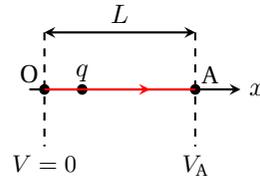


TD11 : Mouvements dans les champs \vec{E} et \vec{B}

★ Exercice 1 : Accélération d'une particule chargée

Une particule de charge q , de masse m , de vitesse initiale nulle, est située en un point O d'une grille plane de potentiel électrique nul. La particule est accélérée en direction d'un point A d'une seconde grille plane, située à une distance $L = 5$ cm de la première et portée au potentiel V_A . Le champ électrique est supposé uniforme entre les deux grilles.



1. En vous appuyant sur un raisonnement énergétique, exprimer la vitesse v de la particule au point A. Quels sont les signes respectifs possibles de q et V_A ?
2. Exprimer le champ électrique \vec{E} en fonction de V_A et L . Exprimer la durée τ du trajet entre les deux grilles.
3. AN : Calculer v et τ dans les deux cas suivants :
 - a) $V_A = 100$ V, $q = -1,60 \cdot 10^{-19}$ C et $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg
 - b) $V_A = -3000$ V, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C et $m = 6,64 \cdot 10^{-26}$ kg (ion argon)

★ Exercice 2 : Cyclotron de Lawrence

Le premier cyclotron fut construit en 1932 par Lawrence à Berkeley (Californie). L'appareil avait un rayon de 14 cm et communiquait à des protons une énergie cinétique de 1,2 MeV. La différence de potentiel était de 4000 V au moment du passage du faisceau entre les dees (parties circulaires dans lesquelles existe un champ magnétique uniforme, indépendant du temps et transversal).

Quelles étaient : la vitesse maximale des protons (on pourra utiliser la formule classique de l'énergie cinétique) ? La tension accélératrice qu'il aurait fallu utiliser pour communiquer la même énergie dans un accélérateur linéaire ? La fréquence du champ accélérateur ? Le champ magnétique ?

★ Exercice 3 : Mouvements dans des champs \vec{E} et \vec{B}

Dans chacun des cas ci-dessous, décrire l'allure de la trajectoire suivie par la particule chargée.

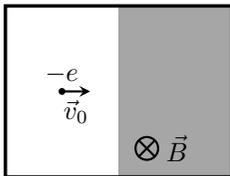


Figure 1

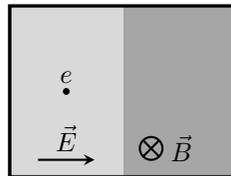


Figure 2

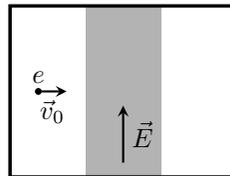


Figure 3

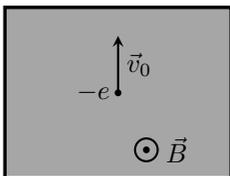


Figure 4

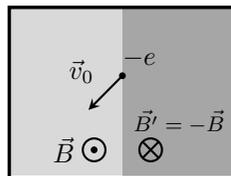


Figure 5

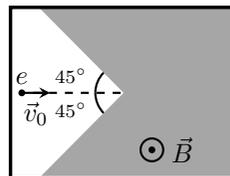
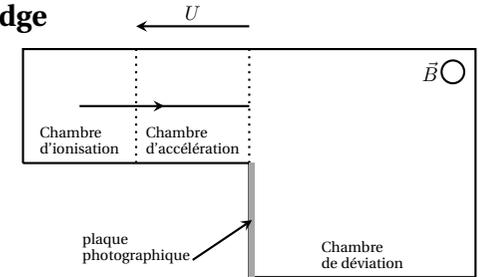


Figure 6

★ Exercice 4 : Spectrographe de Bainbridge

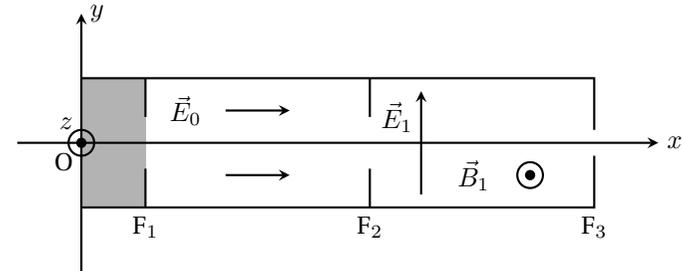
Dans ce spectrographe, des ions $^{39}\text{K}^+$ et $^{41}\text{K}^+$ sont accélérés sous l'action d'une tension U (on néglige la vitesse des ions à l'entrée de la chambre d'accélération), pénètrent ensuite dans un champ magnétostatique uniforme transversal \vec{B} et viennent impressionner la plaque photographique.



