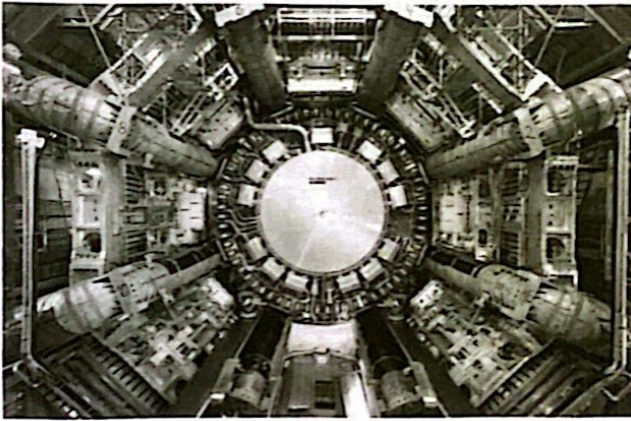
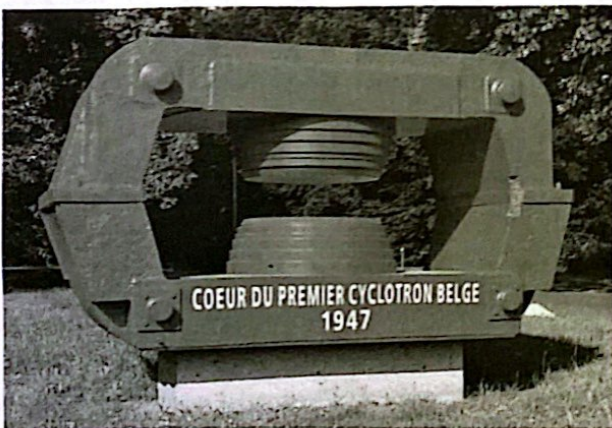


Mécanique MC4 Particule dans un champ

- I Force de Lorentz 2
 - 1.) Définition : 2
 - 2.) Aspect énergétique : 2
- II Particule dans un champ électrique 3
 - 1.) Accélération de particules : 3
 - 2.) Déflexion électrostatique : 4
 - 3.) Applications : 5
- III Particule chargée dans un champ magnétique uniforme et permanent 6
 - 1.) Trajectoire : 6
 - 2.) Applications 7
- Etude documentaire : le LHC grand collisionneur de hadrons 8
 - Les expériences LHC 9
 - Les expériences hors LHC 10



Détecteur ATLAS (Système magnétique toroïdal). Accélérateur de particules au CERN. LHC, grand collisionneur de hadrons. Genève



Aurores boréales : Provoquées par l'interaction entre les particules chargées du vent solaire et la haute atmosphère, les aurores se produisent principalement dans les régions proches des pôles, dans une zone annulaire justement appelée « zone aurorale » (entre 65 et 75° de latitude). En cas d'activité magnétique intense, l'arc auroral s'étend et commence à envahir des zones beaucoup plus proches de l'équateur.

Hypothèse: Les champs sont uniformes (indépendants du point considéré), et permanents ou stationnaires (indépendants du temps). On se place en mécanique classique, non relativiste. $\rightarrow v \ll c$ où $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

- \vec{E} champ électrique créé par des charges
- \vec{B} champ magnétique créé par des charges en mv (aimants ou courants)

1 Force de Lorentz

1.) Définition:

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

Remarque: On considère que toutes les autres forces sont négligeables, en particulier le poids.
Force électrique: $\vec{F}_e = q\vec{E}$
Force magnétique: $\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} = \text{Tor}(T)$.

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.

démo:

$$W(\vec{F}_m) = \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} \vec{F}_m \cdot d\vec{l} = \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} (q\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{l} = 0$$

donc $W(\vec{F}_m) = 0$.
ou \vec{F}_m ne travaille jamais.

th de l'Ec: à une particule $= M(q, \vec{v})$ ds un ref galiléen.

