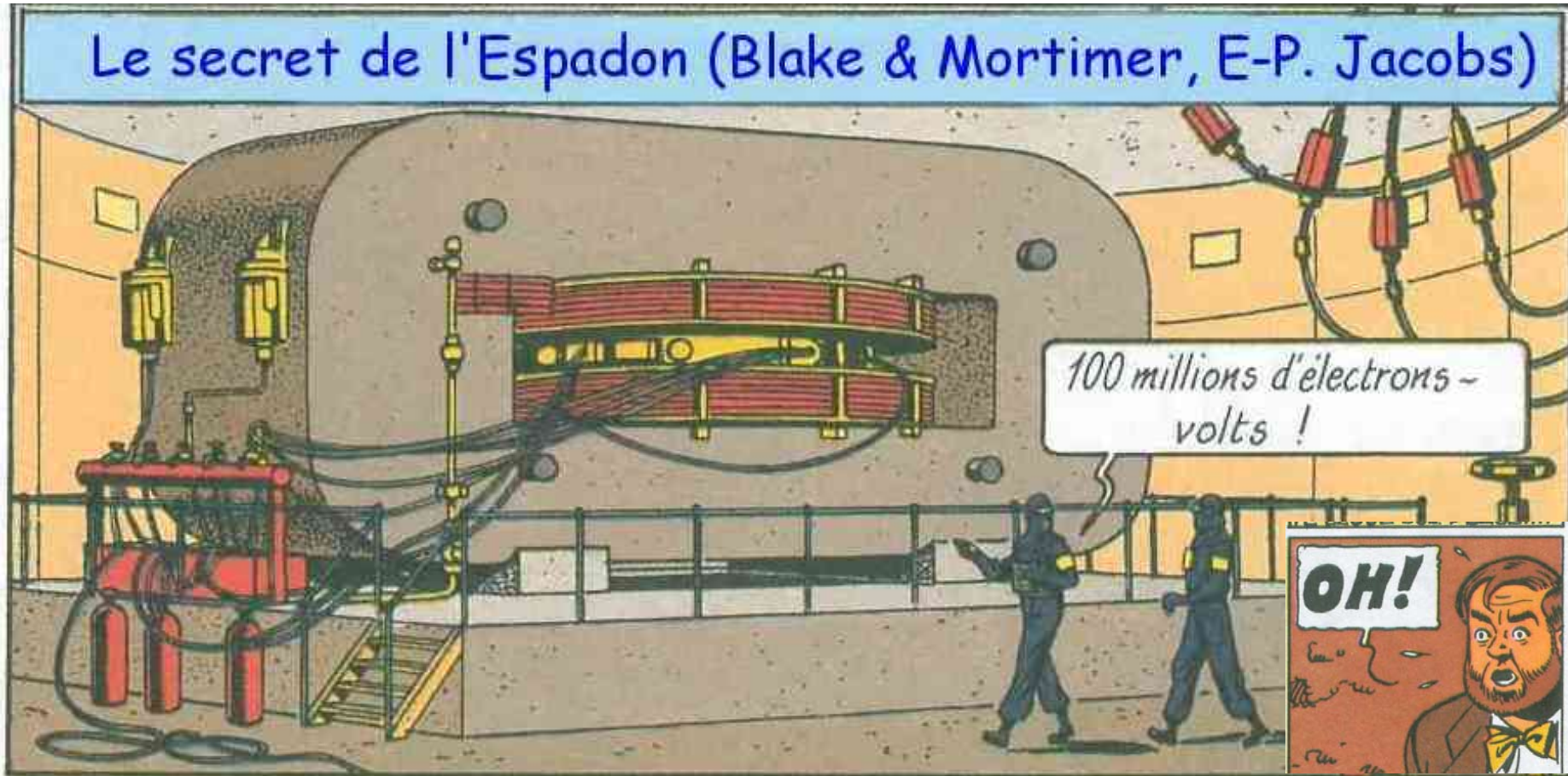


Les accélérateurs et certaines de leurs utilisations



1946 : les accélérateurs entrent dans la culture BD !

Sommaire

Cours n°1

- *Arbre généalogique des accélérateurs*
- *Motivations et genèse des accélérateurs*

Cours n°2

- *Les stabilités transverses vues à travers l'évolution du cyclotron*
- *L'énergie variable des cyclotrons*
- *Les synchrotrons*

Cours n°3

- *Les accélérateurs linéaires*
- *Quelques accélérateurs « exotiques »*

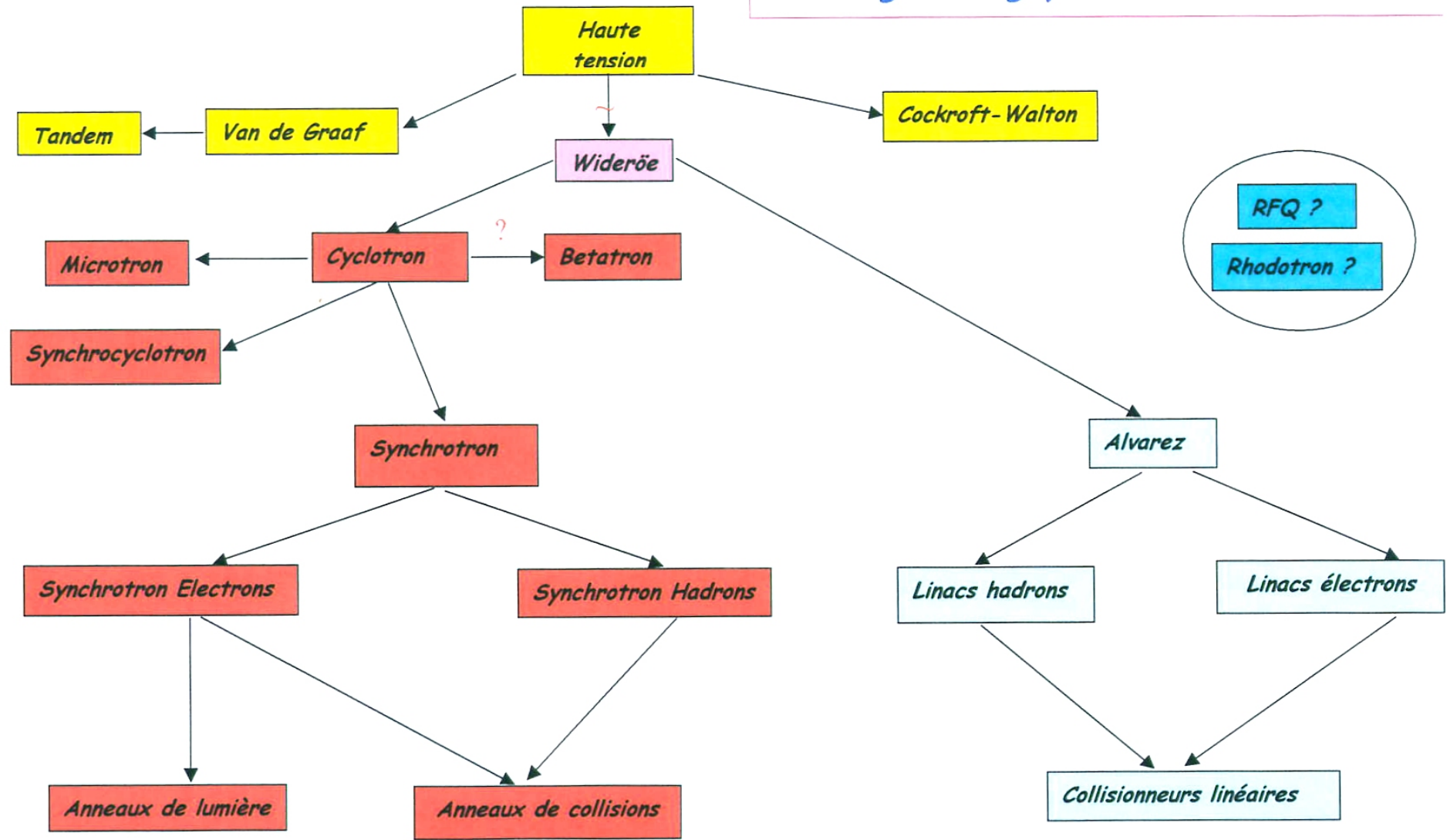
Cours n°4

- *Quelques applications (hors physique nucléaire et physique des particules)*
- *Quelques remarques finales*
- *Bibliographie*
- *Appendices*

Cours n°1

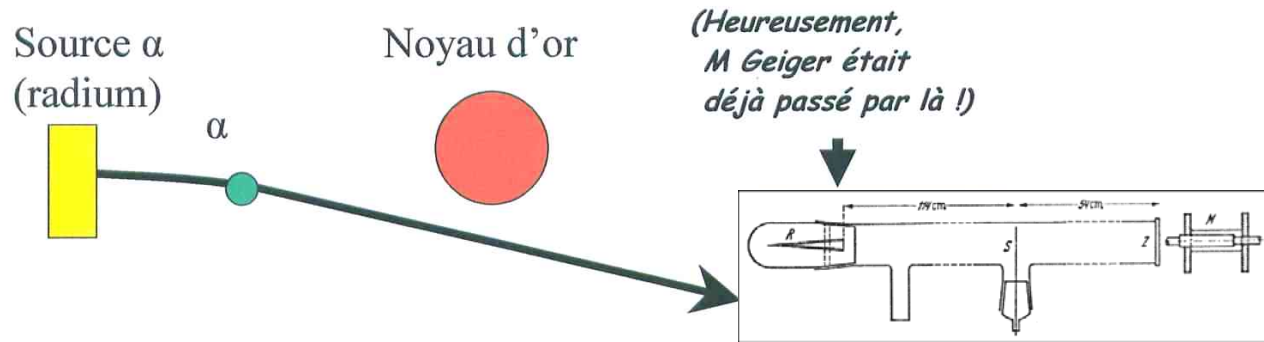
- *La famille des accélérateurs : aperçu sur une petite galaxie*
- *Et puis, pourquoi des accélérateurs ?*

Arbre généalogique des accélérateurs

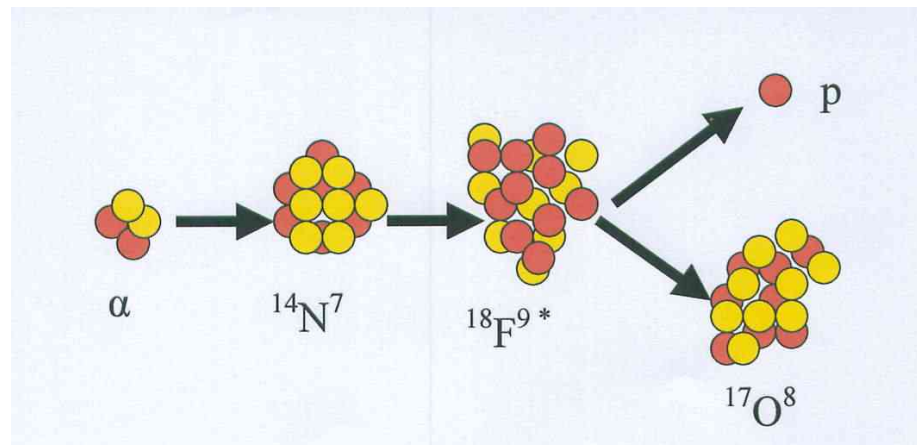


A cause, à cause d'Ernest...

Il met en évidence l'existence d'un noyau dans l'atome (1911)



Il réussit la première transmutation artificielle (1919) avec un projectile rapide : l' α , issu d'une source radioactive.



Ernest Rutherford,

1st baron of Nelson and Cambridge, et fervent de rugby

...et il veut des projectiles encore plus énergiques ! (1927)

Accélération et énergie, notations et unités

L'énergie cinétique acquise par un ion de charge Q dans l'accélération par une différence de potentiel V vaut

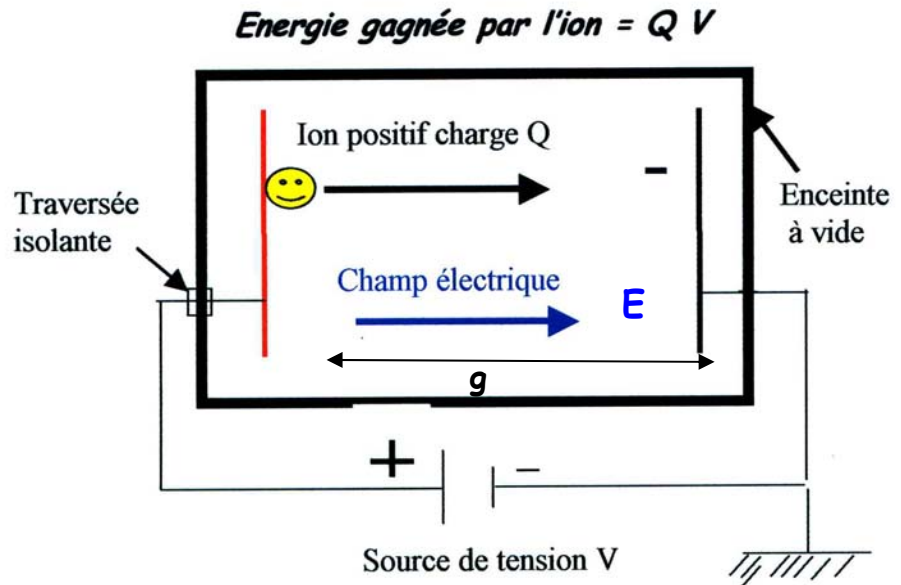
$T = QV$, indépendamment de la masse de l'ion

Elle se mesure en électronvolts (eV), ou en **MeV**.

L'agent accélérateur, c'est le champ électrique, ici :

$$\vec{E} = -\frac{V}{g}$$

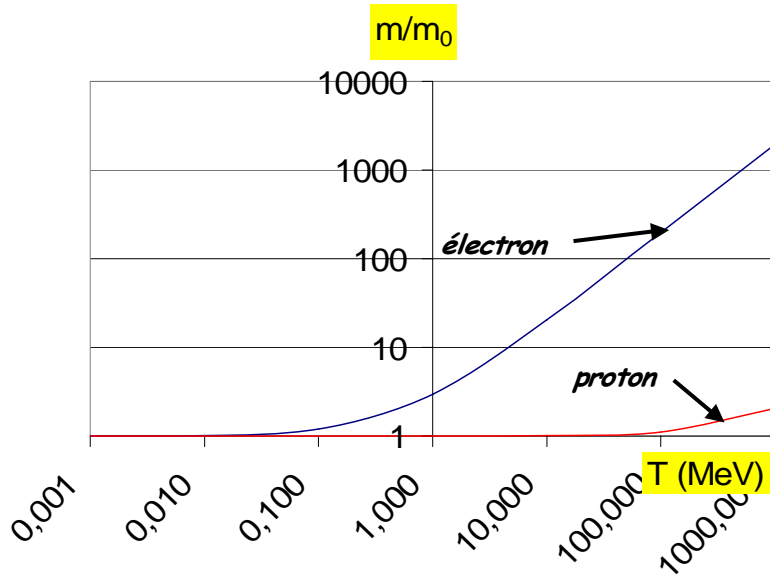
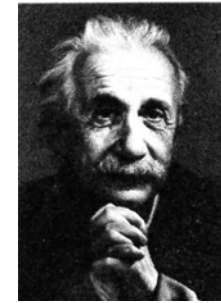
, g = distance inter-électrodes



✓ Pour un ion de masse atomique A (=nombre de protons et de neutrons), on utilise souvent l'énergie par nucléon : $W = T/A$ mesurée en **MeV/nucléon**

✓ Pour les projectiles de très haute énergie ($v \sim c$), on utilise parfois la quantité de mouvement $p = mv \sim E_{\text{totale}}/c$, exprimée en **GeV/c**.

Relativité (repères)



La masse de l'électron commence à sentir l'effet relativiste vers 10 keV.

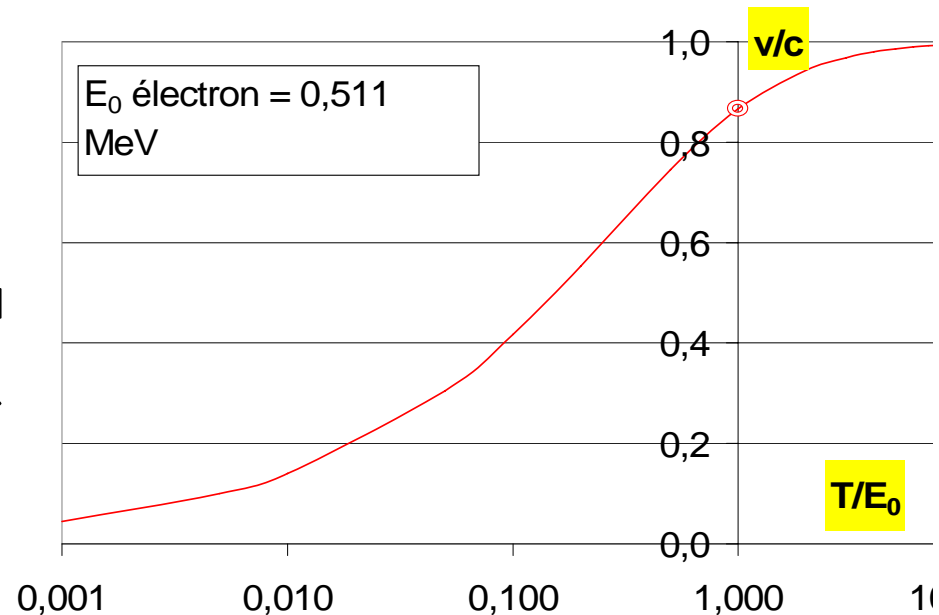
Pour le proton, c'est 100 MeV.

(m_0 est la masse au repos : $T = m_0 c^2$)



Lorsque l'énergie cinétique atteint 10 fois l'énergie au repos, la vitesse (presque égale à c) ne varie presque plus.

Au-delà, l'énergie continue d'augmenter (presque) seulement via l'augmentation de la masse



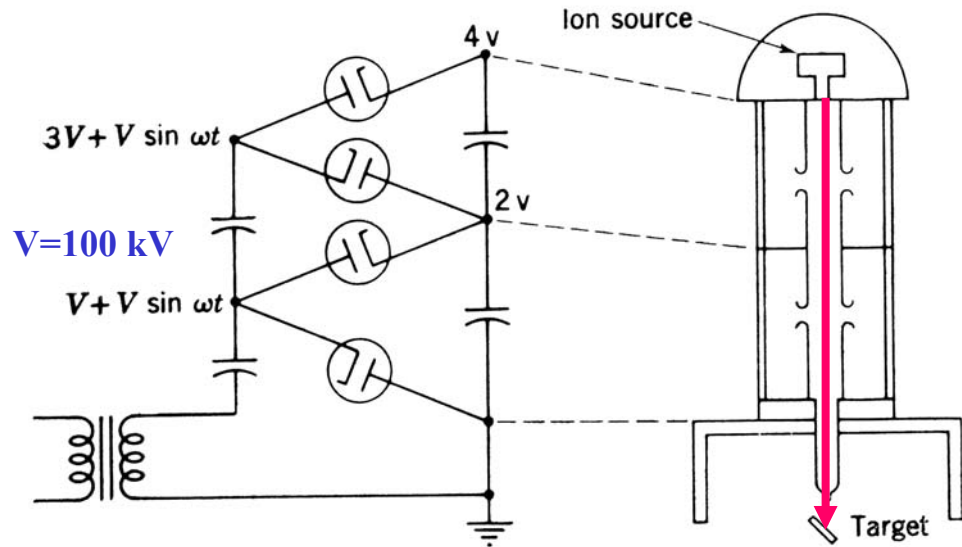
Accélération par générateur haute tension

L'idée la plus simple :

fabriquer une tension continue la plus élevée possible et la répartir sur une série de tubes à l'intérieur desquels les ions se déplacent.

Cockroft-Walton (1932) ,
Nobel 1951

Protons accélérés à 400 keV
sur une cible de lithium →
2 noyaux d'hélium (α)



Limitation de la tension (claquages) : **maximum 1,25 MV** (Philips)

Mais le « Cockroft-Walton » est toujours utilisé comme injecteur pour d'autres accélérateurs : forts courants , $V \sim 800 \text{ kV}$ (PSI, LAMPF, Tevatron).

Tension continue : plus génial, mais plus gonflé, le Van de Graaf

Robert Van de Graaf (1930)

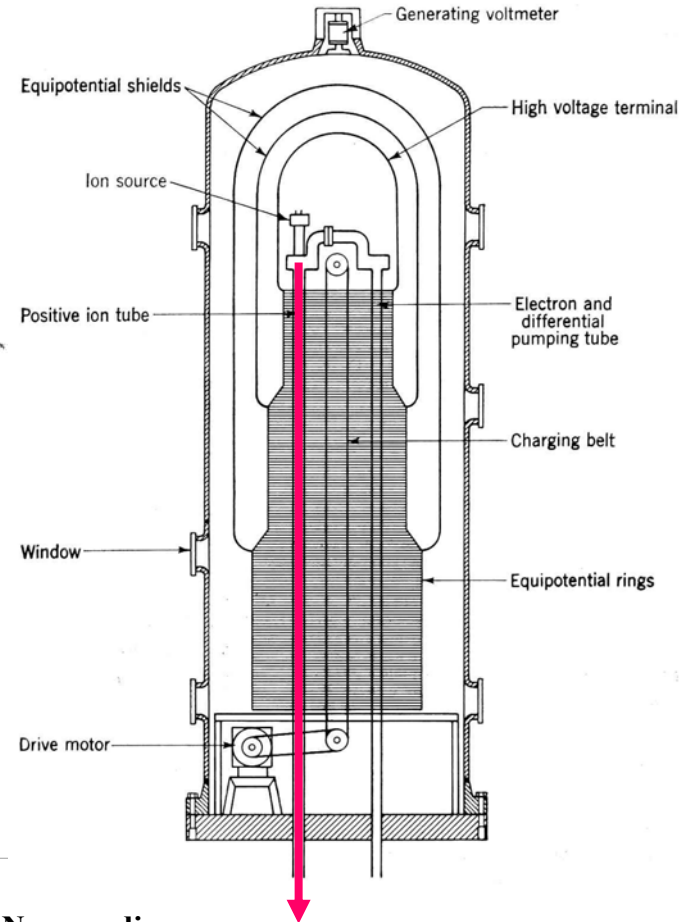
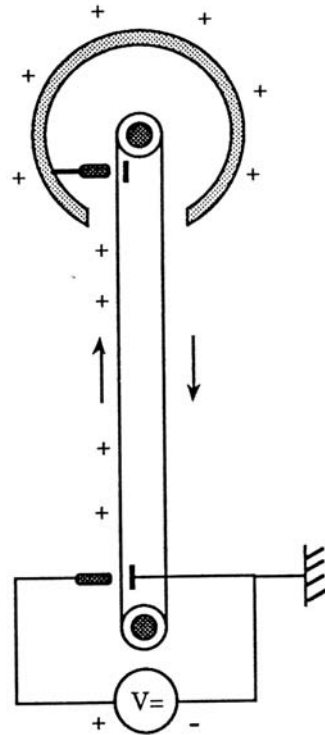
➤ Un peigne polarisé (20 à 30 kV) dépose des charges sur la courroie qui tourne à 10-20 m/s; elles sont collectées au terminal par un peigne similaire, ce qui charge ce terminal (isolé) à une tension qui peut monter à plusieurs MV.

➤ La tension est répartie sur un empilement de disques métalliques séparés par des isolants.

➤ L'isolement du système par rapport à l'enceinte (à la masse) est assuré par un gaz sous pression (air*, azote, SF₆, ou mélange).

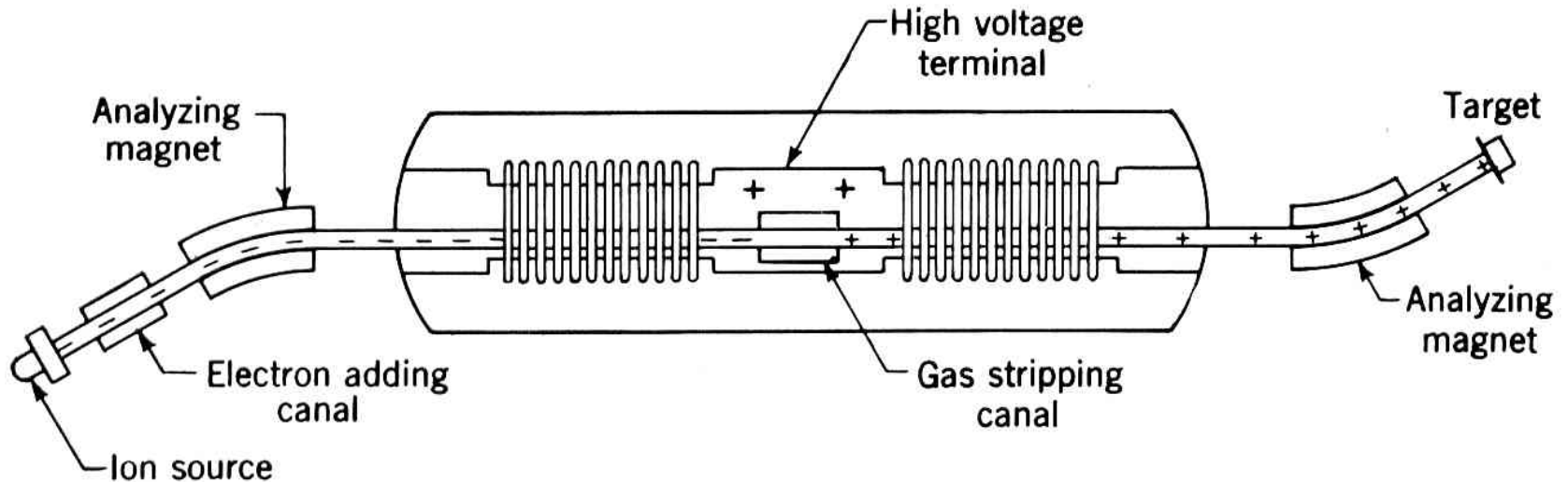
➤ V max de fonctionnement : ~10 MV, *ça marche dans l'air, mais pas en Normandie :

➤ Énergie facilement variable.



trop humide !

Encore mieux: le tandem (si on sait faire des ions négatifs)



Le premier : Chalk-River, 1960

- Les ions négatifs issus de la source sont accélérés par une tension positive jusqu'au milieu de la machine, puis changent de charge et deviennent positifs en traversant une cellule remplie de gaz ou une feuille mince (éplucheur, voir appendice), puis sont à nouveau accélérés entre la tension positive et la masse.
- Excellentes qualités de faisceau (continu !), énergie facilement variable
- **V max : 18 à 25 MV au terminal** . $T_{\max} = V (1 + Q)$
- Intensité limitée avec les ions lourds (émittance, durée de vie des éplucheurs)
- Pour les ions lourds, énergie limitée par la charge Q obtenue avec V_{\max} .

Qualités et limitations des accélérateurs électrostatiques

Qualités:

- faisceau continu*
- symétrie cylindrique*
- excellentes qualités optiques*
- énergie variable*

Mais:

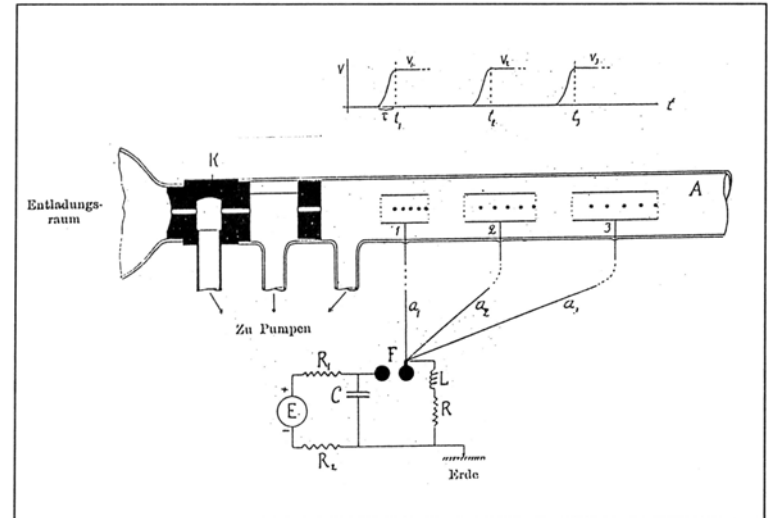
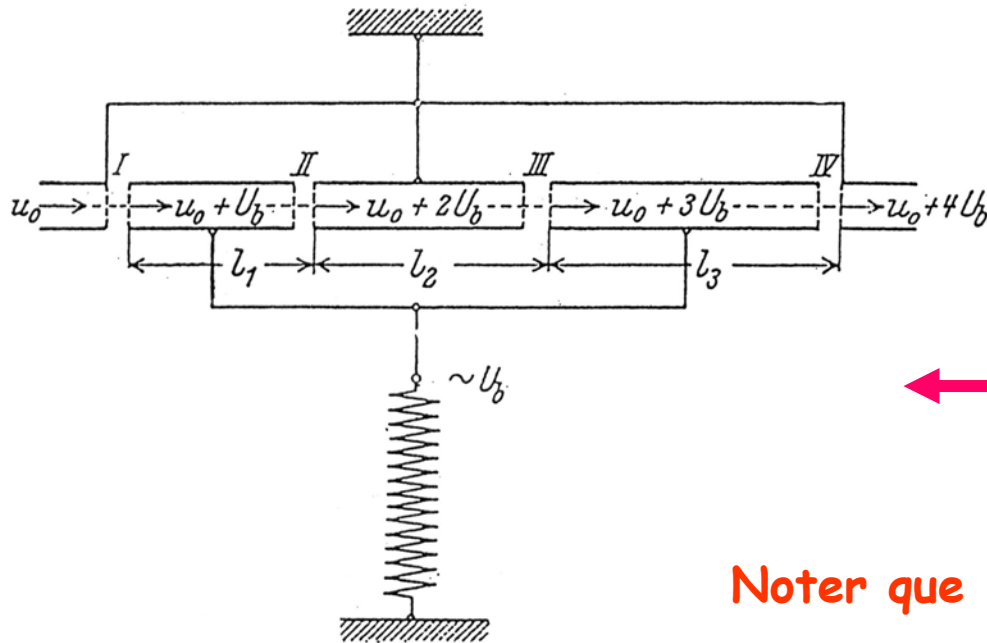
limitation de la tension par effluves et claquages



Toujours plus intelligent:

l'accélération par une tension alternative . C'est le linac

Imaginé pour accélérer des électrons par **Ising** (1924), mais pas de réalisation.



Celui qui l'a fait : **Wideröe** (1928)

Les premiers ions : K et Na sont accélérés jusqu'à 50 keV

Noter que les tubes sont de longueur croissante

Un linac selon Wideröe : Sloan et Lawrence (1931)

La tension $V = V_0 \sin(2\pi t / \tau)$ est appliquée alternativement sur les tubes pairs et impairs.