1. Quel doit être le signe de U pour que les ions atteignent la chambre de déviation ?
2. Quel doit être le sens du champ \vec{B} pour que les ions atteignent la plaque photographique ?
3. Calculer la distance d séparant les traces des deux isotopes sur la plaque.

AN : $B = 0,10$ T, $U = 10$ kV, $m_p \simeq m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C.

★ Exercice 5 : Filtre de vitesse



Une source émet des ions mercure issus de deux isotopes différents : $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ et $^{202}_{80}\text{Hg}^{2+}$. Ces ions se déplacent dans la direction (Ox) et passent par une fente F_1 pour entrer dans un accélérateur où règne un champ électrostatique uniforme $\vec{E}_0 = E_0 \vec{u}_x$. On note U la différence de potentiel entre les fentes F_1 et F_2 . Après avoir traversé la fente F_2 , les ions entrent dans un filtre de vitesse où ils sont soumis à la superposition d'un champ électrostatique uniforme $\vec{E}_1 = E_1 \vec{u}_y$ et d'un champ magnétostatique uniforme $\vec{B}_1 = B_1 \vec{u}_z$ orthogonal à \vec{E}_1 . Une dernière fente F_3 permet de sélectionner les ions qui ont une trajectoire rectiligne dans cette zone.

1. Quel doit être le signe de E_0 pour que les ions soient accélérés dans la première zone ?
2. Calculer les vitesses v_{01} et v_{02} respectivement des ions $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ et $^{202}_{80}\text{Hg}^{2+}$ à la sortie de l'accélérateur.
3. On note $\vec{v} = v \vec{u}_x$ la vitesse d'un ion entrant dans le filtre de vitesse. Exprimer la relation que doivent vérifier v , E_1 et B_1 pour que sa trajectoire reste rectiligne.
4. Calculer la valeur du champ électrique E_1 à imposer afin que seuls les ions $^{200}_{80}\text{Hg}^{2+}$ émergent du filtre. Même question pour les ions $^{202}_{80}\text{Hg}^{2+}$.

Données : $U = 1,000 \cdot 10^4$ V, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, masse moyenne d'un nucléon : $m = 1,674 \cdot 10^{-27}$ kg, $B_1 = 0,3830$ T.

TD11 : Mouvements dans les champs \vec{E} et \vec{B}

★★ Exercice 6 : Mouvement dans des champs \vec{E} et \vec{B} orthogonaux

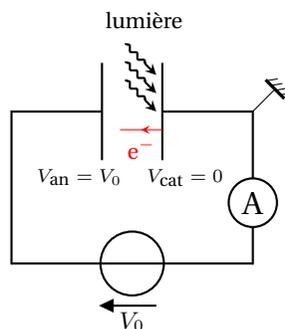
Dans un référentiel (\mathcal{R}) de base $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$, une particule M, de masse m , de charge q , se trouve à la date $t = 0$ en O, au repos, dans une région où règne les champ uniformes et indépendants du temps : $\vec{E} = E\vec{u}_y$ et $\vec{B} = B\vec{u}_z$.

1. Etablir les équations du mouvement de M. En déduire $z(t)$.
2. Montrer que $v_x(t)$ et $v_y(t)$ sont solutions d'une équation d'oscillateur harmonique dont on donnera la pulsation propre ω_0 .
3. Calculer la vitesse moyenne de la particule suivant (Ox), appelée vitesse de dérive \vec{v}_D .
4. Déterminer la trajectoire de la particule, sous forme paramétrique $(x(\xi), y(\xi))$, en supposant ici $q > 0$ et en utilisant la variable réduite $\xi = \omega_0 t$. On notera $R = \frac{mv_D}{qB}$.

