

3.

Mouvement dans un champ magnétique



© Denis Belitsky Shutterstock.com

Sommaire

1	Force de Lorentz (Rappel).....	1
1.1	Définition	1
1.2	Caractéristiques	1
2	Étude du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme	2
2.1	Cas particulier : $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$	2
2.2	Cas particulier : $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$	3
2.3	Cas général.....	3
3	Applications	4
3.1	Spectromètre de masse	4
3.1.1	Utilité	4
3.1.2	Description et principe de fonctionnement	4
3.1.3	Remarque : masse et charge d'un ion	5
3.2	Cyclotron.....	5
3.2.1	Utilité	5
3.2.2	Description et principe de fonctionnement	6
4	Pour en savoir plus.....	8
4.1	L'aurore polaire.....	8
4.2	Ceintures Van Allen.....	8
5	Exercices	9

1 Force de Lorentz (Rappel)

1.1 Définition

Une particule de charge q se déplaçant avec un vecteur vitesse $\vec{v}$ dans un champ magnétique $\vec{B}$ subit une force magnétique $\vec{F}_m$, appelée **force de Lorentz**, telle que :

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Le symbole $\times$ (ou $\wedge$) est l'opérateur mathématique du produit vectoriel.

1.2 Caractéristiques

1. **Point d'application** : la particule de charge q
2. **Direction** : perpendiculaire au plan formé par $q\vec{v}$ et $\vec{B}$ (fig. 1)
3. **Sens** : déterminé à l'aide de la règle de la main droite (fig. 2) :
 - Le pouce suivant $q\vec{v}$ (dans le sens de $\vec{v}$ si $q > 0$, dans le sens opposé si $q < 0$)
 - L'index suivant le champ magnétique $\vec{B}$
 - Le majeur indique alors le sens de la force magnétique $\vec{F}_m$
4. **Intensité (norme)** : $F_m = |q| v B \sin \alpha$, où α est l'angle formé entre $q\vec{v}$ et $\vec{B}$

L'intensité F_m correspond à l'aire du parallélogramme formé par $q\vec{v}$ et $\vec{B}$.

$$\text{Unité SI : } N = C \cdot \frac{m}{s} \cdot T$$

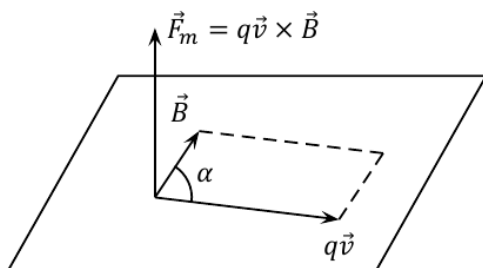


Fig. 1 : Direction de la force de Lorentz

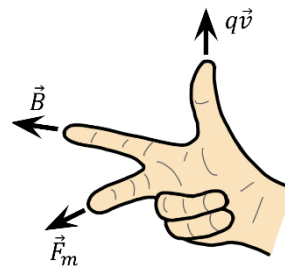


Fig. 2 : Règle de la main droite

Remarques

- Une particule ne subit pas de force de Lorentz :
 - si elle est électriquement neutre ($q = 0$)
 - si elle est au repos ($v = 0$)
 - en l'absence de champ magnétique ($B = 0$)
 - si elle se déplace dans la direction du champ magnétique ($\alpha = 0$ ou $180^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 0$)
- Une particule subit une force de Lorentz maximale si elle se déplace perpendiculairement au champ magnétique ($\alpha = 90^\circ : F_m = |q| v B \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = |q| v B$)
- Puisque la force de Lorentz est toujours normale au vecteur vitesse de la particule, elle n'effectue aucun travail sur la particule. D'après le TEC, un champ magnétique peut dévier une particule chargée en mouvement, mais il ne peut jamais varier la norme de la vitesse ! *Le mouvement d'une particule sous l'influence seule d'un champ magnétique est donc toujours uniforme.*

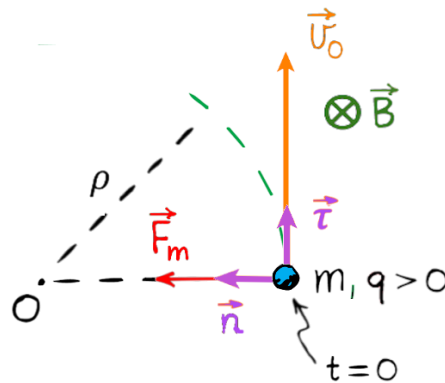


2 Étude du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme

Considérons une particule de masse m et de charge $q > 0$ qui pénètre à l'instant $t = 0$ en un point A d'un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$.