Si M est soumis à \vec{F}_m , $\Delta E_c = W(\vec{F}_m) = 0 \Rightarrow E_c = \text{cte}$

de son côté, $W(\vec{F}_e) = \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} \vec{F}_e \cdot d\vec{l} = \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} q\vec{E} \cdot d\vec{l}$

dans ce chapitre (MCI): champ uniforme $\vec{E} = E\vec{e}_z$ (non, q MCI)

$$\begin{aligned} \text{donc } W(\vec{F}_e) &= \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} qE \vec{e}_z \cdot d\vec{l} \text{ avec } d\vec{l} \text{ en coord cartésiennes} \\ &= qE \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} dx \\ &= [qEx]_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} \end{aligned}$$

$$V_{\Gamma_1 \rightarrow \Gamma_2}(\vec{F}_e) = [-Ep]_{\Gamma_1}^{\Gamma_2}$$

$$\Rightarrow E_{pes} = -qEx + \text{cte}_1 \text{ énergie potentielle électrostatique}$$

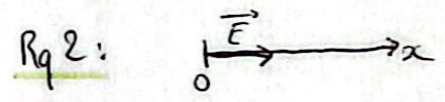
$$\text{donc } E_{pes} = qV + \text{cte}_2 \quad V \vec{E}$$

ou V : potentiel électrostatique

$$\Rightarrow V = -Ex + \text{cte}_3 \quad (3)$$

Rq 1: pour un champ \vec{E} qlq onque:

$E_{pes} = qV + \text{cte}$ reste valable mais E_{pes} et V ont une autre expression



$x \nearrow$ qd $V \downarrow$ d'après (3)

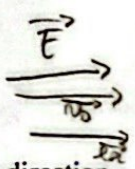
\vec{E} est dans le sens des potentiels décroissants

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.



LFD : à $M(q, \vec{v})$ dans un ref galiléen

$$m\vec{a} = \vec{F}_e = q\vec{E} \quad (\text{on néglige } \vec{P})$$

$$\Rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E} \quad \rightarrow \quad \boxed{\vec{v} = \frac{q}{m} \vec{E} t + \vec{v}_0}$$

si $\vec{E} \parallel \vec{v}_0$ alors $\vec{v} \parallel \vec{v}_0 \rightarrow$ trajectoire rectiligne

• conservat° de l'Em:

$$E_m = E_c + E_{pes} = \frac{1}{2} m v^2 + qV + \text{cte}$$

entre M_1 et M_2 :

$$\frac{1}{2} m v_1^2 + qV_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 + qV_2$$

$$\Rightarrow \Delta E_c = -q(V_2 - V_1), \quad \boxed{U = V_2 - V_1} : \text{diff. potentiel} = \text{tens.}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta E_c = -qU} \quad \text{à redémontrer}$$

Applications :

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

$$\boxed{1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

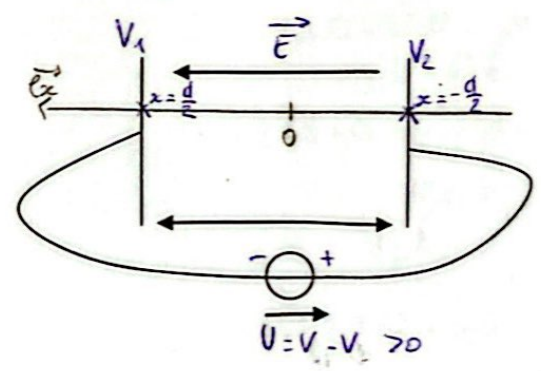
$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

2) Canon à électron

On accélère les électrons entre deux plaques /grilles métalliques



On impose $U \Rightarrow$ potentiels $\Rightarrow \vec{E}$ ds le sens des potentiels décroissants

$$\Rightarrow \vec{E} = E \vec{e}_x \Rightarrow V = -Ex + \text{cte}$$

en $x = -\frac{d}{2}$: $V_2 = -E(-\frac{d}{2}) + \text{cte}$
 $V_2 = \frac{Ed}{2} + \text{cte}$

en $x = \frac{d}{2}$: $V_1 = -E(\frac{d}{2}) + \text{cte}$

$$\Rightarrow U = V_2 - V_1 = E(\frac{d}{2} + \frac{d}{2}) + \text{cte} = Ed$$

$$\Rightarrow \boxed{E = \frac{U}{d}}, \quad \vec{E} = \frac{U}{d} \vec{e}_x$$

AM : $d = 2 \text{ cm}$; $U = 100 \text{ V}$

donc $F_e = |q|E = 1,6 \times 10^{-19} \times \frac{100}{2 \times 10^{-2}} \approx 10^{-15} \text{ N}$

et $P = mg = 9,1 \times 10^{-31} \times 9,81 \approx 10^{-20} \text{ N}$

$$\frac{P}{F_e} \approx 10^{-14} \ll 1 \rightarrow \text{on peut négliger } \vec{P}$$

