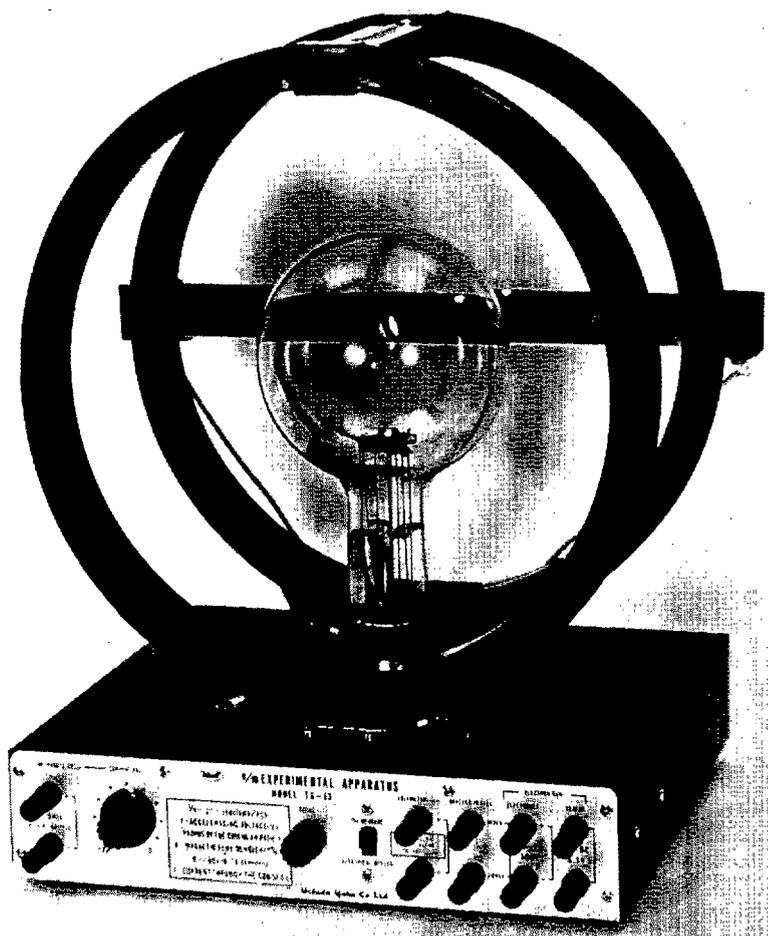


# Trajectoire d'un faisceau électronique dans un champ magnétique et électrique

APPAREIL POUR L'ÉTUDE DES TRAJECTOIRES ÉLECTRONIQUES

Réf. 232 002

Agréé par le Ministère de l'Éducation sous le n° AP 73 12 18



À la fin du siècle, plusieurs expériences décisives furent réalisées, à partir desquelles se dégagèrent une connaissance plus approfondie de la matière.

Deux de ces expériences entraînèrent une caractérisation détaillée de l'électron, une de ces expériences en 1887 par J.-J. Thomson détermina le rapport de la charge de l'électron dans les champs électriques et magnétiques. La seconde expérience, par R. A. Millikan quelques temps plus tard, détermina la charge de l'électron par l'observation de son mouvement dans un champ électrique seul. Ces deux expériences utilisèrent une relation de base de la théorie électromagnétique appelée loi de Lorentz, à savoir :

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} + q_0 (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad [1]$$
$$E = d(U)$$

où  $F$  est la force appliquée à la particule transportant une charge  $q$ , se déplaçant à la vitesse  $v$  dans un champ électrique  $E$  et un champ magnétique  $B$ .

L'appareil 232 002 permet d'étudier le comportement des électrons dans un champ électromagnétique et de faire vérifier en Travaux Pratiques, par vos élèves les phénomènes électromagnétiques au niveau électronique.

Les mesures quantitatives seront facilitées en recouvrant l'appareil en fonctionnement par une housse noire.

- Mise en évidence du phénomène de déflexion électrostatique ou électromagnétique, utilisé dans le tube de téléviseur et celui de l'oscilloscope.
- Mesure quantitative de  $e/m$  : principe du spectromètre de masse.
- Application du produit vectoriel.

