

## Mouvements de particules chargées

## QUESTIONS DE COURS

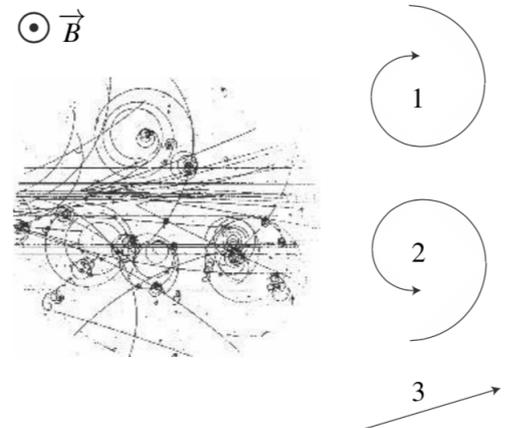
- ↪ Que signifie champ « uniforme » ? Champ « stationnaire » ?
- ↪ Quelles sont les unités du champ électrique et du champ magnétique ? Donner des ordres de grandeurs, citer des sources de champ magnétique.
- ↪ Donner l'expression de la force de Lorentz exercée sur une charge ponctuelle  $q$  placée dans un champ électromagnétique et préciser la signification de chaque terme.
- ↪ Justifier à l'aide d'ordres de grandeurs que le poids est négligeable devant la force de Lorentz.
- ↪ Expliquer pourquoi un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
- ↪ Mettre en équation le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique stationnaire et uniforme et le caractériser comme un mouvement à vecteur-accélération constant (PFD, équations horaires, nature de la trajectoire en fonction de l'orientation du champ électrique avec le vecteur vitesse initiale).
- ↪ Quelles sont les caractéristiques du champ électrique créé entre deux plaques chargées ?
- ↪ Effectuer un bilan énergétique pour calculer la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
- ↪ Mettre en équation le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique stationnaire et uniforme dans le cas où le vecteur-vitesse initial est perpendiculaire au champ magnétique (trajectoire circulaire admise) : on démontrera que le mouvement est uniforme, circulaire et on déterminera l'expression du rayon  $R$  de la trajectoire et de la pulsation cyclotron  $\omega_p$  en fonction de  $B$ .

## SAVOIR-FAIRE

## Savoir-faire 1 - Connaître les trajectoires d'une particule chargée dans un champ électromagnétique

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.



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

## Savoir-faire 2 - 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  $x = 0$ . Déterminer sa vitesse en sortie de l'accélérateur.

## Savoir-faire 3 - 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  $\vec{B}_0 = B_0 \vec{u}_z$  stationnaire et uniforme.

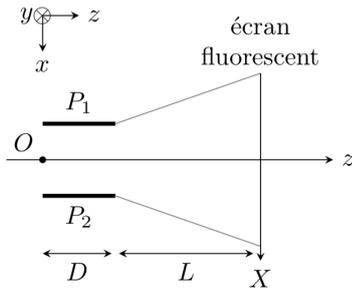
Quelle est la nature de la trajectoire ? Déterminer le rayon de la trajectoire et la pulsation cyclotron.

LES INCONTOURNABLES

Exercices classiques qui doivent être maîtrisés avant d'aller plus loin.

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  $Oz$ .

