** Hypothèse: Les champs sont uniformes (indépendants du point considéré), et permanents ou stationnaires
** (indépendants du temps). On se place en mécanique classique, non relativiste.

$v \ll c$ $c = 10^8 \times 3\ m.s^{-1}$ vitesse de la lumière dans le vide

$\vec{E}$ crée par des charges fixes (ou mobiles)

I Force de Lorentz $\vec{B}$ champs électrique crée par des charge mobiles ou des aimants

1.) Définition :

Une particule de masse m, de charge q, de vitesse $\vec{v}$, placée dans un champ électrique $\vec{E}$ (= cste) et un champ magnétique $\vec{B}$ (= cste) est soumise à la force de Lorentz $\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q\vec{v}\wedge\vec{B}$. $F_e = qE$ et $F_m = qv \wedge B$

Remarque : On considère que toutes les autres forces sont négligeables, en particulier le poids.

$\to$ V/m $\to$ Tesla T

2.) Aspect énergétique :

$\vec{E}$ peut modifier l'énergie cinétique d'une particule, c'est-à-dire la norme de la vitesse.
$\vec{B}$ ne peut que courber la trajectoire, c'est-à-dire modifier la direction de $\vec{v}$, sans apporter d'énergie.

$\vec{E}$ = cste champ électrostatique
$\vec{B}$ = cste champ magnétostatique

démo : Force magnétique $\vec{F_m} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

$\delta W = \vec{F_m} \cdot \vec{dl} = (q\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{dl}$ Or $\vec{dl} = \vec{v}\,dt$

Donc $W_{M_1 \to M_2} = \int_1^2 (q\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}\,dt = 0 \Rightarrow$ La force magnétique ne travaille jamais

Théorème de l'énergie cinétique

$\Delta EC = W(\vec{F_m}) = 0 \Rightarrow EC = cste$

démo : Force électriques $\vec{F_c} = q\vec{E}$

$\vec{E} = E\vec{e_x}$ constant Donc $W_{M_1 \to M_2} = \int_1^2 \vec{F_c} \cdot \vec{dl} = \int_1^2 q\vec{E} \cdot \vec{dl} = \int_1^2 qE\,dx$

Donc $W_{M_1 \to M_2} = [qEx]_1^2$

$= [-E_{pe}]_1^2$ où $\boxed{E_{pe} = -qEx + cste}$

$\vec{F_c}$ est conservative

E_{pe} est l'énergie potentielle électrostatique dont dérive $\vec{F_e}$

Potentiel Electrostatique V tq $E_{pe} = qV + cste_2$

Fe est toujours conservative même si $\vec{E}$ n'est pas constant pour 1 champs constant

$V = -Ex + cste_3$

Remarque 1 D'après 2 $x \nearrow$ $V \searrow$ par E dans le sens de $\vec{e_x}$

$\vec{E}$ est dans le sens des potentielles décroissants

Remarque 2 Le Tesla (unité)

$B = \frac{ma}{qv} = \frac{kg\,m\,s^{-2}}{C\,m\,s^{-1}} = kg\,C^{-1}s^{-1} = T$ (Tesla) où $C = As$

II Particule dans un champ électrique

1.) Accélération de particules :

Hypothèse : champ $\vec{E} \parallel \vec{v}_0$

Le champ va accélérer les particules sans modifier leur direction.

D'après la LFD $m\vec{a} = \vec{F_e} = q\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E} \Rightarrow \vec{v} = \frac{q}{m}\vec{E}t + v_0$

Si $\vec{E} \parallel \vec{v_0}$, $\vec{v} \parallel \vec{v_0}$ accélération sans déviation si $q > 0$

Si $q < 0$ décélération

Conservation de Em : Fe est conservative et dérive de $Ep_e = qV + \text{cste}$ où $V = -Ex + \text{cste}$ ②

entre $M_1(t_1)$ et $M_2(t_2)$

$$E_m = \frac{1}{2} m v_1^2 + qV_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 + qV_2 \Rightarrow \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) = q(V_1 - V_2) = -qU$$

où U est la différence de potentiel entre M_1 et M_2

Applications :

1) L'électron-Volt est l'énergie cinétique acquise par une particule de charge $e = 1.6\ 10^{-19}$ C (charge élémentaire) subissant une chute de potentiel de 1 V.