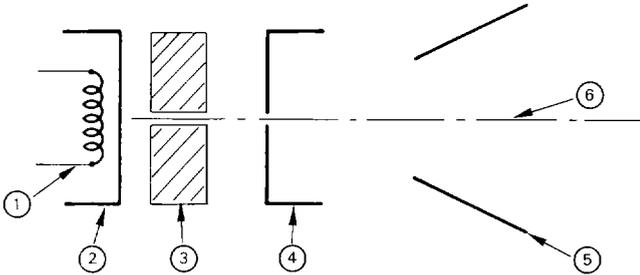
## PRINCIPE DESCRIPTION

### I. PRINCIPE DE L'APPAREIL

L'expérience utilise un tube spécial à l'intérieur duquel la trajectoire du faisceau d'électrons peut être observée directement. Après que le vide ait été fait dans le tube, une petite quantité de mercure se trouve dans le tube à la pression de vapeur saturante.

Les électrons émis par la cathode chaude sont accélérés par la différence de potentiel appliquée entre la cathode et l'ano-

de cylindrique. Certains des électrons émis passent au travers d'un trou circulaire au centre du cylindre, et forment ainsi un faisceau étroit. Ils sont localisés en faisceau rétréci par la grille du tube. Lorsque les électrons possédant une énergie cinétique suffisamment haute quittent la cathode (10,4 eV ou plus), ils entrent en collision avec les atomes de mercure, certains de ces atomes se trouvent ionisés. Lors de la recombinaison de ces ions avec les électrons vagabonds, il y a une émission spectrale du mercure et la couleur bleue caractéristique est observable.



1. Filament de chauffage.
2. Cathode.
3. Grille.
4. Anode.
5. Plaques de diffusion électrostatique.
6. Axe du faisceau électronique.

Étant donné que la recombinaison et l'émission se produisent très près du point d'ionisation initiale, la trajectoire du faisceau d'électrons est visible tant que les électrons se trouvent dans la vapeur du mercure.

### ÉVALUATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE

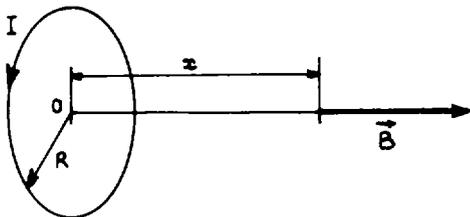
Le champ magnétique produit dans la zone du faisceau électronique par un courant  $I$  circulant dans les bobines peut être calculé.

Pour une unique spire de fil, de rayon  $R$ , le champ le long de l'axe, à une distance  $x$  du plan de la spire, est donné par :

$$B = \frac{\mu_0 R^2 I}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}} \quad [2]$$

$B$  est la composante du champ, normale au plan de la spire, et par conséquent normale à la trajectoire des électrons et la perméabilité est telle que :

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \quad \text{en M.K.S.A.}$$

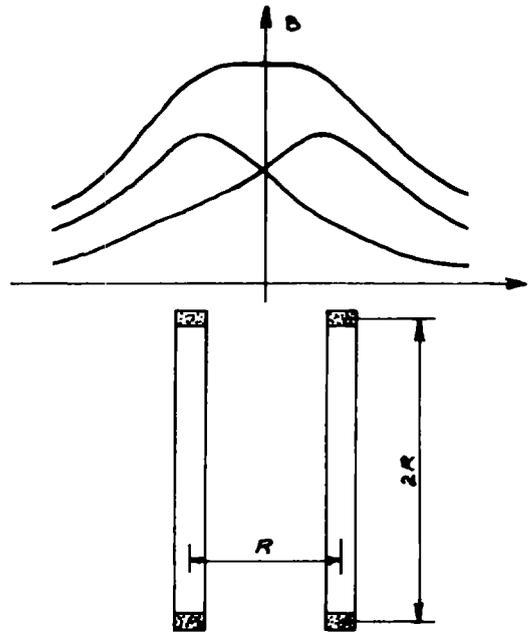


Ici nous avons 2 bobines avec  $N$  tours chacune, placées et alimentées afin d'avoir un champ constant au centre.

D'où :

$$B = \frac{2 \mu_0 R^2 N I}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}} \quad [3]$$

Cette disposition est connue sous le nom de bobines de Helmholtz et a l'avantage de produire un champ uniforme dans la région centrale.