Pour que l'accélération dans les intervalles soit synchrone de la HF (période $\tau = \text{constante}$), il faut que la longueur de chaque tube de glissement :

$$L = v \tau / 2$$

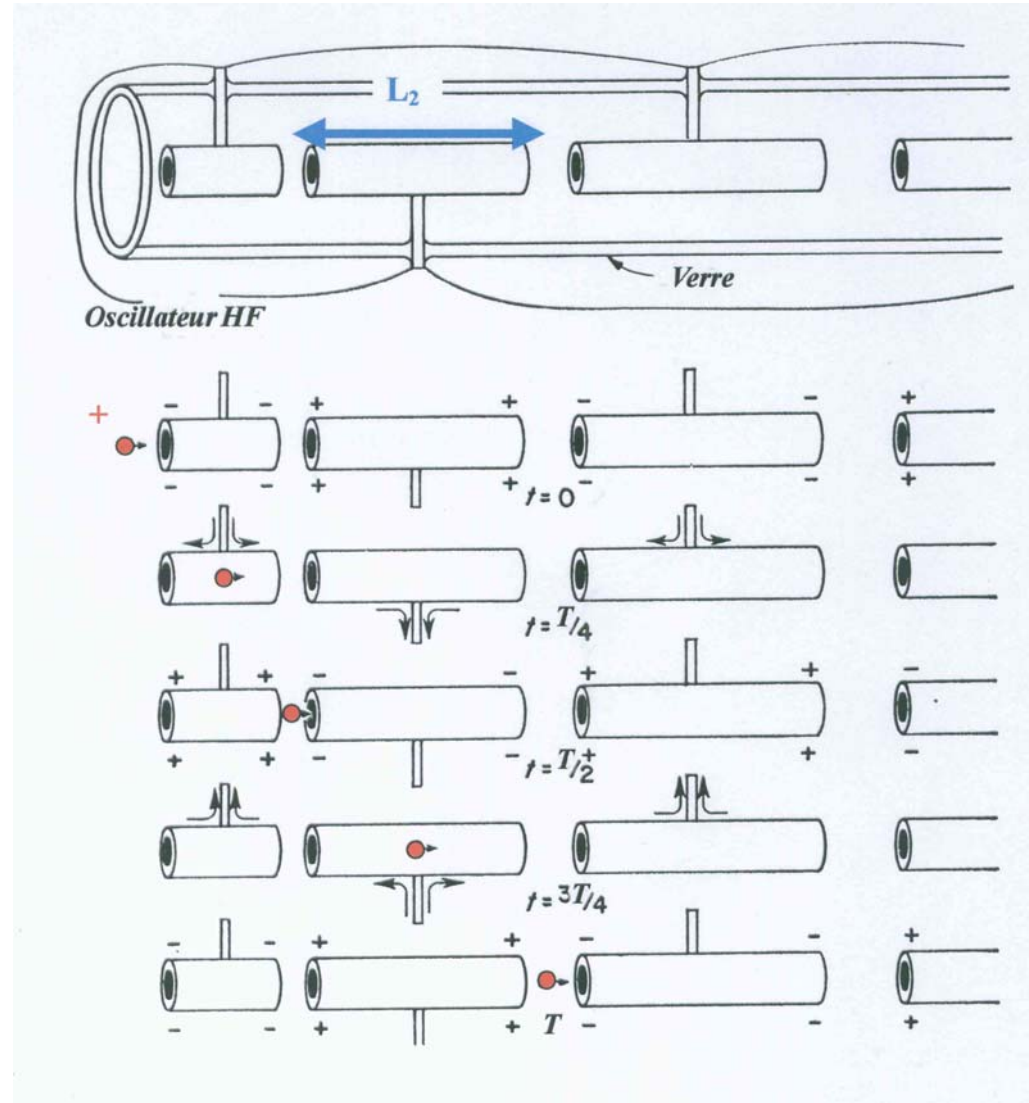
augmente comme la vitesse v .

L'énergie (MeV/n) finale est fixe.

Berkeley 1931 :

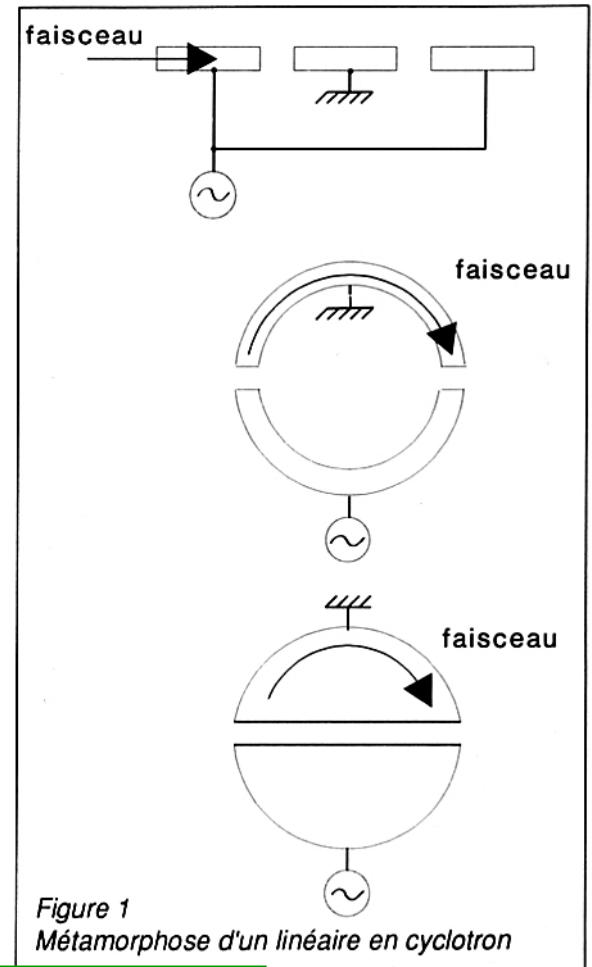
$V_0 = 42 \text{ kV}$, $F = 7 \text{ MHz}$, 30 tubes

→ ions Hg de 1,2 MeV



La belle idée d'Ernest : le cyclotron

- *Idée 1* : les tensions continues (Cockroft-Walton, Van de Graaf) sont limitées vers les hautes valeurs (claquages)
- *Idée 2* : la succession d'électrodes cylindriques alimentées par une différence de potentiel alternative (sinusoïdale) atteint des dimensions rapidement olympiques.
- *Idée 3* : l'éclair de génie (**Ernest O. Lawrence, 1929**). On va plonger l'ensemble des accélérations dans un champ magnétique qui fait tourner les ions en rond, et de surcroît, en n'utilisant qu'une seule paire d'électrodes.



Mais heureusement que Lawrence ne lisait pas l'allemand ! →

En 1924, **Flegler**, de l'université d'Aix-la-Chapelle, propose de faire tourner les ions dans un champ magnétique. **Wideröe** lui réplique qu' » *il serait très difficile de stabiliser les orbites circulaires* » , comme il l'avait exposé dans sa thèse.

C'est ainsi qu'on tue une idée géniale.



Flegler



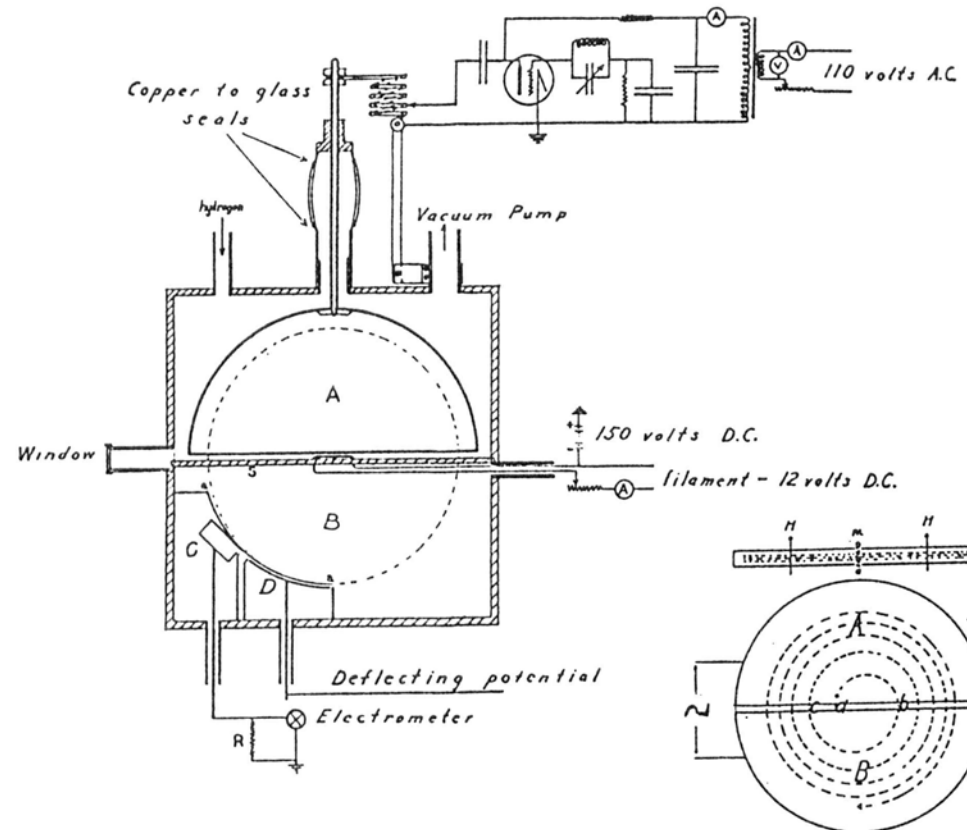
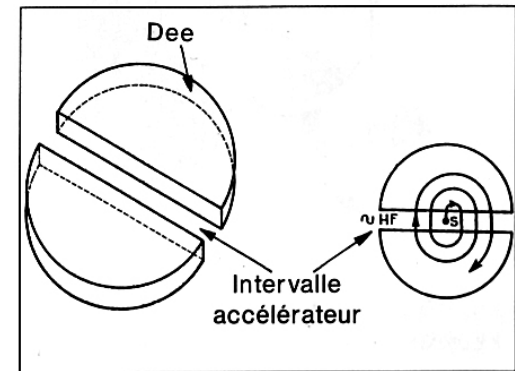
Wideröe

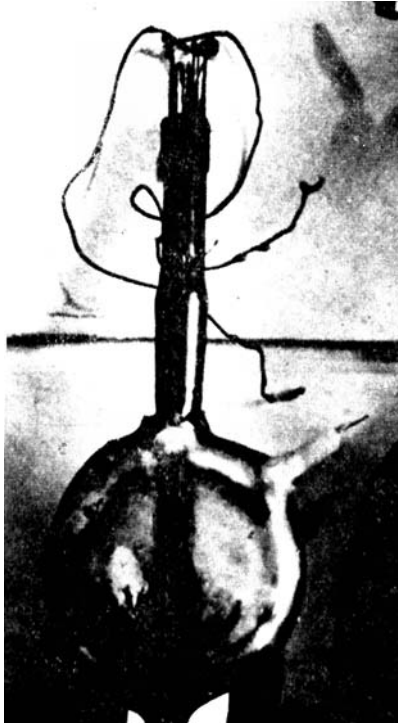
L'électrode unique

➤ La boîte à camembert (en cuivre) est coupée selon un diamètre : une moitié est à la masse et l'autre (« dee ») est reliée à un générateur de tension sinusoïdale.

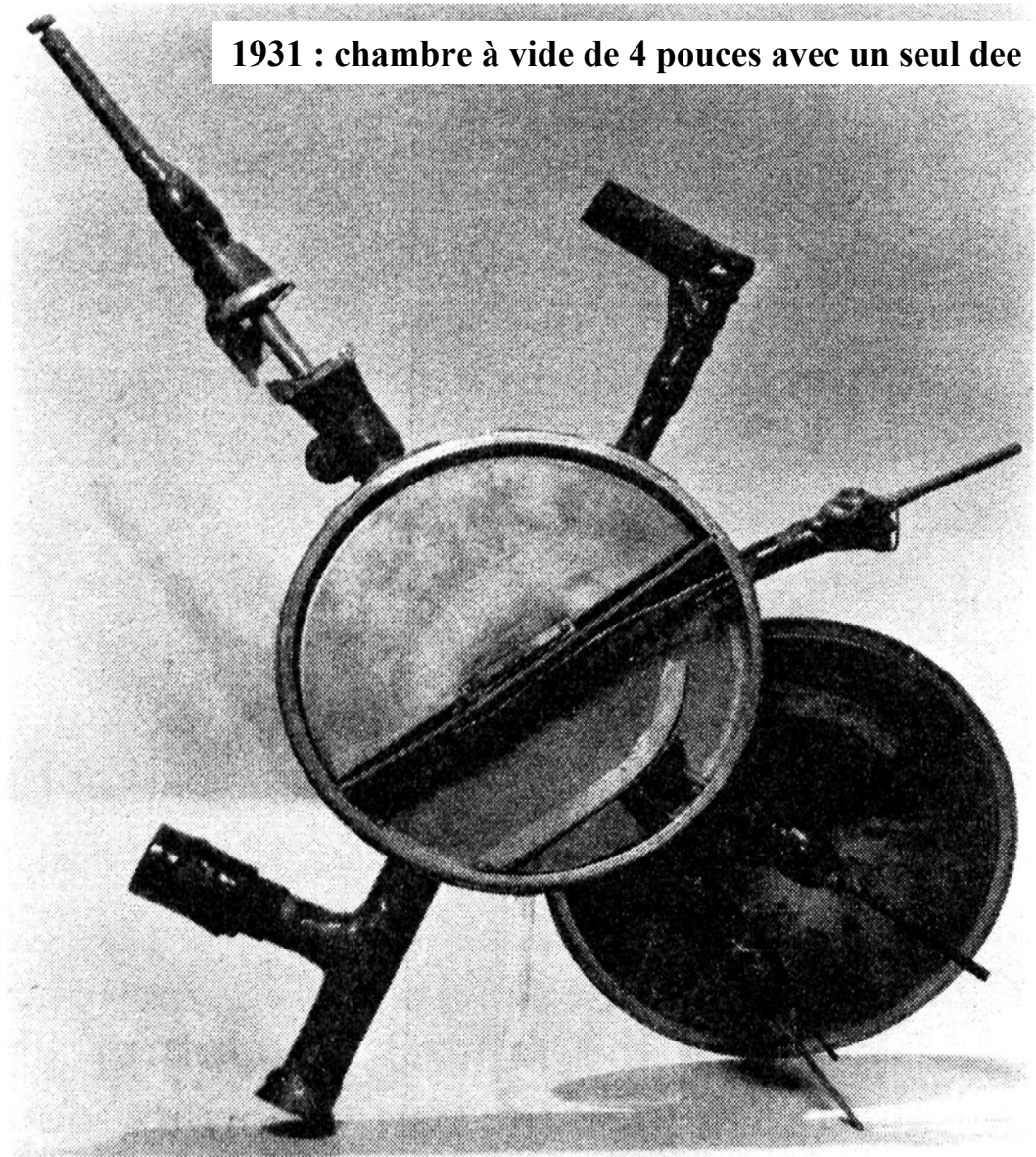
➤ Le tout doit être sous vide (les premières enceintes étaient des flasques de verre) et glissé dans l'entrefer d'un électro-aimant.

➤ Au centre, un filament polarisé et chauffé ionise comme il peut du gaz injecté sous faible pression : c'est la source d'ions.





1930 : les électrodes
sont faites de peinture
à l'argent enduisant
l'intérieur de la flasque
de verre



1931 : chambre à vide de 4 pouces avec un seul dee

L'équation unique du cyclotron

• Si l'ion (Q , m) de vitesse v_θ se déplace sur un cercle de rayon r grâce à un champ magnétique B_z :

force centripète = force centrifuge

$$mv_\theta^2/r = Qv_\theta B_z \quad [1]$$

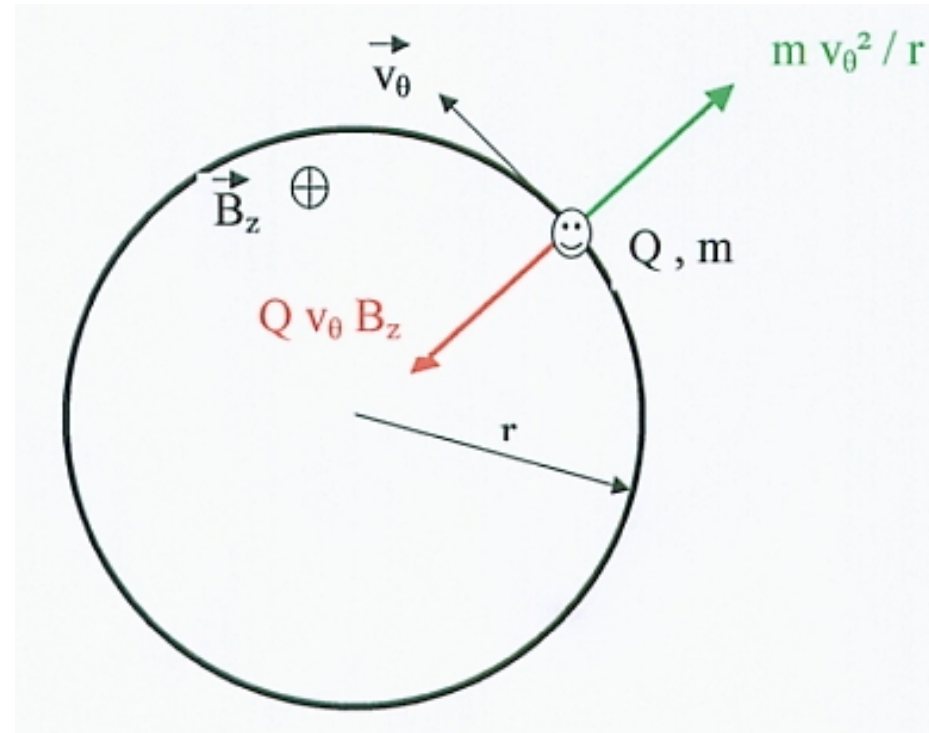
• Vitesse angulaire :

$$\omega = d\theta/dt = v_\theta/r = QB_z/m \quad [2]$$

• Donc, si le champ magnétique est constant partout, et si la masse ne varie pas, la **fréquence de rotation**:

$$f_{\text{rev}} = \omega/2\pi \quad [3]$$

est constante.



Le mouvement est **isochrone** : quelle que soit la vitesse tangentielle v_θ , l'ion met toujours le même temps pour faire un tour.

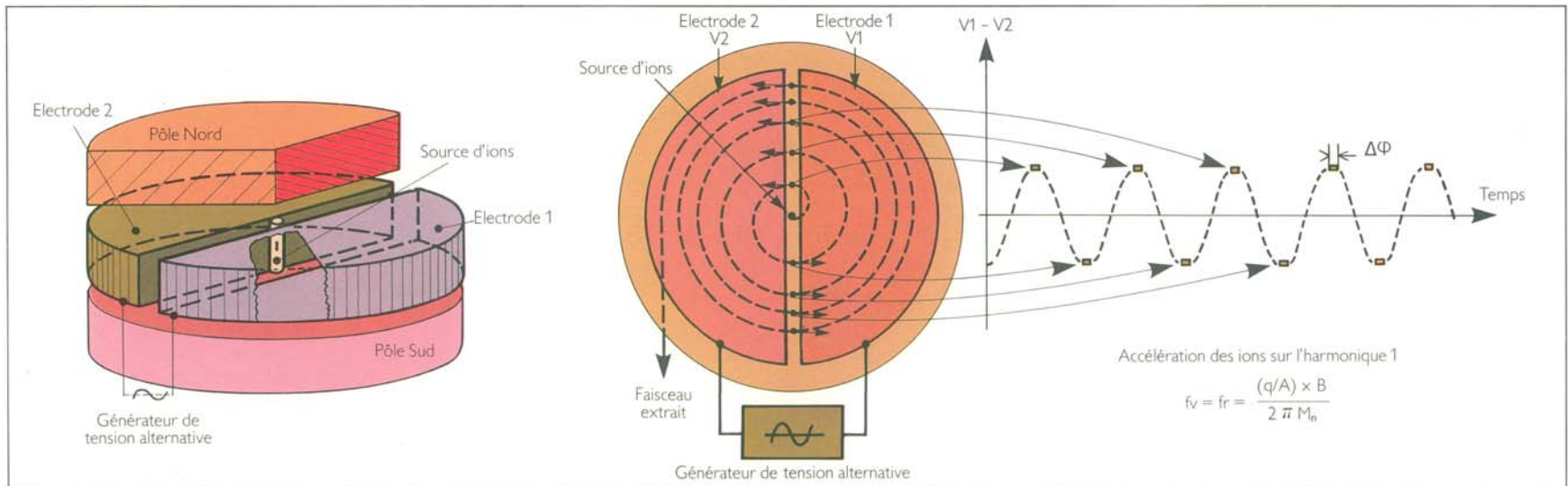
L'accélération Haute Fréquence (HF) et la spirale

Puisque le mouvement est isochrone, il suffit d'appliquer à l'électrode (« dee ») une tension sinusoïdale dont la fréquence est égale (ou un multiple de) la fréquence de rotation : $f_{HF} = h f_{rev}$.

L'équation [2] s'écrit aussi:

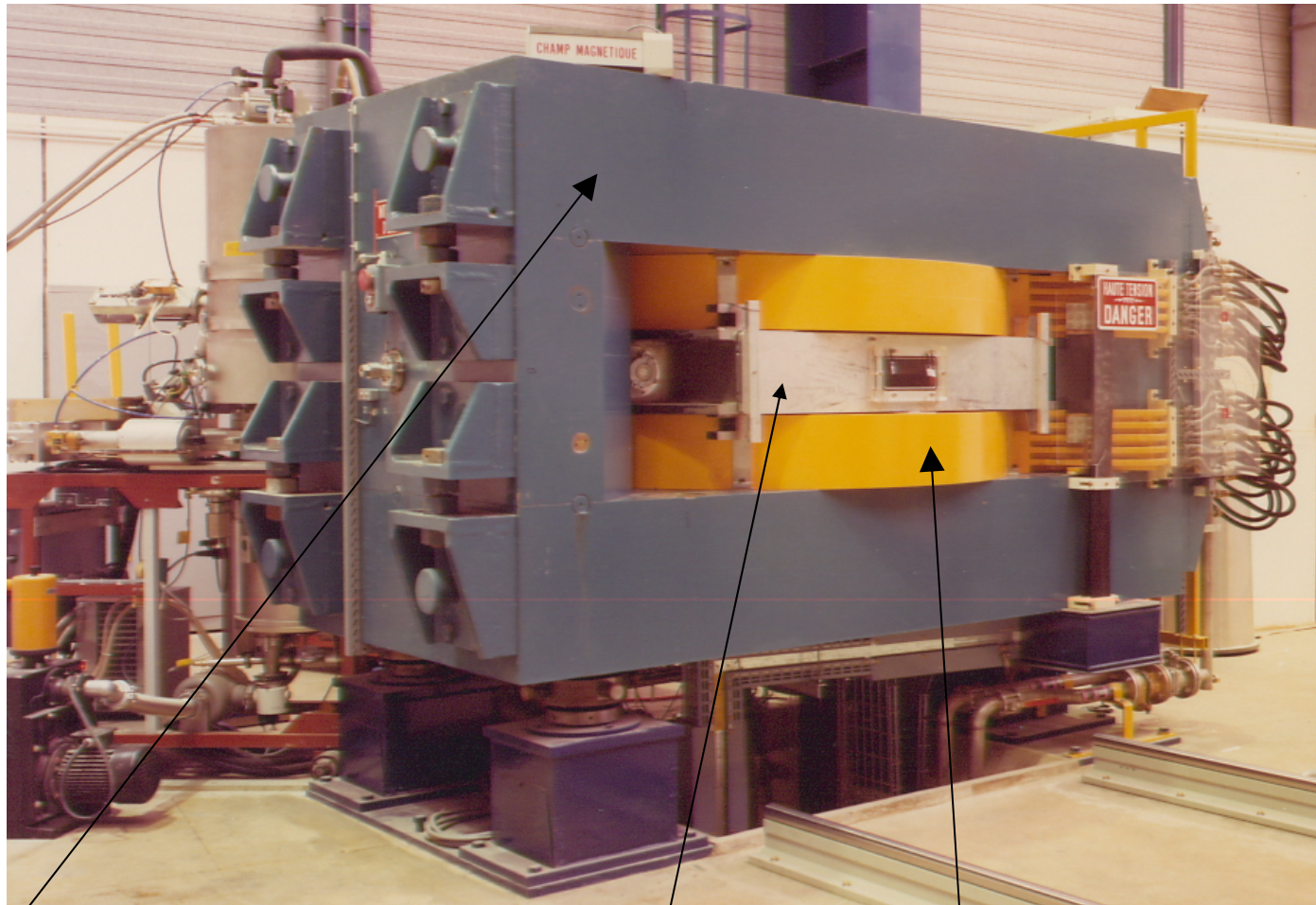
$$v_{\theta} = QB_z r / m \quad [4]$$

→ le rayon augmente avec la vitesse, l'ion décrit une sorte de spirale.

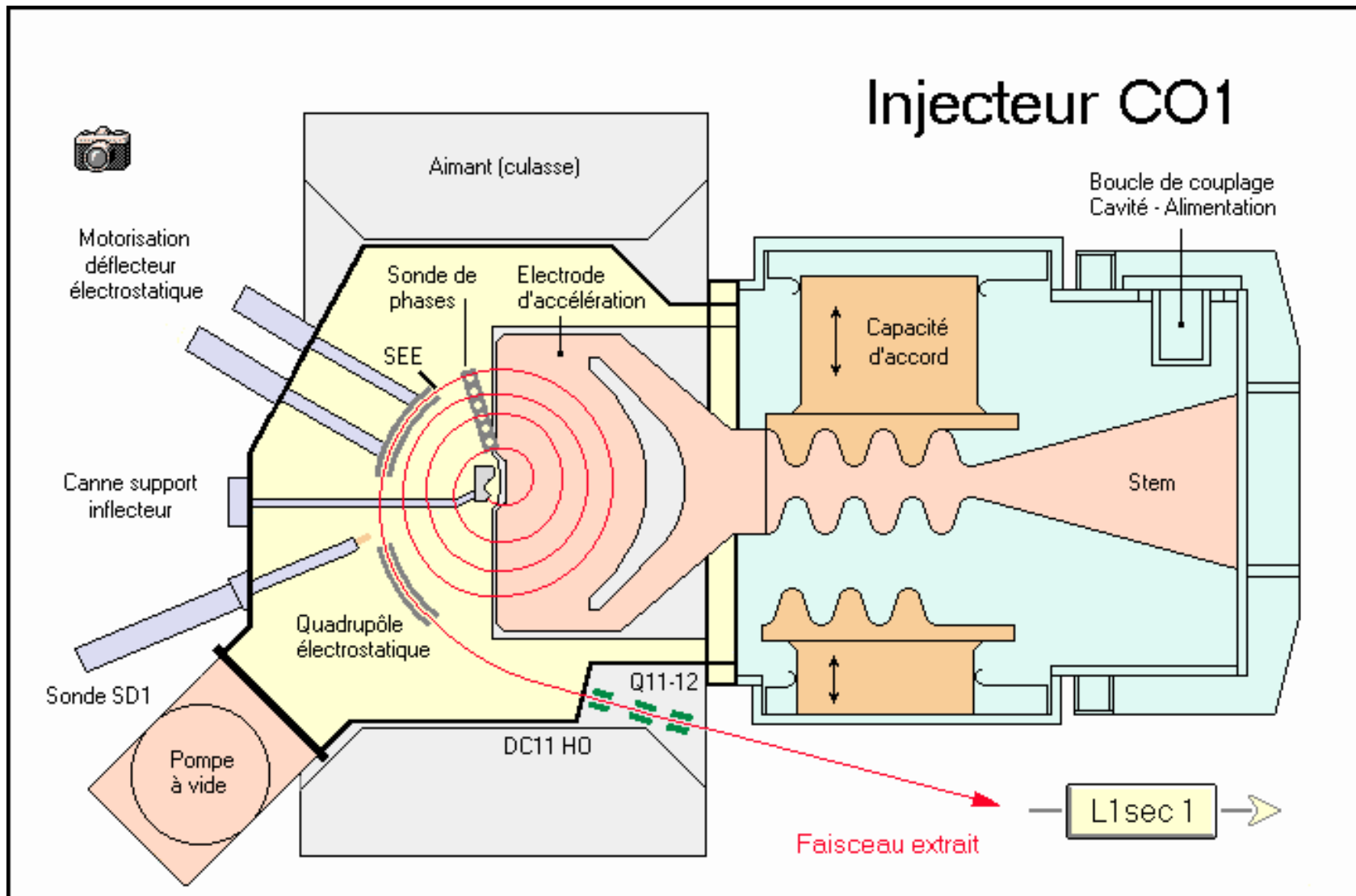




Le 27 pouces de Berkeley (1932)

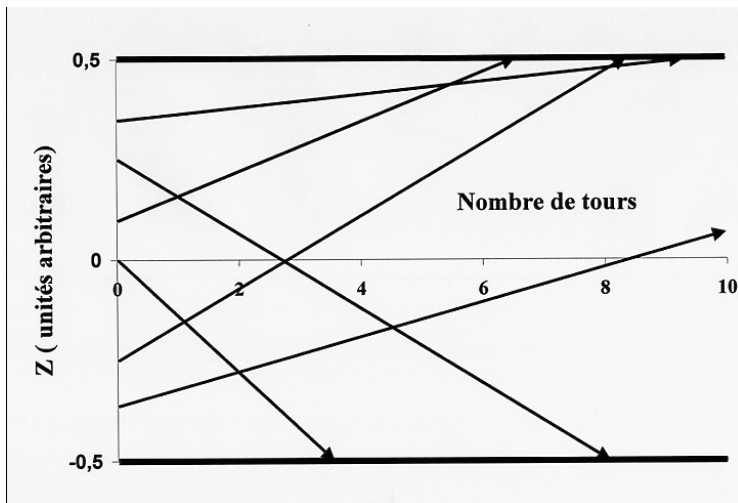


Un des deux injecteurs du GANIL. En jaune, les bobines circulaires qui entourent les deux pôles Nord et Sud. La chambre à vide (inox) est glissée entre les deux. La culasse (en bleu) assure le retour du flux magnétique. Les rails servent à la cavité HF qui a été reculée.

