

# Chapitre 4.2b – Le cyclotron

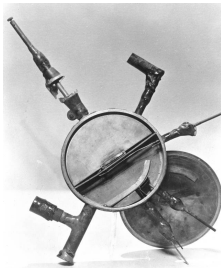
## Le cyclotron

Le cyclotron permet d'accélérer des particules chargées à de très grande vitesse. Même si un simple système de plaque parallèle peut accélérer des charges, cette technique n'est pas suffisante si l'on veut atteindre des vitesses qui s'approchent de la vitesse de la lumière.

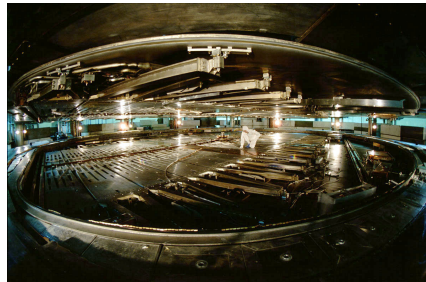
Le premier cyclotron fut inventé par le physicien américain Ernest Orlando Lawrence en 1931 (prix Nobel de physique en 1939) ce qui permis d'accélérer des ions d'hydrogène (proton) à des énergies cinétiques de 80 000 eV. De nos jours, les cyclotrons sont beaucoup plus performant et permet d'atteindre des énergies cinétiques de l'ordre de 500 MeV comme le cyclotron du TRIUMF situé au laboratoire national Canadien TRIUMF en Colombie-Britannique.



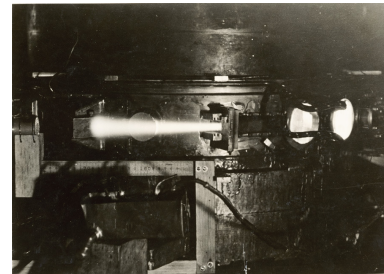
Ernest Orlando Lawrence (1901-1958)



Premier cyclotron



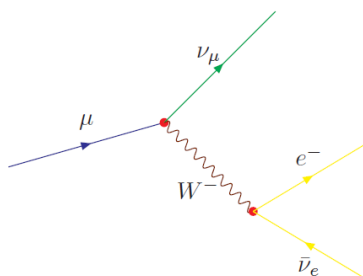
Cyclotron du TRIUMF (Diamètre : 18 m , Champ magnétique : 0,46 T)



Faisceau de particules à la sortie d'un cyclotron

### Usage théorique :

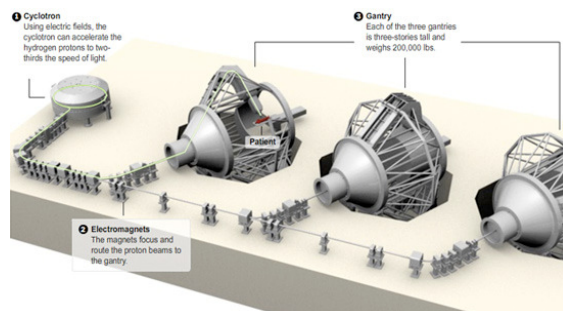
- ❖ Réaliser des expériences en physique nucléaire comme créer des atomes synthétique (ceux de noyau atomique supérieur à l'uranium 92) par collision.
- ❖ Créer des collisions avec des faisceaux de particules à très hautes énergies afin d'étudier des particules plus massives (ex : muon  $\mu$  , pion  $\pi$ ).



Désintégration du muon en électron (diagramme Feynman)

### Usage médicale :

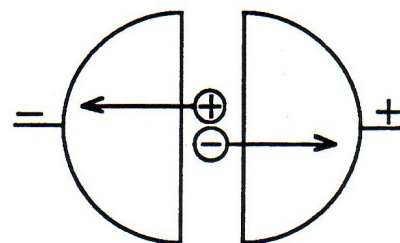
- ❖ Production de fluor 18 (radioactif) utilisé comme traceur dans un système d'imagerie TEP (tomographie par émission de positron). Le carbone 11 et l'oxygène 15 sont également des atomes radioactifs utilisés en imagerie médicale.
- ❖ Protonthérapie en bombardant à l'aide de protons des cellules cancéreuses.



Cyclotron pour protonthérapie

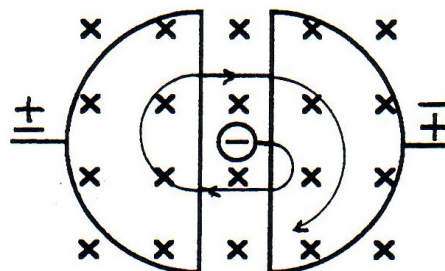
## Le fonctionnement du cyclotron

1) On introduit des particules chargées entre les deux demi-cylindres où il y a présence d'un champ électrique provenant d'une différence de potentiel. Les particules sont poussées vers l'un des deux demi-cylindres.



