

Mouvement de particules chargées

Travaux Dirigés

Méthodologie : Comment travailler les exercices ?

Avant la séance de TD :

- Sur une feuille de brouillon, avec un crayon à la main et le chapitre ouvert sous les yeux.
- Essayer des « trucs » même si cela n'aboutit pas.
- Faire des schémas complets et suffisamment grands.
- Ne rien écrire sur l'énoncé de TD afin de pouvoir refaire les exercices après la correction en classe.
- Réfléchir environ 10 à 15 min sur chaque exercice demandé. Si vous bloquez complètement sur une question/un exercice, passez à la suite au bout de 10 min, et me poser des questions.

Après la séance de TD :

- Refaire les exercices corrigés ensemble, sans regarder le corrigé dans un premier temps.
- Une fois l'exercice terminé ou si vous êtes totalement bloqué, reprendre avec le corrigé.

Echauffement : Savoir-faire

Cahier d'entraînement : fiche n°15 : 15.5 à 15.11

Savoir-faire 1 - Déterminer la vitesse d'une particule en sortie d'une différence de potentiel

On considère deux plaques chargées : le potentiel en $x = 0$ est V_1 et le potentiel en $x = d$ est V_2 tels que $V_1 > V_2$. Un proton est à l'instant $t = 0$ sans vitesse à la position $x = 0$.

Données : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $U = 700 \text{ V}$.

- Q1.** Grâce à un bilan énergétique, déterminer sa vitesse en sortie de l'accélérateur.
- Q2.** Les lois de la mécanique classique utilisées en classe ne sont valables que si la vitesse du système est inférieure au dixième de la vitesse de la lumière dans le vide. Est-ce le cas ici ? Conclure.

Savoir-faire 2 - Déterminer le rayon de la trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique stationnaire et uniforme

On considère un proton de vitesse initiale $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_x$ dans une zone de champ magnétique $\vec{B} = B \cdot \vec{u}_z$ stationnaire et uniforme.

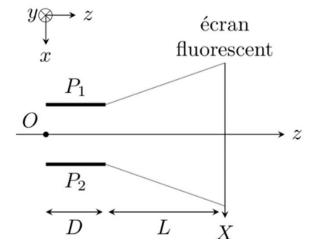
- Q1.** Quelle est la nature de la trajectoire ?
- Q2.** Déterminer le rayon de la trajectoire et la pulsation cyclotron.

Exercices incontournables

Exercice 1 : Déflexion électrique dans un tube cathodique (★★★)

Il y a encore quelques années, les oscilloscopes étaient analogiques et les téléviseurs fonctionnaient grâce à des tubes cathodiques. Le principe est d'exploiter la déviation d'un faisceau d'électrons sous l'effet d'une tension.

Dans tout l'exercice, on se place dans un référentiel galiléen associé à un repère cartésien $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$. Une zone de champ électrique uniforme (voir figure) est établie entre les plaques P_1 et P_2 (le champ est supposé nul en dehors et on néglige les effets de bord). La distance entre les plaques est notée d , la longueur des plaques D et la différence de potentiel est $U = V(P_2) - V(P_1)$ positive. Des électrons accélérés pénètrent en O dans la zone de champ électrique uniforme avec une vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_z$ selon l'axe Oz.

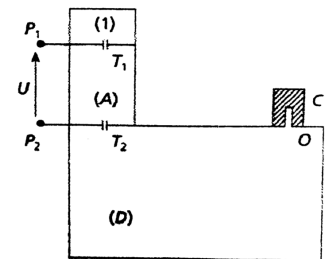


- Q1.** Établir l'expression de la force subie par les électrons en fonction de U , e , d et $\vec{u}_x$.
- Q2.** Établir l'expression de la trajectoire $x = f(z)$ de l'électron dans la zone du champ en fonction de d , U et v_0 .
- Q3.** Déterminer les coordonnées du point de sortie K de la zone de champ et les composantes de la vitesse en ce point.
- Q4.** Montrer que le mouvement est rectiligne uniforme dans les zones en dehors des plaques.
- Q5.** On note L la distance entre la sortie de la zone de champ et l'écran fluorescent. Déterminer l'abscisse X_P du point d'impact P de l'électron sur l'écran en fonction de U , v_0 , D , d , m , L et e .