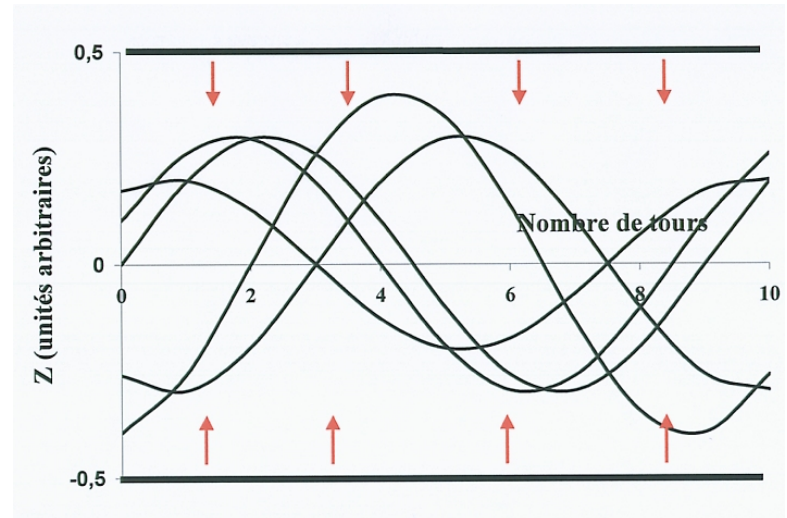


Stabilité : nécessité de la focalisation verticale

A la sortie de la source d'ions, les ions sont affectés de positions et de pentes différentes. Si leur mouvement spiralé dans le plan de symétrie des pôles est assuré, il faut les empêcher de s'échapper verticalement :



Ne pas laisser faire ça



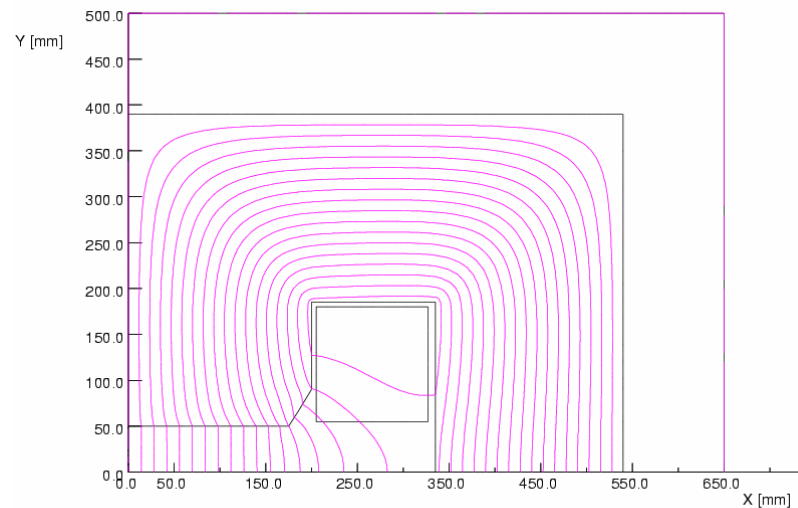
Faire plutôt ça

Autrement dit, *il faut trouver une force de focalisation verticale* (flèches rouges) qui oblige les ions à osciller autour du plan de symétrie des pôles (plan médian).

Donc, Widoeroë avait raison !
Alors, qu'est-ce qui a sauvé Lawrence ?

Cours n°2

Focalisation du faisceau

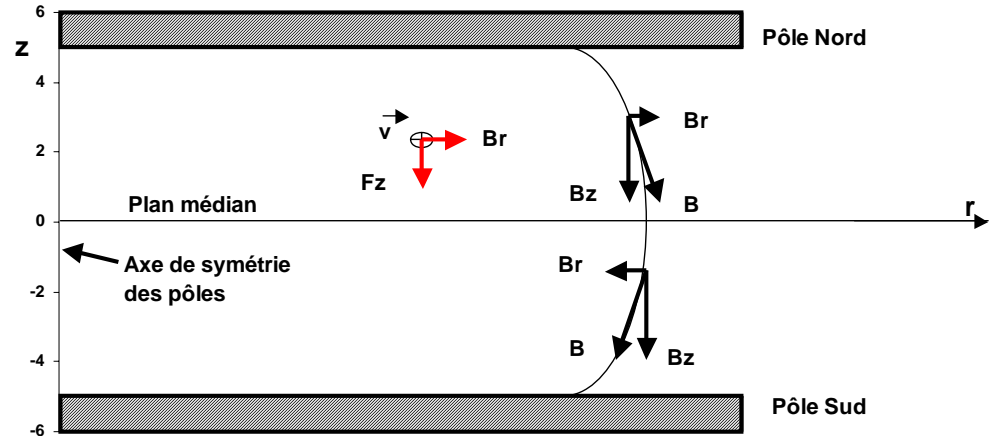


C'est la décroissance du champ magnétique du centre vers le bord qui fournit la force de focalisation verticale

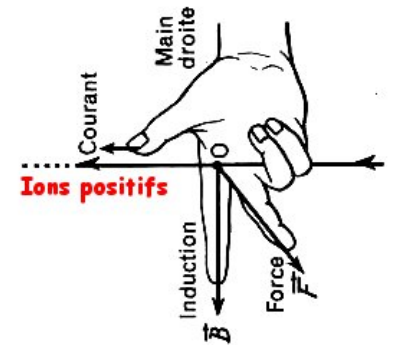
Entre les pôles, les lignes de champ s'incurvent au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre : B_z n'est plus la seule composante.

On mesure la décroissance de la composante du champ vertical par *l'indice de champ* :

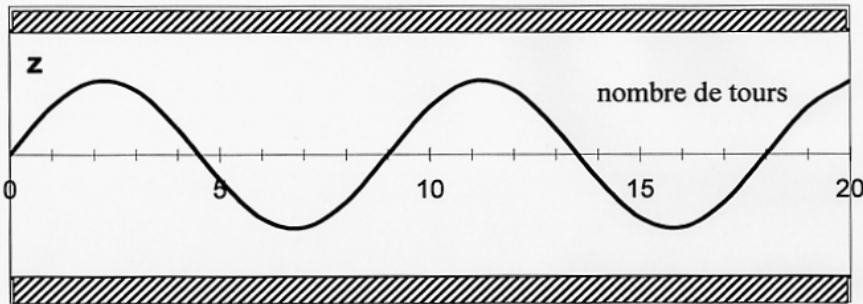
$$k = \frac{r}{B_z} \frac{dB_z}{dr}$$



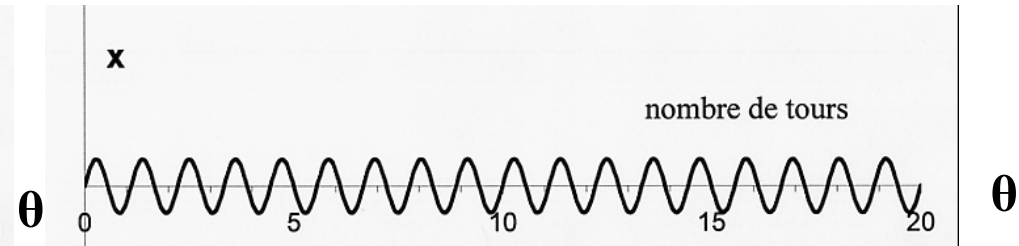
C'est la petite composante B_r (règle des 3 doigts) qui exerce une force verticale dirigée vers le plan médian.



La stabilité des ions est gouvernée par l'indice de champ



Ici, l'oscillation verticale est décrite en 9 tours. On a donc $n_{uz} = 1/9 = 0,11$



Ici, l'oscillation horizontale est décrite en un peu plus d'un tour. En fait, au 10ème tour, elle a effectué 9 oscillations complètes. On a donc $n_{ur} = 9/10 = 0,9$

On montre que les ions ont une oscillation verticale autour du plan médian de la forme:

$$z = z_0 \cos(v_z \theta)$$

avec $v_z \sim 0,1$ à $0,2$.

$$v_z^2 = -k$$

(« Force » de focalisation verticale)

Il faut un indice négatif (champ décroissant) pour que le mouvement vertical soit stable.

Pour les petits mouvements dans le plan médian, autour du cercle de rayon R :

$x = r - R$, c'est pareil:

$$x = x_0 \cos(v_r \theta)$$

avec $v_r \sim 0,9$.

$$v_r^2 = 1 + k$$

Voir appendices 1 et 2

La stabilité exige donc la double condition:

$$-1 < k < 0$$

Première limite : l'isochronisme

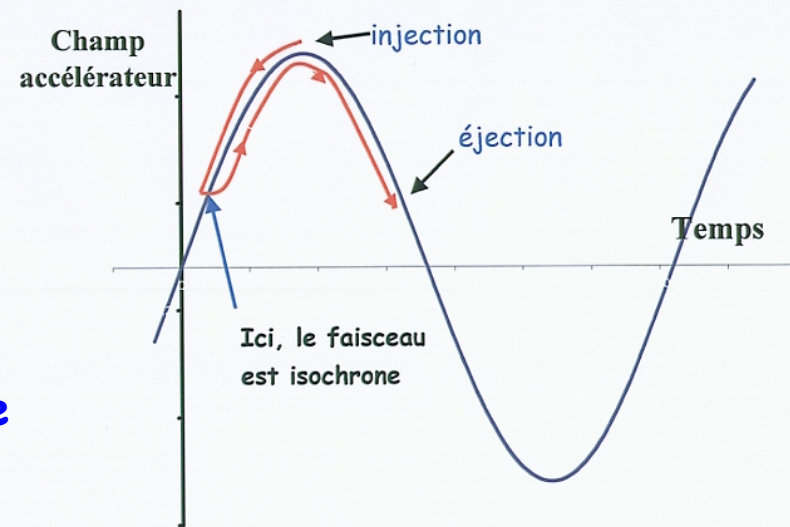
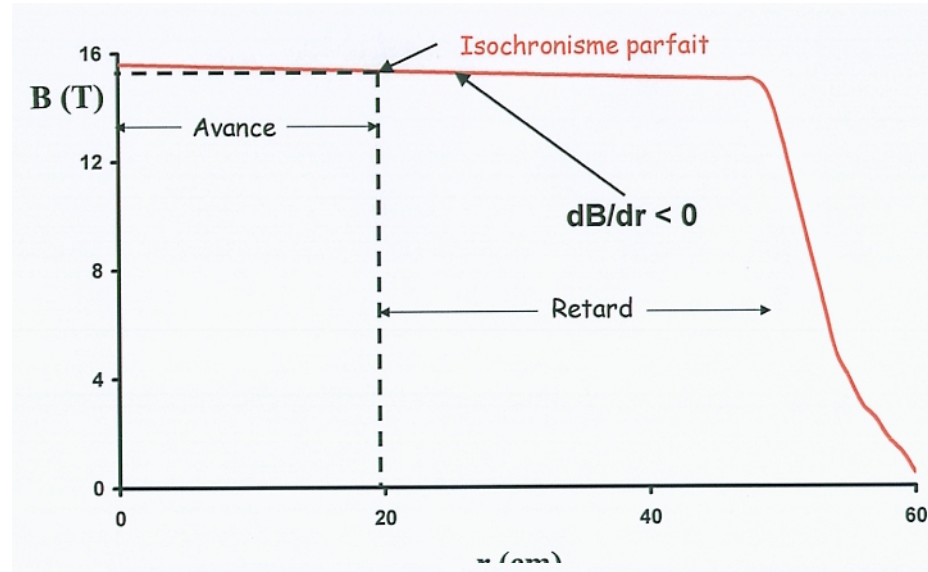
Le faisceau est isochrone pour une valeur précise du champ magnétique B_{iso} .
Si $B(r)$ diminue, puisque : $\omega = QB/m$

- les ions tournent plus vite si le champ $B > B_{iso}$
- et plus lentement quand $B < B_{iso}$.

L'instant d'arrivée des paquets d'ions dans le gap accélérateur varie par rapport à la sinusoïde HF. Les paquets sont accélérés tant qu'ils sont dans la partie positive du champ accélérateur. Il faut éjecter avant d'arriver au zéro du sinus.

La focalisation verticale par gradient négatif est incompatible avec l'isochronisme parfait

Pour un cyclo à pôles plats : limite pratique de l'énergie : ~ 20 MeV ! C'est pas beaucoup.



Deuxième limite :

l'augmentation de la masse par effet relativiste

Même si on se contentait d'une très très légère décroissance du champ, on serait coincés par Einstein !

En effet, si la vitesse devient suffisamment grande pour modifier la masse de l'ion ,

$$m = m_0 \gamma = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad , \quad \beta = \frac{v}{c}$$

la condition d'isochronisme n'est plus respectée

non plus, et il faudrait que le champ magnétique

augmente comme la masse :

$$\omega = \frac{Q B_0 \gamma}{m_0 \gamma}$$

*Conclusion : On ne peut pas être à la fois isochrone
(champ croissant) et focalisant (champ décroissant) !*

Comment s'en tirer?

L'isochronisme est de plus en plus difficile à assurer au fur et à mesure de l'augmentation de l'énergie

Les solutions:

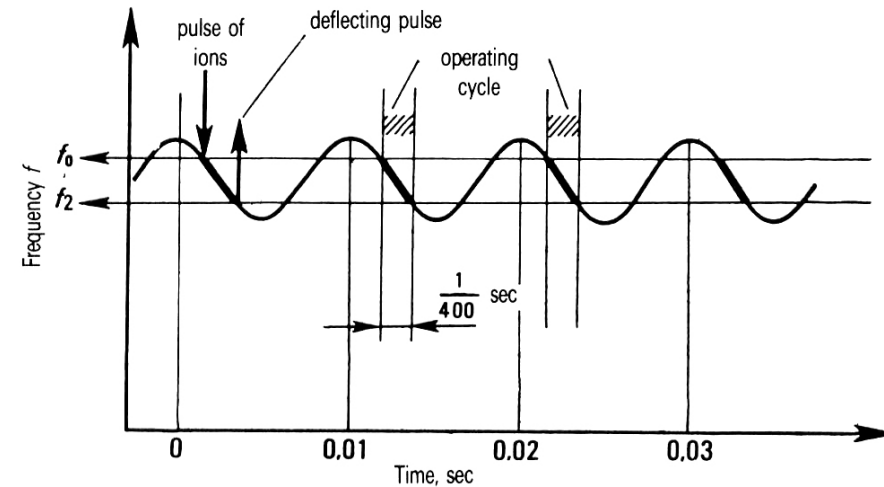
- Le synchrocyclotron
- Les secteurs
- Le synchrotron

Comment s'en tirer ? 1ère solution :

le synchrocyclotron (McMillan-Veksler 1945)

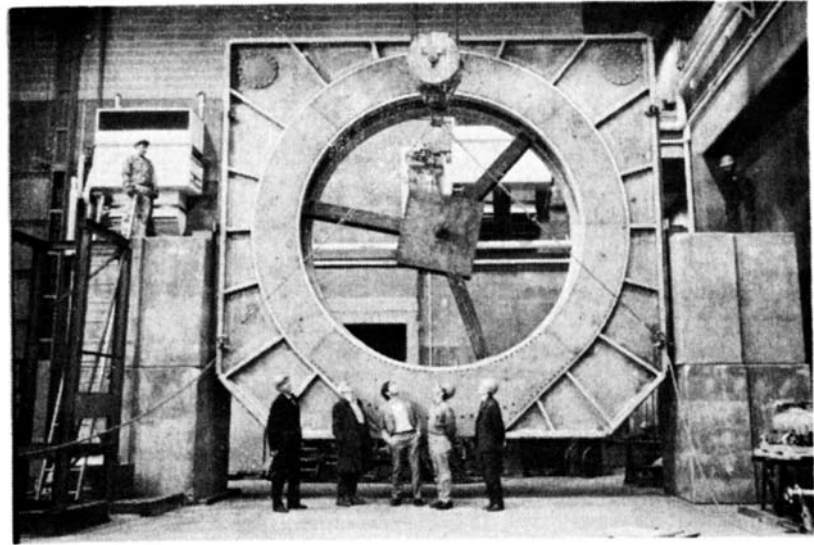
➤ on conserve des pôles plats, à symétrie cylindrique, avec une légère décroissance du champ en fonction du rayon pour conserver la stabilité verticale

➤ on fait varier la fréquence HF en raison inverse de la masse, ceci de façon cyclique, avec une fréquence de répétition de qqHz à qq dizaines de Hz, par un très gros condensateur rotatif



On obtient ainsi des protons d'énergie **600 MeV** (CERN, $B=1,94$ T; $r=2,25$ m) à **1 GeV** (Gatchina, $B=1,9$ T ; $r=3,18$ m) *mais les intensités sont de 10 à 100 fois inférieures à celles des cyclotrons, puisque le faisceau est pulsé.*

Les limitations du synchrocyclotron



Type de machine pratiquement abandonné (exceptions: CP Orsay, Gatchina)

Pourquoi ?

C'est très grand et très lourd et...

les synchrotrons apparaissent comme concurrents

Deuxième solution:

la focalisation par les secteurs (Thomas, 1938)

Système de coordonnées r, θ, z :

$-F_r \ v_\theta \ B_z$ (dans l'ordre, suivez mes 3 doigts),

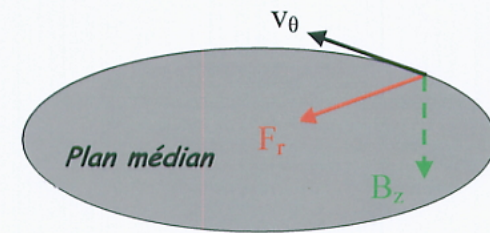
c'est ce qui maintient l'ion sur le cercle

$-F_z \ v_\theta \ B_r$: c'est la focalisation verticale par gradient négatif (qui ne marche pas fort).

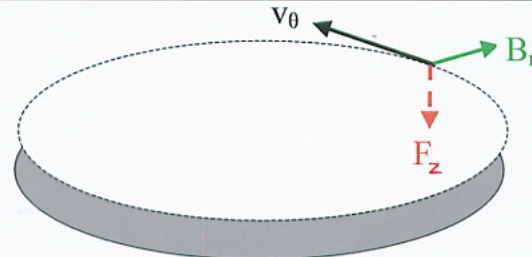
Il reste la combinaison :

$-F_z \ v_r \ B_\theta$: il faut trouver un moyen de créer à la fois une composante azimutale de champ magnétique B_θ et une composante radiale de la vitesse v_r (c'est-à-dire un faisceau qui ne tourne pas tout-à-fait rond)

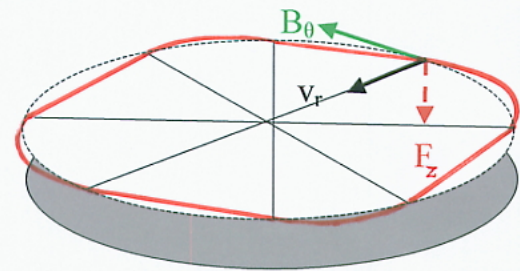
Facile : il suffit de **mettre des secteurs** !



1) La composante verticale de B produit la force radiale qui maintient l'ion sur un cercle



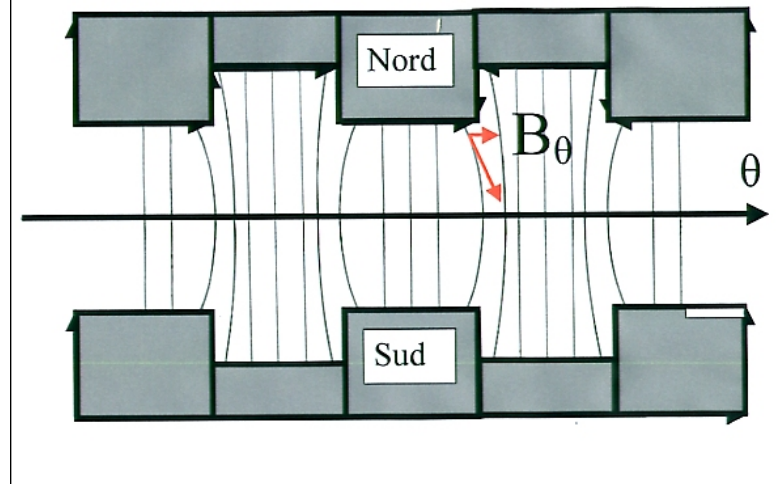
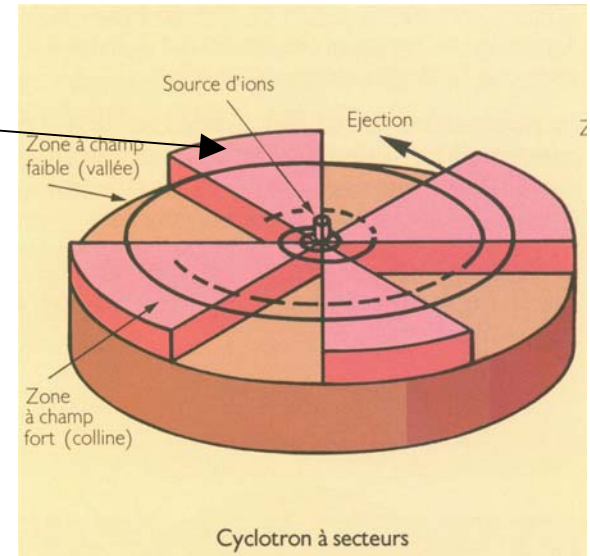
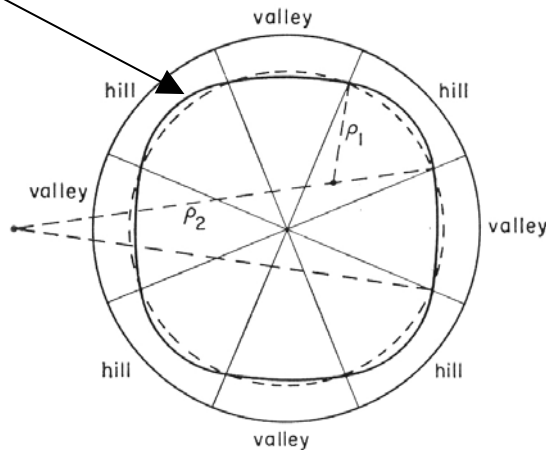
2) La composante radiale de B (si l'indice est négatif) produit une force verticale



3) La composante azimutale de B produit une force verticale (si l'orbite n'est pas circulaire)

Les secteurs

Sur les pôles plats, on rajoute des secteurs qui créent une modulation azimuthale du champ: si on développe un tour, on voit successivement une zone de B fort, puis une zone de B faible, et au-dessus et au-dessous du plan médian, la composante B_θ qu'on voulait. De plus, la trajectoire n'est plus tout-à-fait ronde et v_r apparaît.



Focalisation verticale plus forte et $B(r)$ croissant

La force de focalisation verticale devient :

$$v_z^2 = -k + \frac{N_{sect}^2}{N_{sect}^2 - 1} Fl$$

On a ajouté un terme positif qui dépend du nombre N_{sect} de secteurs et d'un facteur Fl (le « *flutter* ») qui mesure l'amplitude de modulation relative du champ magnétique entre collines et vallées:

$$Fl = \frac{(B_{col} - B_{val})^2}{8 \bar{B}^2} \quad \text{où } \bar{B} \text{ est la valeur moyenne de } B \text{ sur un tour.}$$

Pour obtenir un champ croissant avec le rayon r , on donne une forme aux secteurs et on les tapisse de bobines de courant. On fabrique une loi :

$$\bar{B}_z(r) = \bar{B}_z(r=0) \gamma$$

Il faut :

$$\frac{N_{sect}^2}{N_{sect}^2 - 1} Fl > k$$

pour

assurer la focalisation verticale.

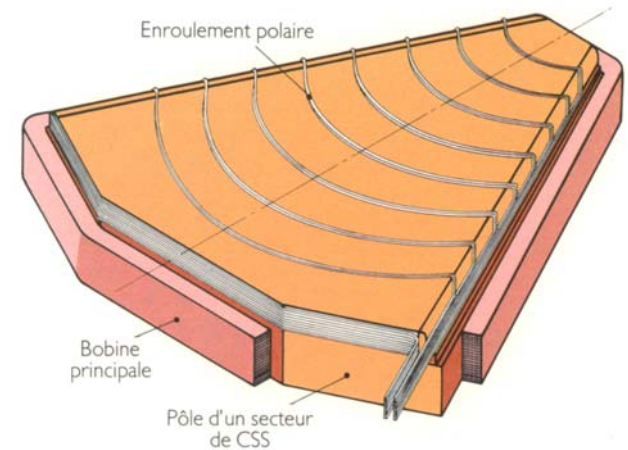


Schéma de principe de la disposition des enroulements polaires

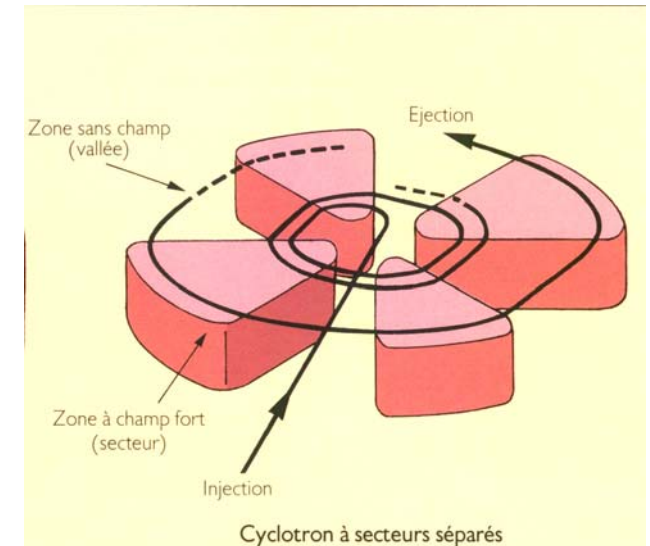
Secteurs séparés et nombre de secteurs

$$\frac{N_{sect}^2}{N_{sect}^2 - 1} Fl > k$$

$$Fl = \frac{(B_{col} - B_{val})^2}{8 \bar{B}^2}$$

➤ Pour augmenter le flutter Fl , on fait des **secteurs séparés** ($B_{val} = 0$). Petit inconvénient : les secteurs ne peuvent se rejoindre au centre, il y a un « cœur vide », et il faudra un autre accélérateur (injecteur) avec l'énergie adéquate pour se placer sur la première orbite.

➤ Si on vise une énergie très élevée, k augmente, et il serait souhaitable d'avoir N le plus petit possible. Mais pour des raisons de stabilité radiale, il faut au contraire augmenter N .



Vallées profondes, cryogénie et secteurs spiralés

• Pour un cyclotron compact, on peut faire des secteurs très hauts et des vallées très profondes :

Exemple : cyclotron 235 MeV protons d'IBA ($B_{max} = 2,15\text{ T}$):

-gap vallée = 60 cm

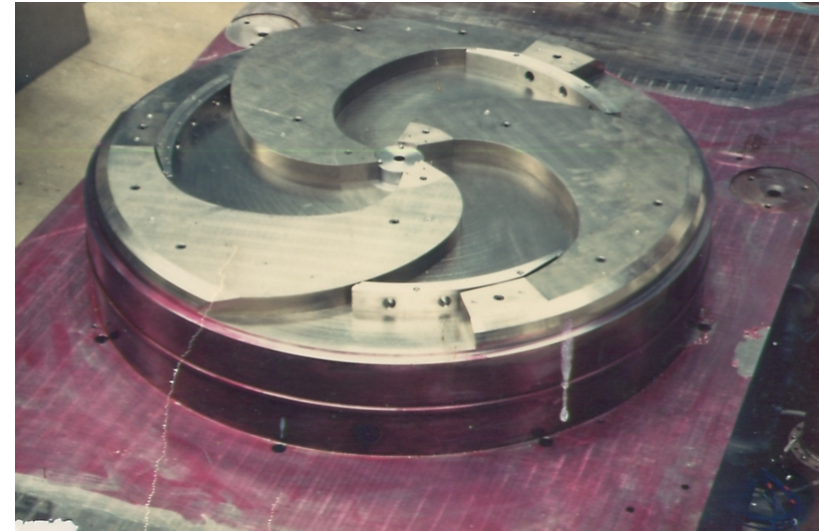
-gap colline = 10 cm au centre, 9 mm à r_{max}

- De plus, si les bobines sont supraconductrices (K 1200 MSU), le champ moyen peut monter à 5,2 T:

- gap colline = 8 cm

-gap vallée = 91 cm

- Enfin, on peut spiraler les secteurs, ce qui ajoute encore de la focalisation

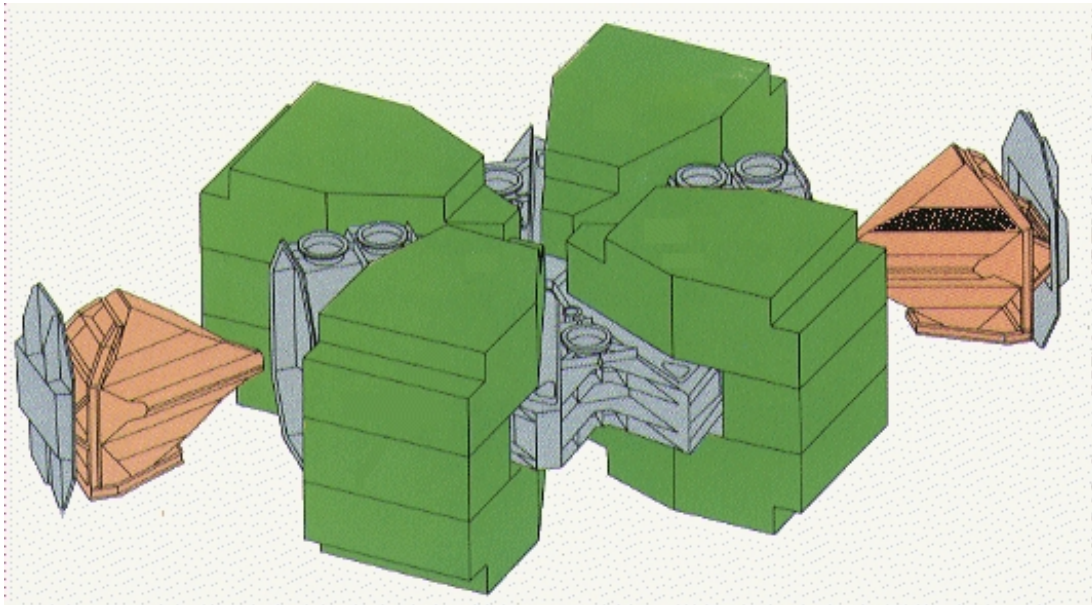


Secteurs spiralés des C0 du GANIL

gap vallée = 30 cm

gap colline = 21 cm

Éléments essentiels d'un cyclotron à secteurs séparés (CSS)



Un des deux CSS de GANIL

4 secteurs magnétiques (droits) de 52° , chacun pesant 400 tonnes

2 cavités HF (240 kV max) dans deux vallées opposées

chambre à vide 40 m³, 60 tonnes

rayon d'éjection 3 m

L'énergie des faisceaux de cyclotrons

Energie cinétique (non relativiste) : $T = \frac{1}{2} m v^2$ avec $v = \frac{Q B r}{m}$

$$T = \frac{(Q B r)^2}{2 m}$$

Définition : $W = \frac{T}{A}$ (MeV /nucléon) , A = nombre de masse de l'ion

$$W \text{ (MeV /n)} = 48.244 \left\{ \frac{Q B r}{A} \right\}^2$$

si relativiste :

$$W \text{ (MeV /n)} = \frac{96,488}{1+\gamma} \left\{ \frac{Q B r}{A} \right\}^2$$

L'énergie des faisceaux de cyclotrons (suite)

$$W (\text{MeV} / n) = 48,244 \left\{ \frac{Q B r}{A} \right\}^2$$

- Remarque 1 : énergie $\sim Q^2$: il est économique d'avoir la source la plus efficace possible et, si on ne peut pas éplucher complètement l'atome, le faire entre deux accélérateurs avec un *éplucheur*. (appendice III)

- remarque 2 : l'énergie est $\sim r^2$. Donc, faire le rayon du pôle le plus grand possible, mais **le volume du fer de la culasse augmente comme r^3 !**

- \rightarrow au maximum $r_{ej} =$ environ 2 m.

- remarque 3 : l'énergie est $\sim B^2$:

- avec des *bobines « chaudes »* , $B_{\max} = 2$ T pour un cyclotron compact

et $B_{\max} = 0,9$ T pour un CSS

-avec des *bobines supra* : $B_{\max} = 5$ T, mais alors $r_{ej} = 1$ m

$$K = 48,244 \left(B_{\max} r_{ej} \right)^2$$

Energie variable et domaine d'énergie des cyclotrons

➤ Si , pour un même élément de masse m , on veut avoir des énergies différentes à la sortie d'un cyclotron:

$$T = \frac{(Q B r)^2}{2 m} \qquad F_{HF} = \frac{1}{2\pi} \frac{Q B}{m}$$

- on peut changer la charge Q à condition d'ajuster le champ B pour rester à fréquence constante

- changer le champ B en ajustant la fréquence HF, donc avoir un oscillateur à fréquence variable

➤ Le cyclotron ne permet pas d'aller au-delà de ~ 150 Mev/nucléon pour les ions lourds (exception : probablement 400 MeV/nucléon avec un cyclotron supraconducteur) et ~ 250 MeV pour les protons.

