

Accélérateurs de particules une introduction

Jean-Marie De Conto
Université Joseph Fourier
LPSC - Grenoble

Plan approximatif du cours

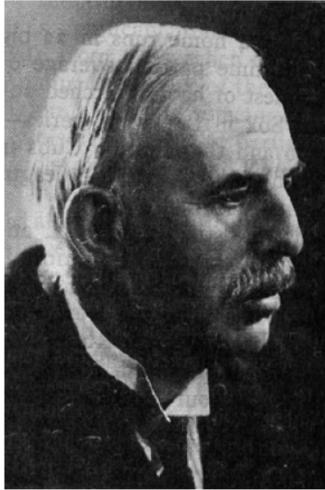
- ❑ Les accélérateurs électrostatiques et leurs limitations. Rem`de: l'accélération HF
- ❑ Guider et focaliser un faisceau. Notions d'optique et d'émittance
- ❑ Accélérer pour de bon: cavités
- ❑ Exemples de machines: cyclotron, synchrotron, linac, RFQ....
- ❑ Quelques diagnostics de faisceau

Références

- Ecoles Accélérateurs IN2P3/CEA (Alex Müller, Eric Baron, Jean-Luc Biarotte, MM Pottin, Monard, Dologeviez, JMDC...) récente ou anciennes
<http://www.in2p3.fr/actions/formation/accelerateurs09/Accelerateurs-09.htm>
- Centre de Protonthérapie de l'Institut Curie (Orsay): Le projet d'extension et de modernisation par Annalisa Patriarca (Institut Curie) – avril 2009
- Patrick Ausset: instrumentation des faisceaux (100 pages de diagnostics)

Revue de quelques accélérateurs classiques

Comment être précurseur: s'appeler Ernest

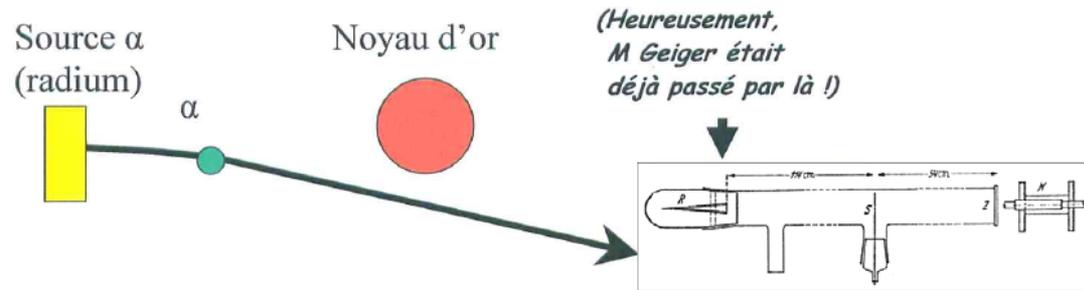


Ernest Rutherford,

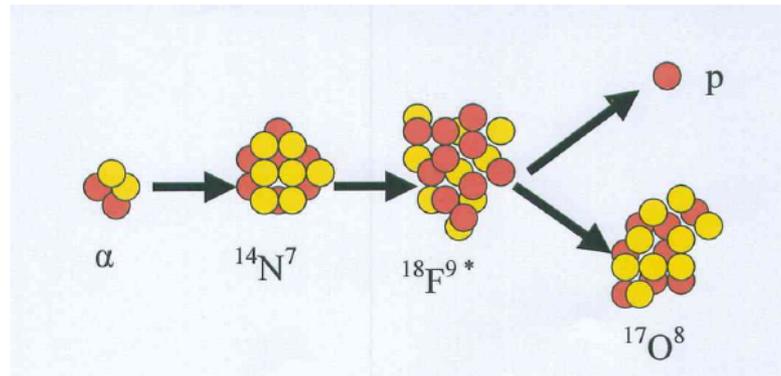
1st baron of Nelson and Cambridge, et fervent de rugby

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

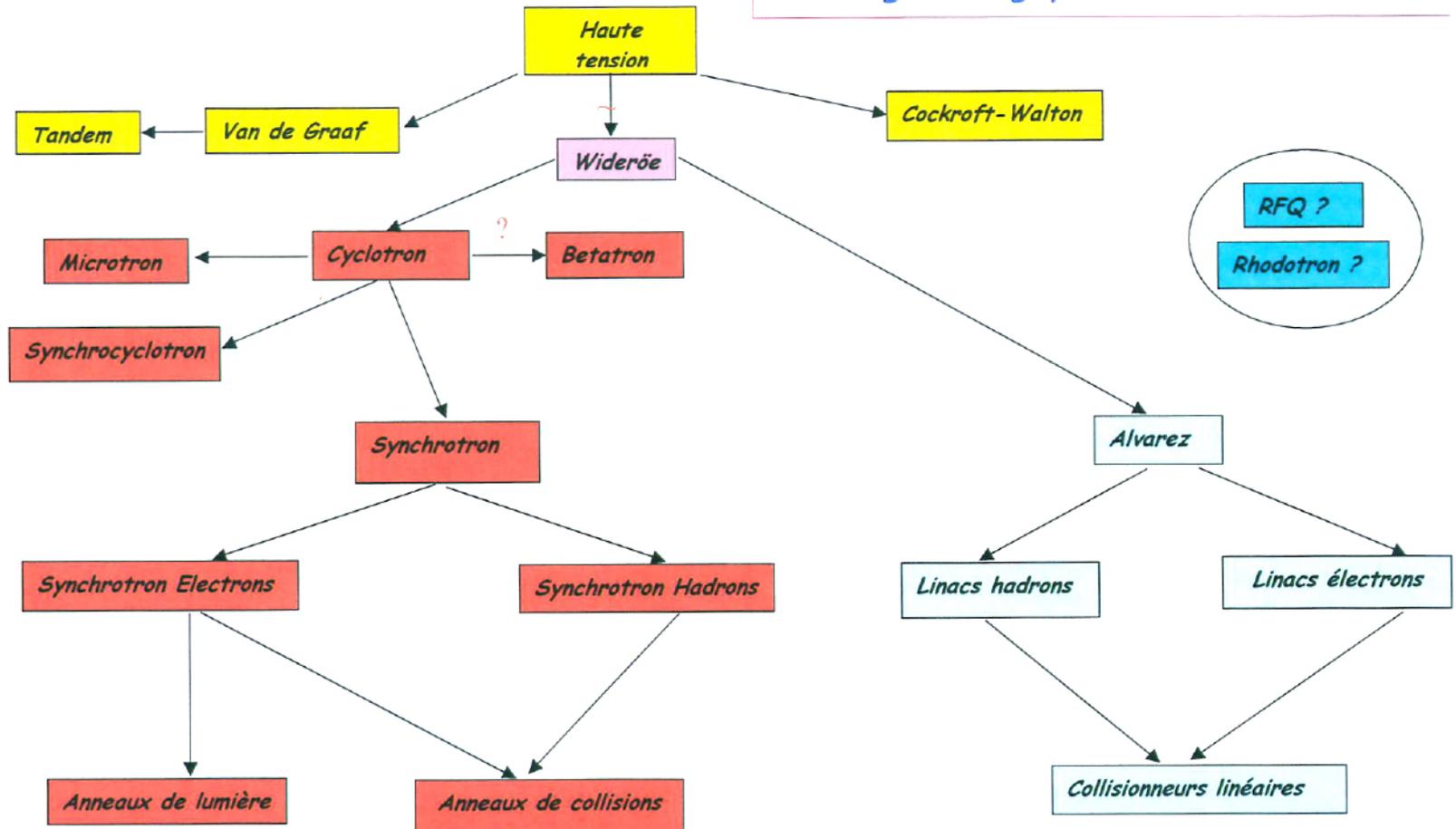
Il met en évidence l'existence d'un noyau dans l'atome (1911)



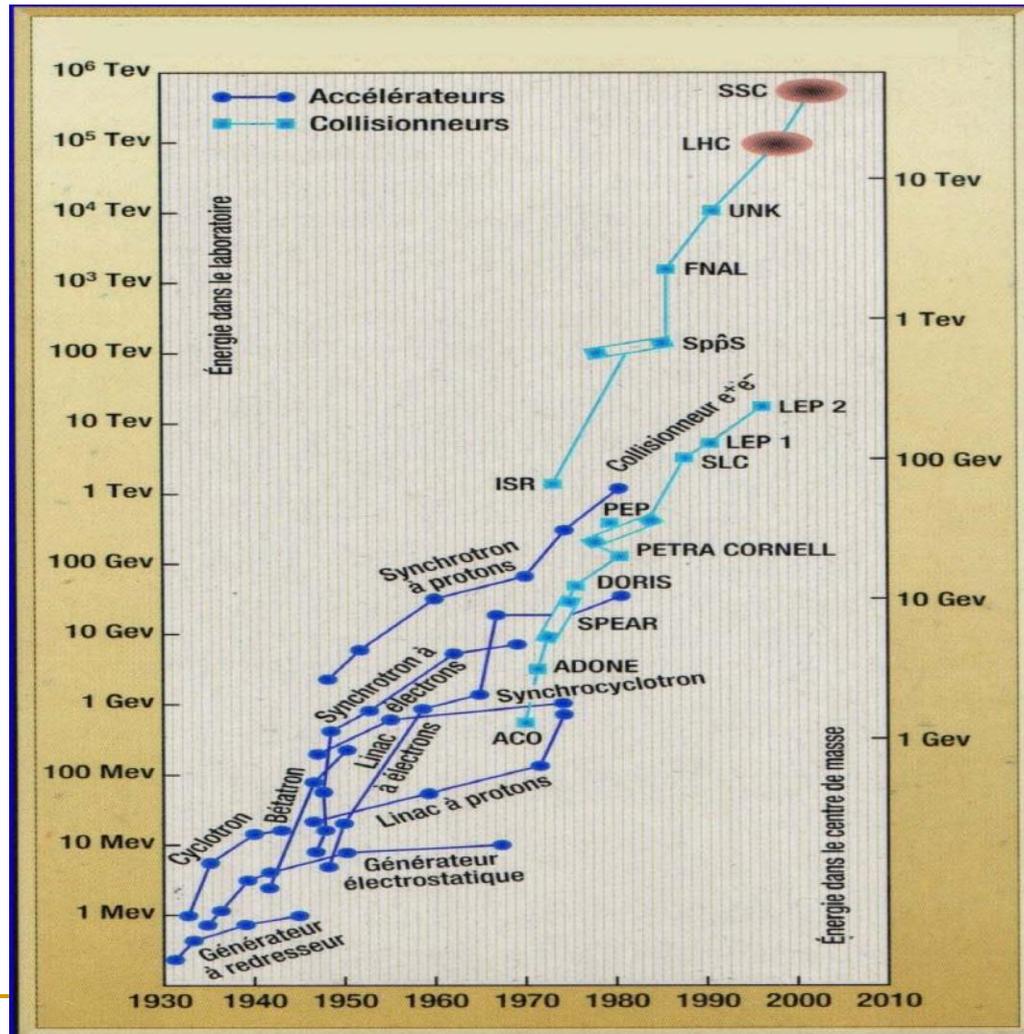
Il réussit la première transmutation artificielle (1919) avec un projectile rapide : l' α , issu d'une source radioactive.



Arbre généalogique des accélérateurs



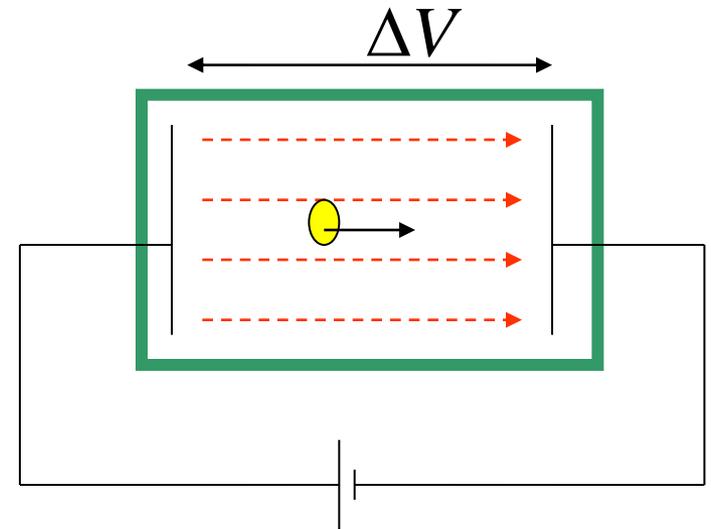
Le diagramme de Livingston



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

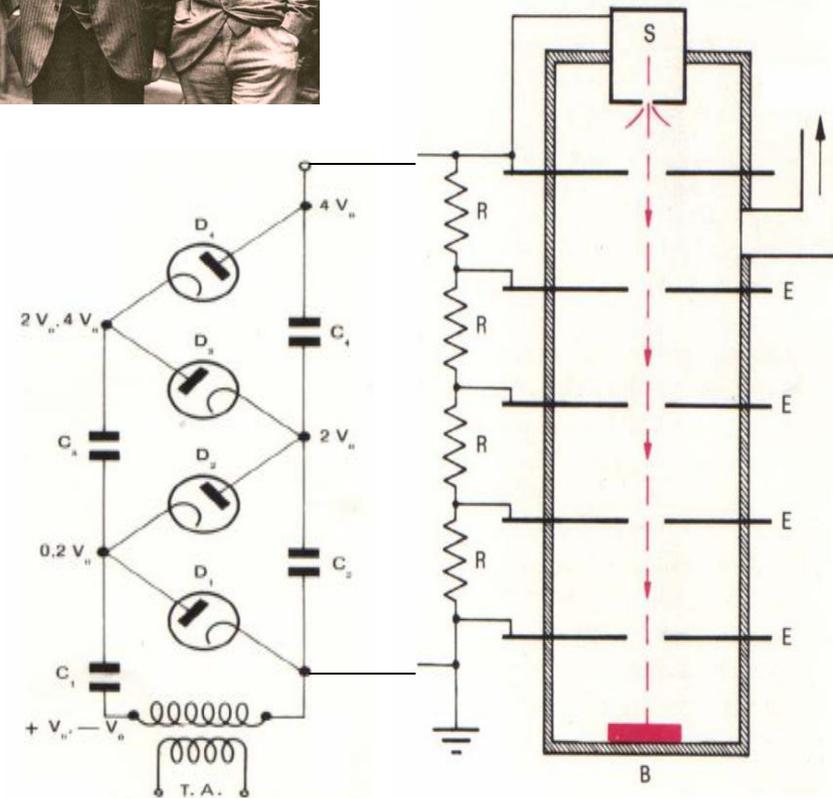
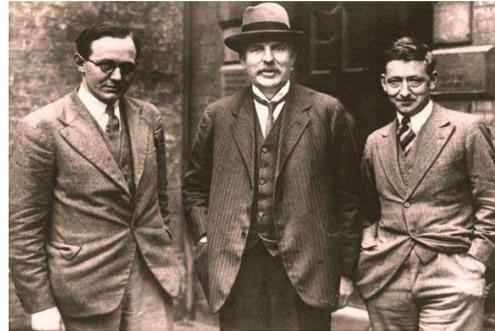
Energie stockée dans le LHC (10^{14} protons de 7 TeV) versus un Boeing 747 de 170 tonnes?



