

Accélérateurs de particules une introduction

Jean-Marie De Conto
Université Grenoble Alpes
LPSC - Grenoble

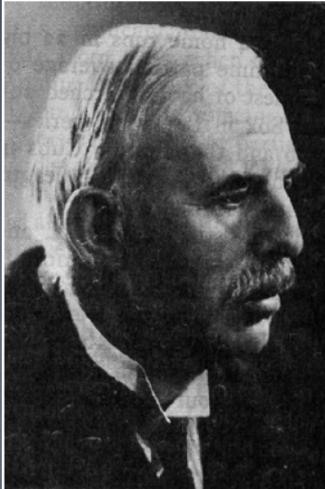
Des accélérateurs de particules vus de l'utilisation (plan de l'école 1/2)

- Machines électrostatiques (ex: spectrométrie de masse, irradiation): CSNSM, Bordeaux, Grenoble
- Des machines à ions pour la physique nucléaire
 - Cyclotrons du GANIL
 - Linac de SPIRAL2: énergie modérée, fort courant, forte puissance ($P=EI$)
- Des machines à électrons
 - Collisionneurs très haute énergie (LEP), physique des particules
 - Machines à rayonnement synchrotron (SOLEIL, ESRF)
- Des linacs protons très forte puissance
 - ESS, IFMIF (irradiation), MYRRHA (réacteurs pilotés par accélérateurs)
- Des machines médicales (cyclotron CPO, synchrotron CNAO)
- Des collisionneurs à ions ou protons (LHC)
- Des tas de machines (ThomX, ELI.... Voir Fabian)

Les accélérateurs de particules vus par le concepteur (plan de l'école 2/2)

- Une source de particules chargées: électrons, ions ,protons...
- Des éléments d'accélération
 - un tube accélérateur (machine électrostatique)
 - des cavités haute fréquence (100MHz-3GHz), chaudes ou supraconductrices
- Des éléments de guidage
 - des lentilles de focalisation (électrostatiques, quadripôles électriques ou magnétiques)
 - des éléments de courbure (déflecteurs électrostatiques, dipôles magnétiques)
- Des diagnostics de faisceau
 - mesures de courant, de position, d'emittance, et l'électronique associée
- Des "infrastructures"
 - système de vide plus ou moins poussé, mais toujours très propre
 - des amplificateurs haute fréquence pour apporter l'énergie dans les cavités
 - un système cryogénique pour les éléments supraconducteurs
- Des utilisateurs
- Un faisceau est caractérisé par différentes grandeurs
 - sa structure en temps
 - son intensité (instantanée et moyenne –puissance-) et cycle utile
 - son emittance (taille*divergence) qui est une quantité qui se conserve

Comment être précurseur: s'appeler Ernest

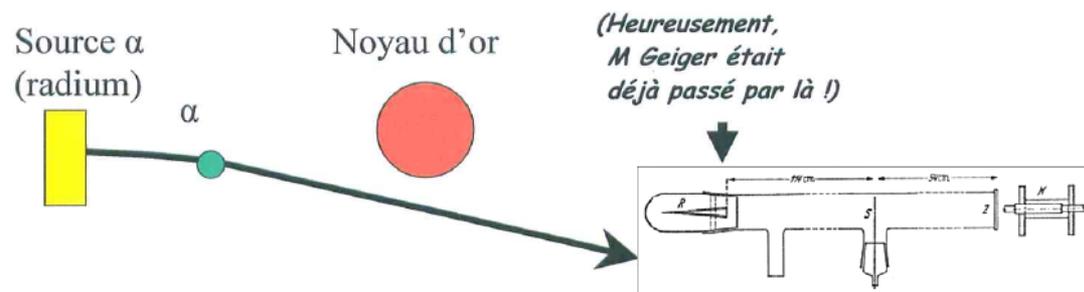


Ernest Rutherford,

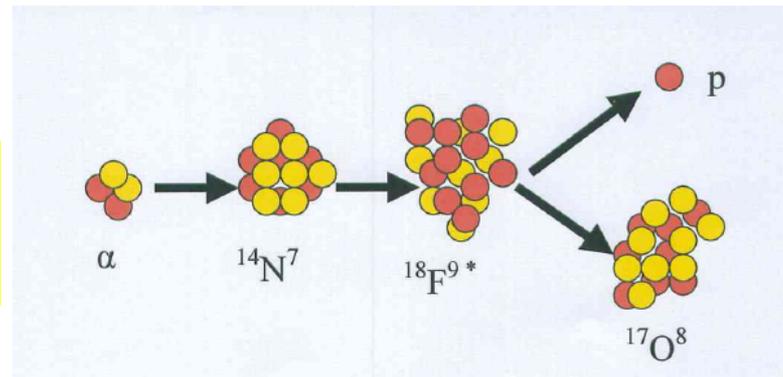
1st baron of Nelson and Cambridge, et fervent de rugby

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

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

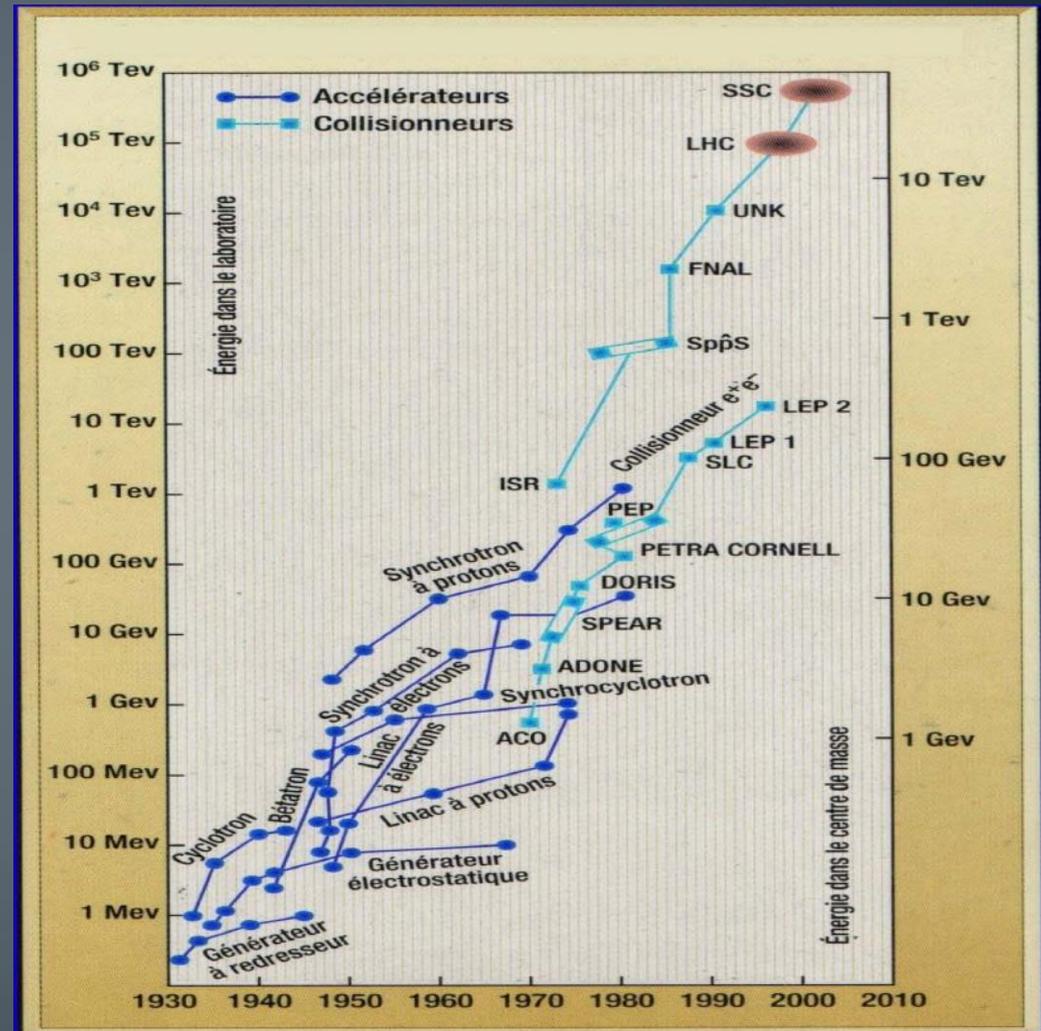


Il réussit la première transmutation artificielle (1919) avec un projectile rapide : l' α , issu d'une source radioactive.



Le diagramme de Livingston

- Note: SSC (Supercollisionneur supraconducteur, ex-concurrent du LHC, abandonné)
- Il manque FCC et ILC ou CLIC)
- Paramètre nouveau: le courant



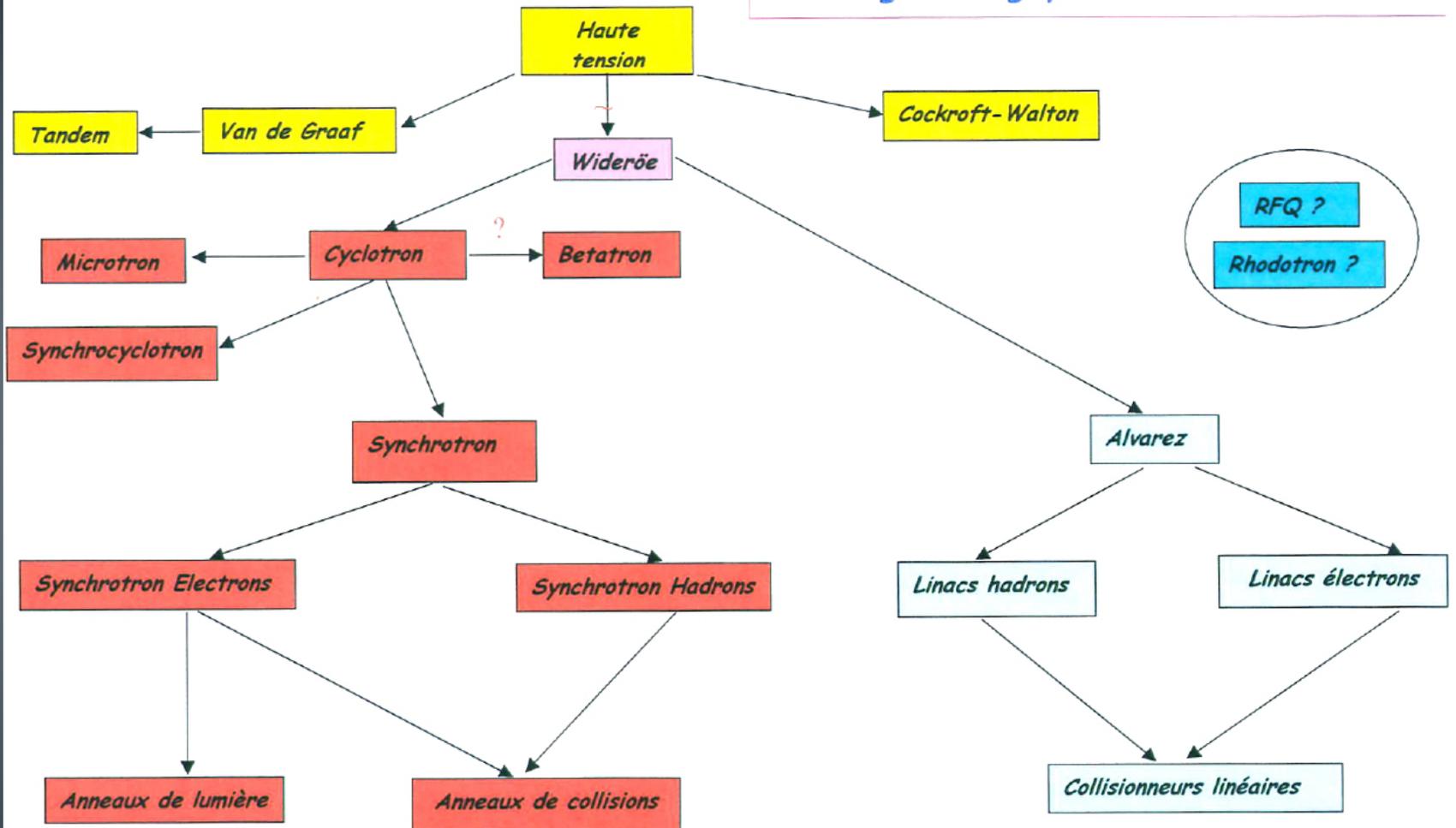
Quelques dates (non exhaustif)

- Début 20ème siècle: Rutherford
- Vers 1930: invention par Cocroft et Walton du premier accélérateur électrostatique de 700 kV, van de Graaf atteint 1.2 MV
- Invention du cyclotron par Lawrence
- Invention du linac par Wideroe
- 1944: Synchrotron (Mac Millan and Co)
- 1946: premier linac à protons type Alvarez par...Alvarez
- 1950: Focalisation forte par Christofilos)
- 1954: implantation de la focalisation forte à Brookhaven par Courant, Livingston et Snyder
- Saturne 1 sera néanmoins construit à focalisation faible (crainte des résonances)
- 1970: invention du RFQ (Radio Frequency Quadrupôle) aujourd'hui tête des linacs à ions
- Années 80: développement des aimants supraconducteurs, des sources ECR (Geller)
- Années 90: Développement des cavités supraconductrices
- LEP: début années 90, pendant environ 10 ans.
- ESRF: premier faisceau en 1992

Accélérateurs à électrons ou à ions

- A même énergie cinétique, un électron est beaucoup plus rapide qu'un proton
- Il y a donc deux types de grandes machines
- **Les machines à particules légères**, où la vitesse des particules est celle de la lumière, et où les structures sont toutes identiques
 - Structures périodiques
 - Fréquence fixe
- **Les machines à particules lourdes**, où la vitesse varie
 - Structures différentes selon l'énergie dans les linacs
 - Fréquences variables dans les anneaux

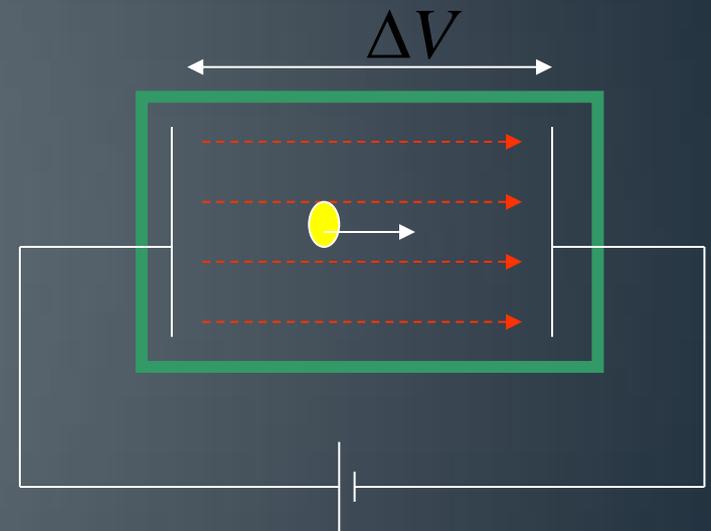
Arbre généalogique des accélérateurs



Le principe de l'accélération

- Accélération par un champ électrique statique
- L'énergie est indépendante de la masse de l'ion
- Unité: l'électron-volt
- Ou l'eV par nucléon
- Unités pratiques: le MeV, GeV, TeV

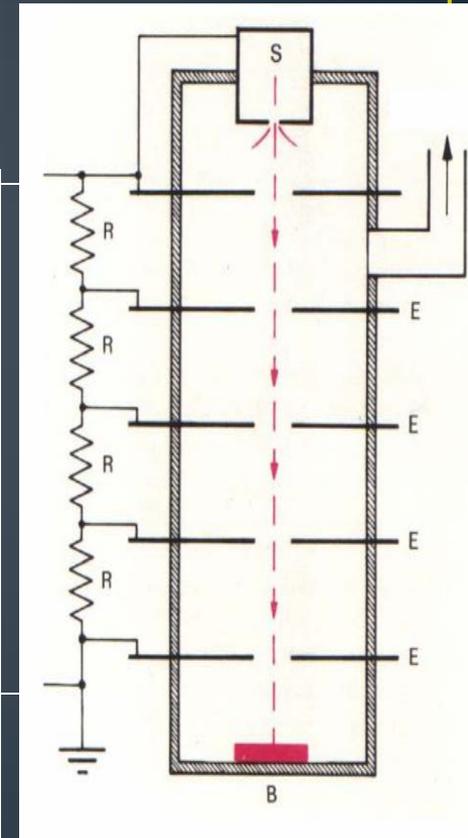
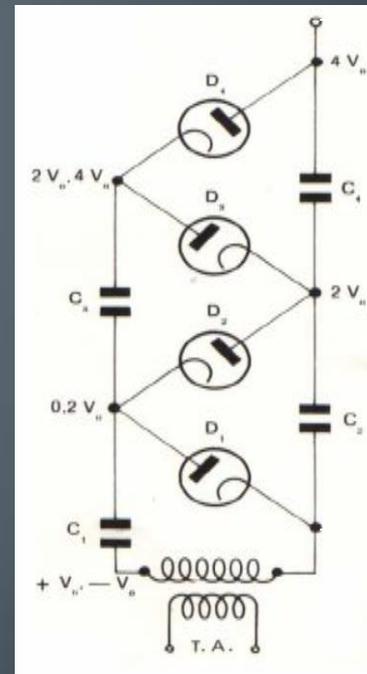
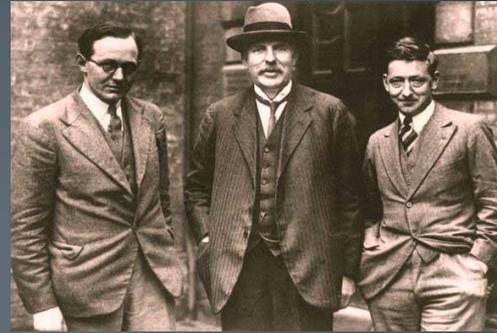
Energie stockée dans le LHC (10^{14} protons de 7 TeV) versus un Boeing 747 de 170 tonnes?



$$\Delta E = q\Delta V$$

Accélérateurs électrostatiques

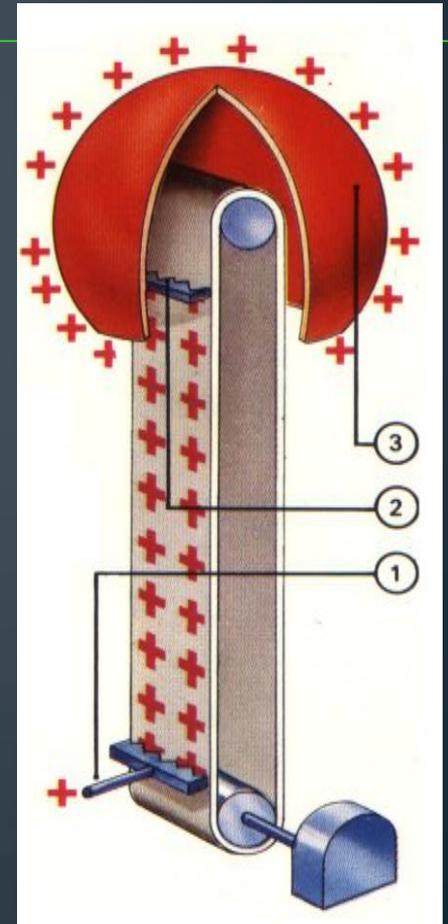
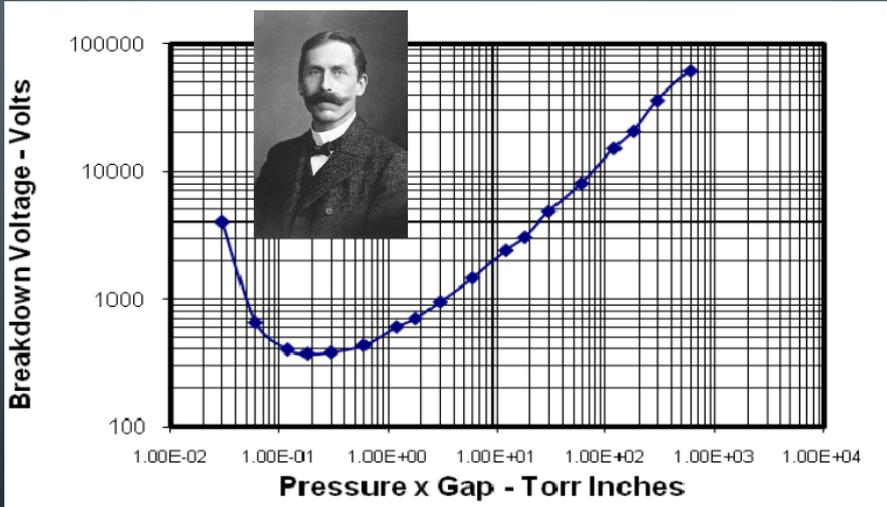
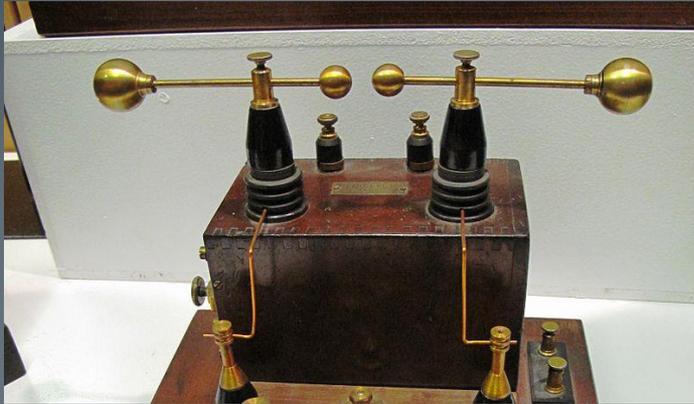
- Cockroft, Walton et Ernest
- Limité à 1.25 MV
- Toujours en usage (injecteur de PSI), Fermilab



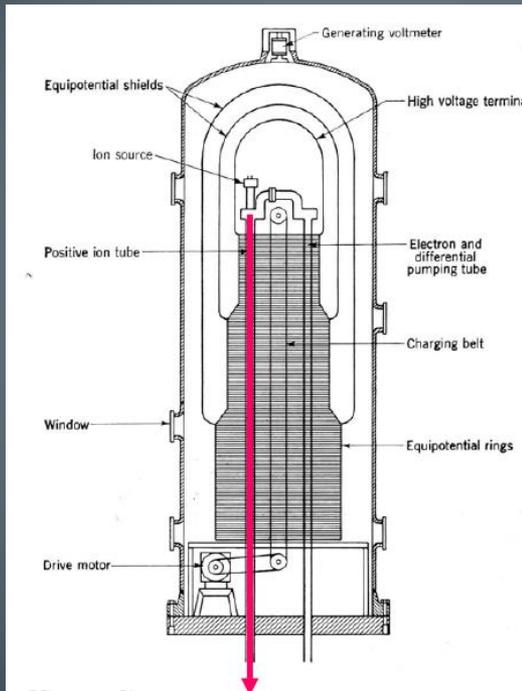
Limitation en tension (claquages).

Loi de Paschen - Accélérateurs Van de Graaf

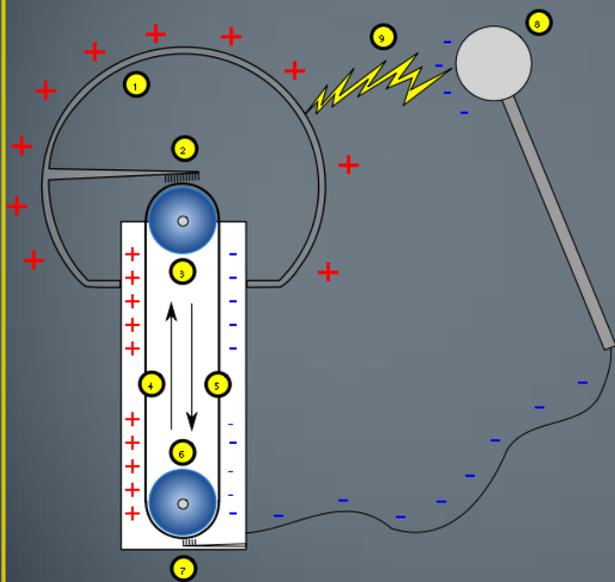
- Air: 3MV/m
 - Vide: 25 MV/m en théorie
 - Air sec, Azote ou SF₆ sous pression
- 10 MV



Van de Graaf - suite



Générateur Van de Graaf: avantages



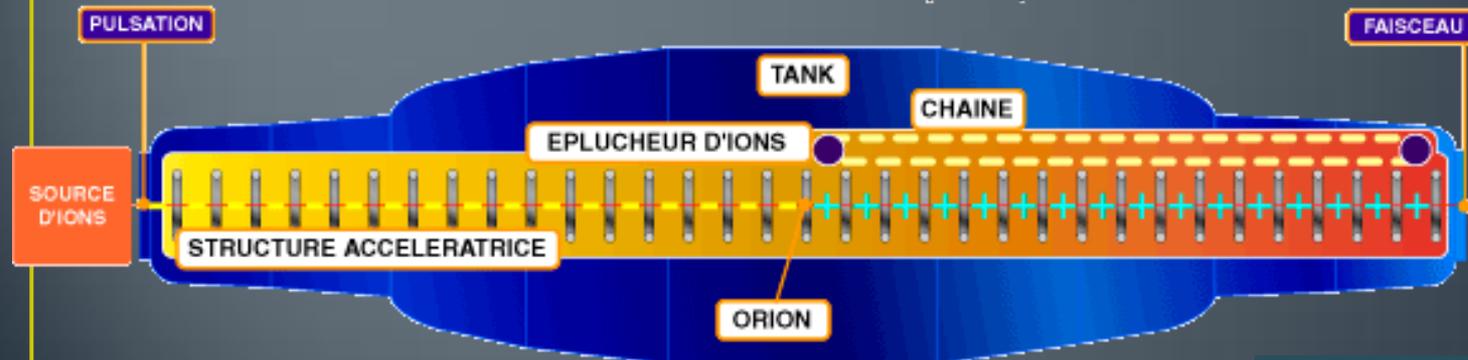
Tandem: l'exemple d'Orsay

Qualités et défauts

- Qualité faisceau, cylindrique, continu
- E variable
- Limité en tension



TANDEM : Schéma de principe

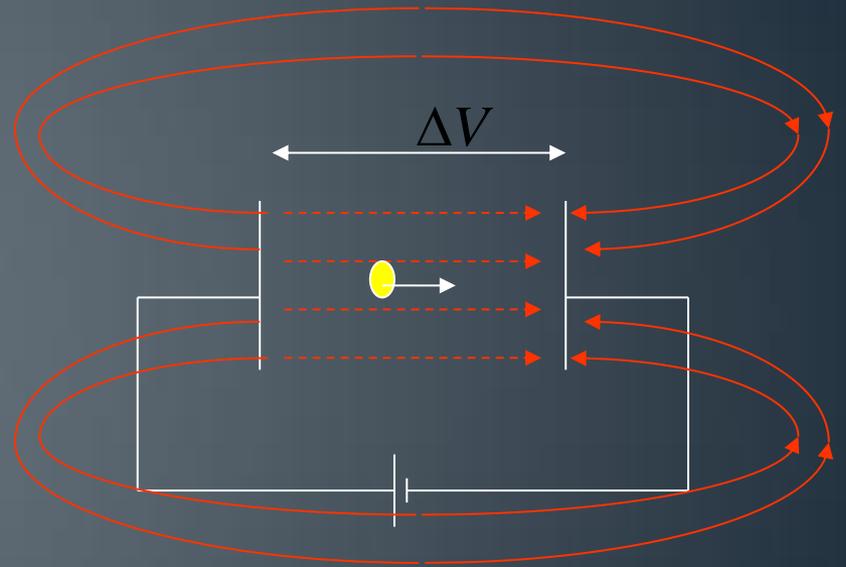


Tandem ORSAY: 15 MV – Ions Hydrogène, Hélium, Carbone, NH etc

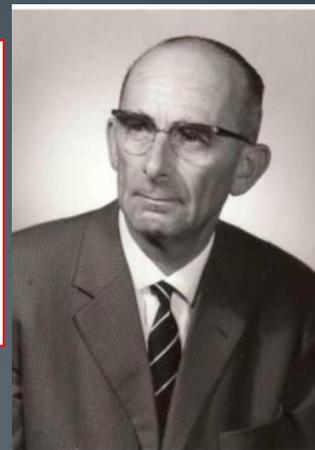
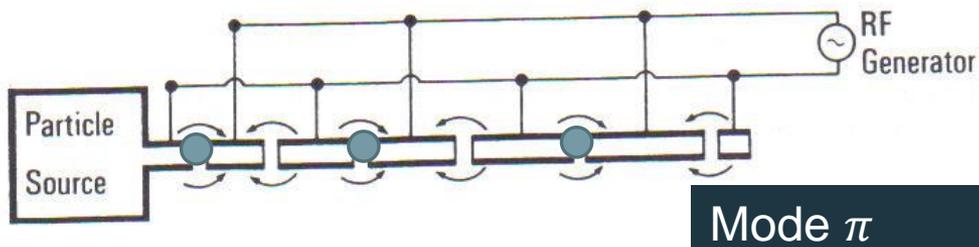
18-25 MV au terminal
 $T=V(1+Q)$

Et si l'on veut plus de 20 MV et/ou une structure compacte?