2.) Déflexion électrostatique :
Hypothèse : champ $\vec{E} \perp \vec{v}_0$

$q_e : q = -e < 0, \text{ à } t=0 : \vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$
 $\vec{E} = -E \vec{e}_y$

FD : à l'e- dans un ref galiléen (P' négligée)

$m\vec{a} = \vec{F}_e = +q\vec{E} = -qE\vec{e}_y$

\vec{F}_e et \vec{v}_0 ds le plan (x, 0y) \Rightarrow traj dans ce plan
 $\hookrightarrow z=0$

$\vec{a} = -\frac{q}{m} E \vec{e}_y$

donc $\int \ddot{x} = 0$
 $\int \ddot{y} = -\frac{qE}{m} = \frac{eE}{m}$ car $q = -e$

$\int \dot{x} = A$
 $\int \dot{y} = \frac{eE}{m} t + B$

d'après les CI :

$v(0) = v_0 = v_0 \vec{e}_x + 0 \vec{e}_y$

donc $\dot{x}(0) = v_0$
 et $y(0) = 0 + B = B = 0$

donc $\dot{x} = v_0$
 $\dot{y} = \frac{eE}{m} t$

donc $x = v_0 t + C$
 $y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 + D$

d'après les CI :

$x(0) = 0$ donc $C = 0$
 $y(0) = 0$ et $D = 0$

donc $x = v_0 t$
 $y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2$ OR $E = \frac{U}{d}$

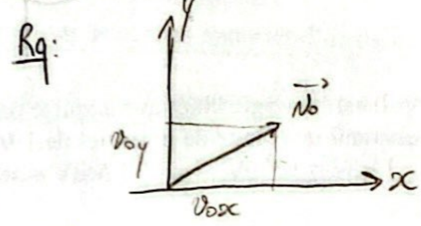
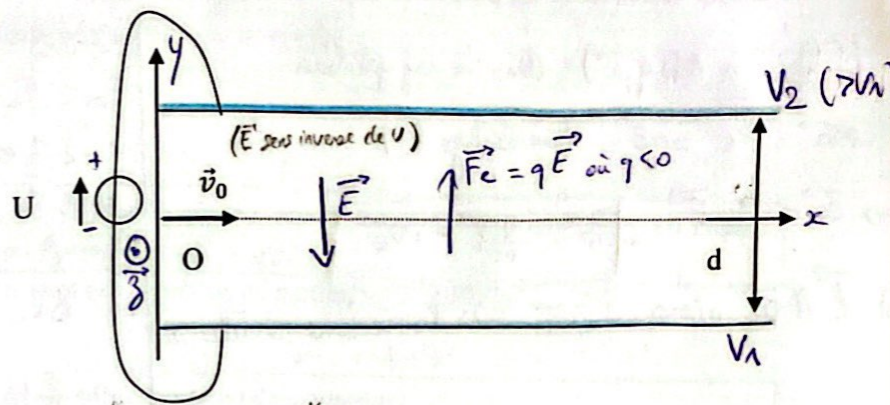
donc $x = v_0 t$
 $y = \frac{eU}{2md} t^2$

$x = v_0 t$ donc $t = \frac{x}{v_0}$

en remplaçant dans y, $y = \frac{eU}{2md} \times \frac{x^2}{v_0^2}$

\hookrightarrow parabolique \hookrightarrow parabole tournée vers le haut

*** Calcul à refaire.

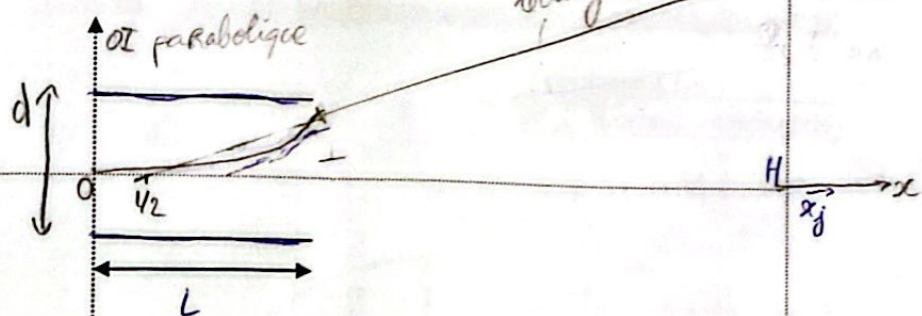


$\vec{v}_0 = v_{0x} \vec{e}_x + v_{0y} \vec{e}_y$, m calcul que tu de projectile (MC2)