Exercice 2 : Spectrographe de masse (★★★)

Le principe du spectrographe de masse est représenté sur la figure ci-contre.

Dans une chambre d'ionisation (1) on produit des ions Zn^{2+} de masse m et de charge $q = 2e$. Ces ions pénètrent par le trou T_1 d'une plaque P_1 dans une enceinte (A) ; leur vitesse en T_1 est négligeable. Dans l'enceinte (A), ces ions sont accélérés par une tension $U = V_{P1} - V_{P2}$, puis sortent de (A) par un trou T_2 percé dans la plaque P_2 . Ils pénètrent alors dans une enceinte (D) où règne un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme et constant perpendiculaire au plan de la figure. La vitesse des ions en T_2 est notée v_0 .



Dans tout cet exercice on néglige le rôle du poids et on suppose les particules non-relativistes.

Données :

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $U = 4000 \text{ V}$; $\vec{B} = \|\vec{B}\| = 0,1 \text{ T}$; $m_{\text{proton}} \approx m_{\text{proton}} \approx m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

- Q1.** Exprimer la vitesse v_0 en fonction de q , m , et U ; puis faire l'application numérique.
- Q2.** Préciser le sens de $\vec{B}$ pour que les ions puissent être accueillis dans la fente O du collecteur (C). Calculer littéralement le rayon R de la trajectoire des ions dans l'enceinte (D).

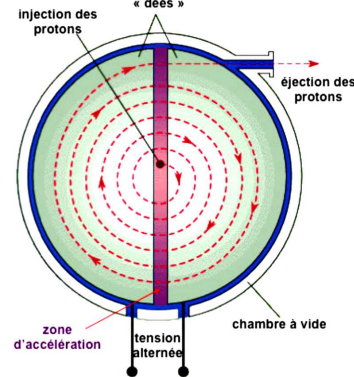
L'élément Zinc contient 2 isotopes de nombres de masse (nombre de nucléons) $A_1 = 68$ et $A_2 = 70$. On souhaite recueillir en O l'isotope ayant $A_1 = 68$.

- Q3.** Calculer numériquement la distance $\ell = T_2 O$ et évaluer la largeur maximale de la fente du collecteur.

Exercice 3 : Principe du cyclotron (★★★)

Un cyclotron est un accélérateur de particules formé de deux « boîtes » métalliques semi-cylindriques D_1 et D_2 placées de sorte que $\vec{B}$ soit parallèle aux génératrices du cylindre. Des protons sont injectés à vitesse nulle par une source d'ions au centre O du système. Une différence de potentiel sinusoïdale est appliquée entre D_1 et D_2 de sorte qu'un proton passant d'une boîte à l'autre trouve toujours dans l'espace entre elles un champ électrique lui communiquant une accélération.

On néglige la durée du passage d'une boîte à l'autre.

**Données :**

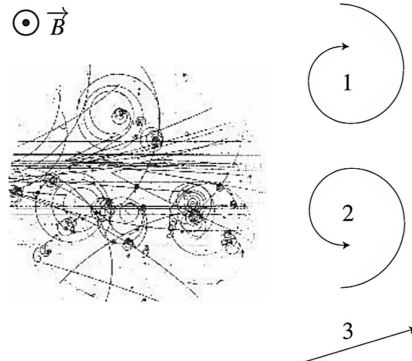
$$\vec{B} = \|\vec{B}\| = 1 \text{ T}; \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C};$$

$$m_{\text{proton}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

- Q1. Etablir puis calculer numériquement la période T_c et la pulsation ω_c dite « cyclotron » du mouvement d'un proton de vitesse initiale $\vec{v}_0$ dans un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme perpendiculaire à $\vec{v}_0$.
- Q2. Le rayon des boîtes D_1 et D_2 est $r = 0,5 \text{ m}$. Quelle sont la vitesse v_{max} et l'énergie maximale E_{max} à laquelle on peut accélérer un proton dans ce dispositif ? On exprimera ce résultat en joules (J) et en méga-électron-volts (MeV). Commenter le résultat.
- Q3. Quelle serait la différence de potentiel V_0 continue nécessaire pour accélérer un proton à cette vitesse v_{max} en une seule fois à partir d'une vitesse initiale nulle (entre les plaques d'un condensateur plan par exemples) ?
- Q4. On émet en O un proton au moment où la différence de potentiel entre D_1 et D_2 est à sa valeur maximale $V_m = 10^4 \text{ V}$. Quel est le nombre maximal de tours qu'il peut effectuer dans l'appareil ? Quelle est alors la durée du parcours ?

