BURHAN

Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme : exercices, entraînement

2ème Année Baccalauréat · Sciences Mathématiques · Physique-Chimie

Version en ligne : burhan.ma/2bac/sciences-mathematiques/physique-chimie/particule-chargee-dans-un-champ-electrique/exercices/entrainement

Chapitre	Palier	Exercices
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme	Entraînement	7

Exercice 1

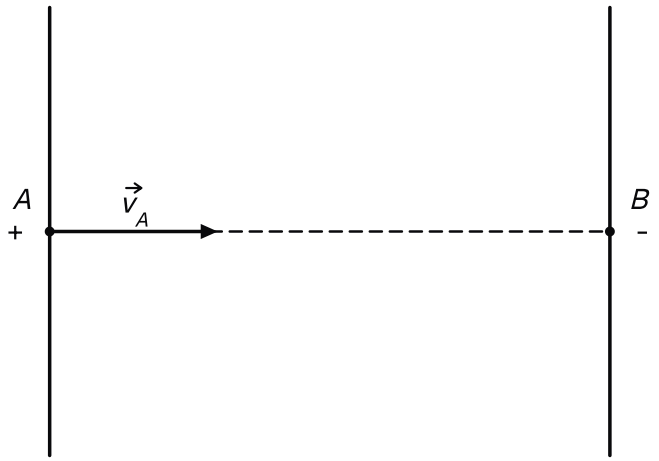
Ions hélium accélérés entre deux plaques

Dans une source d'ions, des ions hélium He^{+}, de charge $+e$, franchissent une petite ouverture de la plaque A avec une vitesse perpendiculaire à la plaque. Ils sont accélérés jusqu'à la plaque B, parallèle à A. Le poids des ions est négligé.

Document. Schéma de la zone d'accélération, sans échelle.

Chaque ion a pour masse $6{,}65 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$ et franchit A à la vitesse $2{,}0 \times 10^{5}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Les plaques sont distantes de $AB = 5{,}0\,\mathrm{cm}$, sous la tension $U_{AB} = 3{,}0\,\mathrm{kV}$.

Donnée : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$.



Zone d'accélération entre les plaques A et B

1.

Préciser le sens du champ électrique entre les plaques et justifier que les ions sont accélérés.

INDICE

Outil : le signe de U_{AB} pour le sens du champ, puis celui du produit $q\,U_{AB}$.

CORRIGÉ

Sens du champ. $U_{AB} > 0$: le champ, perpendiculaire aux plaques, va de A vers B.

Force. La charge est positive : $\vec{F} = e\,\vec{E}$ va aussi de A vers B, dans le sens du mouvement.

Conclusion. Le champ va de A vers B et $q\,U_{AB} > 0$: les ions sont accélérés.

2.

Établir l'expression de l'accélération d'un ion, puis calculer sa valeur.

INDICE

Outil : la deuxième loi de Newton, appliquée à l'ion dans un référentiel galiléen.

CORRIGÉ

Système et référentiel. Un ion, dans le référentiel terrestre supposé galiléen ; seule la force électrique compte.

Loi. $e\,\vec{E} = m\,\vec{a}$, d'où $a = \dfrac{e\,E}{m}$ avec $E = \dfrac{U_{AB}}{AB}$.

Valeurs. $E = \dfrac{3{,}0 \times 10^{3}}{5{,}0 \times 10^{-2}} = 6{,}0 \times 10^{4}\ \mathrm{V \cdot m^{-1}}$, puis

$$\begin{aligned} a &= \frac{1{,}60 \times 10^{-19}}{6{,}65 \times 10^{-27}} \\ &\quad \times 6{,}0 \times 10^{4} \\ a &= 1{,}4 \times 10^{12}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}} \end{aligned}$$

Conclusion. L'accélération des ions est constante, dirigée de A vers B, de valeur $1{,}4 \times 10^{12}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

3.

Calculer la vitesse v_B des ions quand ils atteignent la plaque B.

INDICE

Outil : la vitesse acquise le long d'une ligne de champ, avec une vitesse initiale non nulle.

CORRIGÉ

Relation.

$$\begin{aligned} v_B^2 &= v_A^2 + \frac{2\,e\,U_{AB}}{m} \\ v_B^2 &= 4{,}0 \times 10^{10} \\ &\quad + 1{,}44 \times 10^{11} \\ v_B^2 &= 1{,}84 \times 10^{11} \end{aligned}$$

en $\mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}$.

Vitesse. $v_B = 4{,}3 \times 10^{5}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Conclusion. Les ions atteignent la plaque B à la vitesse $4{,}3 \times 10^{5}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

4.

Calculer la durée de traversée de l'espace entre les plaques.

INDICE

Début : à accélération constante, la vitesse varie proportionnellement au temps. **Point délicat :** garde les valeurs non arrondies.

CORRIGÉ

Vitesse en fonction du temps. $v(t) = v_A + a\,t$: en B, $v_B = v_A + a\,t_B$.

Durée.

$$t_B = \frac{v_B - v_A}{a}$$
$$t_B = \frac{2{,}29 \times 10^{5}}{1{,}44 \times 10^{12}}$$
$$t_B = 1{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{s}$$

Conclusion. Les ions traversent l'espace entre les plaques en $1{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{s}$.