2.1 Cas particulier : $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$

On suppose que $\vec{v}_0$ est perpendiculaire à $\vec{B}$. On note ρ le rayon de courbure de la trajectoire.



- Système : particule de masse m et de charge $q > 0$
- Référentiel : terrestre, considéré comme galiléen
- On suppose que la particule se déplace dans le vide et qu'elle subit uniquement la force de Lorentz $\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B}$ exercée par le champ magnétique, le poids étant négligeable devant la force de Lorentz.

Plan de la trajectoire

Dans le cas où $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$, le mouvement de la particule est plan. Il s'effectue dans le plan perpendiculaire à $\vec{B}$ et contenant $\vec{v}_0$.

Vecteur accélération

D'après le principe fondamental de la dynamique :

$$\begin{aligned}\vec{F}_m &= m \vec{a} \\ q \vec{v} \times \vec{B} &= m \vec{a} \\ \vec{a} &= \frac{q}{m} \vec{v} \times \vec{B}\end{aligned}$$

Puisque le vecteur accélération $\vec{a}$ est perpendiculaire au plan formé par le vecteur vitesse $\vec{v}$ et le vecteur champ magnétique $\vec{B}$, le vecteur accélération et la force de Lorentz sont centripètes. Ainsi, le vecteur accélération s'écrit :

$$\vec{a} = \frac{|q|}{m} v B \vec{n} \quad (1)$$

Vitesse linéaire et rayon de la trajectoire

En analysant la composante tangentielle $\vec{a}_\tau$ et la composante normale $\vec{a}_n$ vecteur accélération séparément, l'expression (1) permet de conclure que :

- $a_\tau = \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow v = \text{const} = v_0$

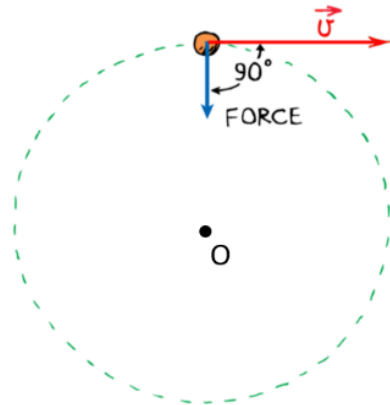
Le mouvement est *uniforme*¹.

En effet, la force de Lorentz $\vec{F}_m$ agit à tout instant perpendiculairement au déplacement de la particule et n'effectue donc aucun travail. Selon le TEC :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_m) = 0 \Rightarrow E_c = \text{const} \Rightarrow v = \text{const}$$

- $a_n = \frac{|q|}{m} v B \Leftrightarrow \frac{v^2}{\rho} = \frac{|q|}{m} v B \Rightarrow \rho = \frac{m v}{|q| B} = \text{const} = r$

Le rayon de courbure est constant : le mouvement est *circulaire*.



Vitesse angulaire

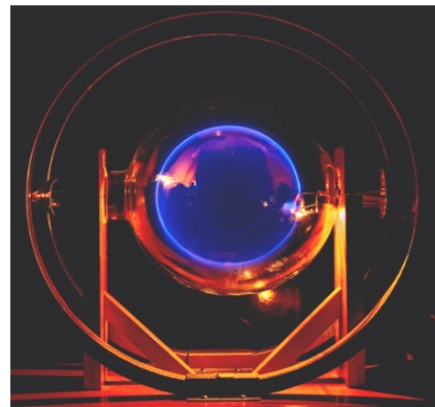
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{|q| B}{m}$$

Période

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{|q| B}$$

Fréquence

$$f = \frac{1}{T} = \frac{|q| B}{2\pi m}$$



À noter que la vitesse angulaire ω , la période T et la fréquence f sont *indépendantes de la vitesse v de la particule et du rayon r de la trajectoire*. Pour une intensité B du champ magnétique donnée, elles ne dépendent que du rapport entre la masse et la charge de la particule.

2.2 Cas particulier : $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$

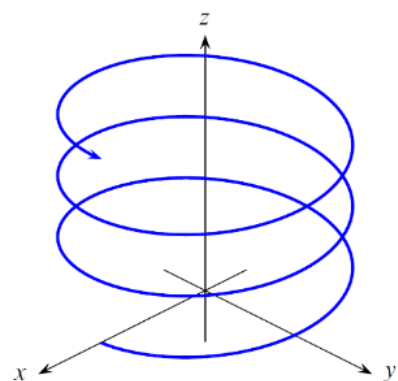
Dans le cas où $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$, la force de Lorentz est constamment nulle. D'après le principe d'inertie (1^{re} loi de Newton), la particule sera animée d'un MRU.