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

Accélérateurs électrostatiques

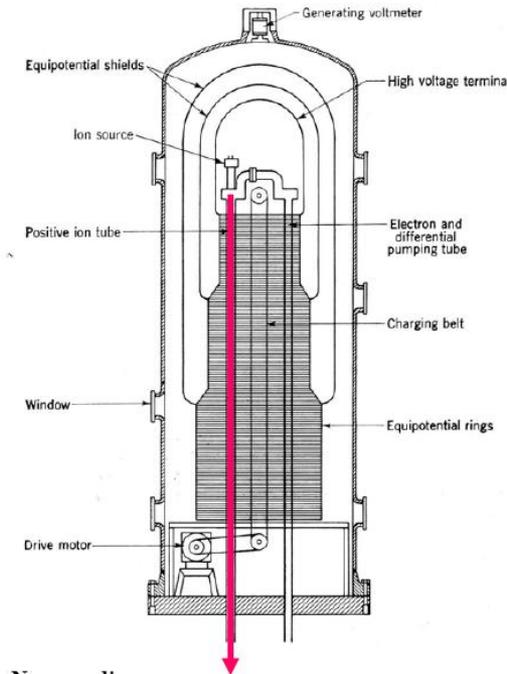
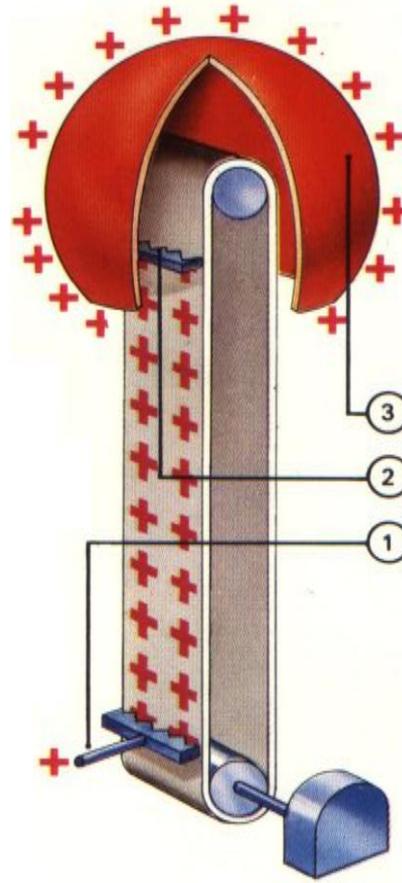
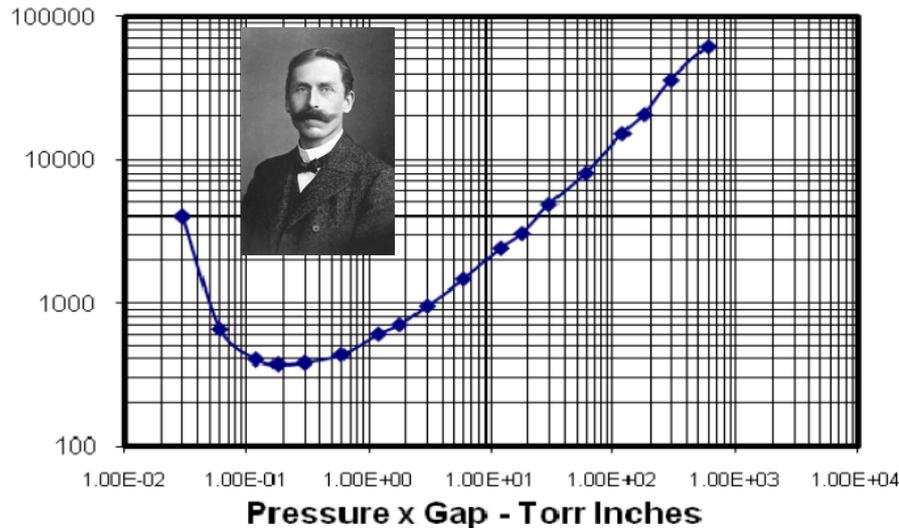
- Cockroft, Walton et Ernest
- Limité à 1.25 MV
- Toujours en usage (injecteur de PSI), Fermilab



Limitation en tension (claquages).

Loi de Paschen - Accélérateurs Van de Graaf

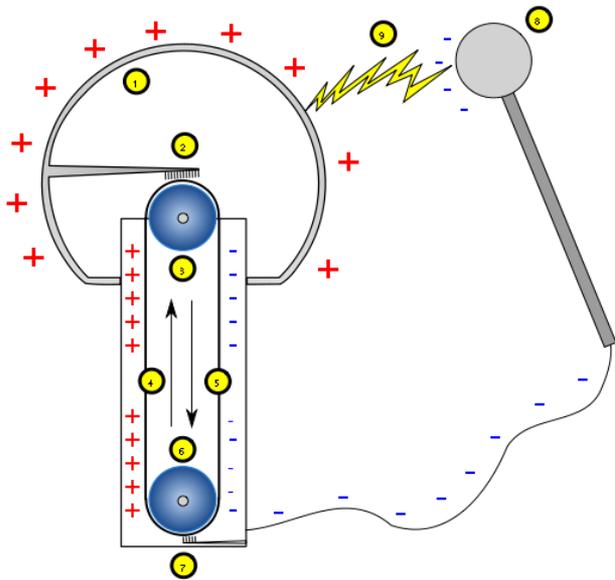
- o Vide: 3.6 MV/m en théorie
 - o Air sec, Azote ou SF6 sous pression
- 10 MV



Van de Graaf - suite



Générateur Van de Graaf: avantages

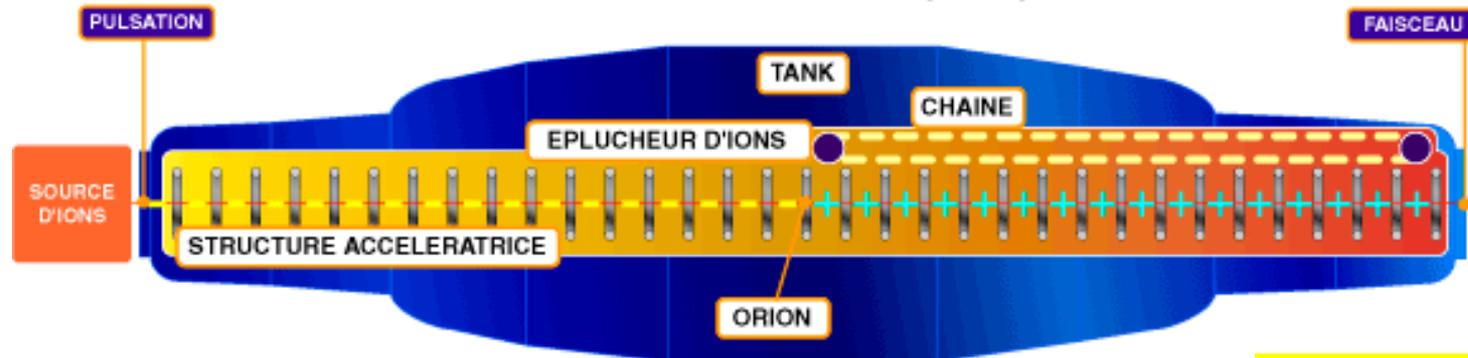


Tandem: l'exemple d'Orsay

- Qualités et défauts
 - ❑ Qualité faisceau, cylindrique, continu
 - ❑ E variable
 - ❑ Limité en tension



TANDEM : Schéma de principe

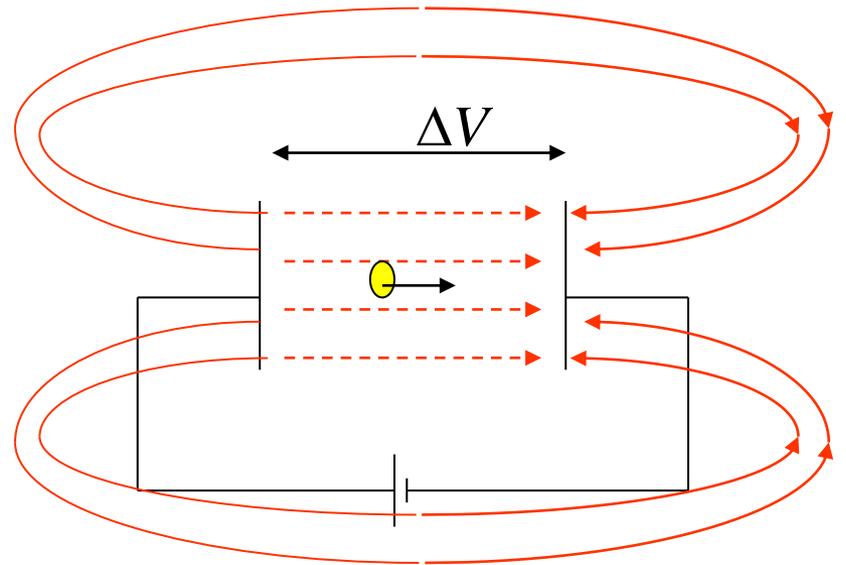


Tandem ORSAY: 15 MV – Ions Hydrogène, Hélium, Carbone, NH etc

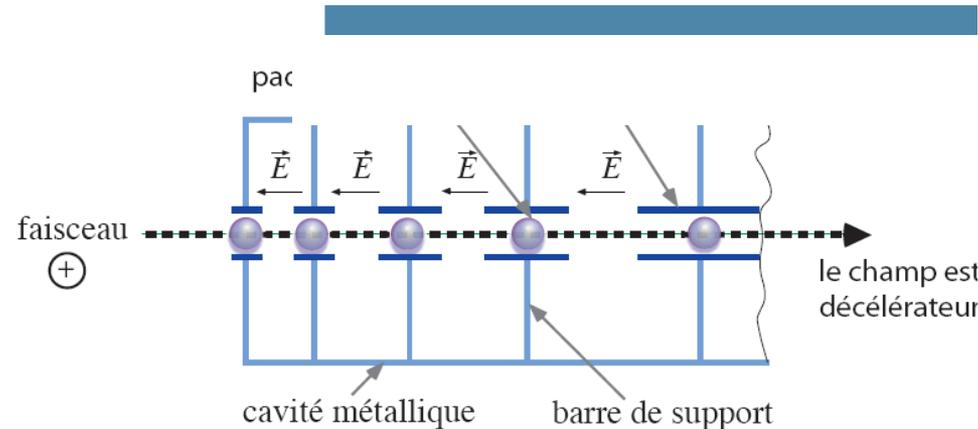
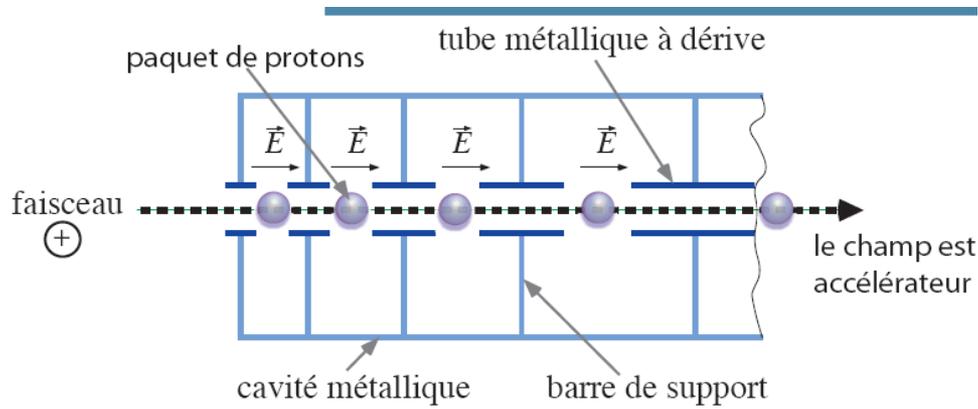
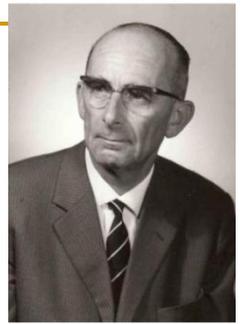
18-25 MV au terminal
 $T=V(1+Q)$

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)



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

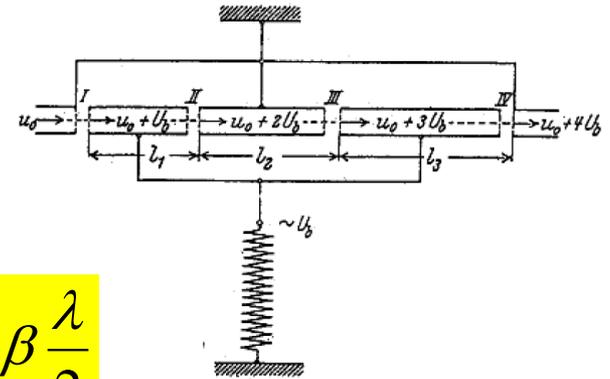
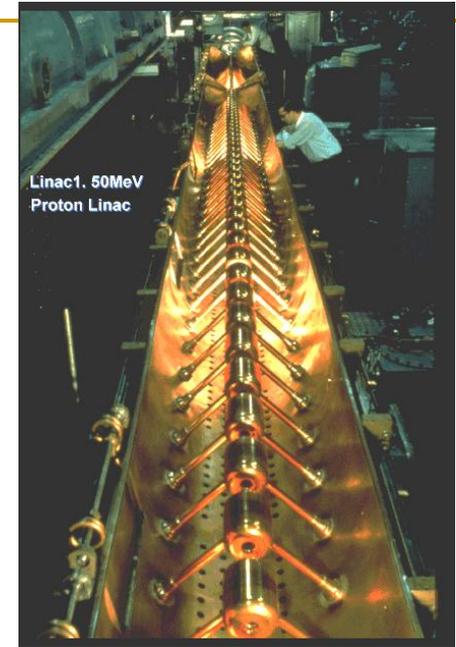


Fig. 3.7: Rolf Wideröe in front of one of the linac models in the

Mode π ou 2π

Quelques exemples

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



Dynamique de faisceau

Mouvement d'une particule

Guidage des particules

Éléments de guidage (lentilles)

Forces

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\frac{dm\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

- Electrique: \parallel E \rightarrow Accélération et guidage
- Magnétique: \perp à v et B (règle des 3 doigts) \rightarrow Guidage

Energie cinétique

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

Non relativiste

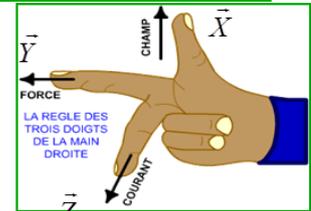
$$\gamma_L = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_L^2}}$$

$$\text{et } m = \gamma_L m_0$$

relativiste

$$E = \gamma_L m_0 c^2$$

$$T = E - m_0 c^2 = (\gamma_L - 1)m_0 c^2 \approx \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{si } v \ll c$$



Potentiel, énergie, qté de mouvement

$$\Delta T = qV = neV$$

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v} \equiv m \vec{v}$$

$$m_0 c^2 \equiv eV_0$$

- 1 électron-volt = 1 électron accéléré sous 1 volt.

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

- Un électron accéléré sous $V=300$ V: $T = 300$ eV
- Un carbone 12 de charge $4+$ accéléré sous 9kV : $T=36$ keV soit 3 keV par nucléon.