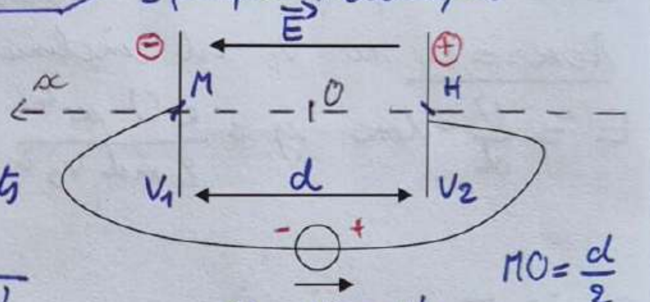
$\boxed{1 \text{ eV} = 1.6\ 10^{-19} \text{ J}}$ 1 keV = 10^3 eV 1 MeV = 10^6 eV 1 GeV = 10^9 eV

$\left.\begin{array}{l} U = -1V \\ q = e \end{array}\right\} \Delta E_c = e = 1,6 \times 10^{-19}$ J (Energie pas des Coulomb) $\simeq 1e$V

2) Canon à électron

On accélère les électrons entre deux plaques

2 plaques métalliques



Electron de charge $q = -e < 0$

attiré par la plaque chargée ⊕

$\vec{E}$ est dans le sens des potentiels décroissants

$v_1 = 0 \Rightarrow \Delta E_c = \frac{1}{2} m v_2^2 = -qU$

$q = -e \Rightarrow \Delta E_c = eU \Rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$

$U = V_2 - V_1$ $MO = \frac{d}{2}$

AN : $U = 100$ V $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg $\Rightarrow v_2 = 6 \times 10^6 \text{ m.s}^{-1}$

$\vec{E} = E\vec{e_x} \Rightarrow V = -Ex + \text{cste}'$ ② or ici $x_1 = d/2$ et $x_2 = -\frac{d}{2}$

Donc $\left\{\begin{array}{l} V_1 = -dE/2 + \text{cste}' \\ V_2 = dE/2 + \text{cste}' \end{array}\right. \Rightarrow U = V_2 - V_1 = \frac{Ed}{2} + \frac{Ed}{2} = Ed$

$\boxed{\text{Donc } U = E \times d \rightarrow m \Rightarrow E = \frac{U}{d} \Rightarrow \vec{E} = \frac{U}{d}\vec{e_x}}$