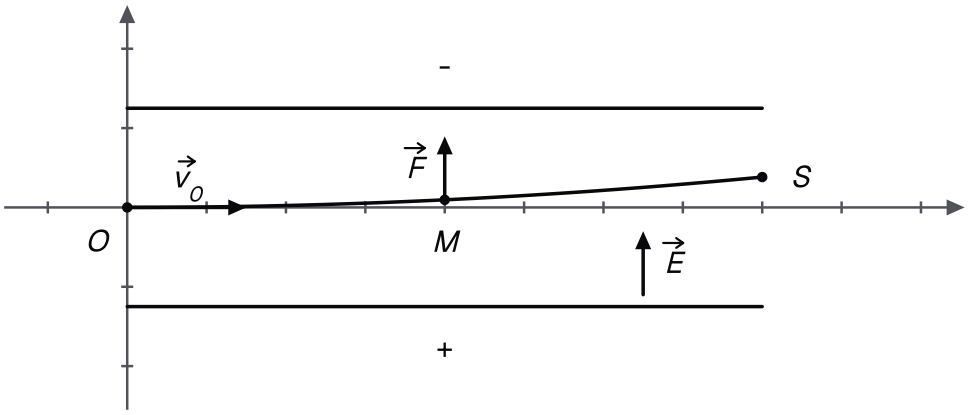
Exercice 2

Trajectoire d'un proton dévié entre deux plaques

Un proton, de charge $+e$ et de masse $m_p = 1{,}00728\,\text{u}$, entre en O entre deux plaques horizontales, à égale distance des deux, avec une vitesse horizontale $\vec{v}_0$ de valeur $v_0 = 1{,}2 \times 10^{6}\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Les plaques ont pour longueur $\ell = 8{,}0\,\text{cm}$ et sont distantes de $d = 2{,}5\,\text{cm}$. La plaque inférieure est positive ; la tension entre les plaques vaut $U = 450\,\text{V}$. On choisit le repère $(O;\vec{i},\vec{j})$: $\vec{i}$ dans le sens de $\vec{v}_0$, $\vec{j}$ vertical vers le haut.

Données : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}\,\text{C}$; $1\,\text{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\text{kg}$; $g = 9{,}80\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Proton dévié entre les plaques, une unité pour 1 cm

1.

Comparer le poids du proton à la force électrique qu'il subit, et conclure.

INDICE

Outil : les valeurs des deux forces, puis leur rapport. **Point délicat :** la masse en kilogrammes.

CORRIGÉ

Force électrique. $E = \dfrac{U}{d} = \dfrac{450}{2{,}5 \times 10^{-2}} = 1{,}8 \times 10^{4}\,\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ et $F = e\,E = 2{,}9 \times 10^{-15}\,\text{N}$.

Poids. $m_p = 1{,}673 \times 10^{-27}\,\text{kg}$, donc $P = m_p\,g = 1{,}64 \times 10^{-26}\,\text{N}$.

Rapport. $\dfrac{P}{F} \approx 5{,}7 \times 10^{-12}$, très petit devant 1.

Conclusion. Le poids du proton est négligeable devant la force électrique.

2.

Établir les équations horaires $x(t)$ et $y(t)$ du mouvement du proton, l'origine des dates étant l'entrée en O.

INDICE

Outil : la deuxième loi de Newton projetée sur les axes. **Ensuite :** deux primitives successives et les conditions initiales.

CORRIGÉ

Système et forces. Le proton, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, soumis à la seule force $\vec{F} = e\,\vec{E}$. La plaque inférieure est positive : $\vec{E}$ est vertical vers le haut, $E_y = +E$.

Accélération. $e\,\vec{E} = m_p\,\vec{a}$, donc $a_x = 0$ et $a_y = \dfrac{e\,E}{m_p}$.

Vitesse. Avec $v_x(0) = v_0$ et $v_y(0) = 0$: $v_x = v_0$ et $v_y = \dfrac{e\,E}{m_p}\,t$.

Position. Avec $x(0) = 0$ et $y(0) = 0$:

$$x(t) = v_0\,t$$
$$y(t) = \frac{e\,E}{2\,m_p}\,t^2$$

Conclusion. Le mouvement est uniforme selon $\vec{i}$ et uniformément accéléré selon $\vec{j}$, avec $x(t) = v_0\,t$ et $y(t) = \dfrac{e\,E}{2\,m_p}\,t^2$.

3.

En déduire l'équation de la trajectoire et calculer son coefficient numérique en unités SI.

INDICE

Début : exprime t en fonction de x à partir de la première équation horaire.

CORRIGÉ

Élimination du temps. $t = \dfrac{x}{v_0}$, reporté dans $y(t)$:

$$y = \frac{e\,E}{2\,m_p\,v_0^2}\,x^2$$

Coefficient. On le note $C = \dfrac{e\,E}{2\,m_p\,v_0^2}$:

$$C = \frac{2{,}88 \times 10^{-15}}{4{,}82 \times 10^{-15}}$$
$$C = 0{,}60\ \mathrm{m^{-1}}$$

Conclusion. La trajectoire est un arc de parabole tourné vers le haut, d'équation $y = 0{,}60\,x^2$, avec x et y en mètres.

4.

Calculer l'ordonnée y_S du point de sortie S et vérifier que le proton sort des plaques.

INDICE

Outil : l'équation de la trajectoire en $x = \ell$, comparée à la moitié de la distance entre les plaques.