Rigidité magnétique

$$\rho = \frac{mv}{qB} = \frac{\gamma m_0 v}{qB}$$

$$\frac{mv}{q} = B\rho = \frac{\sqrt{n^2 V^2 + 2nVV_0}}{nc}$$

N=nombre de charges (entier)

- Electron de 6 GeV (ESRF) : **20 T.m**
- Rayon de courbure dans un champ de 1 (resp. 2) teslas: 20 (resp. 10) mètres. **Vitesse: 0.99999999965 c ~ 3 10⁸ m/s.**
- Rigidité d'un ion monochargé de masse 130 accéléré sous 30 kV : **0.28 Tm** environ (pour une énergie de 30 keV). **Vitesse :212 km/s.**

Repérage des particules

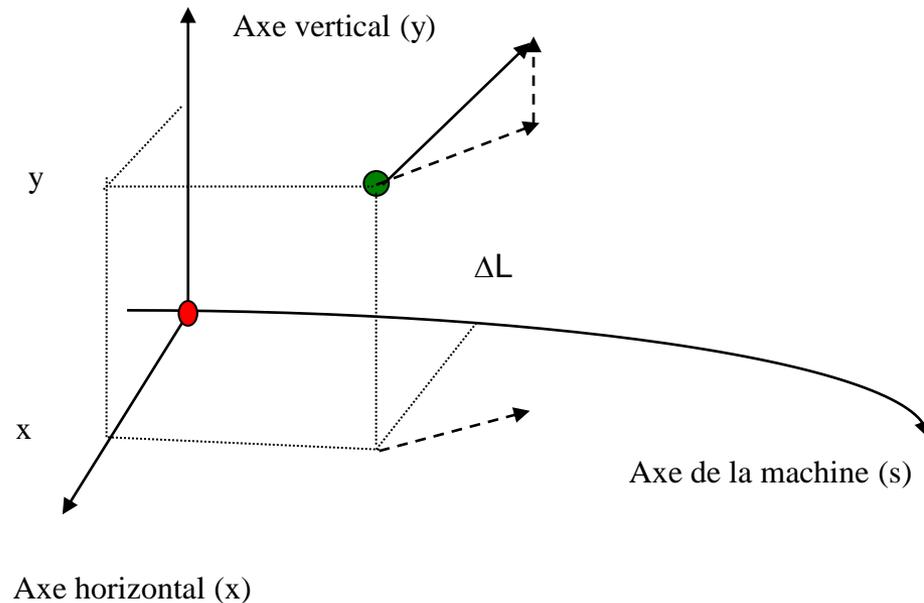
- Trajectoire et particule de référence

$$x' = \frac{v_x}{v} \quad y' = \frac{v_y}{v}$$

- Conditions de Gauss
→ x, x', y, y' petits (parfois)

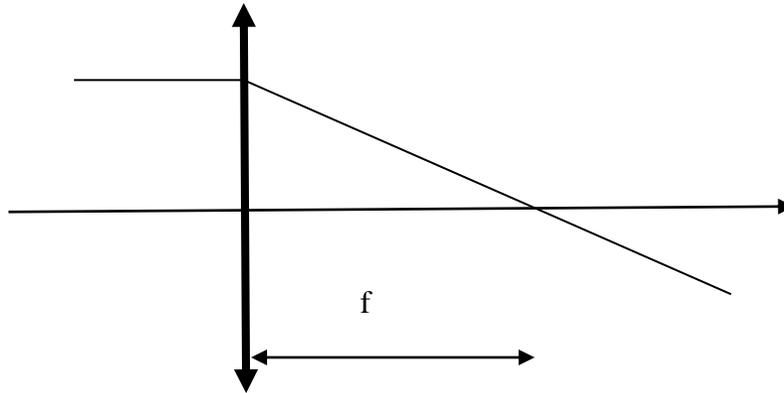
- Petits: linéarité
- Pas petits: aberrations

- Espace des traces:
($x, x', y, y', \Delta L, \Delta p/p_0$) → espace des phases (terme impropre)



Optique : des choses que vous savez déjà

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

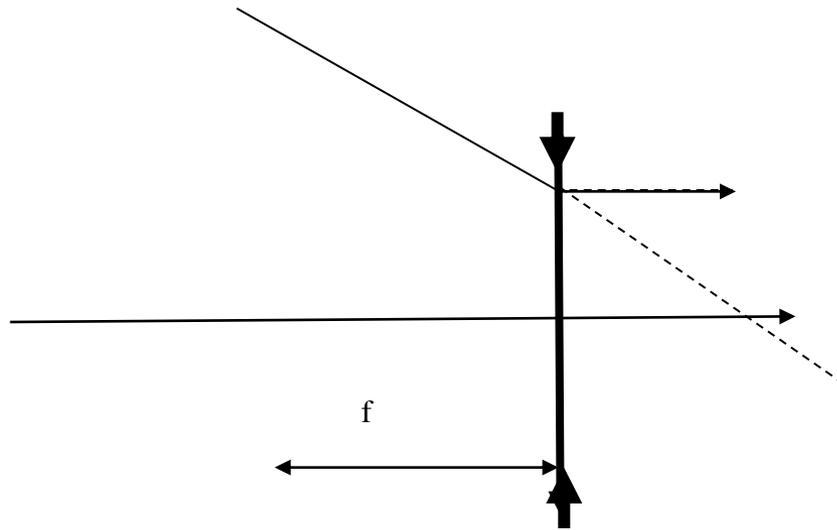


$$x_1 = x_0$$

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

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

Lentille divergente



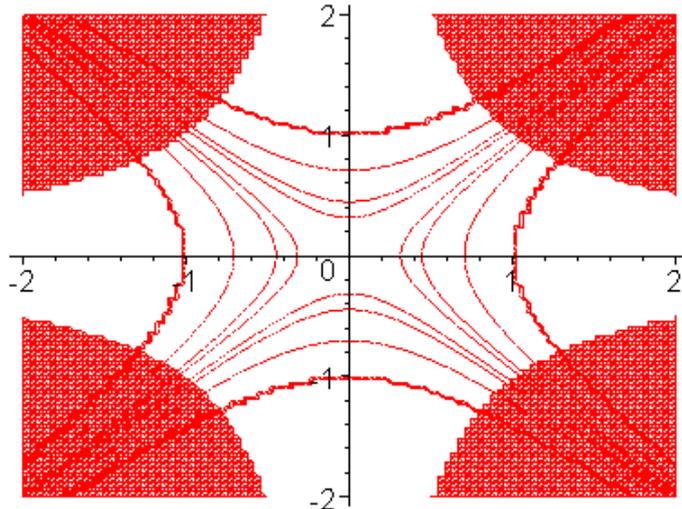
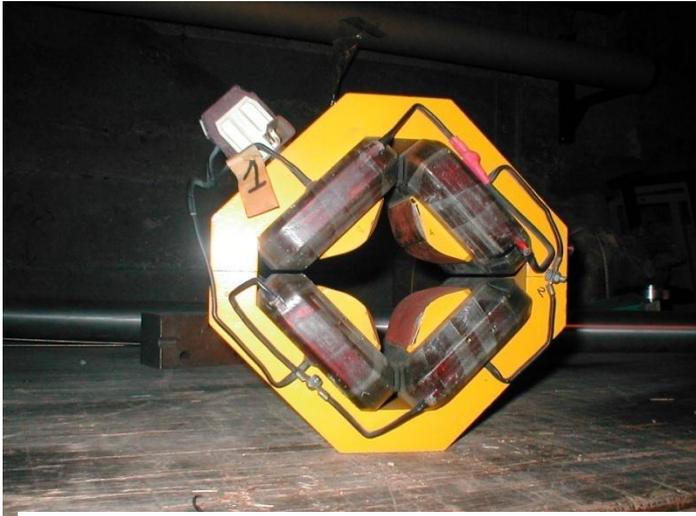
$$x_1 = x_0$$
$$x'_1 = x'_0 + \frac{x_0}{f}$$

- **Propriété** : Deux lentilles minces séparées par un espace sans champ de longueur L , de même distance focale f mais l'une étant divergente et l'autre convergente, forment un ensemble convergent quand $f > 2L$.

Punition: montrer l'assertion précédente!

Comment fabriquer une lentille?

Exemple du quadripôle magnétique



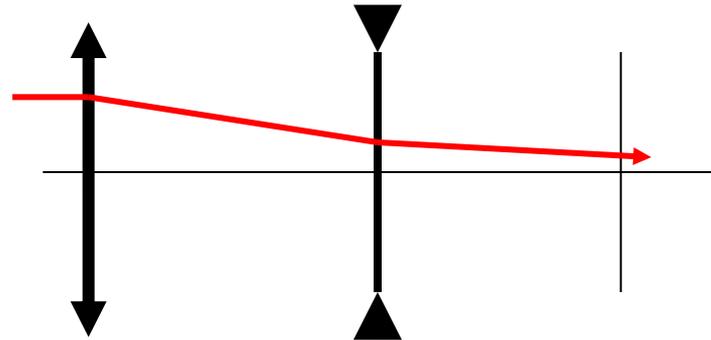
- B_0 sur pôles. Pôles alternés.
- Electrodes idéales hyperboliques
- Il peut être placé à l'extérieur de la chambre à vide.
- Force magnétique plus grande que la force électrique quand E croît, ➔ quadripôles magnétiques dans les grandes machines
- Presque une lentille mince

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

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

La maille FODO

- Toujours « convergent »
- Adapté aux structures à base quadripolaire
- Association de mailles
 - système périodique
 - Oscillation pseudo-harmonique
 - Pas toujours stable
 - Cf « TP »

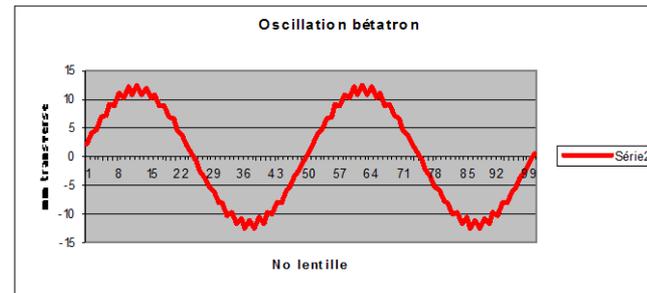
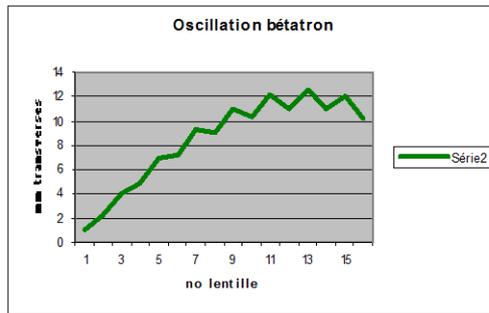


Association de quadripôles. Structure FODO.

Oscillation bêta tron. Stabilité

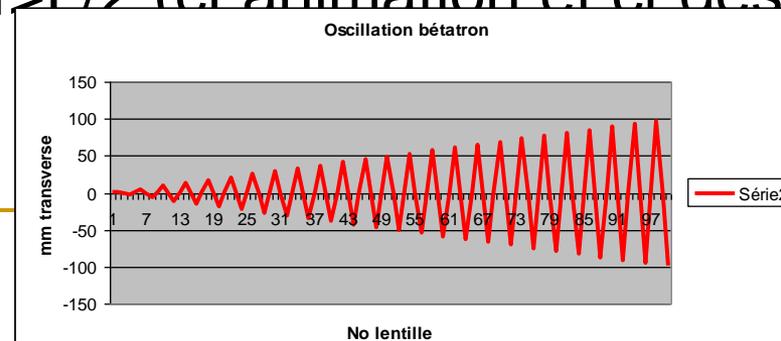
fodo1.xls

- 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)



Bilan sur la structure FODO

- La structure FODO est une des structure de guidage les plus courantes, car la majorité des lentilles ont une structure quadripolaire (cf plus loin) focalisante dans un plan et défocalisante dans l'autre
- Une particule se déplaçant dans une structure FODO a soit un mouvement pseudo-harmonique soit instable
- L'instabilité apparaît pour $f < L/2$ (focalisation trop forte)
- C'est la structure de base des synchrotrons (focalisation forte).

Fonctions bétatron, sans démonstration

- On suppose que la force de focalisation est suffisamment régulière, sans accélération
- Le mouvement d'une particule est alors pseudo-harmonique

$$x'' + k(s)x = 0$$

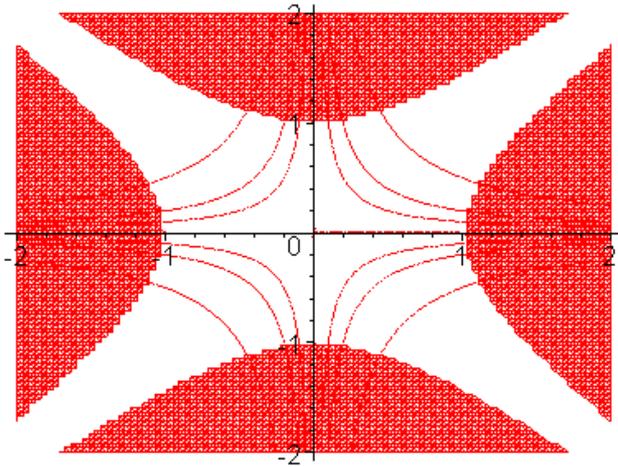
$$x(s) = x_0 \left[\sqrt{\frac{\beta}{\beta_0}} (\cos \mu + \alpha_0 \sin \mu) \right] + x'_0 \sqrt{\beta \beta_0} \sin \mu$$

$$\mu = \int_0^s \frac{d\xi}{\beta(\xi)}$$

Il faudrait aller plus loin

$$\alpha = -\frac{1}{2} \frac{d\beta}{ds}$$

Quadrupôle électrostatique: pour mémoire



- 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).