Dans le cas de cet appareil, et pour sa disposition géométrique et sa construction :

$$B = 7,8 \times 10^{-4} I.$$

### FORCE APPLIQUÉE SUR L'ÉLECTRON DANS LE CHAMP MAGNÉTIQUE

#### CALCUL DE $e/m$

Pour un électron se déplaçant le long d'une orbite perpendiculaire à  $B$ , la force centripète, tirée de [1] :  $e v B$  s'équilibre avec la force centrifuge :

$$\frac{m v^2}{r}$$

où  $r$  est le rayon de l'orbite,  $v$  la vitesse et  $e$  et  $m$  sont la charge et la masse de l'électron.

$$e v B = \frac{m v^2}{r} \quad [4]$$

$$v = \frac{e}{m} B r. \quad [5]$$

La vitesse de l'électron peut être calculée à partir de l'énergie potentielle qu'il perd en passant de la cathode au cylindre d'anode :

$$\frac{m v^2}{2} = e V \quad [6]$$

[5] et [6] donnent :

$$\frac{e}{m} = \frac{2 V}{B^2 r^2} \quad [7]$$

soit pour cet appareil :

$$\frac{e}{m} = \frac{2 V}{(7,8 \times 10^{-4} I r)^2} = C \frac{V}{I^2 r^2} \quad [8]$$

$C =$  Constante.

## II. COMPOSITION

L'appareil se compose de trois parties :

- un tube transparent  $\varnothing$  130 mm, avec le canon à électrodes et des plaques défectrices;
- deux bobines de Helmholtz donnant un champ uniforme dans la zone du tube;
- un socle comportant principalement :
  - un potentiomètre de commande de l'intensité du courant dans les bobines;
  - les bornes d'alimentation des bobines;
  - les bornes d'alimentation du tube : filament du canon à électrons, plaques défectrices, tension accélératrice;
  - les bornes pour la mesure de la tension accélératrice.

## III. MISE EN SERVICE

### Montage

Retirer avec précaution le bloc principal du carton d'emballage. En plus du corps principal, il y a le miroir antiparallaxe, une boîte contenant le canon à électrons dans une ampoule sphérique en verre et une ampoule destinée à isoler le dispositif, afin d'observer l'expérience dans des conditions normales d'éclairage (le faisceau se trouve alors dans une zone sombre ce qui augmente notablement sa visibilité).

Introduire le miroir contre la bobine de Helmholtz arrière en utilisant les deux fentes étudiées pour le maintenir avec une pression convenable. Retirer le tube électronique de sa boîte et l'introduire dans le support de tube situé sur le boîtier de l'appareil.

Le tube et son support peuvent tourner d'environ  $90^\circ$ ; placer le tube de façon que l'axe du canon à électrons soit à peu près parallèle au plan des bobines de Helmholtz.

### Branchement et accessoires

Pour rendre les expériences possibles avec cet ensemble, les sources et appareils de mesure suivants sont nécessaires :

1. Pour les boîtes de Helmholtz et les lampes éclairant l'échelle du miroir, une alimentation courant continu 6 à 9 V 2 A
2. L'ensemble « canon à électrons » nécessite une alimentation courant continu ou alternatif de 6,3 V/1,5 A et une haute tension continu de 150 à 300 V/10 mA

## MANIPULATIONS

### I. OBSERVATION DU FAISCEAU ÉLECTRONIQUE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Afin de supprimer l'action due au champ magnétique terrestre, il est conseillé d'orienter l'ensemble. Prendre une boussole et déterminer le plan du champ magnétique terrestre (voir équation [1]) de telle façon qu'il ne s'exerce aucune force sur les électrons.

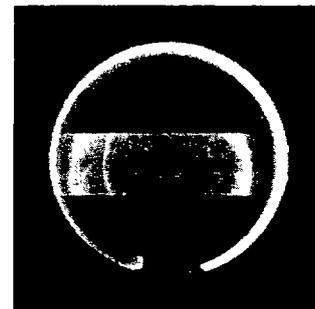
Ensuite mettre le bouton de réglage du courant à zéro et placer l'interrupteur du panneau avant sur la position  $e/m$ . Relier les différentes sources d'alimentation et les appareils de

mesure au montage, en prenant soin d'observer les polarités spécifiées en clair sur le panneau avant. Les ampèremètres devront être branchés en série avec les alimentations et la tension d'accélération contrôlée en utilisant les 2 bornes du panneau avant. Pour l'instant, rien ne doit être relié aux bornes de sortie stipulées « DEFLECT PLATES » (plaques de déviation).

