

Sonder la matière



Choix de la sonde :

→ Dualité onde-corpuscule : $\lambda = h/p$

(Louis de Broglie, 1924)

Pour « voir » des particules de dimensions de plus en plus petites, il faut sonder la matière de plus en plus profondément, donc utiliser des particules de grandes énergies, qui vont être produites par des **accélérateurs de plus en plus puissants**

On utilisera comme sonde des noyaux, des électrons, des nucléons, des ions ou même des quarks

Ex : pour des électrons avec une énergie cinétique T de :

de 100 keV (microscope électronique) : $\lambda = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = 2\pi \cdot \frac{197}{0,3} \approx 3,7 \text{ pm}$

de 50 MeV $\rightarrow \lambda = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = 2\pi \cdot \frac{197}{50} \approx 25 \text{ fm}$ (pour T grand on a $pc \approx T$)

de 1 GeV $\rightarrow \lambda \approx 1,2 \text{ fm}$

de 100 GeV $\rightarrow \lambda \approx 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ fm}$



Rappels de relativité :

Notions de base

Energie de masse au repos : $E_0 = m_0 c^2$

Energie totale : $E = \gamma m_0 c^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ avec $\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E}$ et $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

Impulsion : $\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}$

Energie cinétique : $E = \gamma m_0 c^2 = T + m_0 c^2$ donc $T = (\gamma - 1)m_0 c^2$

Le carré scalaire du quadrivecteur impulsion énergie, qui est un invariant relativiste, donne $E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$. On en déduit que $p^2 c^2 = T(T + 2m_0 c^2)$.

Pour un système de particules, on peut écrire le quadrivecteur impulsion-énergie total, dont le carré est un invariant relativiste (invariant dans tout changement de référentiel) :

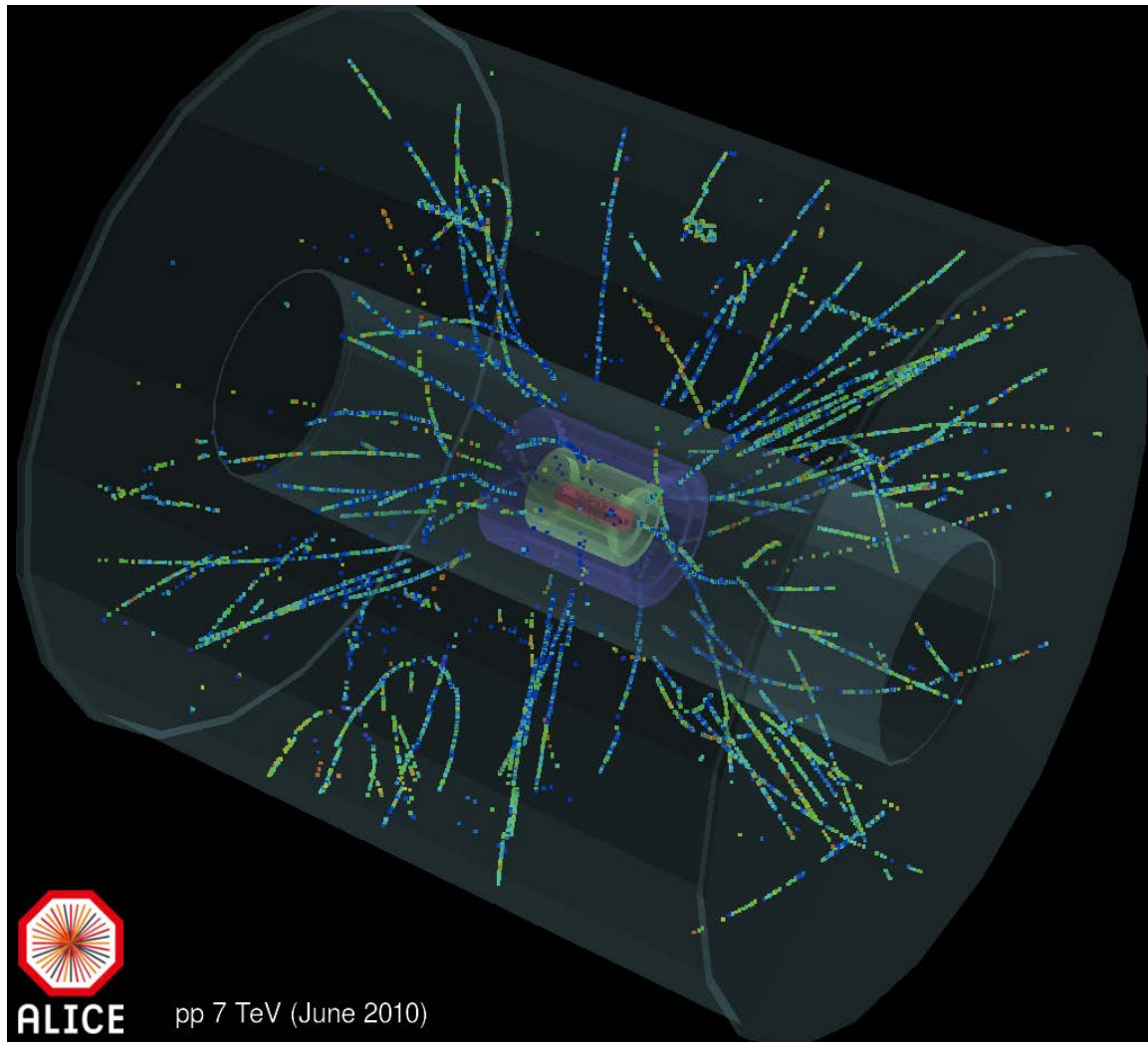
$$\underline{P_{tot}^2} = I = (\sum E)^2 - (\sum \vec{p})^2 c^2$$

Cas important : pour une particule de masse nulle, comme le photon, on a $E = h\nu = pc$

Pour le reste, voir l'annexe du photocopié de TD

Expériences sur accélérateurs

Collisions nucléaires : énergie \leftrightarrow particules



ALICE

pp 7 TeV (June 2010)

$$E = mc^2$$

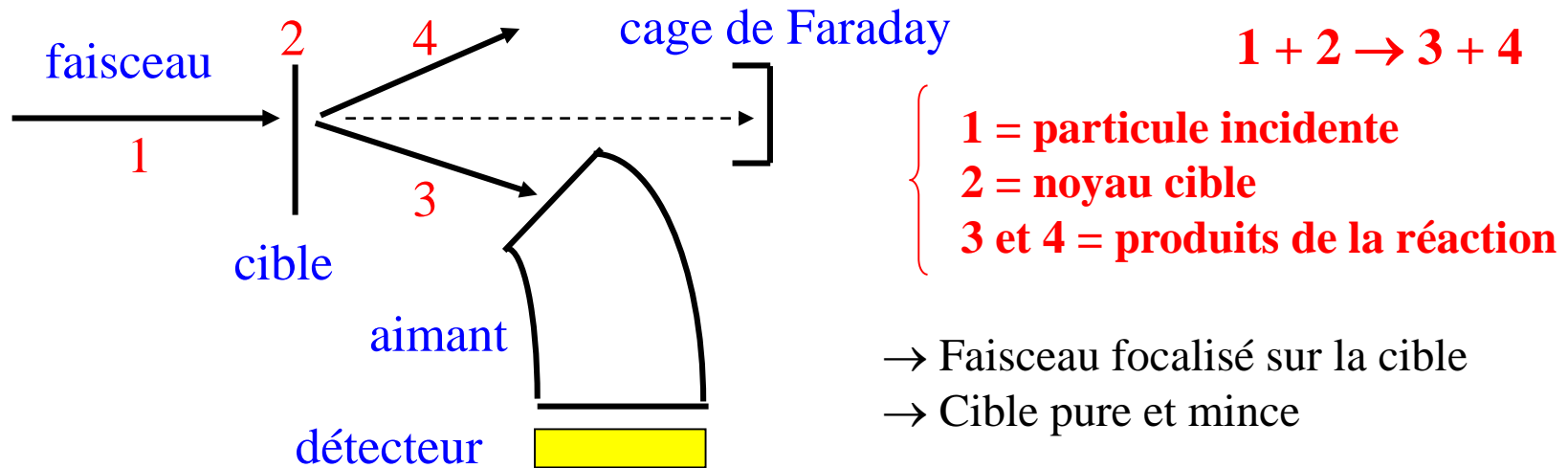
Collision pp à $\sqrt{s} = 7$ TeV

Expérience ALICE au LHC



Irfu - CEA Saclay
Institut de recherche
sur les lois fondamentales
de l'Univers

Expérience typique de physique nucléaire



Diffusion élastique : $p + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow p + {}^{40}\text{Ca}$

Noyau $\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X^N$

Diffusion inélastique : $p + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow p + {}^{40}\text{Ca}^*$

Réaction nucléaire : $p + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow n + {}^{40}\text{Sc}$

A, Z et N se conservent

Diffusion élastique : $1 + 2 \rightarrow 1 + 2$

Diffusion inélastique : $1 + 2 \rightarrow 1 + 2^*$

Réaction nucléaire : $1 + 2 \rightarrow 3 + 4$

Fusion : $1 + 2 \rightarrow 5$

Conditions énergétiques : Le système est considéré isolé et sans interactions avant et après le choc. L'interaction est localisée dans l'espace et le temps. On a conservation du quadrivecteur impulsion énergie avant et après le choc.

- On a toujours conservation de E et \vec{p}

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$$

- On a toujours aussi conservation de A et de Z (donc de $N = A - Z$)

Il faudra ici prendre garde à bien distinguer les choses !

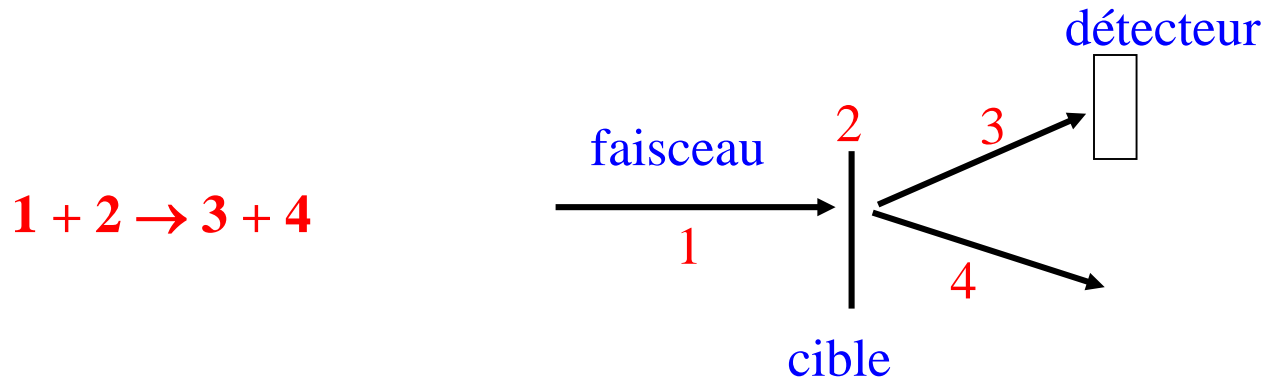


Le référentiel du laboratoire est celui lié à l'observateur et au détecteur (ou à la cible) que l'on considère "immobile". Lorsqu'on parle d'expérience sur cible fixe, on sous entend que le référentiel lié à la cible est donc celui du laboratoire. Ceci n'empêche bien entendu pas de faire des calculs dans le référentiel du Centre de Masse (CdM), si les calculs sont plus simples dans ce référentiel.

Il faudra aussi faire attention que dans le cas d'un collisionneur de particules, le référentiel du CdM n'est pas toujours confondu au référentiel du laboratoire. Par exemple, dans le cas d'un collisionneur de particules comme le LHC, avec des faisceaux symétriques (proton sur proton à la même énergie de 7 TeV), le référentiel du laboratoire (qui est lié à l'observateur et au détecteur) est confondu avec le référentiel CdM dans ce cas particulier.