2.3 Cas général

Lorsque $\vec{v}_0$ n'est ni perpendiculaire à $\vec{B}$, ni parallèle à $\vec{B}$, on décompose la vitesse initiale $\vec{v}_0$ en une composante $\vec{v}_{0\perp}$ perpendiculaire à $\vec{B}$ et une composante $\vec{v}_{0z}$ parallèle à $\vec{B}$.

D'après les cas particuliers ci-dessus et d'après le principe de l'indépendance des mouvements, le mouvement de la particule est **hélicoïdal**. Il peut être considéré comme superposition :

- d'un MCU de vitesse $\vec{v}_{0\perp}$ dans un plan perpendiculaire à $\vec{B}$;
- d'un MRU de vitesse $\vec{v}_{0z}$ en direction de $\vec{B}$.



¹ La particule se déplaçant toujours dans le sens positif de la trajectoire, on a que $v_\tau = v$ et $a_\tau = \frac{dv_\tau}{dt} = \frac{dv}{dt}$.

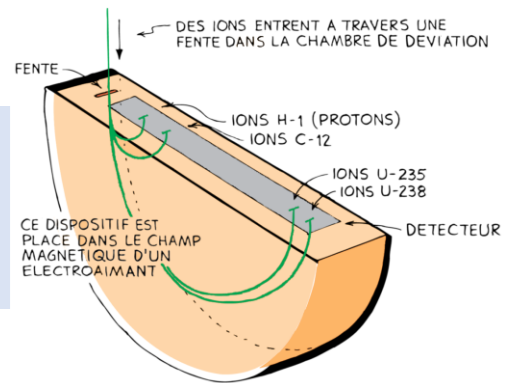
3 Applications

3.1 Spectromètre de masse

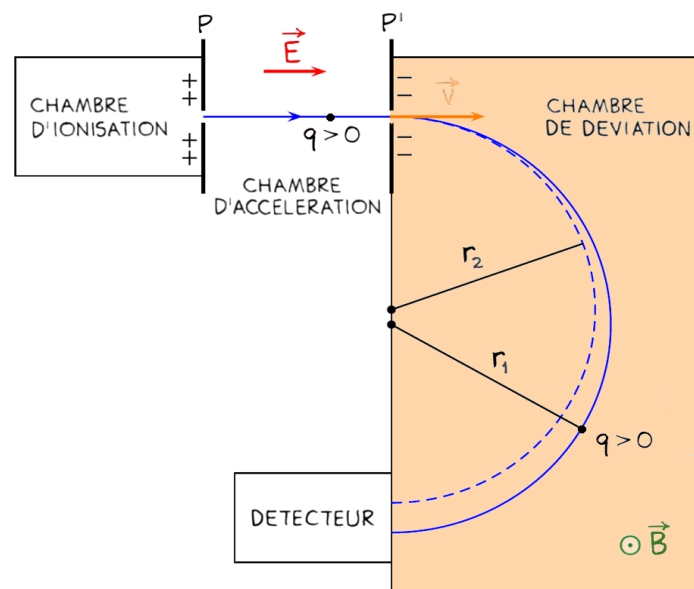
3.1.1 Utilité

Le **spectromètre de masse** est un instrument qui sert :

- à déterminer la masse d'un ion de charge connue ;
- à séparer différents ions selon leur rapport entre masse et charge.



3.1.2 Description et principe de fonctionnement



Le spectromètre de masse comporte quatre parties :

- La **chambre d'ionisation** sert à ioniser les atomes ou molécules à analyser.
- La **chambre d'accélération** est constituée par deux plaques planes et parallèles P et P' entre lesquelles règne un champ électrique $\vec{E}$ uniforme. Il accélère les ions qui y entrent à travers une fente avec des vitesses négligeables. La vitesse acquise par un ion de masse m et de charge q vérifie d'après le théorème de l'énergie cinétique (TEC) :

$$\frac{1}{2} m v^2 = |q| U_{acc} \quad (2)$$

où U_{acc} est la tension d'accélération appliquée entre les plaques P et P'.