CORRIGÉ

Ordonnée de sortie. Avec le coefficient non arrondi :

$$\begin{aligned} y_S &= C\,\ell^2 \\ y_S &= 0{,}5979 \\ &\quad \times (8{,}0\times10^{-2})^2 \\ y_S &= 3{,}8\times10^{-3}\,\mathrm{m} \end{aligned}$$

Condition. $\dfrac{d}{2} = 1{,}25\times10^{-2}\,\mathrm{m}$ et $y_S < \dfrac{d}{2}$.

Conclusion. Le proton sort des plaques en S, $3{,}8\,\mathrm{mm}$ au-dessus de l'axe, sans heurter la plaque supérieure.

5.

Calculer l'angle de déviation φ du proton.

INDICE

Outil : la tangente de l'angle de déviation s'obtient à partir des coordonnées de la vitesse en S.

CORRIGÉ

Vitesse en S. $v_x = v_0$ et $v_y = \dfrac{e\,E\,\ell}{m_p\,v_0}$, donc $\tan\varphi = \dfrac{v_y}{v_0} = \dfrac{2\,y_S}{\ell}$. Ce résultat traduit le passage de la droite de sortie par le milieu des plaques, d'abscisse $\dfrac{\ell}{2}$.

Calcul.

$$\begin{aligned} \tan\varphi &= \frac{2\times3{,}83\times10^{-3}}{8{,}0\times10^{-2}} \\ \tan\varphi &\approx 0{,}096 \\ \varphi &\approx 5{,}5^\circ \end{aligned}$$

Conclusion. Le proton sort dévié vers le haut d'un angle $\varphi \approx 5{,}5^\circ$.

Exercice 3

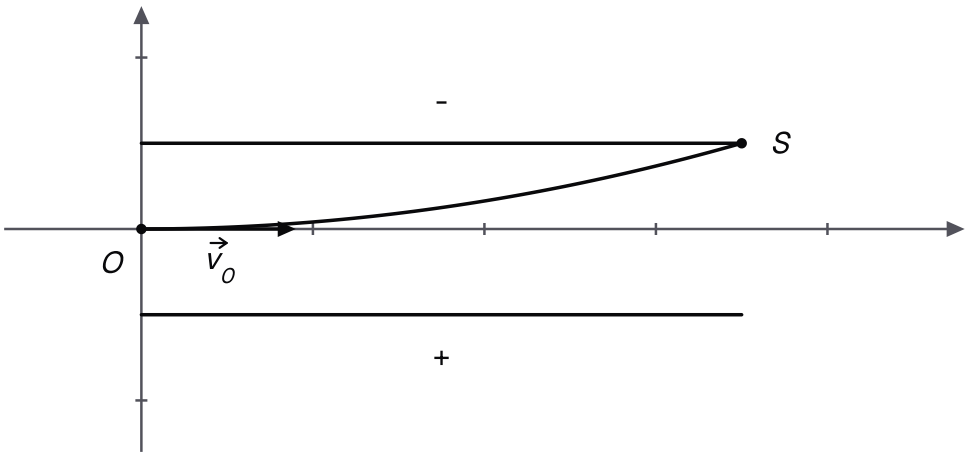
Tension maximale pour que des particules alpha sortent

Des particules alpha, de charge $q = 2e$ et de masse $4{,}00\,\mathrm{u}$, entrent une à une en O, au milieu de deux plaques horizontales de déviation. Leur vitesse est horizontale, $v_0 = 5{,}0 \times 10^{5}\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. La plaque inférieure est positive. Le poids est négligé.

On cherche la plus grande tension U entre les plaques pour laquelle aucune particule ne heurte une plaque.

Document. Trajectoire limite, à l'échelle : une unité pour $1\,\mathrm{cm}$. Les plaques ont pour longueur $\ell = 3{,}5\,\mathrm{cm}$ et sont distantes de $d = 1{,}0\,\mathrm{cm}$.

Données : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$; $1\,\mathrm{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$.



Trajectoire limite d'une particule alpha, une unité pour 1 cm

1.

Exprimer la valeur absolue de l'ordonnée de sortie y_S en fonction de q, U, ℓ, m, d et v_0.

INDICE

Outil : l'ordonnée de sortie des plaques, puis la relation entre le champ et la tension.

CORRIGÉ

Ordonnée de sortie. $|y_S| = \dfrac{q\,E\,\ell^2}{2\,m\,v_0^2}$, la charge étant positive.

Champ. $E = \dfrac{U}{d}$, d'où

$$|y_S| = \frac{q\,U\,\ell^2}{2\,m\,d\,v_0^2}$$

Conclusion. L'ordonnée de sortie est proportionnelle à la tension : $|y_S| = \dfrac{q\,U\,\ell^2}{2\,m\,d\,v_0^2}$.

2.

En déduire l'expression de la tension maximale $U_{\max}$, puis calculer sa valeur.

INDICE

Outil : la condition de sortie des plaques. **Début :** résous l'inégalité en U.

CORRIGÉ

Condition. $|y_S| < \dfrac{d}{2}$ s'écrit $\dfrac{q\,U\,\ell^2}{2\,m\,d\,v_0^2} < \dfrac{d}{2}$, soit

$$U < U_{\max} = \frac{m\,d^2\,v_0^2}{q\,\ell^2}$$

Masse. $m = 4{,}00 \times 1{,}66054 \times 10^{-27} = 6{,}64 \times 10^{-27}\,\text{kg}$.