Ce n'est bien entendu pas le cas si les 2 faisceaux n'ont pas la même énergie comme dans les collisions p-Pb au LHC (proton à 7 TeV et Pb à 2,75 TeV/ nucléon), ici le référentiel du laboratoire n'est plus confondu à celui du CdM.

- Expérience sur cible fixe et calculs dans le Référentiel du laboratoire (L)

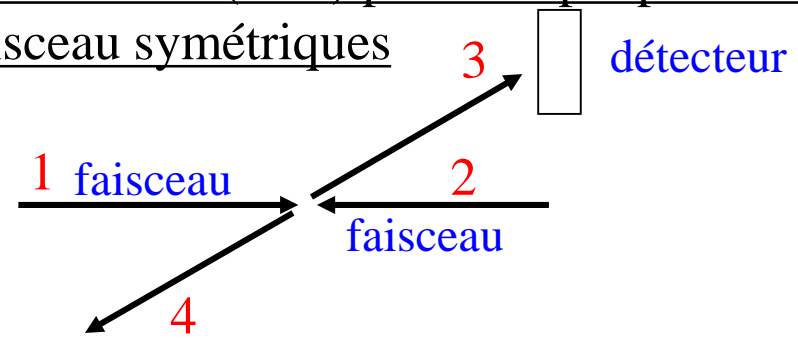


Faisceau : masse $m_1 c^2$, impulsion $\vec{p}_1 c$, énergie $E_1 = \sqrt{p_1^2 c^2 + m_1^2 c^4}$

Cible : masse $m_2 c^2$, impulsion $\vec{p}_2 c = \vec{0}$, énergie $E_2 = m_2 c^2$

- Calculs dans le Référentiel du centre de masse (cdm) par exemple pour une expérience sur collisionneur avec 2 faisceau symétriques

$1 + 2 \rightarrow 3 + 4$



Par définition, le référentiel du centre de masse (cdm) est le système dans lequel les particules, à tout instant, ont des **impulsions égales et opposées** (c'est vrai avant et après la réaction !).

$$\sum_i \vec{p}_i = \vec{0}$$

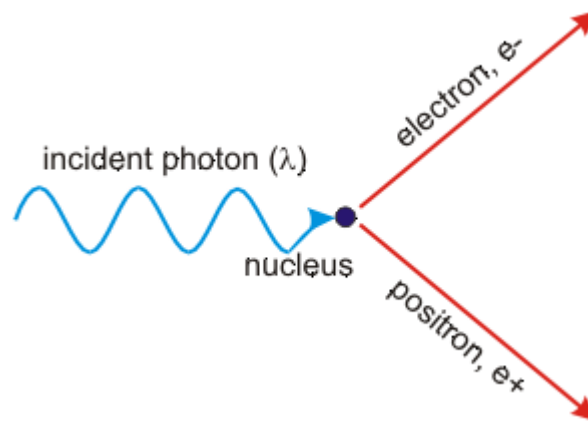
On a deux faisceaux 1 et 2 qui entrent en collision

Faisceaux : 1 : masse $m_1 c^2$, impulsion $\vec{p}_1 c$, énergie $E_1 = \sqrt{p_1^2 c^2 + m_1^2 c^4}$

2 : masse $m_2 c^2$, impulsion $\vec{p}_2 c$, énergie $E_2 = \sqrt{p_2^2 c^2 + m_2^2 c^4}$

Avec $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4 = \vec{0} \Rightarrow \vec{p}_1 c + \vec{p}_2 c = \vec{p}_3 c + \vec{p}_4 c = \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} p_1 c = p_2 c \\ p_3 c = p_4 c \end{cases}$

Certaines réactions ne peuvent être comprises qu'en se référant au ref du CdM. Par exemple, la matérialisation d'un photon en un électron et un positron.



Chaleur de réaction Q



{ état initial i
 état final f

$$Q = \sum_i m_i c^2 - \sum_f m_f c^2$$

$$\text{Ici, } Q = m_1 c^2 + m_2 c^2 - m_3 c^2 - m_4 c^2$$

- $Q = 0$: diffusion élastique
- $Q > 0$: réaction exothermique, donc spontanée, avec une certaine probabilité (au moins pour les désintégrations)
- $Q < 0$: réaction endothermique, donc impossible sans apport extérieur d'énergie

Energie cinétique seuil T_s



$$Q = m_1 c^2 + m_2 c^2 - m_3 c^2 - m_4 c^2$$

Lorsque la réaction est **endothermique**, avec $Q < 0$, elle est impossible sans apport d'énergie extérieure

\Rightarrow il faut fournir de l'énergie dans la voie d'entrée de la réaction, sous forme d'énergie cinétique, pour que celle-ci soit possible

L'énergie seuil T_s est, par définition, l'énergie cinétique juste nécessaire pour créer les particules en voie de sortie, au repos dans le CdM, sans qu'elles aient d'impulsion. C'est donc l'énergie nécessaire pour créer la masse en voie de sortie

Utilisation de l'invariant relativiste :

En voie de sortie on aura toujours

$$I = \left(\sum_f E_f \right)^2 - \left(\sum_f \vec{p}_f \right)^2 c^2 = \left(\sum_f (p_f^2 c^2 + m_f^2 c^4)^{\frac{1}{2}} \right)^2 - \left(\sum_f \vec{p}_f \right)^2 c^2$$

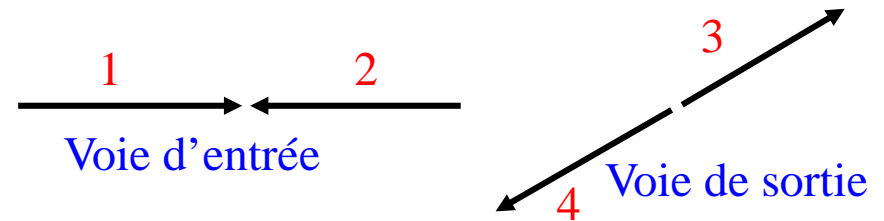
$\Rightarrow I = (\sum_f m_f c^2)^2$ à la limite où toutes les $\vec{p}_f = \vec{0}$

T_s dans le référentiel du centre de masse (expérience sur collisionneur)

$$1 + 2 \rightarrow 3 + 4$$

$$Q = m_1 c^2 + m_2 c^2 - m_3 c^2 - m_4 c^2$$

$$= \sum_i m_i c^2 - \sum_f m_f c^2$$



Déterminons l'invariant relativiste I en voie d'entrée, en faisant apparaître T_s , l'énergie cinétique minimale de l'ensemble des faisceaux 1 et 2

$$I = (\sum_i E_i)^2 - (\sum_i \vec{p}_i)^2 c^2 = (\sum_i (T_i + m_i c^2))^2 \quad \text{avec} \quad \sum_i \vec{p}_i = \vec{0} \text{ dans le CdM}$$

$$I = \left(\sum_i (T_i + m_i c^2) \right)^2 = \left(T_1 + T_2 + \sum_i m_i c^2 \right)^2 = \left(T_s + \sum_i m_i c^2 \right)^2$$

Et $I = \left(\sum_f m_f c^2 \right)^2$ en voie de sortie à la limite où toutes les $\vec{p}_f = \vec{0}$

$$\text{D'où : } T_s + \sum_i m_i c^2 = \sum_f m_f c^2 \Rightarrow T_s = \sum_f m_f c^2 - \sum_i m_i c^2 = |Q|$$

Donc l'énergie seuil dans le référentiel du centre de masse est telle que $T_s = |Q|$;

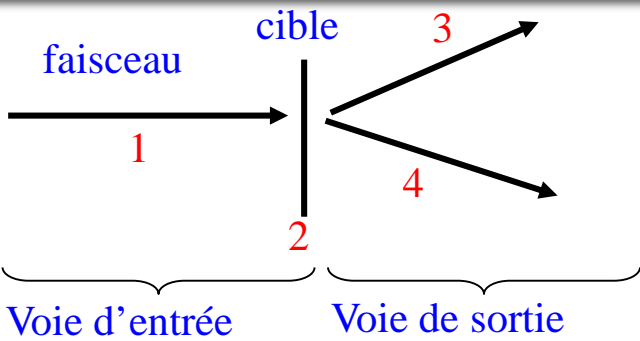
Et chacun des 2 faisceaux (si même masse) doit avoir une énergie cinétique minimale $T_1 = T_2 = |Q|/2$

T_s dans le référentiel du laboratoire (expérience sur cible fixe)

$$1 + 2 \rightarrow 3 + 4$$

$$Q = m_1 c^2 + m_2 c^2 - m_3 c^2 - m_4 c^2$$

$$= \sum_i m_i c^2 - \sum_f m_f c^2$$



Déterminons l'invariant relativiste I en voie d'entrée, en faisant apparaître T_s , l'énergie cinétique minimale du faisceau 1

$$I = \left(\sum_i E_i \right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i \right)^2 c^2 = \left(\sum_i (T_i + m_i c^2) \right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i \right)^2 c^2$$

$$I = (T_1 + m_1 c^2 + 0 + m_2 c^2)^2 - (p_1 + 0)^2 c^2 \text{ car } T_2 = 0 \text{ et } p_2 = 0$$

$$I = (T_s + m_1 c^2 + m_2 c^2)^2 - p_1^2 c^2 = 2T_s m_2 c^2 + (\sum_i m_i c^2)^2 \text{ (voir TD)}$$

Et $I = (\sum_f m_f c^2)^2$ en voie de sortie à la limite où toutes les $\vec{p}_f = \vec{0}$

$$\text{D'où : } 2T_s m_2 c^2 + (\sum_i m_i c^2)^2 = (\sum_f m_f c^2)^2$$

$$2T_s m_2 c^2 + \left(\sum_i m_i c^2 \right)^2 = \left(\sum_f m_f c^2 \right)^2$$

$$2T_s m_2 c^2 = \underbrace{\left[\left(\sum_f m_f c^2 \right) - \left(\sum_i m_i c^2 \right) \right]}_{|Q|} \times \underbrace{\left[\left(\sum_f m_f c^2 \right) + \left(\sum_i m_i c^2 \right) \right]}_{\sum_{if} m_{if} c^2}$$

$$\text{D'où } T_s = \frac{|Q| \cdot (\sum_{if} m_{if} c^2)}{2m_2 c^2}$$

Donc l'énergie seuil dans le référentiel du laboratoire est l'énergie cinétique à fournir au faisceau de particules incidentes, qui est telle que

$$T_s = \frac{|Q|}{2} \frac{(\sum_{if} m_{if} c^2)}{m_2 c^2}$$

Exemples de calcul d'énergie seuil

Soit la réaction : $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$

Quelle est l'énergie minimale des protons incidents pour que la réaction puisse avoir lieu ?

Collision dans le référentiel du centre de
masse
(ex. anneaux de collision)

$$\begin{aligned} T_s &= |Q| \\ &= |2m_p c^2 - 4m_p c^2| \\ &= |-2m_p c^2| \\ &\cong 2 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Donc chaque faisceau de proton doit avoir
pour énergie minimale

$$T_p > 1 \text{ GeV}$$

Collision dans le référentiel du laboratoire
(faisceau contre cible fixe)

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{|Q|}{2} \frac{(\sum_{if} m_{if} c^2)}{m_2 c^2} \\ &= \frac{|-2m_p c^2| \times (6m_p c^2)}{2m_p c^2} \\ &= 6m_p c^2 \approx 6 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Donc le faisceau de proton incident doit avoir
pour énergie minimale

$$T_p > 6 \text{ GeV}$$

⇒ Intérêt des collisions symétriques

Ordres de grandeur

Quelle est l'énergie cinétique minimale que doit avoir un faisceau de photons pour que la réaction $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$ puisse se produire ?

On vérifie la valeur de $Q = m_p c^2 - m_{\pi^0} c^2 - m_p c^2 = - m_{\pi^0} c^2 = - 135 \text{ MeV}$

$Q < 0$, donc il faut apporter de l'énergie cinétique en voie d'entrée

Dans le référentiel du laboratoire, l'énergie seuil est donnée par

$$T_s = \frac{|Q| \cdot (\sum_{if} m_{if} c^2)}{2m_{cible} c^2} = \frac{|Q| \cdot (2m_p c^2 + m_{\pi^0} c^2)}{2m_p c^2} = 144,7 \text{ MeV}$$

Donc il faut des photons incidents d'énergie cinétique $T_\gamma > 144,7 \text{ MeV}$ pour créer le π^0 avec la réaction choisie

Pour étudier un noyau donné ou créer des particules, il faut choisir soigneusement :

- la nature de la particule incidente
- son énergie cinétique.