- La **chambre de déviation** est plongée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, d'intensité connue, qui dévie les ions provenant de la chambre d'accélération et qui leur impose des trajectoires semi-circulaires de rayon :

$$r = \frac{m v}{|q| B} \quad (3)$$

- Le **détecteur** enregistre les positions des points d'impact des ions, ce qui permet de déterminer le rayon des trajectoires.

D'après les équations (2) et (3), le rayon r dépend du rapport entre la masse et la charge. Si la charge de la particule est connue, sa masse peut donc être déduite du rayon de sa trajectoire.

■ As-tu compris ?

1. Montrer à l'aide des expressions (2) et (3) que :

a. le rayon de la trajectoire est proportionnel à $\sqrt{\frac{m}{|q|}}$

b. la masse d'un ion peut s'écrire :

$$m = \frac{|q| B^2 r^2}{2 U_{acc}}$$

2. Quelles modifications faudrait-il apporter au spectromètre de masse montré sur la figure de la page précédente pour qu'il puisse analyser des ions négatifs ?

3.1.3 Remarque : masse et charge d'un ion

Les masses des atomes et des ions sont souvent exprimées dans l'**unité de masse atomique**, qui est définie comme un douzième de la masse d'un atome neutre de carbone 12 :

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C}) = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

L'unité de masse atomique est environ égale à la masse d'un nucléon :

$$1 \text{ u} \simeq m_p \simeq m_n$$

La masse m d'un ion est approximativement égale à la somme des masses de ses nucléons. (Les masses des électrons et les énergies de liaison ne donnent lieu qu'à de petites corrections, voir chapitre « Physique nucléaire ».)

La charge q d'un ion est égale à un multiple entier de la charge élémentaire $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Exemple :

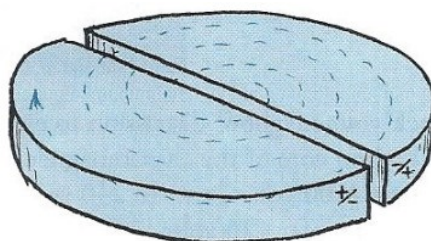
Pour l'ion $^{32}\text{S}^{2-}$ la masse vaut environ $m \simeq 32 \text{ u}$ et la charge $q = -2e$.

3.2 Cyclotron²

3.2.1 Utilité

Le **cyclotron** est un accélérateur de particules chargées (protons, ions positifs, ions négatifs) à haute énergie pour p.ex. :

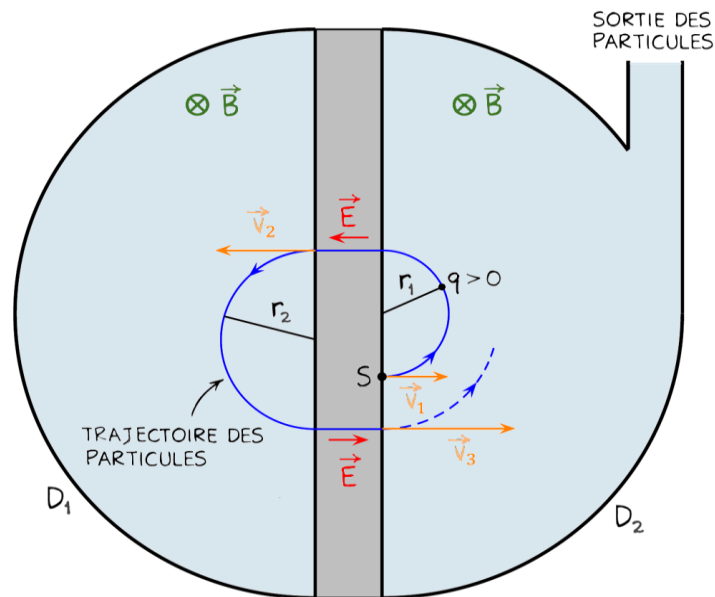
- analyser la structure des noyaux atomiques et les réactions nucléaires ;
- produire des isotopes radioactifs utilisés en médecine ;
- traiter le cancer en bombardant les cellules de tumeur cancéreuses.



² Le cyclotron fut développé par Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) et son étudiant M.S. Livingston au début des années 1930. Lawrence a reçu le prix Nobel de physique en 1939 « pour l'invention et le développement du cyclotron, et pour les résultats de recherches obtenus grâce au cyclotron ».