En vue d'observer le faisceau électronique, il est préférable d'avoir l'appareil dans une pièce sombre. Si cela n'est pas possible une enveloppe est prévue afin d'obscurcir les bobines de Helmholtz et, ainsi, le faisceau pourra être observé dans des conditions d'éclairage de laboratoire normales.

Mettre sous tension l'alimentation du chauffage et attendre deux minutes que le filament soit suffisamment chaud. Alimenter l'anode sous 200 V. Un faisceau doit alors être observé sur l'ampoule de verre, face à l'anode.

Ensuite, ajouter le courant des bobines et observer comment le faisceau dévie dans la sphère en verre du tube et éventuellement, faire incurver jusqu'à ce que l'on ait un cercle fermé.



$$\vec{v}_0 \perp \vec{B}$$

Ramener à zéro le courant des bobines et renverser le sens du courant. Noter maintenant que le faisceau est dévié dans la direction opposée, dans le pied du tube. Revenir à zéro et rebrancher en observant la polarité indiquée. En déduire le sens du champ pour les deux polarités.

Faire pivoter l'ampoule de verre et observer la spirale que décrit le faisceau électronique. Justifier ce résultat d'après les termes de la relation vectorielle [1].



$$\vec{v}_0 \text{ non } \perp \vec{B}$$

### II. DÉTERMINATION DU RAPPORT

$$\frac{\text{charge de l'électron}}{\text{masse de l'électron}} = \frac{e}{m}$$

Dans le but de déterminer  $e/m$ , le plan du faisceau électronique doit être rigoureusement parallèle au plan de bobines Helmholtz. Tout d'abord, en utilisant le réglage de focalisation, obtenir un faisceau bien défini (si vous pouvez disposer

d'une source de tension variable pour le chauffage, un faisceau bien défini peut être obtenu en réduisant légèrement la tension d'alimentation du filament). Ensuite, faire pivoter l'ampoule de verre jusqu'à ce que le faisceau électronique, après avoir décrit un cercle complet, passe entre les deux montants qui servent à alimenter en même temps le filament :

Donner à  $I$  une valeur fixe, 1,5 A par exemple. Mesurer  $r$ , le rayon de l'orbite pour les différentes valeurs de la tension d'accélération. Tracer  $V$  en fonction de  $r$  et utiliser la pente du graphe pour déterminer  $e/m$ . Il est à noter que  $r$  est mesuré en utilisant le système à miroir anti-parallaxe; en pratique on obtient deux valeurs  $r_1$  et  $r_2$  et  $r$  est la moyenne arithmétique de ces deux valeurs.

Maintenant donner à  $V$  une valeur fixe, 200 V par exemple. Puis déterminer  $r$  pour les différentes valeurs de  $I$  traversant les bobines de Helmholtz. Tracer  $I$  en fonction de la courbure  $1/r$  et déterminer  $e/m$  à partir de la pente du graphe. Il y a trois grandeurs quantitatives qui permettent de calculer  $e/m$ . Les incertitudes sur chacune d'entre-elles contribuent aux erreurs sur  $e/m$ . Si les incertitudes sur  $e/m$  sont notées respectivement  $(\Delta Z_1)$ ,  $(\Delta Z_2)$  et  $(\Delta Z_3)$  où  $Z = e/m$ , l'erreur définitive sur  $e/m$  est donnée par :

$$Z = \sqrt{(\Delta Z_1)^2 + (\Delta Z_2)^2 + (\Delta Z_3)^2} \quad [9]$$

dans le cas où les incertitudes sont le fait du hasard et non systématiques. Évidemment, si une légère erreur est commise sur l'une des variables indépendantes par exemple sur  $v$  : erreur  $\Delta v$ , l'erreur résultante  $\Delta Z$  sera donnée par :

$$\Delta Z = \frac{\partial Z}{\partial v} \Delta v. \quad [10]$$

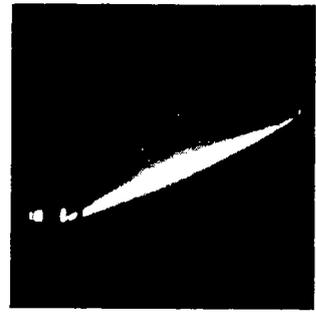
Utiliser les valeurs observées pour calculer  $\Delta Z_1$ ,  $\Delta Z_2$  et  $\Delta Z_3$  en fonction de  $v$ ,  $B$  et  $r$ . Déterminer quelle est la plus importante source d'erreur dans le calcul de  $e/m$ . Discuter les erreurs systématiques possibles.