- Il suffit de repasser dans la machine
- Mais ça ne marche pas avec un potentiel statique:
- Le champ est décélérateur à l'extérieur
- $E=qV$ avec $V(v=0)=0$

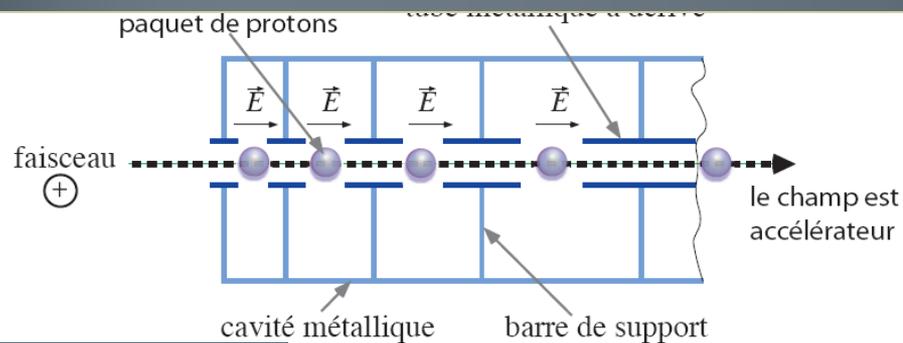


La solution: l'accélération radiofréquence (Wideröe)

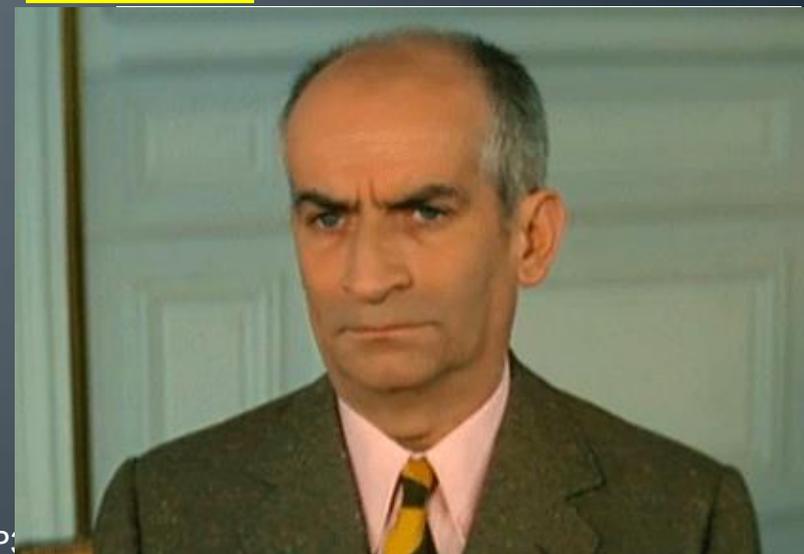
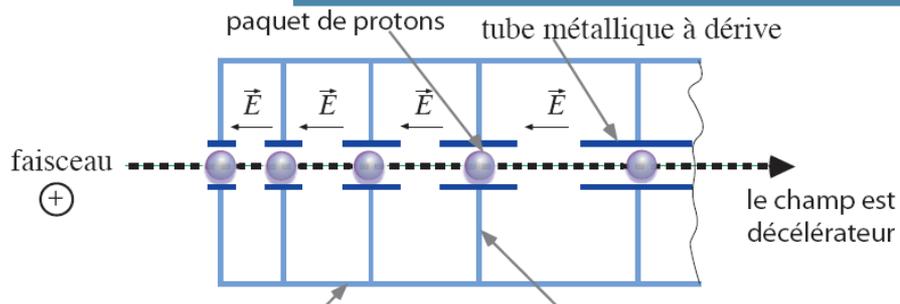


$$L = n\beta \frac{\lambda}{2}$$

Mode π ou 2π

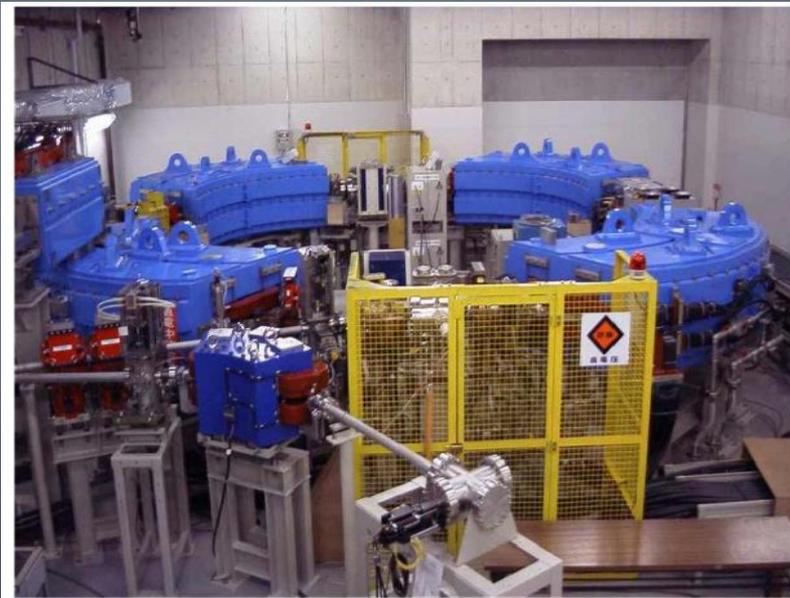
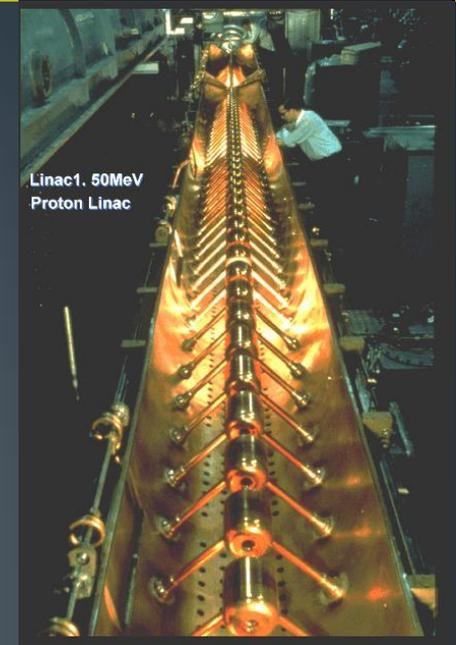


Mode 2π



Quelques exemples

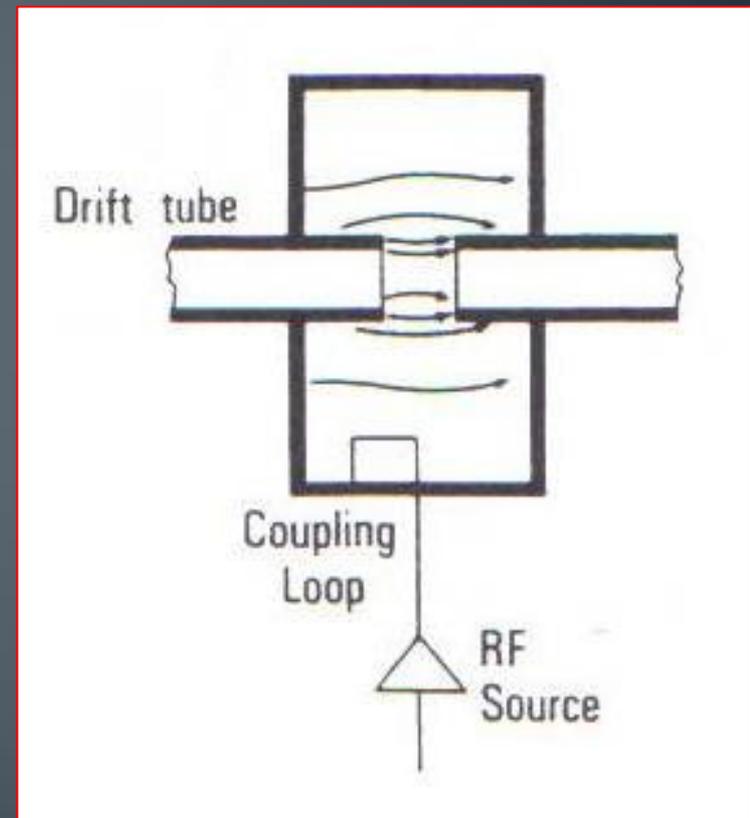
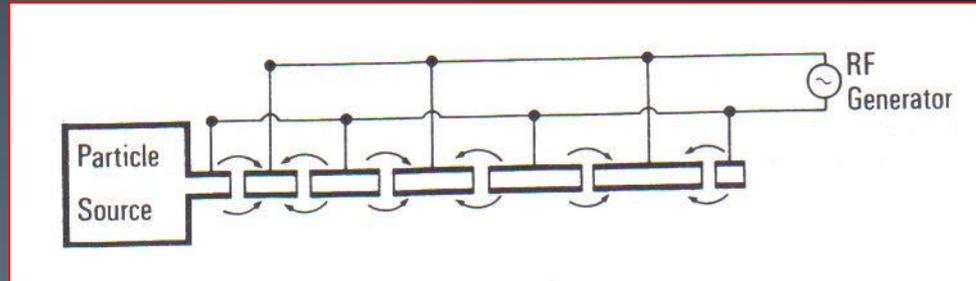
- Le LINAC (ici CERN, protons)
- Le cyclotron
- Le synchrotron



Accélération dans des structures linéaires

Limites

- Longueur pour protons de 1 MeV à 7 MHz ?
 - $\beta=0.045$
 - $L=0.95\text{m}$
- L pour électrons de 1 MeV ?
 - $\beta=0.94$
 - $L=20\text{m!}$
- Augmenter f réduit la longueur
- Courant traversant le gap inter-drifts
 - → rayonnement
 - → fermer le système
 - → cavité radiofréquence



Quelques exemples

- Mode π et 2π
- Alvarez: linéaires à protons
- f: 352 MHz typique
- Ex: protons de 200 MeV

$$\beta = 0.566$$
$$\beta\lambda \approx 0.5m$$

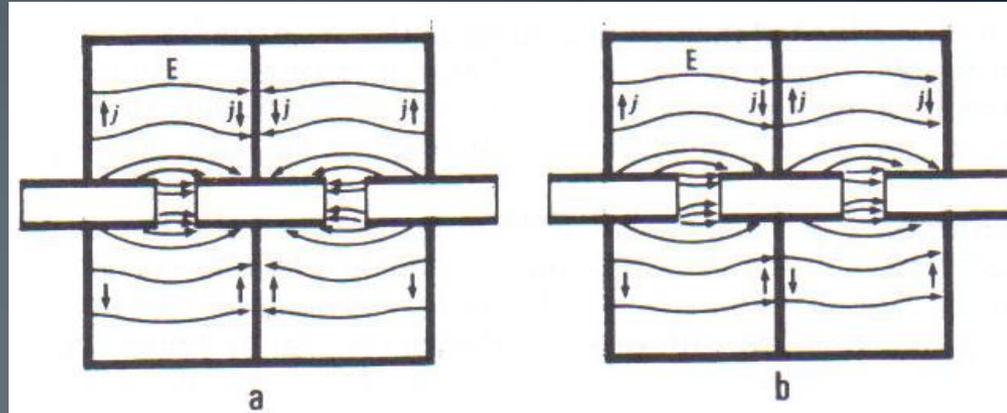


Fig. 4 Adjacent single-gap cavities: a) π mode, b) 2π mode

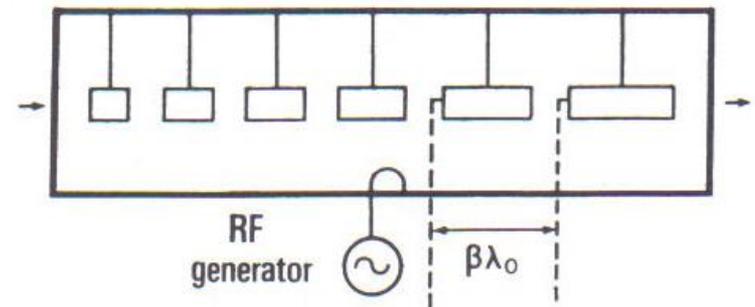
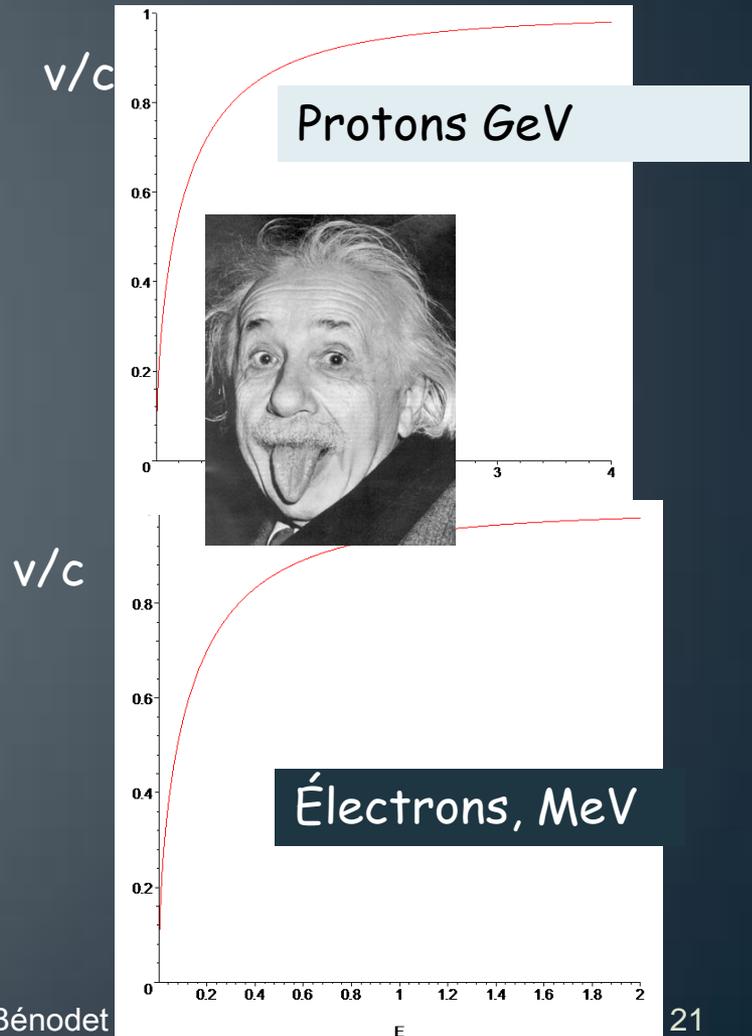


Fig. 5 Alvarez-type structure

La structure doit être adaptée à la vitesse: à cause d'Albert

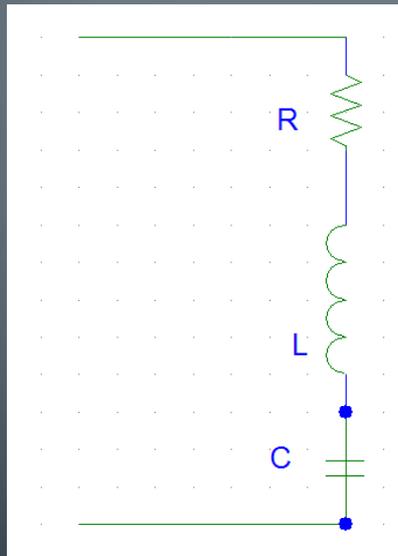
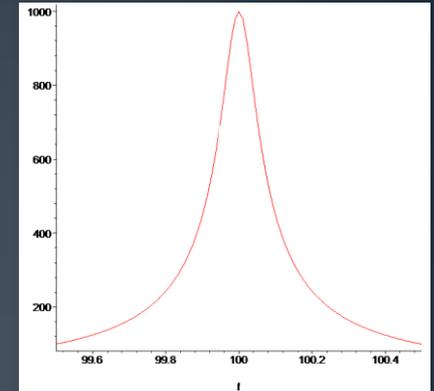
- Structures à électrons: vitesse constante
- Structures à protons: vitesse variable
- Les machines à protons devront avoir une structure variable en fonction de la vitesse
 - Cavités de types différents pour les linacs
 - Cavités large bande pour les synchrotrons



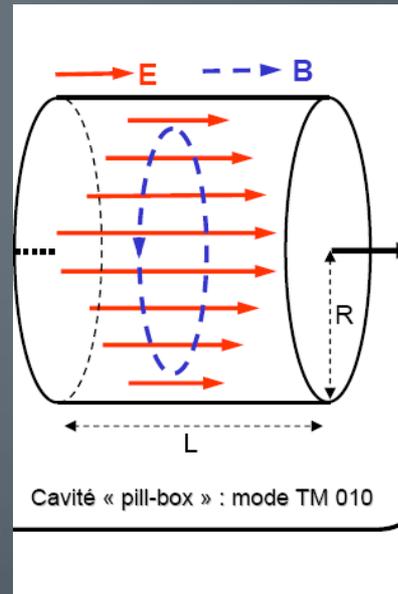
Obtention d'une tension élevée: le circuit résonant, pas le transformateur!

- A la résonance, la tension aux bornes de la capacité est multipliée par le facteur de surtension Q

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$



V_g



V_c

Cavité « pill-box » : mode TM 010

$$\frac{(\Delta f)_{3dB}}{f_0} = \frac{1}{Q}$$

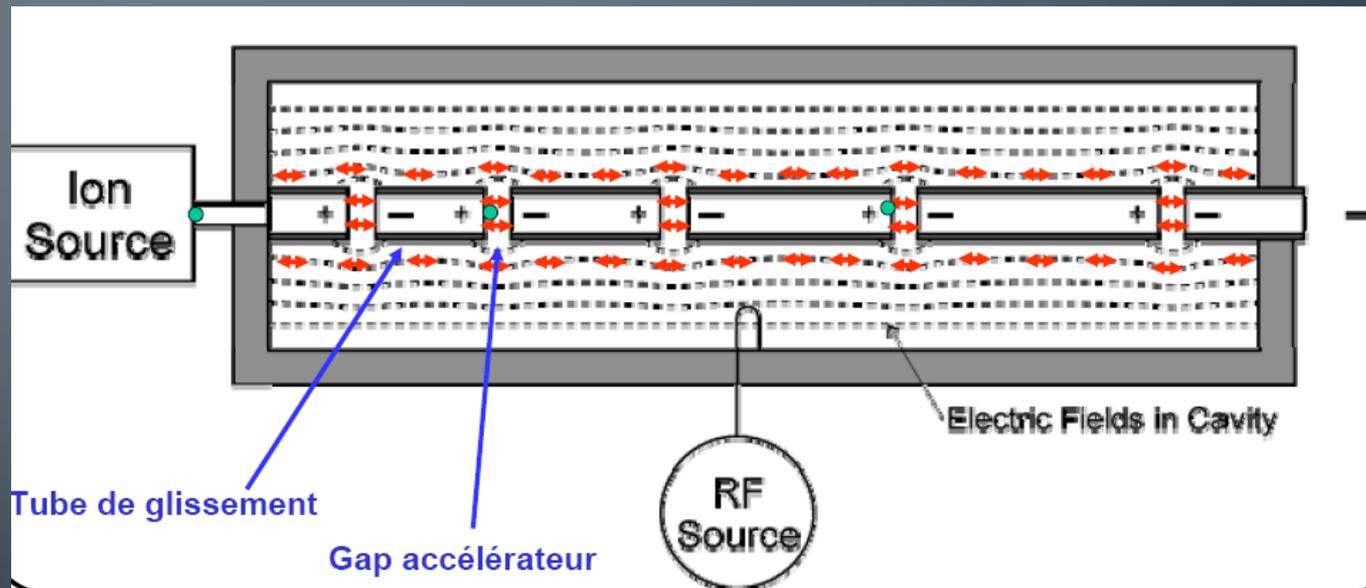
$$Q = 2\pi \frac{\text{Energie stockée}}{\text{Energie perdue par période}}$$

Q: 10000 pour non supra
Q: 10^8 10^9 en supra

$$V_c = Q \cdot V_G$$

Quelques exemples de structures accélératrices

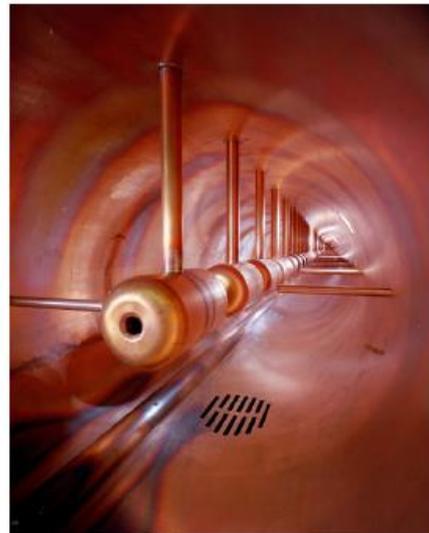
- Le Drift Tube Linac (DTL) pour les ions/protons de basse énergie (quelques MeV)



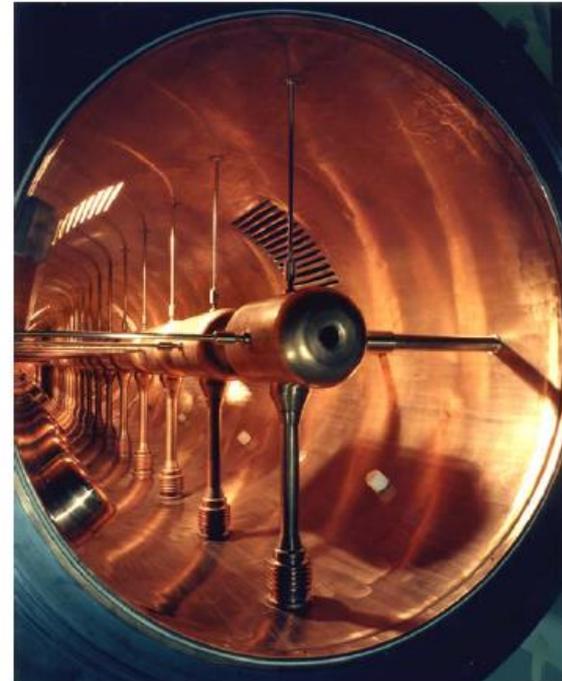
Exemples de "DTL Alvarez" (suite)



Saturne DTL (Saclay) :
-> 20 MeV, 200 MHz



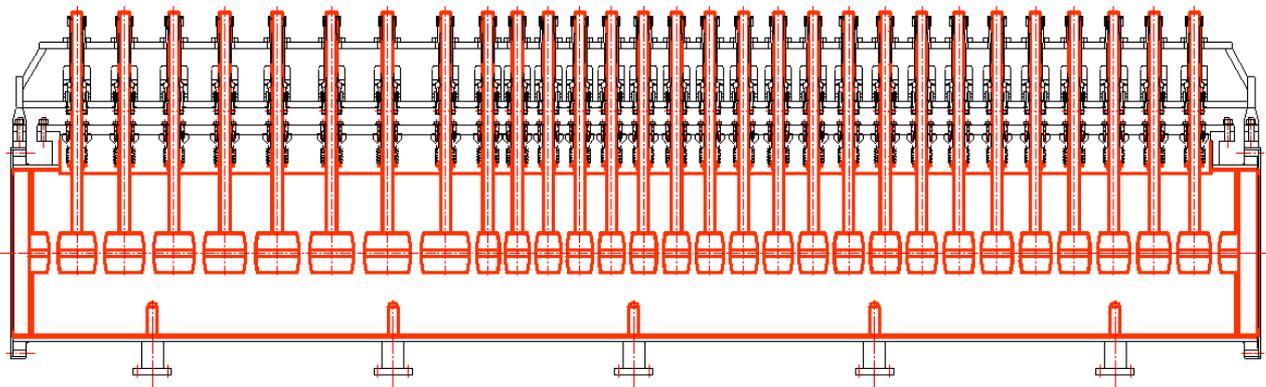
Fermilab DTL :
-> 116 MeV, 425 MHz



AGS DTL (Brookhaven) :
-> 200 MeV, 201.25 MHz

DTL pour LINAC4: avec des aimants permanents

Longitudinal section of the DTL



Focalisation et accélération

| | Stainless Steel shell | Copper shell |
|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Internal diameter | 508 mm | 500 mm |
| Thickness | 12... 14 mm | 4 mm |
| Length | 3800 mm (external) | 3605 mm (internal) |

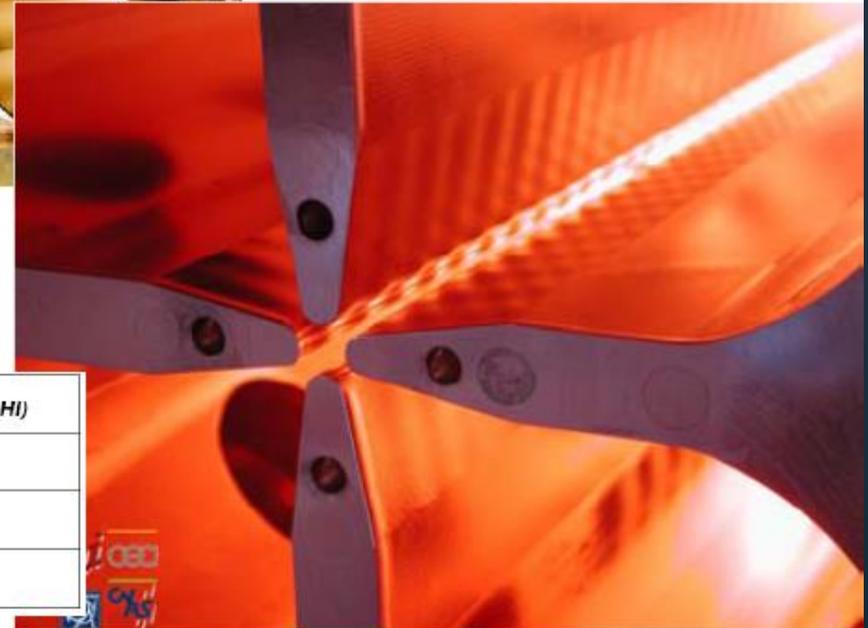
3 tanks 3-40 MeV



A basse énergie: le RFQ (Quadripôle RadioFréquence) Exemple: injecteur de CNAO ou HIT (hadronthérapie)



IPHI RFQ (Saclay) :
0.1->3 MeV, 352 MHz



Puissances dans IPHI 5 MeV

| | 6 mA operation (XADS) | 100 mA operation (IPHI) |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Dissipated power on copper | 1200 kW | 1200 kW |
| Beam loading power | 30 kW | 500 kW |
| Total RFQ power | 1230 kW | 1700 kW |

Modes H (Frankfurt)

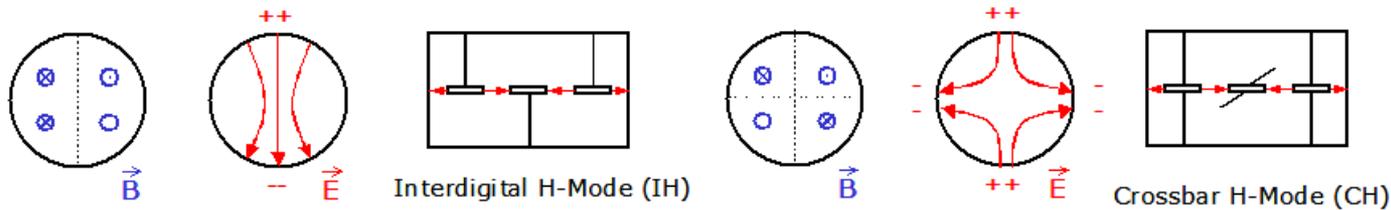
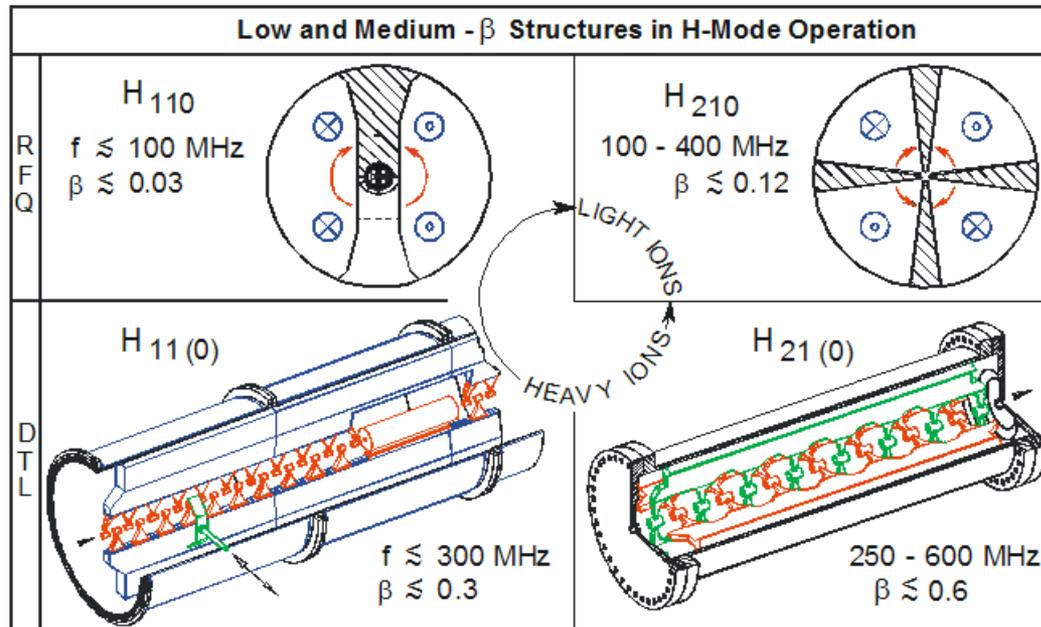
Seconde partie de l'injecteur de HIT et CNAO