3.) Applications :

a) Principe de l'oscilloscope analogique

canon à e



Scu[IS]:

aucune force n'intervient, sauf la poids qui peut légèrement courber la trajectoire

LFD: $m\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \vec{a} = 0$
 $\text{lo } \vec{v} = \vec{v}_I = \text{cste}$ Traj. rectiligne

lo Mov rectiligne uniforme.

trajectoire passant par I ($x_I = L$) de pente $\frac{dy}{dx} \Big|_{(I)} = \frac{y_I}{x_I} = p$

d'après l'ex précédent (m résultats),

(i) $x_I = L = v_0 t_I \Rightarrow t_I = \frac{L}{v_0}$

(ii) $y_I = \frac{eUL^2}{2mdv_0^2}$

$\Rightarrow \dot{x}_I = v_0$

$\Rightarrow \dot{y}_I = \frac{eUL}{mdv_0}$

onc $p = \frac{eUL}{mdv_0^2}$

si $p = \frac{y - y_I}{x - x_I} \Rightarrow y - y_I = p(x - x_I)$

$\Rightarrow y = \frac{eUL}{mdv_0^2} (x - L) + \frac{eUL^2}{2mdv_0^2}$

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

donc $y = \frac{eUL}{mdv_0^2} (x - \frac{L}{2})$

HJ: déviation

$D = \frac{eUL}{mdv_0^2} (x_j - \frac{L}{2})$ proportionnelle à U

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

particules avec $v_0 \neq 0$, m masse, q charge, U cste

$\Rightarrow D = \frac{eUL}{2d(\frac{1}{2}mv_0^2)} (x_j - \frac{L}{2})$

$D \propto \frac{1}{E_c}$ on sépare les particules suivant v.

proportionnelle

III Particule chargée dans un champ magnétique uniforme et permanent

1.) Trajectoire :

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

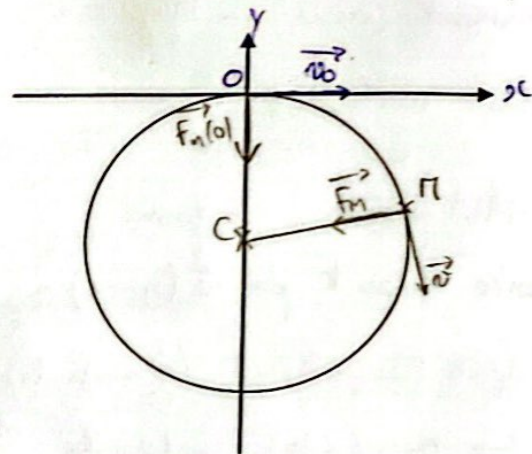
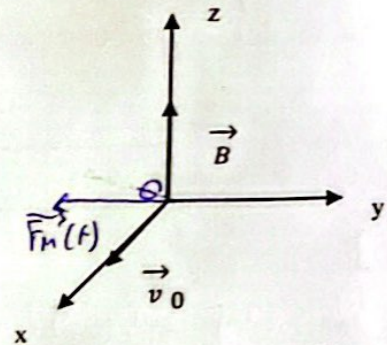
système : $\{ M(m, q) \}$

ref. terrestre gal.

forces : force magnétique :

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

\vec{P} négligé



projection de la LFD :

$$\vec{u}_r \left\{ \begin{aligned} m \frac{dv}{dt} = 0 &\Rightarrow \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow v = \text{cte} \\ \frac{mv^2}{R} = qvB &\Rightarrow R = \frac{mv}{qB} \end{aligned} \right. \rightarrow R = \text{cte}$$

à retrouver

donc la trajectoire est circulaire

et décrite à vitesse cste = mv circulaire uniforme.

temps mis pour faire un tour :