V   V.m^{-1}

AN : $P = mg = 10^{-29}$ N $d = 2$ cm

$F_e = qE = q\frac{U}{d} = 10^{-15}$ N

$\frac{P}{F_e} = 10^{-14} \ll 1$

On peut bien négliger le poids

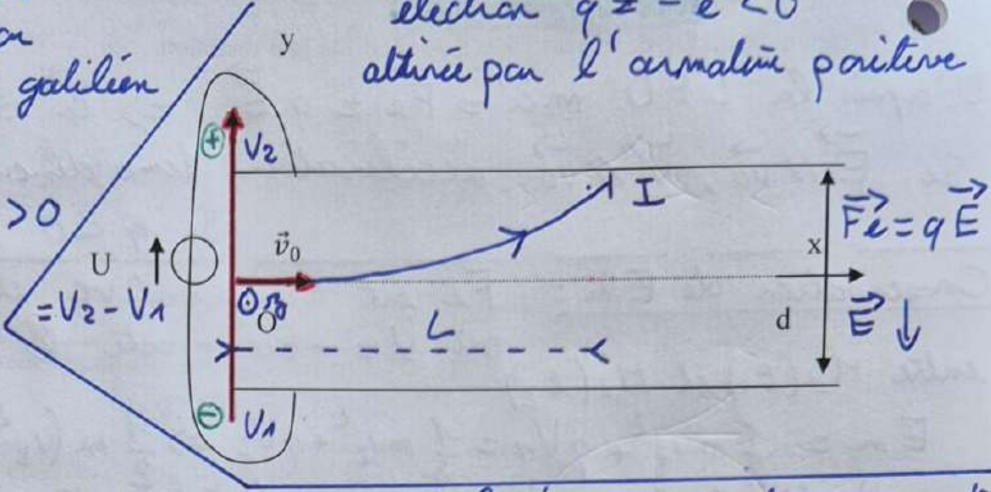
A Savoir Refaire

2.) Déflexion électrostatique :

Hypothèse : champ $\vec{E} \perp \vec{v}_0$

LFD appliquée à l'électron dans le référentiel terrestre galiléen

électron $q = -e < 0$ attirée par l'armature positive



$m\vec{a} = \vec{Fe} = q\vec{E}$

où $\begin{cases} \vec{E} = -E\,\vec{e_y} \text{ où } E > 0 \\ q = -e \end{cases}$

Donc $m\vec{a} = eE\,\vec{e_y}$

$\hookrightarrow \vec{a} = \dfrac{eE}{m}\vec{e_y}$

CI : à $t = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$ et $\vec{v_0} = v_0\,\vec{e_x}$ Il n'y a pas de mouvement sur $\vec{e_z}$

Donc $\vec{v} = \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = \dfrac{eE}{m}t \end{cases}$ $\vec{OM} = \begin{cases} x : v_0 t \\ y : \dfrac{1}{2}\dfrac{eE}{m}t^2 \end{cases}$

Donc l'équation du mouvement est $y = \dfrac{1}{2} \times \dfrac{eE}{m} \times \left(\dfrac{x}{v_0}\right)^2 = \dfrac{eE}{2mv_0^2}x^2$

Remarque si v_0 est incliné -> cos et sin

$E = \dfrac{U}{d}$ donc $y = \dfrac{eUx^2}{2mdv_0^2}$ $\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = \dfrac{eU}{md} \\ \ddot{z} = 0 \end{cases}$ $\begin{cases} \dot{x} = v_0 \\ \dot{y} = \dfrac{eU}{md}t \\ \dot{z} = 0 \end{cases}$ $\begin{cases} x = v_0 t \\ y = \dfrac{eU}{2md}t^2 \\ z = 0 \end{cases}$

Points I = point de sortie des plaques

$x_I = L = v_0 t_I \Rightarrow t_I = L/v_0$

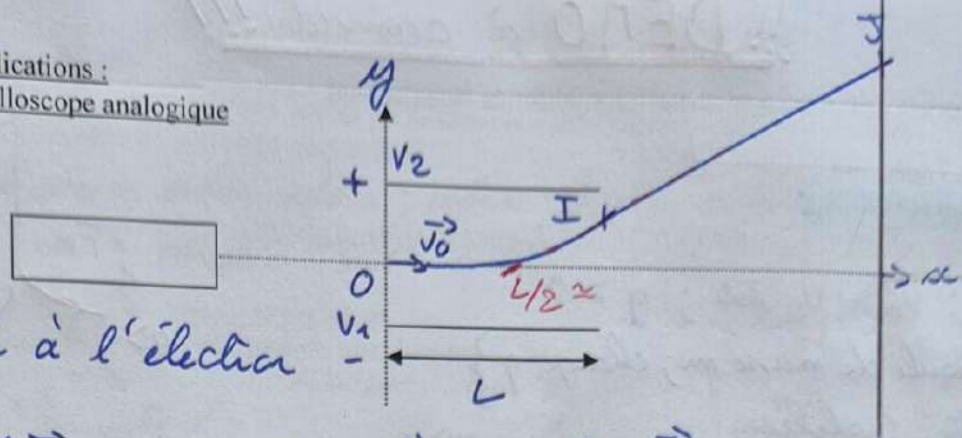
$y_I = \dfrac{eU}{2md}\left(\dfrac{L}{v_0}\right)^2$