Les accélérateurs doivent être adaptés au domaine de la physique que l'on veut étudier.

Pour sonder la matière de plus en plus profondément et découvrir de nouvelles particules d'énergie élevée, il a fallu développer des accélérateurs de plus en plus puissants.

Des énergies élevées sont nécessaires pour **créer de nouvelles particules (stables et instables)** et **explorer la structure des noyaux et des hadrons**

Les sources disponibles :

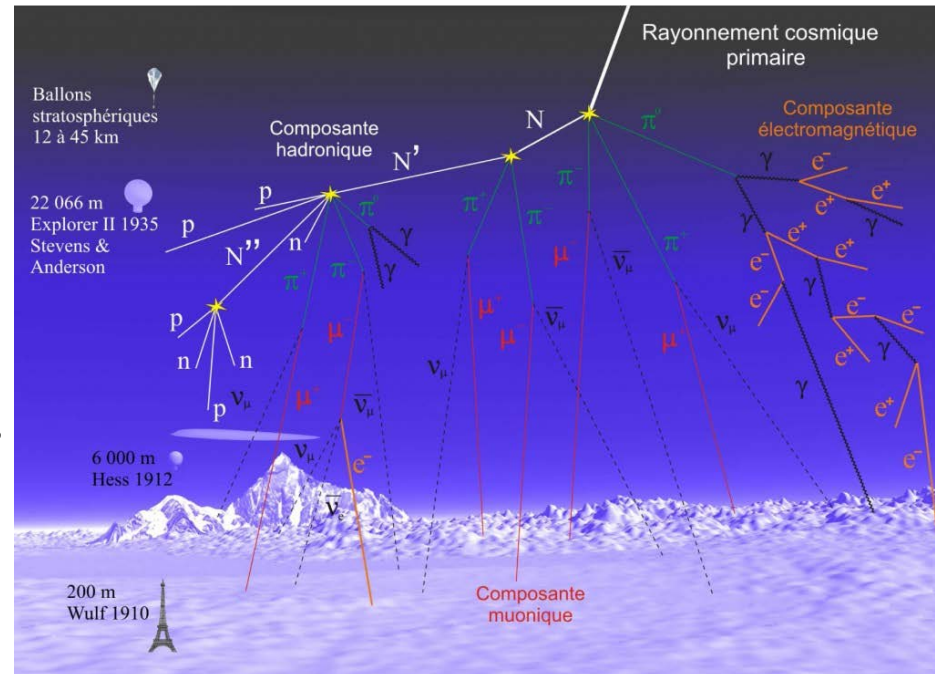
- les sources radioactives α , β et γ

Découverte du noyau par Rutherford avec des particules α

- les rayons cosmiques

Ont permis la découverte de e^+ , μ , π , et des particules étranges

- les accélérateurs de particules



Avantage des accélérateurs : l'expérience est « sous contrôle » !

L'intensité des faisceaux et les conditions initiales sont connues (type, énergie, impulsion, résolution, ...)

Tous les accélérateurs de particules ont les mêmes composants de base

- une source de particules
- des champs électriques pour l'accélération des particules
- des champs magnétiques (dipôle = guidage ; quadripôle = focalisation)
- des détecteurs pour « visualiser » les particules et leurs collisions.

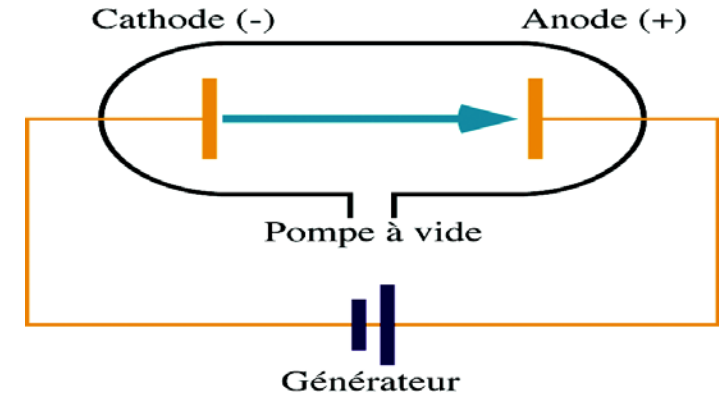
Il existe 2 types d'accélérateurs :

- les accélérateurs linéaires, avec un trajet en ligne droite et des champs accélérateurs successifs
- les accélérateurs circulaires (cyclotron, synchrotron), où les particules ont une trajectoire circulaire qui les fait passer toujours à travers le même champ accélérateur.

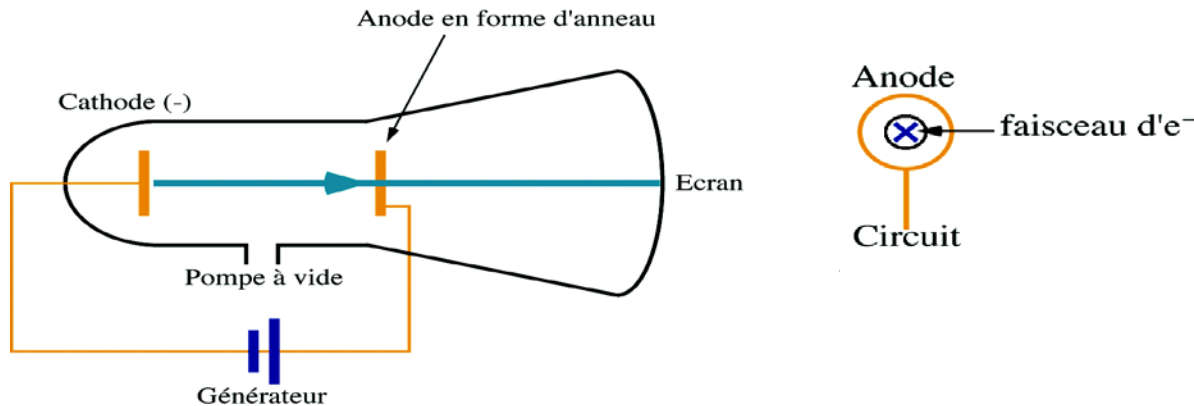
Les machines électrostatiques

Les ancêtres...

1875 : **William Crookes** construit le premier accélérateur, le tube de Crookes. Si la tension délivrée est assez élevée, on a une **circulation continue d'électrons**.



Un tube de Crookes modifié permet de visualiser les « rayons cathodiques » produits, c'est-à-dire le faisceau d'électrons, sur un écran
→ un point lumineux signe la présence des électrons.

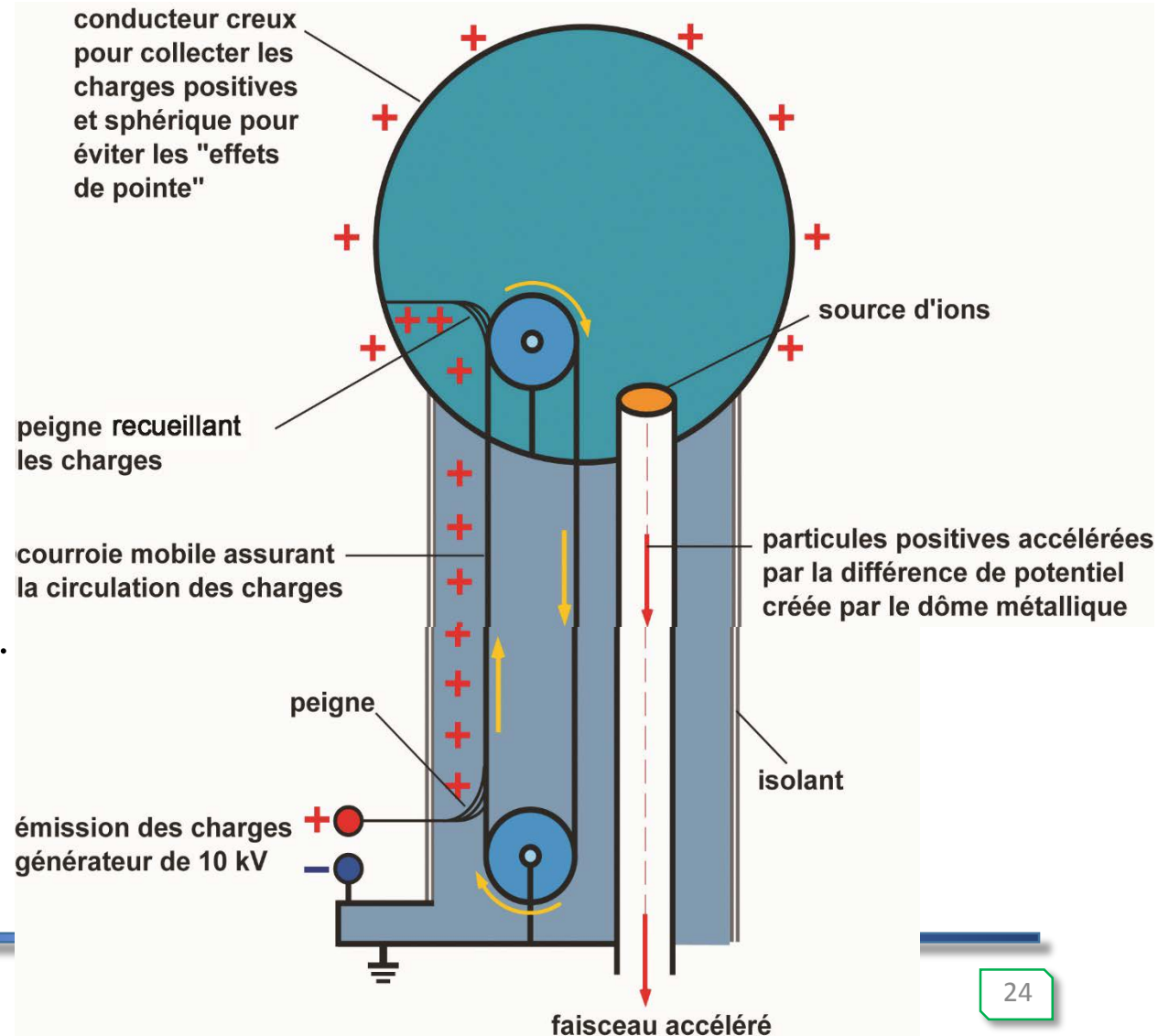


C'est l'ancêtre de l'oscilloscope, mais aussi de la télévision cathodique...

Les machines électrostatiques

Accélérateur électrostatique de Van de Graaff

Ici, les charges sont émises par un générateur de courant continu sous une tension de quelques dizaines de kV. Ces charges sont ensuite capturées par une courroie isolée et emportées jusqu'à une des électrodes de l'accélérateur (comme dans un escalier roulant...).