3.2.2 Description et principe de fonctionnement

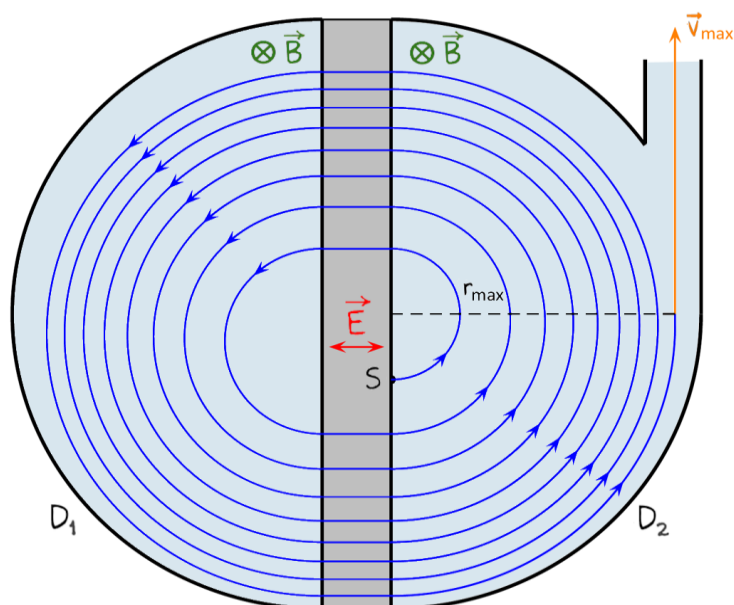
Le cyclotron comporte deux demi-cylindres creux D_1 et D_2 , appelés « dés » (vu que leur forme ressemble à la lettre « D ») ; ils sont séparés par un interstice (en gris sur la figure) :



Les particules chargées sont injectées par la source S située plus ou moins au centre du dispositif dans l'un des dés avec une faible vitesse $\vec{v}_1$.

Les dés sont plongés dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, parallèle à l'axe des dés, qui sert à dévier les particules et à leur imposer des trajectoires semi-circulaires. Entre les dés, les particules sont accélérées à chaque demi-tour par un champ électrique qui doit être orienté dans le bon sens lorsque la particule sort d'un dé. Comme la période de rotation des particules est indépendante de leur vitesse, on inverse le sens du champ électrique en appliquant aux dés une tension alternative qui varie suivant la même période. Les particules décrivent ainsi des demi-cercles de plus en plus grands et à des vitesses de plus en plus élevées.

Après plusieurs tours, la particule est éjectée du cyclotron avec une vitesse $v_{\max} \gg v_1$ en un point correspondant au rayon maximal $r_{\max}$.



■ As-tu compris ?

3. Quelle est l'influence des champs électrique et magnétique sur le mouvement des particules chargées à l'intérieur d'un cyclotron ? Expliquer brièvement.
4. Montrer par un calcul qu'à la sortie du cyclotron, la vitesse maximale d'une particule donnée dépend seulement de l'intensité B du champ magnétique et du rayon maximal $r_{\max}$.

Exercice résolu

On utilise un cyclotron pour accélérer des ions $^{15}\text{N}^{2+}$ depuis le repos. Le diamètre du cyclotron vaut 200 cm et il est siège d'un champ magnétique uniforme d'intensité 1,30 T. La tension appliquée aux dés vaut 40,0 kV. Calculer :

- a. la fréquence de la tension alternative ;
- b. l'énergie cinétique maximale ;
- c. le nombre de tours effectués par les ions.

Solution :

Notons tout d'abord que la masse de l'ion $^{15}\text{N}^{2+}$ vaut en bonne approximation 15 u et que sa charge vaut $2e$.

- a. Fréquence : $f = \frac{q B}{2\pi m}$

$$\text{A.N. : } f = \frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,30}{2\pi \cdot 15 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27}} = 2,66 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 2,66 \text{ MHz}$$

- b. Vitesse maximale :

$$r_{\max} = \frac{m v_{\max}}{q B} \Leftrightarrow v_{\max} = \frac{q r_{\max} B}{m}$$

$$\text{A.N. : } v_{\max} = \frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,00 \cdot 1,30}{15 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27}} = 1,672 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Énergie cinétique maximale : } E_{c,\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2$$

$$\text{A.N.}^3 : E_{c,\max} = \frac{1}{2} \cdot 15 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \cdot (1,672 \cdot 10^7)^2 = 3,48 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 21,7 \text{ MeV}$$

- c. L'ion est accéléré deux fois par tour. D'après le TEC, le gain d'énergie par tour vaut :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_e) = 2 q U_{\text{acc}} = 2 \cdot 2e \cdot 40,0 \text{ kV} = 160 \text{ keV}$$