$\dot{x}_I = v_0$

$\dot{y}_I = \dfrac{eU}{md}\left(\dfrac{L}{v_0}\right)$

3.) Applications :

a) Principe de l'oscilloscope analogique



LFD appliqué à l'électron après I

$m\vec{a} = \vec{0}$ ($\vec{P}$ est négligeable) $\Rightarrow \vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} = \vec{v_I}$

Mouvement rectiligne uniforme (IJ est une droite

pente au point I $p = \frac{y - y_I}{x - x_I}$ où $p = \left(\frac{dy}{dx}\right)_I = \frac{\dot{y}_I}{\dot{x}_I} = v_{Ix}$

$y = p(x - x_I) + y_I$

$= \frac{eUL^2}{2mdv_0^2} + \frac{eUL}{mdv_0^2}(x - L) = \boxed{\frac{eUL}{mdv_0^2}(x - L/2) = y}$ à $y = 0$ $x = L/2$

5

La déviation de y est liée à U tension appliqué entre les plaques (proportionelle)

b) analyseur d'énergie : Même principe que l'oscilloscope : on envoie cette fois un faisceau hétérocinétique de particules identiques. La déviation est proportionnelle à 1/Ec

faisceau hétérocinétique : particules identiques de vitesse différentes

$y = \frac{1}{\frac{1}{2}mv_0^2} \times \frac{eUL}{2d}(x - L/2)$ Ec

Donc y est proportionelle à 1/Ec

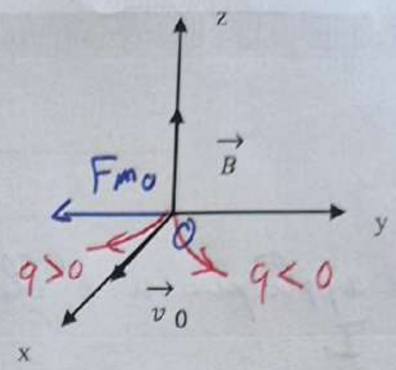
!!! DEMO à connaître !!!

III Particule chargée dans un champ magnétique uniforme et permanent

1.) Trajectoire :

Hypothèse : champ $\vec{B} \perp \vec{v}_0$

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Charges/q_dans_B_FJ.php



$\vec{B} = B\vec{e_z}$; $\vec{v_0} = v_0\,\vec{e_x}$; $q > 0$

Syst : { particule de masse m ; charge q }

Ref : Terrestre Galiléen

Forces : force magnétique $\vec{F_m} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

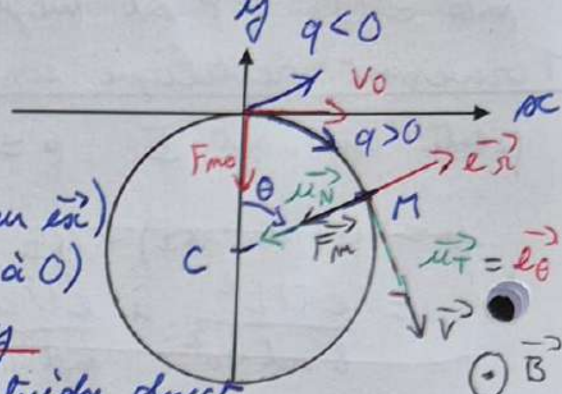
Poids négligé

LFD : $m\vec{a} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{a} \perp \vec{v}$ et $\vec{a} \perp \vec{B}$

Donc $\vec{a} \perp \vec{e_z} \Rightarrow a_z = 0$

$v_z = 0$ (vitesse initiale sur $\vec{e_x}$)

$z = 0$ (position initiale à O)



La trajectoire est dans le plan xOy

à $t = 0$: $\vec{F_{m0}} = q\vec{v_0} \wedge \vec{B}$ ($\vec{v_0}$; $\vec{B}$; $\vec{F_{m0}}$) trièdre direct

Donc $\vec{F_{m0}}$ suivant $-\vec{e_y}$

On trace le cercle tangent à la trajectoire au point O, de centre C

=> Repère de Frenet (coordonnées Polaire MC 1)