Valeur.

$$U_{\max} = \frac{1{,}66 \times 10^{-19}}{3{,}92 \times 10^{-22}}$$
$$U_{\max} = 4{,}2 \times 10^{2}\,\text{V}$$

Conclusion. Les particules sortent des plaques tant que $U < 4{,}2 \times 10^{2}\,\text{V}$.

3.

La tension vaut $300\,\text{V}$. Calculer $|y_S|$ et vérifier la cohérence avec la question précédente.

INDICE

Outil : l'expression de la question 1, avec les unités SI.

CORRIGÉ

Calcul.

$$|y_S| = \frac{1{,}18 \times 10^{-19}}{3{,}32 \times 10^{-17}}$$
$$|y_S| = 3{,}5 \times 10^{-3}\,\text{m}$$

Comparaison. $\dfrac{d}{2} = 5{,}0 \times 10^{-3}\,\text{m}$: $|y_S| < \dfrac{d}{2}$, en accord avec $300\,\text{V} < U_{\max}$.

Conclusion. Sous $300\,\text{V}$, les particules sortent à $3{,}5\,\text{mm}$ de l'axe, sans heurter de plaque.

4.

On double la vitesse d'entrée des particules. Comment varie la tension maximale ?

INDICE

Outil : la dépendance de $U_{\max}$ en v_0.

CORRIGÉ

Dépendance. $U_{\max}$ est proportionnelle à v_0^2 : si v_0 double, v_0^2 est multiplié par 4.

Interprétation. Plus rapides, les particules restent moins longtemps dans le champ et sont moins déviées.

Conclusion. La tension maximale est multipliée par 4 et vaut environ $1{,}7 \times 10^{3}\,\text{V}$.

Exercice 4

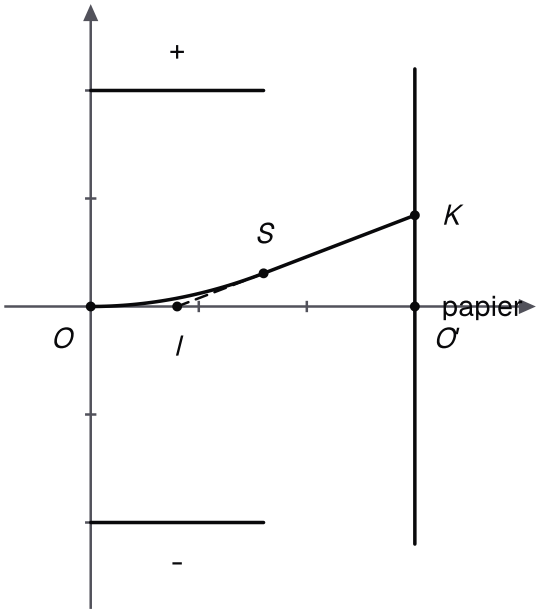
Goutte d'encre déviée vers le papier

Dans une imprimante à jet d'encre continu, des gouttes chargées passent horizontalement entre deux électrodes planes, puis frappent le papier, vertical.

Chaque goutte a une masse $m = 1{,}0 \times 10^{-10}\,\text{kg}$ et porte la charge $q = -1{,}2 \times 10^{-12}\,\text{C}$. Elle entre en O, au milieu des électrodes, à la vitesse $v_0 = 20\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Les électrodes, de longueur $\ell = 1{,}6\,\text{cm}$, sont distantes de $d = 0{,}50\,\text{cm}$; l'électrode supérieure est positive et la tension vaut $U = 500\,\text{V}$. Le papier est à la distance $L = 2{,}2\,\text{cm}$ du milieu I des électrodes.

Donnée : $g = 9{,}80\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Goutte d'encre déviée, ordonnées multipliées par 8

1.

Montrer que le poids de la goutte est négligeable devant la force électrique, en prenant 10^{-2} comme seuil du rapport des deux forces.

INDICE

Outil : le champ entre les électrodes, la valeur de la force électrique, puis le rapport $\dfrac{P}{F}$.

CORRIGÉ

Champ et force. $E = \dfrac{U}{d} = \dfrac{500}{5{,}0 \times 10^{-3}} = 1{,}0 \times 10^{5}\ \mathrm{V \cdot m^{-1}}$ et $F = |q|\,E = 1{,}2 \times 10^{-7}\ \mathrm{N}$.

Poids. $P = m\,g = 9{,}8 \times 10^{-10}\ \mathrm{N}$.

Rapport.

$$\frac{P}{F} \approx 8{,}2 \times 10^{-3}$$

Conclusion. Le rapport est inférieur à 10^{-2} : le poids de la goutte est négligé devant la force électrique.

2.

Vers quelle électrode la goutte est-elle déviée ? Justifier.

INDICE

Outil : le sens du champ entre les électrodes et le signe de la charge.

CORRIGÉ

Champ. $\vec{E}$ va de l'électrode positive vers l'électrode négative : il est vertical vers le bas.

Force. $q < 0$: $\vec{F} = q\,\vec{E}$ est opposée à $\vec{E}$, donc verticale vers le haut.

Conclusion. La goutte est déviée vers l'électrode supérieure, l'électrode positive.

3.

Calculer la valeur absolue de l'ordonnée de sortie y_S de la goutte et vérifier qu'elle sort des électrodes.

INDICE

Début : calcule l'accélération de la goutte, puis sa durée de passage entre les électrodes.