Le nombre N de tours vaut donc :

$$N = \frac{E_{c,\max}}{\Delta E_c} = \frac{21,7 \text{ MeV}}{160 \text{ keV}} = 136$$

³ Un électronvolt est l'énergie qu'une particule, qui porte la charge élémentaire e , acquiert lorsqu'elle est accélérée sous une tension de 1V : $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

4 Pour en savoir plus

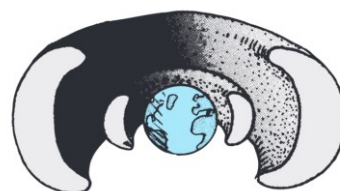
4.1 L'aurore polaire

L'**aurore polaire** (cf. figure de la page titre) est un phénomène lumineux qui a lieu dans la haute atmosphère. La Terre est en permanence bombardée par des particules chargées en provenance de l'espace. Ce **rayonnement cosmique** est composé de particules chargées, avant tout des électrons et des protons venant du Soleil (vent solaire). Elles sont déviées par le champ magnétique terrestre et suivent les lignes de champ sur des trajectoires hélicoïdales. Au niveau des pôles, les particules entrent en collision avec les molécules de l'air atmosphérique. Les molécules sont alors excitées ou ionisées et émettent de la lumière lorsqu'elles se dés excitent. La couleur de la lumière dépend de la nature du gaz.

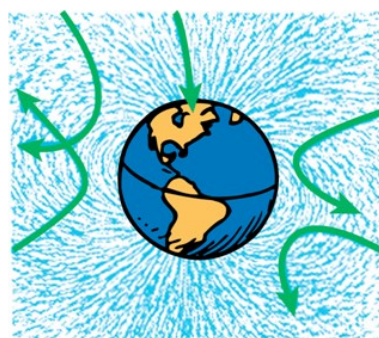


4.2 Ceintures Van Allen

Certaines particules du rayonnement cosmique sont piégées dans le champ magnétique en faisant des allers-retours entre les pôles magnétiques de la Terre. Elles forment les ceintures de **Van Allen**⁴, constituées de deux anneaux en forme de beignet. L'anneau intérieur est centré à une altitude d'environ 3200 km au-dessus de la surface terrestre ; l'anneau extérieur, plus grand et plus large, est centré à une altitude d'environ 16000 km. La plupart des particules chargées piégées dans la ceinture externe proviennent du vent solaire. Les particules piégées dans la ceinture intérieure proviennent en majeure partie de l'atmosphère terrestre. Leur nombre a augmenté à cause des nombreux tests de bombes à hydrogène réalisés en haute altitude.



Malgré le champ magnétique terrestre, de nombreux rayons cosmiques « secondaires » atteignent la surface de la Terre. Ce sont des particules créées lors des collisions des particules du rayonnement cosmique primaire avec les noyaux atomiques de la haute atmosphère. Le bombardement par le rayonnement cosmique est le plus intense aux pôles magnétiques car les particules chargées qui frappent la Terre ne traversent pas les lignes de champ magnétique, mais se déplacent le long des lignes de champ et ne sont donc pas déviées. Le rayonnement cosmique est le moins intense dans les régions équatoriales. Aux latitudes moyennes, environ cinq particules frappent chaque centimètre carré chaque minute au niveau de la mer. Ce nombre augmente rapidement avec l'altitude. Les rayons cosmiques pénètrent donc dans ton corps pendant que tu lis ce cours.



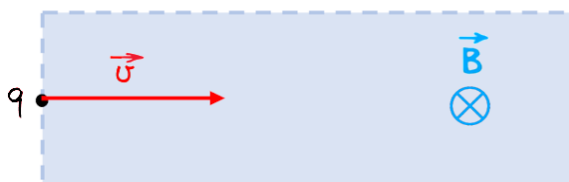
⁴ Nommées en l'honneur de James Van Allen qui a suggéré leur existence à partir des données recueillies par le satellite américain Explorer I en 1958.

5 Exercices

1. Une particule chargée négativement de poids négligeable pénètre avec une vitesse $\vec{v}_0$ dans différents champs uniformes qui peuvent être électrique ou magnétique. Indiquer, selon le mouvement ultérieur de la particule, de quel type de champ il s'agit. Faire dans les quatre cas un croquis et représenter la trajectoire de la particule, la force qu'elle subit et le vecteur-champ en question. Justifier le choix.

Dès qu'elle entre dans le champ, la particule décrit...