HIPPI

High Intensity Pulsed Proton Injector (HIPPI) Meeting in Grenoble

JOHANN WOLFGANG GOETHE
UNIVERSITÄT
FRANKFURT AM MAIN

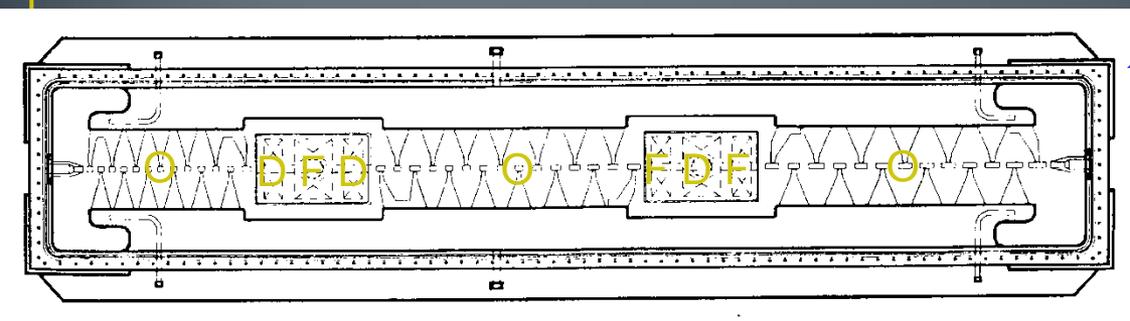
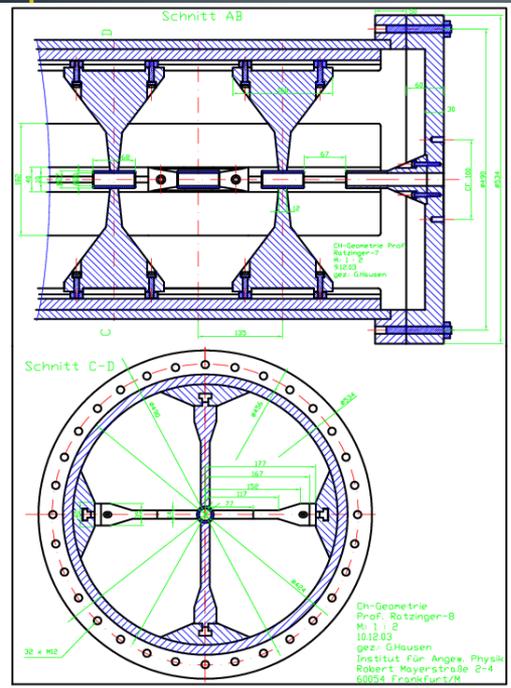
H-mode Structure Family



R. Tiede, Institute for Applied Physics (IAP), J.W.Goethe-University Frankfurt

6

Mode H: Frankfort mais aussi RexIsolde

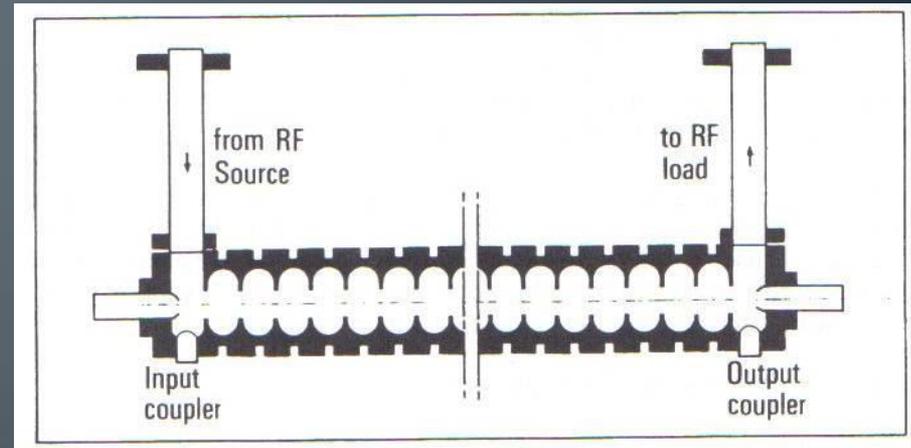
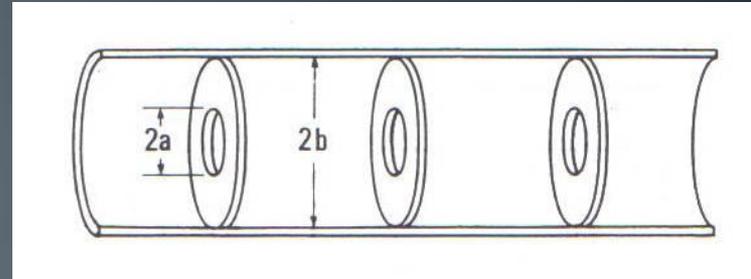


JM De Conto-Ecole IN2P3 Bénod

Rex-Isolde IH (CERN),
202.6 MHz

Particules ultra-relativistes (électrons)

- A 10 MeV un électron est relativiste ($v=c$)
- Une haute fréquence est nécessaire
 - Magnétrons ou klystrons (3 GHz, $\lambda=10\text{cm}$)
- Accélération par un champ électromagnétique
 - Avoir une vitesse de phase égale à c
 - Onde progressive
 - Onde stationnaire (non représenté)



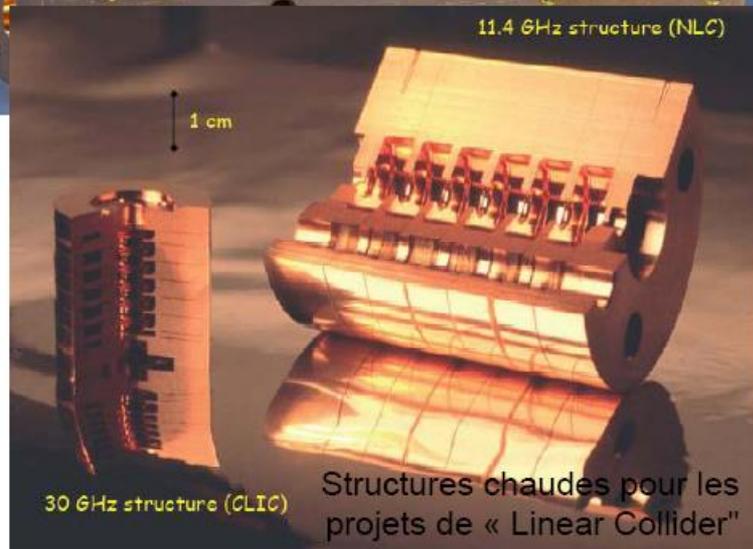
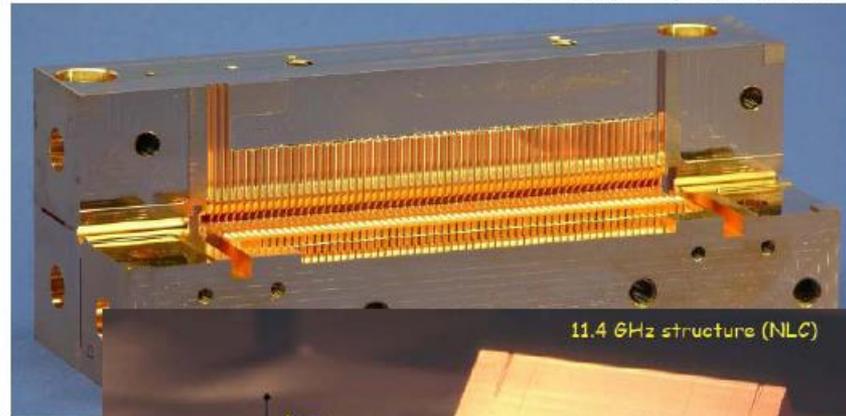
Exemples de structures à ondes progressives

Structure HDS pour CLIC (2004);
30 GHz, >150 MV/m !!!!! 🧐

LIL (injecteur LEP), réutilisé
pour ALTO à Orsay, 3 GHz



Injecteur ESRF, 200 MeV, 3 GHz



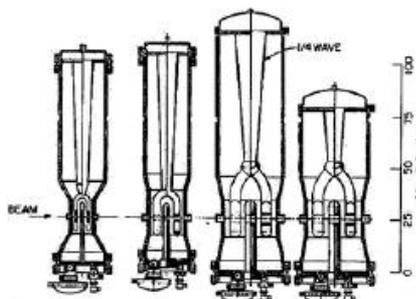
Structures chaudes pour les
projets de « Linear Collider »

Panorama par anticipation

$\beta = 0,01$

$\beta = 0,1$

$\beta = 1$



Structures inter-digitales (ATLAS, Argonne)
48 et 72 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,037$



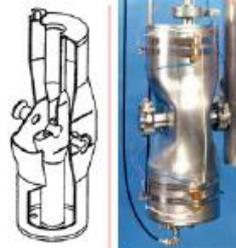
RFQs supra (Legnaro)
80 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,035$



Résonateurs split-ring (ATLAS, Argonne)
97 et 145 MHz - $\beta = 0,06$ à $0,16$



Résonateurs quart d'onde (ALPI, Legnaro)
80 à 352 MHz - $\beta = 0,047$ à $0,25$



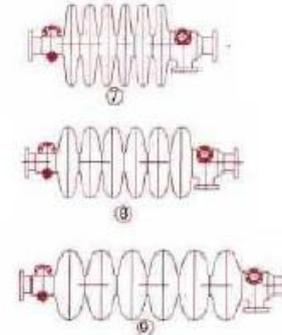
Résonateur demi-onde (Argonne)
355 MHz - $\beta = 0,12$

Cavité ré-entrante (Legnaro)
352 MHz - $\beta \geq 0,1$



Cavités spoke (CNRS Orsay)
352 MHz - $\beta = 0,15$ et $0,35$

Cavités elliptiques
350 MHz à 3 GHz - $\beta = 0,47$ à 1



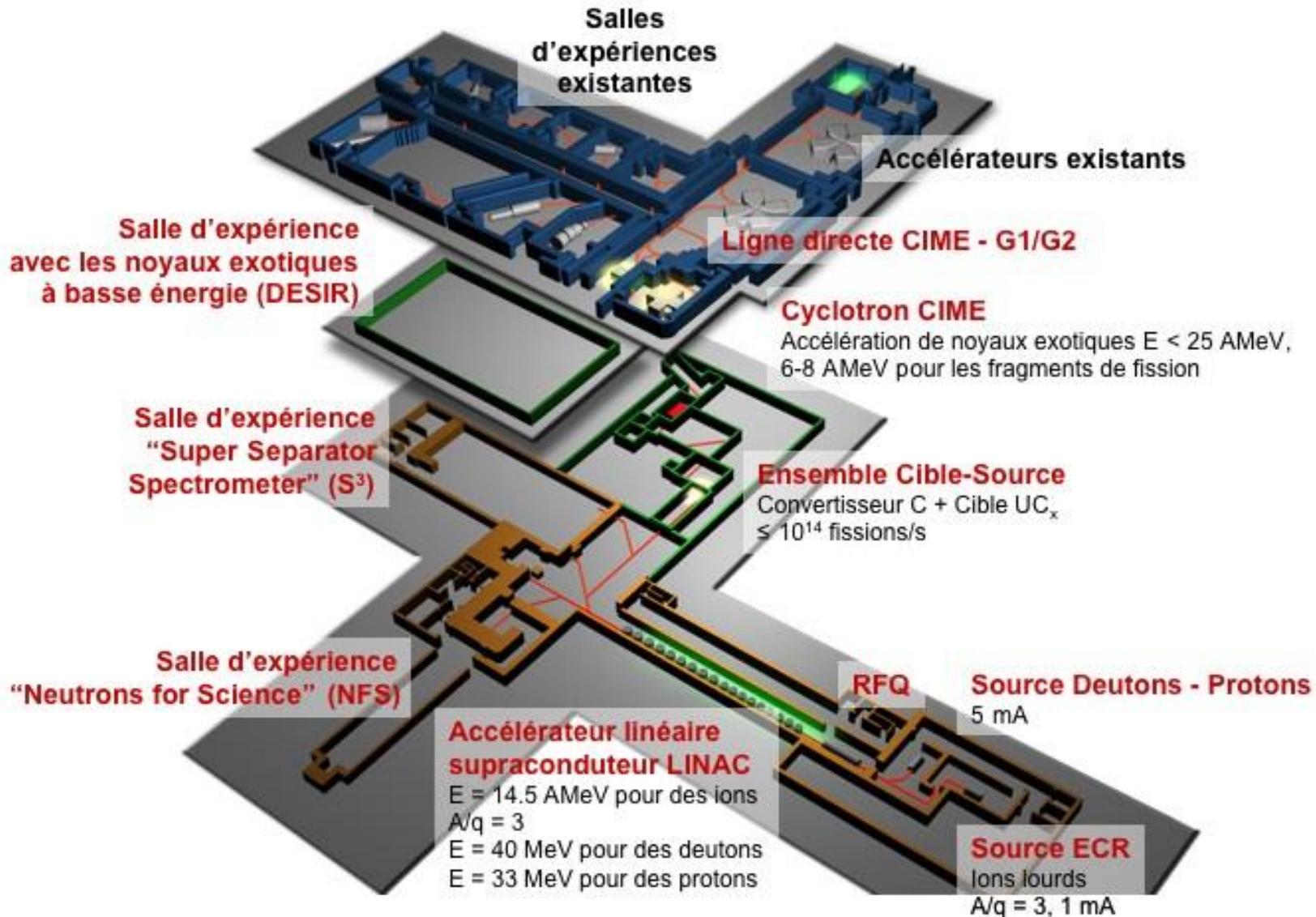
Cavité TTF
1,3 GHz - $\beta = 1$



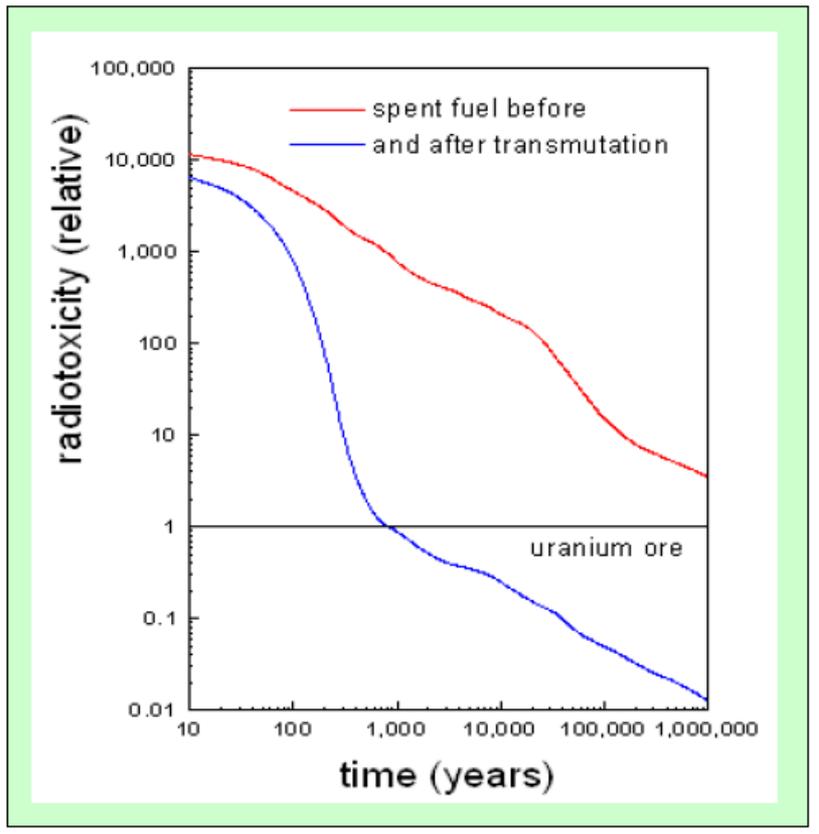
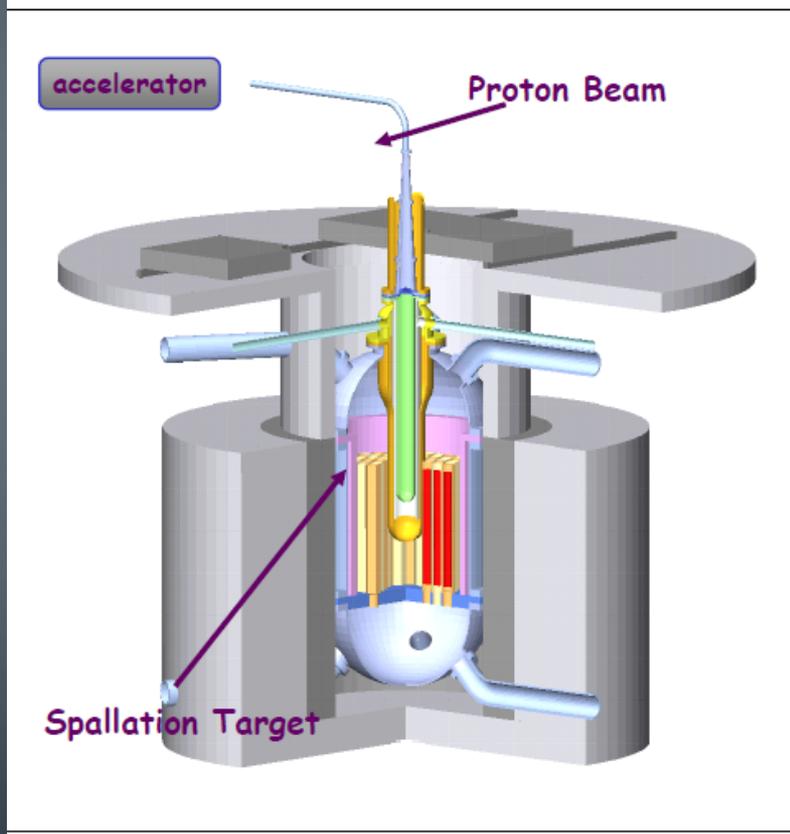
Cavité APT (Los Alamos)
700 MHz - $\beta = 0,64$

Rappel : $\beta = v/c$ ($c \approx 2,998 \cdot 10^8$ m/s)

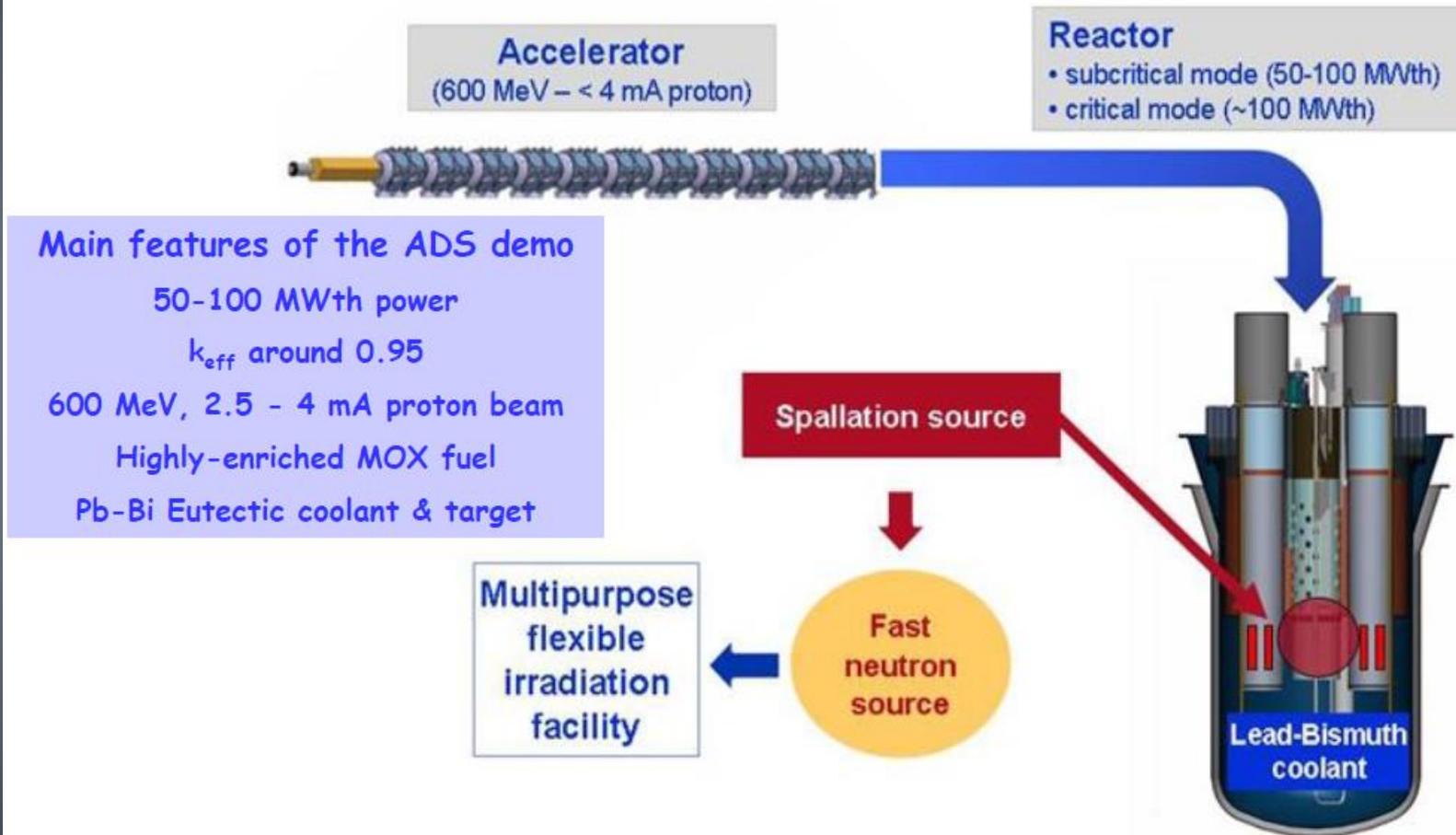
SPIRAL2



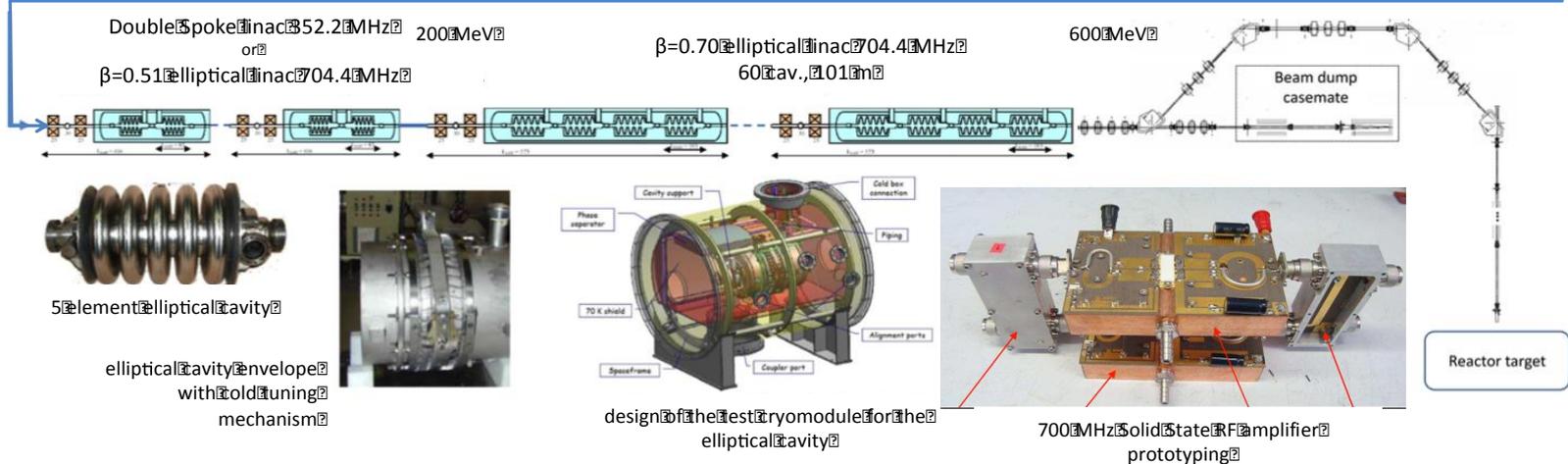
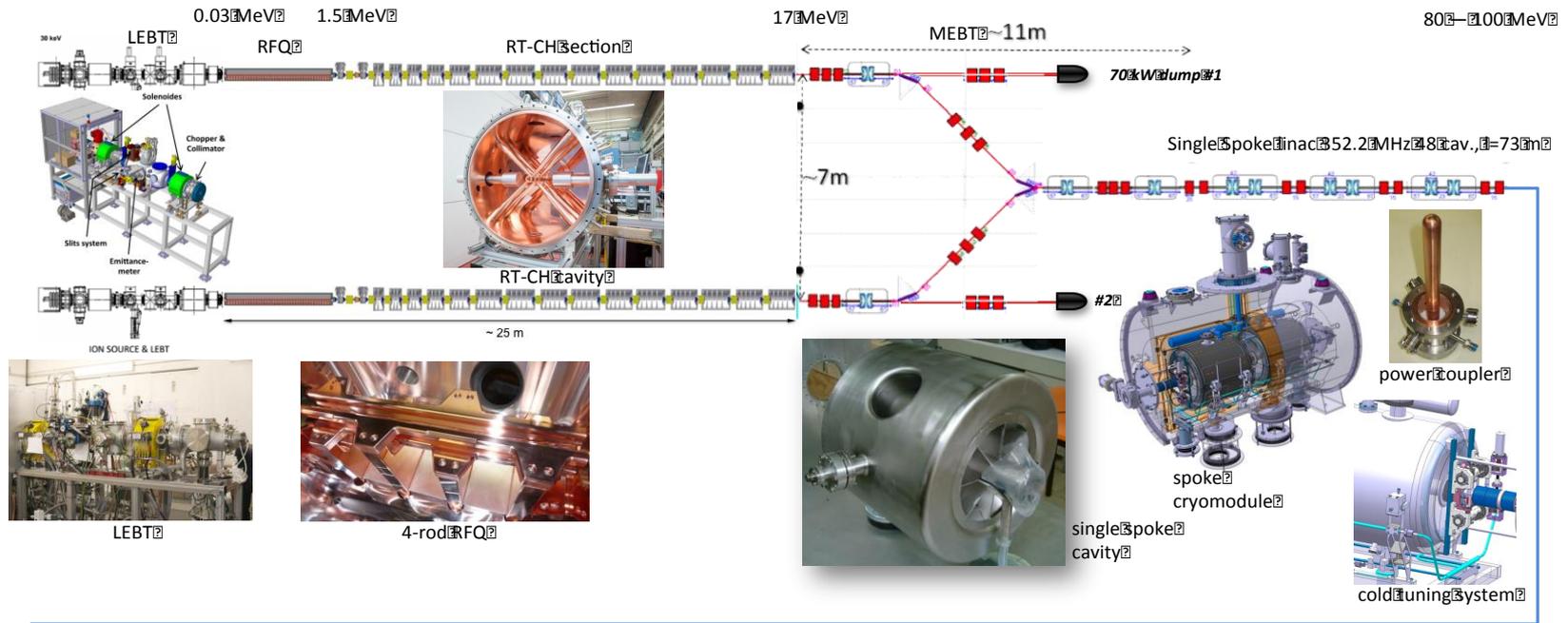
Accelerator Drive Systems: Incinération des déchets nucléaires