CORRIGÉ

Accélération. $a = \dfrac{|q|\,E}{m} = \dfrac{1{,}2 \times 10^{-7}}{1{,}0 \times 10^{-10}} = 1{,}2 \times 10^{3}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Durée. $t_S = \dfrac{\ell}{v_0} = \dfrac{1{,}6 \times 10^{-2}}{20} = 8{,}0 \times 10^{-4}\ \mathrm{s}$.

Ordonnée de sortie.

$$|y_S| = \frac{1}{2}\,a\,t_S^2$$
$$|y_S| = 3{,}8 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}$$

Conclusion. $|y_S| = 3{,}8 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}$ est inférieure à $\dfrac{d}{2} = 2{,}5 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}$: la goutte sort des électrodes.

4.

Calculer la déflexion $Y = O'K$ de la goutte sur le papier.

INDICE

Outil : la tangente de l'angle de déviation, puis le triangle rectangle formé avec le papier.

CORRIGÉ

Angle de déviation. $\tan\varphi = \dfrac{a\,t_S}{v_0} = \dfrac{0{,}96}{20} = 0{,}048$.

Déflexion.

$$Y = L\,\tan\varphi$$
$$Y = 2{,}2 \times 10^{-2} \times 0{,}048$$
$$Y = 1{,}1 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}$$

Conclusion. La goutte frappe le papier $1{,}1\ \mathrm{mm}$ au-dessus de l'axe d'entrée.

5.

L'imprimante dépose les gouttes à des hauteurs différentes en changeant leur charge, sans changer la tension. Sur un banc de contrôle, on a mesuré la déflexion de gouttes de charges différentes.

charge en valeur absolue ($10^{-12}\,\mathrm{C}$)	$1{,}0$	$1{,}4$	$1{,}8$	$2{,}2$
Y (mm)	$0{,}89$	$1{,}22$	$1{,}60$	$1{,}93$

Ces mesures confirment-elles que Y est proportionnelle à $|q|$? En déduire la charge qui place une goutte $1{,}20\,\mathrm{mm}$ au-dessus de l'axe.

INDICE

Outil : le quotient $\dfrac{Y}{|q|}$ pour chaque mesure.

CORRIGÉ

Quotients. En mm par $10^{-12}\,\mathrm{C}$: $0{,}89$; $0{,}87$; $0{,}89$; $0{,}88$.

Proportionnalité. Les quotients restent proches de $0{,}88$, à la précision des lectures près : Y est proportionnelle à $|q|$, comme le prévoit $Y = \dfrac{|q|\,E\,\ell\,L}{m\,v_0^2}$.

Charge cherchée. Avec le quotient moyen $0{,}882$:

$$|q| = \frac{1{,}20}{0{,}882} \times 10^{-12}$$
$$|q| = 1{,}4 \times 10^{-12}\,\mathrm{C}$$

Conclusion. Les mesures confirment la proportionnalité ; une goutte de charge $-1{,}4 \times 10^{-12}\,\mathrm{C}$ frappe le papier $1{,}20\,\mathrm{mm}$ au-dessus de l'axe.

Exercice 5

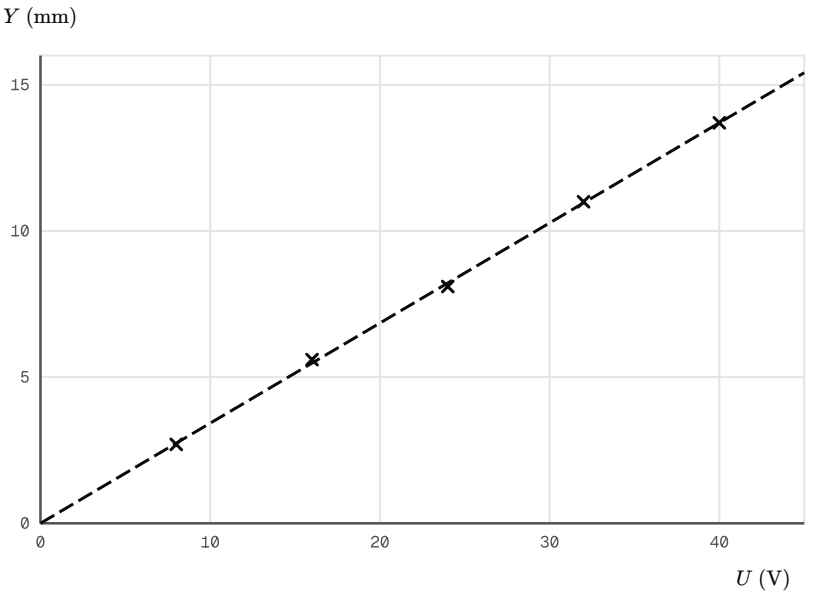
Mesure du rapport de la charge à la masse de l'électron

En travaux pratiques, un faisceau d'électrons entre entre deux plaques horizontales de déviation avec une vitesse $v_0 = 2{,}00 \times 10^{7}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, mesurée par ailleurs. Les plaques ont pour longueur $\ell = 4{,}50\ \mathrm{cm}$ et sont distantes de $d = 1{,}40\ \mathrm{cm}$; l'écran est à $L = 25{,}0\ \mathrm{cm}$ du milieu des plaques.

Document. Déflexion Y du spot en fonction de la tension U entre les plaques.