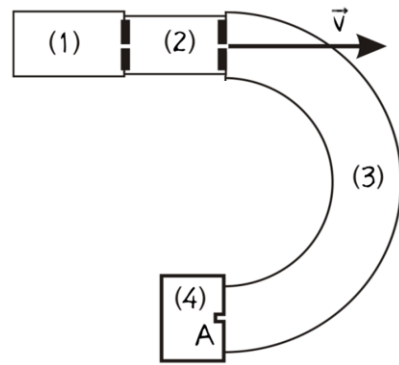
- a. un mouvement rectiligne uniforme ;
 - b. un mouvement rectiligne uniformément retardé ;
 - c. un mouvement circulaire uniforme ;
 - d. un mouvement parabolique.
2. Un proton et une particule α pénètrent avec la même vitesse $\vec{v}$ dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$.



- a. Vers où est dévié le proton, respectivement la particule α ? Expliquer.
 - b. Comparer l'intensité des forces subies par les deux particules chargées. Expliquer.
 - c. Comparer l'accélération subies par les deux particules chargées. Expliquer.
 - d. Comparer le rayon des trajectoires circulaires suivies par les deux particules chargées. Expliquer.
 - e. Comparer la fréquence de rotation des deux particules chargées. Expliquer.
3. Un électron est envoyé avec une vitesse $\vec{v}_0$ horizontale de norme $2 \cdot 10^7$ m/s dirigée vers la droite dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme de norme 10 mT, perpendiculaire au vecteur vitesse.
 - a. Faire une figure et préciser le sens de $\vec{B}$ pour que l'électron soit dévié vers le bas.
 - b. Donner les caractéristiques de la force qu'il subit et calculez sa norme. Comparer celle-ci à celle de son poids $\vec{P}$.
 - c. Calculer le rayon R de la trajectoire et la durée nécessaire T pour parcourir un tour complet.
 - d. On double la vitesse initiale. Comment varient le rayon et la période ? Justifier.
 - e. Qu'est-ce qui change, lorsqu'on envoie la particule avec une vitesse initiale identique, mais parallèle au champ magnétique ? Justifier.
 4. Peut-on séparer des ions $^{12}\text{C}^{3+}$ et $^{16}\text{O}^{4+}$ à l'aide d'un spectromètre de masse ? Justifier.

5. Voici le schéma d'un spectromètre de masse :

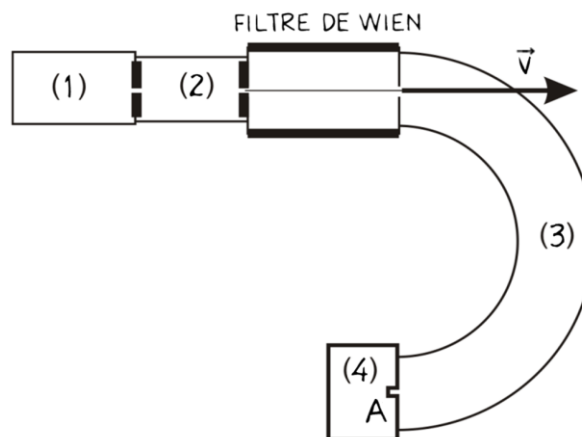
- Préciser la nature des différents constituants de ce dispositif et rappelez son utilité.
- Quelle est la nature du mouvement de particules chargées dans chacune des chambres ?
- Application :
Des ions $^{35}\text{Cl}^+$ sont accélérés sous une tension de 500 V. (On néglige le poids devant les autres forces qui interviennent).



- Déterminer les caractéristiques (direction, sens, norme) du champ magnétique qui doit régner dans la cavité hémicylindrique pour que les ions viennent frapper le détecteur en A à 40 cm de l'endroit où ils pénètrent dans la chambre.
- Etablir une relation entre le rayon de la trajectoire des ions et la tension accélératrice. En déduire à quelle distance de A se trouve le lieu d'impact d'ions $^{37}\text{Cl}^+$ accélérés sous la même tension.