Exercices d'entraînement**Exercice 4 : Chambre à bulles (★★★)**

Pour visualiser les trajectoires des particules chargées, les premiers détecteurs étaient des chambres à bulles dans lesquelles les particules déclenchaient la formation de bulles dans un liquide et marquait ainsi leur passage par une traînée de bulles. La figure ci-contre représente un cliché typique des traces observées lors d'une collision à haute énergie de particules au CERN. Sur le côté droit, on a schématisé les trois types de trajectoires observées avec leur sens de parcours.



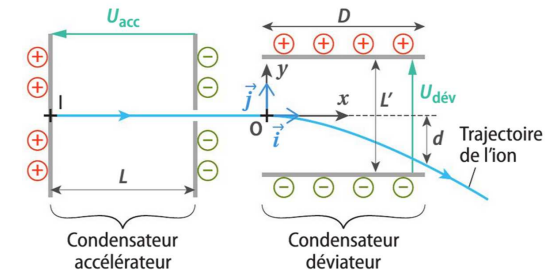
Dans les chambres à bulles, il règne un champ magnétique uniforme et stationnaire $\vec{B}$. Par ailleurs, le passage dans le liquide conduit à une lente décélération des particules.

- Q1. Déterminer le signe de la charge pour les trois types de trajectoires observées.
- Q2. Expliquer qualitativement pourquoi les trajectoires observées ne sont pas circulaires mais s'enroulent en spirale dont le rayon diminue.

Exercice 5 : Un spectromètre de masse avec deux condensateurs, c'est possible ? (★★★)

Un spectromètre de masse est un outil physique qui permet de déterminer la masse d'un ion à partir de sa déviation dans un champ magnétique. Dans cet exercice, on cherchera à comprendre pourquoi on ne peut pas obtenir la même information avec des condensateurs plans.

On étudie un ion (de masse m et de charge électrique q) modélisé par un point qui est introduit au point I dans un condensateur accélérateur (tension U_{acc} ; distance entre armatures L) sans vitesse initiale, puis dévié dans un condensateur déviateur (tension $U_{\text{dév}}$; distance entre armatures L' ; longueur D).



- Q1. L'ion étudié est-il porteur d'une charge électrique positive ou négative ? Justifier.
- Q2. En utilisant une approche énergétique, montrer que la vitesse de l'ion à la sortie du condensateur accélérateur a une norme : $v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U_{\text{acc}}}{m}}$.
- Q3. L'origine du repère est la position initiale de l'ion dans le déviateur. L'ion ne subit que la force électrique. Déterminer les équations horaires de la vitesse et de la position de l'ion à l'intérieur de ce condensateur.
- Q4. Déterminer l'équation de la trajectoire de l'ion et montrer que la déviation en sortie est :

$$d = \frac{U_{\text{dév}} \cdot D^2}{4 \cdot U_{\text{acc}} \cdot L'}$$

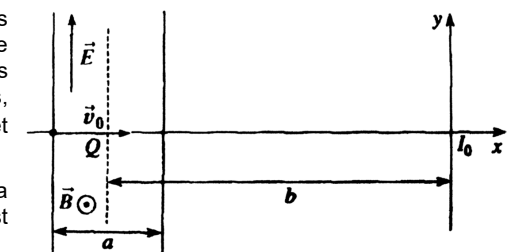
Répondre à la question du titre de l'exercice.

Résolution de problème : 3^{ème} expérience de Thomson (★★★)

(Un peu d'histoire : https://fr.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson)

Un faisceau monocinétique d'électrons traverse sans déviation une région D de largeur a , où règnent des champs magnétique et électrique uniformes, constants et orthogonaux : $\vec{E} = E \cdot \vec{u}_y$ et $\vec{B} = B \cdot \vec{u}_z$.

Le point d'impact sur un écran placé à la distance b du centre Q de la région est noté I_0 .



Si on supprime le champ $\vec{B}$, nous observons que le point d'impact se déplace en I, de côté y_I sur l'écran.

- Q1. Montrer que la connaissance de E , B , a , b et y_I permet la mesure du ratio e/m .