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

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

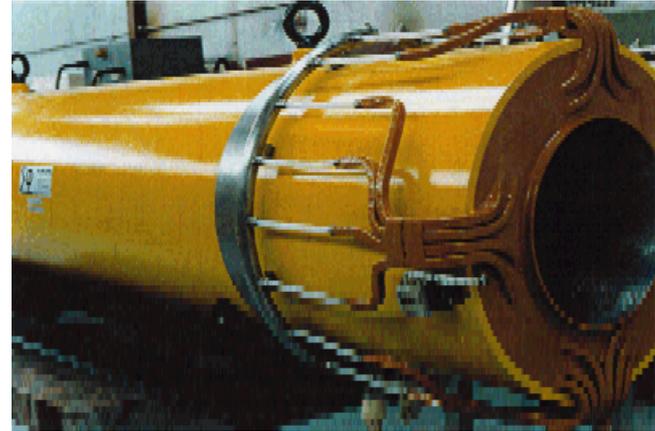
Quelques propriétés

- 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 Qpôle original

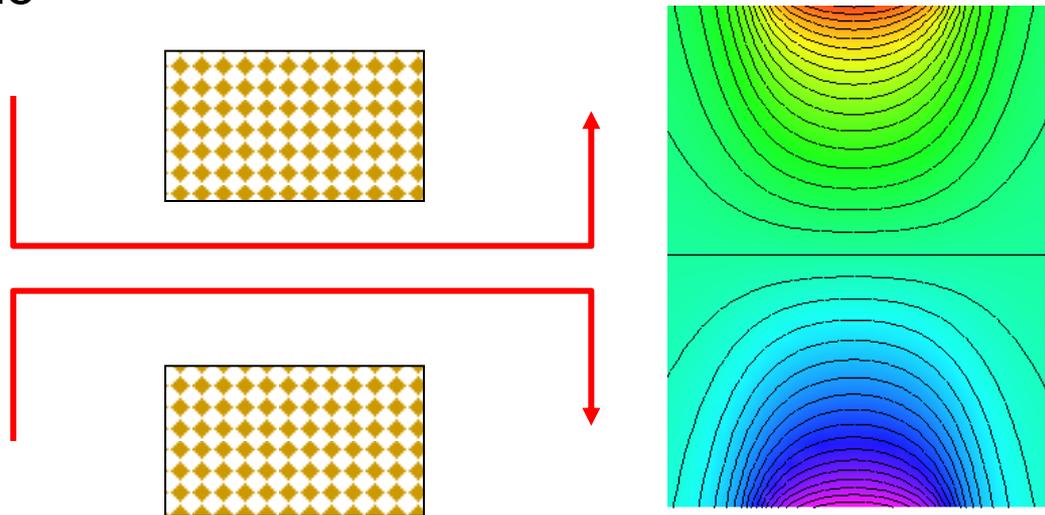


Le solénoïde

- Focalisation par les faces
- Peu d'aberrations
- Convergent
- Symétrie de révolution, mais couplage des plans
- 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

$$B \propto x^2$$

$$B \propto x^3$$

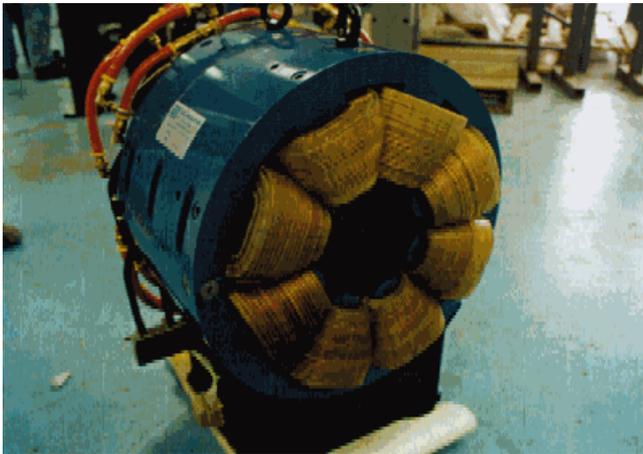
$$B \propto x^4$$

$$B \propto x^5$$

...

Corrections de non linéarité

Correction de chromaticité dans les anneaux

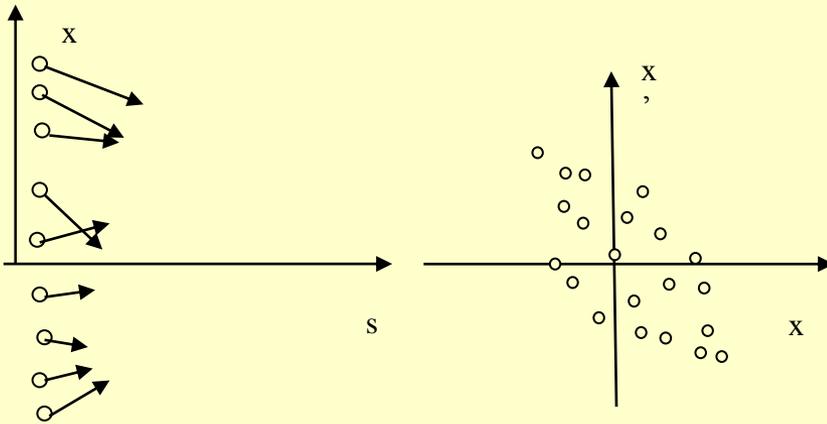


C'est encore à vous

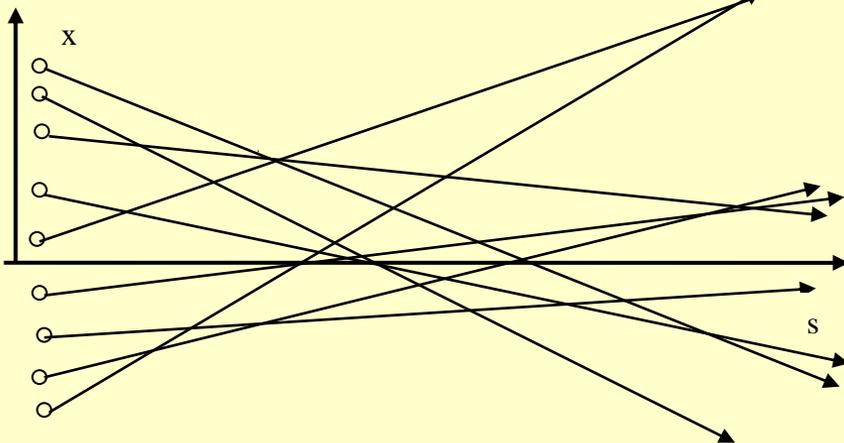
- On suppose que la rigidité vaut 20 Tm . On veut faire un quadripôle de distance focale 0.8 mètres, de rayon de gorge 30 mm pour $B=1\text{T}$. Quelle est la longueur du quadripôle ?
 - Indication : Réfléchissez bien!
- Un Qpôle idéal est il parfait (sans aberrations) ?

Emittance du faisceau

Description globale d'un faisceau – émittance – notion intuitive

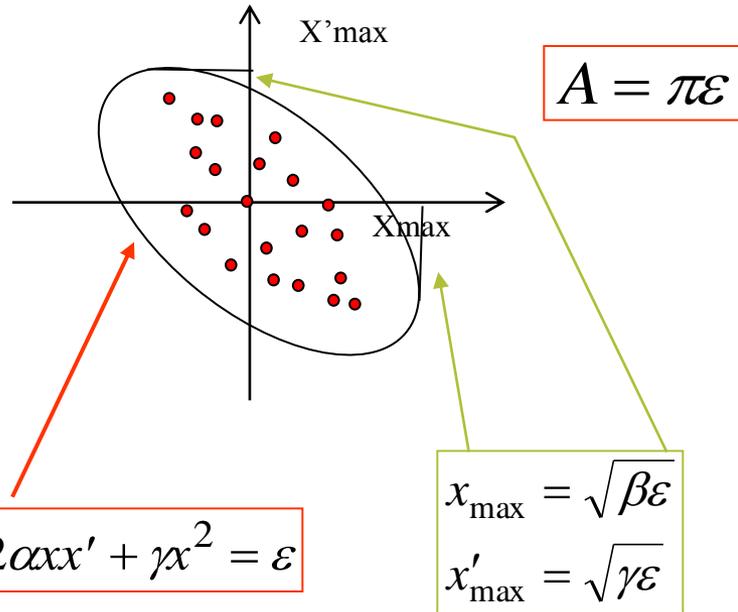


- Exemple sur espace sans champ
- (x, x') uniquement ici
- Minimum d'enveloppe (« waist »)



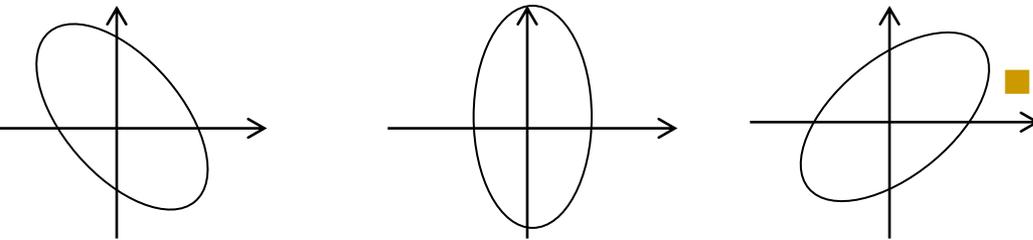
- ➔ Caractériser globalement
- ➔ Émittance (« RMS »)

Emittance: définition



- ellipse qui encadre au mieux
- émittance dite RMS (ici)
- englobe tout ou partie (ex : 95%) des particules.
- caractérise la dimension et la divergence du faisceau.
- 4 paramètres ($\alpha, \beta, \gamma, \epsilon$)

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



$\alpha > 0$ (convergent)

$\alpha = 0$ (waist)

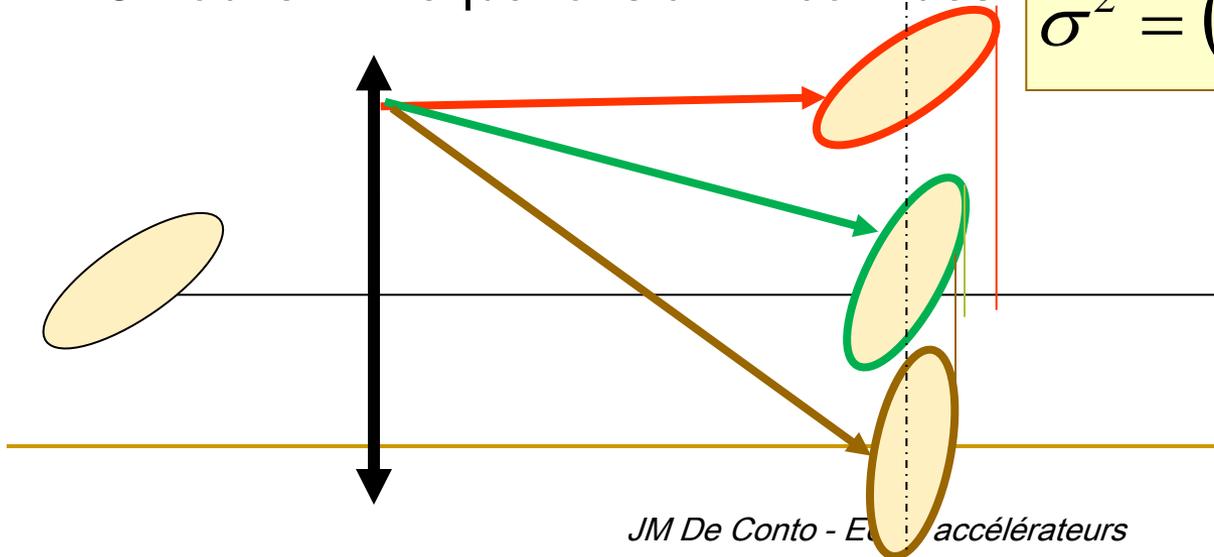
$\alpha < 0$ (divergent)

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

Méthode des 3 gradients et émittance RMS

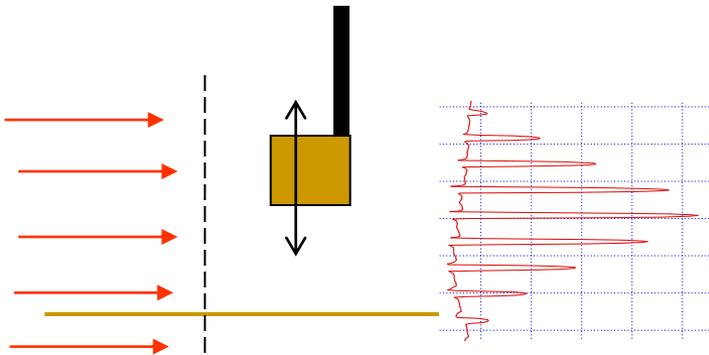
- La dimension quadratique moyenne varie le long de la structure en fonction de la focalisation
- Elle est reliée aux paramètres d'émittance
- On utilise une lentille connue dont on fait varier la force de focalisation
- On effectue N mesures de profil
- On obtient N équations à 4 inconnues

$$\langle x^2 \rangle = \sigma_0^2 = \beta_0 \varepsilon_{RMS}$$
$$\sigma^2 = (A\beta + B\alpha + C\gamma) \varepsilon_{RMS}$$

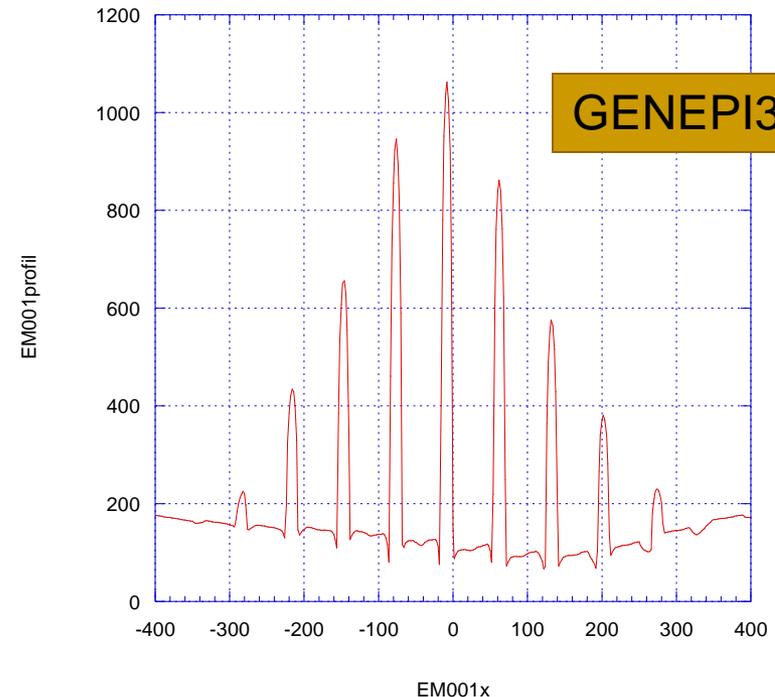


Mesures d'émittance par la méthode du pepper-pot

- ❑ 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)

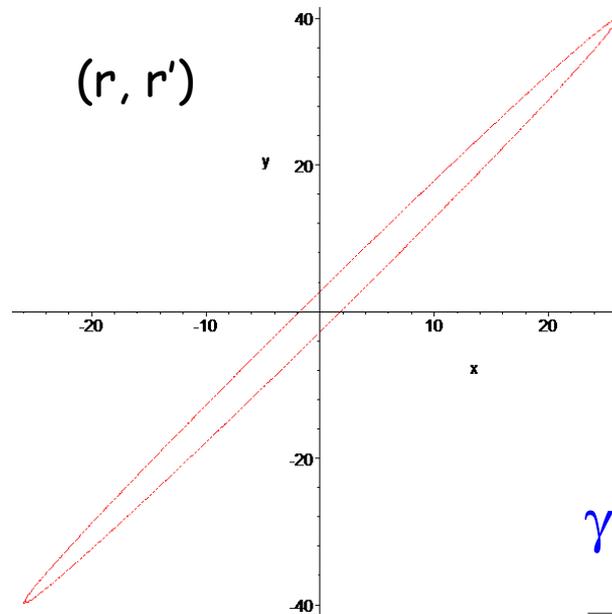
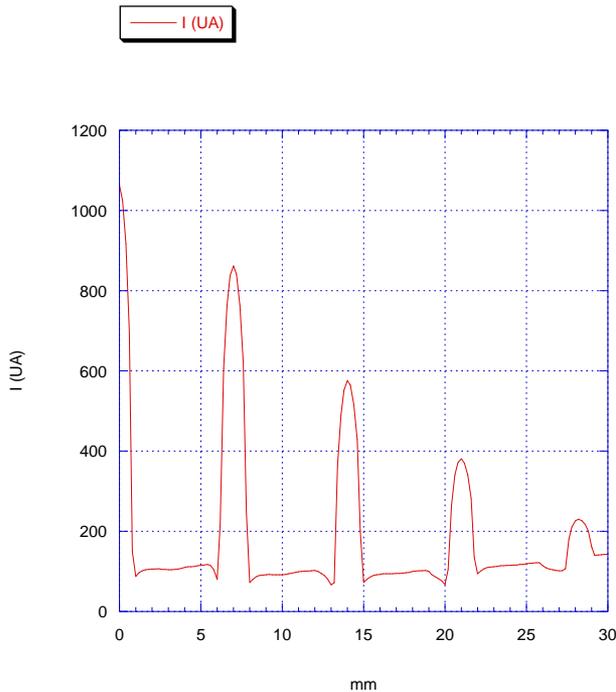


10èmes de mm et UA



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!