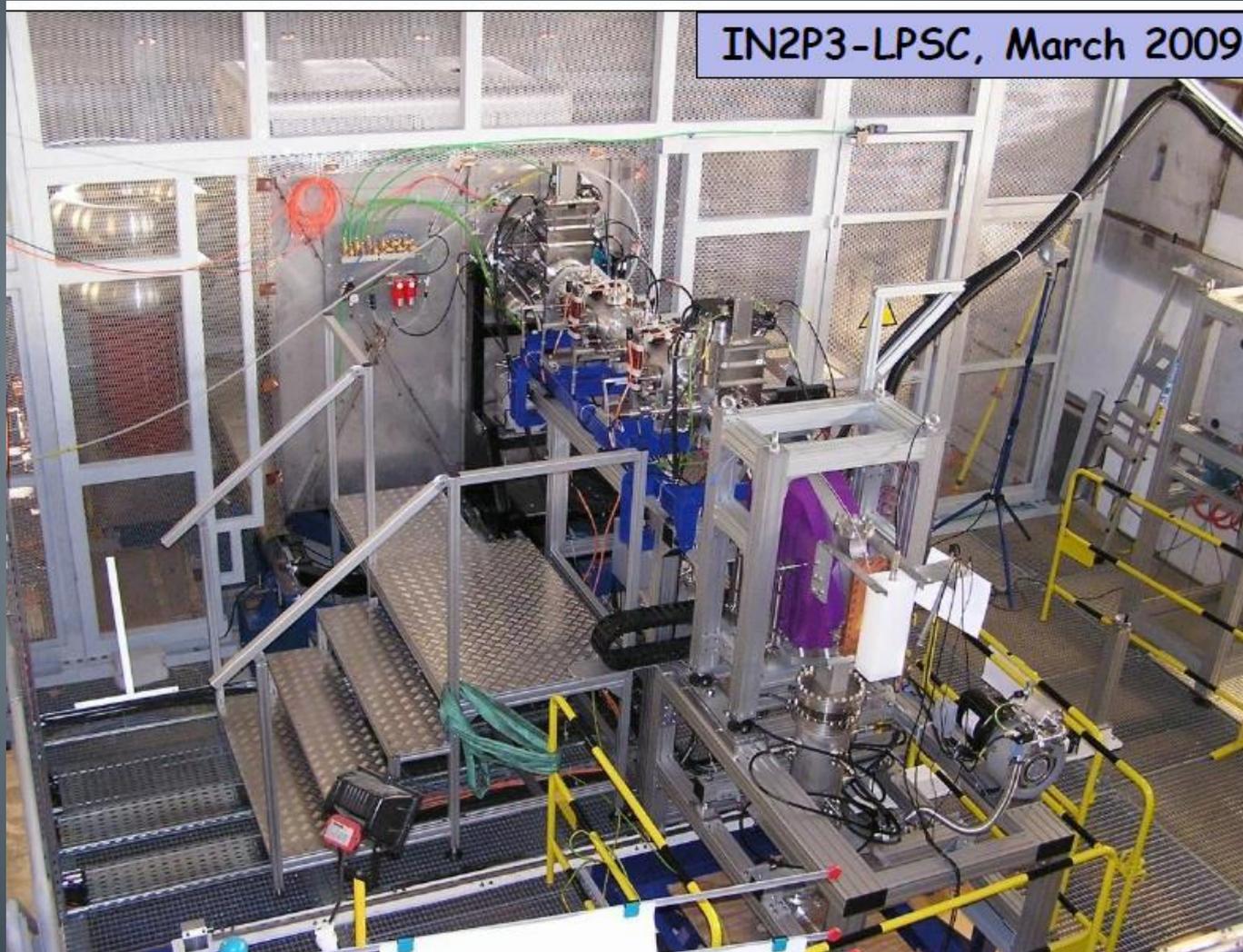
ADS Demonstrator = MYRRHA



MYRRHA accelerator design

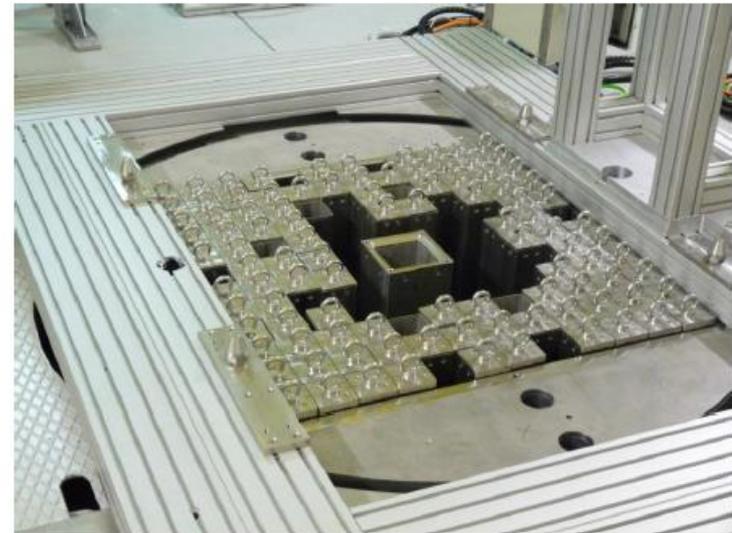
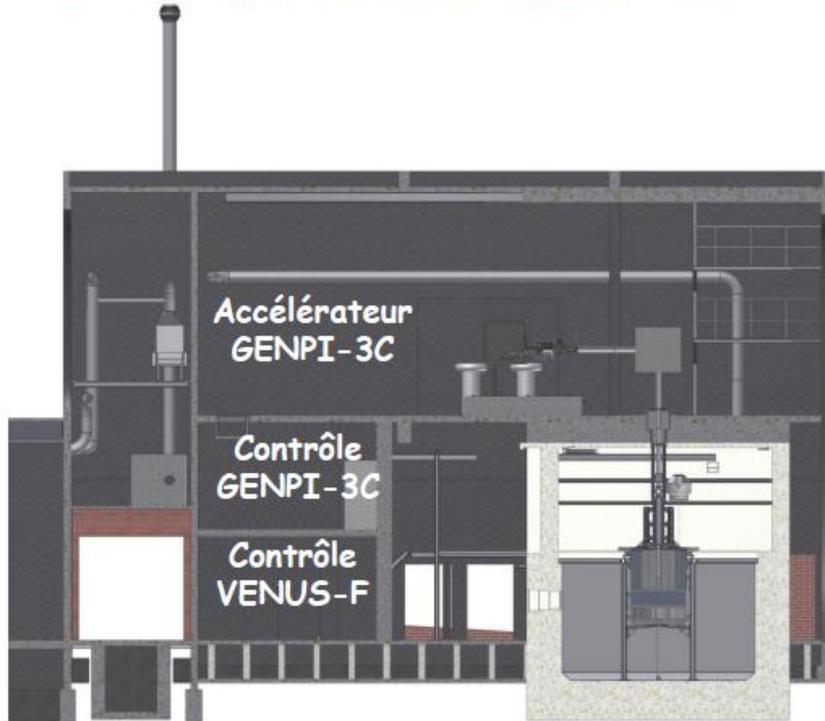
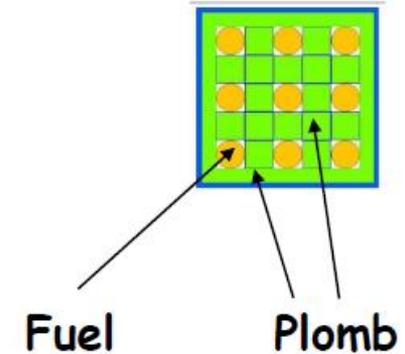


Avant MYRRHA: GUIVENERE@MOL



GUINEVERE (suite)

- neutron source GENEPI-3C (CNRS-IN2P3)
- VENUS experimental reactor (SCK-CEN)
- VENUS was light-water moderated but is transformed for GUINEVERE into a fast lead-moderated reactor
- 360 kg 30% enriched metallic U-235 fuel (CEA)



Ecole IN2P3 Accélérateurs, 5-9 Décembre 2011

Alex C. Mueller

79

Optique des faisceaux

Rappels d'optique

Emittance

Éléments de focalisation et de guidage

Repérage des particules

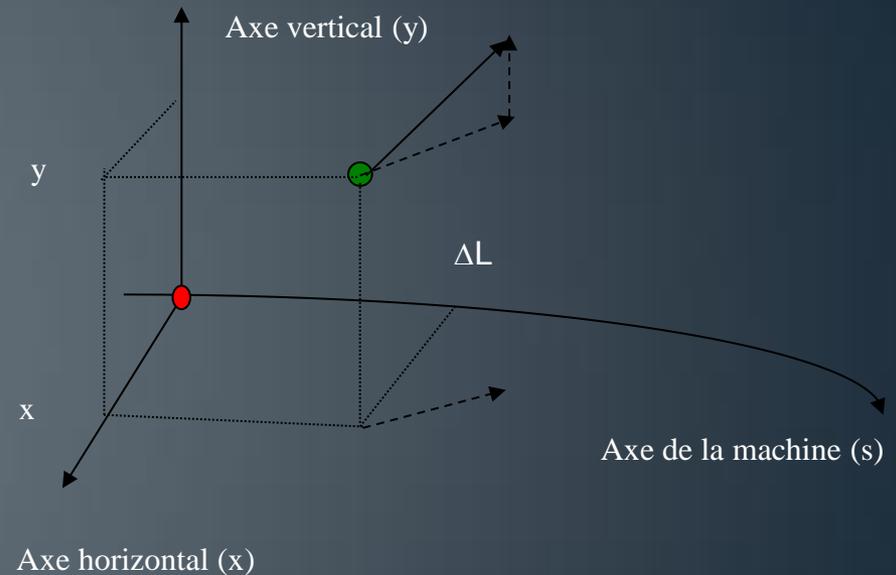
- Trajectoire et particule de référence

$$x' = \frac{p_x}{p_L} \quad y' = \frac{p_y}{p_L}$$

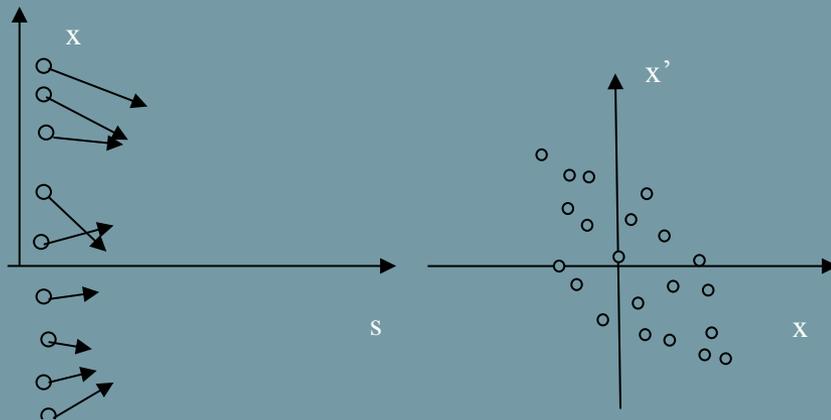
- Conditions de Gauss

x, x', y, y' petits

- $(x, x', y, y', \Delta L, \Delta p/p_0)$

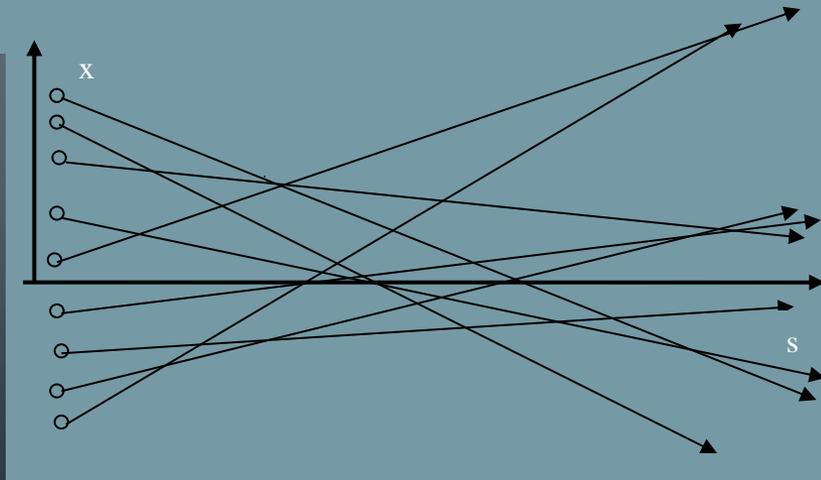


Faisceau réel et émittance



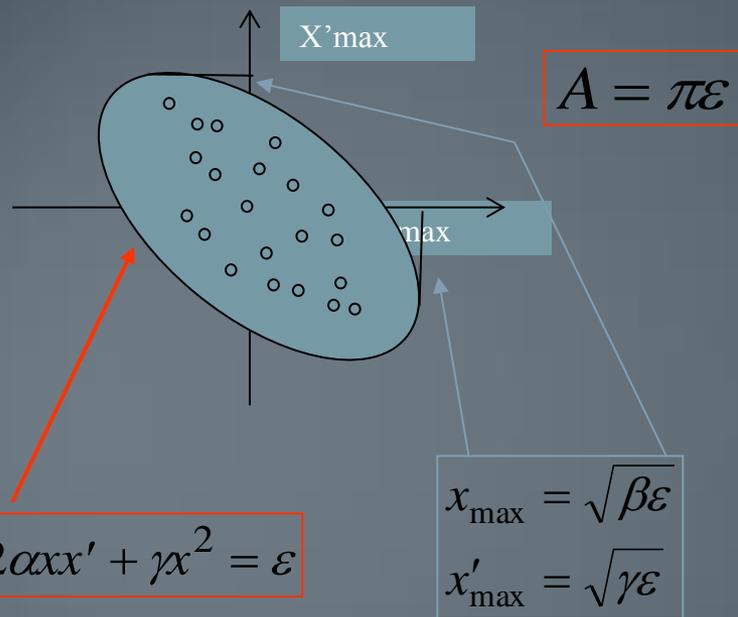
- Exemple sur espace sans champ
- (x, x') uniquement ici
- Minimum d'enveloppe (« waist » ou « col »)

- ➔ Caractériser globalement
- ➔ Émittance quadratique moyenne (« RMS »)



Emittance quadratique moyenne

on part des données statistiques du faisceau



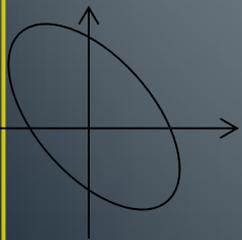
$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1$$

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_{x'}^2 - \sigma_{xx'}^2}$$

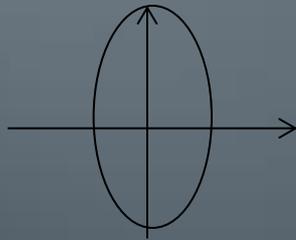
$$\beta \epsilon_{RMS} = \sigma_x^2 \rightarrow \beta = \frac{\sigma_x^2}{\epsilon_{RMS}}$$

$$\gamma \epsilon_{RMS} = \sigma_{x'}^2 \rightarrow \gamma = \frac{\sigma_{x'}^2}{\epsilon_{RMS}}$$

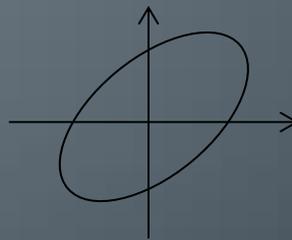
$$\epsilon = k \cdot \epsilon_{RMS}$$



$\alpha > 0$ (convergent)



$\alpha = 0$ (waist)



$\alpha < 0$ (divergent)

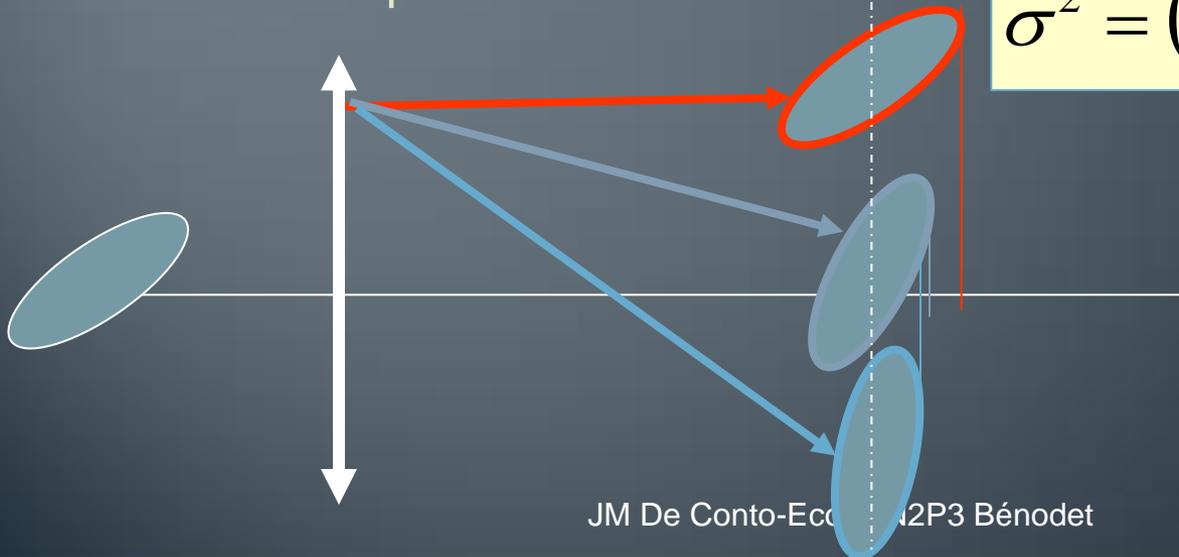
Plus ou moins de particules
incluses selon k et la distribution

Méthode des 3 gradients et émittance RMS

- La dimension quadratique moyenne varie le long de la structure en fonction de la focalisation
- Elle est reliée aux paramètres d'émittance
- On utilise une lentille connue dont on fait varier la force de focalisation
- On effectue N mesures de profil
- On obtient N équations à 4 inconnues

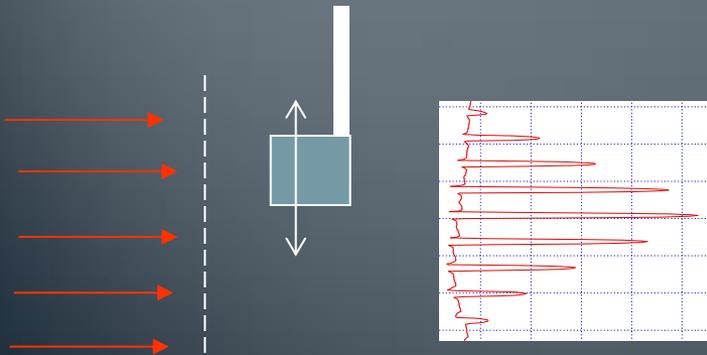
$$\langle x^2 \rangle = \sigma_0^2 = \beta_0 \varepsilon_{RMS}$$

$$\sigma^2 = (A\beta + B\alpha + C\gamma) \varepsilon_{RMS}$$

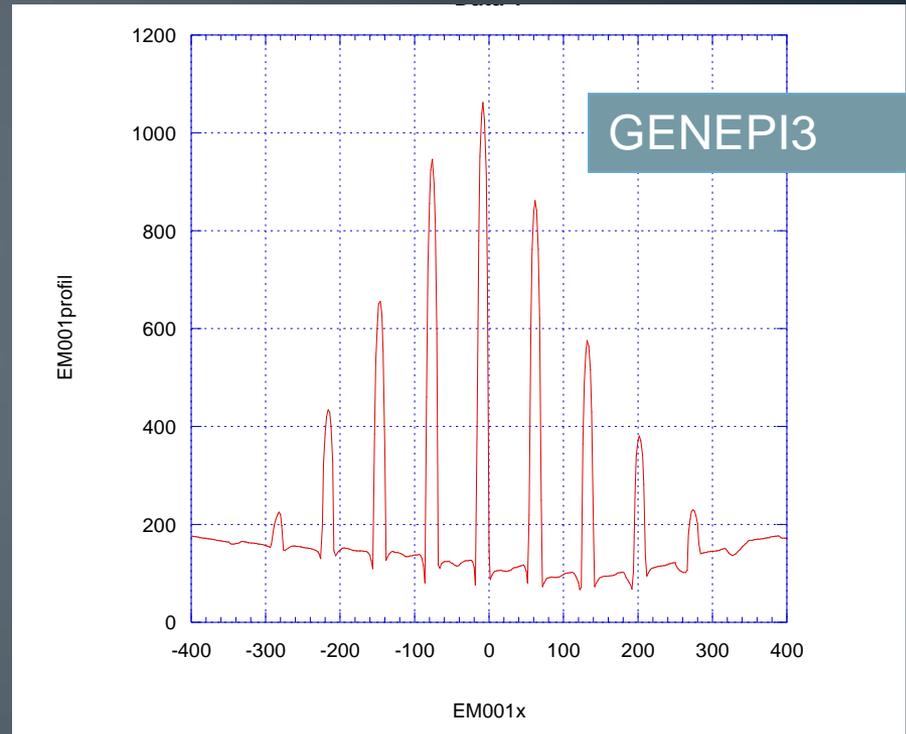


Mesures d'émittance par la méthode du pepper-pot

- ❑ Chambre à sténopé (pepper-pot en français!)
- ❑ Trous $\Phi 1.5\text{mm}$, entraxe 6.5mm sur un diamètre
- ❑ Coupelle de Faraday 52 mm en aval
- ❑ Ecartement de l'entraxe \rightarrow divergence ou convergence du faisceau
- ❑ Elargissement des trous \rightarrow divergence locale (épaisseur de l'ellipse)

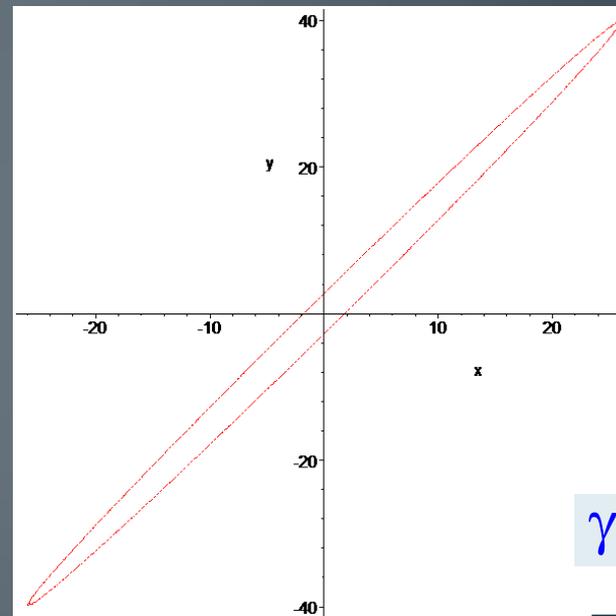
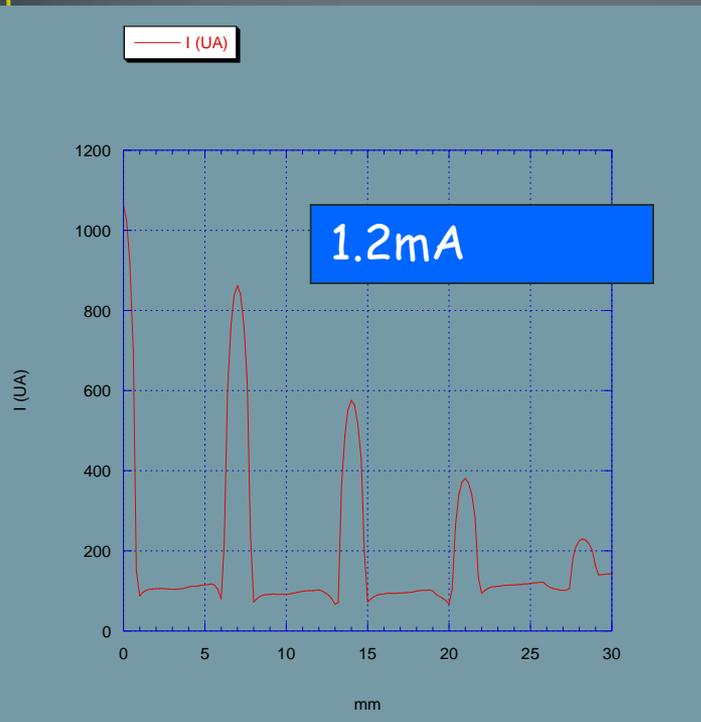


10èmes de mm et UA



Faisceau centré à
0.8mm près

Résultat: un faisceau homothétique à celui de GENEPI1(*)



$$\varepsilon := 72$$

$$\alpha := -14.4$$

$$\beta := 9.4$$

$$\gamma := 22.16595745$$

$$E = 26\text{mm}$$

$$E' = 40\text{mrad}$$

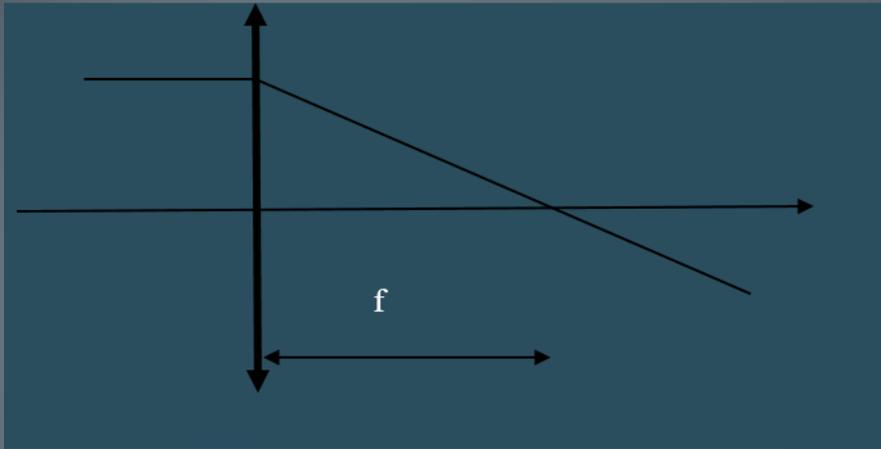
(*) Peu vous chaut, mais à moi, si!

- **Théorème de Liouville** : La quantité ε varie comme l'inverse de la quantité de mouvement.
- **Corollaire 1**: l'émittance diminue avec l'accélération.
- **Corollaire 2** : l'émittance n'est jamais nulle (sauf si elle est nulle au départ ce qui supposerait n'accélérer qu'une particule !).
- **Corollaire 3** : la dimension transverse et la divergence d'un faisceau ne sont jamais nulles.
- **Nota**: l'émittance RMS varie si l'optique est non linéaire
- Emittance normalisée: $\varepsilon^* = \beta_L \gamma_L \varepsilon$ ne varie pas avec E

Eléments optiques

Optique

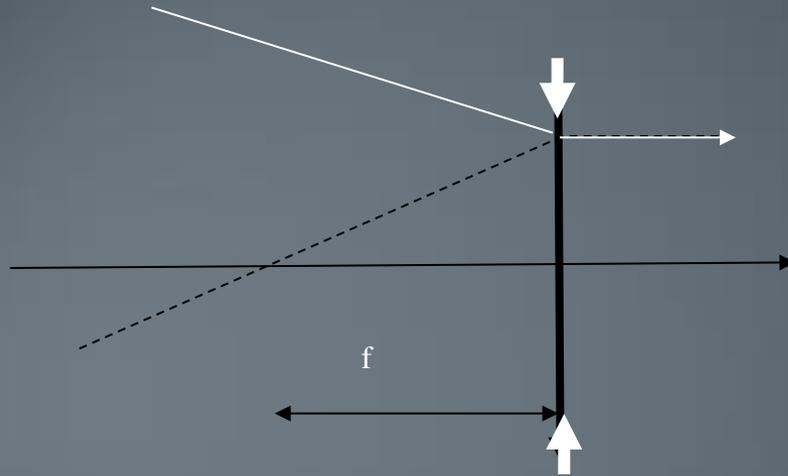
- *Définition* : une lentille mince est un élément de longueur nulle qui donne une déviation angulaire proportionnelle à la position sans changer cette dernière.



$$x_1 = x_0$$
$$x'_1 = x'_0 - \frac{x_0}{f}$$

- f est la distance focale de la lentille (position de son foyer). On a un signe « moins » quand la lentille est convergente.

Lentille divergente



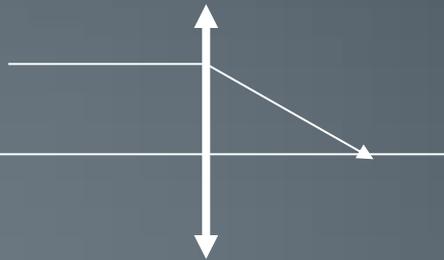
$$x_1 = x_0$$
$$x'_1 = x'_0 + \frac{x_0}{f}$$

- *Propriété* : Deux lentilles minces séparées par un espace sans champ, de même distance focale mais l'une étant divergente et l'autre convergente, forment un ensemble convergent. C'est cette propriété qui expliquera pourquoi une lentille électrostatique est convergente.

Punition en exo: montrer l'assertion précédente!