Deux limites : focalisation verticale et volume de fer.

Alors , le synchrotron ?

Le synchrotron

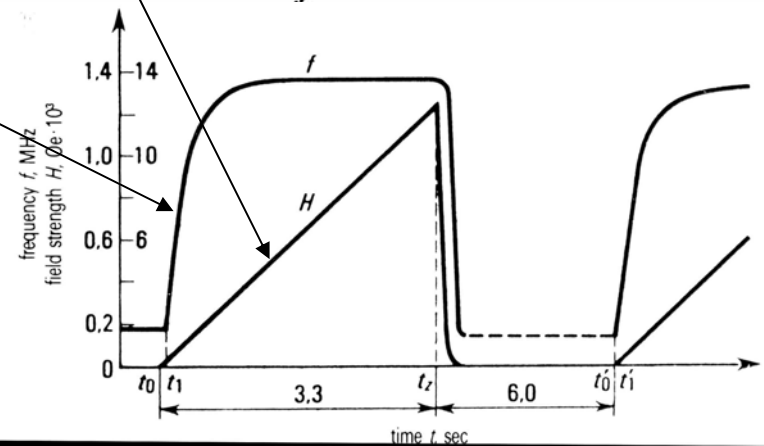
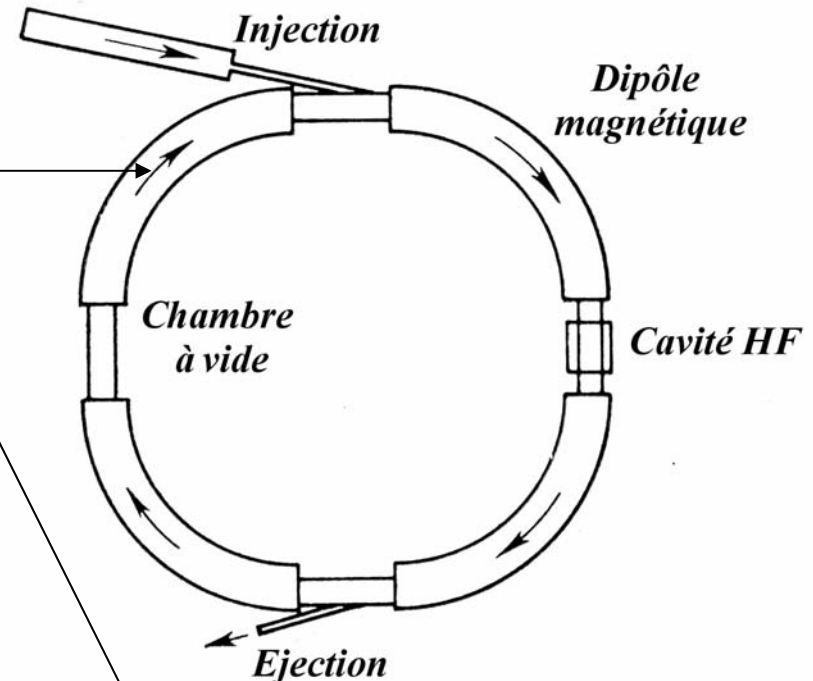
Principe:

- Le rayon moyen R de la trajectoire reste fixe.
- C'est le champ magnétique qui croît en même temps que le moment $p = mv = qBR$ de l'ion.
- La fréquence HF, synchrone de la fréquence de rotation, doit augmenter aussi puisque la vitesse augmente alors que le rayon reste fixe : $\omega = v / r$

Le rayon moyen R est différent du rayon de courbure local ρ .

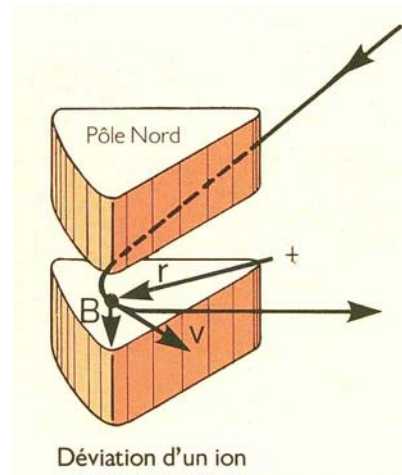
CERN PS : $R = 100$ m, $\rho = 70$ m.

Note : l'énergie est variable en ajustant le niveau de champ



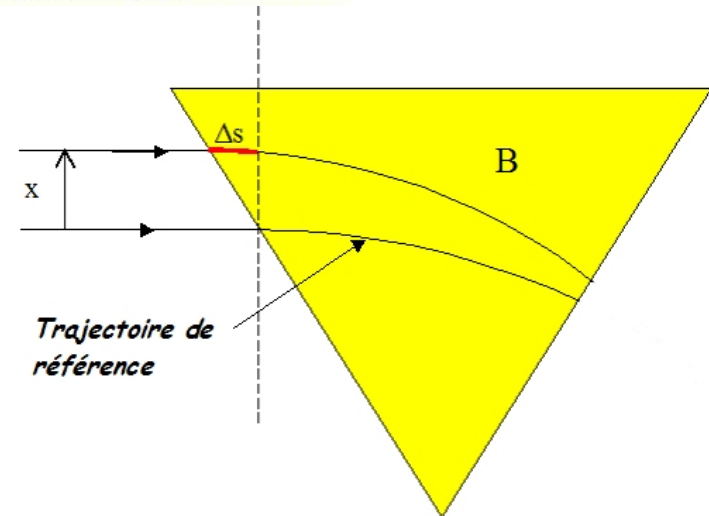
Synchrotrons à focalisation faible (1)

Un aimant,
ça courbe la trajectoire



Mais à l'entrée ou à la sortie, ça peut focaliser aussi :

le ZGS (**Zéro Gradient Synchrotron d'Argonne**) de 12,5 GeV était constitué uniquement de dipôles à pôles parallèles avec des faces inclinées.



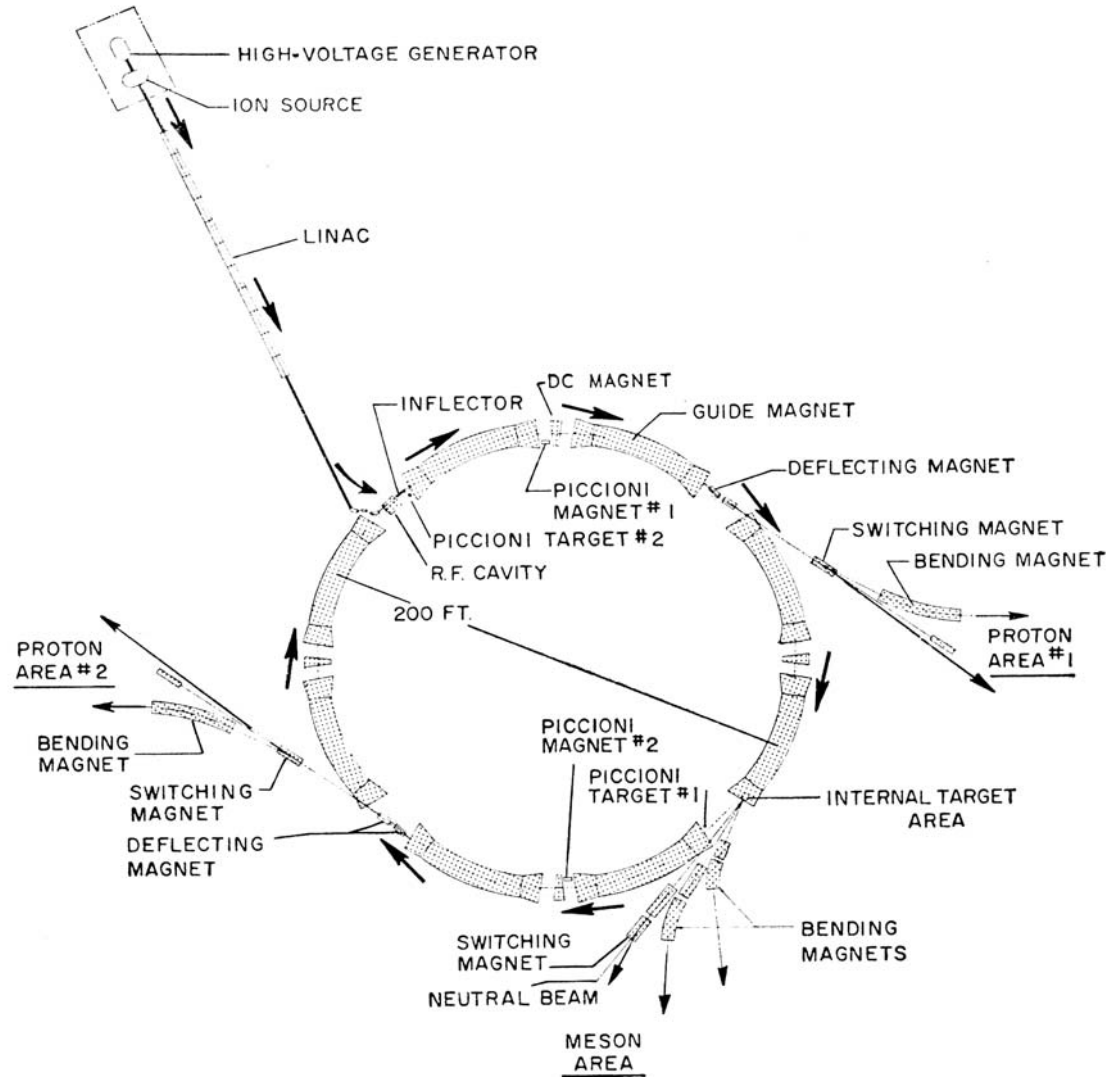
Le ZGS (Zero Gradient synchrotron)

Argonne 1963

12 Gev protons

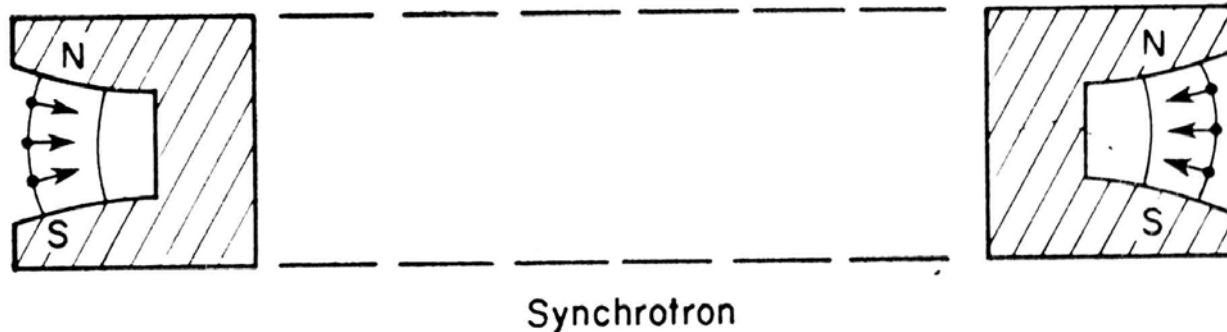
Circonférence 169 m

Mais c'est une focalisation faible, d'où grande amplitude transverse du faisceau, d'où section de la chambre à vide = 85×13.3 cm



Les synchrotrons à focalisation faible (2)

Autre solution: si on introduit un indice de champ dans les dipôles (comme dans les vieux cyclotrons) , on a une focalisation radiale et verticale ...



... à condition que l'indice $k = - (r/B) dB/dr$ soit faible, sinon, l'un des deux plans est défocalisant. Indice de champ faible dit focalisation faible, donc à nouveau dimensions transverses du faisceau grandes.

Conséquences : chambre à vide de très grand diamètre et aimants de très grand entrefer, donc chers.

Quelques synchrotrons à focalisation faible

	<i>Birmingham</i>	<i>Saclay Saturne I</i>	<i>Brookhaven Cosmotron</i>	<i>Berkeley Bevatron</i>	<i>Dubna synchrophasotron</i>
<i>Energie (GeV)</i>	<i>1</i>	<i>2,94</i>	<i>3</i>	<i>6,4</i>	<i>10</i>
<i>Rayon moyen (m)</i>	<i>4,5</i>	<i>11</i>	<i>10,7</i>	<i>18,2</i>	<i>30,5</i>
<i>Section chambre (cm²)</i>	<i>50 x 21</i>	<i>60 x 10</i>	<i>91 x 22</i>	<i>122 x 30</i>	<i>150 x 40</i>
<i>Démarrage</i>	<i>1953</i>	<i>1958</i>	<i>1952</i>	<i>1954</i>	<i>1957</i>

Le synchrotron à focalisation forte (Christophilos 1950; Courant, Livingston & Snyder 1952)

Petit rappel d'optique classique:

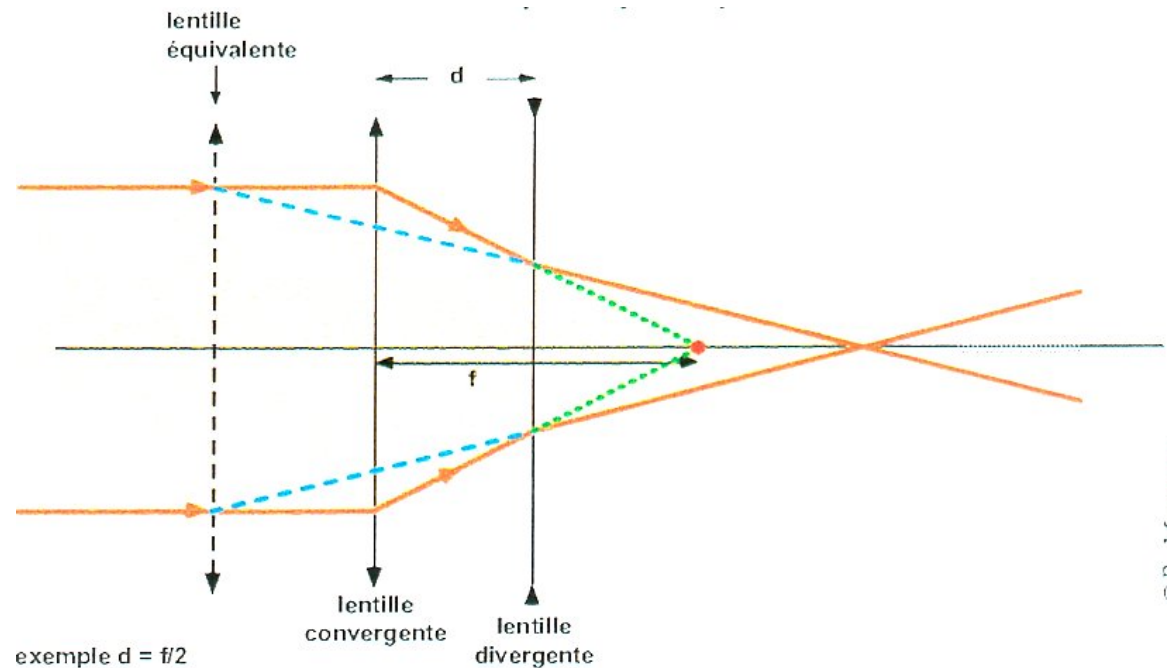
deux lentilles , l'une convergente et l'autre divergente, séparées par une distance d , donnent un ensemble convergent.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Avec :

$$f_1 = -f_2$$

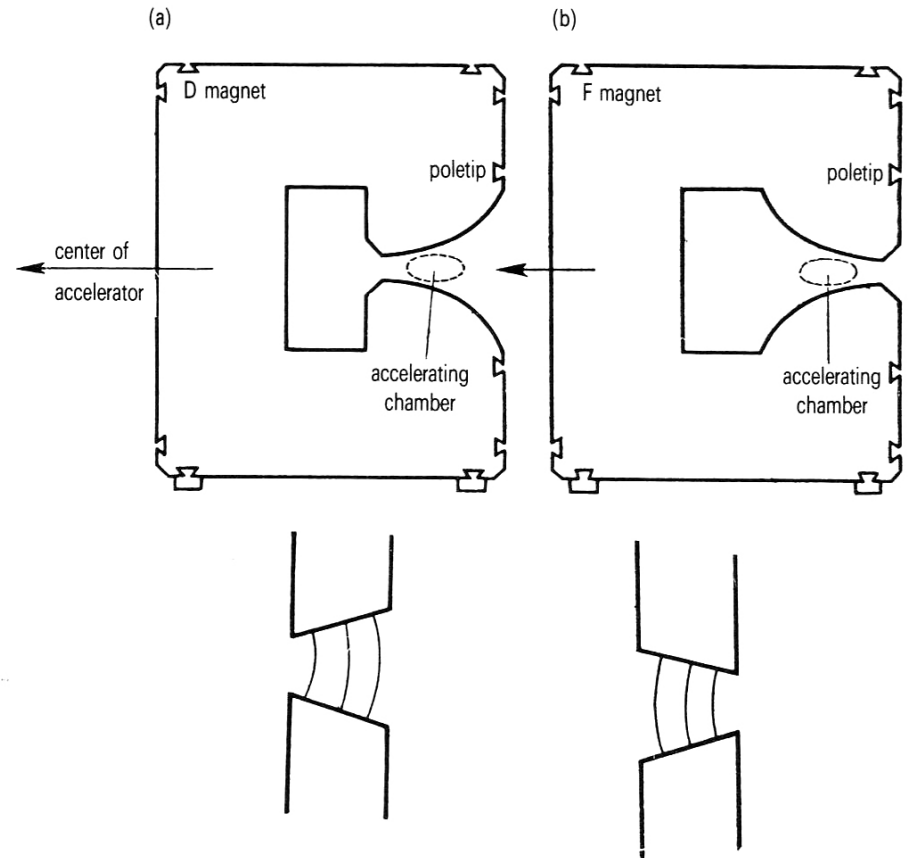
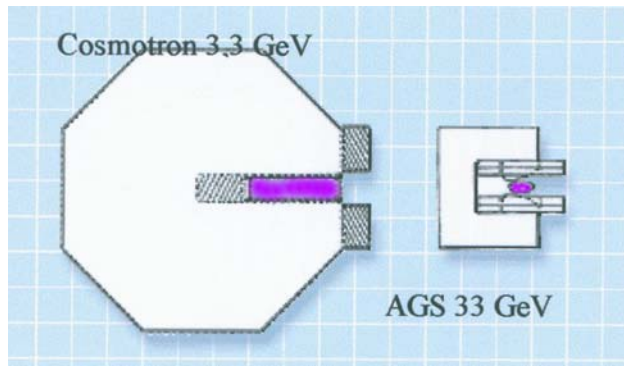
$$F = \frac{f^2}{d} > 0$$



© B. Mazoyer

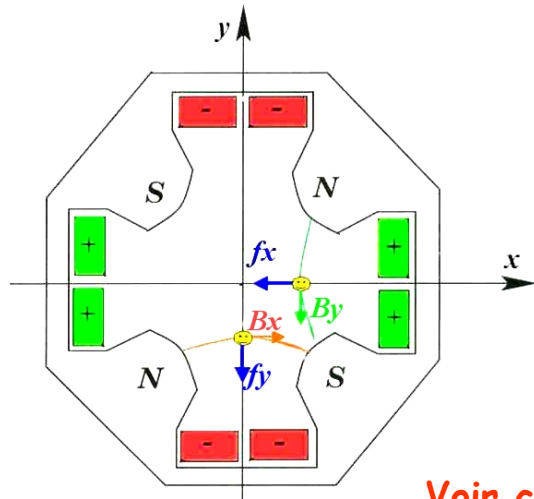
Le synchrotron à focalisation forte (gradients alternés)

- On combine la courbure et la focalisation
 - Les dipôles sont façonnés pour donner de forts gradients, alternativement positifs et négatifs
 - L'ensemble est focalisant dans les 2 plans (radial et vertical) et les v_r , v_z ont des valeurs élevées
- > dimensions de faisceau petites (cf. le cyclotron)



Le synchrotron à focalisation forte (fonctions séparées)

L'anneau est constitué d'une succession de dipôles (BM) qui donnent la courbure, et de quadrupôles qui assurent la focalisation horizontale (QF) et verticale (QD).



Un quadrupôle est focalisant dans un plan (ici, x) et défocalisant dans l'autre (ici y)

Voir cours J-M de Conto



On focalise dans les 2 directions en alternant les QD et les QF

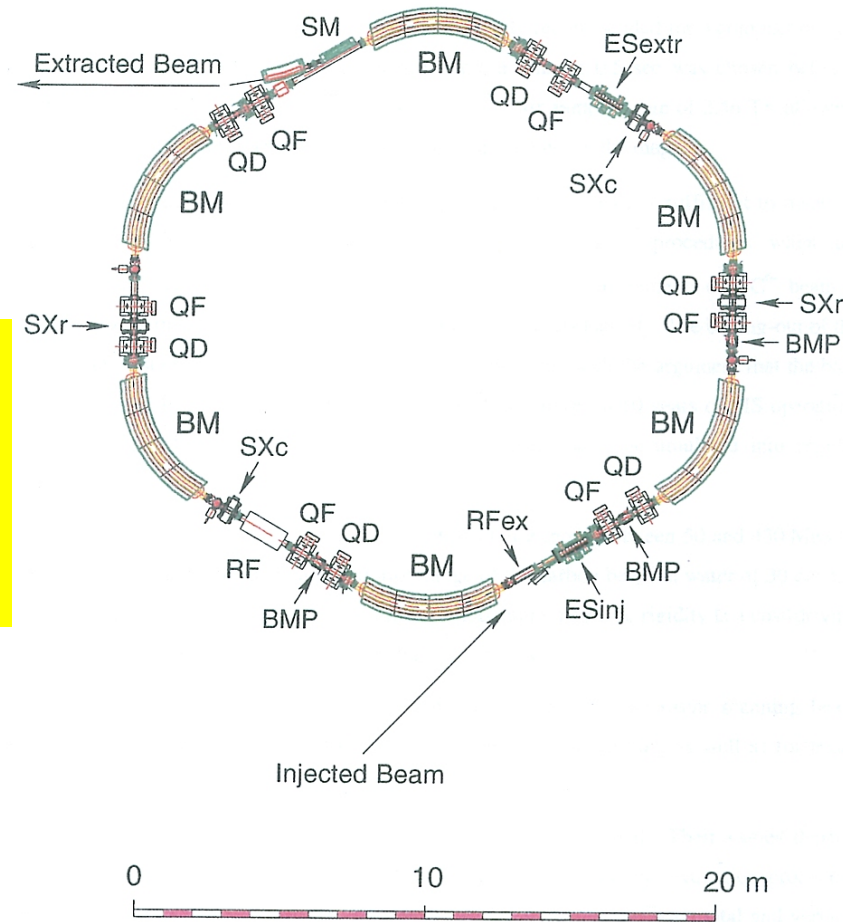


Schéma du projet de synchrotron médical de Heidelberg

Exemple: le Super Proton Synchrotron (SPS) du CERN

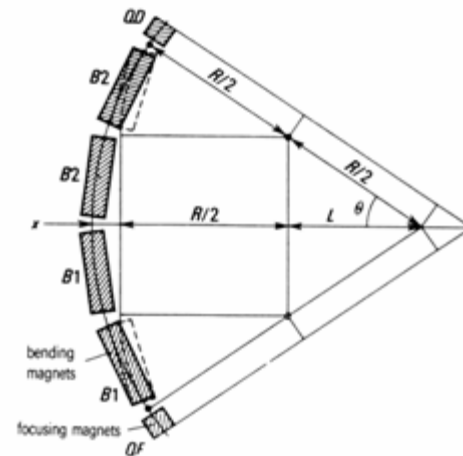
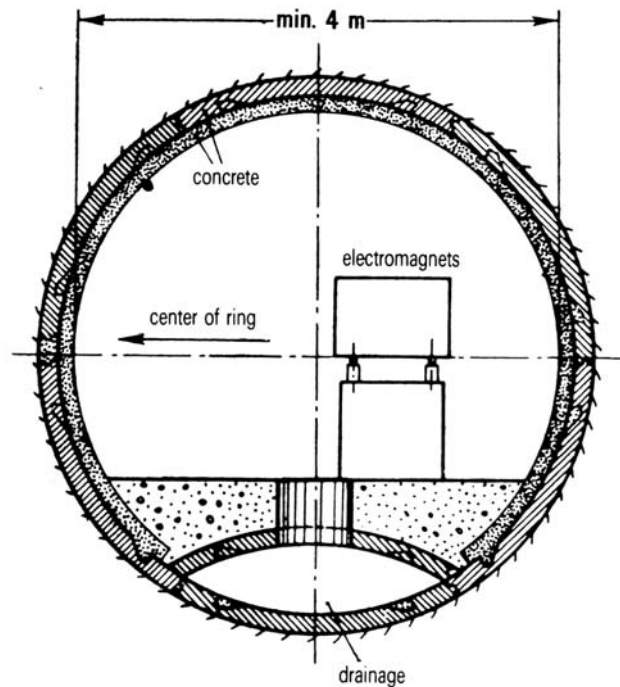
450 GeV protons

158 GeV/nucléon ions Pb

$2\pi R = 6,9$ Km

744 dipôles, 216 aimants de focalisation

Section de la chambre à vide : 10 x 5 cm



Cours n°3

- **Pour en finir avec les « machines rondes »**
- **Aperçu sur les collisionneurs circulaires**
- **Aperçus sur les accélérateurs linéaires**
- **Quelques accélérateurs « exotiques »**

Peut-on accélérer des électrons avec un synchrotron ?

- Bien sûr, et c'est d'autant plus facile si l'énergie d'injection est de plusieurs MeV: alors, $v \sim c$, et la gamme de variation de la fréquence HF est très étroite, et même peut rester fixe, puisque la vitesse est fixe (presque).
- MAIS, quand $\beta = v/c \sim 1$, chaque électron perd de l'énergie par rayonnement (émission d'un photon) à chaque virage.
- On saura s'en servir dans les anneaux de lumière
- Puissance rayonnée par un électron dans un virage de rayon r :

$$P \propto \frac{\gamma^4 \beta^4}{r^2} \quad \left(\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right)$$

Le rayonnement synchrotron limite l'énergie communicable aux électrons :

Comparaison (CERN) :

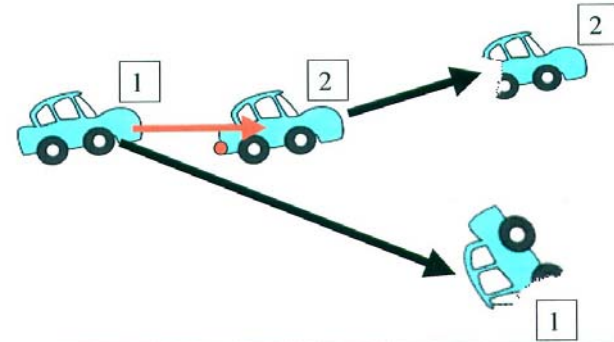
☆ LEP :	$E_e = 108 \text{ GeV}$	$r = 3\,096 \text{ m}$	$P = 61 \text{ TeV/s}$ par électron
☆ LHC :	$E_p = 7\,000 \text{ GeV}$	$r = 2\,778 \text{ m}$	$P = 0,31 \text{ eV/s}$ par proton

Les collisionneurs circulaires

La collision frontale donne des meilleurs résultats que la collision sur une cible fixe

Pourquoi ?

➤ *Dans la collision entre une particule rapide et une particule fixe, une grande partie de l'énergie est dépensée inutilement dans le mouvement de recul de l'ensemble de ces deux particules.*



Projectile contre cible fixe :
que d'énergie perdue, emportée par les deux partenaires de la collision !



Choc frontal :
Toute l'énergie cinétique est utilisée dans l'encastrement.

Collisionneurs (1)

➤ Principe: amener en **collision frontale** deux faisceaux de particules.