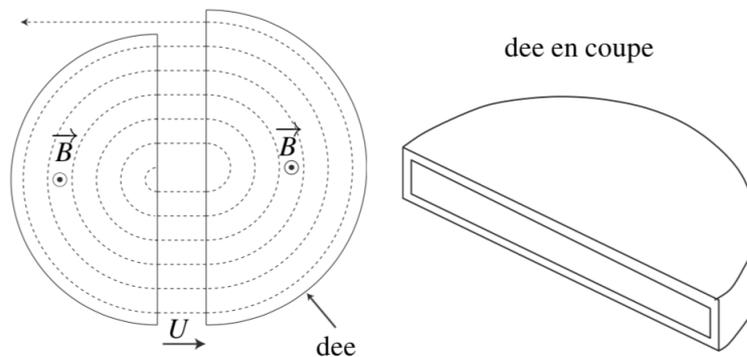


- 1/ Établir l'expression de la force subie par les électrons en fonction de  $U$ ,  $q$ ,  $d$  et  $\vec{u}_x$ .
- 2/ Établir l'expression de la trajectoire  $x = f(z)$  de l'électron dans la zone du champ en fonction de  $d$ ,  $U$  et  $v_0$ .
- 3/ Déterminer les coordonnées du point de sortie  $K$  de la zone de champ et les composantes de la vitesse en ce point.

- 4/ Montrer que le mouvement est rectiligne uniforme dans les zones en dehors des plaques.
- 5/ 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 : Cyclotron

Un cyclotron est un accélérateur de particules constitué de deux demi-cylindres conducteurs creux horizontaux appelés « dees », séparés par un intervalle étroit. Les deux « dees » plongent dans un champ magnétique uniforme vertical. Une tension électrique alternative est appliquée entre les deux « dees ».



Constitution d'un cyclotron

La valeur du champ magnétique dans les dees est  $B = 0,1 \text{ T}$ . L'amplitude de la tension crête générant le champ électrostatique entre les dees est  $U_m = 2,5 \cdot 10^3 \text{ V}$ .

- 1/ Montrer que dans un dee, le mouvement est circulaire et uniforme.
- 2/ Exprimer le temps mis pour parcourir un demi-tour dans un dee. Ce temps dépend-il de la vitesse du proton ?
- 3/ En déduire la fréquence  $f$  de la tension à appliquer entre les dees pour que le champ accélère au mieux les protons (on considère que le temps de passage entre les deux dees est négligeable devant le temps passé dans chaque dee).
- 4/ Exprimer puis calculer numériquement l'augmentation d'énergie cinétique à chaque accélération.
- 5/ La vitesse d'injection du proton étant quasi nulle, on désire que sa vitesse atteigne  $15 \cdot 10^3 \text{ km.s}^{-1}$ . Calculer le nombre de tours que doit faire le proton dans le cyclotron ainsi que le temps nécessaire à cette opération.
- 6/ Quel est le rayon du dernier arc de cercle parcouru par les protons lorsqu'ils ont atteint cette vitesse ?

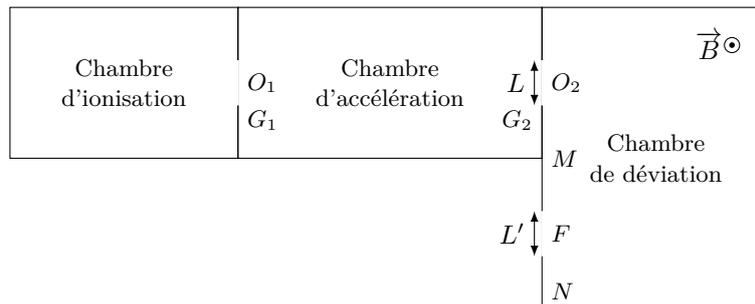
## DEVOIR-MAISON : SPECTROMÉTRIE DE MASSE

Cet exercice est un premier pas vers le travail du devoir surveillé.

La France produit l'essentiel de son électricité – environ 75% – à partir de centrales électriques nucléaires. Ces centrales utilisent comme source d'énergie un « combustible » constitué d'oxyde d'uranium enrichi en uranium 235, seul isotope fissible, afin d'atteindre une teneur de l'ordre de 4%. Avant utilisation dans une centrale, le minerai doit donc d'abord être traité afin de produire ce combustible. Les deux principaux isotopes de l'uranium sont  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et  ${}^{238}_{92}\text{U}$  de masses molaires respectives  $235,0439 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $238,0508 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

L'enrichissement de l'uranium a pour but d'élever la teneur en  ${}^{235}\text{U}$  de l'uranium de départ à une valeur optimale pour l'application désirée. Une des méthodes est la spectrographie de masse qui reste la méthode la plus sensible d'analyse isotopique. Elle a été employée pendant la Seconde Guerre mondiale dans l'usine Y12 d'Oark Ridge dans des dispositifs appelés Calutrons.