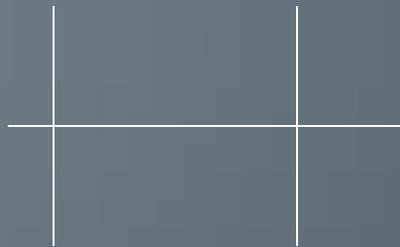
Lentille mince + espace de glissement

- Lentille mince



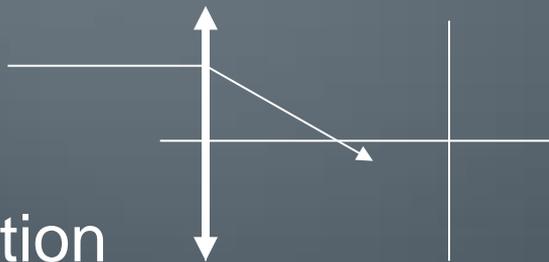
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

- Espace de glissement



$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

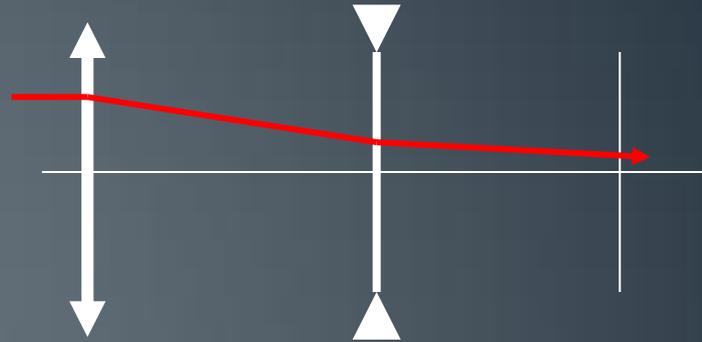
- Association



$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{L}{f} & L \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

La maille FODO- focalisation forte

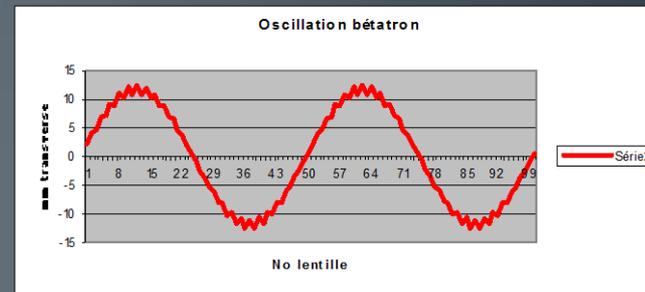
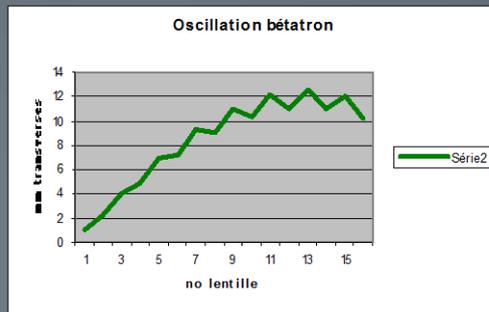
- Adapté aux structures à base quadripolaire
- Association de mailles
 - système périodique
 - Oscillation pseudo-harmonique
 - Pas toujours stable



$$\begin{bmatrix} \frac{f^2 - Lf - L^2}{f^2} & \frac{L(2f + L)}{f} \\ -\frac{L}{f^2} & \frac{f + L}{f} \end{bmatrix}$$

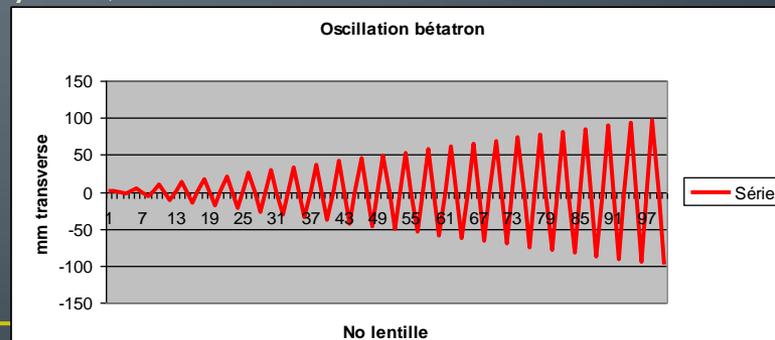
Association de quadripôles. Structure FODO.
Oscillation bêta-tron. Stabilité. Cf excell

- Qpôle: converge en x \leftrightarrow diverge en y
- Guidage stable \Rightarrow FODO périodique (par exemple)

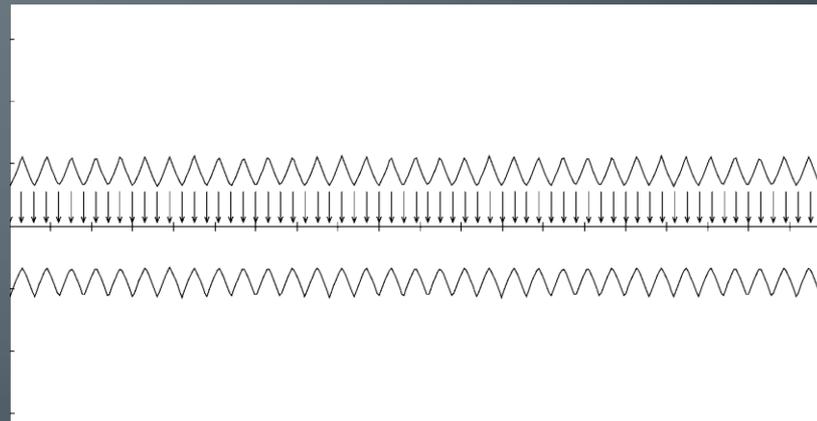
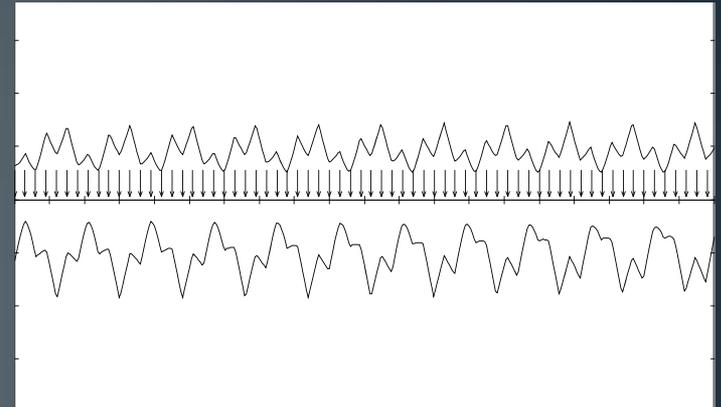
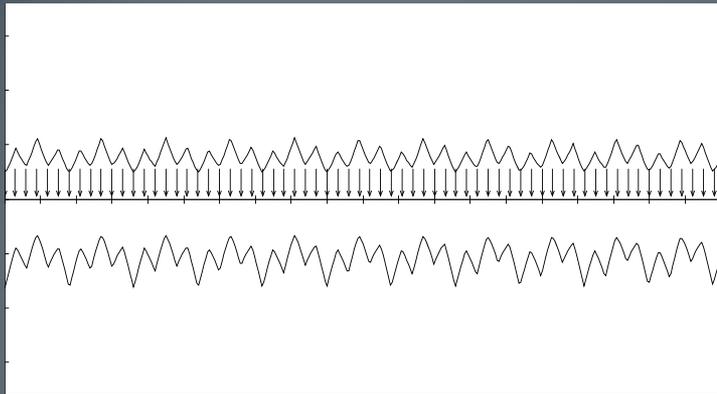


L=distance inter-lentilles

- Oscillation pseudo-harmonique «bêta-tron »
- FODO stable si $f > L/2$ (cf animation et ci-dessous)



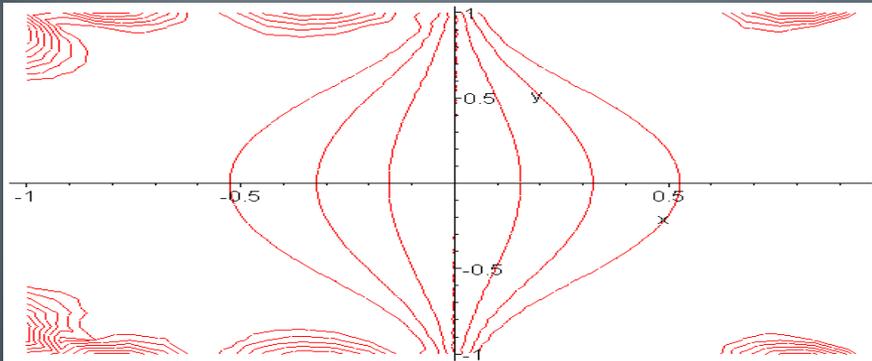
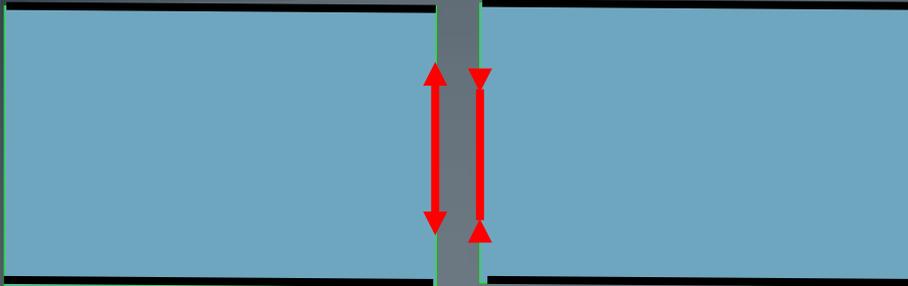
Systeme **périodique**: Adaptation d'émittance ou « matching »: il existe une forme d'émittance qui minimise l'amplitude des oscillations d'enveloppe



Lentille électrostatique de révolution

V1

V2



- Convergent dans gap
- Accélératrice ou décélératrice
 - Émittance, ch. Espace
 - +forte si décel.
- Indépendant de n
- Tension $\sim V$ faisceau
- Lent. fente $>$ lentille trou
- Ouverture $\sim R/2$
- Propreté!

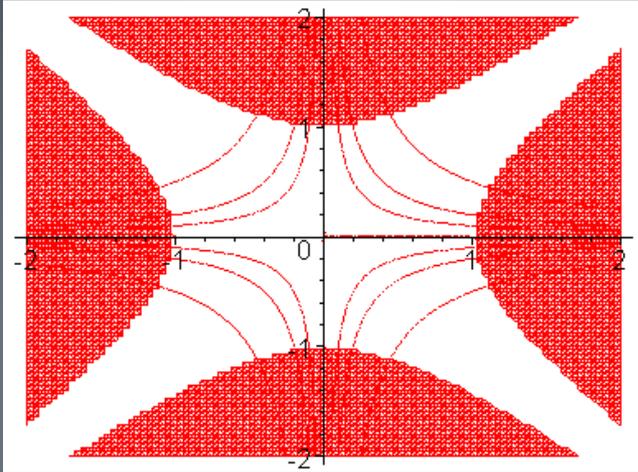
0

V

0



Quadripôle électrostatique



- Champ transverse.
- Axe du faisceau perpendiculaire à la feuille.
- Electrodes portées au potentiel $\pm\Delta V$ par rapport à l'axe. Pôles opposés de même polarité.
- Electrodes idéales hyperboliques (dans la pratique: cercles possibles).



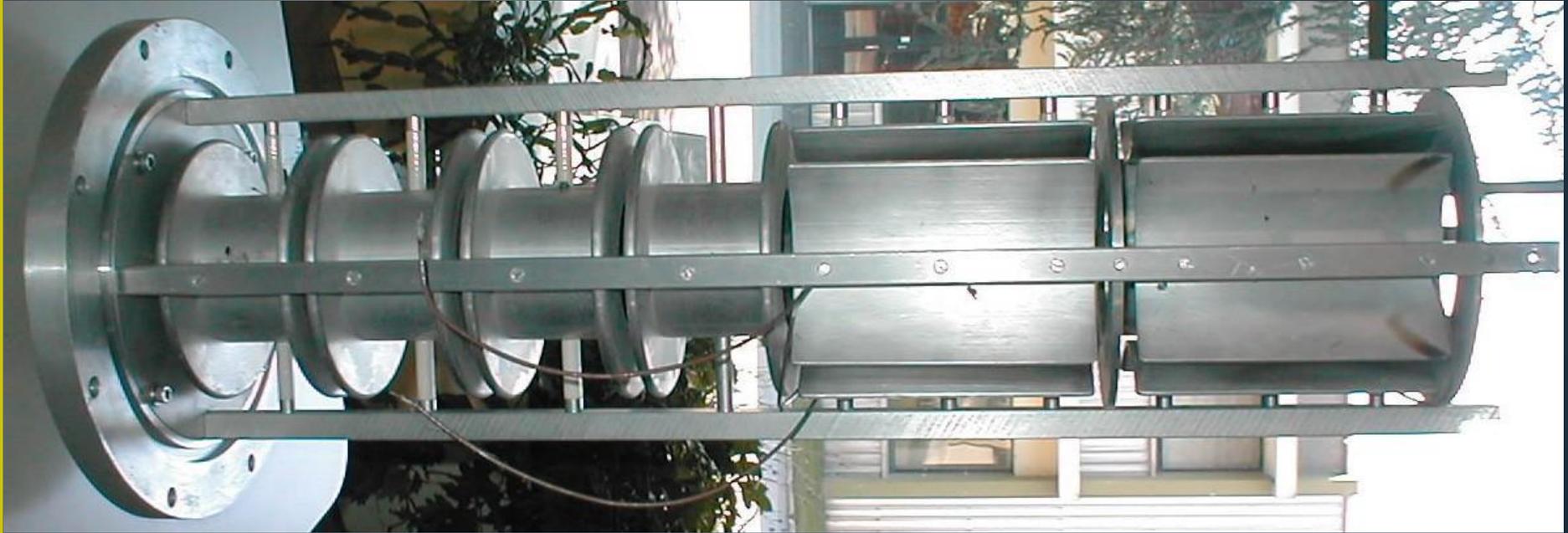
$$\left. \begin{aligned} E_x &= \pm \frac{2\Delta V}{R^2} x \\ E_y &= \mp \frac{2\Delta V}{R^2} y \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{L\Delta V}{R^2V} = \frac{nL\Delta V}{R^2T}$$

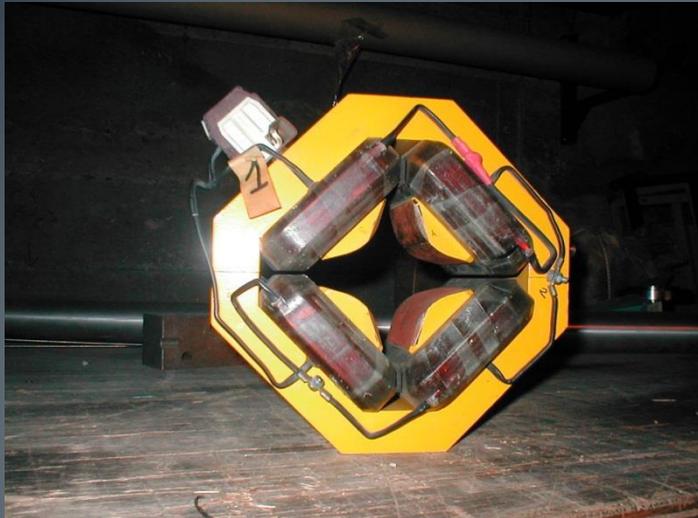
n: état de charge
T: énergie cinétique totale (eV)

Quadripôle électrostatique

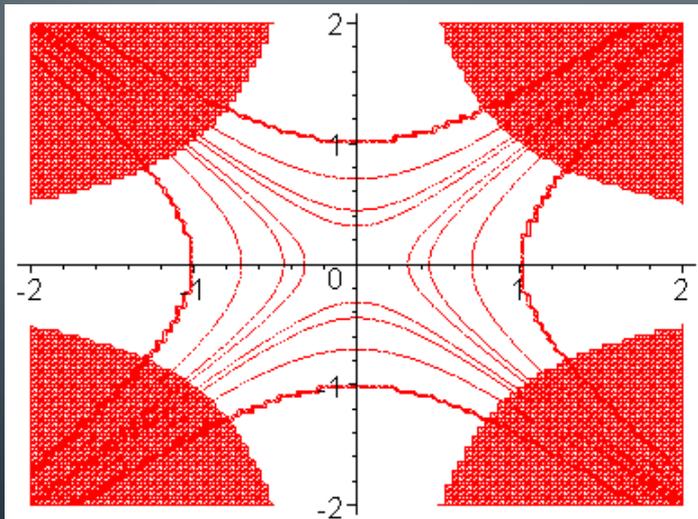
- Electrodes hyperboliques (et infinies) → Force est exactement proportionnelle à la position dans chaque plan.
- Un quadripôle est **convergent** dans une direction et **divergent** dans l'autre.
- → L'association périodique de quadripôles doit donc être alternée (exemple de FODO)
- Symétrie de révolution non préservée
- Equivalent à une lentille mince.
- A distance focale égale, la tension à appliquer varie comme R^2
- Faisceau $1+$ / 30 keV : **100 V** pour ($L=0.2$ m, $R=20$ mm) pour $f=60$ cm
- Longueur efficace $\sim L-R/2$
- Dans la chambre à vide.
- L'ouverture utilisable \sim l'ouverture totale.



Quadripôle magnétique



- B_0 : champ sur le pôle.
- R : rayon interne (dit « de gorge »)
- $g = B_0/R$ est le gradient
- Pôles idéaux hyperboliques
- Il peut être placé à l'extérieur de la chambre à vide.
- Force magnétique plus grande que la force électrique quand E croît,
➔ quadripôles magnétiques dans les grandes machines
- B_0 est une limite mais g aussi (saturation ailleurs que sur le pôle)



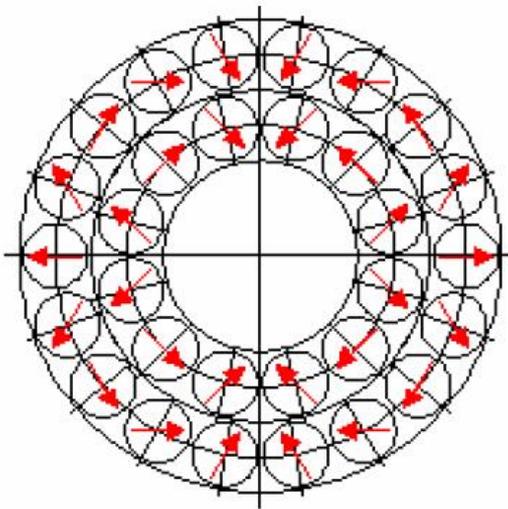
$$\left. \begin{aligned} B_x &= gy \\ B_y &= gx \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{B_0 L}{R(B\rho)} = \frac{gL}{(B\rho)}$$

Quadripôle à aimants permanents (CERN et HIPPI collaboration)

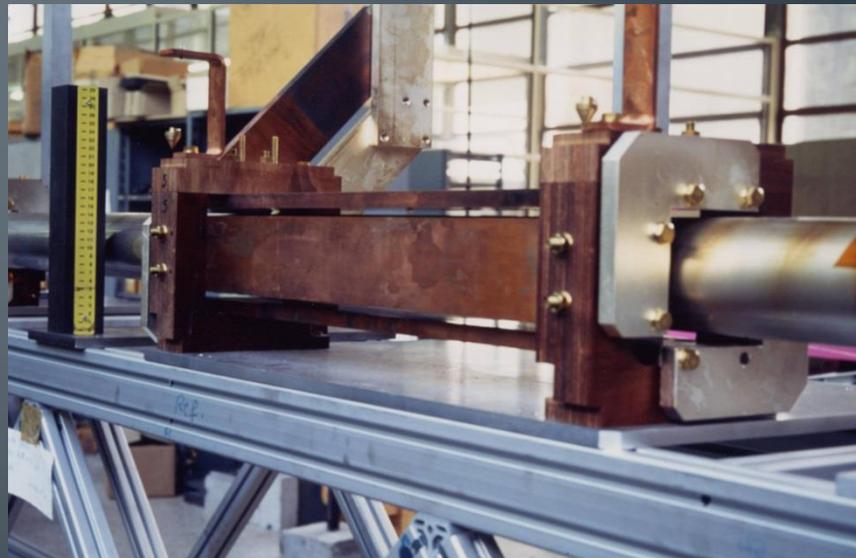


- ITEP Prototype PMQ designed for 50 T/m
 - Inner layer: 12 rods of SmCo_5
 - Outer layer: 18 rods of SmCo_5



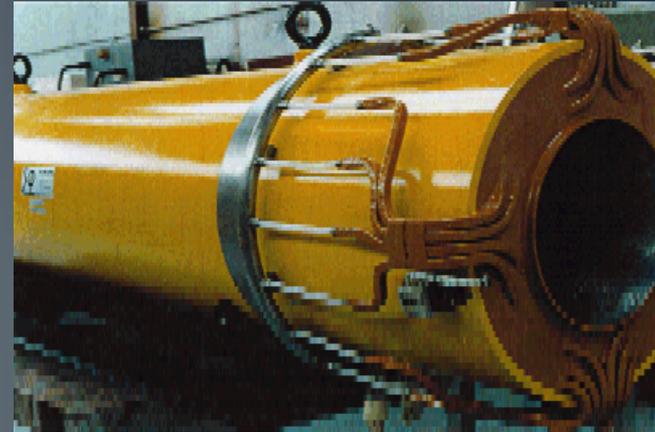
Divers

- Un **quadripôle** est **équivalent**, avec une grande précision, à une **lentille mince** entourée de deux espaces sans champ de longueur $L/2$ (la longueur totale ne doit bien sûr pas changer).
- Un **doublet** de quadripôles est très **différent** d'une **lentille mince**. Il est en fait équivalent à une lentille épaisse et, qui plus est, décalée.
- Un **triplet symétrique** de quadripôles est également équivalent à une **lentille mince**.
- Un quadripôle sera d'autant meilleur que son **GRADIENT de CHAMP sera constant** (ou que son champ variera **LINEAIREMENT** avec la position latérale)
- Un Qpôle original

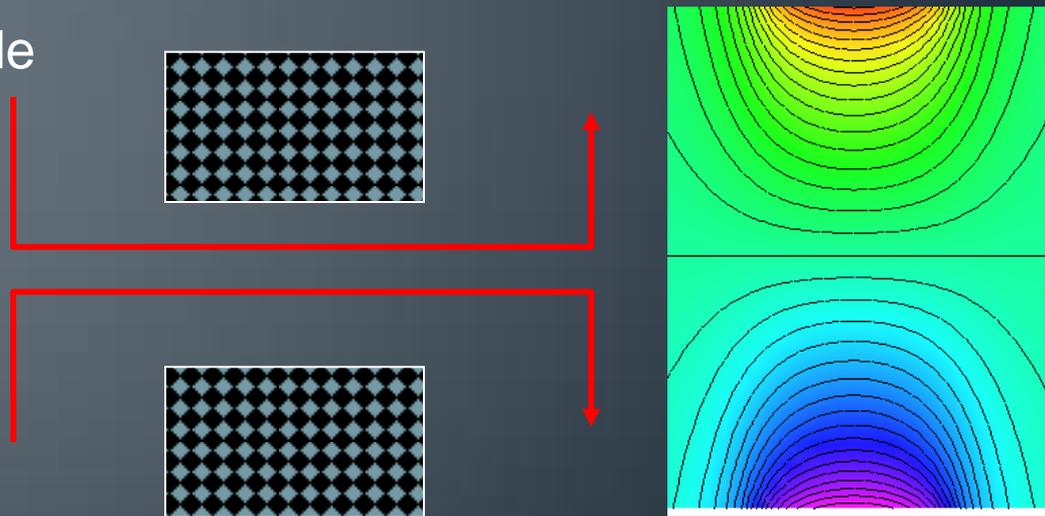


Le solénoïde (lentille Glaser)

- Focalisation par les faces
- Peu d'aberrations
- Convergent
- Symétrie de révolution, mais couplage des plans → lentilles **contra-rotatives** si besoin
- similaire à une lentille mince entourée de deux espaces de glissement



$$B_s \approx B_0 \left(1 + \frac{s^2}{a^2} \right)^{-1}$$
$$\frac{1}{f} = \frac{\pi a B_0^2}{8(B\rho)^2}$$



Pour information: lentilles non-linéaires

- Hexapôles
- Octupôles
- Décapôles
- Dodécapôles

$$B \propto x^2$$

$$B \propto x^3$$

$$B \propto x^4$$

$$B \propto x^5$$

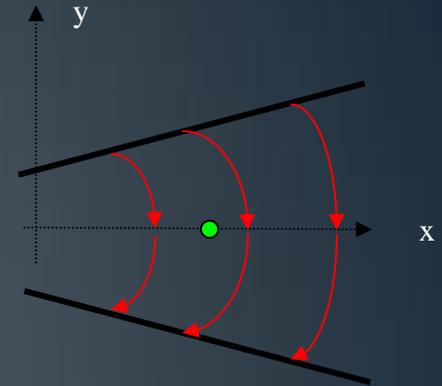
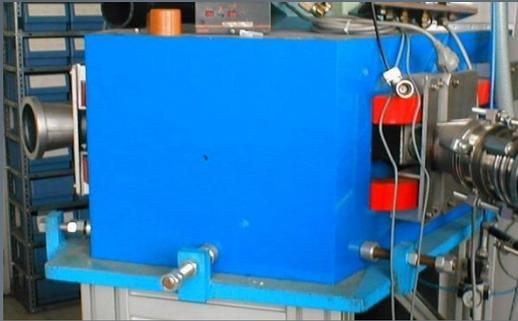
...

Corrections de non linéarité

Correction de chromaticité dans les anneaux



Déviatation des particules



- Ici: focalisant dans le plan de déviation
- **Indice** : composante horizontale non nulle en dehors du plan médian, donc un effet dans le plan vertical
- indice nul → la trajectoire dans le plan vertical est celle dans un espace sans champ.
- indice non nul → effet focalisant ou défocalisant, selon le signe de l'indice, dans le plan qui n'est pas celui de déviation. Il subsiste un effet focalisant dans le plan de déviation mais amoindri voire défocalisant si $n > 1$

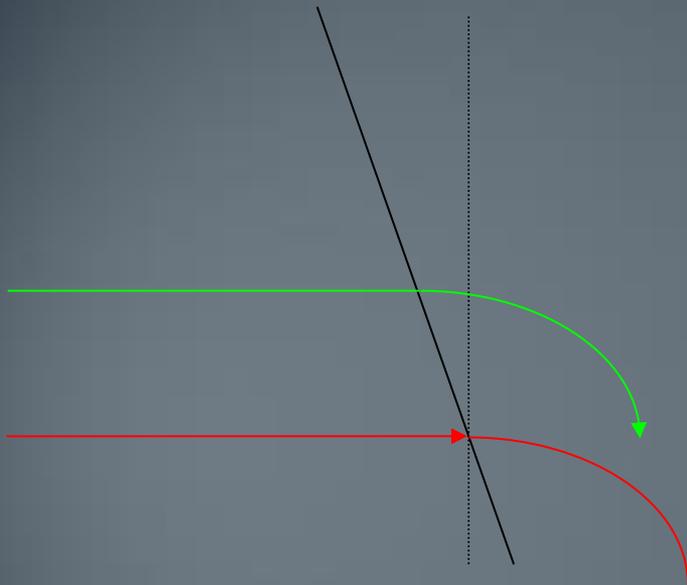
$$R = \frac{(B\rho)}{B}$$

$$n = -\frac{R}{B} \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\frac{R}{B} \frac{\partial B_y}{\partial x}$$

$$B_y = B_0 \left[1 - n \frac{x}{R} \right]$$

$$B_x = -B_0 n \frac{y}{R}$$

Focalisation par les faces (simplifiée)



$$\left| \frac{1}{f} \right| = \frac{\tan(\phi)}{R}$$

- ~ lentille mince, convergente ou divergente
- effet de face focalisant dans le plan de déviation → effet défocalisant dans l'autre plan
- *Propriété* : Si l'angle d'entrée est égal à celui de sortie et égal au quart de l'angle de déviation alors le dipôle est convergent identiquement dans les deux plans.
- *Remarque* : un dipôle n'a pas obligatoirement la forme d'un secteur d'angle égal à celui de déviation
- *Nota* : nous avons totalement négligé l'effet des champs de fuite.