Propriétés fondamentales

- **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: $\varepsilon^* = \beta\gamma\varepsilon$ ne varie pas avec E (coefs de Lorentz!!)

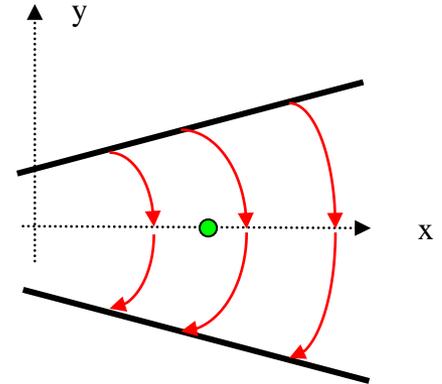
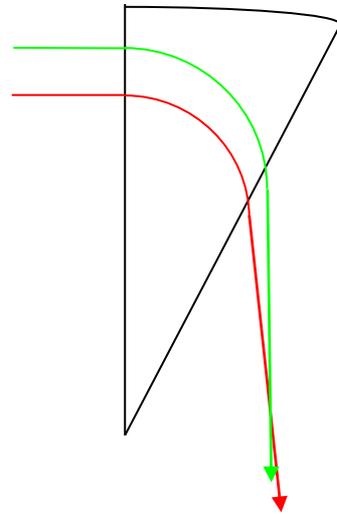
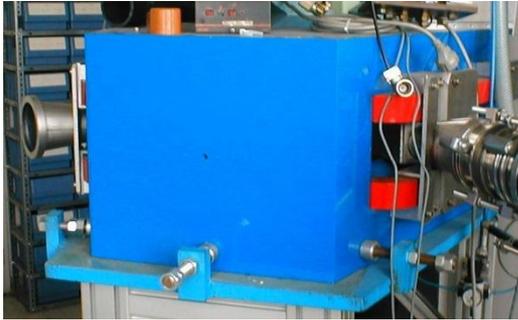
Déviatation du faisceau

Dipôles magnétiques

Structures achromatiques

Application: focalisation finale dans un accélérateur médical

Déviatation et focalisation: dipôle magnétique



- Ici: focalisant dans le plan de déviatation
- **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 déviatation. Il subsiste un effet focalisant dans le plan de déviatation mais amoindri voire défocalisant si $n > 1$

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

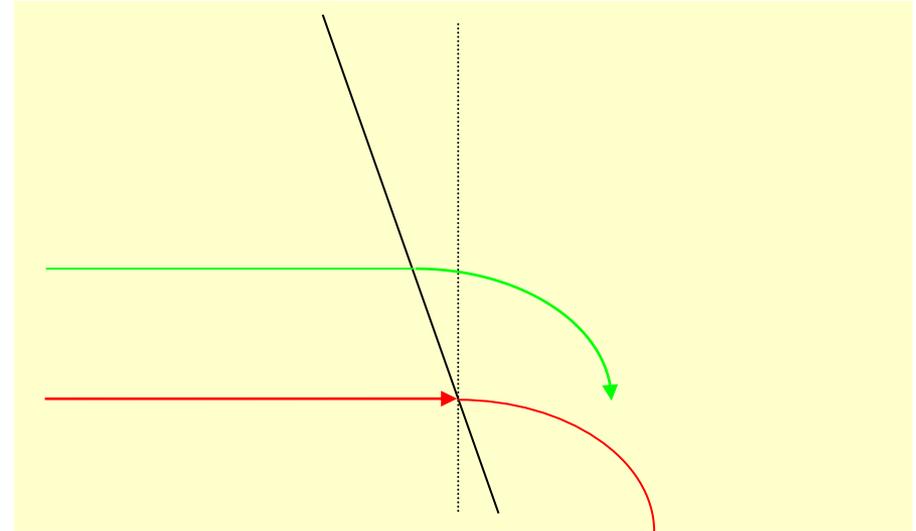
$$n = \frac{B}{R} \frac{\partial B}{\partial x} = - \frac{B}{R} \frac{\partial B}{\partial y}$$

$$x'' + \frac{1-n}{\rho^2} x = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{p_0}$$

$$y'' + \frac{n}{\rho^2} y = 0$$

Focalisation par les faces (edge focusing)

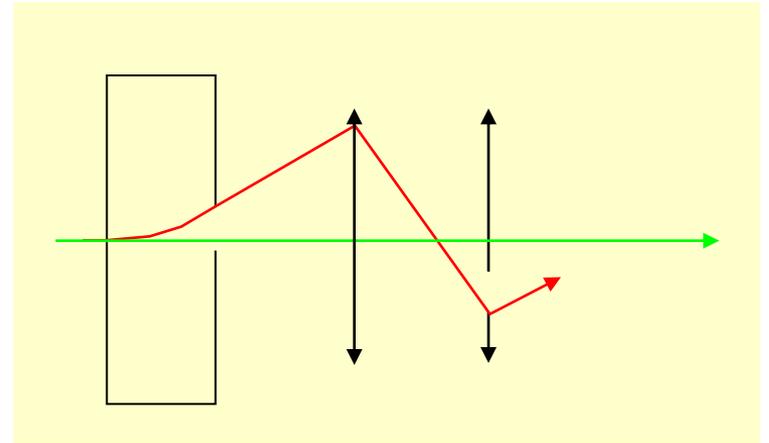
- ~ lentille mince, convergente ou divergente
- effet de face focalisant dans le plan de déviation → effet défocalisant dans l'autre plan
- *Propriété* : Si l'angle d'entrée est égal à celui de sortie et égal au quart de l'angle de déviation alors le dipôle est convergent identiquement dans les deux 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.



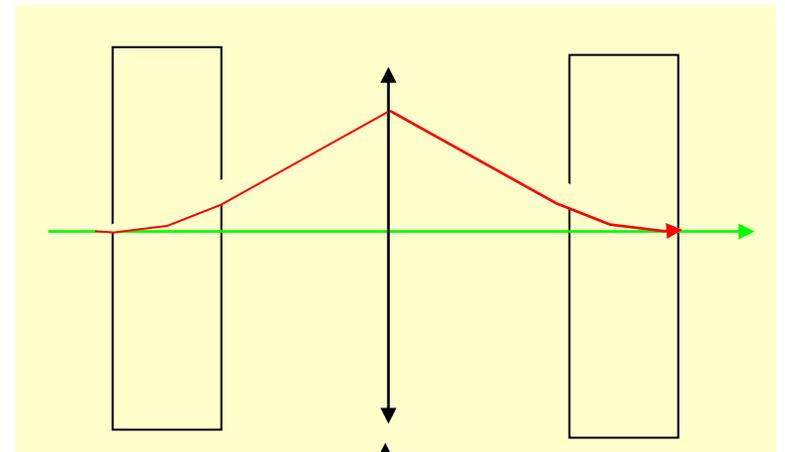
$$\left| \frac{1}{f} \right| = \frac{\tan(\phi)}{R}$$

Achromatisme

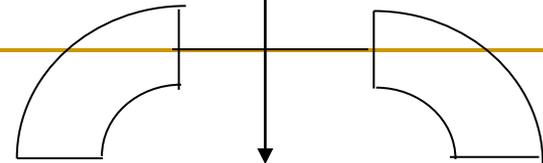
- Système dispersif
- Élargissement et/ou instabilité du faisceau



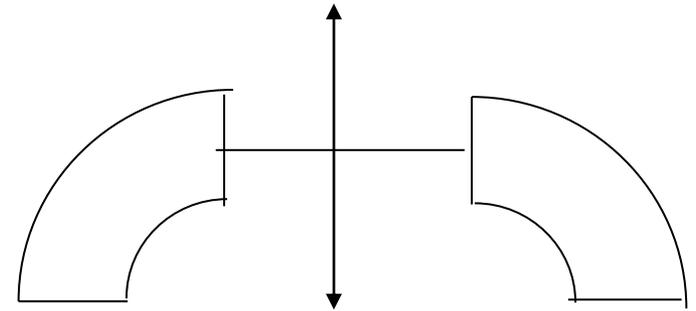
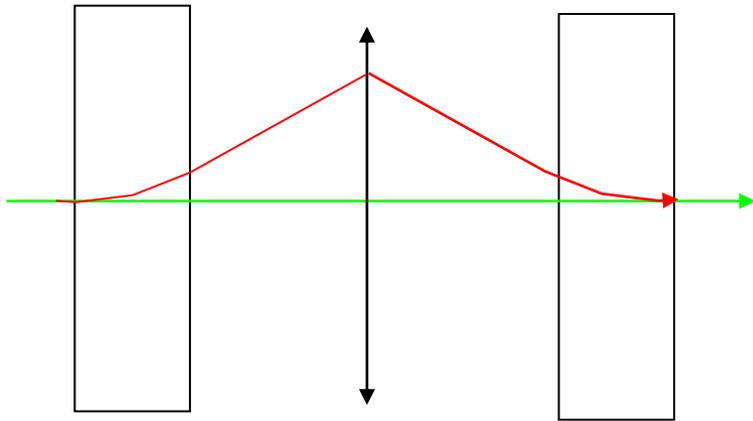
- Système achromatique (rotation dans un seul sens)



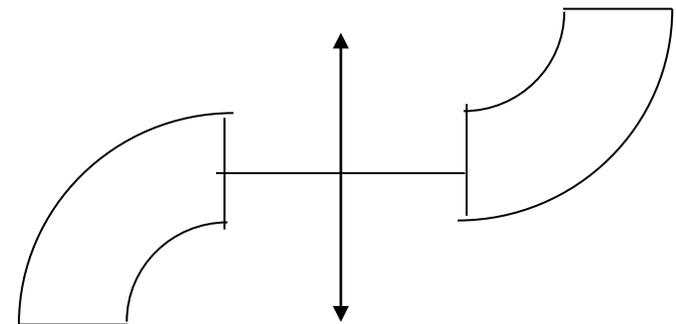
Exercice: dans le cas de rotation en sens contraire?



Exercice! Chicane achromatique

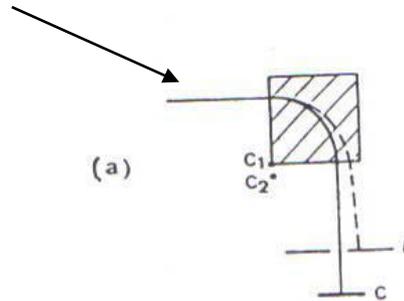


?

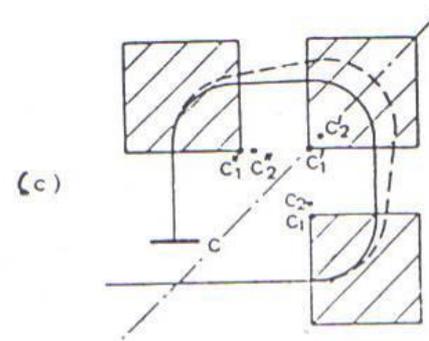
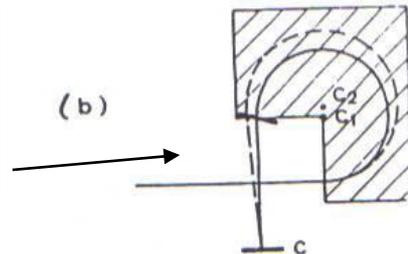


Application: déviation finale d'un accélérateur médical

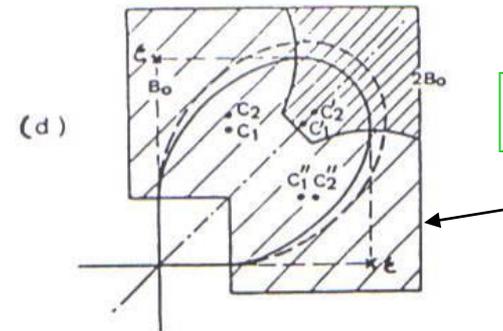
Dipôle simple:
aucun intérêt



270 degrés
achromatique en un
point →



Vrai achromat
→ complexe
→ CLINAC 18
(Varian)



Cf après

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)

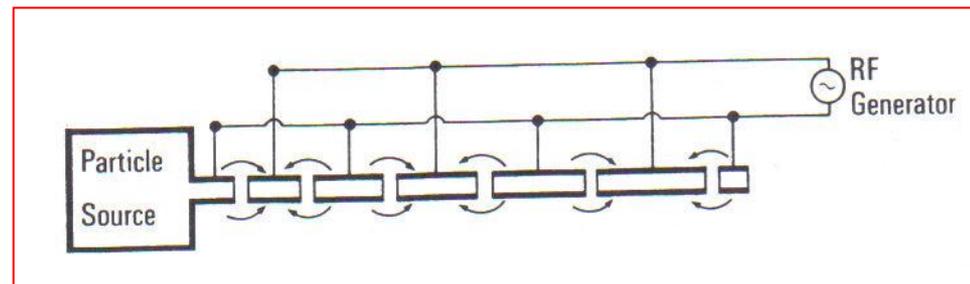
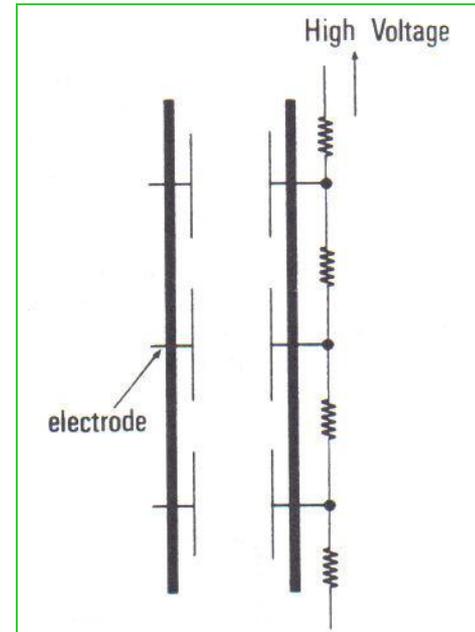
Encore des exos vrai/faux....