Donc $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_T} + \frac{v^2}{R}\vec{u_N} = R\ddot{\theta}\vec{e_\theta} - R\dot{\theta}^2\vec{e_r}$

LFD : $m\vec{a} = q\vec{v} \wedge \vec{B} = qvB\,\vec{u_N}$

Sur $\vec{u_T}$: $\frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow v = \text{cste}$ $\boxed{v = v_0}$ } Le mouvement est uniforme

Sur $\vec{u_N}$: $m\frac{v^2}{R} = qvB \Rightarrow R = \frac{mv}{qB} = \frac{mv_0}{qB} = \text{cste}$ } La trajectoire est circulaire

Donc Mouvement Circulaire uniforme

Temps mis pour décrire le cercle (temps de révolution T)

$\Delta t = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m v}{qBv} = \frac{2\pi m}{qB}$ et $\Delta t = \frac{2\pi}{\omega_0}$ Donc $\omega_0 = \frac{qB}{m}$ Pulsation Cyclotron

Remarque : Si $q < 0$ Déviation vers les $y > 0$

$\vec{F_m} = |q|\,v\,\vec{B}\,\vec{u_N}$ et $R = mv/|q|B$

Remarque : Si v_0 n'est pas $\perp$ à $\vec{B}$, la trajectoire est une hélice d'axe Oz

2.) Applications

a) Principe du spectrographe de masse : On envoie un faisceau homocinétique de particules de même charge, mais de masses différentes. On les sépare par champ magnétique.

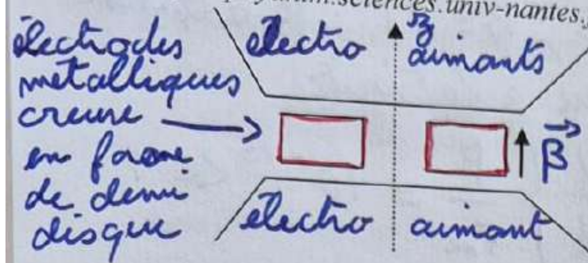
homocinétique = même vitesse ; même charge mais masse ≠ => Isotop

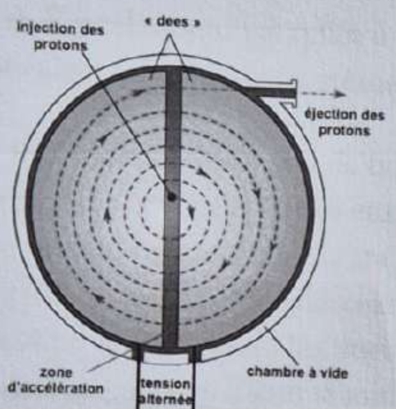
R est proportionelle à m si V_0 et q sont identiques

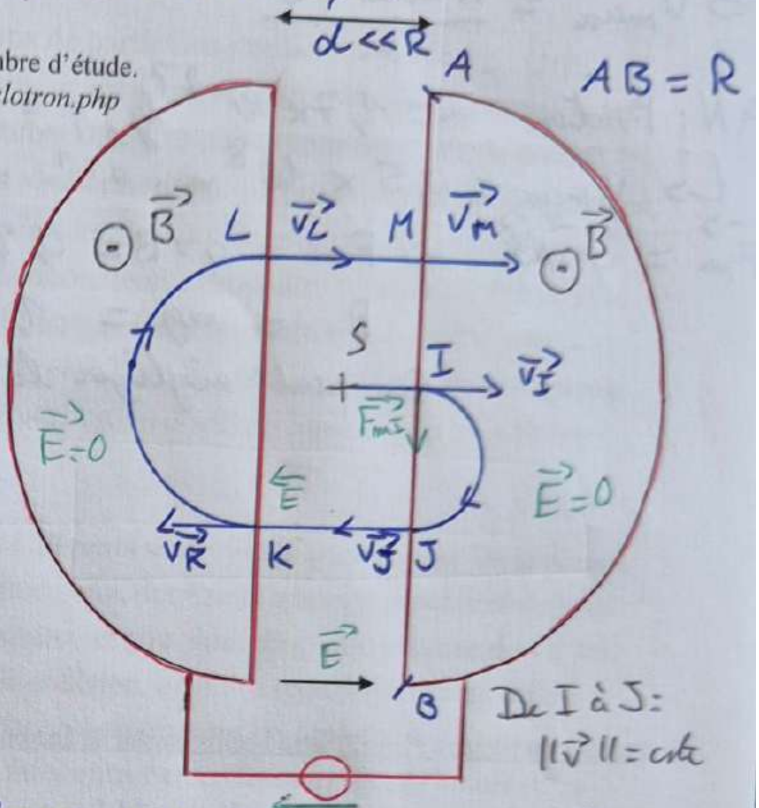
b) Exemple d'accélérateur de particules : le cyclotron