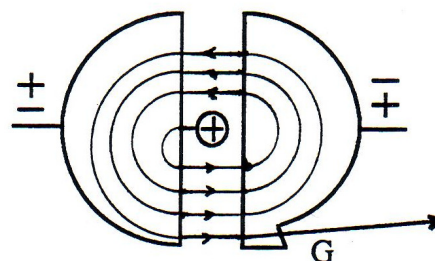
**Le module de la vitesse des particules augmente.**

2) Lorsque les particules entrent dans l'un des demi-cylindres, il n'y a plus de force électrique appliquée sur les particules, mais la présence d'un champ magnétique impose aux particules une trajectoire circulaire de rayon  $r = mv / qB$ .



**Le module de la vitesse des particules ne varie pas.**

3) Après avoir complété un demi tour, les particules se retrouvent à l'intersection des deux demi-cylindres. On **inverse** à ce moment la **différence de potentiel** pour inverser l'orientation du champ électrique afin de permettre aux particules d'accélérer à nouveau.



**Le module de la vitesse de la particule augmente.**

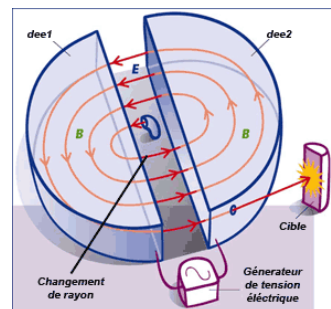
4) Les particules effectuent plusieurs tours dans le cyclotron jusqu'à leur expulsion du cyclotron, car le rayon de la trajectoire circulaire augmente avec l'augmentation du module de la vitesse.

## La fréquence du cyclotron

Puisque la **période** du mouvement circulaire d'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique **ne dépend pas** de la **vitesse** ni du **rayon** de la trajectoire circulaire, on peut appliquer aux bornes des deux demi-cylindres une différence de potentiel alternative sinusoïdale avec une fréquence  $f$  constante telle que :

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

- où
- $f$  : Fréquence cyclotronique (Hz)
  - $m$  : Masse de la particule (kg)
  - $q$  : Charge électrique de la particule (C)
  - $B$  : Module du champ magnétique (T)



Preuve :

À partir de la période  $T$  du mouvement hélicoïdale d'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique, évaluons la fréquence  $f$  de ce mouvement à partir de la définition de la fréquence :

$$f = \frac{1}{T} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{1}{(2\pi m / qB)} \quad \text{(Remplacer } T = \frac{2\pi m}{qB} \text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{f = \frac{qB}{2\pi m}} \quad \blacksquare \quad \text{(Simplifier)}$$

## CERN

Le CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), fondé en 1954, est devenu le plus grand laboratoire de recherche en physique des particules. Il est constitué de plusieurs accélérateurs de particules et de plusieurs sites de détection de particules.

Localité :

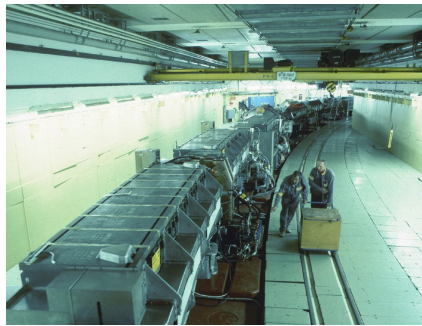
Genève sur la frontière Franco-suisse

Taille du Synchrocyclotron :

27 km de circonférence à 100 m sous terre



Vue aérienne du CERN



Synchrocyclotron à proton du CERN

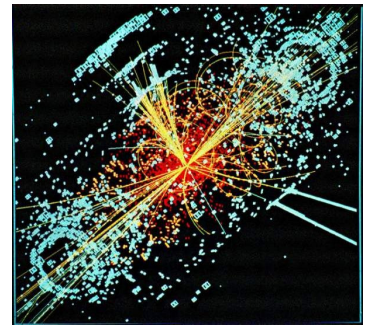


Image des détecteurs du CERN

Large Electron-Positron Collider (LEP)

- Année : 1989 à 2000
- Énergie en jeu : électron et positron à 104 GeV (16,6 nJ)

Large Hadron Collider (LHC)

- Année : 2008 à aujourd'hui
- Énergie en jeu : proton et anti-proton à 7 TeV (1,12 μJ), ion de plomb à 1 150 TeV (184 μJ)

Équivalence masse-énergétique :

$E = mc^2$	104 GeV (G = 10 <sup>9</sup> )	7 TeV (T = 10 <sup>12</sup> )
$E_{\text{électron}} = 8,19 \times 10^{-14} \text{ J}$	203 174 électrons	1 953 602 électrons
$E_{\text{proton}} = 1,44 \times 10^{-10} \text{ J}$	115 protons	7 778 protons
Pile AA (1000 mAh) : 5 400 J	$3,07 \times 10^{-12}$ Pile AA	$2,07 \times 10^{-10}$ Pile AA

## Exercices

**Référence :** Note Science Santé - Chapitre 7 – Question 20

On utilise un cyclotron pour accélérer des particules  $\alpha$  (noyaux de 2 protons et 2 neutrons). La différence de potentiel fournie par l'oscillateur à haute fréquence est de 1000 V.