➤ Exemples : $p \bar{p}$ 2 x 315 GeV (SPS, CERN), 2 x 900 GeV (Fermilab)

: $e^+ e^-$ 2 x 50 GeV (LEP I)

➤ *Exemple* : dans le cas $p p$ - du CERN, l'énergie disponible dans le système du centre de masse est de 630 GeV. Pour parvenir au même résultat avec une cible fixe, il faudrait un synchrotron de 212 TeV (champ moyen 8 T, diamètre 175 km)

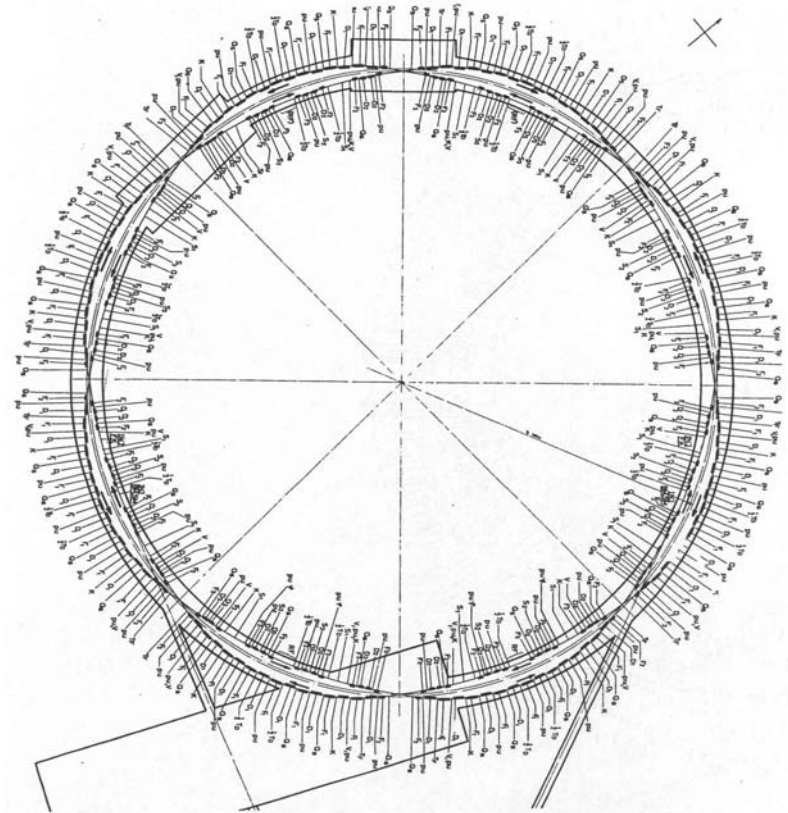
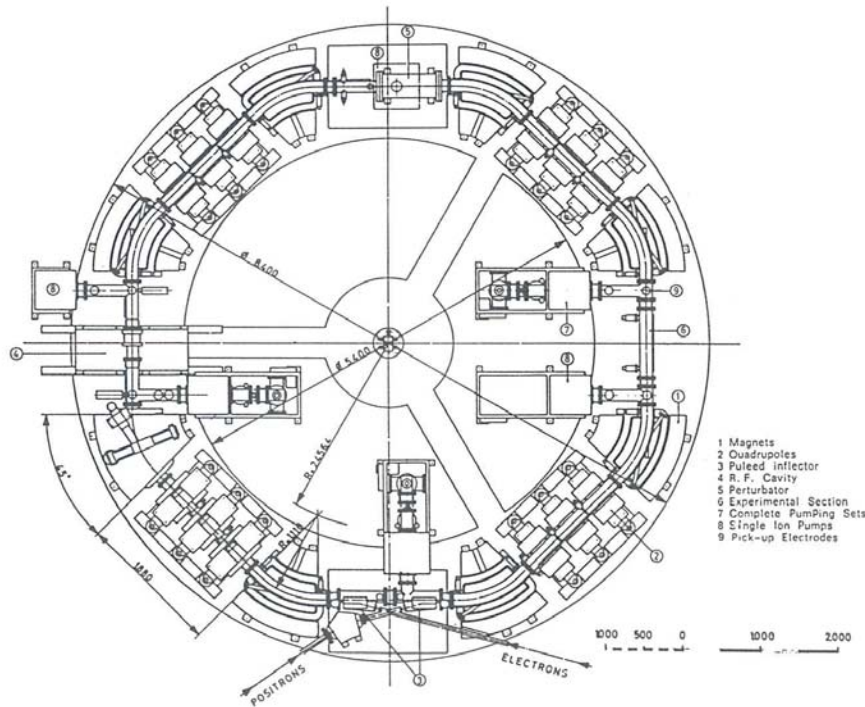
➤ MAIS:

densité cible très faible : nécessité d'une luminosité élevée et croisements répétitifs

faible nombre de points d'interaction

nature de la cible unique dans le cas d'un anneau unique

Collisionneurs (2)



*ACO : Anneau de collisions
d'Orsay. $e^+ - e^-$*

(rayon ~ 3,5 m)

*Anneaux d'intersection proton-proton du
CERN (rayon 100 m)*

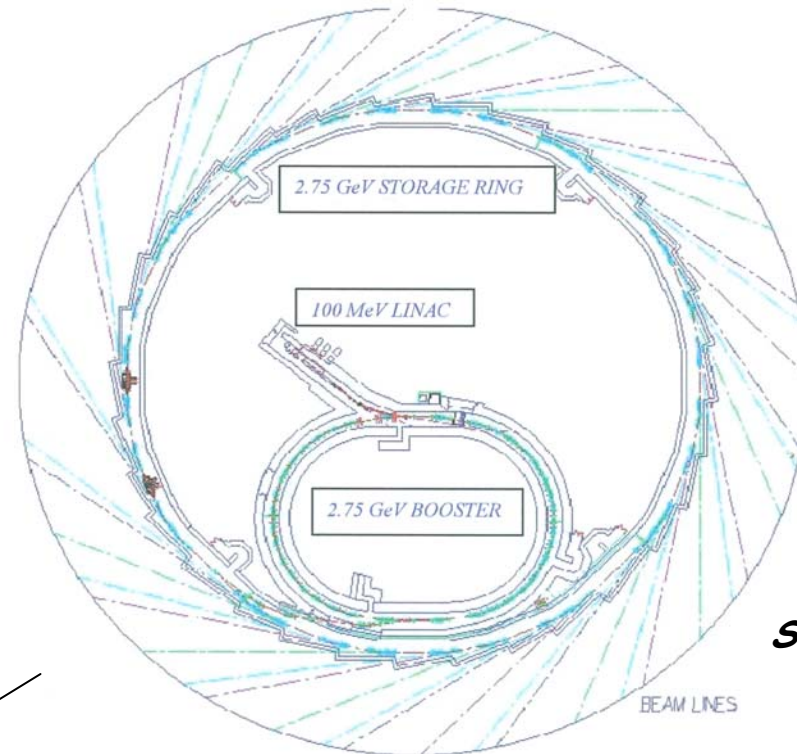
*Ici, les deux faisceaux étant identiques et de
même charge, on est obligé de les faire circuler
dans deux anneaux entrelacés*

Un accélérateur qui n'en est pas tout-à fait un : Le synchrotron comme source de rayonnement

Les faisceaux d'électrons sont aussi utilisés comme source de rayonnement X et ultraviolet.

Des anneaux spécifiques sont construits, dans lesquels on stocke de fortes intensités (qq ampères). Des dispositifs magnétiques: onduleurs et wigglers, donnent au faisceau une succession de courbures locales.

La lumière est alors émise par les électrons dans un cône très étroit, tangentiellement au faisceau.



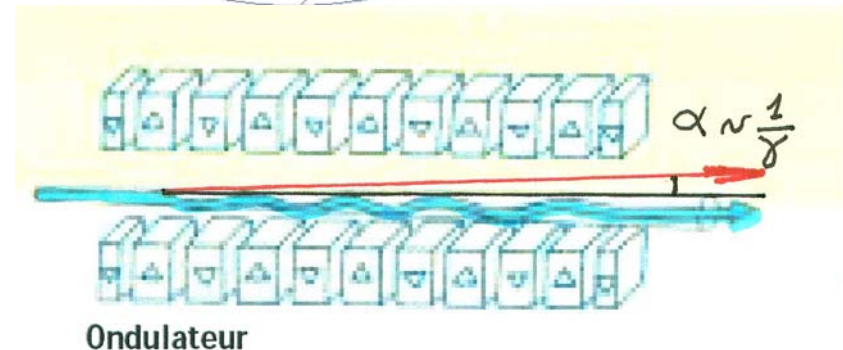
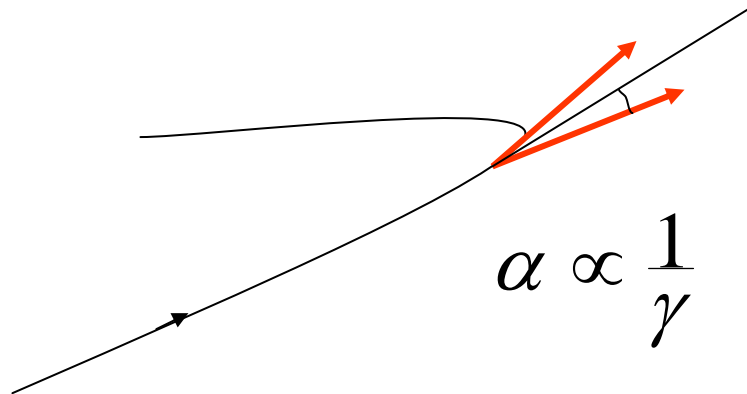
2 super periods
Circumference:
157 m

36 Dipoles : 0.67
T / 2.17 m

44 Qpoles:
10.3 T/m - 0.4 m

SOLEIL

BEAM LINES



On résume (Accélérateurs circulaires)

- L'accélération par impulsions successives, combinée à un champ magnétique, a permis de se libérer des limitations de l'accélération imposées par un champ électrique statique (dimensions, claquages).
- On a trouvé des moyens de focaliser le faisceau :
 - soit par un gradient faible (cyclotron, synchrocyclotron)
 - soit par des secteurs (cyclotrons, synchrotrons)
 - soit des quadrupôles (synchrotrons)
- Les grandes énergies (GeV, TeV) sont accessibles uniquement avec des anneaux et au prix d'une variation temporelle du champ magnétique et de la fréquence HF (synchrotrons).
- Les plus hautes énergies sont obtenues via des collisions frontales (collisionneurs)

Un linac selon Wideröe : Sloan et Lawrence (1931)

La tension $V=V_0\sin(2\pi t/\tau)$ est appliquée alternativement sur les tubes pairs et impairs.

Pour que l'accélération dans les intervalles soit synchrone de la HF (période $\tau = \text{constante}$), il faut que la longueur de chaque tube de glissement :

$$L = v \tau / 2$$

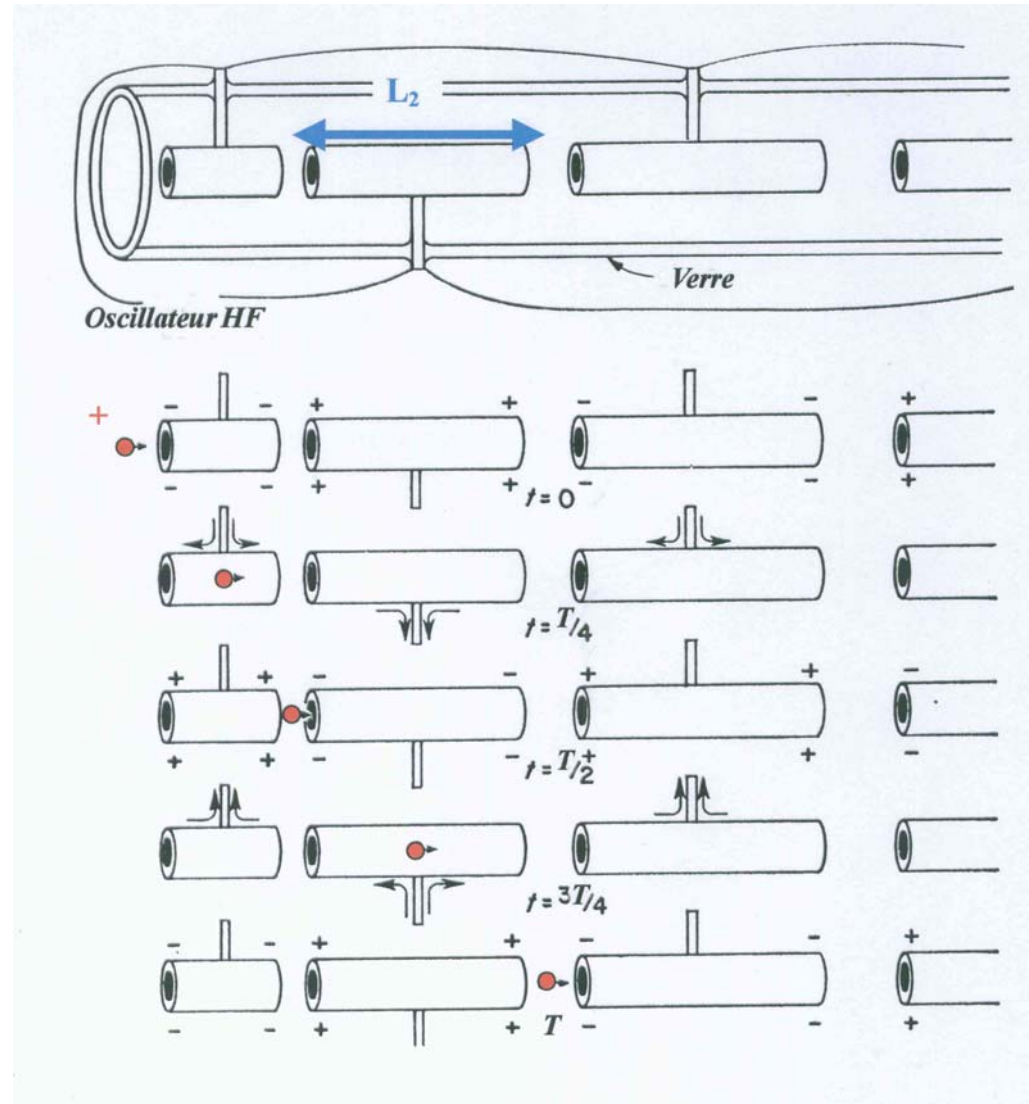
augmente comme la vitesse v .

L'énergie (MeV/n) finale est fixe.

Berkeley 1931 :

$V_0 = 42 \text{ kV}$, $F = 7 \text{ MHz}$, 30 tubes

→ ions Hg de 1,2 MeV



La structure de type Alvarez

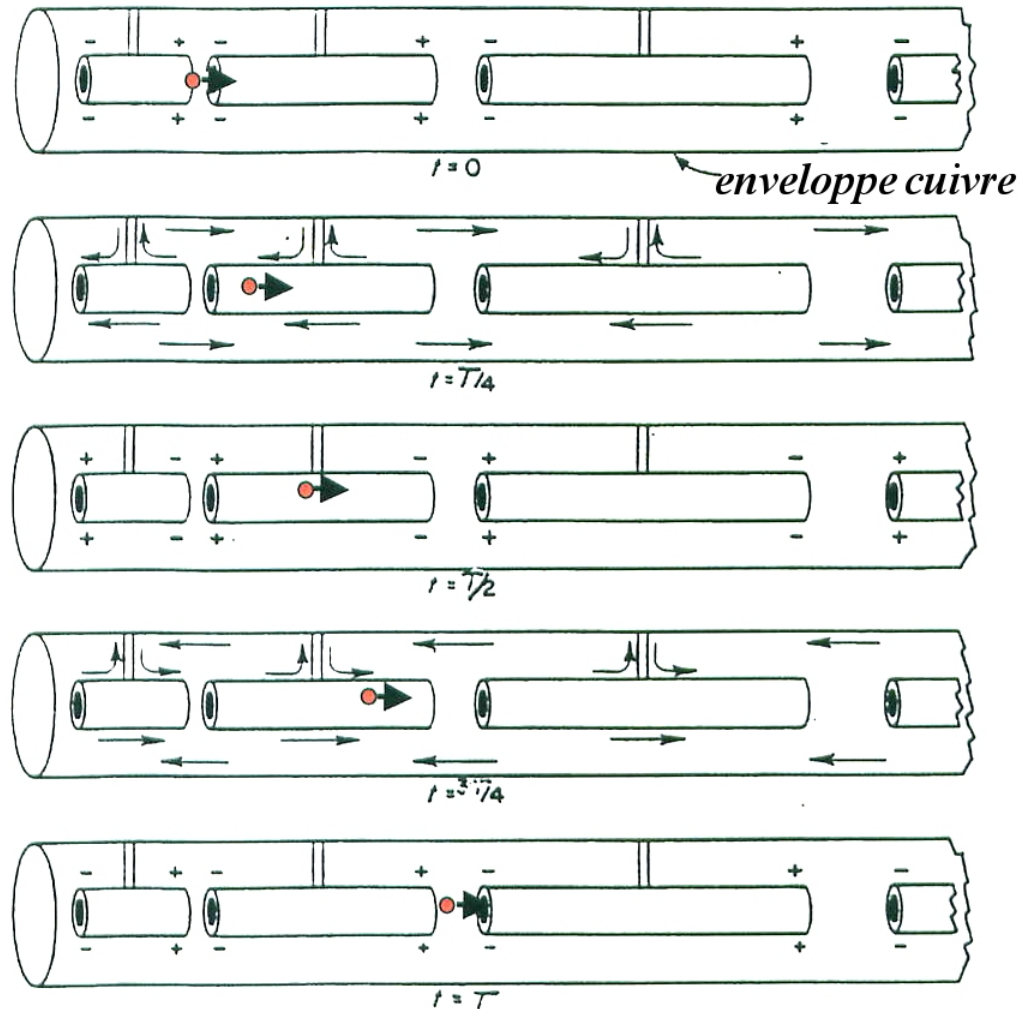
Pour le linéaire de Wideröe : les tubes VHF (~ 200 MHz) n'étaient pas au rendez-vous ! Ils apparaissent en 1945 (radar, et toutes ces sortes de choses...).

En passant de 7 à 200 MHz, on va pouvoir raccourcir les tubes.

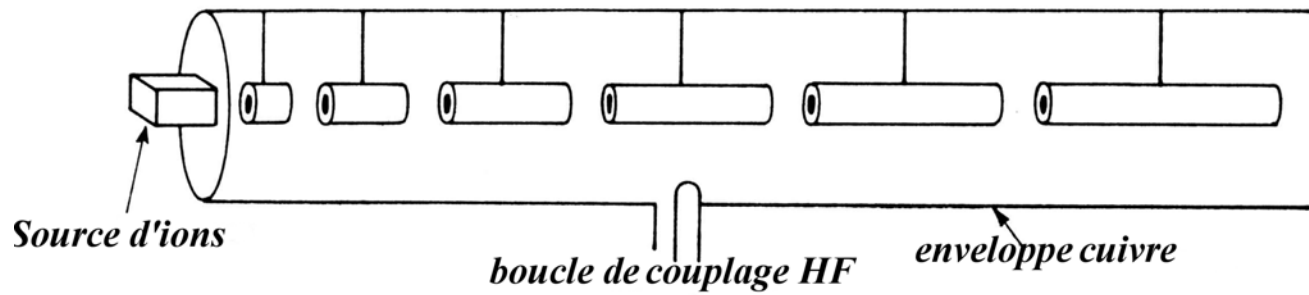
Dans le linac de type Alvarez, la longueur des tubes :

$$L = v \tau = \beta \lambda$$

Et l'énergie au bout du dernier tube est figée par la géométrie.

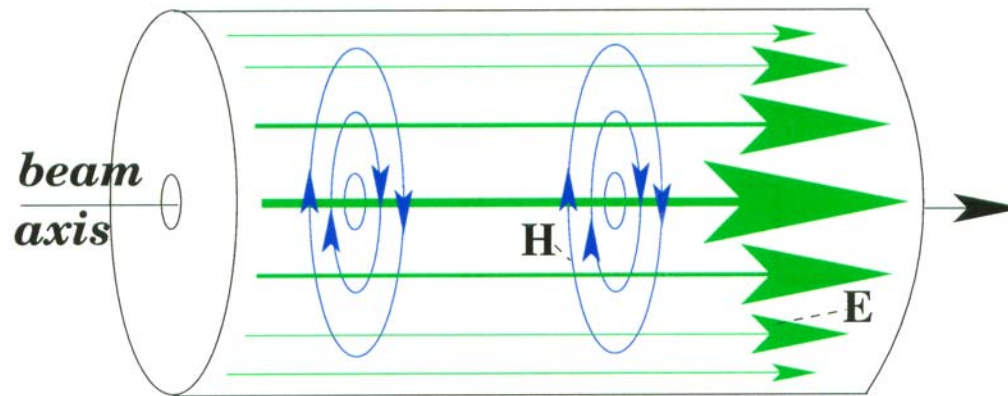


Structure Alvarez : cavité résonnante

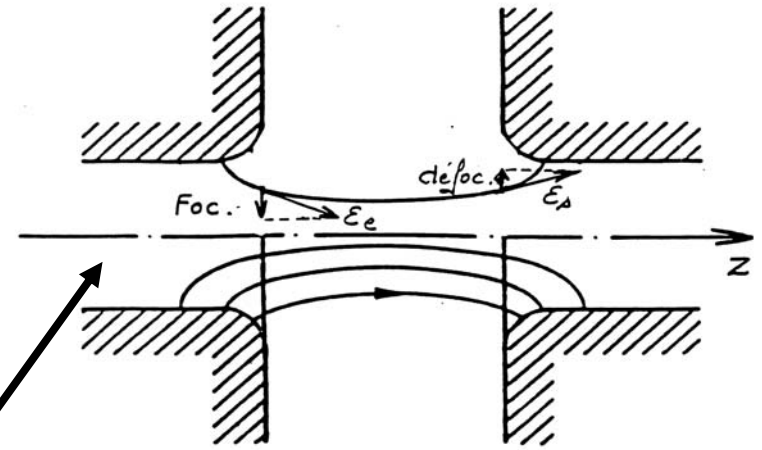
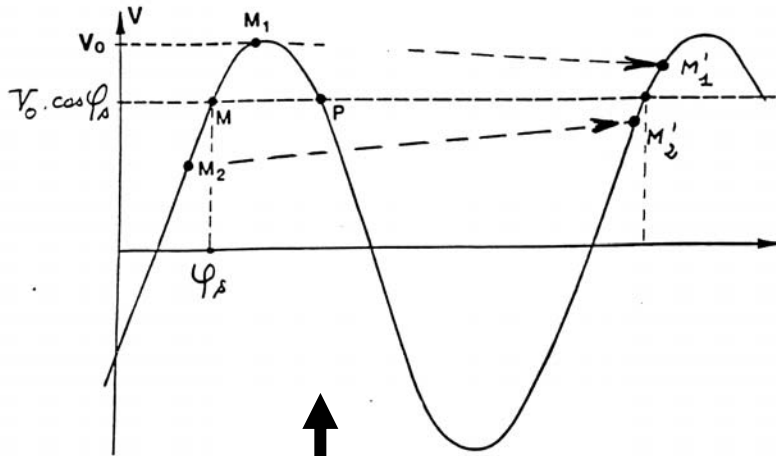


La cavité (métallique) oscille selon un mode Transverse Magnétique, c'est à dire que :

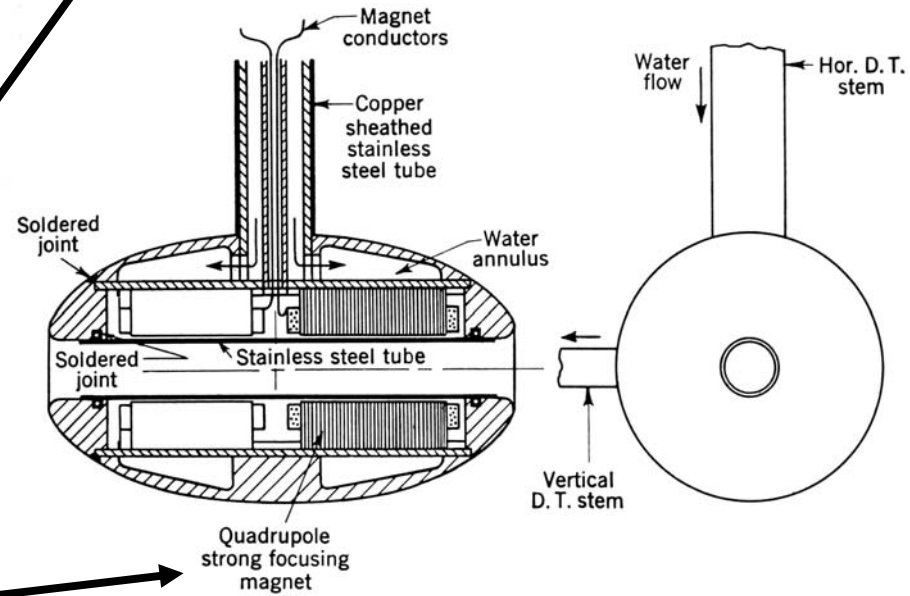
- la composante magnétique H est azimutale, nulle sur l'axe et max sur la paroi,
 - la composante électrique E est longitudinale, max sur l'axe et zéro sur la paroi.
- Les tubes ne servent que de blindage pour l'ion .



Structure Alvarez : accélération et focalisation



- Pour être stable en phase, le faisceau doit passer sur la partie montante de l'onde.
- Alors, l'ion est plus défocalisé en sortie qu'il n'est focalisé à l'entrée du gap.
- **Focalisation transverse et stabilité de phase sont incompatibles** : les accélérateurs linéaires ont besoin de focalisation dans le plan transverse (quadrupôles)



Accélérateurs linéaires pour protons et ions

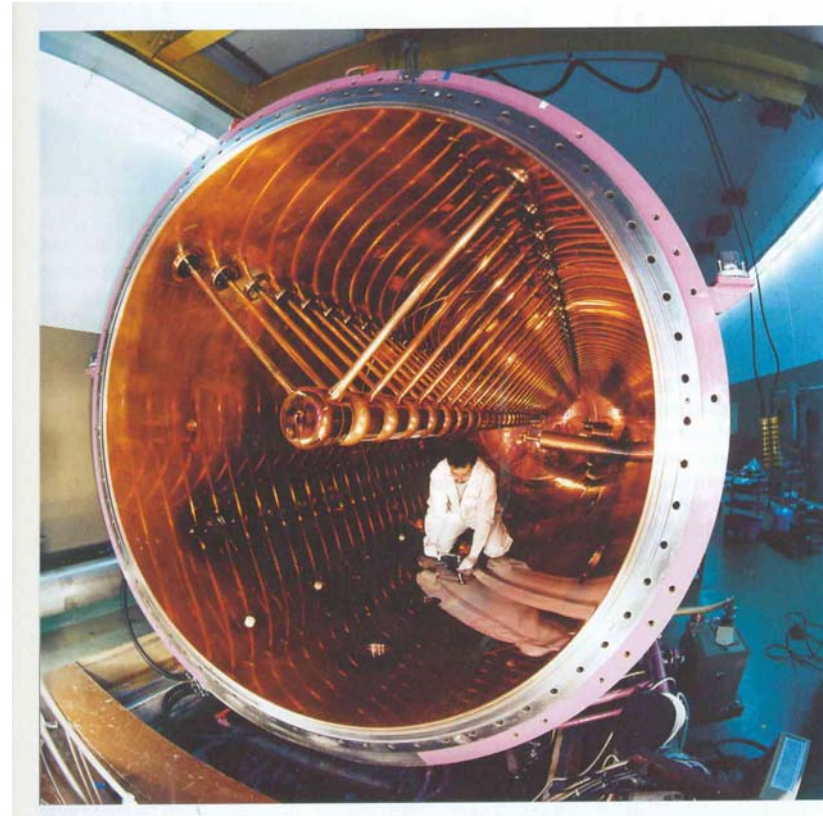
- *Nécessité d'un injecteur (souvent un Cocroft-Walton)*
- *Coût élevé du MeV par rapport aux accélérateurs circulaires*
- *Gamme d'énergie : de 20 à 200 MeV protons, de 1 à 10 MeV/n ions lourds*
- *Souvent utilisés comme injecteur pour des machines circulaires*

Exemple de structure Alvarez: linac de GSI pour ions lourds

Injecteur : Wideröe 1,4 MeV/n

Energie de sortie : ~ 11 MeV/n

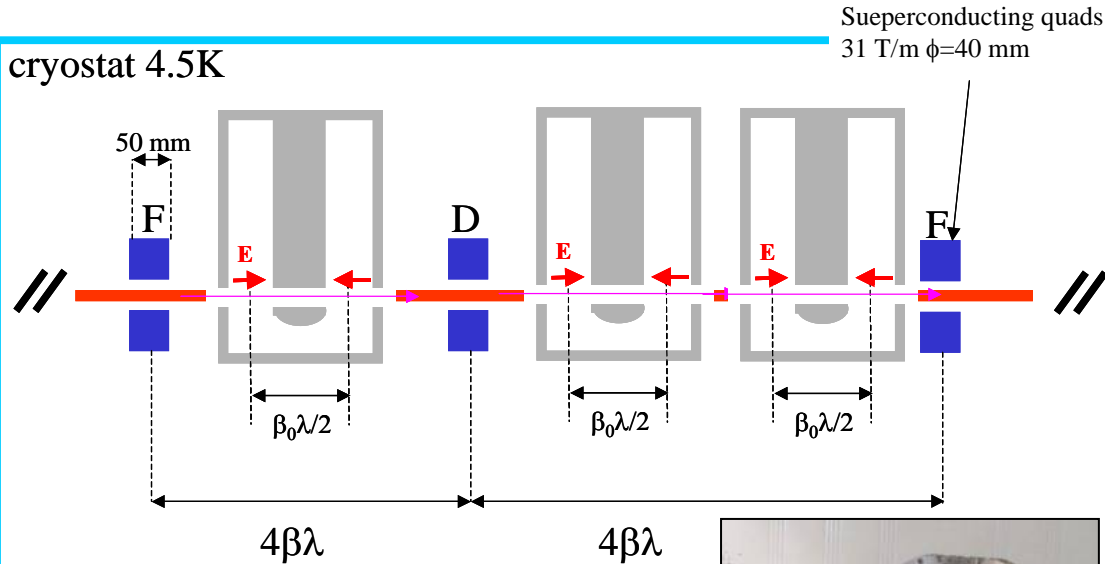
MAIS , la cryogénie entre en scène !



Accélérateurs linéaires supraconducteurs pour ions

Les accélérateurs linéaires souffrent d'un rendement très faible : une partie importante de l'énergie HF est perdue dans les parois. Cette perte est fortement réduite en rendant les parois supraconductrices.

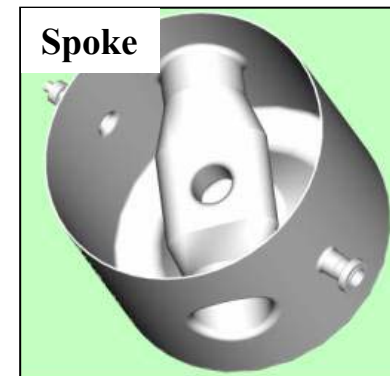
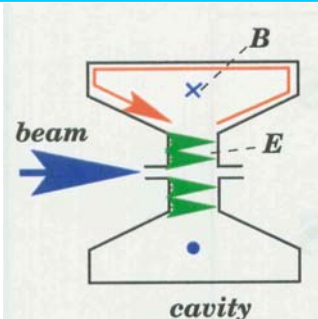
Par ailleurs, pour obtenir une flexibilité de l'énergie, on divise l'accélérateur en plusieurs cryostats, chacune contenant plusieurs éléments accélérateurs.



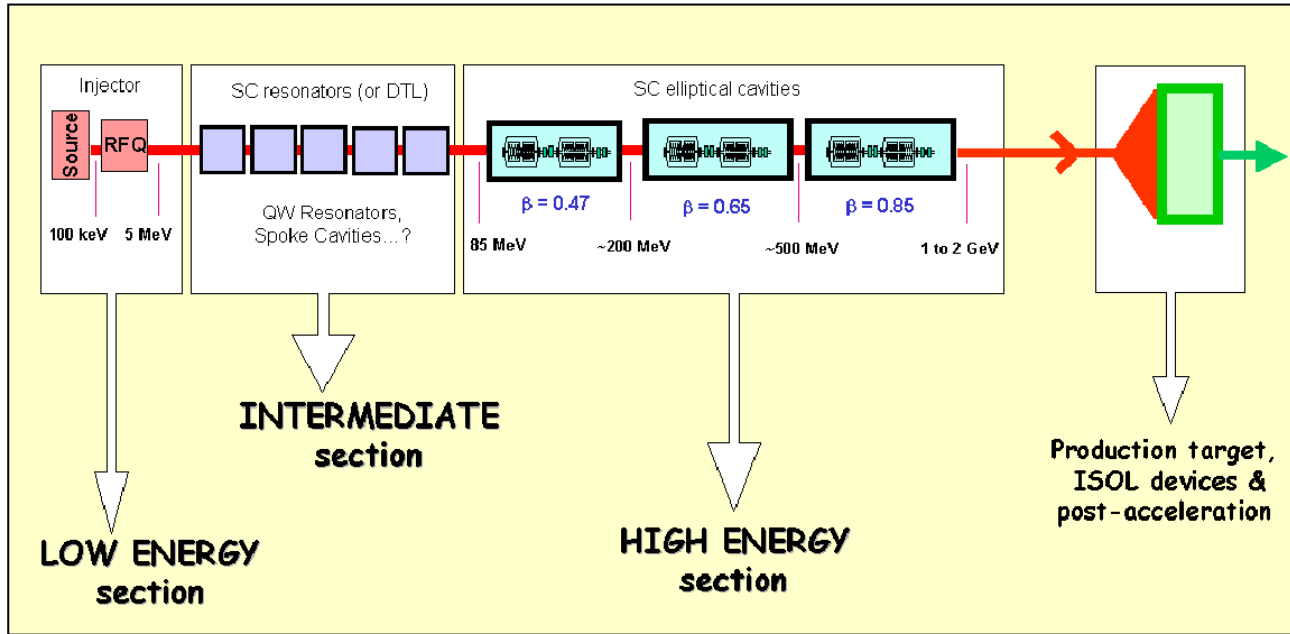
Linac supra-conducteur utilisant des cavités « QWR » pour le projet EURISOL

Etage énergie intermédiaire : 5 – 85 MeV protons

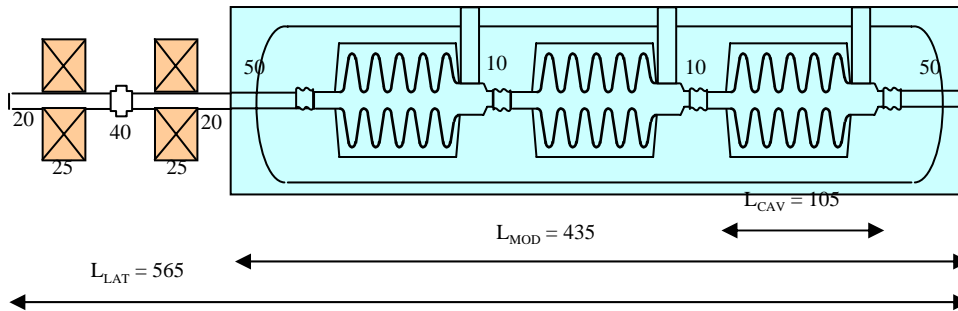
Quadrupôles supra conducteurs .