- 1] Dans un champ magnétique, la force subie par une particule est perpendiculaire à sa vitesse.
- 2] Dans un champ magnétique, la force subie par une particule est perpendiculaire au champ.
- 3] Dans un champ électrique, la force subie par une particule est perpendiculaire à sa vitesse.
- 4] Dans un champ électrique, la force subie par une particule est perpendiculaire au champ.
- 5] Je peux donner une accélération à des particules à l'aide d'un champ magnétique
- 6] Un quadripôle est une lentille convergente dans les plans horizontaux et verticaux.
- 7] Une lentille électrostatique est toujours convergente.
- 8] A tension égale, à faisceau identique, un quadripôle électrique est plus efficace qu'une lentille électrostatique
- 9] Une lentille ou un quadripôle électrique est plus efficace à basse énergie
- 10] Un dipôle magnétique focalise dans le plan de déviation
- 11] Un dipôle magnétique focalise dans le plan où il n'y a pas déviation
- 12] Je veux réaliser un quadripôle conventionnel magnétique de gradient 20T/m et de rayon 50 mm.
 - 12.1 C'est faisable
 - 12.2 Ça dépend de sa longueur
- 13] * Le synchrotron ETOILE d'hadronthérapie est un anneau de diamètre 24 mètres en technologie conventionnelle. Quelle est la rigidité magnétique maximale des particules ?
- 14] Dans un champ électrique, la trajectoire des particules est confondue avec les lignes de champ

Accélération dans des structures linéaires

Principes de base de l'accélération

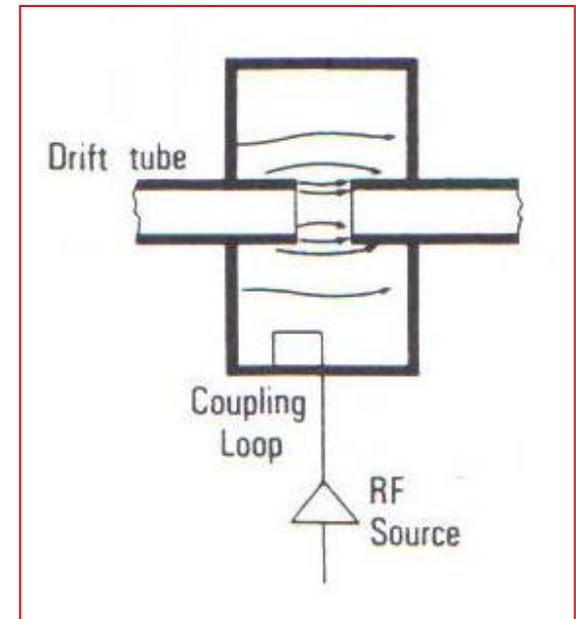
- L'accélération électrostatique
- Limitée à quelques MV (grosse machine!)
-
- L'accélération radiofréquence
 - Structure en paquets requise
 - Condition de synchronisme



$$L = \frac{vT}{2} = \frac{v}{2f}$$

Limites

- Exemple:
- L 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



$$I = VC\omega$$

Quelques solutions

- Condition de synchronisme dans le mode 2π
- Alvarez: linéaires à protons
- f : 352 MHz typique
- Nota: protons de 200 MeV

$$\beta = 0.566$$

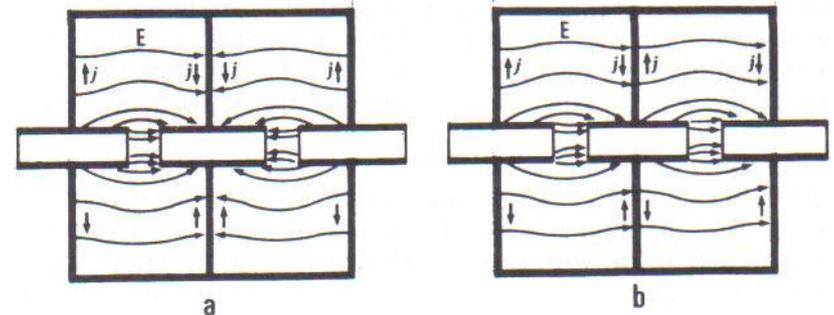


Fig. 4 Adjacent single-gap cavities: a) π mode, b) 2π mode

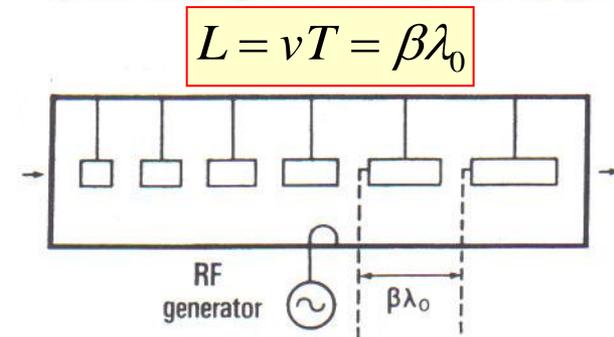
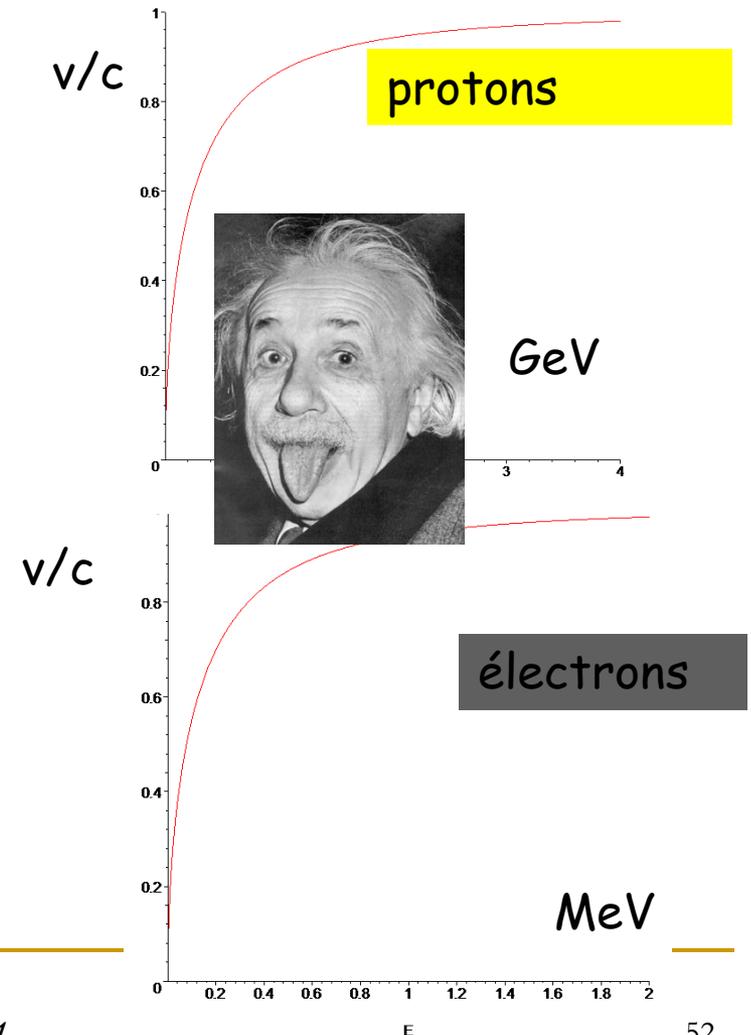


Fig. 5 Alvarez-type structure

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

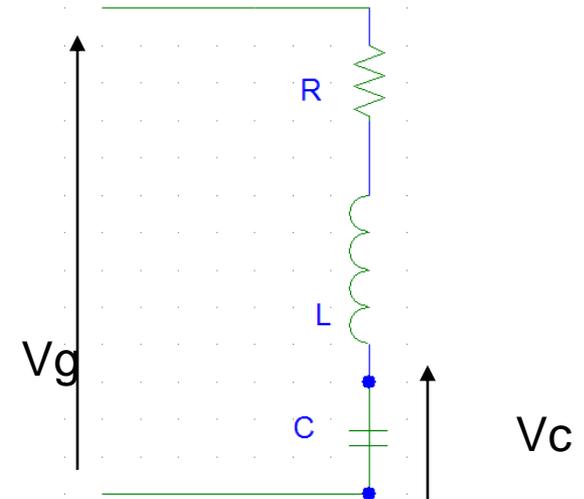
- Structures à électrons: vitesse constante
- Structures à protons: vitesse variable
- Les machines à protons devront avoir une structure variable en fonction de la vitesse
 - Cavités de types différents pour les linacs
 - Cavités larges bande pour les synchrotrons



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

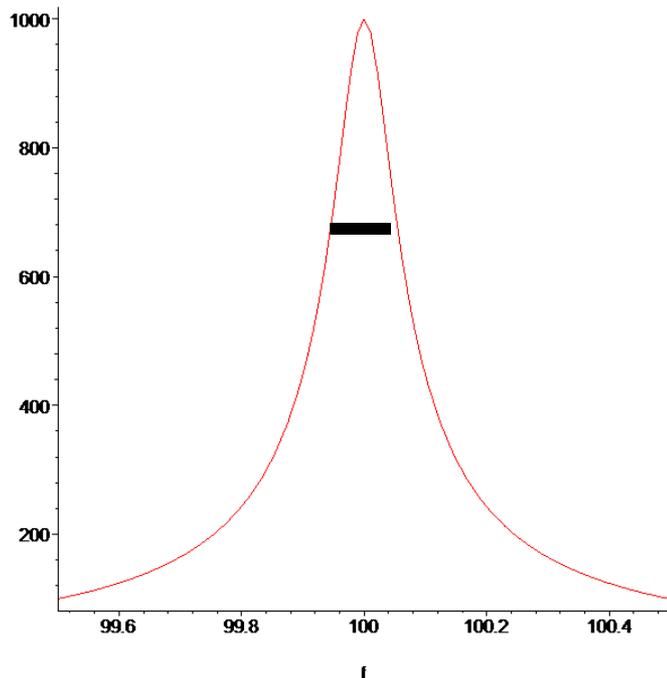
- A la résonance, la tension aux bornes de la capacité est multipliée par le facteur de surtension Q

$$V_c = \frac{1}{jC\omega} \frac{1}{R + \frac{1}{jC\omega} + jL\omega} V_g$$
$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$
$$Q = \frac{L\omega_0}{R}$$
$$V_c = \frac{V_g}{j\frac{\omega}{Q\omega_0} + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)} = \frac{Q}{j\frac{\omega}{\omega_0} + Q\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)} V_g$$



Le coefficient de surtension

- Il caractérise la bande passante
- Il mesure le ratio énergie stockée/énergie perdue par effet Joule
- Un « bon » résonateur aura une faible bande passante



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

Ici $Q=1000$

$\rightarrow \Delta f=0.1$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{L\omega_0}{R} = 2\pi \frac{LI^2}{T_0 RI^2}$$

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

Structures résonnantes et choix de la fréquence

Le résonateur le plus simple: la boîte à pilules

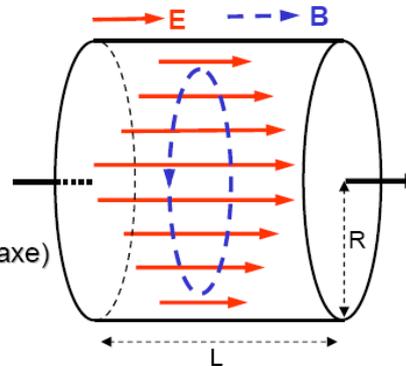
- Fréquence: dimension des structures
- Tenue en champ (critère de Kilpatrick)
- Kilpatrick est une référence (on est à plusieurs « Kilpatrick », de 1.5 à 2.5 en non supra)
- Ex: 2*10 MV/m pic maxi à 70 MHz

Ex: cavité «pillbox» de longueur L et rayon R

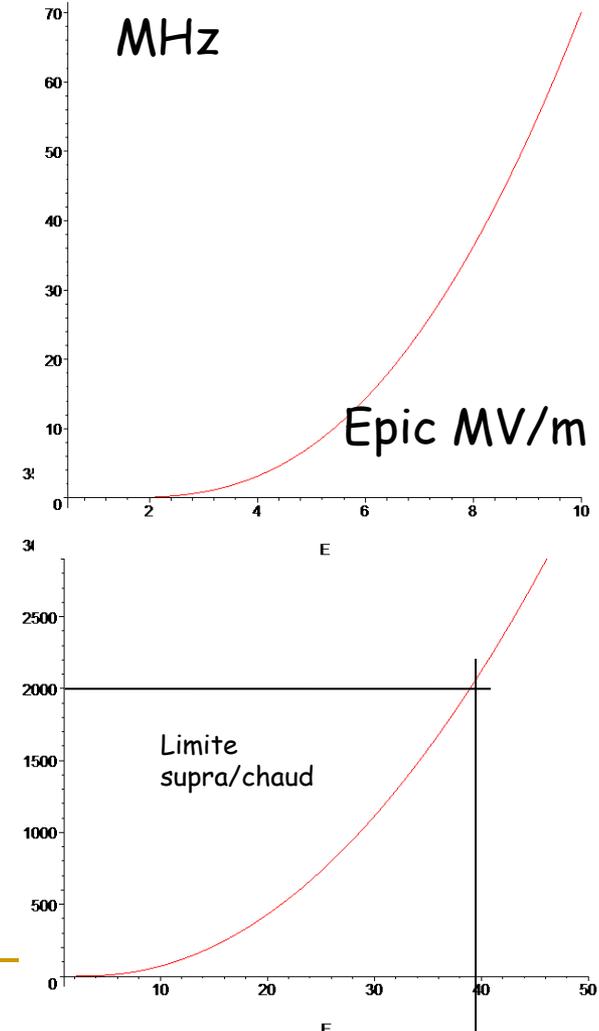
=> Fréquence de résonance du mode accélérateur (E sur l'axe)

$$f_{TM010} = \frac{2.405 c}{2\pi R} \quad \text{Ex : } f = 700 \text{ MHz} \rightarrow R = 16.4 \text{ cm}$$

Fréquences basses = grandes cavités !