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \times \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$\Delta t = \frac{2\pi}{\omega_c} \text{ où } \omega_c = \frac{qB}{m} \text{ pulsation cyclotron}$$

$$\Rightarrow v = R \omega_c$$

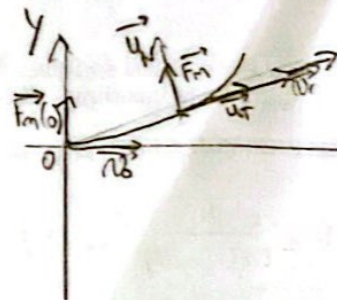
Rq: pour $q < 0$:

particule déviée vers le haut

$$\text{sur } \vec{u}_r : \frac{mv^2}{R} = |q|vB$$

$$\hookrightarrow R = \frac{mv}{|q|B}$$

Rq 2: or \vec{v}_0 pas \perp à \vec{B}
la traj est une hélice oblique (\vec{v}_0)
($\vec{v}_0 = v_x \vec{e}_x + v_y \vec{e}_y$)



à $t=0$: CI :

$$\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$$

particule $q > 0$ au point O

$$\vec{B} = B \vec{e}_z = \text{cte}$$

LFD :

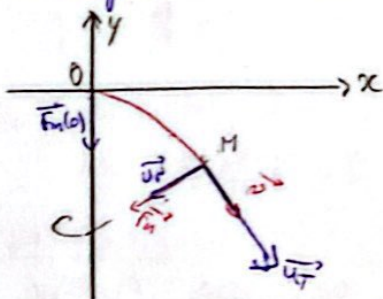
$$m \vec{a} = \vec{F}_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$\vec{F}_m(t=0) = q v_0 \wedge B \vec{e}_z$$

↳ suivant $-\vec{e}_y$

\vec{F}_m et \vec{v}_0 sont dans le plan (O, x, y)

↳ la trajectoire sera dans ce plan



on se place dans le repère de Fresnel

on trace le cercle tangent à la traj au pt M, de centre C.

\vec{v} est tangent à la trajectoire, ds le sens du mvt

\vec{u}_r est à la traj ds le sens de \vec{v}

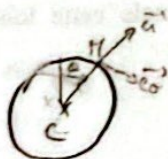
$\vec{u}_p \perp \vec{u}_r$, orienté vers C.

$$\vec{v} = v \vec{u}_r$$

$$\text{Rq: } \vec{CM} = R \vec{e}_r, \vec{v} = R \dot{\theta} \vec{e}_\theta$$

$$\vec{a} = R \ddot{\theta} \vec{e}_\theta - R \dot{\theta}^2 \vec{e}_r \quad (\text{car } v = R \dot{\theta})$$

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{e}_\theta - \frac{v^2}{R} \vec{e}_r$$



Rerc dépendent à priori du temps
↳ non cste

$$\text{donc } \vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{u}_r + \frac{v^2}{R} \vec{u}_p$$

cf: sciences-univ-Montp (méca/particules chargées/champs magnétiques)

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.

