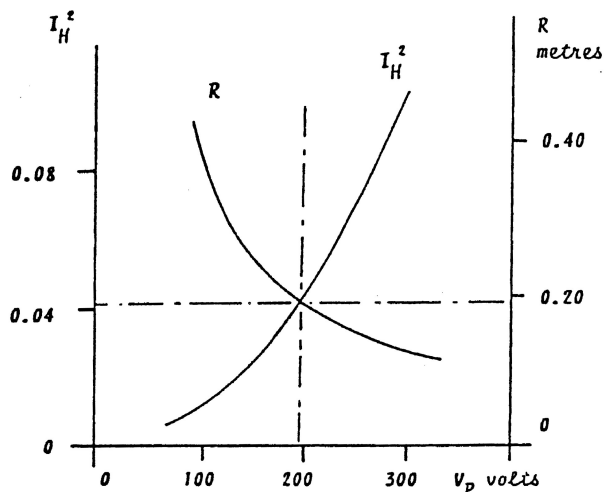
03.32 Mettre V_P à 100V.

03.33 Etablir correctement les paramètres et la polarité des bobines de Helmholtz pour opposer V_P et ajuster I_H pour avoir une déviation nulle en G.

03.34 Remettre V_P au potentiel de la terre et mesurer la longueur L .

03.35 Tabuler I_H et R (à partir de L et de l'équation 03.23) en fonction de V_P et tracer la courbe correspondante.

V_P	I_H	I_H^2	L	R
VOLTS	AMPS	-	mm	m
100				
150				
200				
250				
300				



03.36 En remplaçant les valeurs pour V_P, I_H^2 et R dans l'équation 03.30, évaluer e/m et également v à partir de l'équation 02.22.

03.37 L'expérience peut être réalisée par les étudiants avec d'autres valeurs de V_A comme 2000V ou 3000V, mais les plus petites déviations où L est maximum sont plus difficiles à mesurer pour des tensions supérieures à 3000V.

EXPERIENCE 3.4 –EQUILIBRE DES CHAMPS DANS UN TEMPS MINIMUM

Temps - 25 min

V_H ; = Alim. Pierron réf 04851 + rhéostat réf; 04036

V_P = Alim. Pierron réf.04533

V_A, V_F = Alim. Pierron réf.04863

Les technologies modernes permettent d'utiliser des tensions beaucoup plus basses que par le passé; on peut ainsi mesurer facilement V_A et obtenir rapidement la valeur exacte de e/m sans perdre de temps en mesurant x, y ou L .

03.38 En combinant les équations 02.22 et 03.19 (au lieu de 03.20), on obtient

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2V_A} \left(\frac{V_P}{Bd} \right)^2$$

où $B = (4.17 \times 10^{-3}) I_H$ et $d = 8 \times 10^{-3}$, d'où

$$\frac{e}{m} = \frac{V_P^2}{V_A I_H^2} \times 4.49 \times 10^8 \quad 03.39$$

et donc $I_H^2 = k \frac{V_P^2}{V_A}$

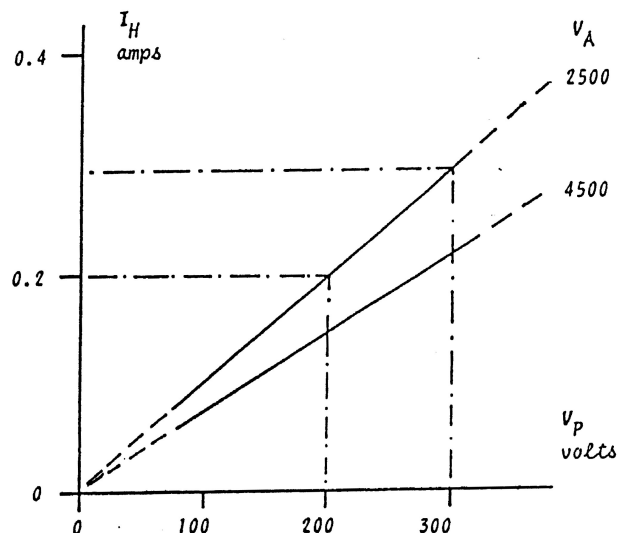
03.40 Mettre V_A à 4500V.

03.41 Mettre V_P à 100V.

03.42 Etablir correctement les paramètres et la polarité des bobines de Helmholtz pour opposer V_P et ajuster I_H pour avoir une déviation nulle en G .

03.43 Tabuler I_H en fonction de V_P et tracer la courbe; si le temps le permet, de plus faibles valeurs de V_A comme 2500V peuvent être mesurées.

V_A	V_P	I_H
VOLTS	VOLTS	AMPS
4500	100	
	200	
	300	
2500	300	
	200	
	100	



03.44 En remplaçant les valeurs pour I_H^2 , V_P^2 et V_A dans l'équation 03.39, estimer e/m et v à partir de l'équation 03.19.

4. Généralités : mesure de e et m

Puisque la masse de l'électron ne peut être mesurée à partir de l'effet gravitationnel, une mesure de la charge électronique e peut être effectuée à partir de la méthode de Millikan par exemple et m sera déduit des mesures de e/m.

NOTES SUR LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Bien que ce tube ait été fabriqué avec le plus grand soin, les tolérances sont telles que le faisceau d'électron non dévié n'est pas parfaitement aligné le long de l'axe du carré ; en faisant les mesures de déviation à la fois vers le haut et vers le bas et en prenant la valeur moyenne, on minimise les effets de non alignement; toujours tourner le tube pour optimiser l'intersection avec le faisceau.

Dans les expériences précédentes, il est important de mesurer avec beaucoup de précision le courant I_H , aussi un appareil numérique est recommandé; les hautes et très hautes tensions seront lues sur les afficheurs des alimentations respectives, par conséquent il n'est pas nécessaire d'avoir un multimètre supplémentaire.

NOTE SUR LA CONSTANTE k

La constante k associée à I_H^2 dans ces 4 expériences est spécifique à chaque expérience.

5. MISE EN SERVICE

5.1 Prescription de sécurité

Le matériel doit être utilisé conformément aux instructions de ce document. Il est conseillé d'utiliser des câbles de sécurité.

AUCUNE INTERVENTION N'EST AUTORISEE A L'INTERIEUR DE L'APPAREIL.

5.2 Mise en service

Voir les instructions dans les chapitres concernant chaque produit.

5.3 MAINTENANCE

Ce matériel ne nécessite aucun entretien particulier. Il convient d'éviter l'humidité et les chocs. Pour le nettoyage, il convient d'utiliser un chiffon doux à poussière.

<p>S.A.V. PIERRON : Contactez le Service Relations Clients ☎ 0825 37 38 39</p>

(Ne jamais retourner de matériel sans avoir pris, au préalable, contact avec notre Service Relations Clients).

5.4 GARANTIE

Ce matériel est garanti **UN AN** pièces et main-d'œuvre contre tout vice de fabrication. Ce produit étant très fragile, nous ne le garantissons que s'il est utilisé avec les alimentations préconisées par Pierron dans les instructions du présent document.

Seuls les appareils retournés avec une facture d'achat datée, pourront être couverts par la garantie. Toute intervention par des personnes ou des organismes non agréés, fait perdre le bénéfice de la garantie.

<p>PIERRON Education – 2, rue Gutenberg – BP80609 – 57206 SARREGUEMINES CEDEX Tél. 0 825 37 38 39 – Fax 03 87 98 45 91 e-mail : EDUCATION-France@pierron.fr – Internet : http://www.pierron.com</p>
--