U (V)	Y (mm)
8	2,7
16	5,6
24	8,1
32	11,0
40	13,7

Données : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$.



Déflexion du spot en fonction de la tension

1.

Proposer un protocole qui permet d'obtenir ces mesures : réglages à garder fixes, grandeur à faire varier, repérage de la déflexion.

INDICE

Début : liste ce qui fixe la vitesse et la géométrie. **Ensuite :** dis comment lire Y sur l'écran.

CORRIGÉ

Réglages fixes. La tension du canon, donc v_0, la position des plaques et celle de l'écran.

Repère. Sans tension entre les plaques, on repère la position O' du spot sur l'écran gradué.

Mesures. On applique plusieurs tensions U, mesurées au voltmètre, et on lit chaque fois la distance Y du spot à O'.

Conclusion. On fait varier la seule tension U, on relève Y pour chaque valeur, puis on trace Y en fonction de U.

2.

Justifier que Y est proportionnelle à U. Déterminer le coefficient directeur k de la droite de modélisation, en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{V}^{-1}$, à partir de deux points de cette droite éloignés l'un de l'autre.

INDICE

Outil : la forme de la droite de modélisation ; lis ses points sur la droite, pas dans le tableau.

CORRIGÉ

Proportionnalité. Les points sont presque alignés sur une droite qui passe par l'origine : $Y = k\,U$.

Coefficient. La droite passe par l'origine et par le point $(35\,\mathrm{V}\,;\,12{,}0\,\mathrm{mm})$, qui n'est pas une mesure :

$$k \approx \frac{12{,}0\times10^{-3}}{35}$$
$$k \approx 3{,}43\times10^{-4}\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{V}^{-1}$$

Conclusion. La déflexion est proportionnelle à la tension, avec $k \approx 3{,}43\times10^{-4}\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{V}^{-1}$.

3.

À l'aide de l'expression de la déflexion électrostatique, exprimer le rapport $\dfrac{e}{m_e}$ en fonction de k, d, v_0, ℓ et L.

INDICE

Outil : la déflexion sur l'écran écrite en fonction de la tension entre les plaques.

CORRIGÉ

Identification. Pour un électron, $|q| = e$ et $Y = \dfrac{e\,\ell\,L}{m_e\,d\,v_0^2}\,U$, donc $k = \dfrac{e\,\ell\,L}{m_e\,d\,v_0^2}$.

Expression.

$$\frac{e}{m_e} = \frac{k\,d\,v_0^2}{\ell\,L}$$

Conclusion. Le rapport cherché s'écrit $\dfrac{e}{m_e} = \dfrac{k\,d\,v_0^2}{\ell\,L}$.

4.

Calculer la valeur expérimentale du rapport $\dfrac{e}{m_e}$.

INDICE

Point délicat : toutes les longueurs en mètres et la vitesse au carré.

CORRIGÉ

Valeurs. $k \approx 3{,}43 \times 10^{-4}\ \mathrm{m \cdot V^{-1}}$, $d = 1{,}40 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}$, $v_0^2 = 4{,}00 \times 10^{14}\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}$, $\ell\,L = 0{,}01125\ \mathrm{m^2}$.

Calcul.

$$\frac{e}{m_e} \approx \frac{1{,}92 \times 10^{9}}{0{,}01125}$$
$$\frac{e}{m_e} \approx 1{,}71 \times 10^{11}$$

en $\mathrm{C \cdot kg^{-1}}$.

Conclusion. La mesure donne $\dfrac{e}{m_e} \approx 1{,}71 \times 10^{11}\ \mathrm{C \cdot kg^{-1}}$.

5.

Comparer ce résultat à la valeur calculée avec les données, par un écart relatif, puis citer deux sources d'écart.

INDICE

Outil : l'écart relatif, rapport de la différence des deux valeurs à la valeur attendue.

CORRIGÉ

Valeur attendue. $\dfrac{e}{m_e} = \dfrac{1{,}60 \times 10^{-19}}{9{,}11 \times 10^{-31}} = 1{,}76 \times 10^{11}\ \mathrm{C \cdot kg^{-1}}$.

Écart relatif. $\dfrac{|1{,}71 \times 10^{11} - 1{,}76 \times 10^{11}|}{1{,}76 \times 10^{11}} \approx 2{,}8\,\%$.

Sources d'écart. La lecture de la position du spot, à environ $0{,}5\ \mathrm{mm}$ près, soit près de $4\,\%$ sur une déflexion de $14\ \mathrm{mm}$; l'incertitude sur v_0, qui intervient au carré ; le champ non uniforme aux bords des plaques.

Conclusion. L'écart, voisin de $3\,\%$, reste inférieur à la précision des lectures : la mesure est compatible avec la valeur attendue.

Exercice 6

Électron freiné par un champ entre deux plaques

Un faisceau d'électrons, de charge $-e$, franchit une petite ouverture de la plaque A avec une vitesse perpendiculaire à la plaque.

Leur vitesse vaut $v_A = 4{,}0 \times 10^{6}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Il se dirige vers la plaque B, parallèle à A et distante de $AB = 3{,}2\ \mathrm{cm}$. Le poids est négligé. Dans les questions 1, 2, 3 et 5, la tension vaut $U_{AB} = 60\ \mathrm{V}$.

Document. La plaque B est reliée à un microampèremètre, qui mesure l'intensité I du courant dû aux électrons reçus. On relève I pour plusieurs tensions U_{AB}.