### III OBSERVATION DU FAISCEAU ÉLECTRONIQUE DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE

L'équation [1] détermine dans le cas général le comportement d'un électron dans un champ électrique. Avec cet appareil, il est possible d'appliquer la relation d'une façon semi-quantitative. En vue de réaliser ces expériences, il est nécessaire de disposer d'une source supplémentaire (type haute tension 200 V environ) et d'un appareil de mesure. Pour la plupart des expériences, il est possible, cependant, d'alimenter en parallèle l'anode accélératrice et les plaques de déflexion.

Placer l'interrupteur du panneau avant sur la position « ELECTRIC DEFLEXION » (déviation électrique). Mettre le bouton de réglage de courant des bobines Helmholtz à zéro.

Donner à  $V$  la valeur approximative de 200 V et noter la déviation du faisceau électronique. Observer comment cette déviation évolue quand la tension varie autour des 200 V. Quel est le signe de la charge des électrons? Observer aussi ce qui se passe quand le faisceau heurte les plaques de déviation, l'expliquer.



Expérience essentiellement quantitative.

On remarquera pour un certain angle d'incidence, la trace des électrons réfléchis sur l'ampoule de verre.

### IV. OBSERVATION DU FAISCEAU ÉLECTRONIQUE SIMULTANÉMENT DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

J.-J. Thomson détermina  $e/m$  par l'observation de l'effet sur son faisceau électronique de l'application simultanée de champs électrique et magnétique. En utilisant cet appareil, il est possible de reprendre cette expérience.

Obtenir tout d'abord un faisceau dévié par les plaques de déflexion électrostatique. Noter le potentiel des plaques  $V$ .

Annuler exactement cette déflexion, en créant une déflexion magnétique de sens inverse (en inversant le courant des bobines). On a alors :

$$\begin{aligned} \Rightarrow F &= 0; \\ E &= B v; \end{aligned}$$

avec :

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

$V$  = potentiel des plaques;

$d$  = distance entre les plaques;

d'où :

$$v = \frac{V}{B d}$$

D'autre part l'énergie de l'électron est :

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

$U$  = tension d'accélération;

$$\Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{1}{2} \frac{v^2}{U};$$

d'où :

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2} \frac{B^2 d^2}{U}$$

Dans l'expérience  $B = 7,8 \cdot 10^{-4} \times I$

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2} \frac{B^2 d^2}{U} = \frac{1}{2} \frac{(7,8 \cdot 10^{-4})^2 \times I^2 \times d^2}{U}$$

Remarque : J.-J. Thomson utilisa une paire de plaques de déviation parallèles ce qui lui a permis d'effectuer une mesure exacte. Pour des raisons technologiques, les plaques de l'appareil ne sont pas parallèles, mais il est cependant possible de réaliser des calculs très approximatifs (à 25 %) en évaluant la distance moyenne d'entre les plaques et la longueur de la trajectoire des électrons.

# TRAJECTOIRE D'UN FAISCEAU ELECTRONIQUE DANS UN CHAMP MAGNETIQUE ET ELECTRIQUE

APPAREIL POUR L'ETUDE DES TRAJECTOIRES ELECTRONIQUES

REF : 232 002

## *ADDITIF A LA NOTICE*

### **INSTRUCTIONS DE SECURITE**

Cet appareil est livré avec une douille de sécurité de terre jaune/verte située à l'arrière de l'appareil et un cordon de terre normalisé. Lorsque l'alimentation utilisée avec cet appareil est équipée d'une douille de terre accessible à l'utilisateur, connecter le cordon de terre entre l'appareil et l'alimentation. Cette connexion est possible avec le nouveau modèle de l'alimentation JEULIN Evolution R700 Réf : 281 092.

D'autre part, il est impératif d'utiliser des cordons de sécurité pour relier l'appareil à l'alimentation, de façon à éviter tout risque de contact direct avec des tensions de niveau élevé (jusqu'à 300 V).