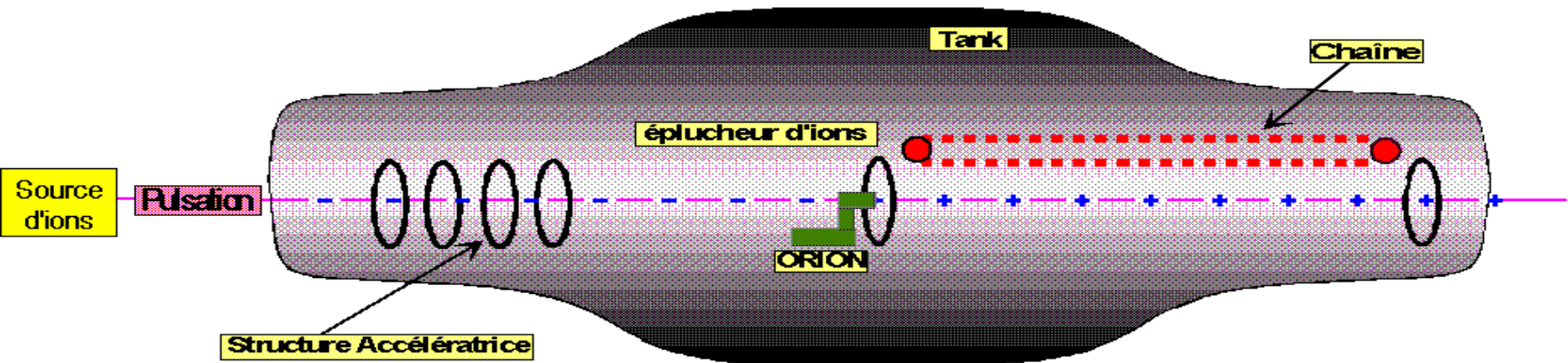


Les machines électrostatiques

Accélérateur électrostatique Tandem à deux étages

Tandem : Schéma de principe

« double Van de Graaff »



- HT créée par apport de charges au centre de la machine, convoyées par chaîne isolante en rotation continue.
- Partie centrale de la machine portée à tension V positive élevée (au max 15 MV).
→ transformation des atomes à accélérer en ions négatifs ; ces ions sont injectés à une extrémité et soumis au champ accélérateur créé par la ddp statique.

Arrivés au centre, les ions négatifs sont «épluchés» d'une partie de leurs électrons au passage d'une mince couche de gaz ou de carbone. Les ions deviennent alors positifs et sont repoussés dans la deuxième partie de leur trajet.

Un ion de charge Z_i soumis à une ddp de V (Volts) va acquérir une énergie cinétique : $T_{ev} = (Z_i + 1) V$

Les machines électrostatiques

Accélérateur électrostatique Tandem à deux étages

Soit une tension appliquée $V = 13$ MV.

L'énergie cinétique des ions à la sortie du Tandem est donnée par $T(\text{eV}) = (Z_i + 1) V$,
où Z_i correspond à l'état de charge de l'ion.

Exemple

On veut accélérer des noyaux de $^{16}_8\text{O}^8$ à l'énergie maximale.

→ on applique la tension maximale

→ on va pouvoir ioniser le $^{16}_8\text{O}^8$:

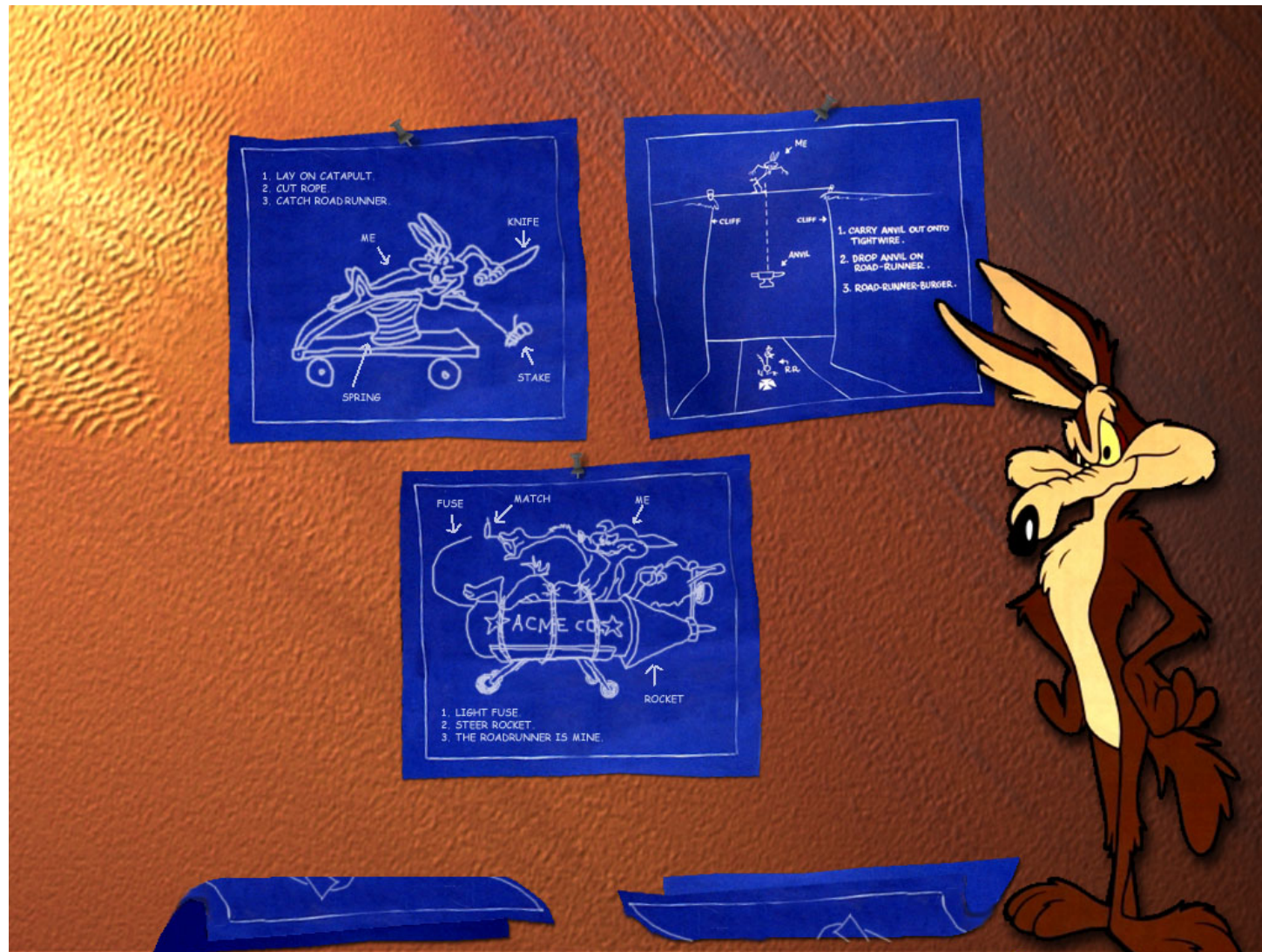
une fois → $(^{16}_8\text{O}^8)^{1+}$ donc $T = (1+1) \times 13 = 2 \times 13 = 26$ MeV

deux fois → $(^{16}_8\text{O}^8)^{2+}$ donc $T = (2+1) \times 13 = 3 \times 13 = 39$ MeV

.

.

jusqu'à huit fois → $(^{16}_8\text{O}^8)^{8+}$ donc $T = (8+1) \times 13 = 9 \times 13 = 117$ MeV

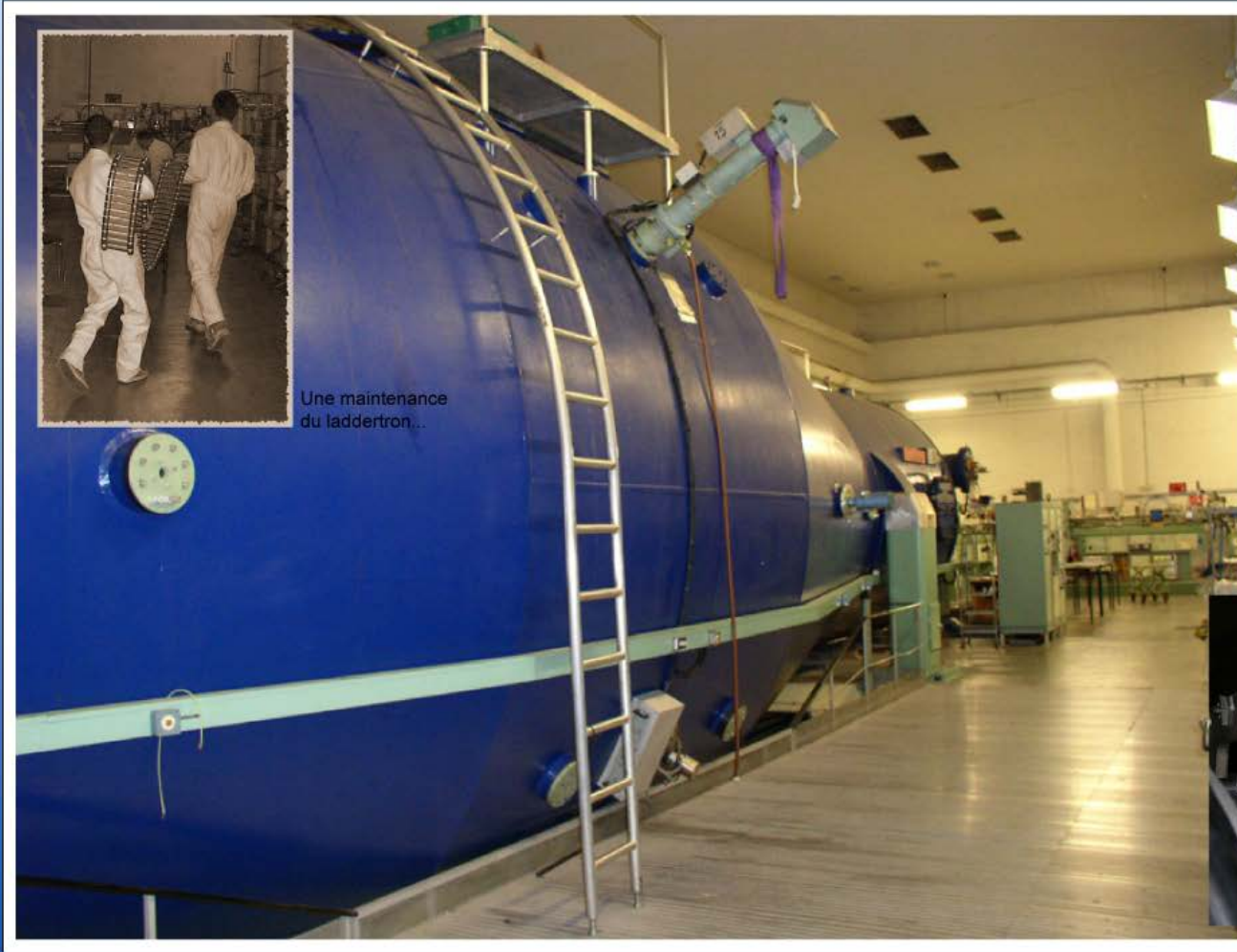


Les machines électrostatiques

Accélérateur électrostatique Tandem à deux étages



**Accélérateur Tandem de l'IPN d'Orsay,
délivrant une tension maximale de 15 MV.**



Une maintenance
du laddertron...

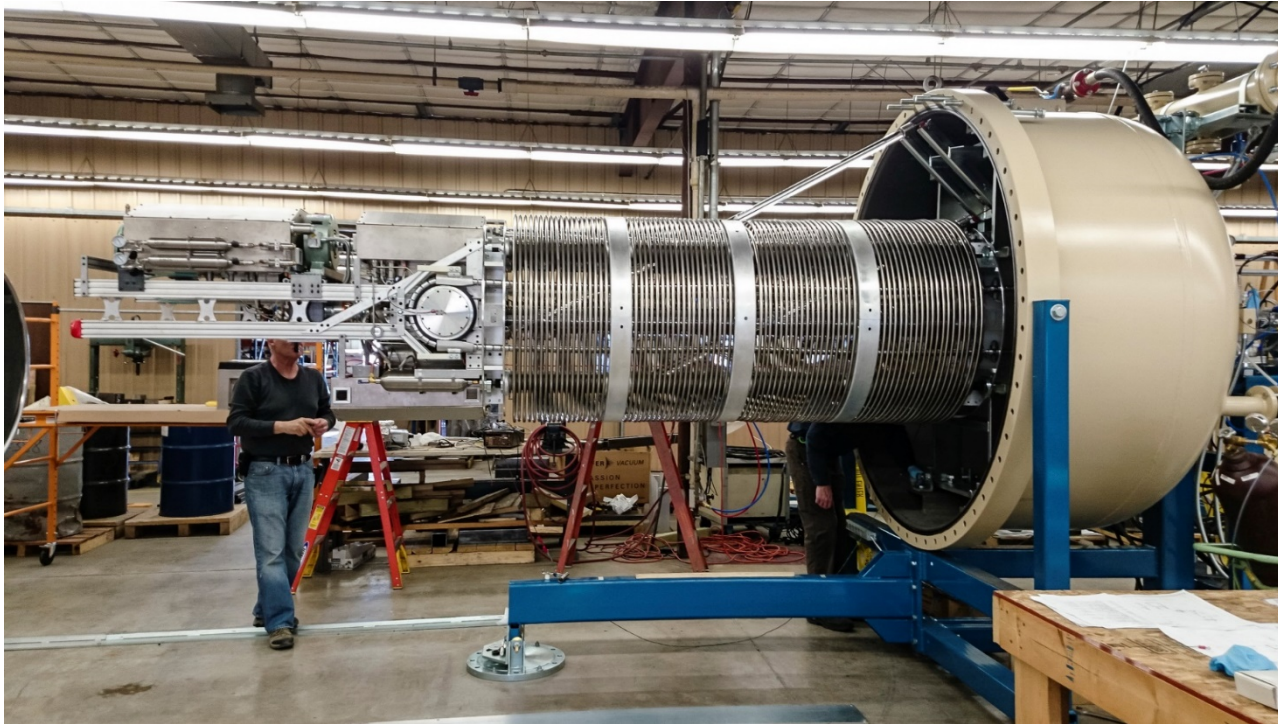


Le laddertron en place. On distingue le moteur au fond,
ainsi que les anneaux en haut.