U_{AB} (V)	0	20	40	44	45	46	47	50
I (μA)	2,0	2,0	2,0	1,8	1,3	0,4	0,0	0,0

Données : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$.

1.

Montrer que l'électron est freiné entre les plaques.

INDICE

Outil : le sens du champ, puis celui de la force sur une charge négative.

CORRIGÉ

Champ. $U_{AB} > 0$: $\vec{E}$ va de A vers B, dans le sens du mouvement.

Force. $q = -e < 0$: $\vec{F} = -e\,\vec{E}$ va de B vers A, en sens contraire du mouvement.

Conclusion. La force électrique s'oppose au mouvement ($q\,U_{AB} < 0$) : l'électron est freiné.

2.

Établir l'expression de la valeur de l'accélération de l'électron, puis la calculer.

INDICE

Outil : la deuxième loi de Newton ; projette-la sur l'axe orienté de A vers B.

CORRIGÉ

Système et référentiel. L'électron, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, soumis à la seule force électrique.

Projection. Sur l'axe orienté de A vers B : $-e\,E = m_e\,a_x$, avec $E = \dfrac{U_{AB}}{AB}$.

Valeur.

$$|a_x| = \frac{e\,U_{AB}}{m_e\,AB}$$
$$|a_x| = \frac{9{,}60 \times 10^{-18}}{2{,}915 \times 10^{-32}}$$
$$|a_x| = 3{,}3 \times 10^{14}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$$

Conclusion. L'accélération est constante, dirigée de B vers A, de valeur $3{,}3 \times 10^{14}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

3.

Calculer la distance parcourue par l'électron avant de s'arrêter. Atteint-il la plaque B ?

INDICE

Outil : la relation entre le carré de la vitesse et la position, à accélération constante, pour une vitesse finale nulle.

CORRIGÉ

Relation. $v^2 = v_A^2 + 2\,a_x\,x$, avec $v = 0$ à l'arrêt et $a_x < 0$:

$$x_{\text{arr}} = \frac{v_A^2}{2\,|a_x|}$$
$$x_{\text{arr}} = \frac{1{,}6 \times 10^{13}}{6{,}59 \times 10^{14}}$$
$$x_{\text{arr}} = 0{,}024\,\text{m}$$

Comparaison. $x_{\text{arr}} < AB = 3{,}2 \times 10^{-2}\,\text{m}$.

Conclusion. L'électron s'arrête à $2{,}4\,\text{cm}$ de la plaque A : il n'atteint pas la plaque B.

4.

Calculer la tension seuil U_s au-delà de laquelle les électrons n'atteignent plus la plaque B. Expliquer comment le document permet de repérer ce seuil, puis comparer la valeur lue à la valeur calculée.

INDICE

Outil : la vitesse acquise le long d'une ligne de champ, pour un électron qui s'arrête juste en B.

CORRIGÉ

Calcul. L'électron s'arrête juste en B si $0 = v_A^2 - \dfrac{2\,e\,U_{AB}}{m_e}$, soit

$$U_s = \frac{m_e\,v_A^2}{2\,e}$$
$$U_s = \frac{1{,}46 \times 10^{-17}}{3{,}20 \times 10^{-19}}$$
$$U_s = 46\,\text{V}$$

Repérage. Tant que les électrons atteignent B, le microampèremètre indique un courant. On augmente U_{AB} pas à pas et on note la tension pour laquelle le courant s'annule.

Lecture. Le courant chute entre 44 et $47\,\text{V}$ et s'annule vers 46 à $47\,\text{V}$: les vitesses des électrons sont un peu dispersées.

Conclusion. Le seuil lu, voisin de $46\,\text{V}$, est en accord avec la valeur calculée $U_s = 46\,\text{V}$; avec $60\,\text{V}$, aucun électron n'atteint B.

5.

Décrire le mouvement de l'électron après son arrêt, et donner sa vitesse quand il repasse par l'ouverture de A.

INDICE

Début : la force reste la même après l'arrêt. **Ensuite :** applique la même relation entre la vitesse et la position au retour.

CORRIGÉ

Après l'arrêt. La force, dirigée vers A, ne change pas : l'électron repart vers A d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

Retour en A. Il parcourt la distance x_{arr} à partir du repos avec la même accélération : $v^2 = 2\,|a_x|\,x_{\text{arr}} = v_A^2$.

Conclusion. L'électron revient en A en sens inverse, avec une vitesse de valeur $4{,}0 \times 10^{6}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Exercice 7

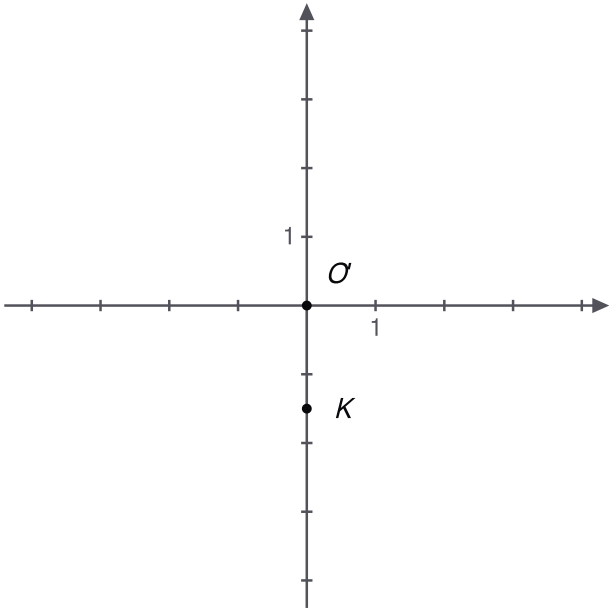
Sensibilité verticale d'un oscilloscope

Dans un oscilloscope analogique, les électrons entrent entre les plaques de déviation verticale Y_1 (en haut) et Y_2 (en bas) avec une vitesse horizontale v_0. On note $U = U_{Y_1Y_2}$ la tension entre les plaques ; le poids est négligé.