- a) Après combien de tours complets les particules  $\alpha$  auront-elles acquis une vitesse d'au moins  $2 \times 10^6$  m/s ? (on suppose ici que l'oscillateur produit un voltage parfaitement carré)
- b) Quelle doit être la grandeur du champ magnétique du cyclotron, au gauss ( $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ ), pour que ces particules ressortent sous un rayon de 0,5 mètre ?
- c) Quelle est la fréquence de l'oscillateur ?

**Référence :** Note Science Santé - Chapitre 7 – Question 19

On veut obtenir des protons de 8 MeV. Le champ magnétique du cyclotron est de 2 T.

- a) Quel doit être le rayon de chaque D ?
- b) Quelle serait l'énergie des deutérons (noyaux composés d'un proton et d'un neutron;  $m_d = 2 m_p$ ) accélérés dans ce même cyclotron.
- c) Quelle doit être la fréquence de l'oscillateur
  - 1) Quand on accélère des deutérons ?
  - 2) Quand on accélère des protons ?

## Solutions

**Référence :** Note Science Santé - Chapitre 7 – Question 20

On utilisera :

$$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad q_p = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$
$$m_n = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

a)  $\Delta K + \Delta U = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta K + q\Delta V = 0$

$$\Rightarrow \quad \Delta K + qN\Delta V_{\text{passage}} = 0$$

Avec  $K_i = 0$ ,  $V_f = 0$  :

$$K_f - qNV_{\text{passage}} = 0 \quad \Rightarrow \quad K_f = qNV_{\text{passage}}$$
$$\Rightarrow \quad N = \frac{K_f}{qV_{\text{passage}}} = \frac{mv^2}{2qV_{\text{passage}}} = \frac{4m_p v^2}{2 * 2e V_{\text{passage}}}$$
$$\Rightarrow \quad N = \frac{4(1,67 \times 10^{-27})(2 \times 10^6)^2}{4(1,6 \times 10^{-19})(1000)} = 41,75 \text{ passages}$$

Puisqu'il y a 2 passages par tours :

$$N_{\text{tours}} = \frac{N}{2} = \frac{41,75}{2} = 20,875 \text{ tours} \quad \Rightarrow \quad \text{il faut compléter } \underline{21 \text{ tours}} \text{ pour atteindre la vitesse.}$$

b)  $R = \frac{mv}{qB} \quad \Rightarrow \quad B = \frac{mv}{qR} = \frac{4m_p v}{2eR} = \frac{4(1,67 \times 10^{-27})(2 \times 10^6)}{2(1,6 \times 10^{-19})(0,5)} = 0,0835 \text{ T} = 835 \text{ G}$

c)  $f = \frac{qB}{2\pi m} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{2eB}{2\pi * 4m_p} = \frac{2(1,6 \times 10^{-19})(0,0835)}{8\pi(1,67 \times 10^{-27})} = 6,37 \times 10^5 \text{ Hz}$

**Référence :** Note Science Santé - Chapitre 7 – Question 19

On utilisera :  $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$        $q_p = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Changement d'unité :  $1 \text{ eV} = 1 * (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) * \text{V} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

Donc :  $8 \text{ MeV} = 8 * (1 \times 10^6) (1,6 \times 10^{-19}) = 1,28 \times 10^{-12} \text{ J}$

Voici le rayon de la trajectoire d'une particule chargée sous l'effet d'une force magnétique :

$$R = \frac{mv}{qB}$$

a)  $R = \frac{mv}{qB}$     et     $K = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2K}{m}}$

$$\Rightarrow R = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2K}{m}} = \frac{\sqrt{2mK}}{qB} = \frac{\sqrt{2(1,67 \times 10^{-27})(1,28 \times 10^{-12})}}{(1,6 \times 10^{-19})(2)} = 0,204 \text{ m} = 20,4 \text{ cm}$$

b)  $R = \frac{\sqrt{2m_d K}}{qB}$

$$\Rightarrow K = \frac{(RqB)^2}{2m_d} = \frac{((0,204)(1,6 \times 10^{-19})(2))^2}{2(2 * 1,67 \times 10^{-27})}$$

$$\Rightarrow K = 6,38 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\Rightarrow K = 6,38 \times 10^{-13} \text{ J} * \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J}} \quad (\text{Conversion unité : } 1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J})$$

$$\Rightarrow K = 3,99 \text{ MeV}$$

c) Avec  $f = \frac{qB}{2\pi m} \Rightarrow f_d = \frac{(1,6 \times 10^{-19})(2)}{2\pi(2 * 1,67 \times 10^{-27})} = 15,2 \times 10^7 \text{ Hz}$

$$f_p = \frac{(1,6 \times 10^{-19})(2)}{2\pi(1,67 \times 10^{-27})} = 30,4 \times 10^7 \text{ Hz}$$