Une vue du terminal, à l'arrivée du laddertron

Accélérateur Andromède – IPN Orsay Type Pelletron – 1 à 4 MV

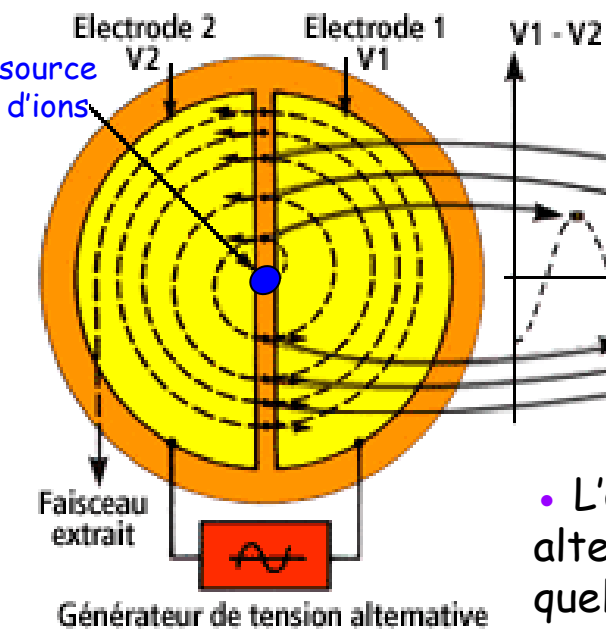


Accélération d'ions, de molécules et
d'agrégats d'or

Les machines circulaires

1930 : Lawrence et Livingston, à Berkeley

Cyclotron (vue de dessus)



Principe de l'accélération dans le cyclotron

- Un champ magnétique uniforme force les ions à tourner sur un cercle de rayon proportionnel à leur vitesse.
- A chaque passage entre les 2 électrodes (dees), les ions reçoivent un supplément de vitesse qui les place sur une orbite un peu plus grande.
- L'accélération est engendrée par un générateur de tension alternative → champ électrique oscillant, toujours accélérateur quelle que soit la direction de passage des particules

• La fréquence f_v de variation de cette tension est ici égale à la fréquence de rotation des ions, qui est une constante. $f_v = f_{rot} = q B / (2\pi m)$

Les machines circulaires

$$\left. \begin{array}{l} \text{PFD + mvt circulaire} \\ \text{uniforme sur chaque} \\ \text{tour de rayon } R \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} q v B = m v^2 / R \quad \text{et} \quad p = q B R = Ze B R \\ \mathbf{R = mv/qB = p/qB} \end{array}$$

Inconvénient du cyclotron → limite relativiste (voir TD)

⇒ les particules sont non relativistes : le cyclotron est « classique »

⇒ $T_{\max} \sim 50 \text{ MeV/nucléon}$

Cyclotron

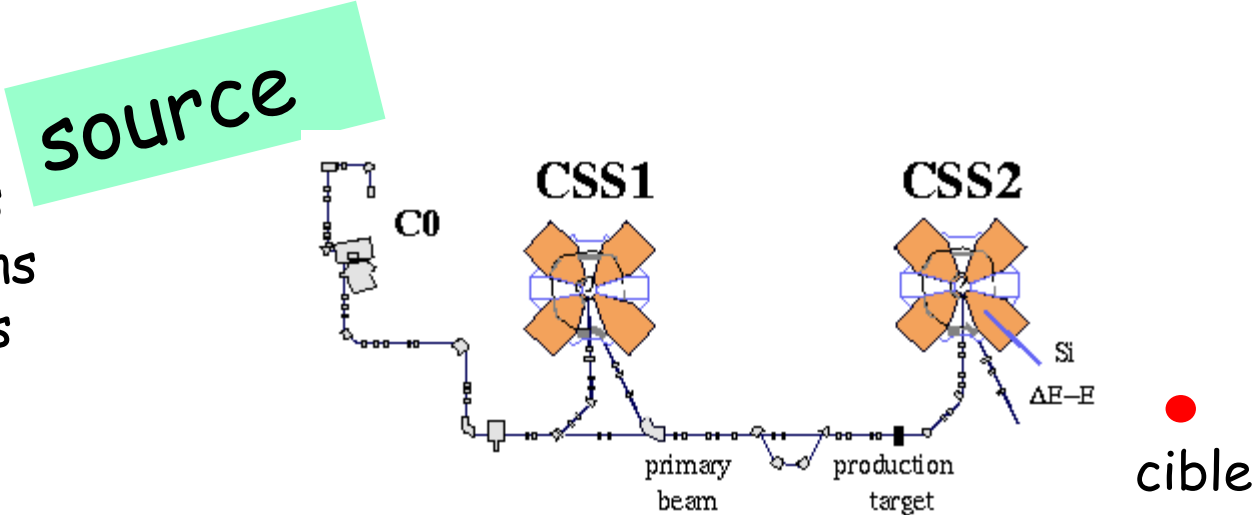


Premier cyclotron, LBNL, 1931
 $d = 4.5\text{in}$, $V = 1.8\text{ keV}$,
→ pour accélérer les ions ^2H à 80 keV

Dans les années 30-40, le cyclotron devient l'outil majeur de la physique nucléaire.

1938 : 1er cyclotron en Europe, installé par Frédéric Joliot au Collège de France (4 MeV).

GANIL :
accélération d'ions
par deux cyclotrons
à secteurs séparés
(CSS1 et CSS2)
successifs



Les machines circulaires

Synchrocyclotron

C'est le remède au pb du cyclotron, en 1944/45 : Veksler (URSS), McMillan (Berkeley) et Oliphant (Angleterre)

Idée : diminuer la fréquence accélératrice en phase avec la fréquence de rotation

- le faisceau devient pulsé
- synchronisation nécessaire est importante

→ **stabilisation de phase** : homogénéise la distribution des vitesses du faisceau et regroupe les particules dans un paquet aux propriétés bien définies (énergie, trajectoire, etc....)

- Utilisation de l'ancien synchrocyclotron de l'IPN à des fins thérapeutiques → Centre de Protonthérapie d'Orsay (CPO)

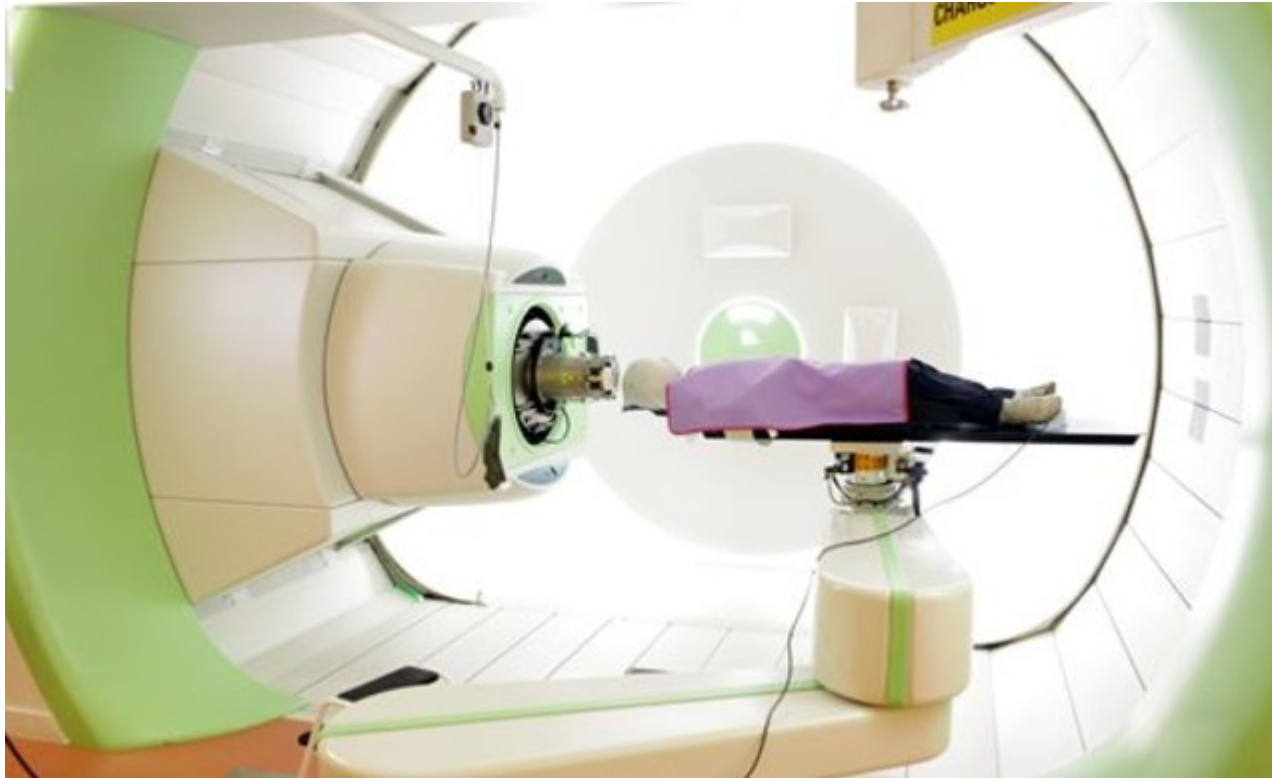
Mais le synchrocyclotron est limité par la taille de l'aimant (la quantité de fer nécessaire pour le construire est énorme !!)

⇒ il faut encore un nouveau type d'accélérateur

Exemple cyclotron : Centre de Proton Thérapie d'Orsay.

Synchrocyclotron de 160 MeV de l'IPN d'Orsay adapté entre 1989 et 1991 à des fins d'utilisations médicales.

Aujourd'hui un nouveau cyclotron remplace le synchrocyclotron.