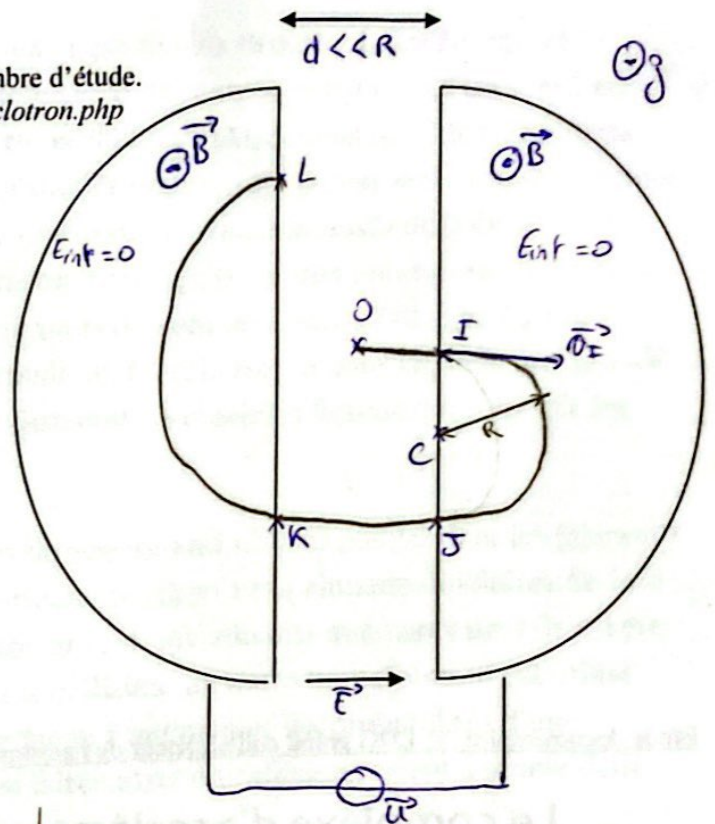
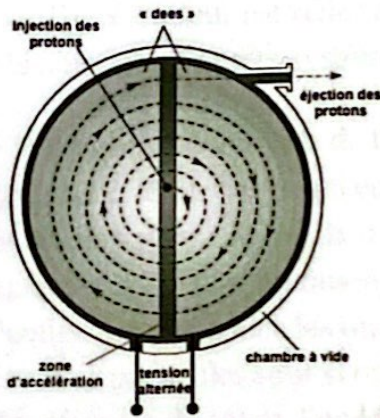
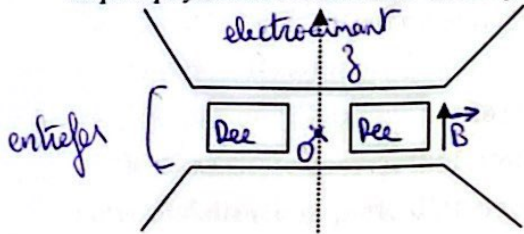
ex: isotopes: \tilde{m} , Z , $A \neq$
 charge, même $\Rightarrow \tilde{m} q$

$R = \frac{mv}{qB} \rightarrow R \propto m$ ← separation isotopes

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>



des ions sont injectés en O sans vitesse initiale
sur OI, ils sont accélérés par \vec{E} sur une distance $\frac{d}{2}$
 (aux autres passages sur une distance d).

sur IJ, les ions sont déviés par \vec{B} , mais restent à vitesse const.
 $R = \frac{mv}{qB}$ (cf page ant)

$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_c}$ pour parcourir $\frac{1}{2}$ cercle.
 où $\omega_c = \frac{qB}{m} \Rightarrow \Delta t$ est indépendant de R

$E = E_0 \cos(\omega t)$ pour accélérer les ions à chaque passage
 $E = +E_0$ sur OI, $\cos(\omega t_1) = 1 \rightarrow \omega t_1 = 0 + 2k\pi$
 $E = -E_0$ sur JK, $\cos(\omega t_2) = -1 \rightarrow \omega t_2 = \pi + 2k\pi$

on veut varier entre $(-E_0, E_0) \rightarrow$ on utilise cos, sinusoïdal
 $t_2 - t_1 = \frac{\pi}{\omega} \Rightarrow \Delta t = t_2 - t_1 \Rightarrow \omega = \omega_c$

à chaque traversée : conservation de l'Em entre J et K

$\frac{1}{2} m v_1^2 + qV_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 + qV_2$
 $\Rightarrow \Delta E = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) = q(V_1 - V_2) = qU$
 où $U = E \cdot d$ ($E = \frac{U}{d}$)

AN: $R_{cyclo} = 0,5 \text{ m}$ $B = 1 \text{ T}$
 proton: $m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $q = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