Deux petits « trucs »

- Si l'angle des faces est défocalisant dans le plan de déviation et égal au quart de l'angle de rotation, on focalise ~ pareillement dans les deux plans
- Si l'angle des faces est défocalisant dans le plan de déviation et égal à la moitié de l'angle de rotation, on n'a plus de focalisation dans le plan de déviation

¼ angle sur chaque face: ~même focalisation x/y

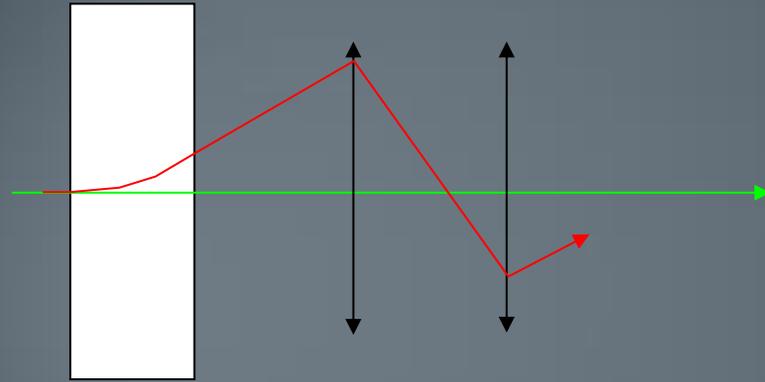
$$\begin{bmatrix} 4 \cos\left(\frac{\theta}{4}\right)^2 - 3 & r_o \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\frac{2 \sin\left(\frac{\theta}{4}\right)}{\cos\left(\frac{\theta}{4}\right) r_o} & 4 \cos\left(\frac{\theta}{4}\right)^2 - 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \tan\left(\frac{\theta}{4}\right) \theta & r_o \theta \\ 0 & 0 & \frac{\tan\left(\frac{\theta}{4}\right) \left(-2 + \tan\left(\frac{\theta}{4}\right) \theta\right)}{r_o} & 1 - \tan\left(\frac{\theta}{4}\right) \theta \end{bmatrix}$$

Angle ½ on chaque face : espace de glissement dans le plan de déviation

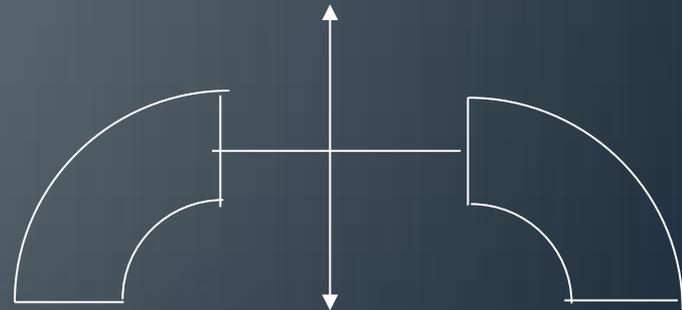
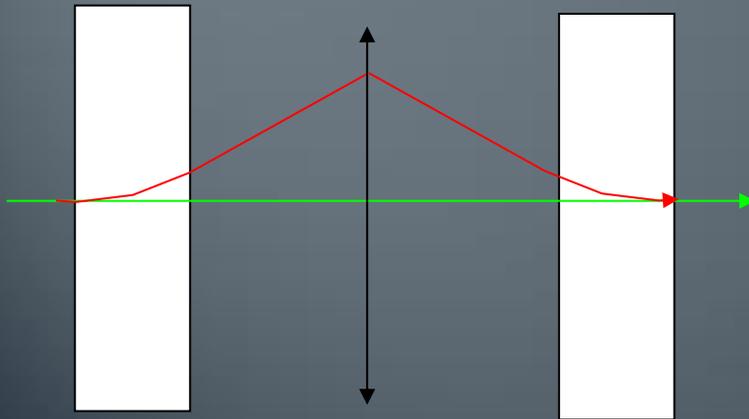
$$\begin{bmatrix} 1 & r_o \sin(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \theta & r_o \theta \\ 0 & 0 & \frac{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(-2 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \theta\right)}{r_o} & 1 - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \theta \end{bmatrix}$$

Séparation et dispersion

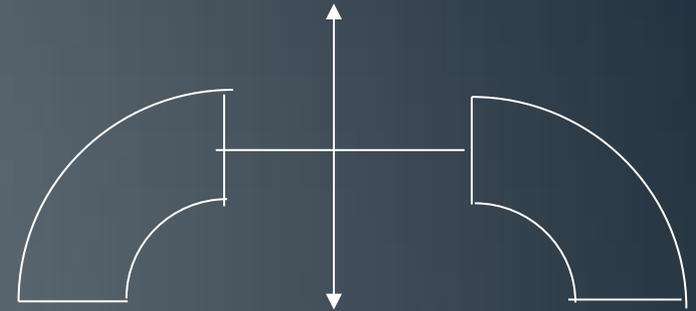
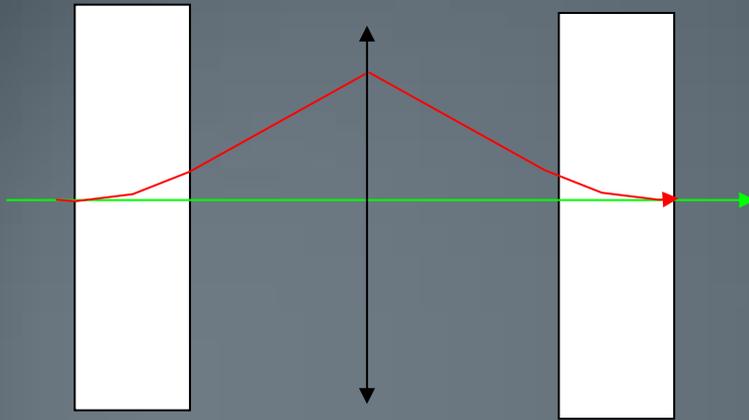
$$x(s) = x_0(s) + D(s) \frac{\Delta p}{p_0}$$



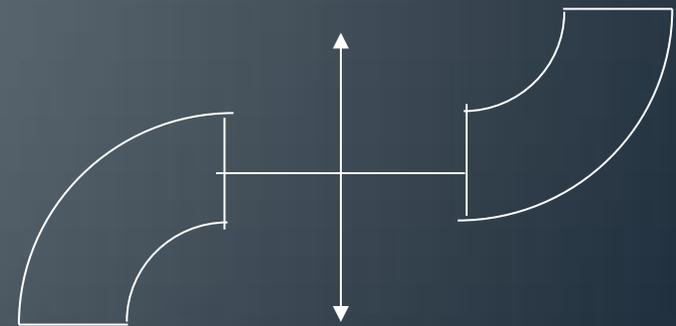
- séparation dans un champ magnétique si q/mv sont différents.
- séparation dans un champ électrique si et seulement si q/T sont différents.
- Spectromètre de masse: peut combiner les deux
- Fonction de dispersion
- Achromatisme



Exercice! Chicane achromatique



?



Application: déviation finale d'un accélérateur de radiothérapie

Dipôle simple:
aucun intérêt

270 degrés
achromatique en un
point →

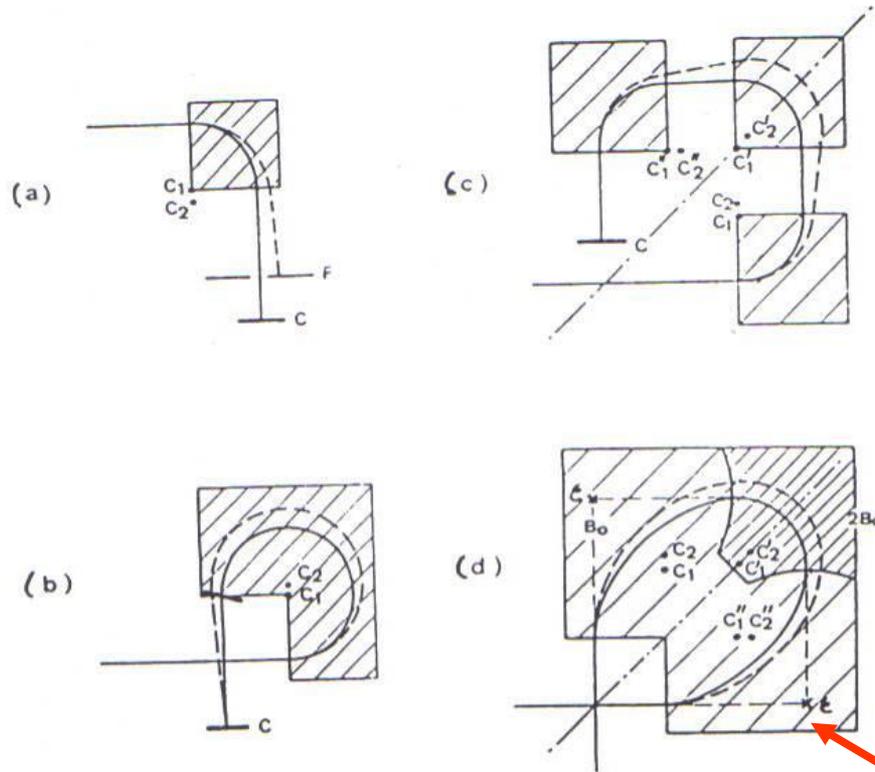
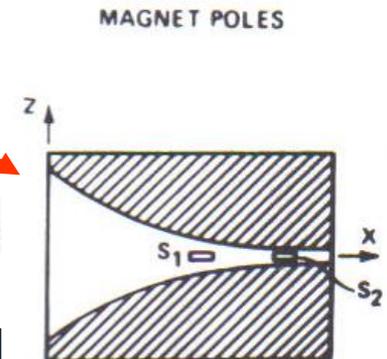


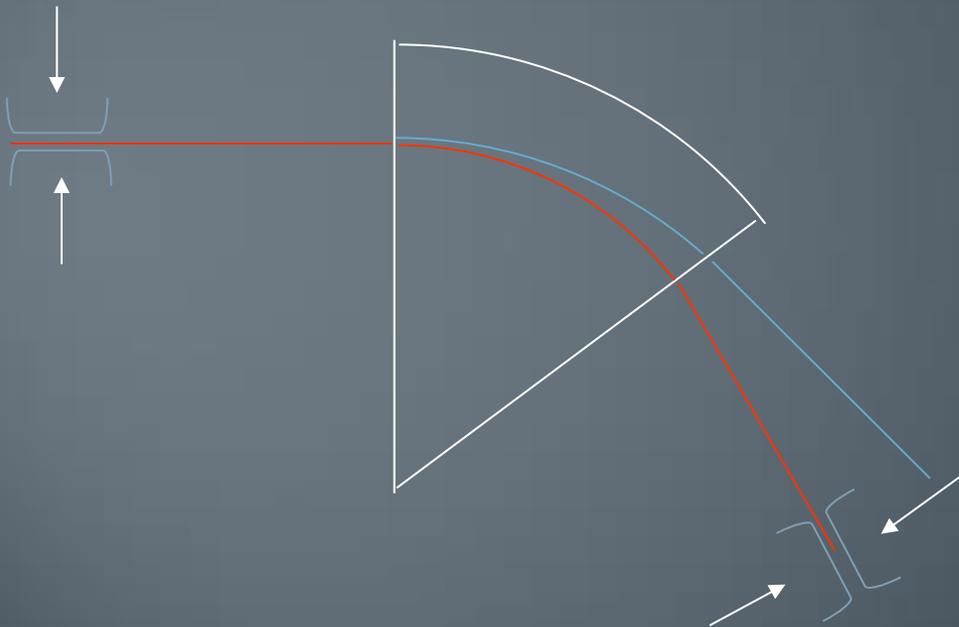
FIGURE 3.27 Beam bending magnetic systems: (a) — 90° magnet, (b) — triplefocal 270° magnet, (c) — multisectional 270° magnet, (d) — Pretzel-type 270° magnet (achromatic magnetic mirror)

Vrai achromat
→ complexe
→ CLINAC 18
(Varian)

Pretzel



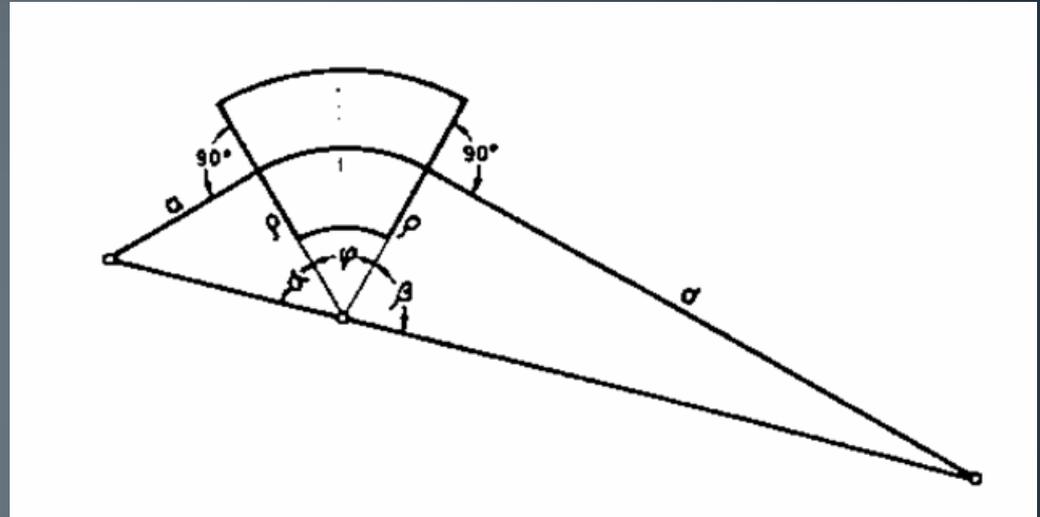
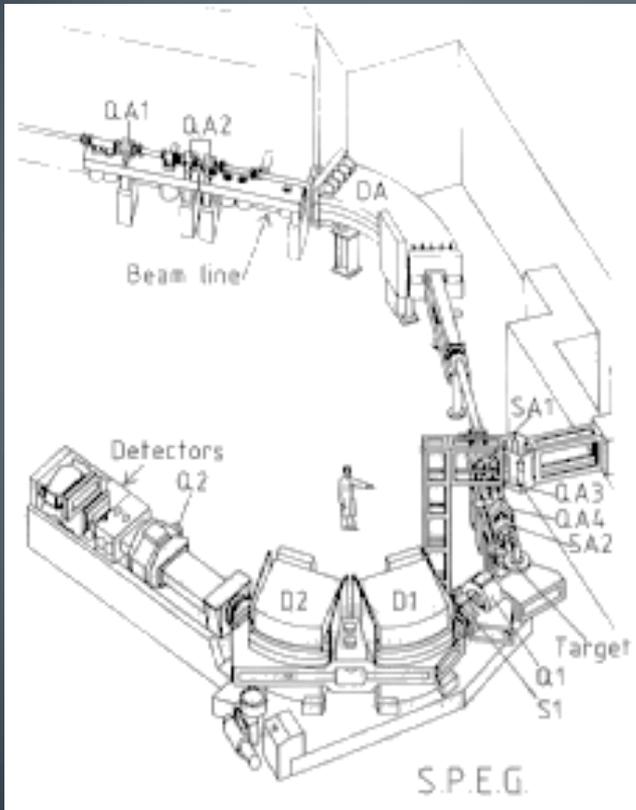
Principe de base du spectromètre



$$R = \frac{p}{\Delta p} = \frac{D}{2Gx_e}$$

- Liaison objet-image ET liaison waist-waist entre fentes entrée/sortie
- La résolution dépend du grandissement (petit)
- Il manque l'optique (Qpôles etc)
- Il peut y avoir deux étages: magnétique et électrostatique

SPEG (GANIL) et un petit truc



Liaison objet-image

Le problème de la charge d'espace

- Dans un faisceau d'intensité importante, la répulsion coulombienne entre particules n'est plus négligeable
- Faisceau continu sans champ: l'ionisation du gaz résiduel permet de piéger des particules de charge opposée et de neutraliser l'effet
- Faisceau non continu: ça peut ne plus marcher si les impulsions sont trop courtes (ex: GENEPI: $1\ \mu\text{s}$, temps de neutralisation $1\ \text{ms}$ –deutons $250\ \text{keV}$)
- Loi en $V^{3/2}$
- Présence de champ: les particules neutralisantes sont éjectées

Charge d'espace (suite)

- Machines de fortes puissance ou supra: pertes admissibles d'environ 1 W/m
- Le faisceau doit être manipulé avec douceur (adiabaticité). En particulier, les enveloppes doivent être très régulières
- Calcul particulière (lourd) ou de l'enveloppe (sommaire mais rapide).

Machines circulaires

Cyclotron

Focalisation: comme chacun sait, les accélérateurs circulaires ne fonctionnent pas

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.

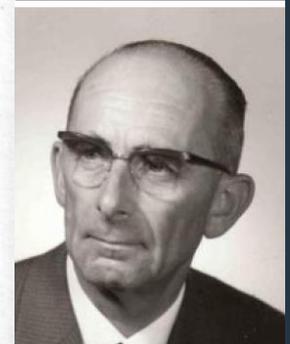
C'est ainsi qu'on tue une idée géniale.



Flegler



Wideröe

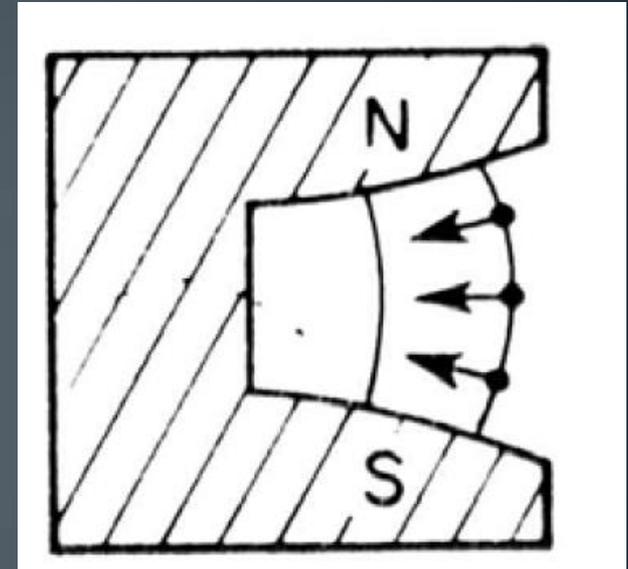


Ecole IN2P3 : accélérateurs
La Lande Les Maures, Novembre 2007

Eric Baron 15

Focalisation faible

- Le champ magnétique n'est pas uniforme en bord de pôle
- Effet de focalisation ou de défocalisation
- Focalisation H et V si l'indice de champ est modéré (inférieur à 1)
- Adapté aux cyclotrons
- Grande chambres à vide, grosse machines, coût, pour les synchrotrons
- SATURNE1 à Saclay



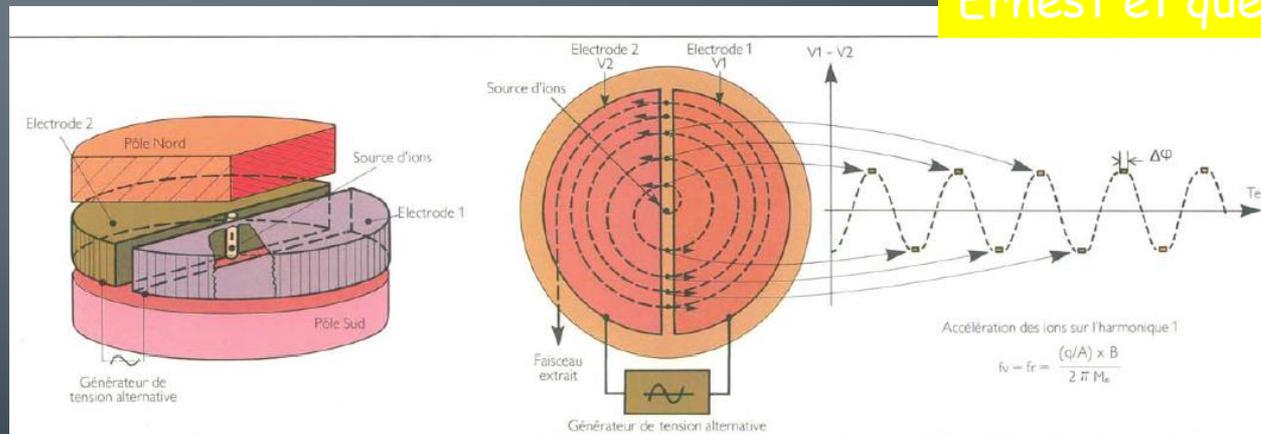
$$n = - \frac{R}{B} \frac{\partial B}{\partial R}$$

Cyclotrons

- Le cyclotron assure
 - Focalisation
 - Isochronisme
- Limité à 20 MeV en version « naïve »



Ernest et quelques amis

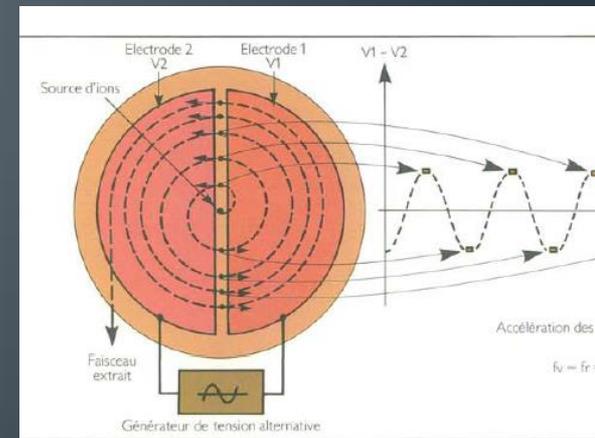


Dynamique dans un cyclotron

- Fréquence cyclotron (de révolution)
- Machine basse énergie (cinétique versus totale)
- En non relativiste, on obtient le pas de spiralisation
- La machine peut avoir en fait jusqu'à 4 cavités accélératrices
- Fonctionnement en « harmonique n » multiple de la fréquence cyclotron
- f_c indépendant de la vitesse et du rayon

$$\rho = \frac{v}{2\pi f_c} = \frac{mv}{qB} \Rightarrow f_c = \frac{qB}{2\pi m}$$

$$\rho = \frac{mv}{qB} \propto \sqrt{T} \Rightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta T_{tour}}{T}$$



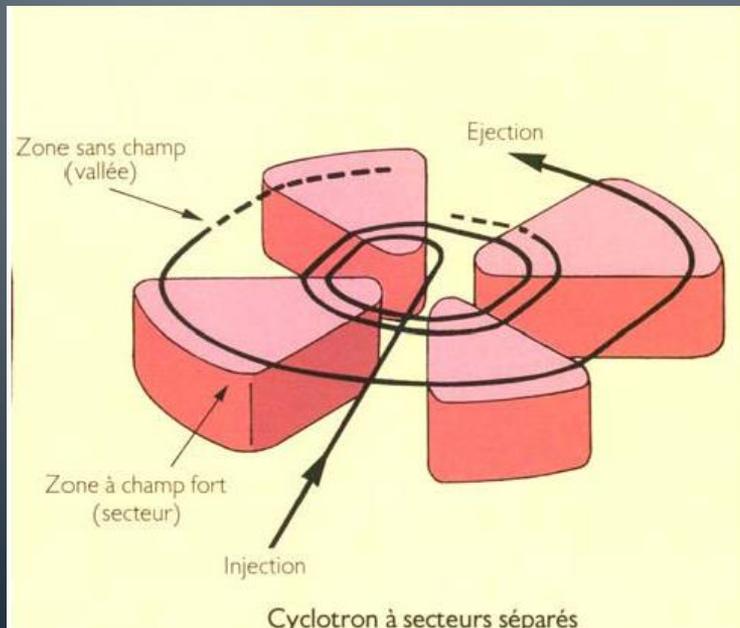
Le K d'un cyclotron

- L'énergie cinétique de sortie, par nucléon, est proportionnelle au carré de la charge par nucléon des particules accélérées, uniquement

$$B\rho = \frac{mv}{q} \Rightarrow T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2}{2m}(B\rho)^2$$
$$\frac{T_{\max}}{A} = \left(\frac{q}{A}\right)^2 \frac{(B\rho)_{\max}^2}{2m_{\text{nucl}}} \equiv K \left(\frac{q}{A}\right)^2$$
$$T_{\text{MeV}/A} \approx 48(B\rho)_{\max}^2 \left(\frac{q}{A}\right)^2$$

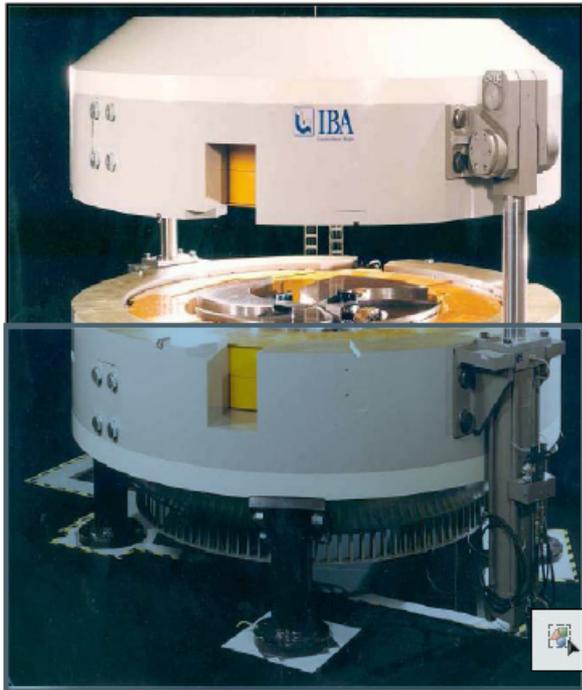
Cyclotron à secteurs séparés

- Résout les aspects isochronisme (dont les effets relativistes)
- Assure la focalisation via les faces



E Baron

Equipement: le cyclotron IBA



$E_{\max} = 235 \text{ MeV}$

$I_{\max} = 500 \text{ nA}$

220 tonnes

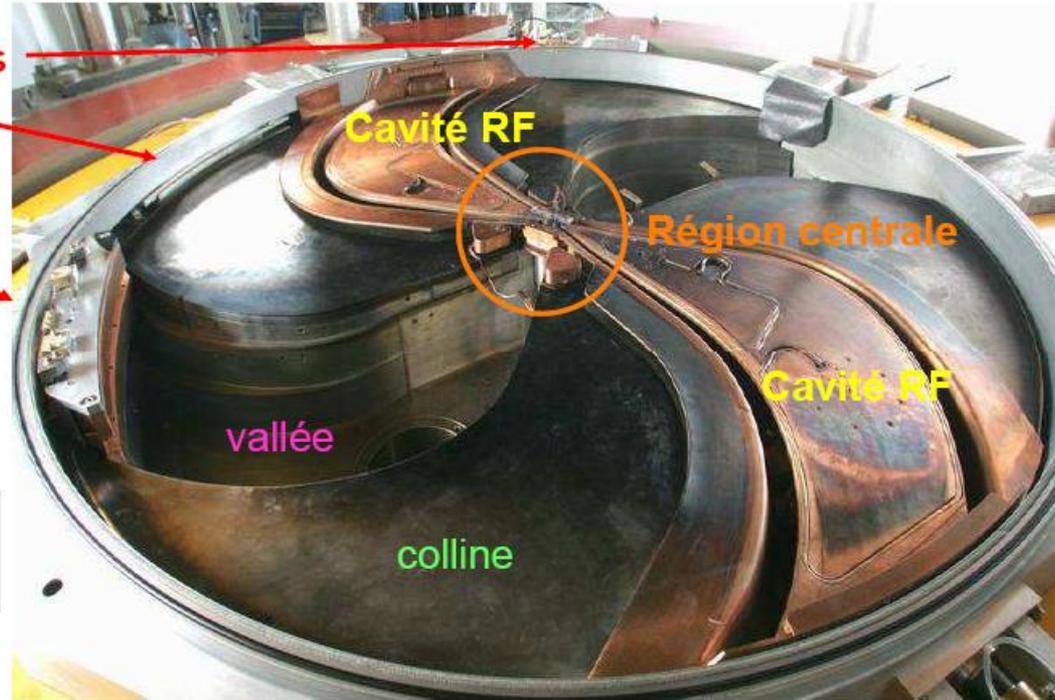
4 secteurs – 2 cavités RF à 106.157 MHz

champ moyen à l'extraction 2.188 T

Le cyclotron: le plan median

Système d'extraction:

- quadrupoles permanents
- correcteur de gradient
- défecteur

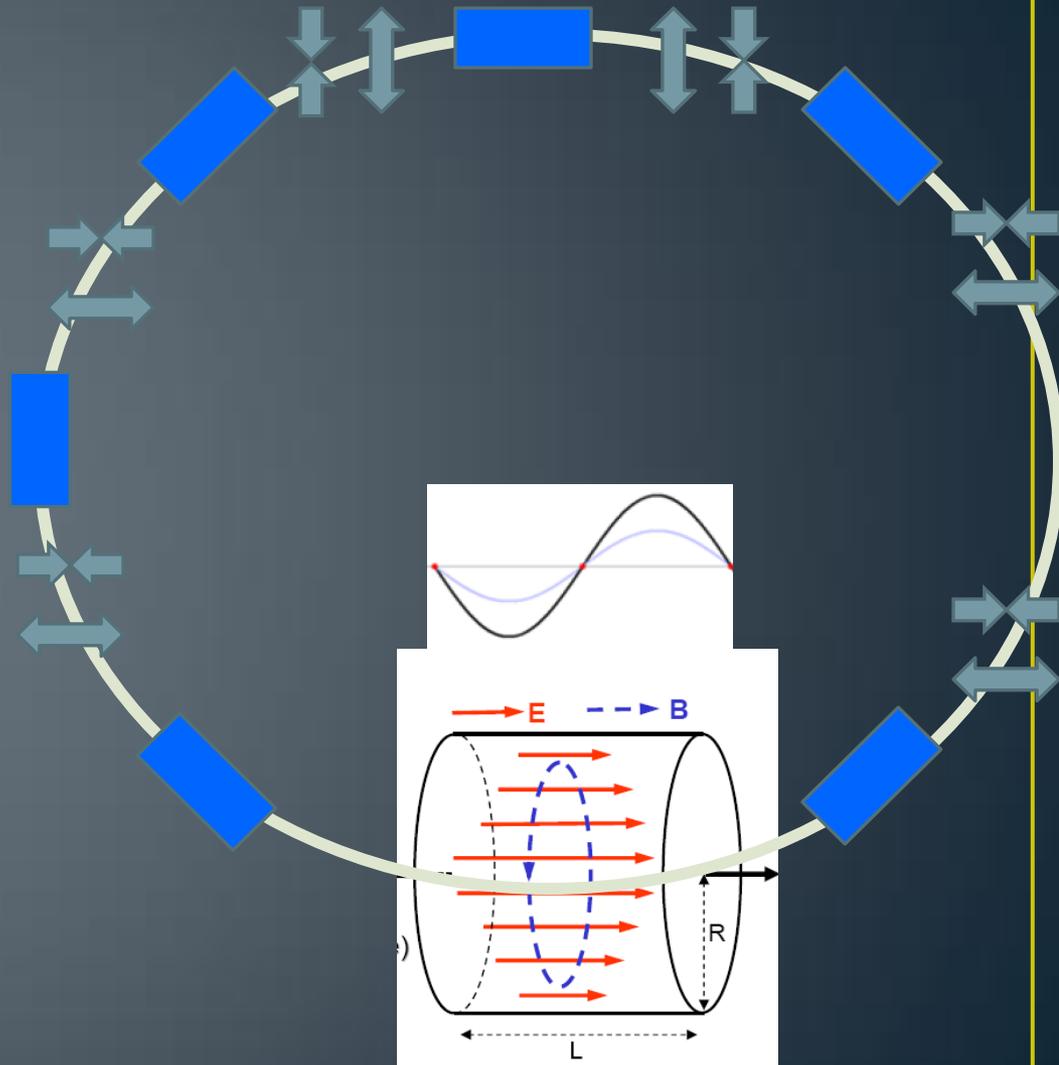


4 vallées
4 collines

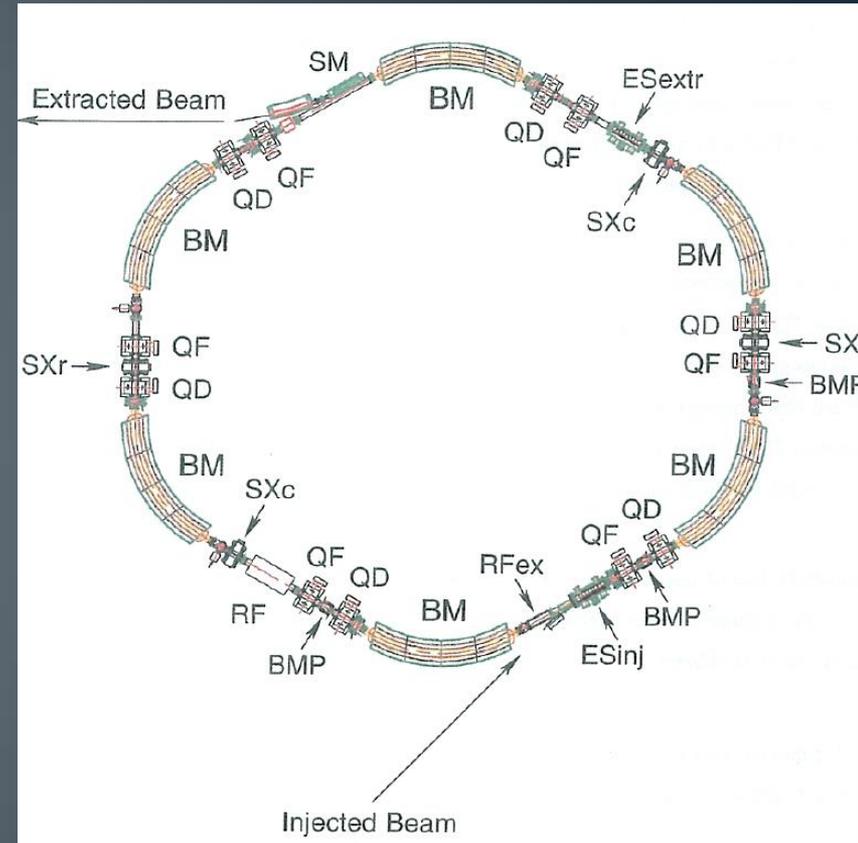
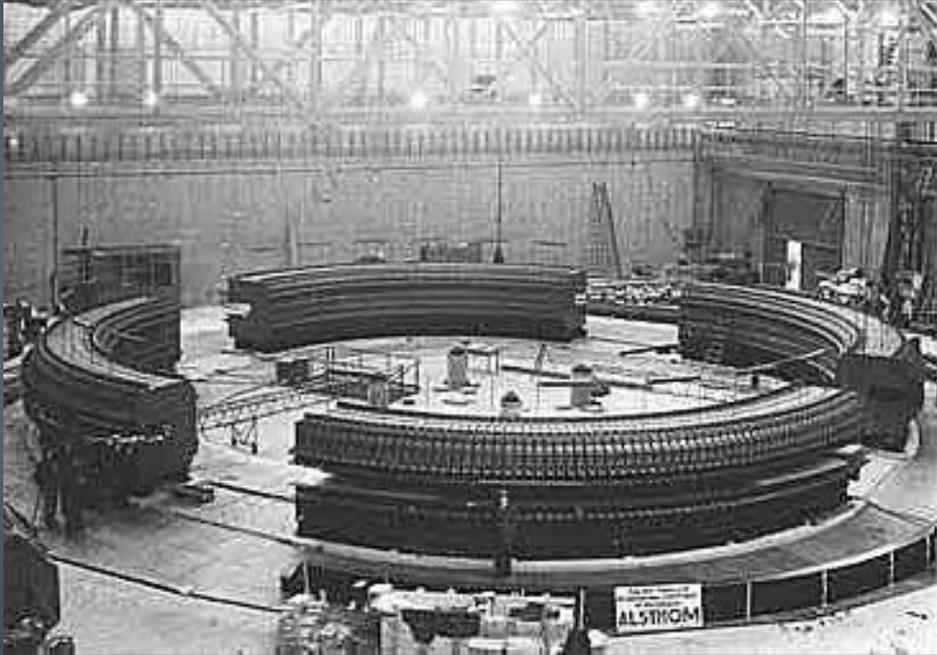
Synchrotron

Le synchrotron **PAR** les nuls

- Accélération et/ou stockage: champs variables ou fixes
- Guidage et focalisation achromatique
- Cavités pour augmenter l'énergie ou la maintenir (rayonnement synchrotron)
- Particules synchrones de la RF: fréquence fixe ou variable (électrons vs ions)



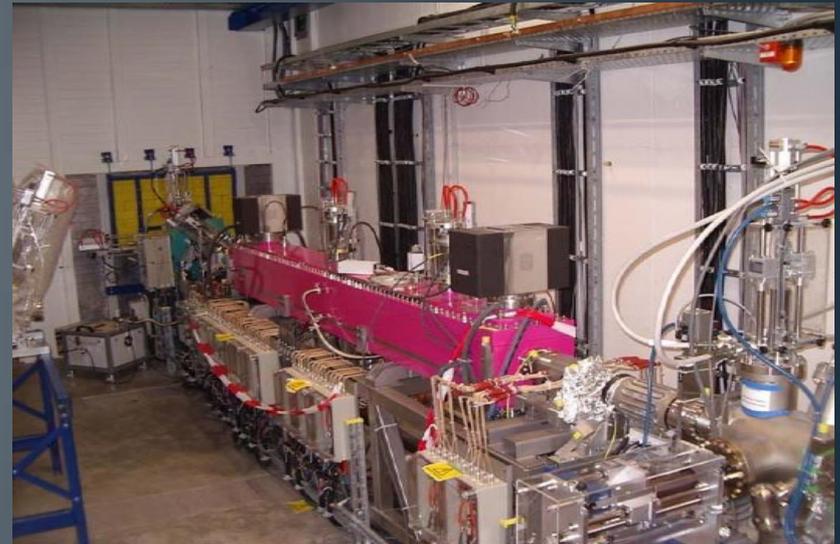
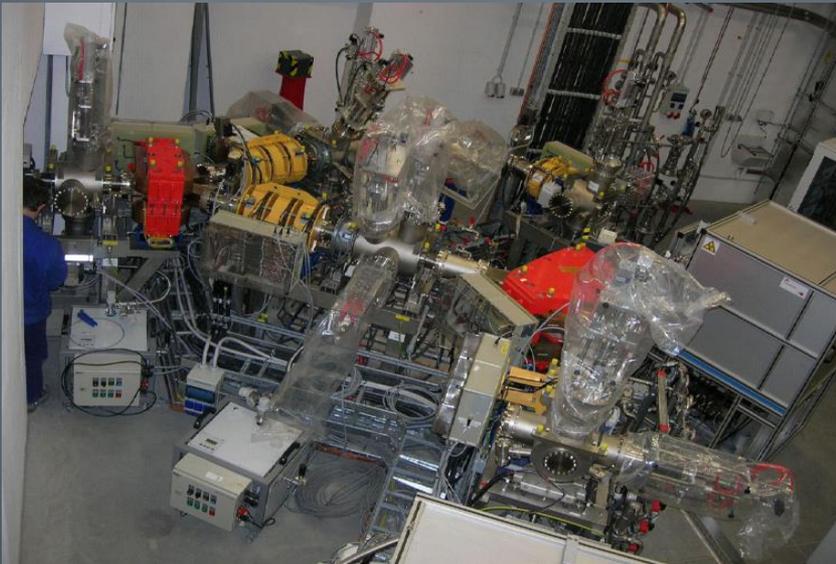
Les synchrotrons



• Saturne1 (focalisation faible)

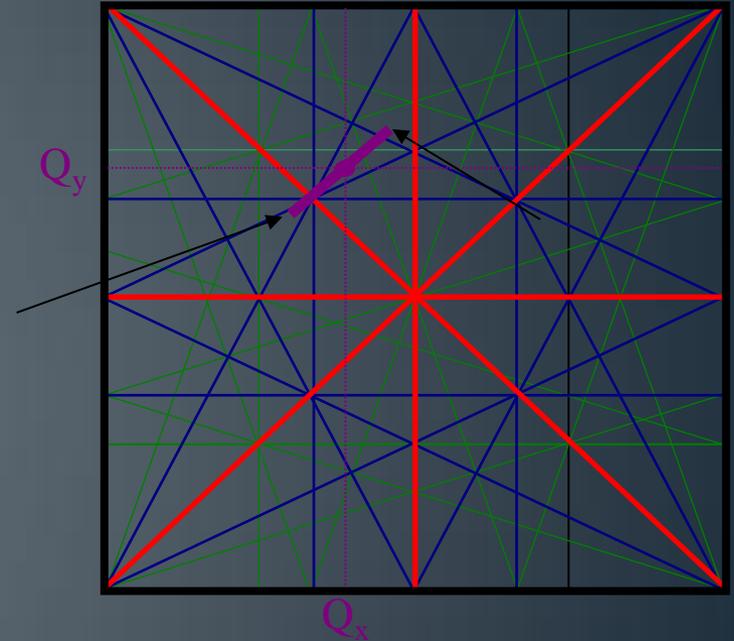
• HICAT (Hadronthérapie par faisceau carbone, Heidelberg)

HIT: les sources d'ion, le linac



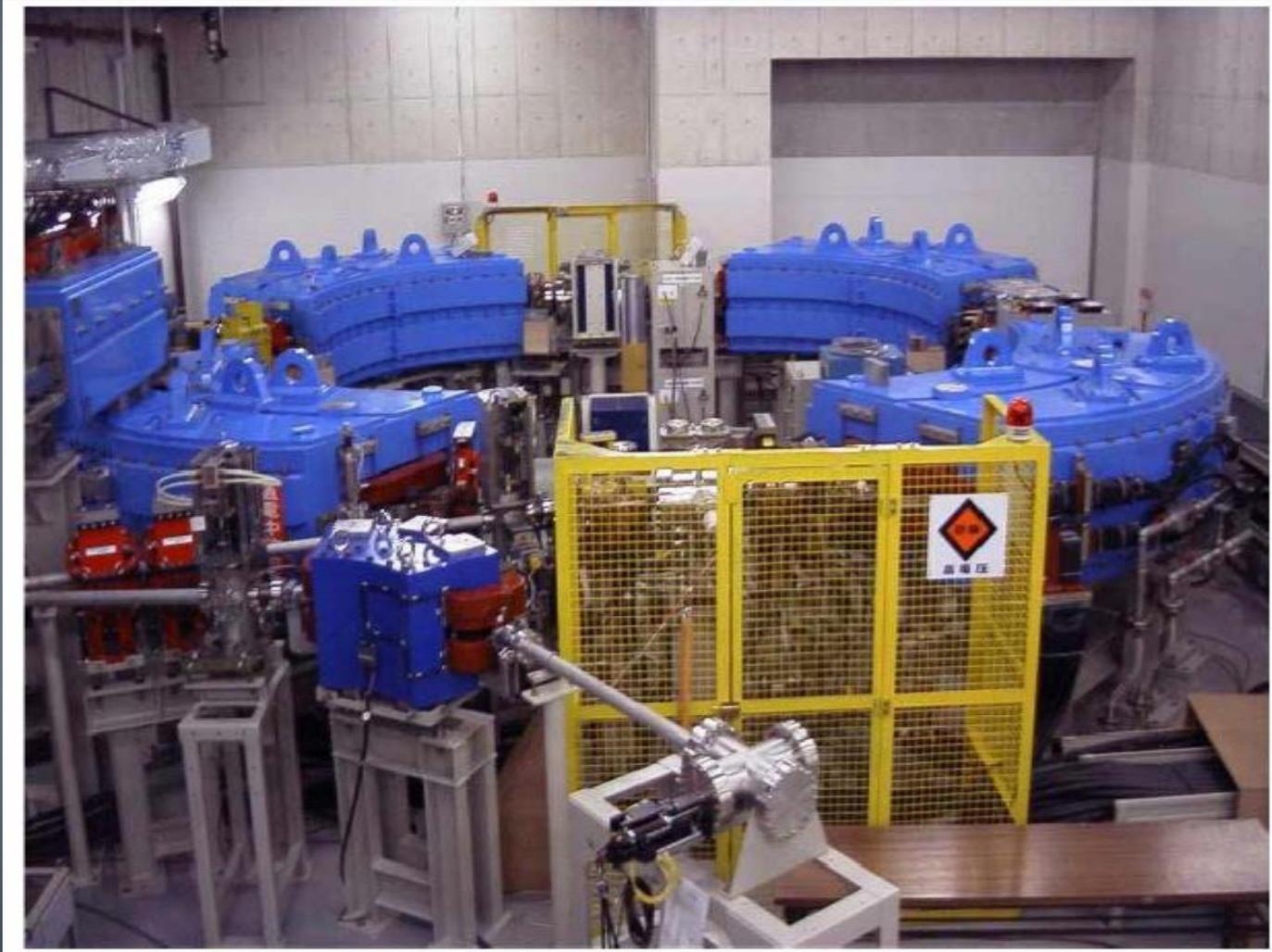
Autres caractéristiques

- Machines circulaire = résonances
- Champ magnétique croissant avec la montée en énergie
- Cavités à fréquence variable pour les ions
- Cavités à fréquence fixe pour les électrons
 - Ex: ESRF: $f_{\text{rotation}} = f_{\text{HF}} = 352 \text{ MHz}$



Nombres d'onde horizontal et vertical et déplacement du point de fonctionnement avec l'énergie (source N Pichoff)

prot.-synchrotron, Shizuoka, Japan



Rayonnement synchrotron

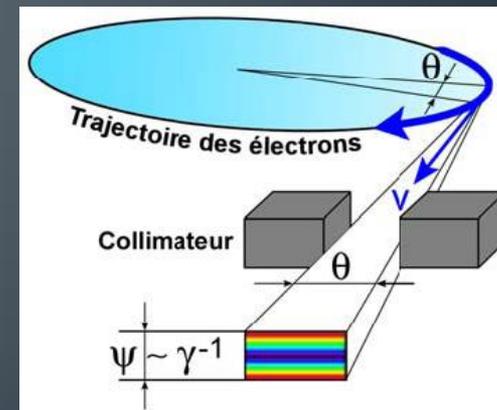
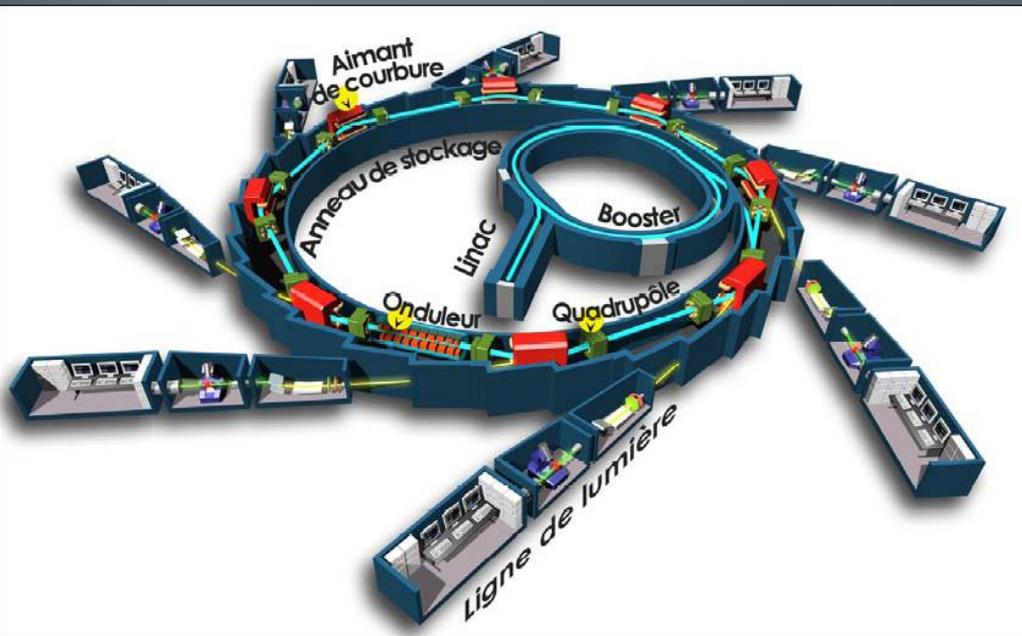
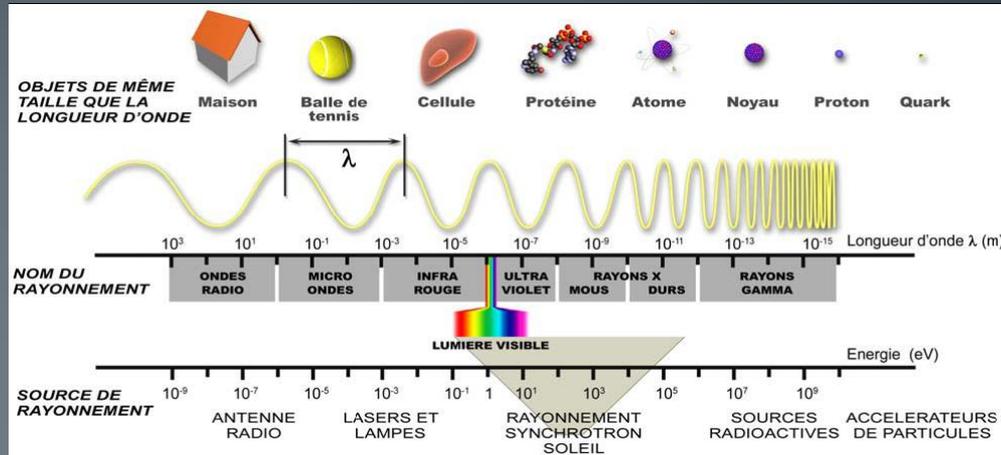
- Le rayonnement synchrotron: rayonnement électromagnétique émis par des particules chargées et déviées
- En $E^4/m^4 \rightarrow$ électrons
- Nuisance ou opportunité?

Quelques exemples de perte d'énergie par rayonnement synchrotron

$$U_0(\text{keV}) = 88,5 \frac{E^4(\text{GeV})}{\rho(\text{m})}$$

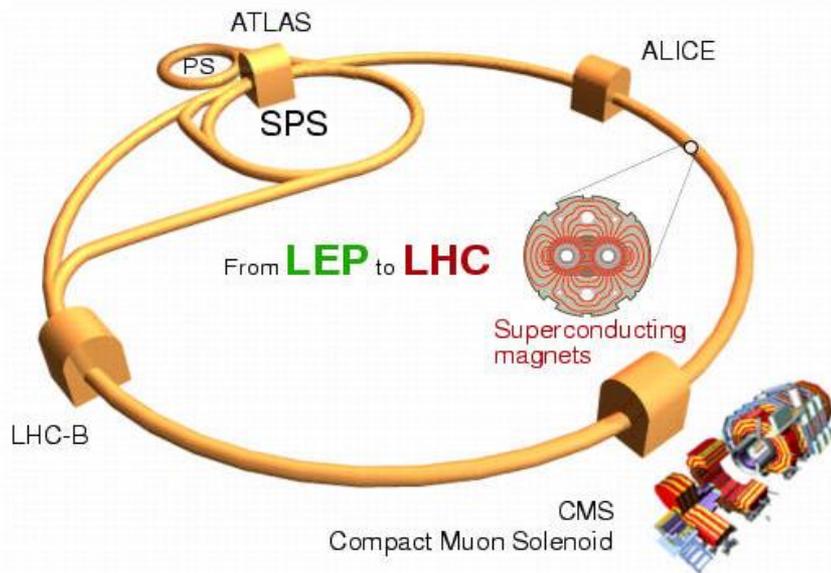
| | Circonférence de l'anneau en m | Energie E de la machine en GeV et en keV | Rayon de courbure ρ en m | Energie U_0 perdue par tour en keV |
|---------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|
| Super-ACO (Orsay) | 72 | 0,8 GeV = $0,8 \cdot 10^6$ keV | 1,70 | 21,3 |
| SOLEIL (Saclay) | 354 | 2,75 GeV = $2,75 \cdot 10^6$ keV | 5,36 | 944 |
| ESRF (Grenoble) | 844 | 6 GeV = $6 \cdot 10^6$ keV | 23,40 | $4,9 \cdot 10^3$ |
| LEP (CERN – Genève) | $27 \cdot 10^3$ | 70 GeV = $70 \cdot 10^6$ keV | 3000 | $7,08 \cdot 10^5$ |

Machines à lumière synchrotron: des microscopes



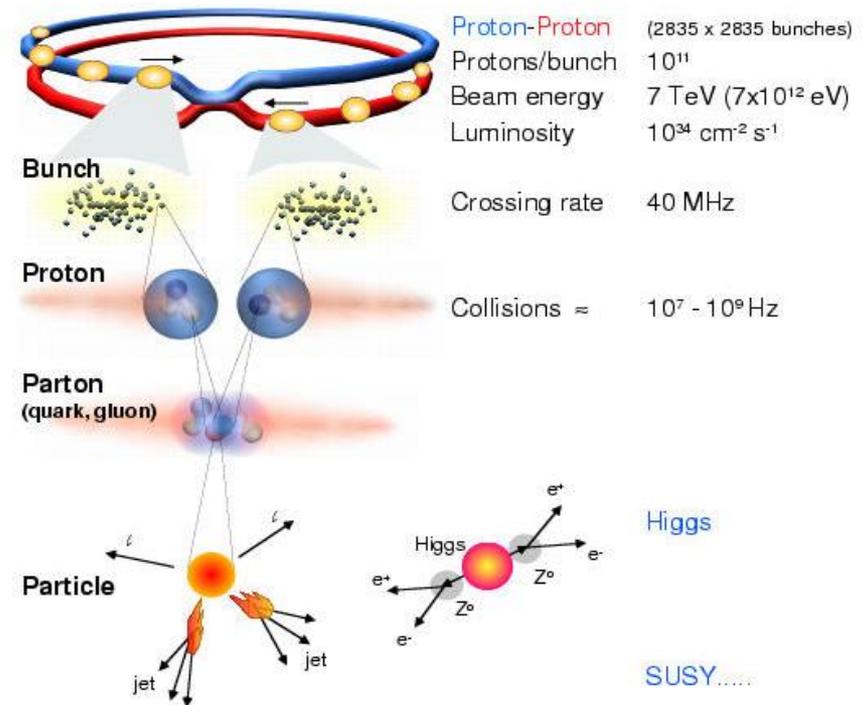
Collisionneurs: synchrotrons et anneaux de stockage

The Large Hadron Collider (LHC)



| | Beams | Energy | Luminosity |
|------------|-------------------------------|--------------------|---|
| LEP | e ⁺ e ⁻ | 200 GeV | 10 ³² cm ⁻² s ⁻¹ |
| LHC | p p Pb Pb | 14 TeV 1312 TeV | 10 ³⁴ 10 ²⁷ |

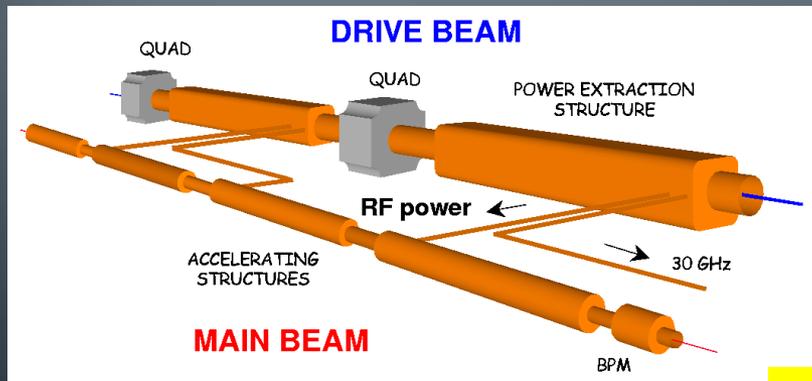
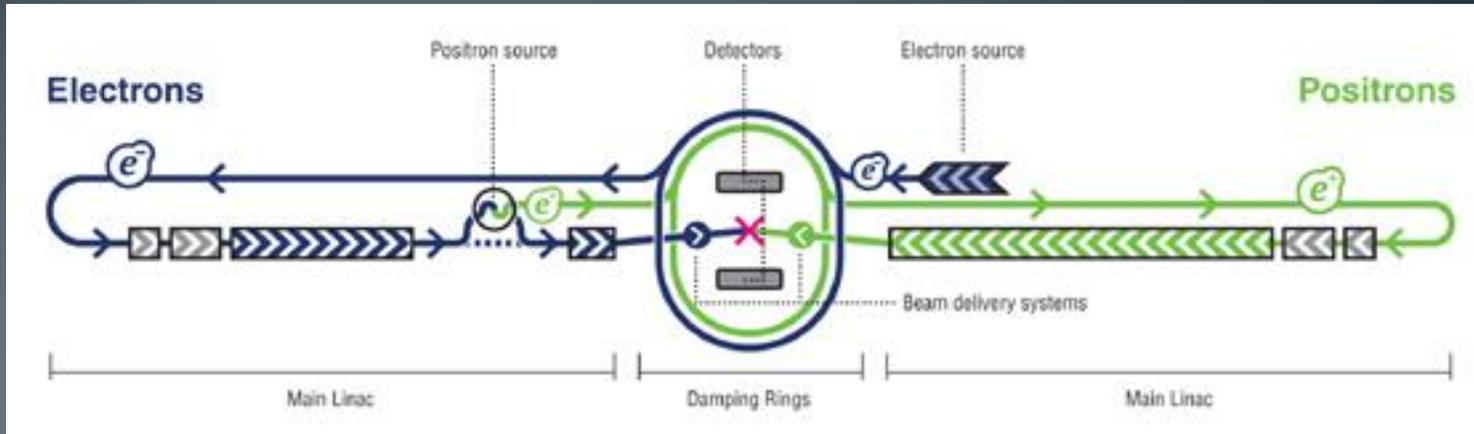
Collisions at LHC