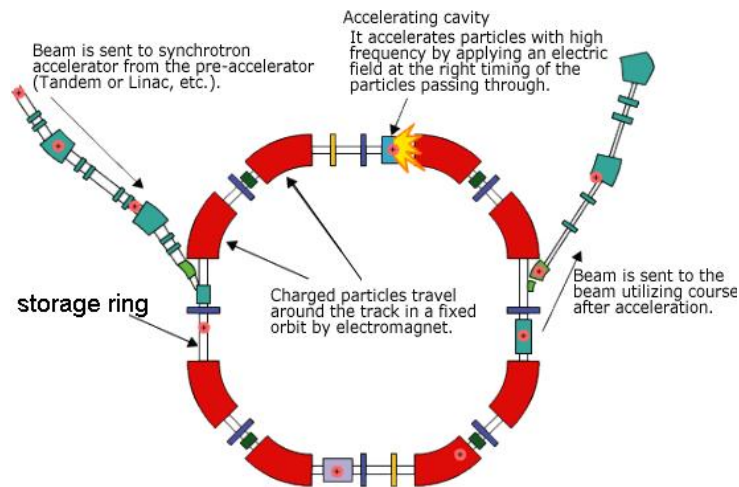
Synchrotron

Oliphant, 1943 : l'idée est de garder R constant pendant l'accélération

$$qvB = mv^2 / R \quad \rightarrow R = p/qB = m_0\beta\gamma c/qB = pc/qBc$$

$\rightarrow B$ doit être synchronisé avec pc (ou avec $\beta\gamma$)

Avantage : il n'y a plus besoin de gros aimant



\rightarrow un anneau avec de petits aimants de guidage, et une ou plusieurs brèches pour l'accélération

R constant, B variable

$v \sim c \rightarrow E$ varie mais v constant

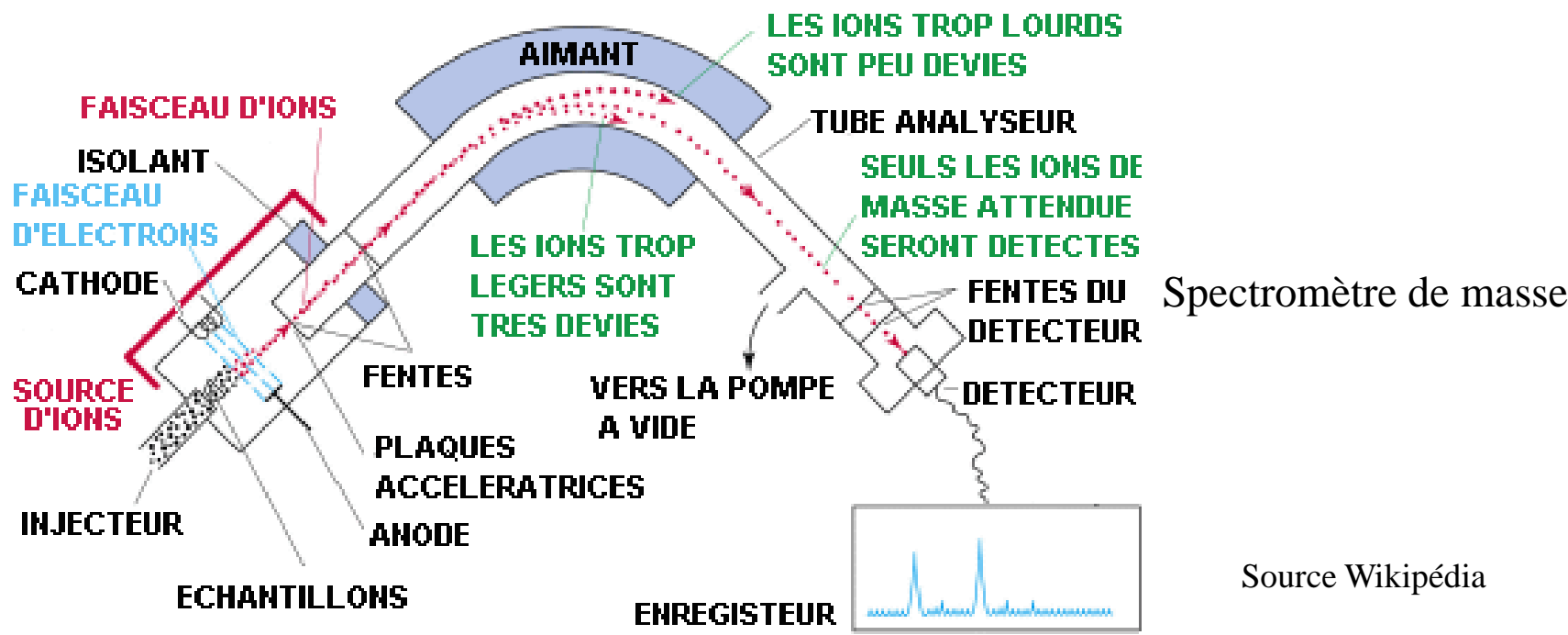
Les protons sont injectés dans l'anneau après une pré-accelération.

Ils sont maintenus sur leur trajectoire circulaire et accélérés à chaque passage dans l'électrode.

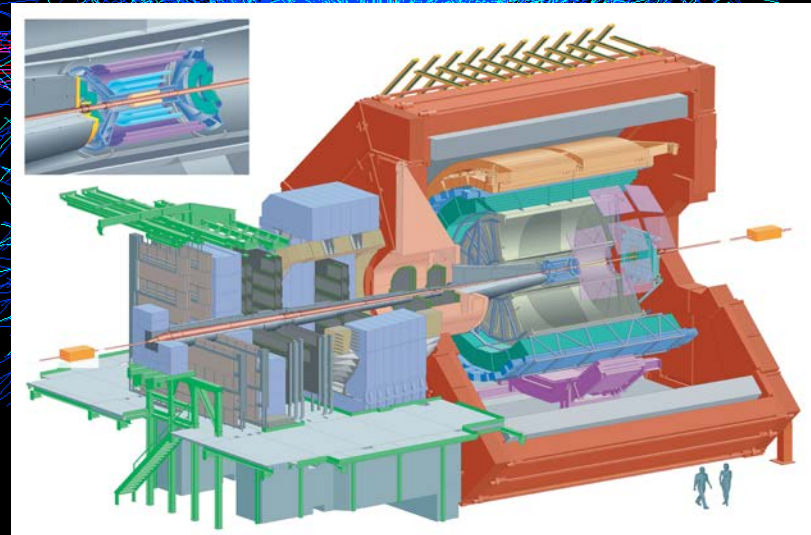
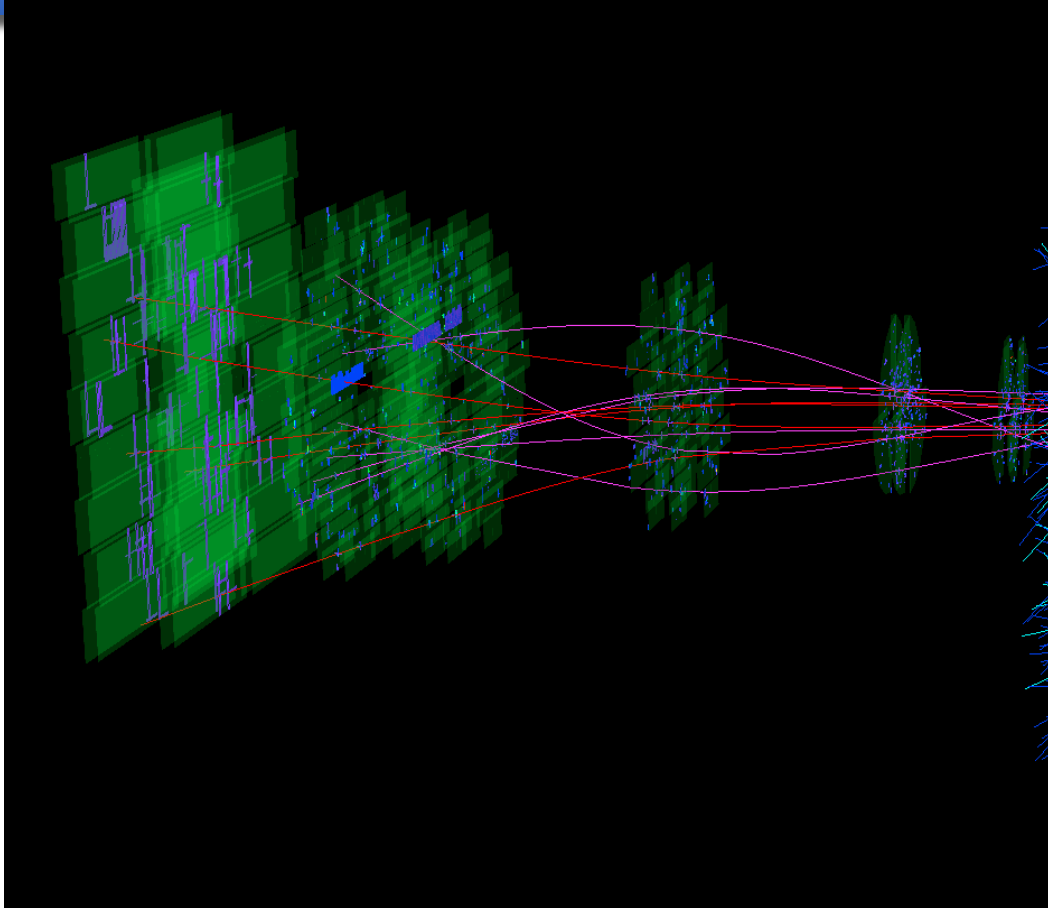
Lorsqu'ils ont atteint l'énergie voulue, ils sont extraits ou servent à la production de faisceaux secondaires

Remarque

Si on peut faire varier B pour maintenir une particule donnée sur une trajectoire de rayon R fixé, on peut aussi maintenir B fixe pour faire varier le rayon des trajectoires pour des particules d'impulsions différentes ou de masses différentes -> principe des spectromètres. On utilisera encore : $R = p/qB = m_0\beta\gamma c/qB = pc/qBc$
A noter que $RB = p/q$ est appelé la rigidité magnétique (en T.m).



Source Wikipédia

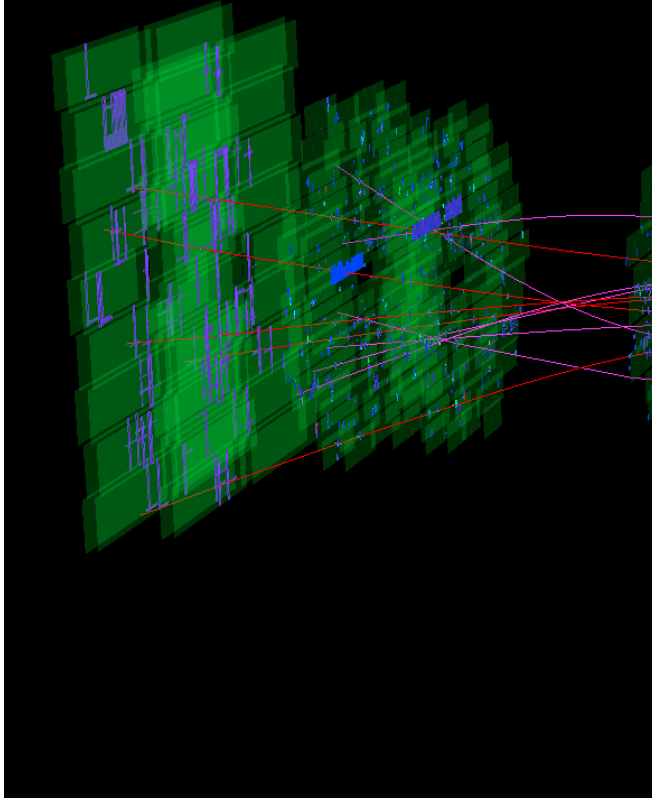


Spectromètre à muons -> les muons sont déviés dans un champ magnétique -> mesure de l'impulsion des muons

Une formule utile avec R en mètre, B en Tesla, pc en MeV et $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$:

$$pc = 300 BR$$

Expérience ALICE au CERN



Spectromètre à muons -> les muons sont déviés dans un champ magnétique -> mesure de l'impulsion des muons

Les synchrotrons à protons...

1952 : premier synchrotron à proton : **Cosmotron** de 3 GeV à Brookhaven, $d = 23$ m, accélération en 1 s, 288 aimants

1953 : **Bevatron** à Berkeley, 6 GeV, découverte des antiprotons en 1959, en opération jusqu'en 1993, avec 4 prix Nobel

Améliorations obtenues avec utilisation de la focalisation dite « forte » (alternance d'aimants focalisants et défocalisants qui produisent un effet résultant focalisant), qui permet de réduire le nombre d'aimants, donc d'augmenter l'énergie à moindre coût.

1967 : U-70, Protvino, URSS, 70 GeV

1976 : SPS au CERN, 400 GeV, $d = 2.2$ km, collisions à 630 GeV

2008 : LHC au CERN 6,5 TeV, $d = 8,6$ km, aimants supraconducteurs, collisions à 13 TeV, découverte du boson de Higgs.