On donne : $m(^{35}\text{Cl}^+) = 34,968 \text{ u}$ et $m(^{37}\text{Cl}^+) = 36,965 \text{ u}$

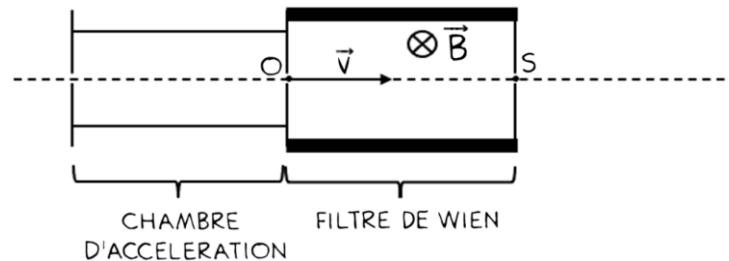
6. On intercale entre la chambre d'accélération (2) et la chambre de déviation (3) d'un spectromètre de masse un filtre (appelé **filtre de vitesse** ou **filtre de Wien**) tel que, pour un type d'ions donné, uniquement les particules ayant la même vitesse $\vec{v}$ pénètrent dans la chambre (3). A l'intérieur du filtre règnent un champ magnétique $\vec{B}$ et un champ électrique $\vec{E}$ dont les effets conjugués se compensent pour les particules ayant la vitesse $\vec{v}$ (c.-à-d. que leur mouvement est rectiligne et uniforme à travers le filtre).



- Sachant que l'intensité du champ magnétique est 150 mT, déterminer les caractéristiques (direction, sens et norme) du champ électrique $\vec{E}$ qu'il faut superposer à $\vec{B}$ pour que toutes les particules arrivent dans la chambre (3) avec la même vitesse de $5,25 \cdot 10^5 \text{ m/s}$.
- Sachant que les particules traversant le filtre ont été accélérées dans la chambre d'accélération sous une tension U_{acc} , laquelle des affirmations suivantes est correcte ?

- A. $B \sim U_{acc}$ B. $B \sim \sqrt{U_{acc}}$ C. $B \sim \frac{1}{U_{acc}}$ D. $B \sim \frac{1}{\sqrt{U_{acc}}}$

7. Différentes particules, supposées chargées positivement, sont créées dans une chambre d'ionisation et pénètrent avec une vitesse négligeable dans une chambre d'accélération où elles sont accélérées linéairement à l'aide d'une tension accélératrice U_{acc} . Elles pénètrent ensuite dans un filtre de vitesse ou filtre de Wien tel que, uniquement les particules ayant la vitesse d'entrée voulue $\vec{v}$ en O, parviennent à sortir du filtre avec la même vitesse de sortie $\vec{v}$ en S. A l'intérieur du filtre règne un champ magnétique $\vec{B}$, tel qu'indiqué sur la figure de la page suivante, et un champ électrique $\vec{E}$ dont les effets conjugués se compensent pour les particules ayant la vitesse d'entrée $\vec{v}$ voulue.



- a. Redessiner le filtre de Wien et indiquer sur la figure le champ électrique $\vec{E}$, la force de Lorentz $\vec{F}_m$ ainsi que la force électrique $\vec{F}$ pour une particule ayant la vitesse d'entrée $\vec{v}$ voulue. Quelle relation existe entre les forces s'exerçant sur la particule ? Justifier.
 - b. Tracer sur la figure précédente l'allure approximative de la trajectoire d'une particule ayant une vitesse d'entrée trop petite. Justifier.
8. Dans un centre de recherche, des particules α sont accélérées dans un cyclotron avant d'être lancées contre une cible. Le cyclotron a un rayon de 5 m. Les particules α sont accélérées à partir du repos et sortent du cyclotron avec une vitesse de 2500 km/s.
- a. Faire un schéma d'un cyclotron et indiquer les vecteurs champs qui y règnent et les forces qui s'appliquent à la particule sur sa trajectoire. Expliquer le fonctionnement de cet accélérateur de particules.
 - b. Calculer l'intensité du champ magnétique dans les dés pour que les particules sortent avec la vitesse désirée.
 - c. Sachant que la tension entre les dés à une valeur de 540 V, déterminer l'augmentation d'énergie cinétique à chaque accélération.
 - d. En déduire le nombre de tours qu'une particule α parcourt dans le cyclotron avant de sortir.
 - e. Vrai ou faux ? Justifier. « Si on accélère des protons au lieu des particules α , les protons sortent du même cyclotron avec une vitesse deux fois plus élevée. »
9. Vrai ou faux ? Donner une réponse sans justification.
- Dans un cyclotron donné, la vitesse maximale atteinte par une particule chargée, dépend...
- A. de la nature des particules
 - B. du rayon des dés
 - C. de l'intensité du champ électrique entre les dés
 - D. de l'intensité du champ magnétique entre les dés
 - E. de la masse des particules

Crédits Photos

© Denis Belitsky / Shutterstock.com (1579360606) – **page titre** (aurore polaire)

© Henri Weyer – **p.3** (déviaton d'un faisceau d'électrons)

Crédits Illustrations

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

© EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press