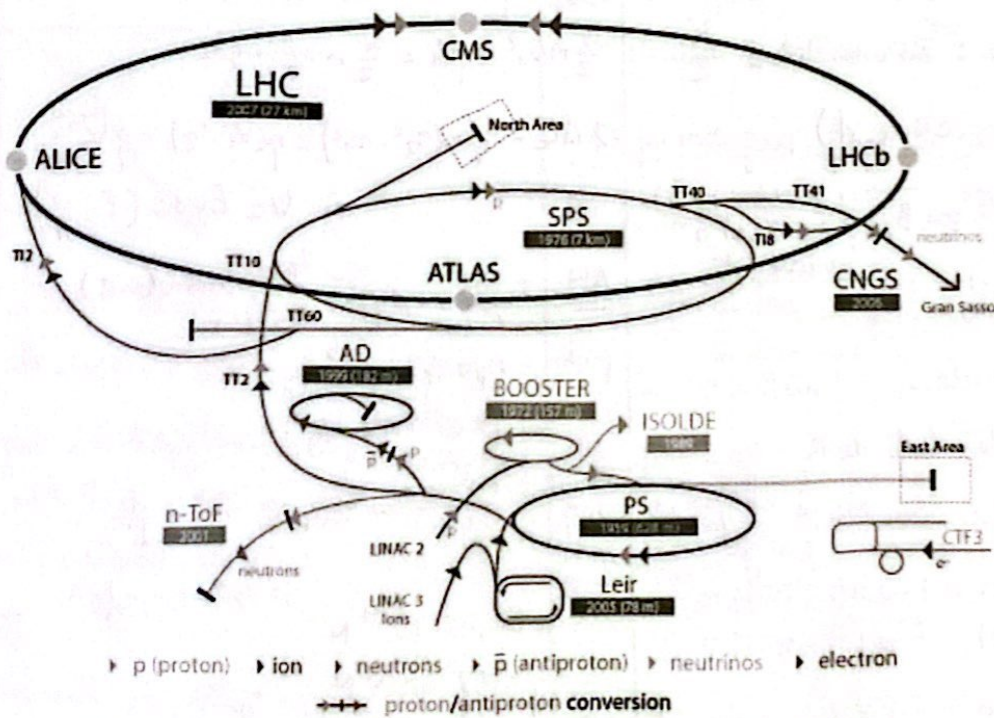
$R_{cyclo} = \frac{m v_{max}}{qB} \Rightarrow v_{max} = \frac{R_{cyclo} qB}{m}$
 $= 0,5 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

$F_n = qvB = 0,8 \times 10^{-11} \text{ N}$
 $P = mg = 1,7 \times 10^{-26} \text{ N}$

$\frac{P}{F_n} \approx 10^{-15} \ll 1 \rightarrow \vec{P}$ négligeable.

Etude documentaire : le LHC grand collisionneur de hadrons

Le complexe d'accélérateurs du CERN



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Le LHC, l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant du monde, est le dernier maillon du complexe d'accélérateurs du CERN. Il consiste en un anneau de 27 kilomètres de circonférence formé d'aimants supraconducteurs et de structures accélératrices qui augmentent l'énergie des particules qui y circulent.

À l'intérieur de l'accélérateur, deux faisceaux de particules circulent à des énergies très élevées et à une vitesse proche de celle de la lumière avant de rentrer en collision l'un avec l'autre. Les faisceaux circulent en sens opposé, dans des tubes distincts placés sous un vide très poussé (ultravide). Ils sont guidés le long de l'anneau de l'accélérateur par un puissant champ magnétique, généré par des électroaimants supraconducteurs. Ces derniers sont composés de bobines d'un câble électrique spécial fonctionnant à l'état supraconducteur, c'est-à-dire conduisant l'électricité sans résistance ni perte d'énergie. Pour cela, les aimants doivent être refroidis à -271°C , une température plus froide que celle de l'espace intersidéral. C'est la raison pour laquelle une grande partie de l'accélérateur est reliée à un système de distribution d'hélium liquide qui refroidit les aimants ainsi que d'autres systèmes annexes.

Des milliers d'aimants de types et de tailles différents sont utilisés pour diriger les faisceaux le long de l'accélérateur. Parmi eux, les aimants principaux, dont 1234 aimants dipolaires de 15m de long utilisés pour courber la trajectoire des faisceaux, et 392 aimants quadripolaires de 5 à 7m de long qui concentrent les faisceaux. Juste avant la collision, un autre type d'aimant est utilisé pour "coller" les particules les unes aux autres, de façon à augmenter les probabilités d'une collision. Ces particules sont si minuscules que les faire entrer en collision revient à lancer deux aiguilles éloignées de 10km, l'une contre l'autre !

Tous les systèmes de contrôle de l'accélérateur et de leur infrastructure technique sont regroupés au Centre de contrôle du CERN. C'est depuis ce Centre que sont déclenchées les collisions des faisceaux au centre des détecteurs de particules.