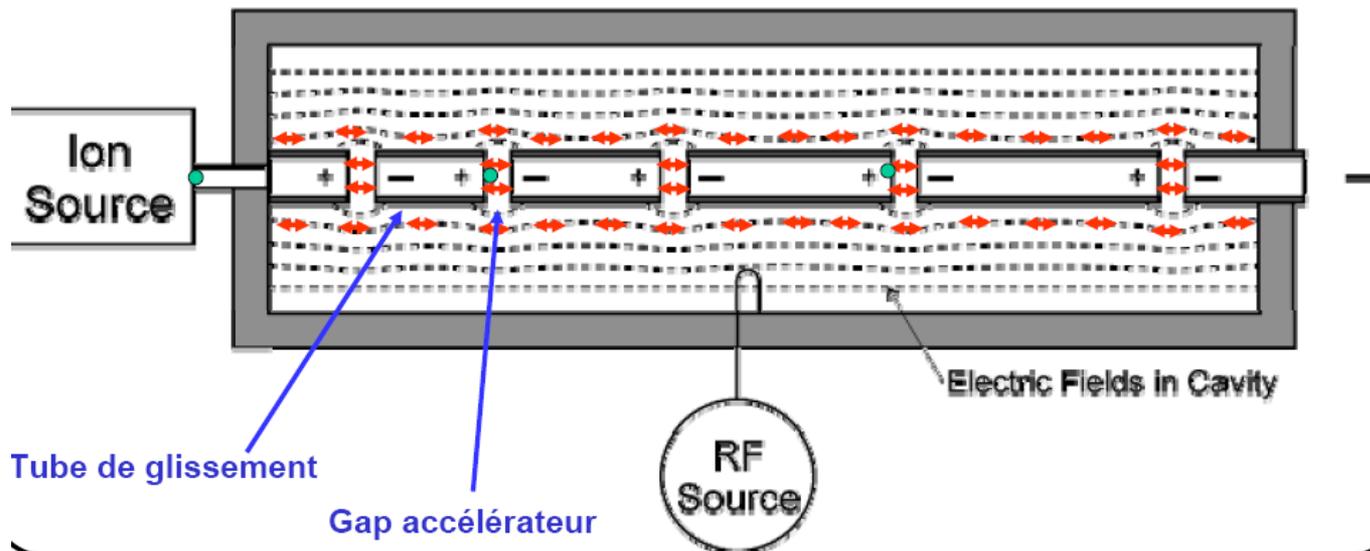


Cavité « pill-box » : mode TM 010



Quelques exemples de structures accélératrices

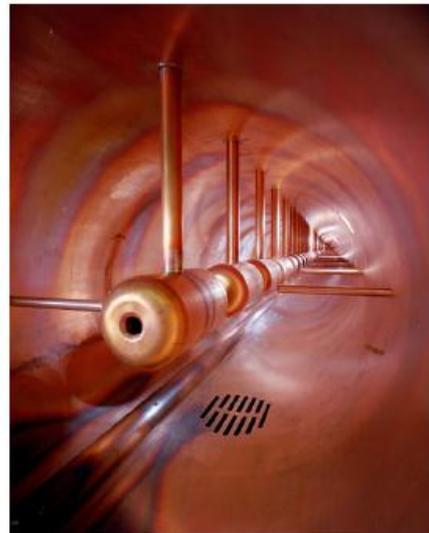
- Le Drift Tube Linac (DTL) pour les ions/protons de basse énergie (quelques MeV)



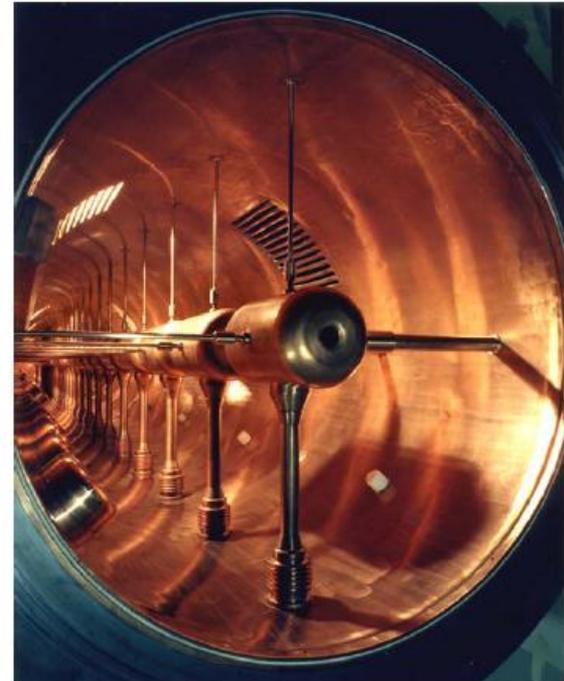
Exemples de "DTL Alvarez" (suite)



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



Fermilab DTL :
-> 116 MeV, 425 MHz



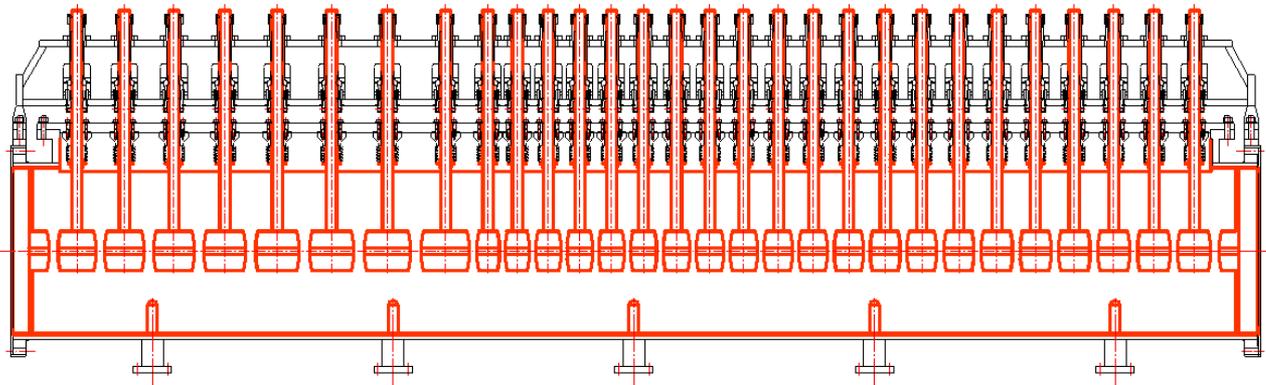
AGS DTL (Brookhaven) :
-> 200 MeV, 201.25 MHz

DTL pour LINAC4: avec des aimants permanents



M Vretenar CERN

Longitudinal section of the DTL



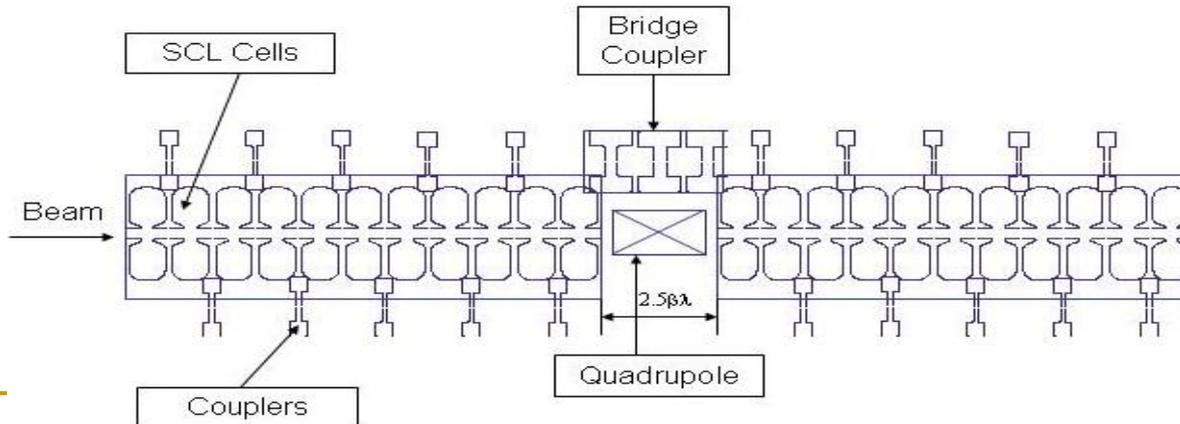
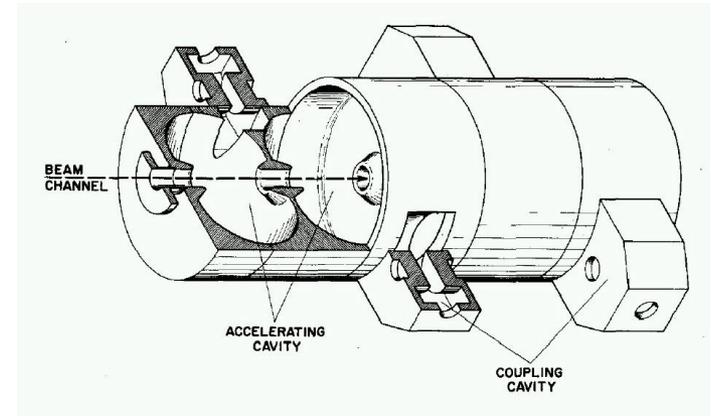
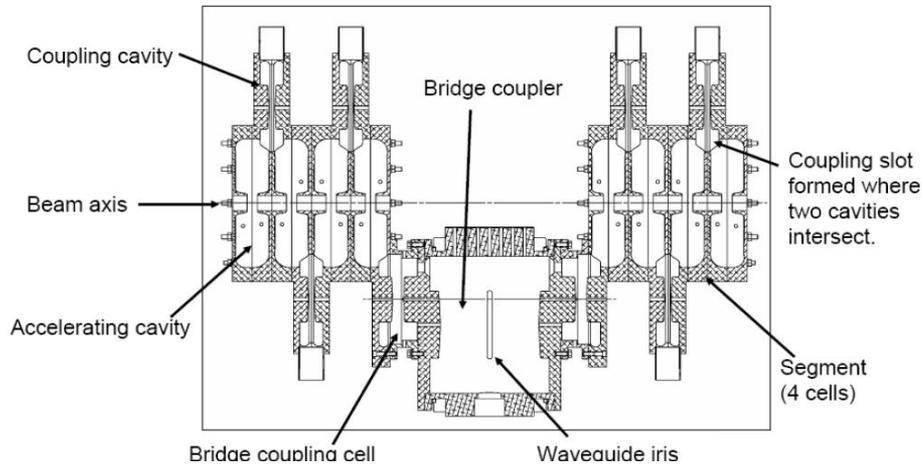
Focalisation et accélération

	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 haute énergie: le Side Coupled Linac

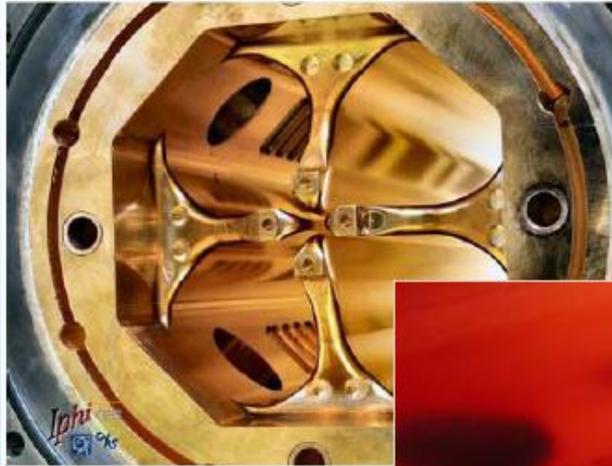


Existe dans les linéaires médicaux à électrons

Onde stationnaires

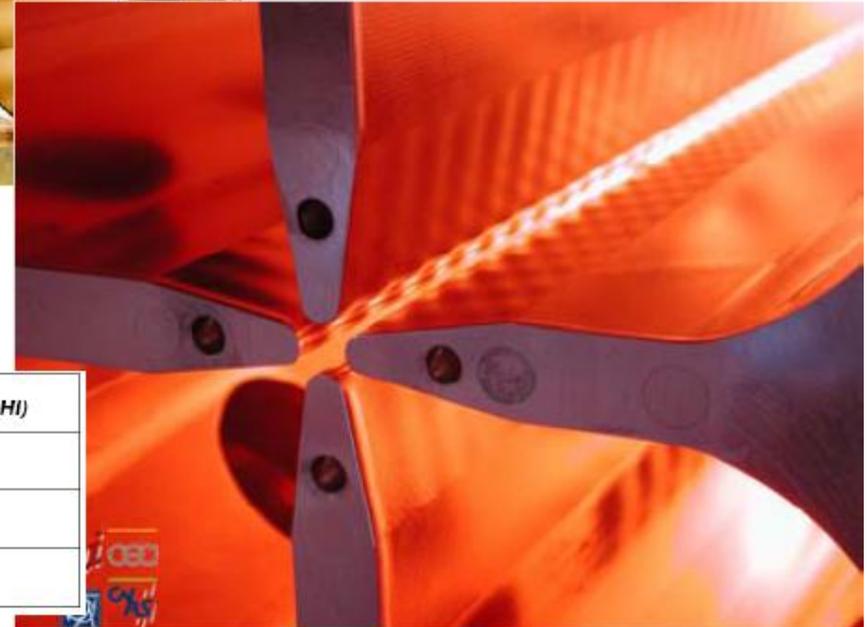
A basse énergie: le RFQ (Quadripôle RadioFréquence)

Exemple: injecteur de CNAO ou HIT (hadronthérapie)



Ici: la version fort courant
(100 mA!!)

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)

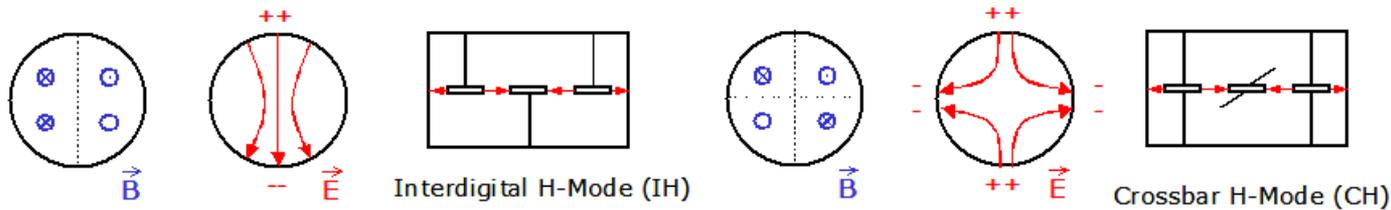
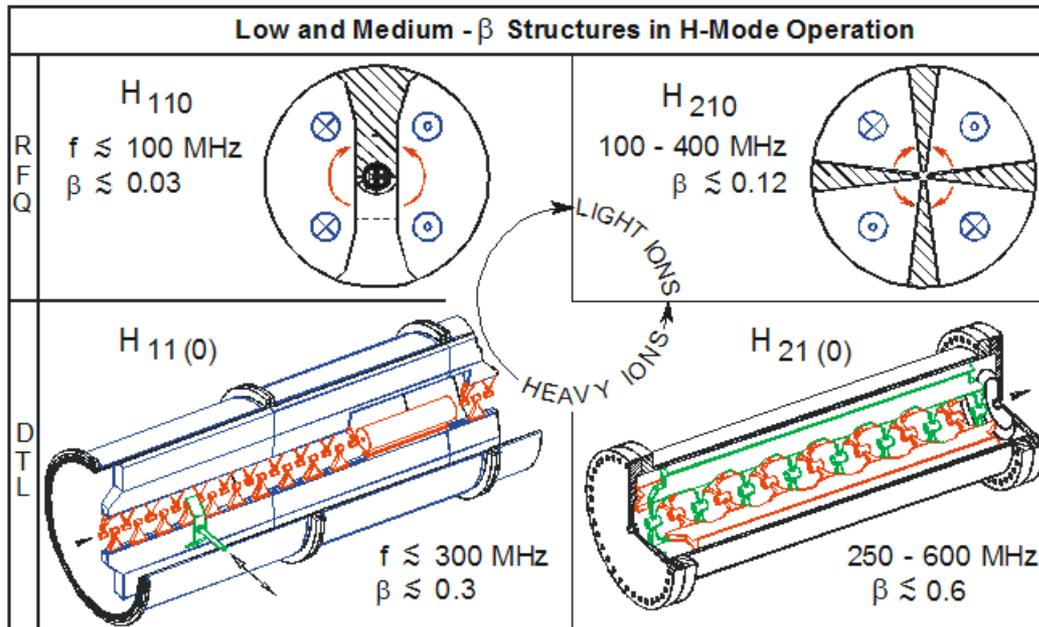
Seconde partie de l'injecteur de HIT et CNAO