Document. L'écran gradué en centimètres, avec la position K du spot pendant une mesure, et les caractéristiques du tube.

Grandeur	Valeur
vitesse d'entrée v_0	$2{,}6 \times 10^{7}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
longueur ℓ des plaques	$2{,}8\ \text{cm}$
distance d des plaques	$0{,}75\ \text{cm}$
distance L à l'écran	$18\ \text{cm}$

Données : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C}$; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$.



Écran de l'oscilloscope, une graduation par centimètre

1.

La déflexion s'écrit $Y = k\,|U|$. Exprimer k, puis calculer sa valeur en $\mathrm{m \cdot V^{-1}}$.

INDICE

Outil : la déflexion électrostatique sur un écran, pour une charge de valeur absolue e.

CORRIGÉ

Expression. $k = \dfrac{e\,\ell\,L}{m_e\,d\,v_0^2}$.

Valeur.

$$k = \frac{8{,}06 \times 10^{-22}}{4{,}62 \times 10^{-18}}$$
$$k = 1{,}7 \times 10^{-4}\,\mathrm{m \cdot V^{-1}}$$

Conclusion. Le coefficient de déflexion vaut $k = 1{,}7 \times 10^{-4}\,\mathrm{m \cdot V^{-1}}$.

2.

La sensibilité verticale est la tension qui déplace le spot d'un centimètre. Calculer sa valeur en $\mathrm{V \cdot cm^{-1}}$.

INDICE

Outil : que représente $\dfrac{1}{k}$, et dans quelle unité s'exprime-t-il ?

CORRIGÉ

Inverse. $\dfrac{1}{k} = 5{,}7 \times 10^{3}\ \mathrm{V \cdot m^{-1}}$: il faut $5{,}7 \times 10^{3}$ volts par mètre de déflexion, sans rapport avec la valeur du champ entre les plaques.

Par centimètre.

$$s = \frac{5{,}7 \times 10^{3}}{100}$$
$$s = 57\,\mathrm{V \cdot cm^{-1}}$$

Conclusion. Il faut environ $57\ \mathrm{V}$ entre les plaques pour déplacer le spot d'un centimètre.

3.

De quel côté du centre de l'écran le spot se forme-t-il quand $U > 0$? Et quand $U < 0$?

INDICE

Outil : le sens du champ selon le signe de $U_{Y_1Y_2}$, puis le sens de la force sur un électron.

CORRIGÉ

Cas $U > 0$. Y_1 est au potentiel le plus élevé : $\vec{E}$ va de Y_1 vers Y_2, vers le bas. L'électron subit une force vers le haut.

Cas $U < 0$. Le champ est vers le haut et la force vers le bas.

Conclusion. Le spot se forme au-dessus du centre quand $U > 0$, au-dessous quand $U < 0$.

4.

On observe le spot en K sur le document. Lire sa distance au centre de l'écran, puis en déduire la tension U, avec son signe.

INDICE

Outil : la relation entre la déflexion et la tension. **Point délicat :** le côté du spot donne le signe.

CORRIGÉ

Lecture. Le spot est sur l'axe vertical, une graduation et demie au-dessous du centre : $Y = 1{,}5\,\text{cm}$.

Valeur absolue. Avec la valeur non arrondie de k :

$$|U| = \frac{Y}{k} = \frac{1{,}5 \times 10^{-2}}{1{,}75 \times 10^{-4}}$$
$$|U| = 86\,\text{V}$$

Signe. Le spot est au-dessous du centre : $U < 0$.

Conclusion. La tension entre les plaques vaut $U_{Y_1Y_2} = -86\,\text{V}$.

5.

Calculer la plus grande valeur de $|U|$ pour laquelle les électrons sortent des plaques, et la déflexion correspondante.

INDICE

Outil : la condition de sortie des plaques, avec l'ordonnée de sortie exprimée en fonction de U.

CORRIGÉ

Condition. $\dfrac{e\,|U|\,\ell^2}{2\,m_e\,d\,v_0^2} < \dfrac{d}{2}$, soit $|U| < \dfrac{m_e\,d^2\,v_0^2}{e\,\ell^2}$.

Valeur.

$$|U|_{\max} = \frac{3{,}46 \times 10^{-20}}{1{,}25 \times 10^{-22}}$$
$$|U|_{\max} = 2{,}8 \times 10^{2}\,\text{V}$$

Déflexion. $Y_{\max} = k\,|U|_{\max} \approx 0{,}048\,\text{m}$.

Conclusion. Les électrons sortent des plaques tant que $|U| < 2{,}8 \times 10^{2}\,\text{V}$, soit une déflexion d'au plus $4{,}8\,\text{cm}$ environ.