Les expériences LHC

Parmi les expériences menées au Grand collisionneur de hadrons (LHC), sept utilisent des détecteurs pour analyser la myriade de particules produites lors des collisions dans l'accélérateur. Ces expériences sont conduites par des collaborations de chercheurs provenant d'instituts du monde entier. Chacune est différente et se caractérise par ses détecteurs.

Les deux expériences les plus grandes, ATLAS et CMS, exploitent des détecteurs polyvalents pour explorer des domaines aussi vastes que possible. Le fait de disposer de deux détecteurs conçus indépendamment est essentiel pour recouper des informations en cas de découverte. ALICE et LHCb utilisent des détecteurs spécialisés pour se concentrer sur des phénomènes particuliers. Ces quatre détecteurs sont logés dans d'énormes cavernes souterraines disposées le long de l'anneau du LHC.

Les plus petites expériences menées au LHC sont TOTEM et LHCf. Elles sont axées sur les particules dites « à très petits angles » – des protons ou des ions lourds qui se frôlent plutôt que

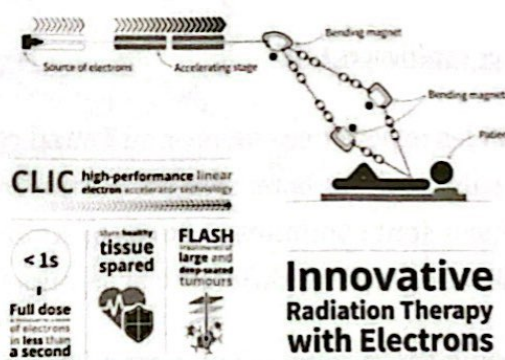
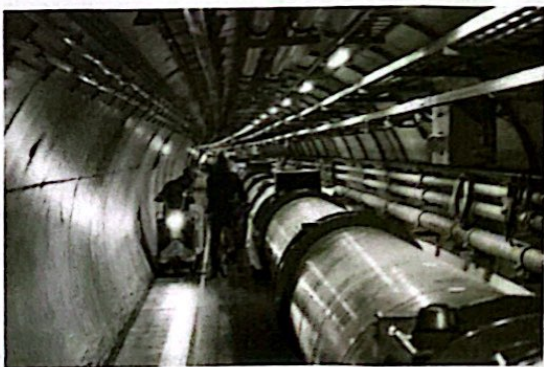
d'entrer en collision frontale lorsque les faisceaux se croisent. TOTEM utilise des détecteurs placés de part et d'autre du point d'interaction de CMS, tandis que l'installation de LHCf est constituée de deux détecteurs disposés le long de la ligne de faisceau du LHC, à 140 mètres de chaque côté du point de collision d'ATLAS. MoEDAL, qui exploite des détecteurs déployés près de LHCb, a été conçu pour la recherche d'une particule hypothétique appelée monopôle magnétique.

Les expériences hors LHC

Si la recherche au CERN s'est de plus en plus concentrée sur le LHC ces dernières années, les expériences menées à l'aide d'autres accélérateurs ou installations, que ce soit sur le domaine du CERN ou ailleurs, continuent de former une partie importante des activités du Laboratoire.

Dans les expériences avec cible fixes, un faisceau de particules accélérées est orienté sur une cible solide, liquide ou gazeuse, qui peut faire partie intégrante du système de détection. COMPASS, qui étudie la structure des hadrons (des particules constituées de quarks) utilise des faisceaux du Supersynchrotron à protons (SPS). NA61/SHINE a pour objet les propriétés des hadrons lors des collisions de particules sur des cibles fixes. NA62 utilise des protons du SPS pour analyser des modes rares de désintégration des kaons. DIRAC explore les interactions fortes entre les quarks au Synchrotron à protons (PS). L'expérience CLOUD étudie le lien possible entre les rayons cosmiques et la formation des nuages. Les expériences ACE, AEGIS, ALPHA, ASACUSA et ATRAP utilisent toutes des antiprotons du Décélérateur d'antiprotons, tandis que l'expérience CAST a pour objet de trouver des particules hypothétiques ne provenant pas d'oscillations dans les accélérateurs, mais du Soleil.

Ce programme de recherche, d'une grande richesse, couvre un vaste éventail de thèmes de la physique, allant des kaons aux rayons cosmiques et du Modèle standard à la supersymétrie.



<http://home.web.cern.ch>

<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/accelerateurs-de-particules.aspx?Type=Chapitre&numero=1>