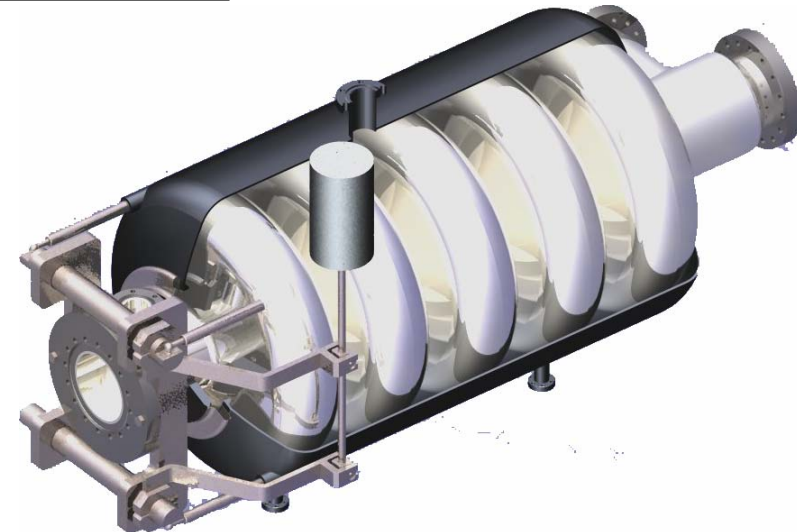
Accélérateurs linéaires supraconducteurs pour ions (2)



Projet de « driver »
pour EURISOL :
protons 1 GeV,
5 mA,
longueur ~ 270 m.



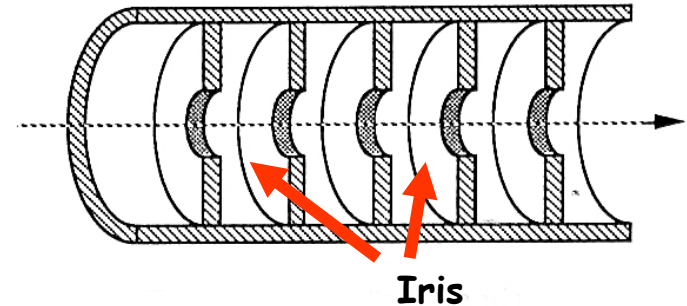
Un des 16 modules de la section
 $\beta = 0,65$ (192 à 481 MeV)



Accélérateurs linéaires d'électrons

- La vitesse de propagation de l'onde est ajustée à celle de l'électron : $\sim c$, par des iris équidistants.
- On établit dans le guide d'ondes une onde stationnaire, superposition de 2 ondes progressives circulant en sens inverse.
- L'électron est « porté » par l'onde progressive, l'onde inverse ayant une influence moyenne nulle sur l'énergie finale.
- Pas de tubes de glissement: on peut augmenter la fréquence (qq GHz), ce qui diminue les pertes par effet de peau.
- Energie finale obtenue dans un linac de longueur $L =$
- **Contrairement aux accélérateurs d'ions, on peut augmenter l'énergie finale en augmentant la valeur du champ.**
- Le gain linéique d'énergie peut atteindre 10 à 15 MeV/m (1 à 2 MeV/m pour les accélérateurs d'ions)

N.B. : On verra des exemples de « petits » accélérateurs linéaires d'électrons plus loin, à propos de radiothérapie.



$$eLE_0$$

où E_0 est la valeur-crête du champ

Exemple : le SLAC (Stanford)

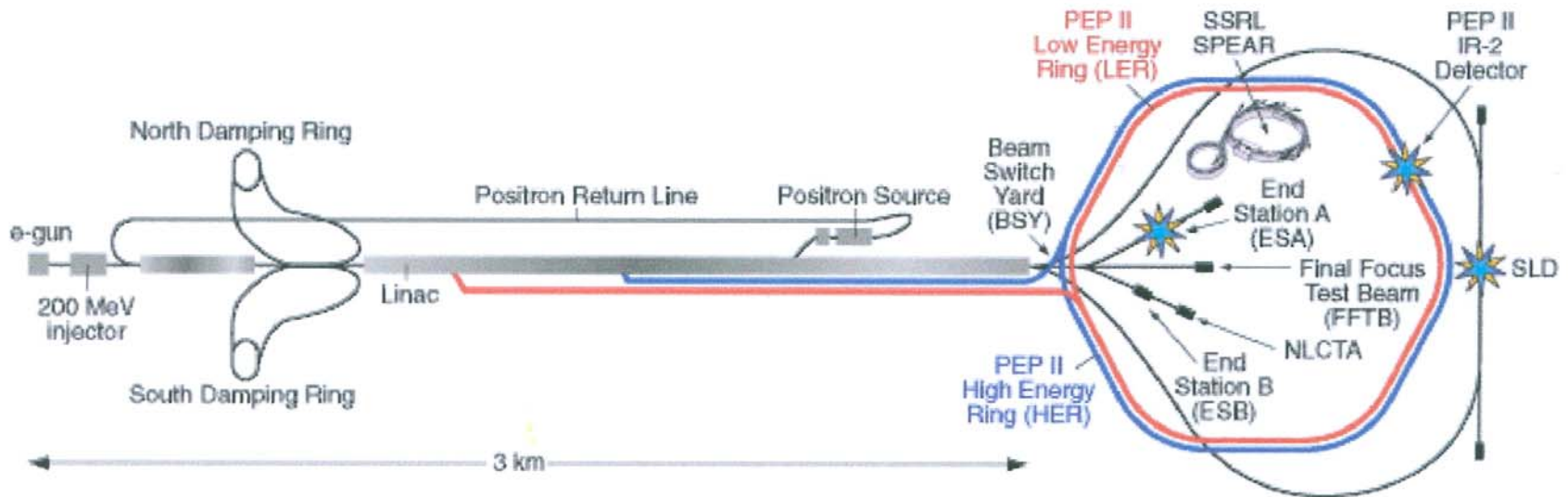
De 32 MeV à 32 GeV

Longueur 3,2 km

$F = 3,86$ GHz

Gain = 10 MeV/m

Le SLAC est aussi un exemple de collisionneur linéaire



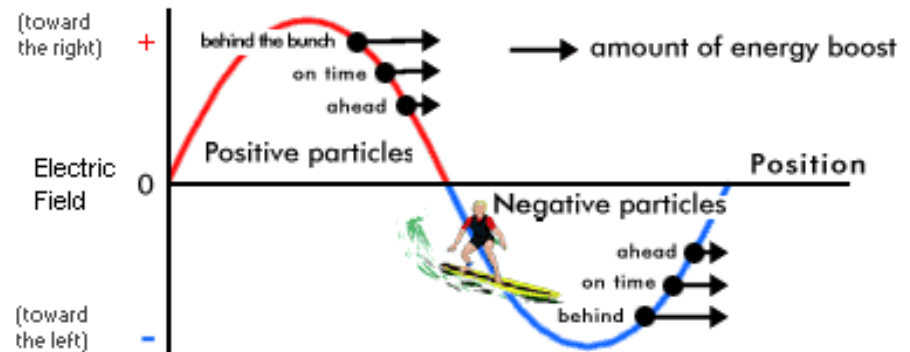
Stanford Linear Accelerator (SLAC)

Energie 50 GeV pour e^+ et e^- .

Après « refroidissement » dans deux petits anneaux (but : diminuer la section des faisceaux), les faisceaux sont accélérés, puis séparés dans deux longs arcs pour rejoindre le point de collision unique.

Rayon du faisceau au point d'interaction:

2 μm !



Les accélérateurs « exotiques »



Le bêtatron

➤ (Slepian 1922, Wideröe 1928, Kerst 1940).

➤ **Bêtatron (électrons seulement)** : le seul accélérateur n'utilisant pas de source de potentiel propre: la variation du flux de champ magnétique vertical induit un champ électrique azimuthal E_{θ} ...

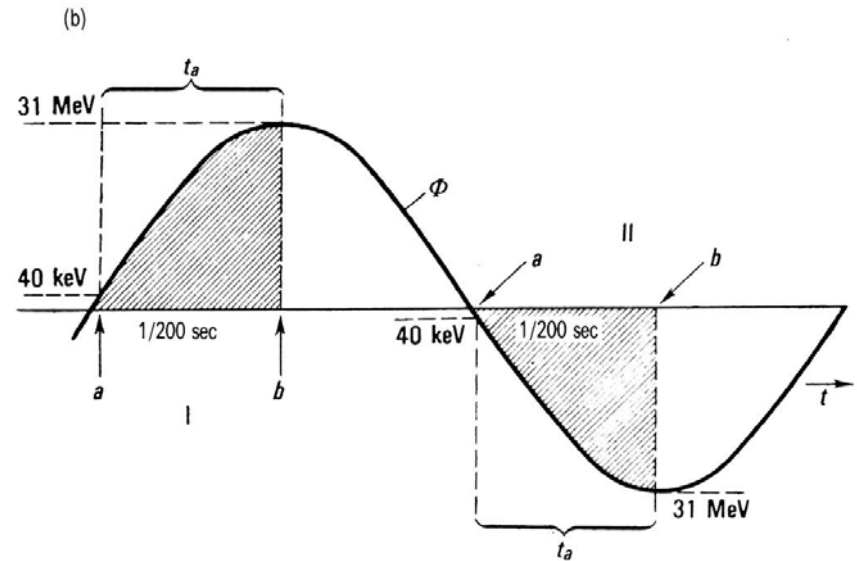
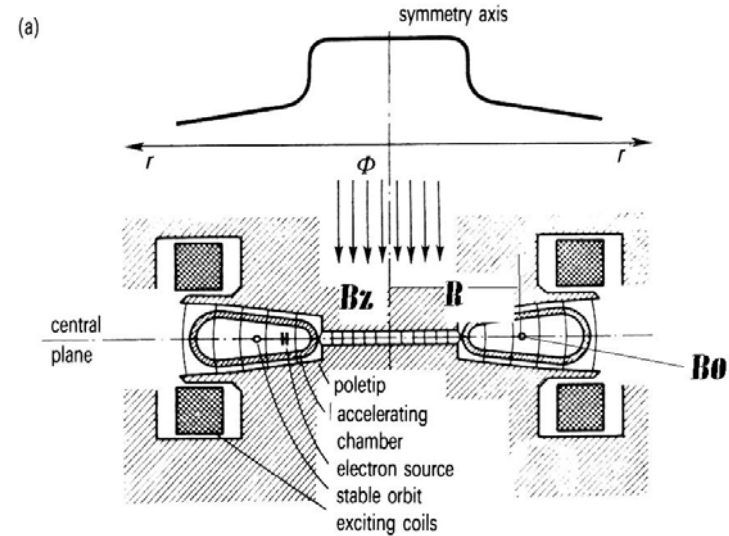
➤ Condition pour que le rayon R des trajectoires soit constant au cours de l'accélération : $B_0 = B_z/2$.

➤ Injection 50 à 100 keV, $E_{max} \sim 30$ MeV (typique).

➤ Parcours $\sim 1\,500$ km, gain d'énergie par tour ~ 31 eV, 10^6 tours en ~ 5 ms.

➤ En fin d'accélération, on diminue le champ et le faisceau percute une cible avec production de rayons X (**radiothérapie, radiographie**)

➤ $E_{record} = 340$ MeV (Kerst, 1952)



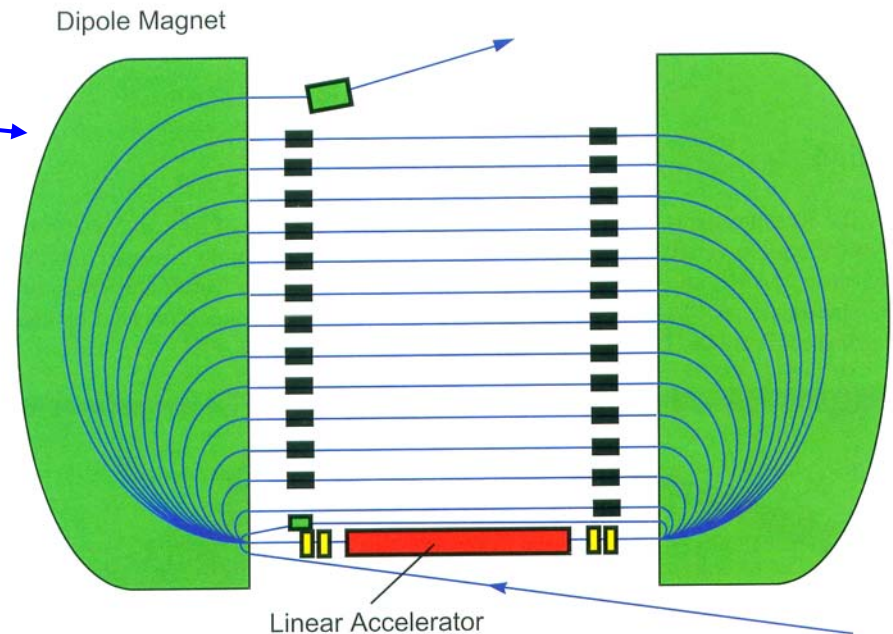
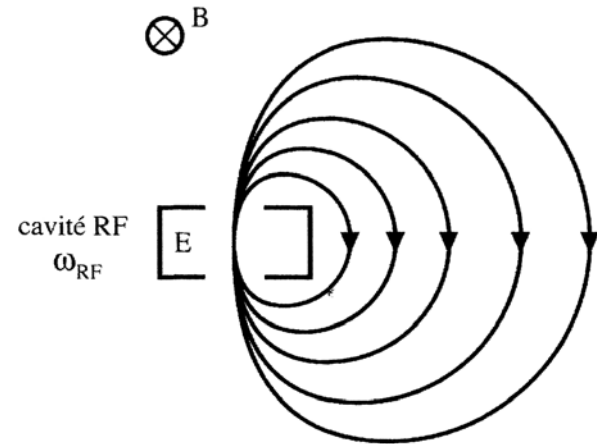
Le microtron

- Veksler, 1954. *Pour électrons seulement.*
- Le champ magnétique B est constant.
- A fréquence d'oscillateur constante, il faut que la **période de rotation** de l'électron pour faire un tour soit un **multiple entier de la période HF**. Condition : gain d'énergie par tour constant et au moins égal à l'énergie au repos, soit 511 keV pour l'électron.
- Donc, peu de tours et un grand gain d'énergie par tour. Pour augmenter ce gain, on peut remplacer la cavité RF par une série de cavités (linac).

➤ Exemples :

- microtron circulaire : Dubna, 30 tours, 30 MeV, chambre de 1,10 m.
- « race track » IKP (Mainz) : 1^{er} étage circulaire, 14 MeV en 2 tours, puis 883 MeV en mettant 2 racetracks en cascade.

Note: l'énergie est variable si on fait varier l'énergie d'injection.



Et encore un : le « rhodotron * »

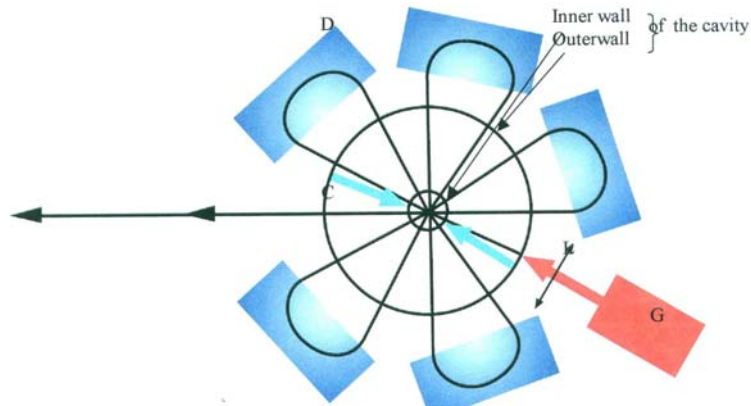
Accélérateur d'électrons (Pottier 1989)

- Les électrons traversent plusieurs fois l'âme d'une cavité coaxiale 107 MHz.
- Deux accélérations (jusqu'à 500 keV chacune) par passage.
- Pour 9 aimants et 10 passages, énergie finale **10 MeV**.
- Puissance faisceau jusqu'à **200 kW**. Le faisceau est continu.

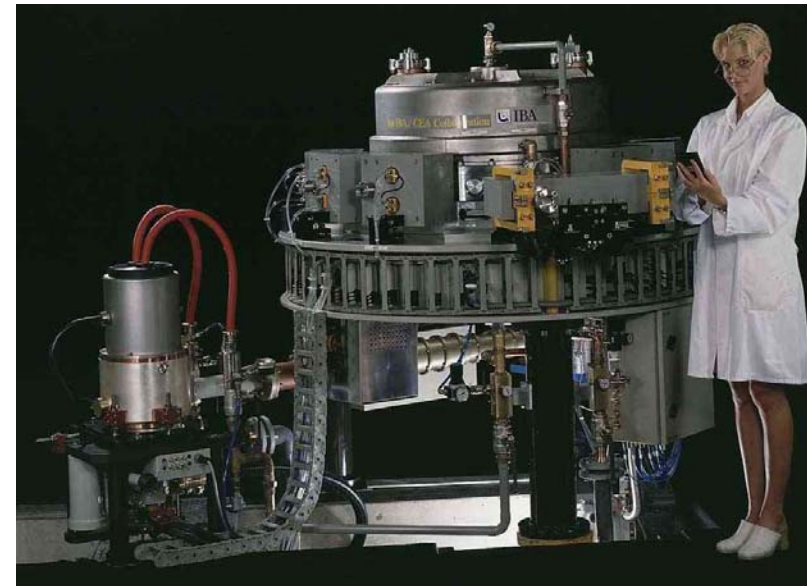
Utilisations:

- stérilisation d'aliments ou de matériels (chirurgie)
- irradiation de polymères
- modifications de propriétés des semi-conducteurs
- coloration de diamants

* Du grec *ρόδον* : rose



Rhodotron: marque déposée par CEA sous licence IBA

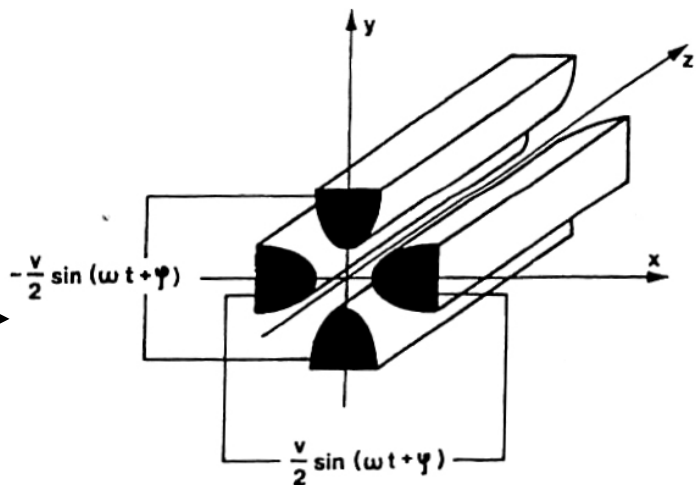


Et pour finir avec les inclassables : le RFQ (quadrupôle radiofréquence)

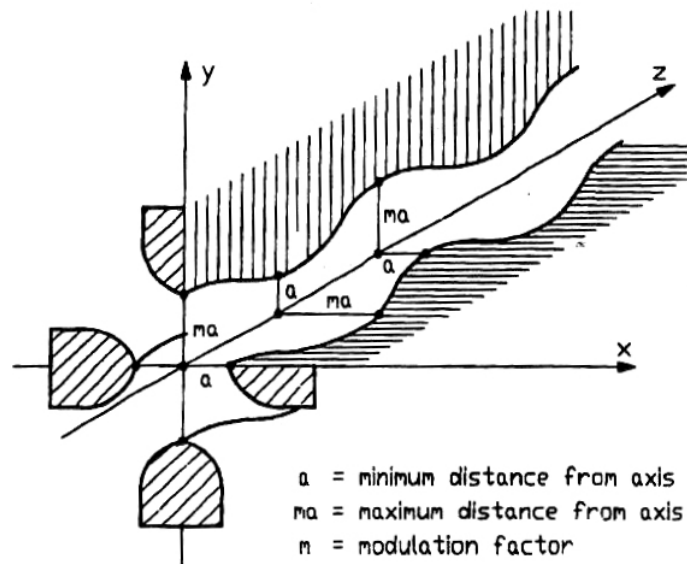
Pour **ions seulement**, (Kapschinskiy, 1970).

Domaine qq keV/n à qq MeV/n. Utilisé comme injecteur.

Ici, on a seulement un quadrupôle alimenté par deux tensions RF : un ion (de vitesse constante selon Oz) serait focalisé alternativement en x et en y.



Si on module la forme des électrodes, il apparaît une composante longitudinale du champ électrique.



Un RFQ accélère, focalise et groupe le faisceau (continu à l'origine), sans champ magnétique.

I. Applications relatives à la santé

- *La production d'isotopes pour l'imagerie*
- *La production d'isotopes pour l'immunothérapie*
- *La radiothérapie (utilisation des X)*
- *L'hadronthérapie*
- *La thérapie par neutrons*
- *La stérilisation médicale*

II. Quelques applications industrielles

- *Applications diverses. Exemple : de mesure d'usure mécanique par activation en couche mince*
- *Neutrographie*
- *La détection de contrebande d'explosifs*
- *La spectrométrie de masse pour la datation*

Image historique



L'image radiographique résulte de l'absorption plus ou moins importante du flux de rayons X selon la densité des éléments de l'objet étudié.

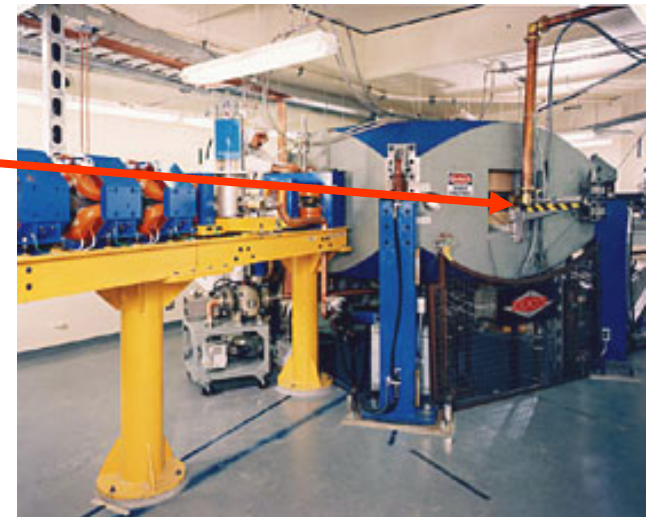


La main de Mme Röntgen
(après son mariage)

Production de radio-isotopes pour imagerie

Qu'appelle-t-on imagerie ?

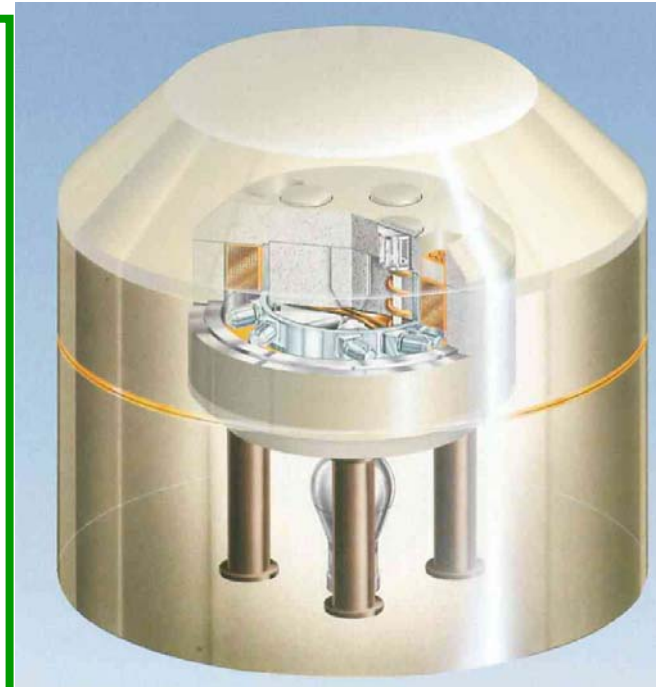
- On injecte une solution contenant un émetteur γ de courte période et sa répartition dans le corps ou l'organe est détectée par une caméra spéciale
- Les γ émis doivent être suffisamment énergiques pour quitter le corps du patient et être détectés.
- **Emetteurs γ** (50 à 300 keV) produits par protons 30-50 MeV, 50 à 400 μA : cyclotrons simples, champ et fréquence fixes, optimisés en rendement énergétique
- Dose injectée inférieure à 5 mSv
- 20 millions de patients/an examinés, demande mondiale croissante (7 à 8 % / an)



TR 30 EBCO, 30 MeV H-

Production de radio-isotopes pour tomographie (TEP)

- **Images et mesures quantitatives de paramètres biochimiques** : débit sanguin, métabolisme de l'oxygène, concentration et occupation des sites récepteurs dans les organes
- Dose nécessaire pour un examen : 200 MBq
- Radioéléments marqueurs : **émetteurs β^+** (2 γ émis à 180 °). Produits par des faisceaux de p (10-18 MeV) ou d(5-9 MeV), jusqu'à 75 μ A. Cyclos Presse-bouton
- Exemple : production de fluor 18 par bombardement par des protons d'eau enrichie en oxygène 18



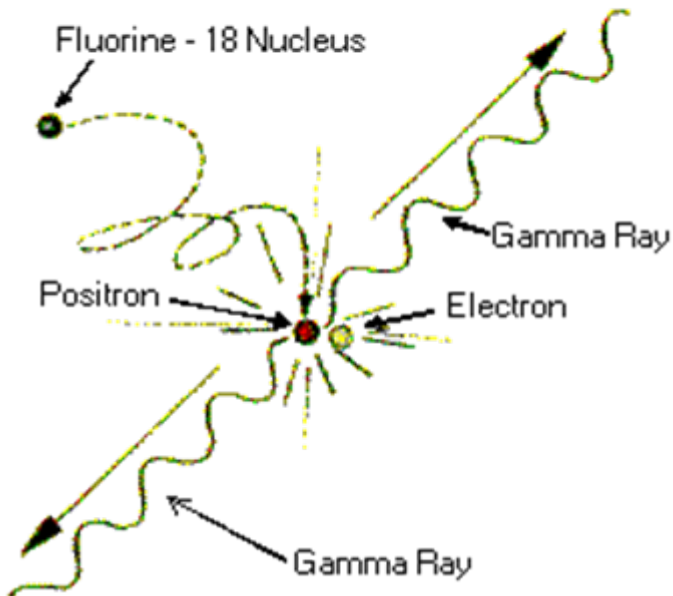
CYCLONE 10/5 protons-deutons IBA

Plusieurs centaines de cyclotrons producteurs de tels radioisotopes dans le monde

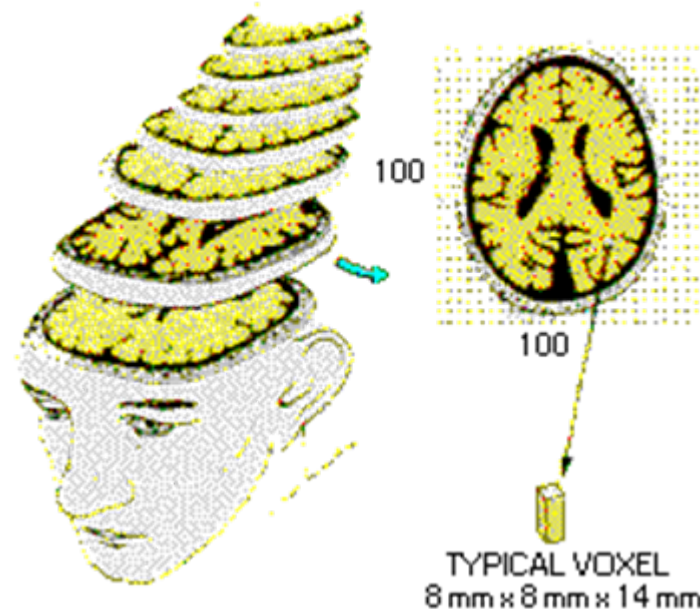
le FDG (fluorodeoxyglucose): un exemple détaillé pour tomographie par caméra à émission de positons (TEP) :

- Certains tissus cancéreux sont particulièrement « gourmands » en glucose (cerveau).
- En injectant un composé de glucose « marqué » avec du Fluor 18, émetteur β^+ , on peut localiser par caméra à positons les concentrations anormales révélatrices de tissus tumoraux. La période du F 18 étant de 110 minutes, cet isotope est rapidement éliminé.