Un Calutron est un spectrographe de masse constitué de plusieurs parties :



- La chambre d'ionisation dans laquelle des atomes d'uranium  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et  ${}^{238}_{92}\text{U}$  de masses respectives  $m_1$  et  $m_2$  portée à haute température sont ionisés en ions  $\text{U}^+$ . On considérera qu'à la sortie de cette chambre, en  $O_1$ , la vitesse des ions est quasi nulle ;
- La chambre d'accélération dans laquelle les ions sont accélérés entre  $O_1$  et  $O_2$  sous l'action d'une différence de potentiel établie entre les deux grilles  $G_1$  et  $G_2$  ;
- La chambre de déviation dans laquelle les ions sont déviés par un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  de direction perpendiculaire au plan de figure. Un collecteur d'ions est disposé entre  $M$  et  $N$ . Une fente centrée sur  $O_2$  de largeur  $L$  dans le plan de la figure permet de choisir la largeur du faisceau incident. Une fente collectrice centrée sur  $F$  est placée entre  $M$  et  $N$  et a pour largeur  $L'$  dans le plan de la figure.

Les chambres sont sous vide. On négligera le poids des ions devant les autres forces et on admettra qu'à la sortie de la chambre d'accélération, les vecteurs vitesse des ions sont contenus dans le plan de la figure.

- 1/ Quel doit être le sens du champ électrique dans la cavité accélératrice ? En déduire le signe de la tension aux bornes de la cavité.
- 2/ Établir les expressions des vitesses  $u_1$  et  $u_2$  respectivement des ions  ${}^{235}_{92}\text{U}^+$  et  ${}^{238}_{92}\text{U}^+$  en  $O_2$ .
- 3/ L'énergie cinétique acquise par les ions en  $O_2$  est de 15,0 keV ; en déduire la valeur de la tension  $U$  appliquée entre les deux grilles. Déterminer numériquement les vitesses  $u_1$  et  $u_2$ .
- 4/ Quel doit être le sens du champ magnétique  $\vec{B}$  régnant dans la chambre de déviation pour que les ions puissent atteindre le collecteur ?
- 5/ Quelle est la nature de la trajectoire d'un faisceau homocinétique d'ions  ${}^{235}_{92}\text{U}^+$  dans la zone où règne le champ magnétique ? On pourra faire une hypothèse.
- 6/ Exprimer le rayon de courbure  $R_1$  de la trajectoire. Faire de même pour un faisceau homocinétique d'ions  ${}^{238}_{92}\text{U}^+$  ; on notera  $R_2$  leur rayon de courbure.
- 7/ Le collecteur du Calutron consiste en un récipient métallique muni d'une fente centrée en  $F$  de largeur  $L'$ , placée en  $M$  et  $N$  qui permet de recueillir les isotopes 235. Quelle doit être la valeur du champ magnétique régnant dans le calutron sachant que  $F$  est placé à  $D = 940 \text{ mm}$  de  $O_2$  ?
- 8/ Le faisceau d'ions émis en  $O_2$  est un faisceau parallèle dans le plan de la figure. La fente du collecteur a une largeur  $L' = 4,0 \text{ mm}$  dans le plan de la figure. Peut-il y avoir séparation isotopique dans le récipient du collecteur ?
- 9/ L'intensité du faisceau utilisé dans un Calutron est de 100 mA. La source est alimentée en uranium contenant 0,7 % de  ${}^{235}_{92}\text{U}^+$  et 99,3 % de  ${}^{238}_{92}\text{U}^+$ . Quelle quantité de l'isotope 235 le Calutron peut-il isoler en une année de fonctionnement continu ?