Les synchrotrons à électrons

L'accélération circulaire d'une particule chargée légère induit une **radiation synchrotron** (utilisé par LURE et SOLEIL) → provoque une perte d'énergie par tour ΔE , par émission d'onde électromagnétique.

$$\Delta E \propto (1/R) \times (E^2 / mc^2)^2$$

Dernier synchrotron à électrons utilisé pour la physique des particules :

LEP, 1989-2000 : collisionneur e^+e^- ,

$\sqrt{s} = 91$ à 209 GeV (énergie disponible dans le centre de masse)

Au LEP, pour **$E = 100$ GeV**, avec $2\pi R \sim 27$ km, $P_{\text{synchrotron}} = 18$ MW

⇒ Perte par rayonnement synchrotron **$DE(e^-) = 2.9$ GeV**

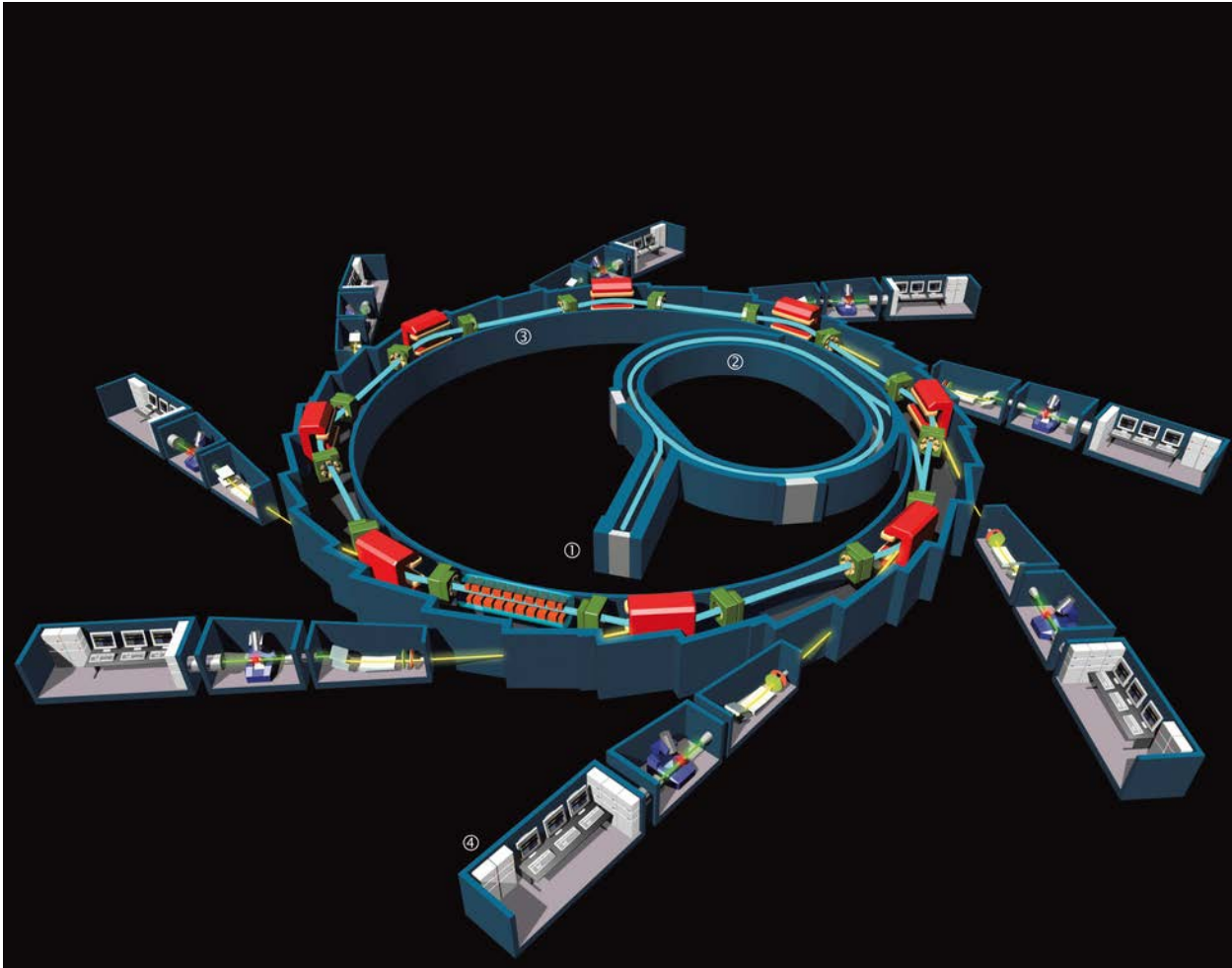
Mais si on voulait des énergies encore plus élevées ?

Supposons $E = 500$ GeV, $2\pi R = 250$ km, $P_{\text{synchrotron}} = 100$ MW

⇒ $DE(e^-) = 220$ GeV !!!

⇒ **le synchrotron à électrons est limité par la radiation synchrotron**

Exemple : synchrotron SOLEIL (Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE)



Accélération
d'électrons pour
produire un
rayonnement très
intense de
l'infrarouge aux
X durs

Les anneaux de collisions

Principe :

les deux faisceaux ont des impulsions égales et opposées au moment de la collision

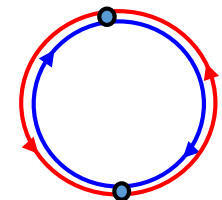
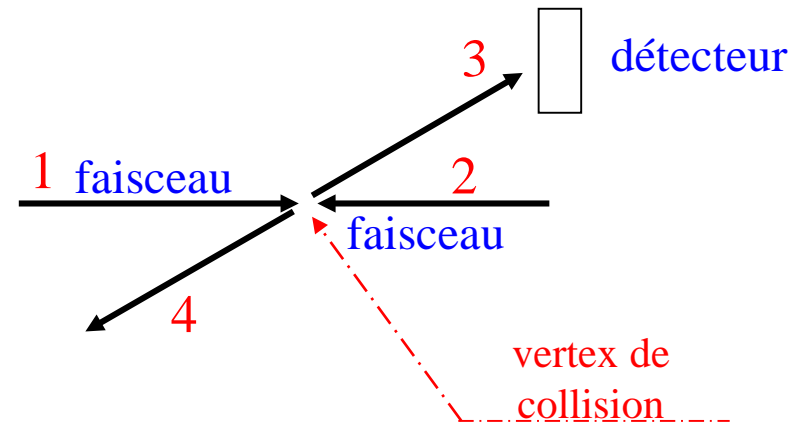
labo \equiv système du centre de masse
(syst. sym.)

Méthodes possibles :

→ synchrotron fournissant deux faisceaux de particules circulant en sens opposés dans le même tunnel et se croisant en des points choisis

→ anneaux séparés, entrant en collision en un seul point

Réf. du labo \equiv réf. du cdm \Rightarrow donc + intéressant pour l'énergie que les collisions de type faisceau sur cible fixe



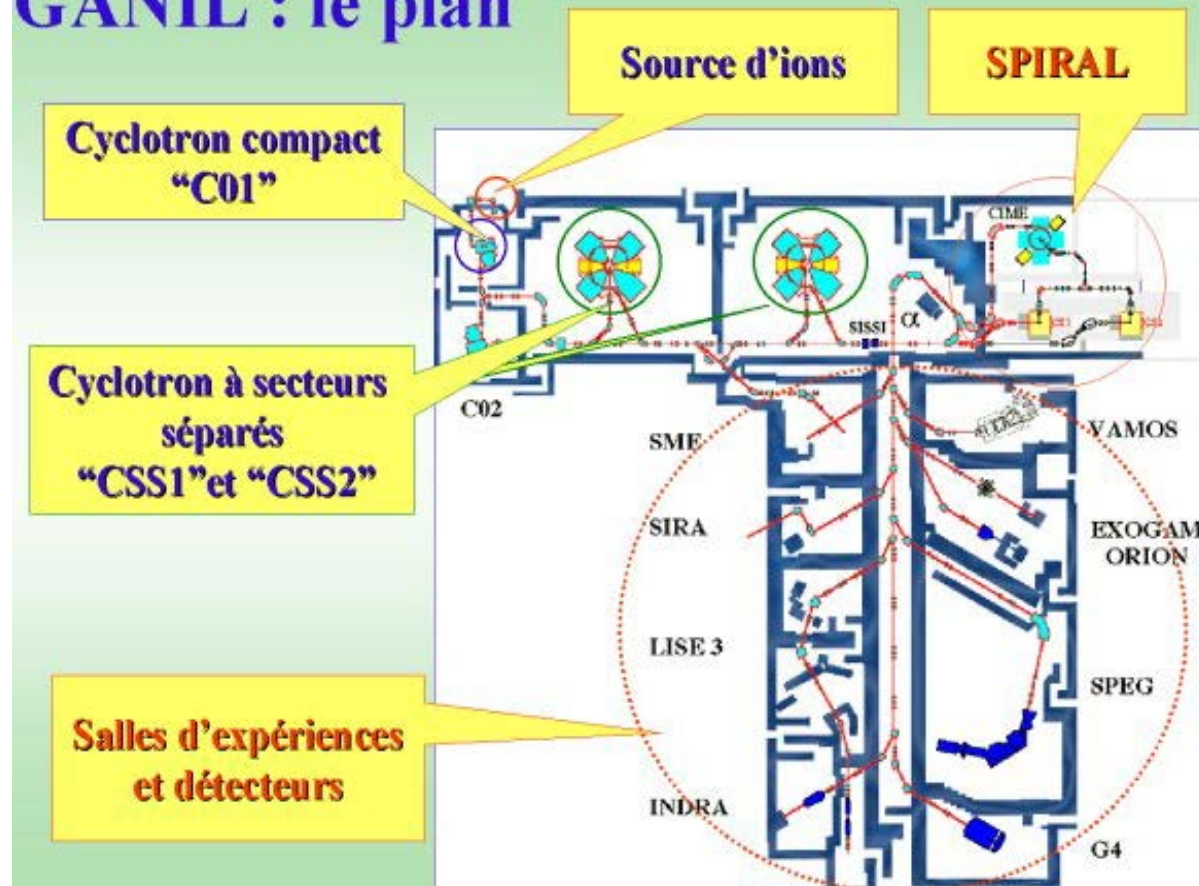
Les complexes d'accélérateurs : exemples

GANIL

$20 \text{ MeV/u} < E < 100 \text{ MeV/u}$

Accélération d'ions : C à U

GANIL : le plan




SPIRAL : accélérateur permettant la production de faisceaux radioactifs à partir d'un faisceau d'ions stables produit par GANIL

→ permet ainsi d'obtenir des noyaux exotiques en quantité suffisante.

SPIRAL 2 inauguré en novembre 2016...