Positron Emission Tomography

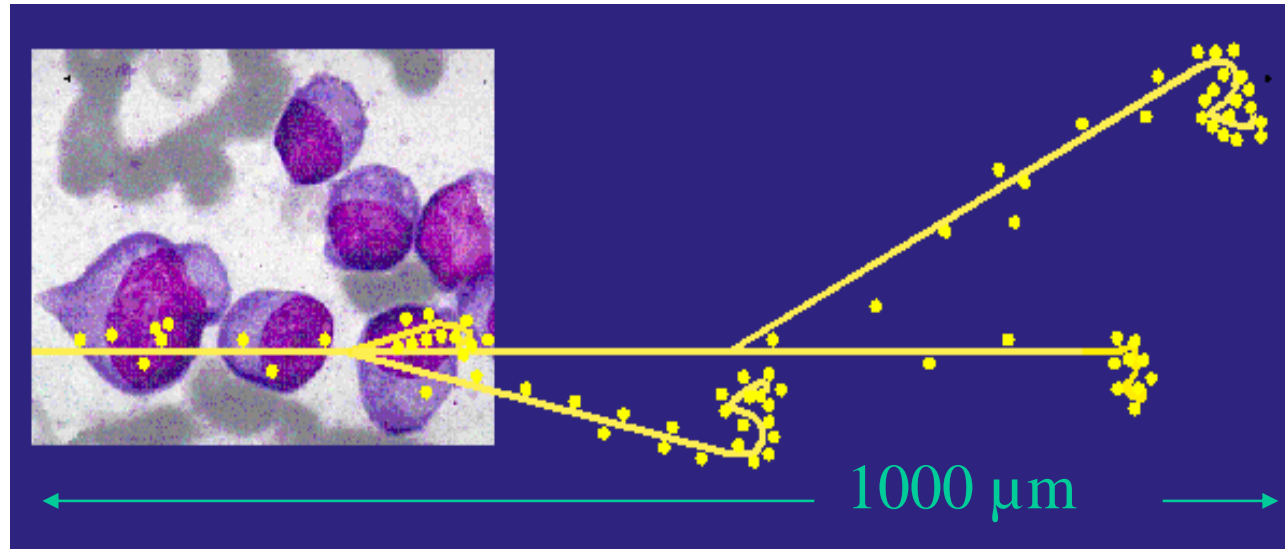
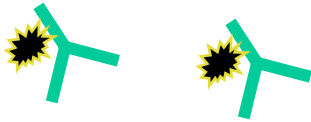


Typical "Slice"

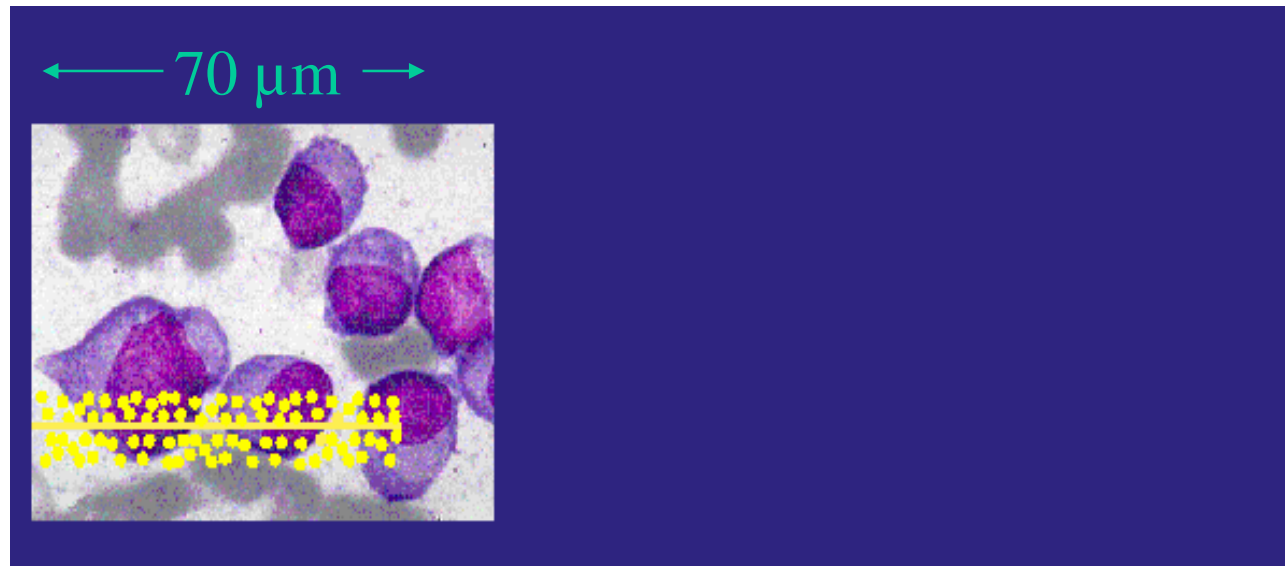
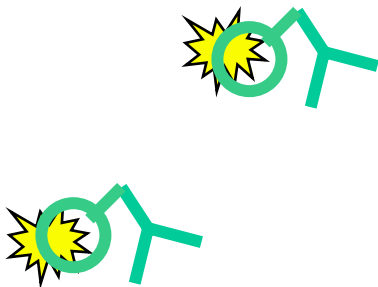


Radioimmunothérapie β et α

^{131}I



^{213}Bi

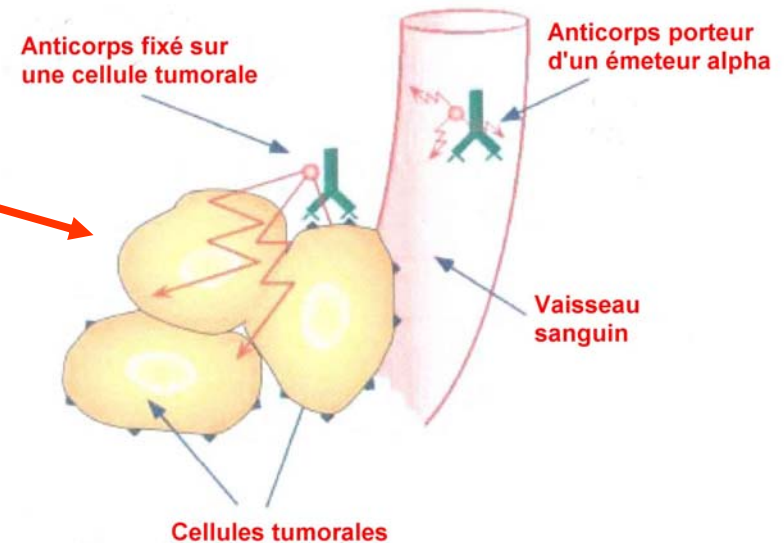


Un exemple de radioimmunothérapie : l'iode et la thyroïde

Radioimmunothérapie ou radiothérapie interne : irradiation sélective de la tumeur après injection de molécules marquées par des radionucléides émetteurs de particules

Exemples

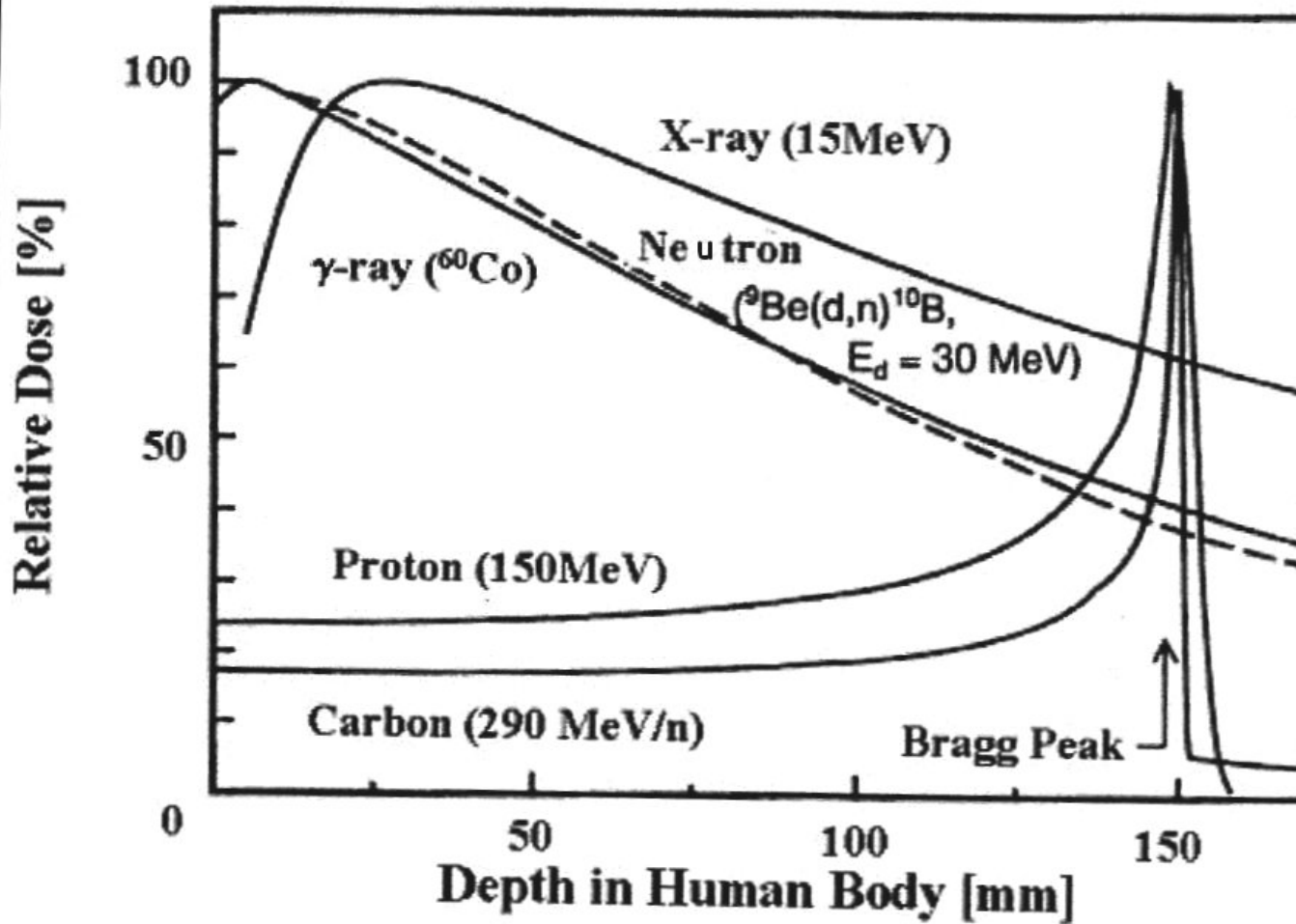
- Une méthode connue depuis 50 ans : destruction de cellules tumorales de la thyroïde par l'Iode 131, émetteur β .
- **émetteurs α** (yttrium 90) : lymphomes, leucémie



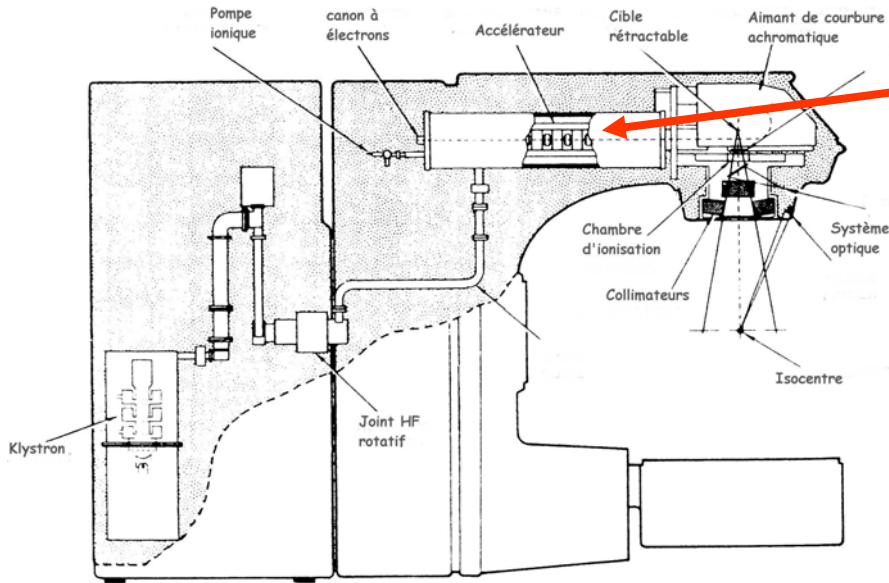
Radioimmunothérapie : une longue recherche

- Il faut dans chaque cas, trouver le bon isotope qui pourra s'intégrer dans l'anticorps adéquat
- Il faut des cyclotrons d'énergie au moins égale à 50-70 MeV pour la production de ces radionucléides (cuivre 67, fer 52)
- Par exemple , protons (H^-) et particules alpha (He^{++}) pour la production d'astate 211 (**Cyclotron ARRONAX** , Nantes)

Comparaison de la pénétration et du dépôt de dose des différents rayonnements dans le corps humain



Radiothérapie



Un petit linac accélère des électrons dans une gamme d'énergie de qq MeV à 20-25 MeV.

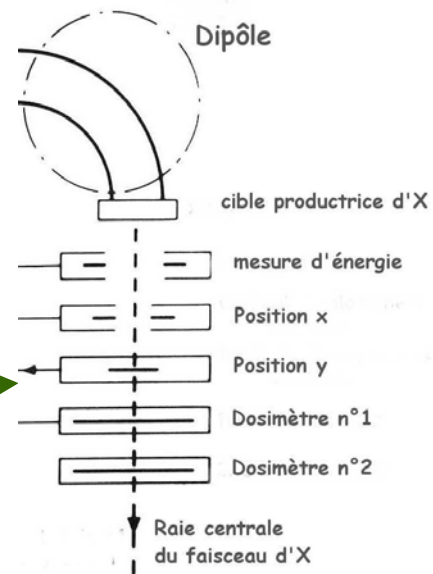
Les X (approximativement même gamme d'énergie) sont produits par une cible bombardée par les électrons.

Des centaines d'accélérateurs linéaires de ce type dans le monde

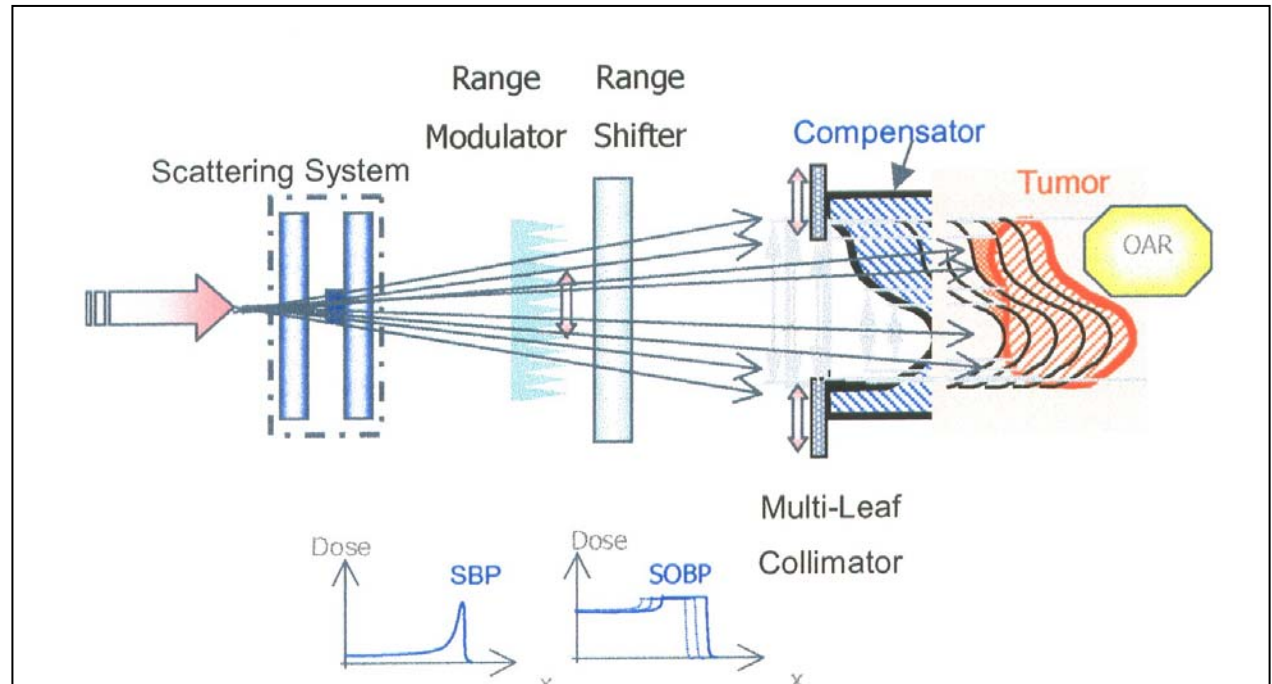
Importance des certifications et des contrôles !

Voir accidents récents !

Système de contrôle draconien de l'énergie, de la dose et de la direction du faisceau d'X.



Méthode d'irradiation passive

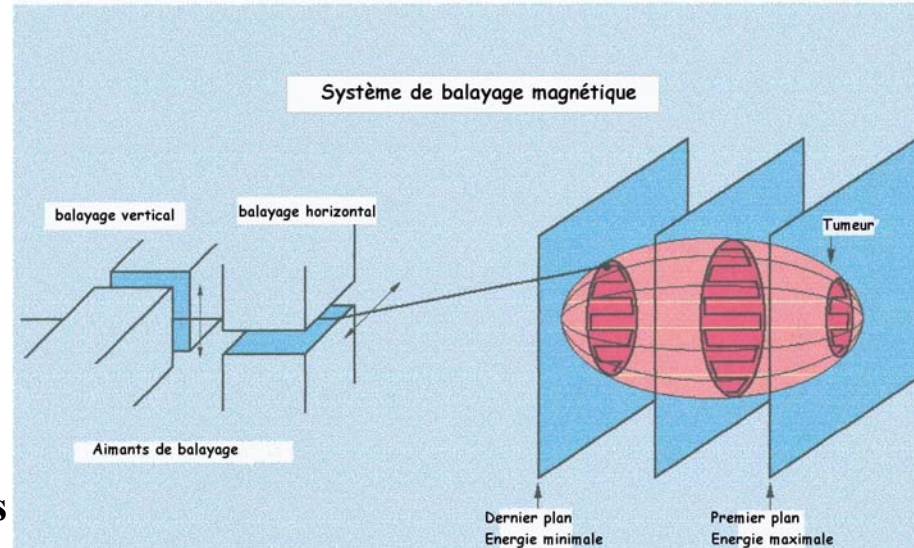


On ne fait pas de balayage du faisceau.

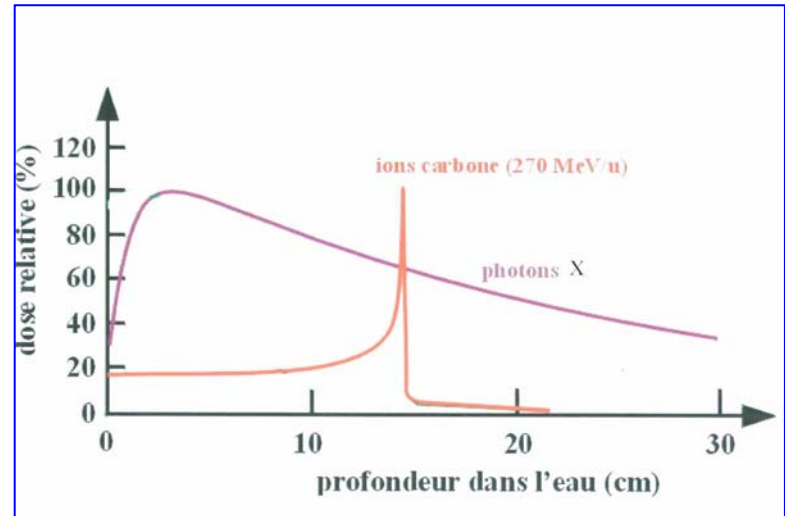
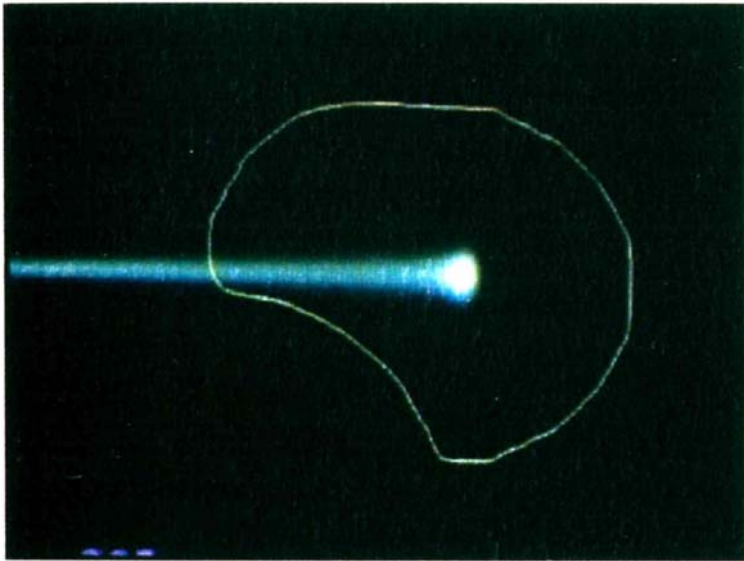
On utilise des masques absorbeurs d'épaisseur et de forme adaptée

Hadronthérapie, principe

- Les hadrons : protons, ions légers, déposent le maximum de densité d'énergie en fin de parcours (**pic de Bragg**)
- Les « dégâts » sont donc plus faibles en amont et en aval de la tumeur
- Les particules chargées autorisent un **balayage** en x, y, donc une irradiation précise, en particulier pour les tumeurs « tordues » ou non connexes
- Energie variable : irradiation par plans successifs

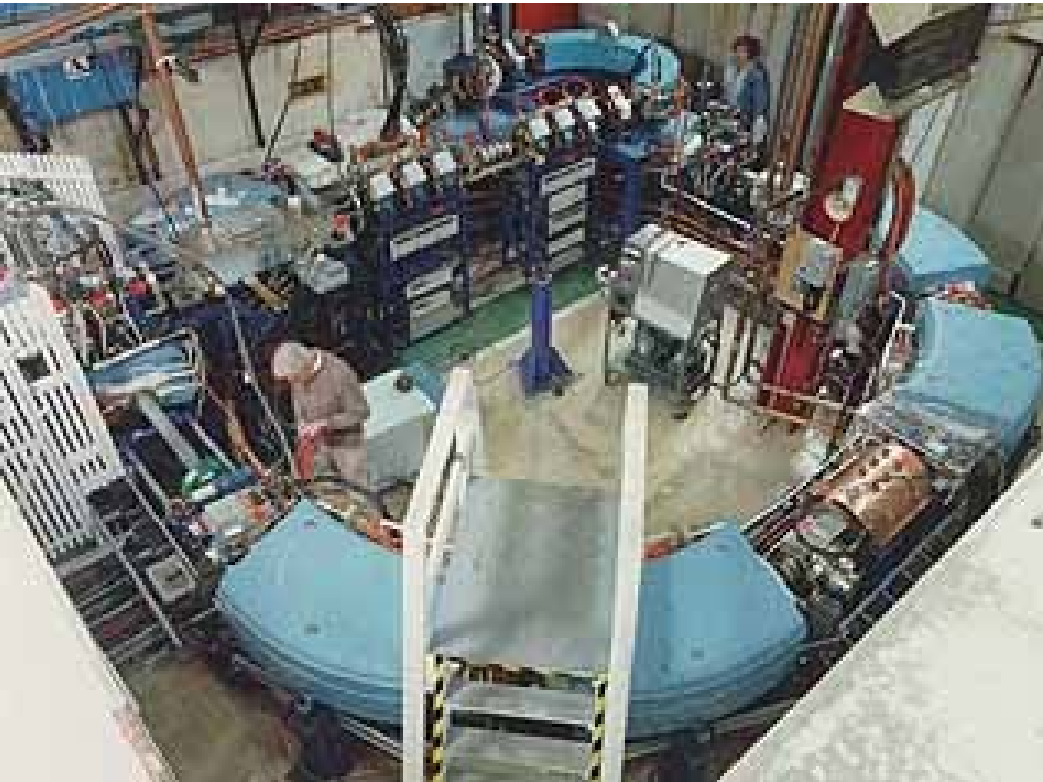


Mais pas pour les leucémies



Cependant, le traitement : radiothérapie (X) + chimiothérapie n'est pas à exclure !

Protonthérapie : Loma Linda , un pionnier



**Synchrotron à protons de
Loma Linda (USA) Conception
Fermilab**

70 -250 MeV

Diamètre ~ 8 m

Plusieurs centaines de patients traités chaque année

- Japon : deux synchrotrons, traitements depuis la fin des années 90
- GSI (Darmstadt): un grand synchrotron dédié à la recherche, mais un programme de traitement des tumeurs sur une trentaine de patients. Résultat : décision de construction d'un synchrotron dédié auprès d'un hôpital (Heidelberg)

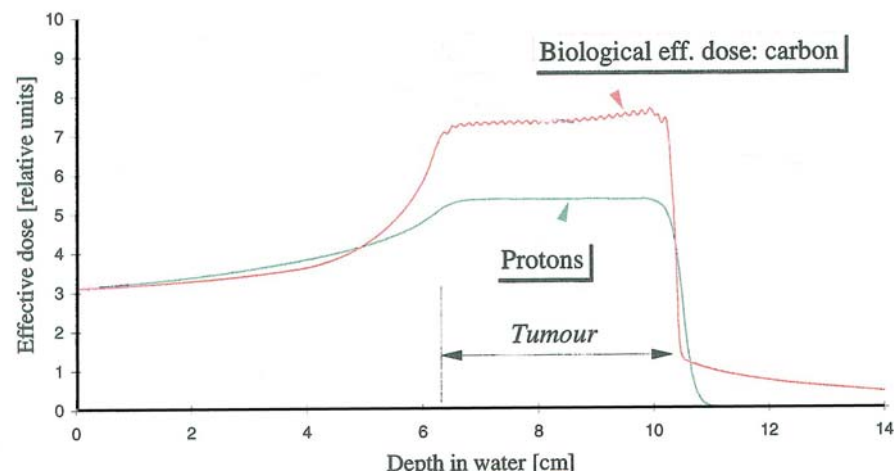
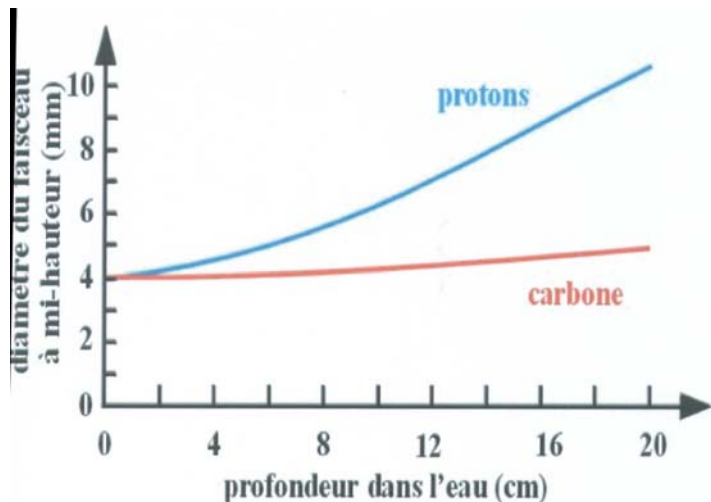
Hadronthérapie : protons et ions légers (carbone)

Protons versus ions carbone ?

- La diffusion latérale est plus faible avec C
- L'effet biologique relatif (EBR) est plus important avec C
- Le pic de Bragg est plus pointu

MAIS

- L'accélérateur est plus cher (400 Mev/nucléon!) que pour les protons (250 MeV)
- Il y a production d'éléments secondaires radioactifs (un peu) entre la peau et la tumeur.

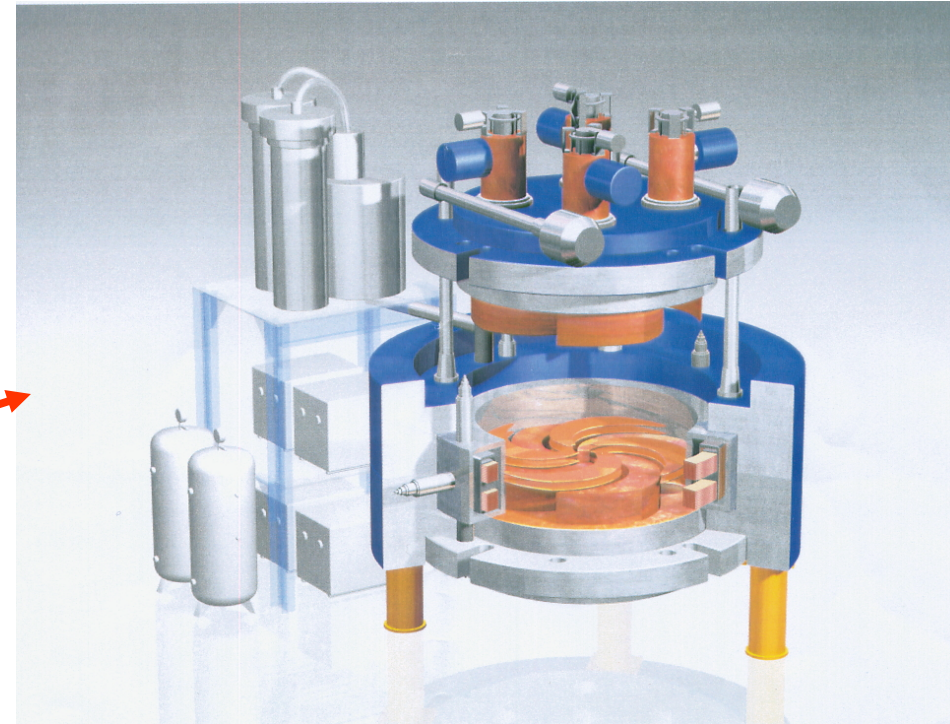


Protonthérapie : cyclotrons chauds et froids



Cyclotron « chaud » C 235 MeV protons (IBA)
pour NPTC General Hospital, Boston Mass. USA),
Diamètre 4 m, 220 tonnes

12 unités vendues à ce jour, dont une en cours
d'installation à Orsay (CPO) pour remplacer le
synchrocyclotron actuel



Cyclotron à bobines supraconductrices COMET
250 MeV protons pour PSI, Suisse (ACCEL)

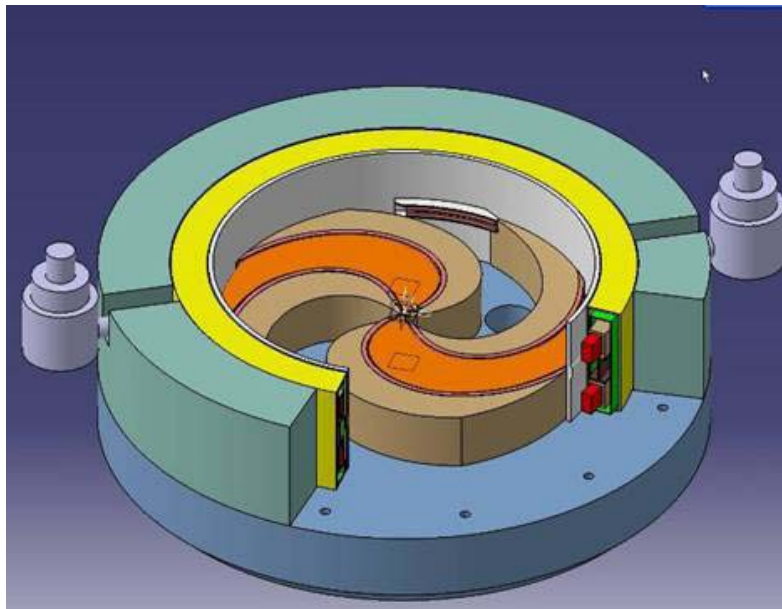
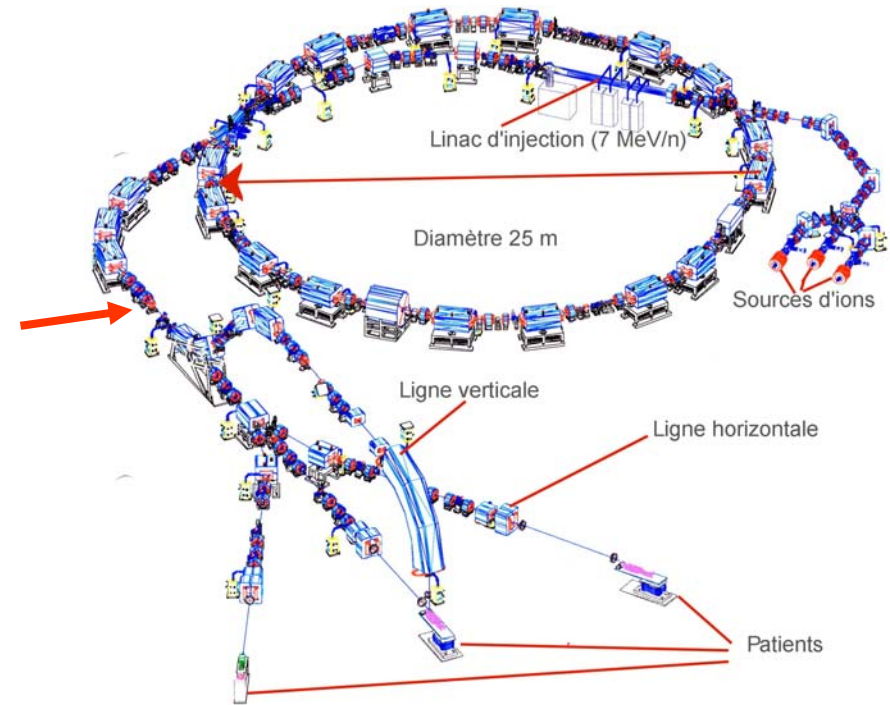
Diamètre 90 tonnes