Principe : accélère des ions pour les utiliser dans une chambre d'étude.

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Charges/cyclotron.php







Au centre S : Source d'ion de charge > 0 émis avec une vitesse quasi nulle

1) Sur [SI] : Les ions sont accélérés par le champ $\vec{E}$: LFD $m\vec{a} = q\vec{E}$ avec A dans le sens de $\vec{E}$ pour $q > 0$ sur une distance d/2

2) Sur [IJ] : LFD : $m\vec{a} = q\vec{v} \wedge \vec{B} = \vec{F_m}$ de rayon $R = \frac{mV}{qB}$ $\boxed{\text{Voir p6}}$

3) Sur [JK] : il faut de nouveau accélérer les ions avec un champ $\vec{E}$ en sens inverse

Temps de parcours $\overset{\frown}{IJ}$: $\Delta T = T/2 = \frac{\pi}{\omega_0}$ où $\omega_0 = \frac{qB}{m}$ $\boxed{\text{Voir p 6}}$

On prend un champs sinusoïdal : $E = E_0 \cos(\omega t)$

On veut $E = +E_0$ à l'instant $t_1 \Rightarrow \omega t_1 = 0 + 2k\pi$

$E = -E_0$ à l'instant $t_2 \Rightarrow \omega t_2 = \pi + 2k\pi$

$$\left.\begin{array}{l} \text{avec } t_2 - t_1 = \Delta t = \pi/\omega_c \\ \text{Or } t_2 - t_1 = \dfrac{\pi}{\omega} \end{array}\right\} \text{Donc } \omega = \omega_c = \frac{qB}{m} = cste$$

A chaque traversée : La particule est soumise à $\vec{F_e}$ conservative

=> Conservation de Em : $E_m = \frac{1}{2} m v_J^2 + q V_J + cste = \frac{1}{2} m v_K^2 + q V_K + cste$

Donc $\Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_K^2 - v_J^2) = q(V_J - V_K)$

$\Delta E_c = q U_0$

et $E = E_0 \cos(\omega t)$ On $\underline{U_0 = E_0 \times d}$

$\boxed{\text{Donc } U = U_0 \cos(\omega t)}$

De plus $R_{max} = \dfrac{m\, v_{max}}{q\, B}$ où R_{max} = rayon du cyclotron

$\Rightarrow v_{max} = \dfrac{R_{max}\, q B}{m}$

AN : Proton $m = 1{,}7 \times 10^{-27}$ kg ; $q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C ; $B = 1$ T ; $R = 0{,}5$ m

$\hookrightarrow v_{max} = 0{,}5 \times 10^{8}\ m.s^{-1}$ $\Rightarrow$ Mécanique relativiste

$\vec{F_m} = q\, \vec{v} \wedge \vec{B}$ $\Rightarrow$ $\left.\begin{array}{l} F_m = q v B = 0{,}8 \times 10^{-11}\ N \\ P = mg = 1{,}7 \times 10^{-26}\ N \end{array}\right\} \dfrac{P}{F_m} \simeq 10^{-15} \ll 1$

On peut négliger le poids