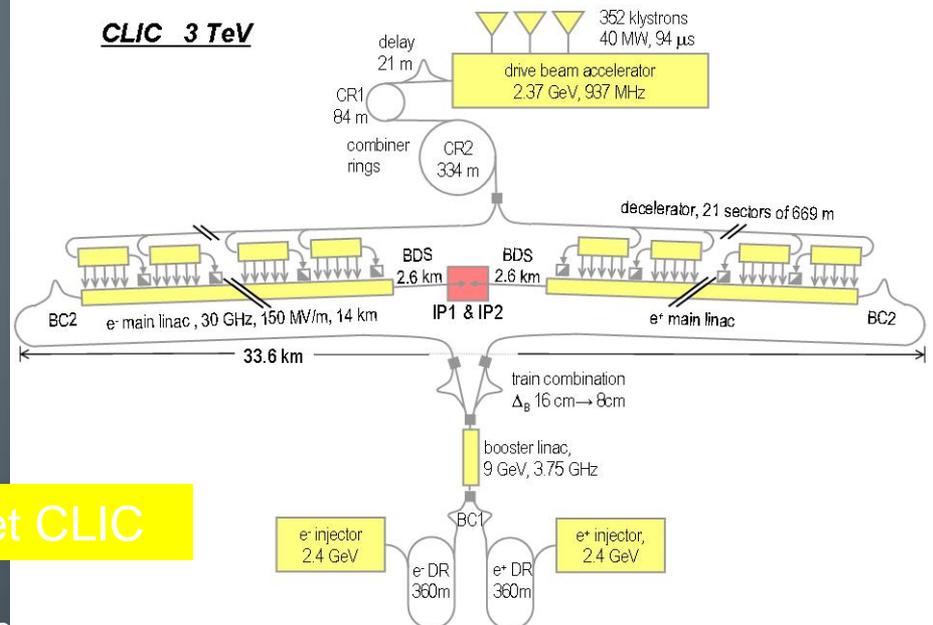
Selection of 1 in 10,000,000,000,000

Collisionneurs linéaires e⁺/e⁻: au-delà du LHC

Les machines circulaires deviennent inutilisables



ILC et CLIC



Accélérateurs pour le médical et le biomédical

Quelques chiffres pour le cancer

- Le cancer touche environ 30% de la population des pays développés
- **355 000 nouveaux cas de cancers** en France en 2012
- 200 000 hommes et 155 000 femmes
- **148 000 décès** (85 000 hommes et 63 000 femmes)

- Chez **l'homme** : poumon/colon/prostate
- Chez la **femme** : sein/colon/poumon)

- Traitements: chirurgie, chimiothérapie, radiothérapie (souvent associés)
- Besoin d'un très grand nombre de moyens adaptés aux **types** et **localisations** de tumeurs
- Pour la radiothérapie: électrons, X ou gamma, protons, ions légers, carbone **etc**
- 45% de guérisons (50% chirurgie, 20% chirurgie + radiothérapie, 20% radiothérapie exclusive, 10% chimiothérapie)

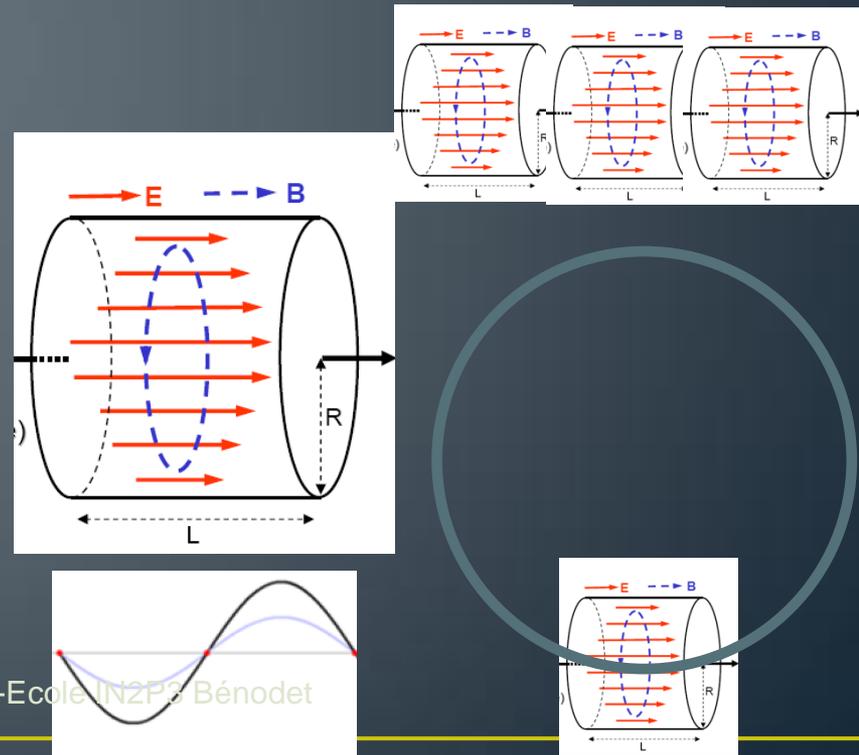
Des machines selon les besoins

- Electrons/X ~ 20 MeV: accélérateur linéaire
- Protons de 200 MeV: cyclotron
- Protons ou ions jusqu'à 400 MeV/uma: synchrotron ou cyclotron supraconducteur

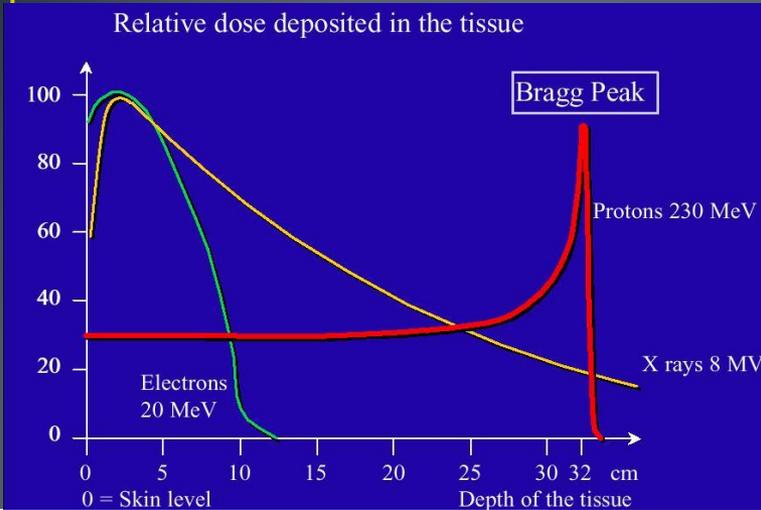
Machines non-électrostatiques car les tensions sont au delà du réalisable (champ statique non confinable)

Utilisation d'une onde HF confinable dans cavite

Les faisceaux ont une structure en temps (qqes MHz à qqes GHz)



Le dépôt de dose dans les tissus



Electrons/X ou gamma

- Dépôt en entrée
- Différentes incidences pour irradier les tumeurs internes

Hadrons

- Pic de Bragg (plus élevé pour le carbone¹)
- Dépôt plus localisé
- Fragmentation et irradiation avale (sauf p)

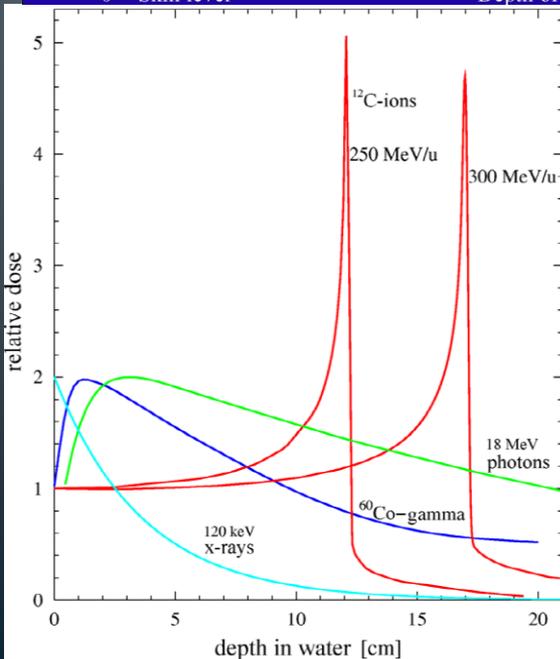
¹Attention: ce qui compte est **l'efficacité biologique**

Les effets sont **non-linéaires avec la dose**:
nécessité d'un contrôle de dose précis

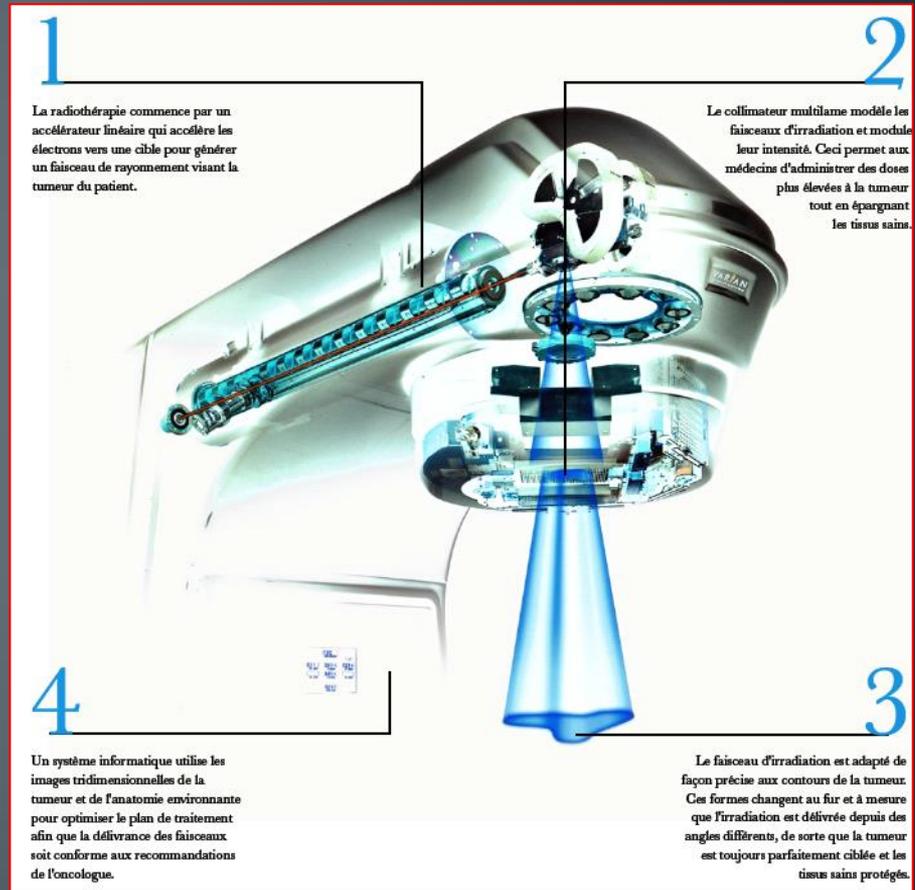
(~2%)

$$RBE = \frac{D_X}{D_{part}}$$

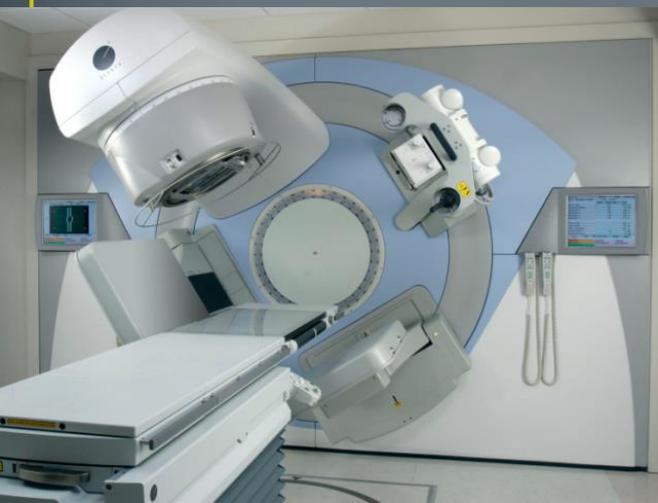
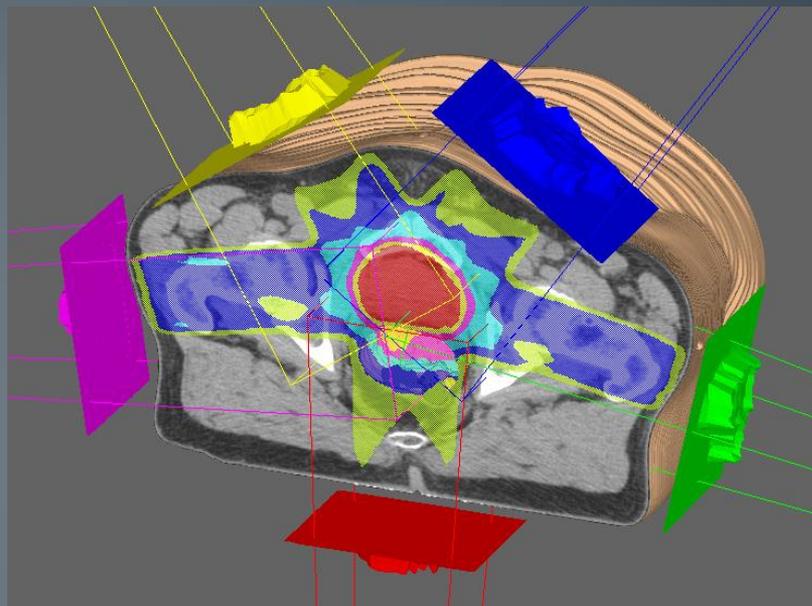
effet egal



L'accélérateur linéaire à électrons



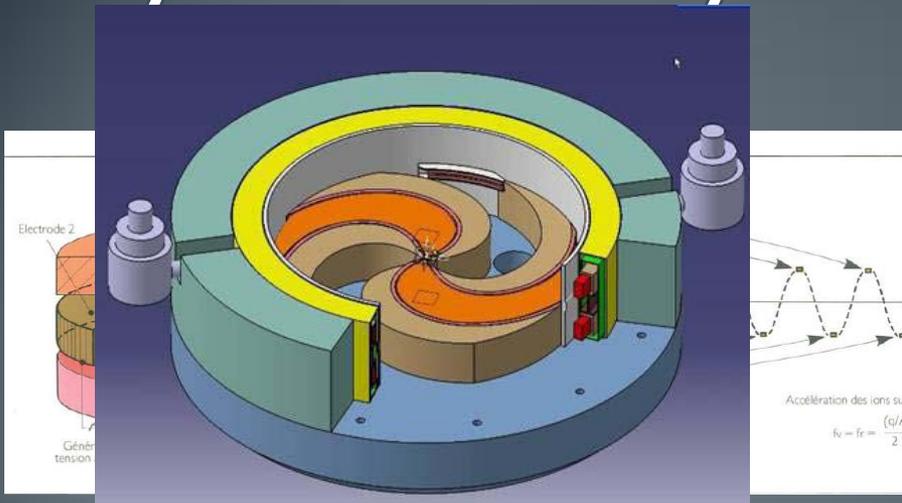
Irradiation à incidence variable (cf SD)



Centres de traitement (cf SD)

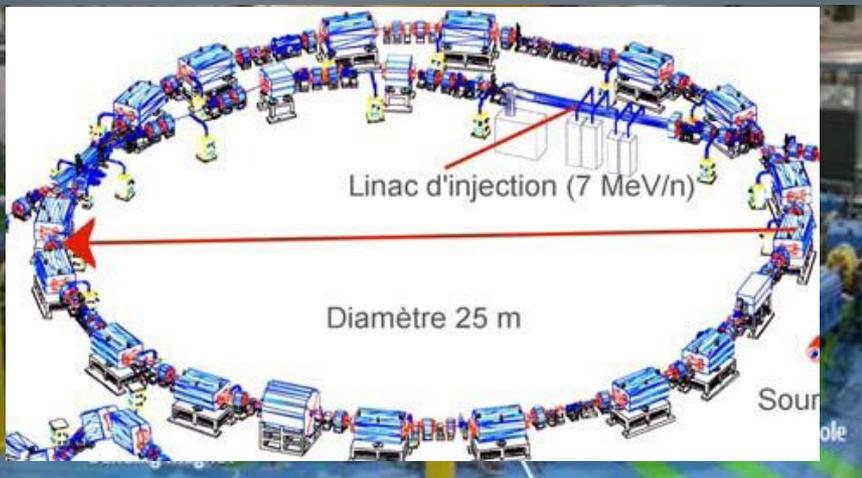
- 50 centres de traitement par faisceau de protons dans le monde
106000 patients traités depuis les années 1990
- 2 centres en France :
Centre de Protonthérapie d'Orsay et Centre Antoine Lacassagne Nice
- 8 centres de traitement par ions carbone
4 au Japon, 2 en Chine, 1 en Allemagne et 1 en Italie
13000 patients traités depuis les années 2000
deux autres centres allemands avaient été prévus
un centre en construction à Vienne (MedAustron)
- En France
 - ETOILE (LYON) abandonné (démarré en 2000)
 - ARCHADE (Advanced Resource Centre for HADrontherapy in Europe)
 - Une machine de traitement protons+une de R&D carbone

Cyclotron et synchrotron



Cyclotron

- Compact et économique
- Flexible en intensité
- Limité en énergie
- Machine à énergie fixe
- Besoin d'un dégradeur pour positionner le pic de Bragg

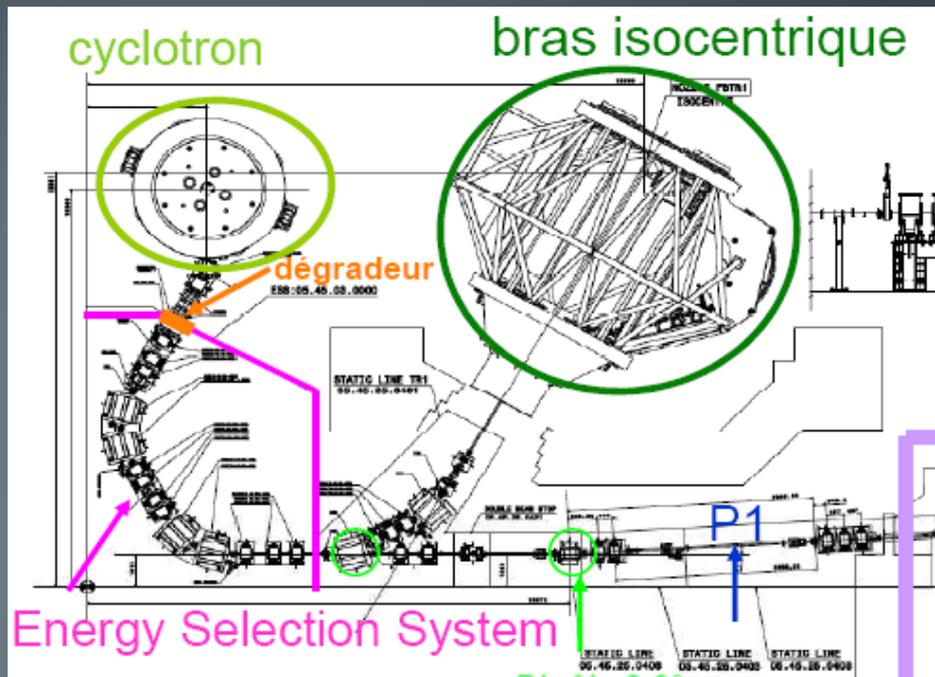


Synchrotron

- Non limité en énergie
- Flexibilité absolue en courant et énergie (1 s)
- Irradiation active (cf après)
- Moins économique

Carbone 430 MeV/uma → diamètre 25 m

Cyclotron: Centre de Protonthérapie d'Orsay



$E_{max} = 235 \text{ MeV}$

$I_{max} = 500 \text{ nA}$

220 tonnes

4 secteurs – 2 cavités RF à 106.157 MHz

champ moyen à l'extraction 2.188 T

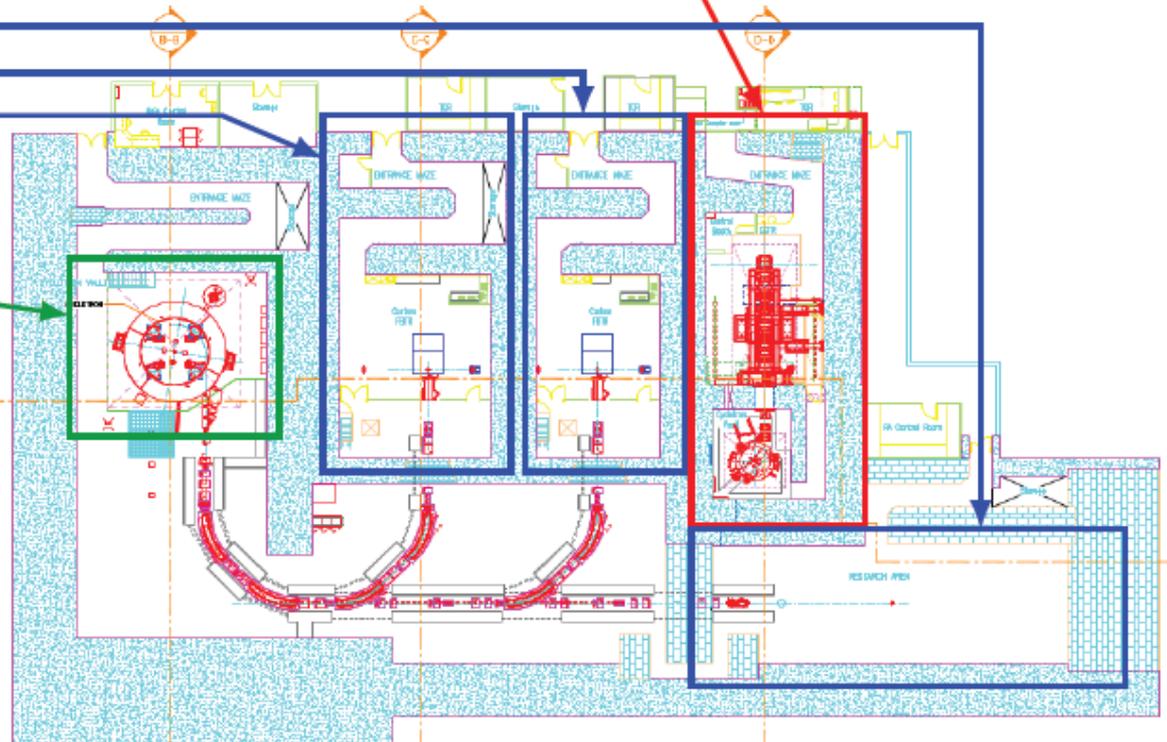
JM De Conto-Ecole IN2P3 Bénodet

Projet ARCHADE



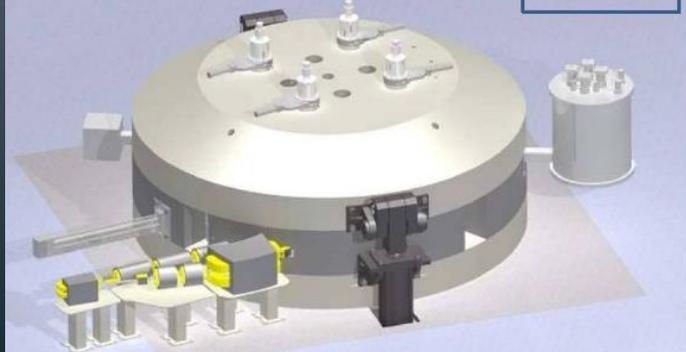
- Hadrontherapy center :
 - ▶ Protontherapy treatments
 - Proteus One (S2C2)
 - Protons at 250 MeV
 - ▶ Research in carbon-therapy
 - Physics
 - Biology
 - Clinical testing

- Supraconducting Cyclotron C400
 - ^{12}C at 400 MeV/u
 - Protons at 250 MeV
 - All light nuclei with $A/Z=2$



Cyclotron cryogénique (C/p)

C : 400 MeV/u
p : 250 MeV

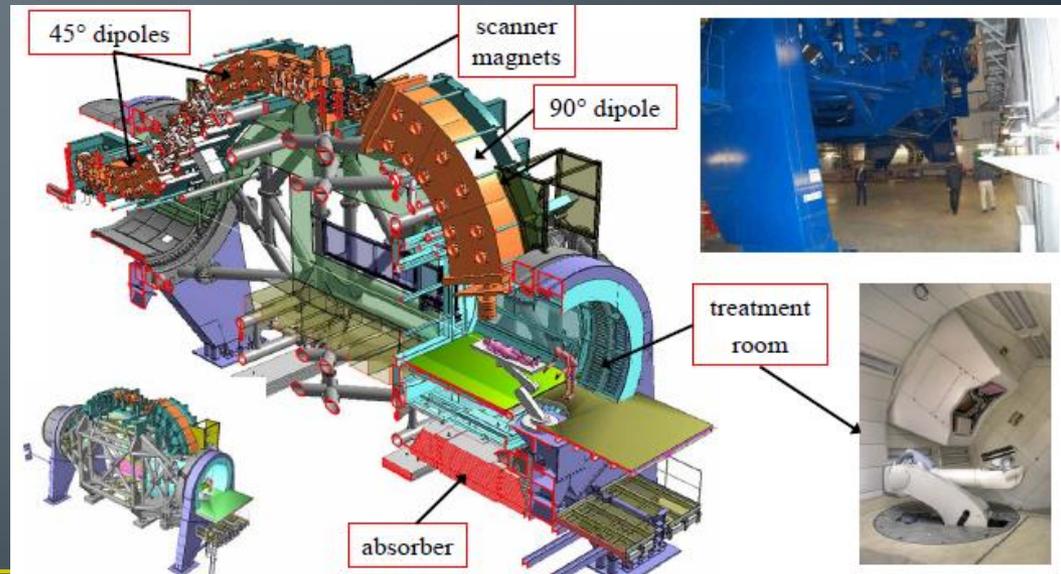


$B_{\max} = 3,5 \text{ T} - 700 \text{ tons} - 6,6 \text{ m } \varnothing$

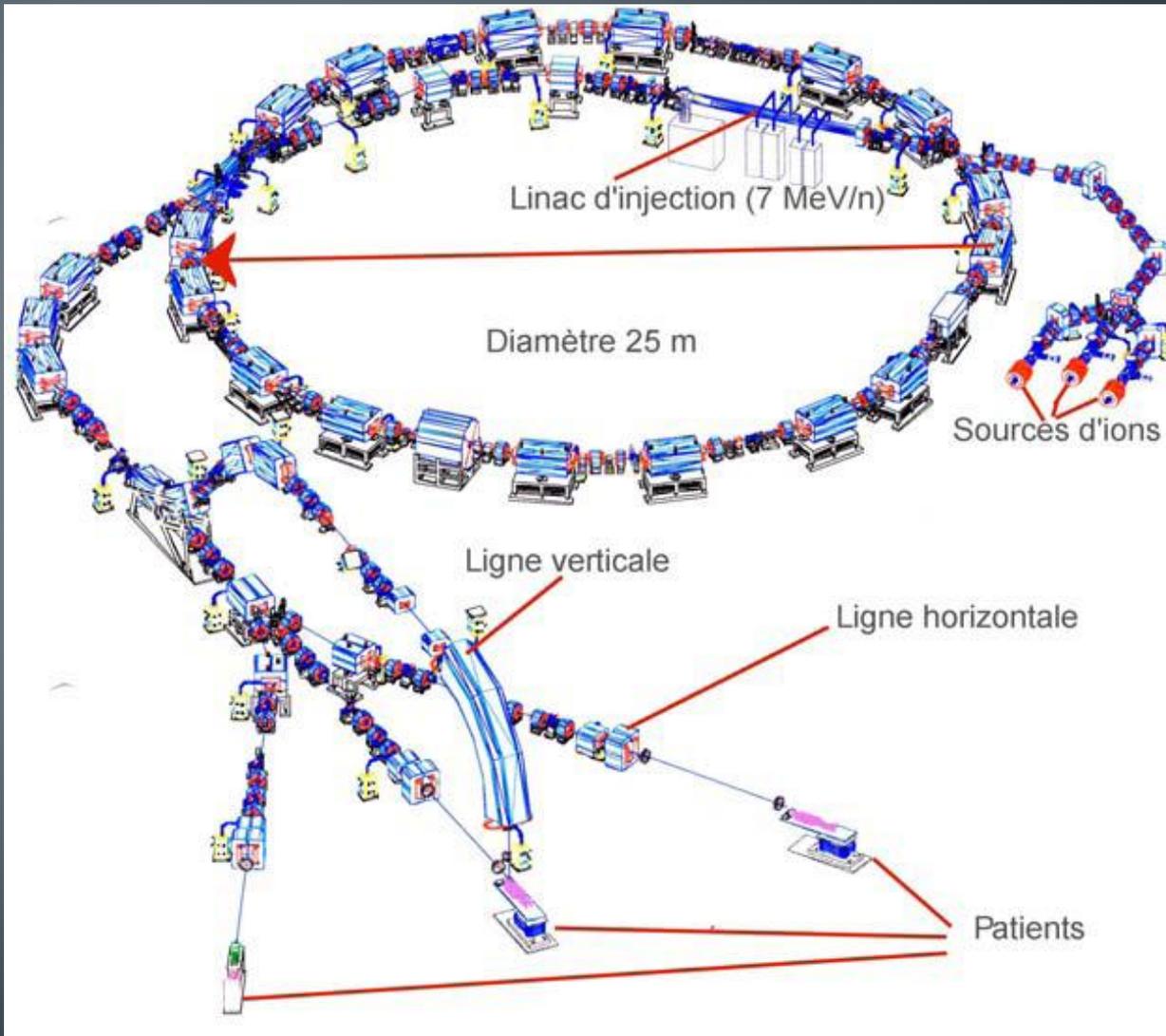
HIT Heidelberg (en opération)



Diamètre synchrotron 25m
GANTRY: 22mx13m 450t



CNAO (Pavie). En opération



**Merci de votre
attention**