Hadronthérapie avec synchrotrons et cyclotrons

Le synchrotron pour C et p de Pavie (CNAO) :
400 MeV/n, 250 Mev protons, énergie variable
par action sur le niveau de champ magnétique

Les C 4+ sont pré-accélérés par un linéaire de
7 MeV/n, puis injectés dans le synchrotron

En construction



Le projet de cyclotron à bobines supra-
conductrices C400 (IBA) : champ et fréquence
fixes et on injecte directement du C 6+ à partir
de la source. pois 700 tonnes

Le cyclotron est plus simple que le
synchrotron: pas d'injecteur, champ fixe,
fréquence hf fixe, **MAIS ...**

La situation en France

1. **Centre Antoine Lacassagne à Nice** : un cyclotron de 65 MeV pour le traitement du mélanome de l'œil. Réussites de l'ordre de 98 %
2. **Centre de protonthérapie d'Orsay** : un synchrocyclotron de 200 MeV, bientôt remplacé par un cyclotron compact. Traitement du mélanome + tumeurs de la base du crane et du cou (voir exposé Sabine Delacroix)

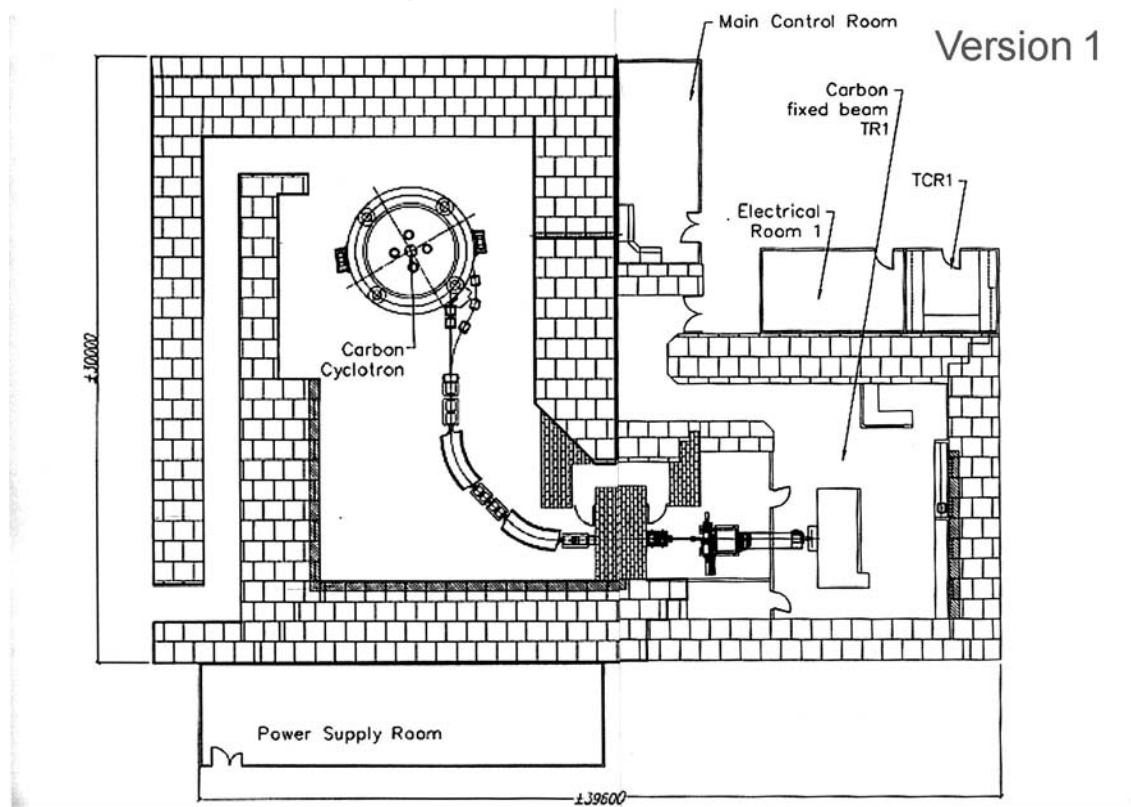
En projet:

1. Approuvé : **ETOILE** à Lyon. Synchrotron de 400 MeV/nucléon ions Carbone . Centre de soins.
2. En gestation: **ARCHADE** (ex ASCLEPIOS) . Cyclotron de 400 MeV/ nucléon ions carbone et protons. Centre de ressources :toutes expérimentations sur cellules saines et cancéreuse, mise au point de systèmes de planning de traitement.

MAIS ...

On ne sait pas faire varier finement et rapidement l'énergie d'un cyclotron.

On est donc obligé d'utiliser un dégradeur, puis de faire un tri dans les espèces ioniques produites, ainsi que dans l'énergie.



Combien ça coûte ?

Un centre d'hadronthérapie équipé de 3 salles de traitement = 100 à 120 M€

Coût du traitement d'un patient (amortissement du centre inclus : **24 000 €**)

Coût d'un traitement classique : radiothérapie & chimiothérapie associée :

entre 18 000 et 28 000 €

Financement ?

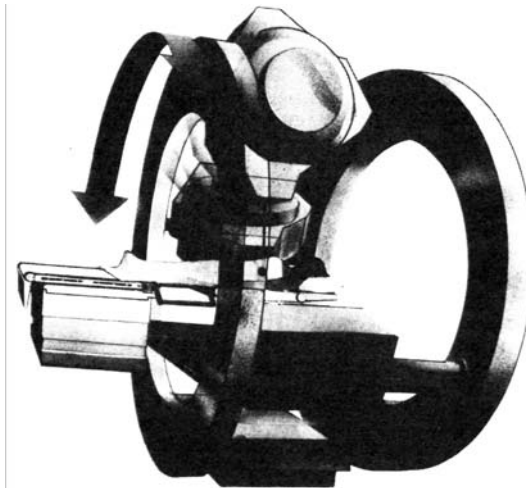
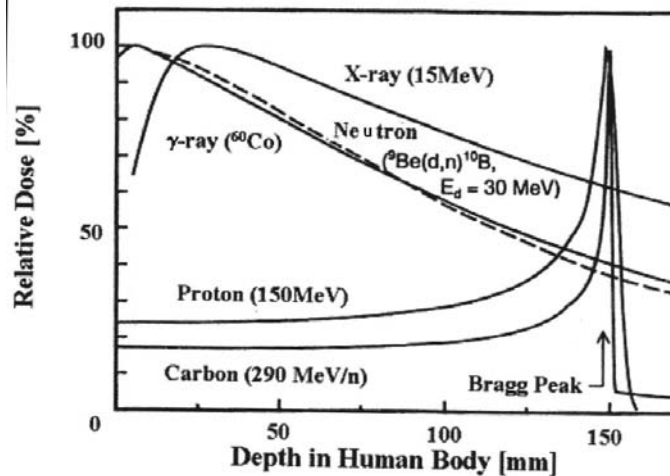
Thérapie par neutrons rapides

Historique ! Les frères Lawrence soignent le cancer de leur mère avec des neutrons rapides

L'accélérateur doit bombarder une cible de Be avec des faisceaux de p ou D de 14 à 70 MeV, 15 à 60 mA

Comme pour les X, la dose est maximale au début du parcours et décroît ensuite lentement

Type de tumeurs : glandes salivaires



Cyclotron cryo (D 48 MeV) du Harper Hospital à Détroit : ce min-cyclotron peut tourner autour du patient

Thérapie par neutrons lents (BNCT : Boron Neutron Capture Therapy)

- Traitement de tumeurs superficielles
- Du ^{10}B est fixé sur les cellules cancéreuses qui sont ensuite bombardées par des **neutrons thermiques**: la capture produit des α et des noyaux de Lithium de **5 à 9 μm de parcours**
- Petits accélérateurs : protons de 2.5 MeV, 50 mA, cible de Lithium

Applications industrielles diverses

➤ Fabrication (ions lourds) de filtres microporeux calibrés

(ici, un globule rouge sain, $\bar{\varnothing}$ 7 à 8 μm ,
peut se faufiler dans un canal de 3 μm .
Un globule malade est bloqué par ce filtre)



➤ Mesures des dommages causés par les neutrons rapides aux matériaux isolants (câbles, araldite des bobinages)

Stérilisation alimentaire

➤ Durcissement des composants semi-conducteurs pour l'industrie spatiale

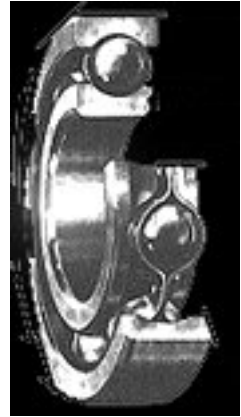
➤ Utilisations du rayonnement synchrotron

➤ Modification des propriétés de surface de métaux (coefficient de frottement) ou d'implants prothésiques

Applications industrielles: mesures d'usure et de corrosion

Basées sur l'activation en couches minces (TLA) :

- Implantation d'un radioisotope adéquat à une profondeur précise dans une zone définie du matériau : **bombardement par p ou D**
- Ex : $^{56}\text{Fe} (p,n) ^{56}\text{Co}$ ou $^{56}\text{Fe} (D,n) ^{57}\text{Co}$
- Toute altération physique ou chimique se traduit par une diminution de l'activité, qui peut être reliée à la réduction de masse ou d'épaisseur
- Faible activité nécessaire ($\sim 10 \mu\text{Ci}$, ou 370 kBq)
- Emetteurs γ , sans neutrons ni α , période qq mois

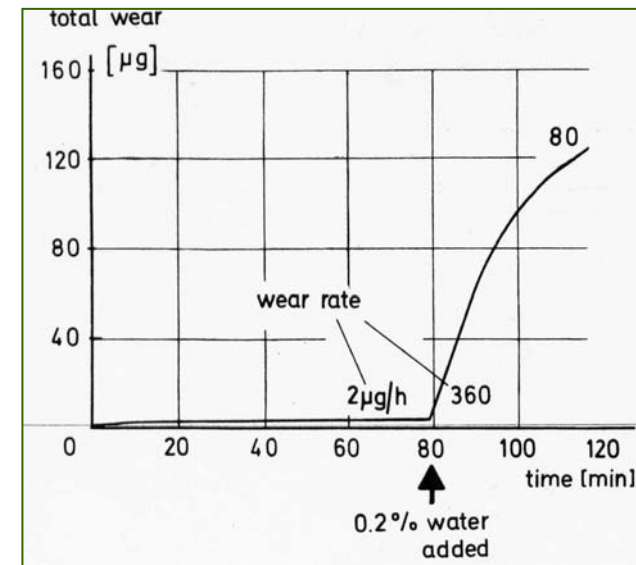


Les avantages :

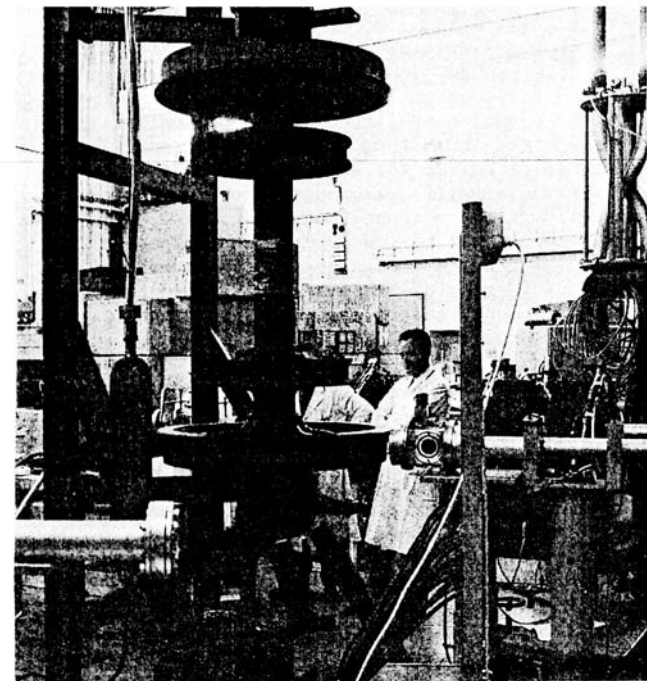
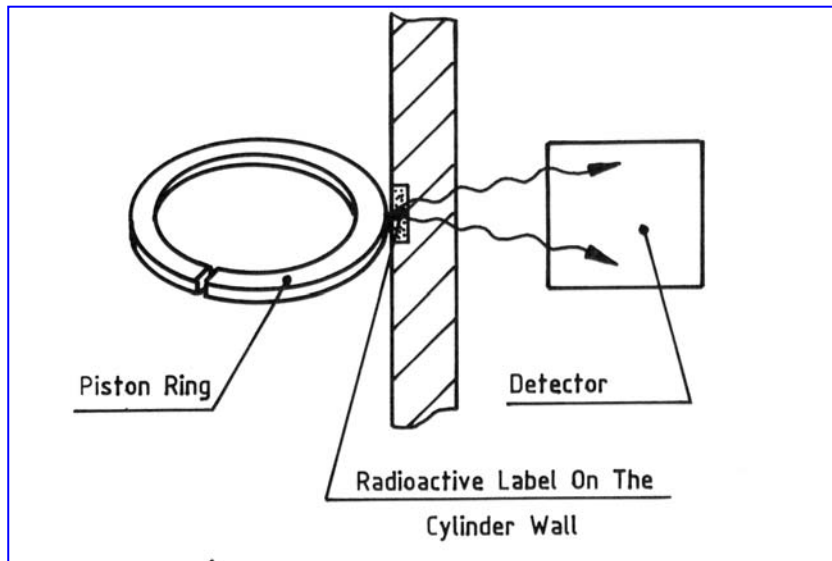
- plus précis que la pesée
- suivi en temps

Ici, mesure de l'usure de la cage d'un roulement à billes:

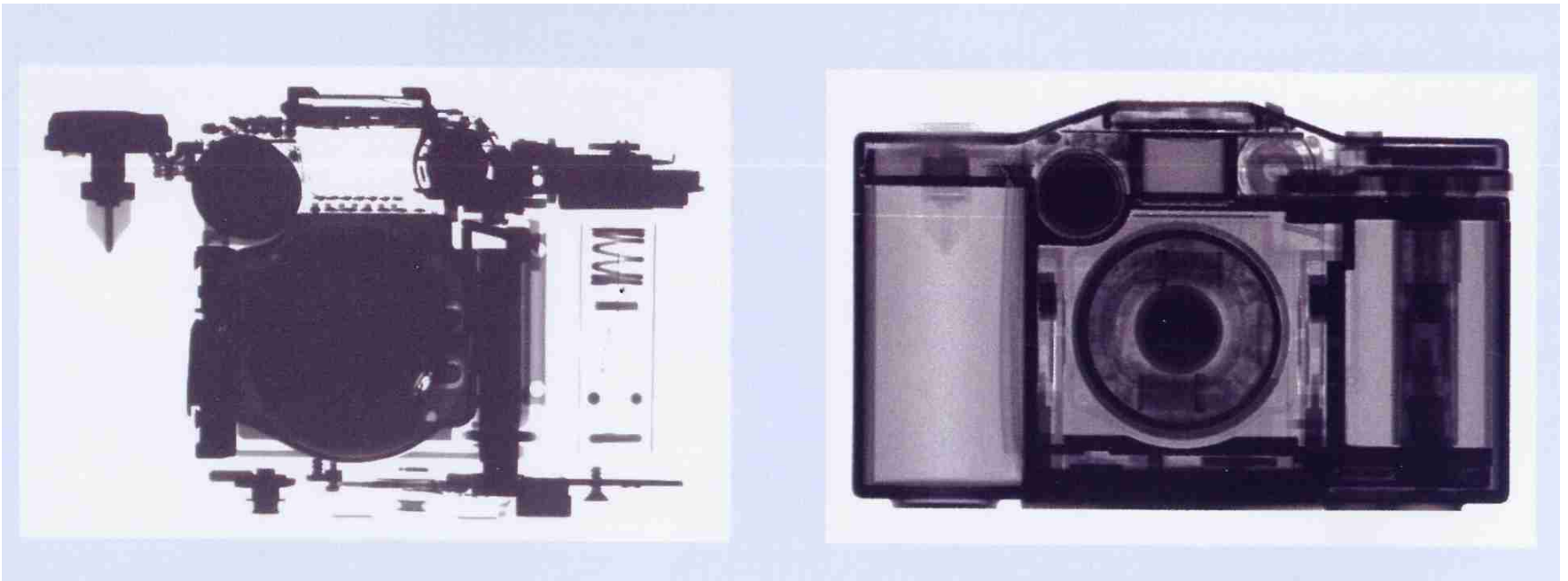
L'addition de 0,2 % d'eau au lubrifiant augmente l'usure de façon spectaculaire



Usure des roues de chemin de fer et des segments de piston dans les moteurs autos.

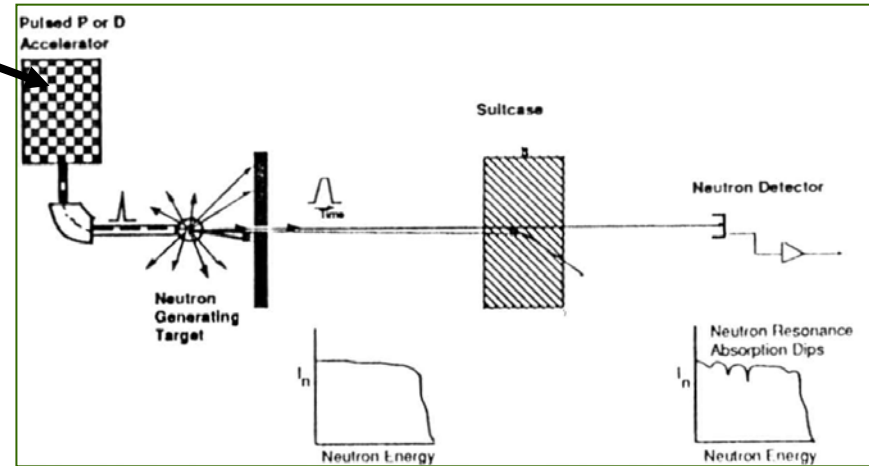
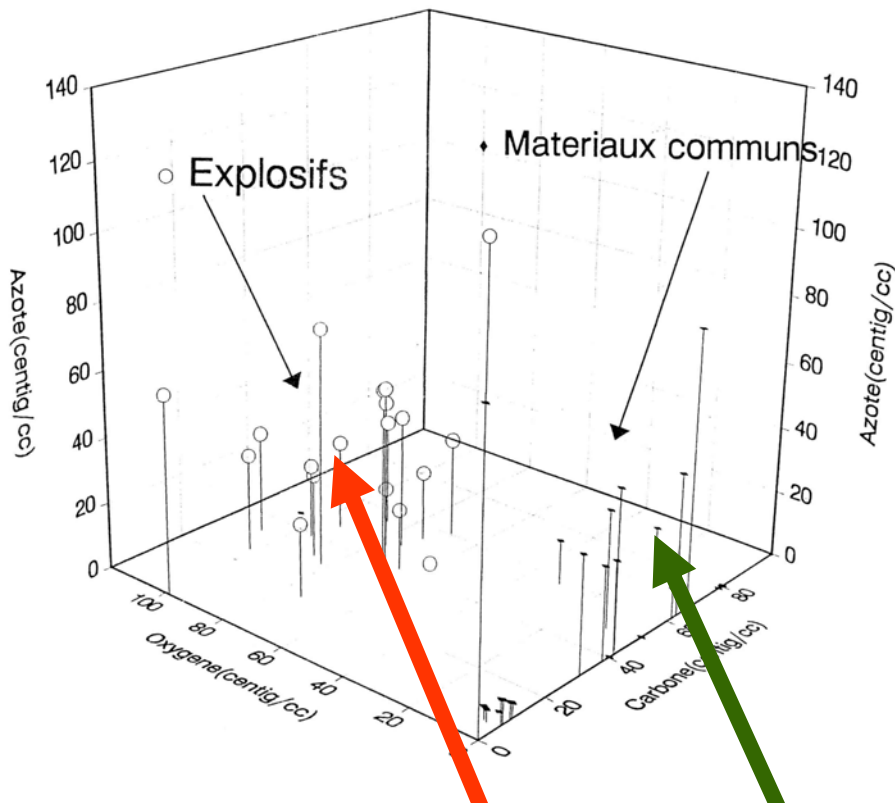


Radiographie par rayons X et par faisceau de neutrons



Détection rapide d'explosifs dans les bagages légers d'aéroports

Un petit accélérateur (4,5 MeV deutons) pourrait servir à détecter un explosif dans un bagage



Absorption résonnante des neutrons

Contraintes :

- Contrôler un bagage toutes les 6 secondes
- Ne pas voiler les films photographiques

La composition C,N,O d'un explosif est très différente de celle de mon pull ou de mon rasoir.



Aglaé est au Louvre !

Exemple de backscattering : datation

**AGLAE : Accélérateur Grand Louvre
d'Analyse Élémentaire**

L'analyse non destructive d'objets ou de matériaux (composition, datation) se fait par bombardement avec des ions.

L'interaction est suivie d'une émission de photons ou d'ions secondaires caractéristiques de l'élément cible

L'accélérateur est un tandem de 2 MV capable en particulier de délivrer **DANS L'AIR** un faisceau de protons de 10 μm de diamètre.



Conclusions (ou plutôt, quelques remarques finales)

- ✓ *La recherche fondamentale sur le noyau et les particules élémentaires n'a pu se développer que grâce aux accélérateurs*
- ✓ *Les grands accélérateurs de recherche ne peuvent être réalisés qu'en collaboration entre plusieurs nations*
- ✓ *Les applications dans le domaine de la santé (traitement par rayons X et hadrons, diagnostics et études radiobiologiques avec isotopes à vie courte, etc.) sont pour l'instant irremplaçables*
- ✓ *Les applications en stérilisation, datation, analyse, études diverses sont passées dans le domaine public*

Bibliographie

- ✓ **Historique** : *The infancy of Particle Accelerators* (Life and Work of Rolf Wideroë), édité par Pedro Waloschek, DESY 94-039, Mars 1994
- ✓ **Vraiment très simple, sans mathématiques** : *Les accélérateurs de particules*, Pierre Lapostolle, Bilan de la science, Fayard , 1966, 150 petites pages.
- ✓ **Si vous voulez un document concis (110 pages), très bien fait et en français, lisez** : *Introduction aux accélérateurs de particules*, Pierre Germain , rapport CERN 89-07, accessible sur le net à :<http://cdsweb.cern.ch>

Ouvrages plus approfondis:

- ✓ **Un manuel, profondément documenté sur toutes les caractéristiques de la majorité des accélérateurs existants** : *Particle accelerators and their uses*, Waldemar Scharf, Harwood academic publishers (1986)
- ✓ **Un fantastique exemple de pédagogie** : *Principles of cyclic particle accelerators*, John J. Livingood, Van Nostrand Co, 1960. Bien sûr, il n'y a pas la supra. Difficile à se procurer car n'est plus édité.
- ✓ **Plus complet, mais aussi ancien**: *Particle Accelerators*, M.S. Livingston et J.P. Blewett, Mc Graw Hill book Co (1962)
- ✓ **Uniquement théorique mais pas trop compliqué, en français**: *Accélérateurs circulaires de particules*, H. Bruck, PUF (1966).
- ✓ **Un cours du CERN (CAS: CERN Accelerator School), par 23 experts**: *Cyclotrons, linacs and their applications*, rapport CERN 96-02.

Remerciements

... à

Edgar-P. Jacobs,

Gotlib,



.... et à beaucoup d'autres personnes à qui j'ai piqué des schémas.

C'est fini

Appendice I : Equations générales du mouvement dans un champ magnétique

Les équations du mouvement d'un ion de charge Q , de masse m et de vitesse v dans un champ magnétique $\vec{B} = B_x, B_y, B_z$, sans accélération, s'écrivent (Newton-Lorentz):

$$\vec{f} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = Q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

où t est le temps, soit en coordonnées cartésiennes :

$$\frac{d(mv_x)}{dt} = \frac{d(m\dot{x})}{dt} = Q(\dot{y}B_z - \dot{z}B_y)$$

$$\frac{d(mv_y)}{dt} = \frac{d(m\dot{y})}{dt} = Q(\dot{z}B_x - \dot{x}B_z)$$

$$\frac{d(mv_z)}{dt} = \frac{d(m\dot{z})}{dt} = Q(\dot{x}B_y - \dot{y}B_x)$$

où le point désigne la dérivée par rapport au temps.

Dans un cyclotron, il est plus sympathique de raisonner en coordonnées cylindriques. Ces équations deviennent alors :

$$\frac{d(m\dot{r})}{dt} - m r \dot{\theta}^2 = Q(r\dot{\theta}B_z - \dot{z}B_\theta)$$

$$\frac{d(mr\dot{\theta})}{dt} + m\dot{r}\dot{\theta} = Q(\dot{z}B_r - \dot{r}B_z)$$

$$\frac{d(m\dot{z})}{dt} = Q(\dot{r}B_\theta - r\dot{\theta}B_r)$$

Pour une particule non relativiste de masse m_0 se déplaçant dans un champ magnétique homogène axial, et en choisissant par convention une induction magnétique B_0 dirigée vers les z négatifs de façon que le mouvement soit décrit dans le sens trigonométrique :

les équations de l'appendice I se réduisent à :

$$B_z = -B_0$$

$$m_0(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -Qr\dot{\theta}B_0$$

$$m_0(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) = Q\dot{r}B_0$$

$$m_0\ddot{z} = 0$$

Le résultat est une orbite circulaire fermée dans le plan x-y perpendiculaire aux lignes de champ. Le rayon orbital R et la vitesse angulaire ω sont donnés par :

$$R = \frac{m_0 v}{QB_0}$$

$$\omega = \frac{Q}{m_0} B_0$$

ω ne dépend que du champ B_0 pour un ion de type donné.

Ces relations restent vraies même dans le cas relativiste. En utilisant les conventions usuelles : $\beta = \frac{v}{c}$

on obtient :

$$m = m_0 \gamma$$

$$m_0 \gamma v = QRB$$

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{QB}{m_0 \gamma}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

On voit que la vitesse angulaire ne peut être constante que si le champ magnétique suit l'augmentation relativiste de masse pendant l'accélération : $B_z(r) = B_0 \gamma(r)$

Introduisons le paramètre k, indice de champ magnétique : $k = \frac{r}{B_z} \frac{dB_z}{dr} = \frac{r}{\gamma} \frac{d\gamma}{dr} = \gamma^2 - 1$

et récrivons la partie radiale de l'équation du mouvement en termes de x, petit déplacement de l'ion par rapport à l'orbite fermée, dite orbite d'équilibre :

$$x = r - R$$

$$\ddot{x} = \ddot{r}$$

$$\dot{g} = \omega \frac{R}{r}$$

$$r\dot{\theta}^2 = \omega^2 \left(\frac{R^2}{r}\right) \cong \omega^2 (R - x)$$

$$\omega = \frac{Q}{m} B_z(R) = \frac{v(R)}{R}$$

$$B_z(r) = B_z(R) + \left(\frac{dB_z}{dr}\right)x + \dots$$

$$B_z(r) = B_z(R) \left(1 + \frac{kx}{R} + \dots\right)$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur, on obtient pour x : $\ddot{x} = \omega^2 (R - x) - v\omega \left(1 + \frac{kx}{R}\right) = -\omega^2 (1 + k)x$

équation d'un oscillateur harmonique dont une solution particulière est : $x = x_0 \cos(v_r \omega t)$

avec : $v_r^2 = 1 + k = \gamma^2$

v_r est appelée **fréquence bêatron radiale**. Le cas spécial $k = 0$ peut entraîner une instabilité du mouvement radial dès qu'une perturbation du champ magnétique est présente. *Dans un cyclotron à pôles plats (donc, avec un gradient radial négatif), v_r souvent de l'ordre de 0,9.*

Verticalement, toujours dans le cas d'une symétrie axiale ($B_\theta = 0$) l'équation du mouvement axial se réduit à :

$$m_0 \ddot{z} = -Qr\dot{\theta}B_r$$

Ici, $B_r = 0$ dans le plan médian et peut être développé en termes de B_z en utilisant : $\text{div}(\vec{B}) = 0$ $B_r(z) = \frac{dB_r}{dz} z = -\frac{dB_z}{dr} z + \dots$

En négligeant les termes d'ordre supérieur, l'équation devient : $\ddot{z} = \omega^2 kz$

avec pour solution particulière : $z = z_0 \cos(v_z \omega t)$

où : $v_z^2 = -k$

v_z étant appelée **fréquence d'oscillation verticale bêatron**. Dans un cyclotron à pôles plats, v_z est plutôt de l'ordre de 0,1 à 0,2.

Cette dernière formule met en évidence la contradiction entre la nécessité d'avoir une décroissance radiale du champ pour conserver la stabilité verticale, et la nécessité d'avoir un champ croissant pour compenser l'augmentation relativiste de masse.

Appendice III : L'épluchage

Pour accélérer un noyau, il faut arracher à l'atome dont il est le cœur un ou plusieurs électrons : devenu un ion, c'est-à-dire porteur d'une charge électrique, il est alors sensible au champ électromagnétique. On peut l'accélérer, le guider et le focaliser.

L'énergie communiquée à un ion de charge Q par une différence de potentiel V (ou une succession d'impulsions électrique dont la somme est V) vaut exactement QV . On a donc intérêt , pour un accélérateur de performances données, à enlever le maximum d'électrons au cortège de l'atome.

Le premier « épluchage », comme on le verra dans un autre chapitre de cette Ecole, s'opère dans la source d'ions : le phénomène de base est toujours un bombardement des atomes par un flux d'électrons. Mais l'obtention d'intensités importantes d'ions très épluchés par ce procédé est limitée, car il est difficile d'arracher les électrons les plus proches du noyau, ceux qui ont une forte énergie de liaison.

Une méthode additionnelle consiste à intercaler sur le parcours du faisceau ayant déjà acquis une certaine énergie, une feuille solide mince, le plus souvent du carbone. Le ralentissement provoqué est négligeable, mais le nombre de collisions à l'intérieur de la feuille est suffisamment élevé pour que l'état de charge *moyen* en sortie soit plus élevé qu'à l'entrée. Le prix à payer est que l'ensemble de ces collisions conduit aussi à une distribution constituée de plusieurs états de charge, dont un seul sera acceptable par l'accélérateur aval : il y a par conséquent perte d'une fraction souvent importante (jusqu'à 80 %) du nombre d'ions en provenance de l'accélérateur amont.

Nous donnons ci-après un exemple illustrant les aspects qualitatifs et quantitatifs du phénomène.

Un faisceau d'ions Pb de charge $Q = 23+$, d'énergie 4,575 MeV/nucléon, traverse une feuille de carbone d'épaisseur 1,25 μm . La perte d'énergie n'est que de 4 %, et le spectre d'états de charges qui résulte de l'épluchage se présente comme indiqué sur la figure ci-dessous : on voit que l'état de charge le plus probable est $Q' = 54+$, mais avec seulement 22% de l'intensité du faisceau incident.