★★ Exercice 7 : Expérience de Millikan

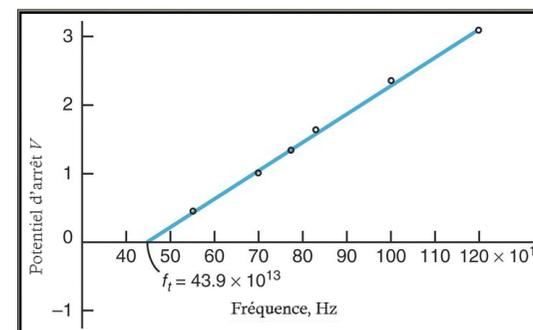
Un métal éclairé avec une onde lumineuse de fréquence suffisamment élevée éjecte des électrons. Ce phénomène découvert par Heinrich Hertz en 1887 porte le nom d'**effet photoélectrique**. En 1905 Einstein proposa dans un article de la revue scientifique *Zeitschrift für physik* une interprétation de l'effet photoélectrique fondée sur la **quantification de l'énergie lumineuse**. L'américain Robert Millikan, qui n'était pas convaincu par cette explication, voulu démontrer par l'expérience qu'Einstein se trompait, ce qu'il tenta de faire en 1916. Travaillant avec rigueur et minutie, il obtient des résultats qui lui permirent de trancher la question sans équivoque et, contrairement à ce à quoi il s'attendait, **ce fut une confirmation des idées d'Einstein** ! L'expérience de Millikan, désormais célèbre, constitue l'un des premiers succès marquants de la théorie quantique. Einstein reçut le prix Nobel de physique en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique. Dans cet exercice on s'intéresse à l'expérience réalisée par Millikan.

Une électrode de métal (la cathode), dont le potentiel électrique est arbitrairement fixé à zéro, est éclairée par une onde lumineuse afin de produire des photoélectrons (nom donné aux électrons arrachés du métal par effet photoélectrique). On suppose que les photoélectrons ont une énergie cinétique comprise entre 0 et une valeur maximale $e_{c,max}$ quand ils quittent la cathode. L'expérience de Millikan consiste à mesurer la valeur de $e_{c,max}$. Pour cela une autre électrode (l'anode), placée en face de la première, est portée au potentiel V_0 .



Le rôle de l'anode est de **repousser les électrons** en provenance de la cathode. Si $|V_0|$ est faible les photoélectrons les plus rapides peuvent malgré tout atteindre l'anode et on observe avec un ampèremètre de précision (appelé galvanomètre) un courant dans le circuit. Si $|V_0|$ est suffisamment élevée alors aucun photoélectron n'atteint la cathode et le courant est nul dans le circuit. En mesurant le potentiel limite $V_{0,lim}$ (appelé *potentiel d'arrêt*) on peut en déduire la valeur de $e_{c,max}$.

1. Quel doit être le signe de V_0 pour que les photoélectrons soient repoussés par l'anode ?
2. Déterminer une relation entre $V_{0,lim}$ et $e_{c,max}$. On néglige toute autre action que la force électrique exercée sur les photoélectrons par le champ \vec{E} supposé stationnaire et uniforme existant entre les électrodes.
3. Selon Einstein les photoélectrons ont une énergie cinétique maximale $e_{c,max} = h\nu - W$ où h est la constante de Planck, ν est la fréquence de l'onde lumineuse qui éclaire la cathode et la constante W , appelée *travail d'extraction*, est l'énergie minimale qu'il faut fournir à un atome de la cathode pour lui arracher un électron. Pour tester le modèle d'Einstein Millikan mesura le potentiel d'arrêt pour différentes valeurs de la fréquence ν de l'onde lumineuse. Le graphe ci-contre illustre les résultats obtenus ; la fréquence ν de l'onde lumineuse est indiquée en abscisses (exprimée en Hz) et la valeur absolue du potentiel d'arrêt $|V_{0,lim}|$ est représentée en ordonnées (exprimé en V).



Montrer que les mesures de Millikan sont compatibles avec l'hypothèse d'Einstein. À partir du graphe déterminer la valeur de la constante de Planck et celle du travail d'extraction pour la cathode utilisée par Millikan.

Donnée : charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Solutions :

Ex1 : 1. $v = \sqrt{\frac{-2qV_A}{m}}$ 2. $\vec{E} = -\frac{V_A}{L}\vec{u}_x, \tau = L\sqrt{\frac{2m}{-qV_A}}$ 3. a) $v = 5,96 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \tau = 1,69 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

b) $v = 1,20 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \tau = 8,32 \cdot 10^{-7} \text{ s}$

Ex2 : $v_{max} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $U = 1,2 \cdot 10^6 \text{ V}$ $f = 1,7 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ $B = 1,1 \text{ T}$

Ex4 : $d = 4,6 \text{ cm}$

Ex5 : 2. $v_{01} = 1,383 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_{02} = 1,377 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 3. $v = \frac{E_1}{B_1}$

4. $E_1 = 5,299 \cdot 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ $E_1 = 5,272 \cdot 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$

Ex6 : 1. $z(t) = 0$ 2. $\omega_0 = \left| \frac{qB}{m} \right|$ 3. $\vec{v}_D = \frac{E}{B}\vec{u}_x$ 4. $x(\xi) = R(\xi - \sin \xi)$, $y(\xi) = R(1 - \cos \xi)$

Ex7 : 2. $e_{c,max} = -eV_{0,min}$

3. $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $W = 1,8 \text{ eV}$