Le CERN

	Protons
	Antiprotons
	Ions
	Neutrinos to Gran Sasso

LHC : Large Hadron Collider

LEP : Large Electron Proton (Collider)

SPS : Super Proton Synchrotron

AD : Antiproton Decelerator

ISOLDE : Isotope Separator OnLine DEvice

PSB : Proton Synchrotron Booster

PS : Proton Synchrotron

LINAC : LINear ACcelerator

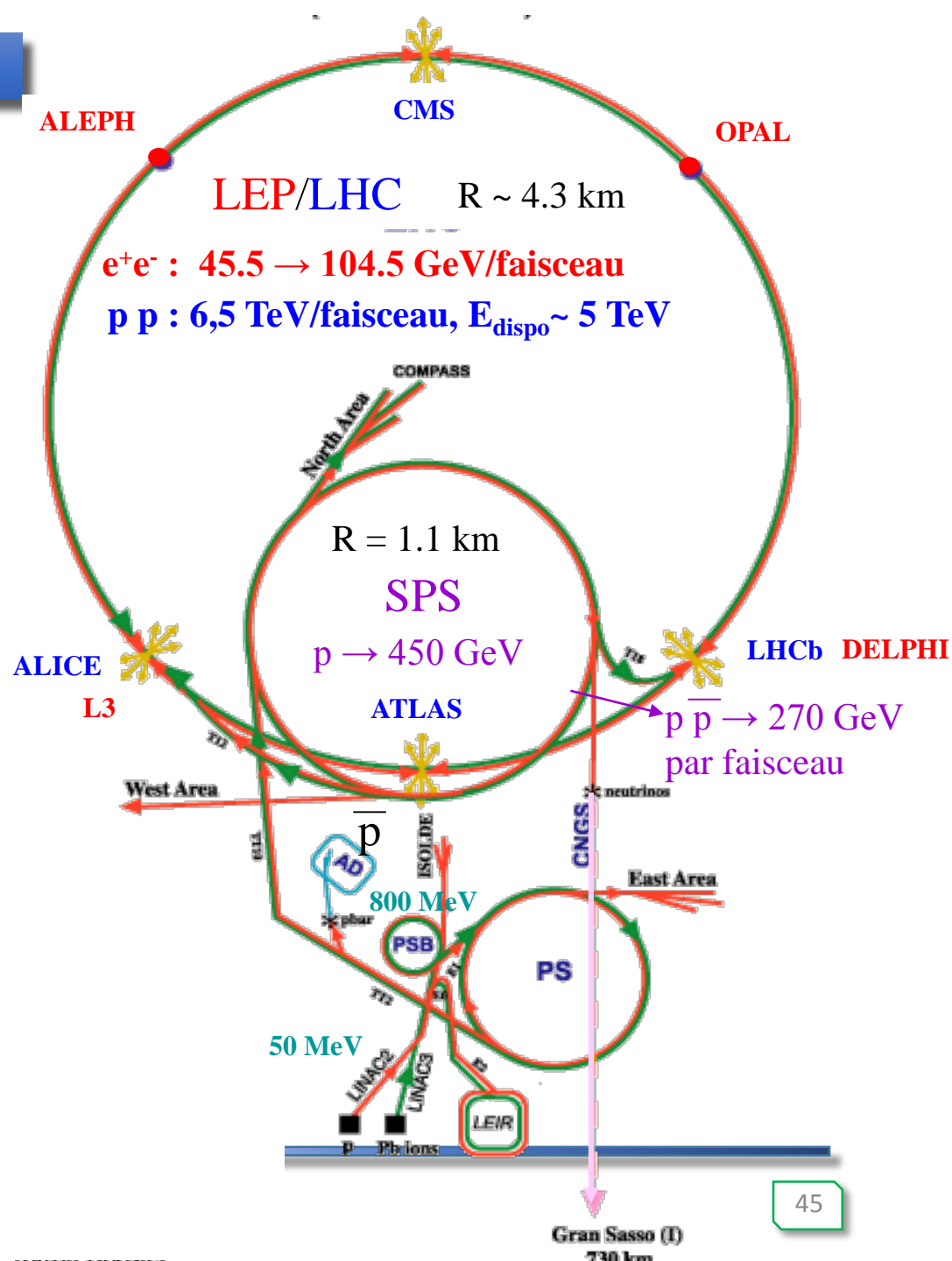
LEIR : Low Energy Ion Ring

CNGS : Cern Neutrinos to Gran Sasso

Découverte des courants neutres ;

Découverte des bosons W et Z de l'interaction faible ;

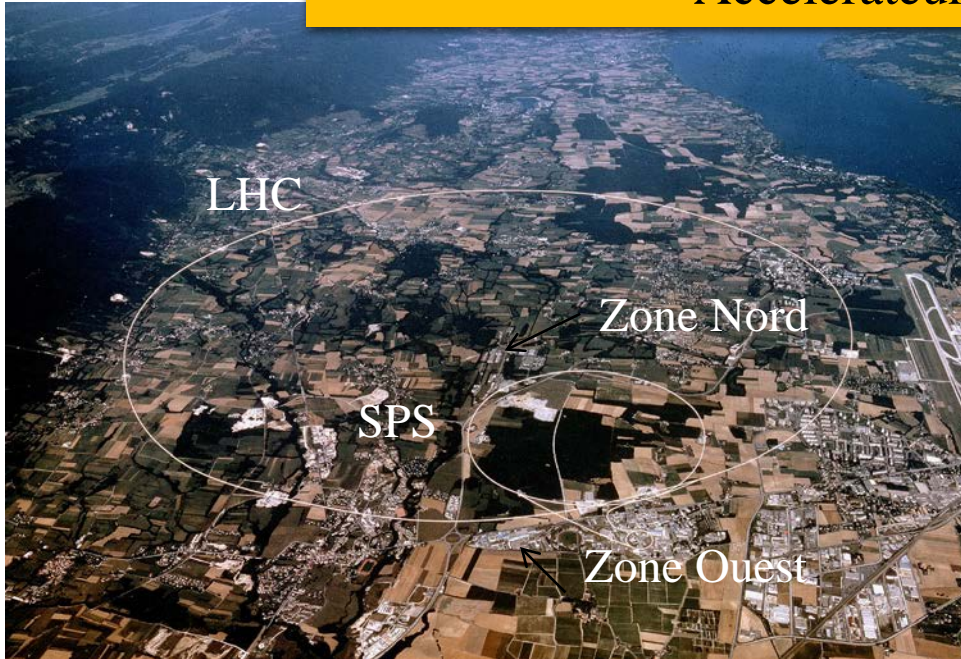
Découverte du boson de Higgs ;



Le collisionneur LHC (Large Hadron Collider) en quelques chiffres...

- Collisionneur proton-proton, 2 faisceaux prévus à 7 TeV dans l'ex-tunnel du LEP soit 14 TeV dans le cdm. Actuellement 6,5 TeV soit 13 TeV dans le cdm $\Rightarrow \sim 5$ TeV disponibles (quarks et gluons)
Premiers faisceaux en 2008
- 4 grandes expériences
ATLAS, CMS, LHCb (Phys. Part.), ALICE (Phys. Nucl.)
Plus de 3000 physiciens pour ATLAS et CMS, collaborations “mondiales”, plus de 1800 pour ALICE
- 40 millions de croisements/seconde
 \rightarrow Le flot de données à traiter est hallucinant.

Accélérateurs au CERN



Le SPS (cible fixe) :

- 6,3 km de circonférence, injecteur du LHC
- protons jusqu'à 450 GeV (10^9 par sec), Pb jusqu'à 158 AGeV (10^7 par sec)

Le LHC (collisionneur) :

profondeur moyenne : 100 mètres, circonférence : 27 km, 9593 aimants

énergie de faisceau : 2,75/7 TeV Pb/proton (= 99.9999991 % de la vitesse de la lumière)

2808 paquets, 10^{11} protons/paquet, 11245 tours/s, 600 millions de collisions/s, 4 détecteurs

Énergie LHC

Énergie pour 1 faisceau pp = 360 MJ

= porte avion de 20000 tonnes à 20 km/h

... ou l'énergie cinétique d'un Falcon 900 à vide
à 900 km/h

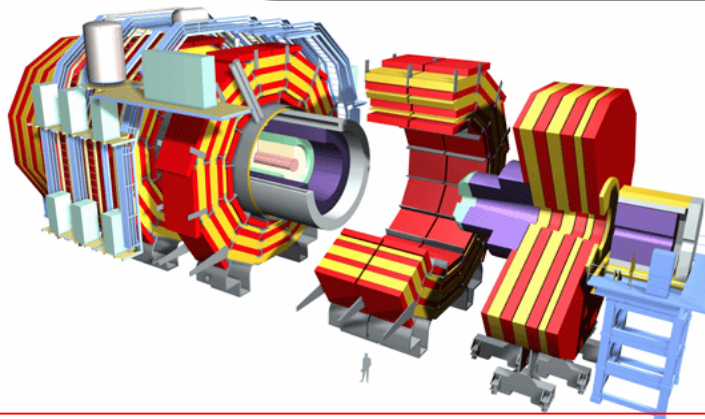
... ou bien énergie suffisante pour faire fondre
500 kg de cuivre

... ou 77,4 kg de TNT

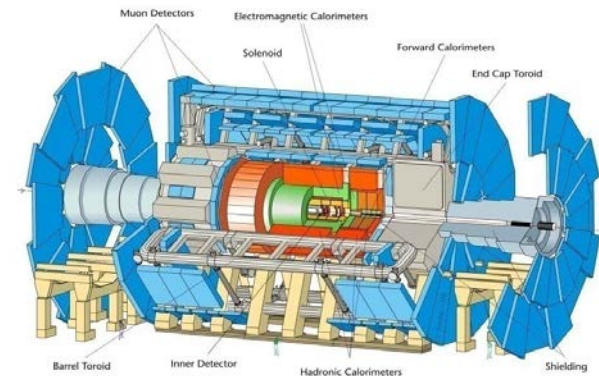
Bref ~ 280 fois l'énergie du Tevatron



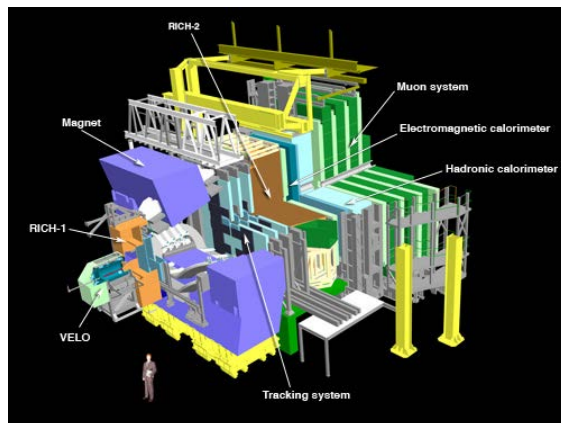
Les détecteurs des expériences LHC



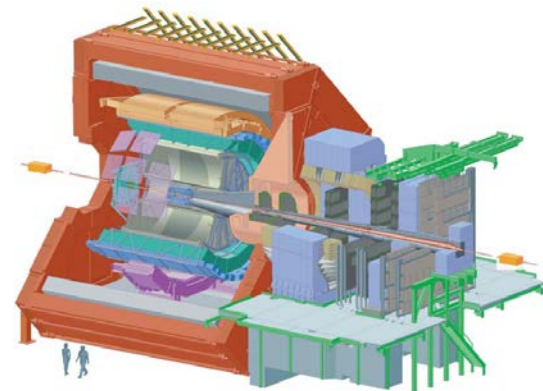
CMS : plus de 3000 signataires, 40 pays, 200 instituts -> Higgs, nouvelle physique



ATLAS : Plus de 3000 signataires, 38 pays, 182 instituts -> Higgs, nouvelle physique



LHCb : 700 signataires, 15 pays, 15 instituts -> violation CP, désintégrations rares

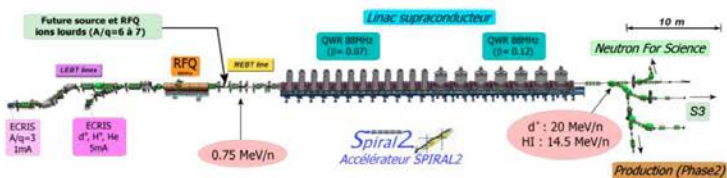


ALICE : 1800 signataires, 38 pays, 182 instituts -> physique des ions lourds – Plasma de quarks et de gluons

Liens avec la recherche

Paris-Saclay: un pôle en RF supra de niveau international

Spiral-2: deutons 40 MeV, 5 mA, 200 kW faisceau



11+7 cryomodules conçus, assemblés, testés
par les équipes IRFU et IPNO



IRFU + LAL:

800 coupleurs RF fabriqués et conditionnés,
et 100 cryomodules préparés & assemblés



X-FEL: e- 17.5 GeV, 500 kW faisceau, 3 kms

Utilisation d'accélérateur pour des traitements en radiothérapie : microfaisceaux d'électrons de haute énergie

Intérêt -> fractionnement spatiale de la dose permettant une meilleure tolérance aux traitements de radiothérapie.

Dose de 100 Gy là où par un traitement conventionnel une dose de 20 Gy serait létal.

R&D Grid therapy sur PRAE (Plate-forme pour la Recherche et les Applications avec des Electrons – IPNO, LAL, IMNC)