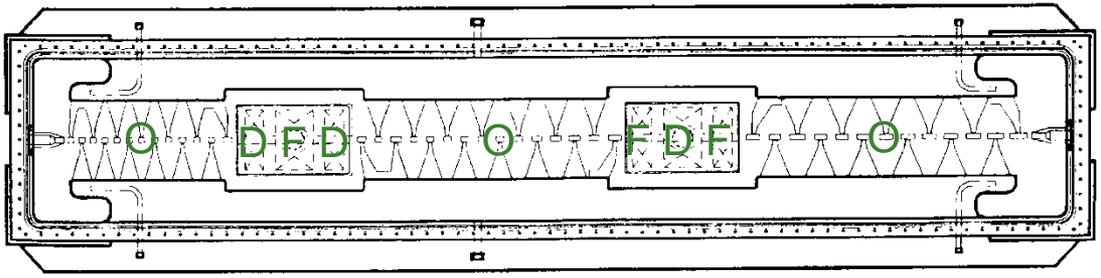
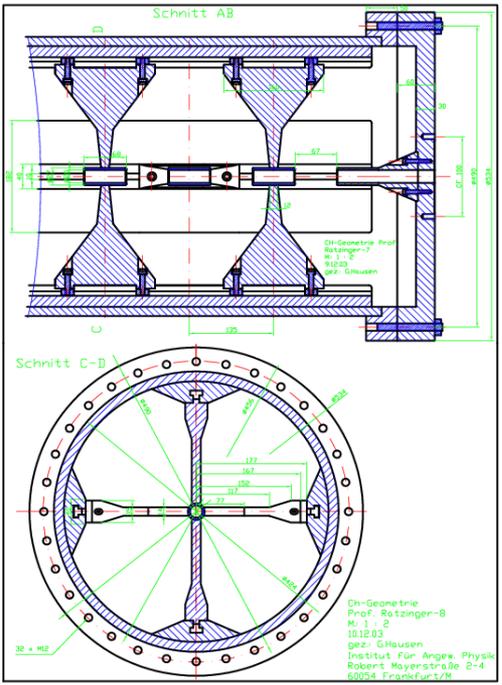
High Intensity Pulsed Proton Injector (HIPPI) Meeting in [Grenoble](#)



H-mode Structure Family



Mode H: Frankfort mais aussi RexIsolde



Rex-Isolde IH (CERN),
202.6 MHz

Cavités à ondes progressives LINACS à électrons

- Les électrons surfent sur l'onde progressive
- v =vitesse de phase dans la cavité

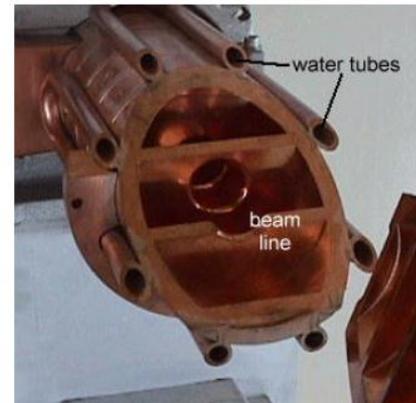
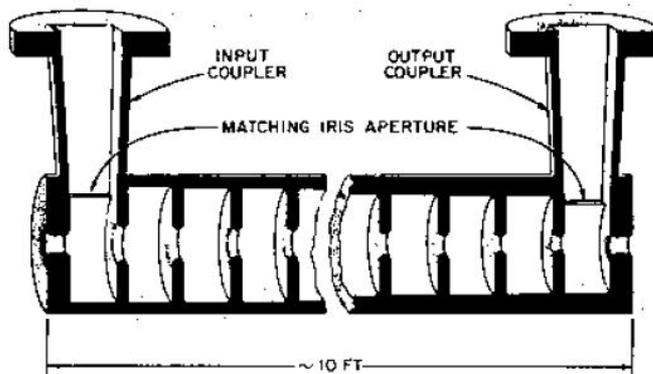
Années 50 : développement du "guide à iris"

Guide d'ondes (ondes progressives) dans lequel on intercale des « iris » pour ralentir la vitesse de phase de l'onde, et l'adapter à la vitesse du faisceau

Fonctionnement le plus souvent en mode $\pi/2$ ou $2\pi/3$

Utilisé pour les vitesses proches de $\beta=1$ (électrons)

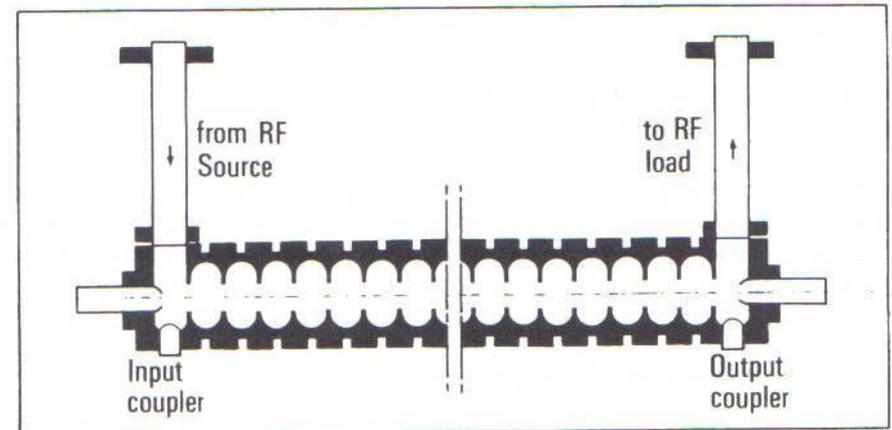
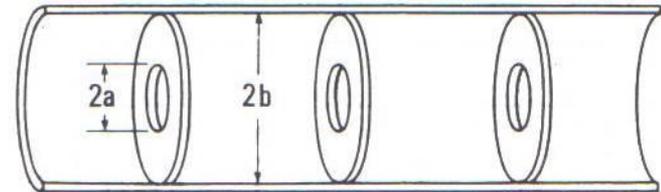
Exemple: SLAC 50 GeV, 3 km, le plus long linac du monde (pour l'instant !)



Structure à iris SLAC, 2.86 GHz

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)



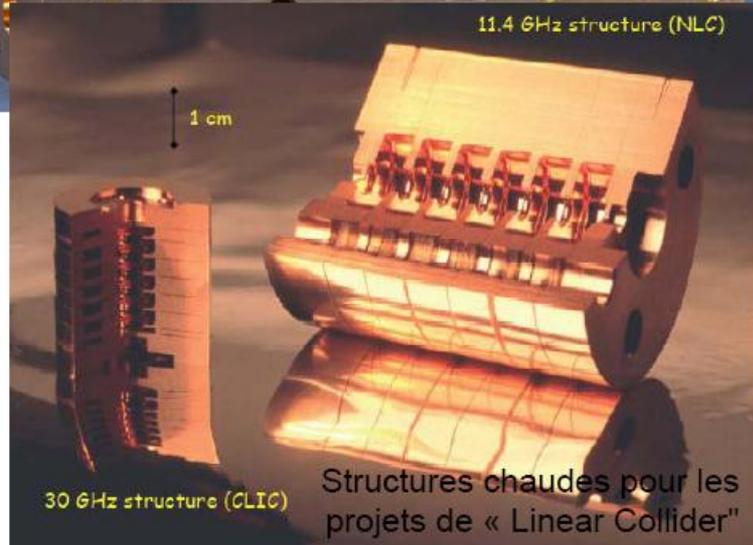
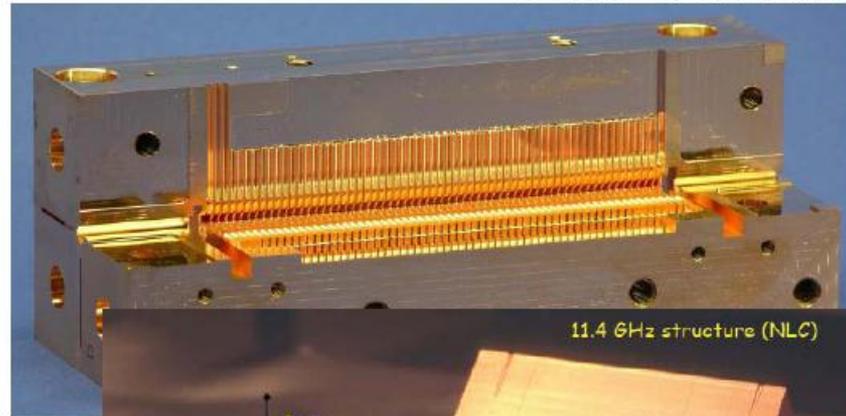
Exemples de structures à ondes progressives

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

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



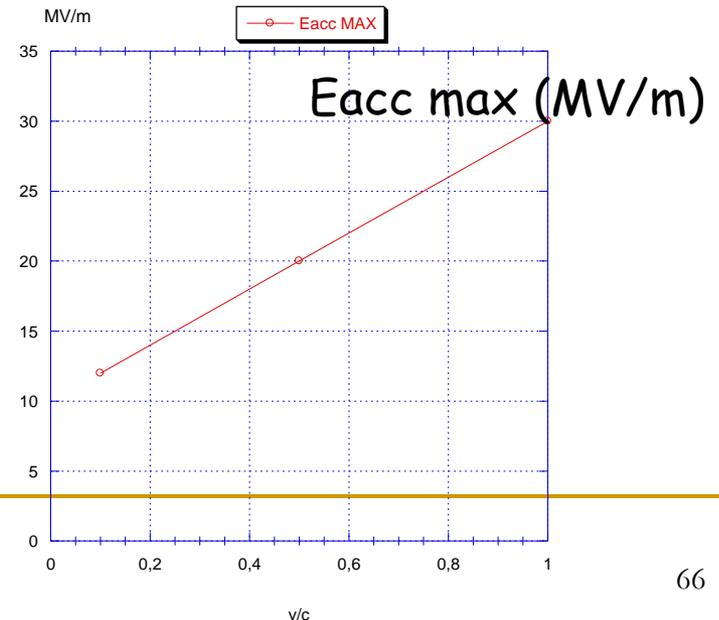
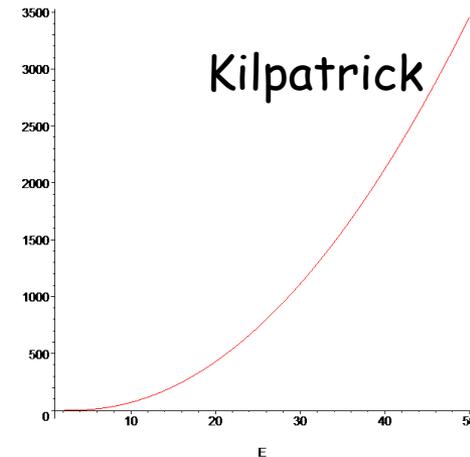
Injecteur ESRF, 200 MeV, 3 GHz



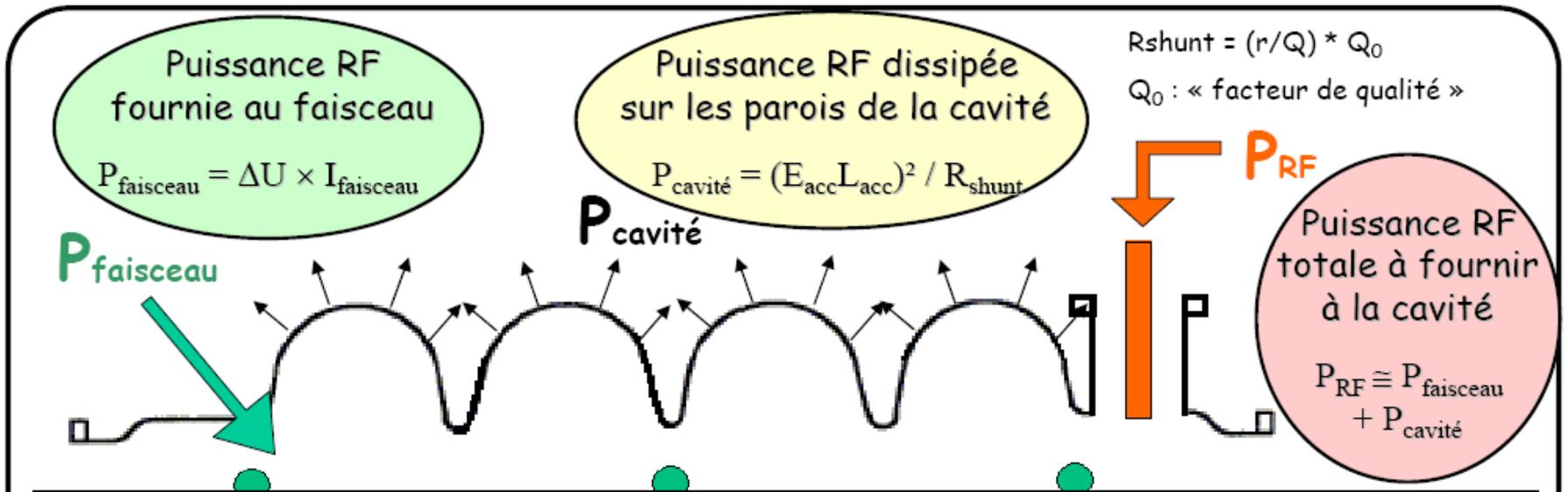
Structures chaudes pour les
projets de « Linear Collider »

Cavités chaudes ou froides?

- Les cavités chaudes sont limitées par le critère de Kilpatrick (facteur ~ 2)
- Les cavités froides sont limitées par le champ magnétique (la densité de courant) 100-180 mT
- Attention: $E_{pic} \sim 2E_{acc}$
- Cavités chaudes avantageuses pour $f > 2\text{GHz}$
- Techno supra plus complexe



NB: E c'est bien mais Q aussi!



Ordres de grandeur (cavité 700 MHz - $\beta = 0.65$ - 5 cellules - 10MV/m - $\varphi = -30^\circ$ - faisceau protons 10 mA)

Cas cavité froide ($Q_0 \sim 10^{10}$) : $P_{\text{faisceau}} = 6 \text{ MeV} \times 10 \text{ mA} = 60 \text{ kW}$

$P_{\text{cavité}} \approx 16 \text{ W}$ à évacuer à 4K (équivalent 4kW) ou à 2K (équiv. 10kW)

Cas cavité chaude ($Q_0 \sim 3 \cdot 10^4$) : $P_{\text{faisceau}} = 60 \text{ kW}$ aussi

$P_{\text{cavité}} \approx 5,5 \text{ MW} !!!$ ← irréalisable en continu...!!!!

=> Nécessité de limiter le champ et/ou le cycle utile RF dans les cavités chaudes

Les cavités supraconductrices

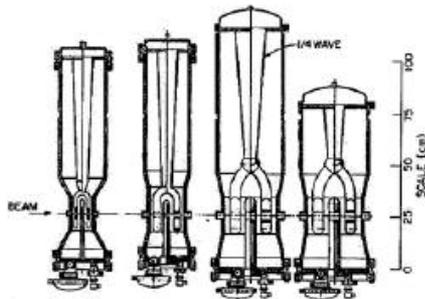
- Cycle utile
 - Pertes Joule plus réduites
 - Usine cryogénique de meilleur rendement relatif
- Haut gradient accélérateur et $f < 2\text{GHz}$
- Excellent rendement RF
- Large ouverture (champs élevés)
- Possible à partir de quelques MeV/nucléon
- Champ accélérateur théorique maximal: 55 MV/m

Panorama

$\beta = 0,01$

$\beta = 0,1$

$\beta = 1$



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



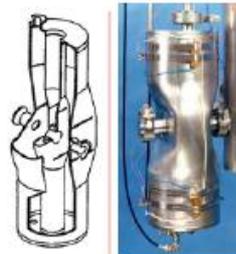
RFQs supra (Legnaro)
80 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,035$



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 $0,25$



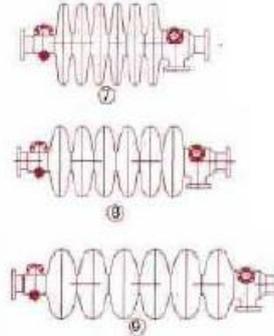
Résonateur demi-onde (Argonne)
355 MHz - $\beta = 0,12$

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



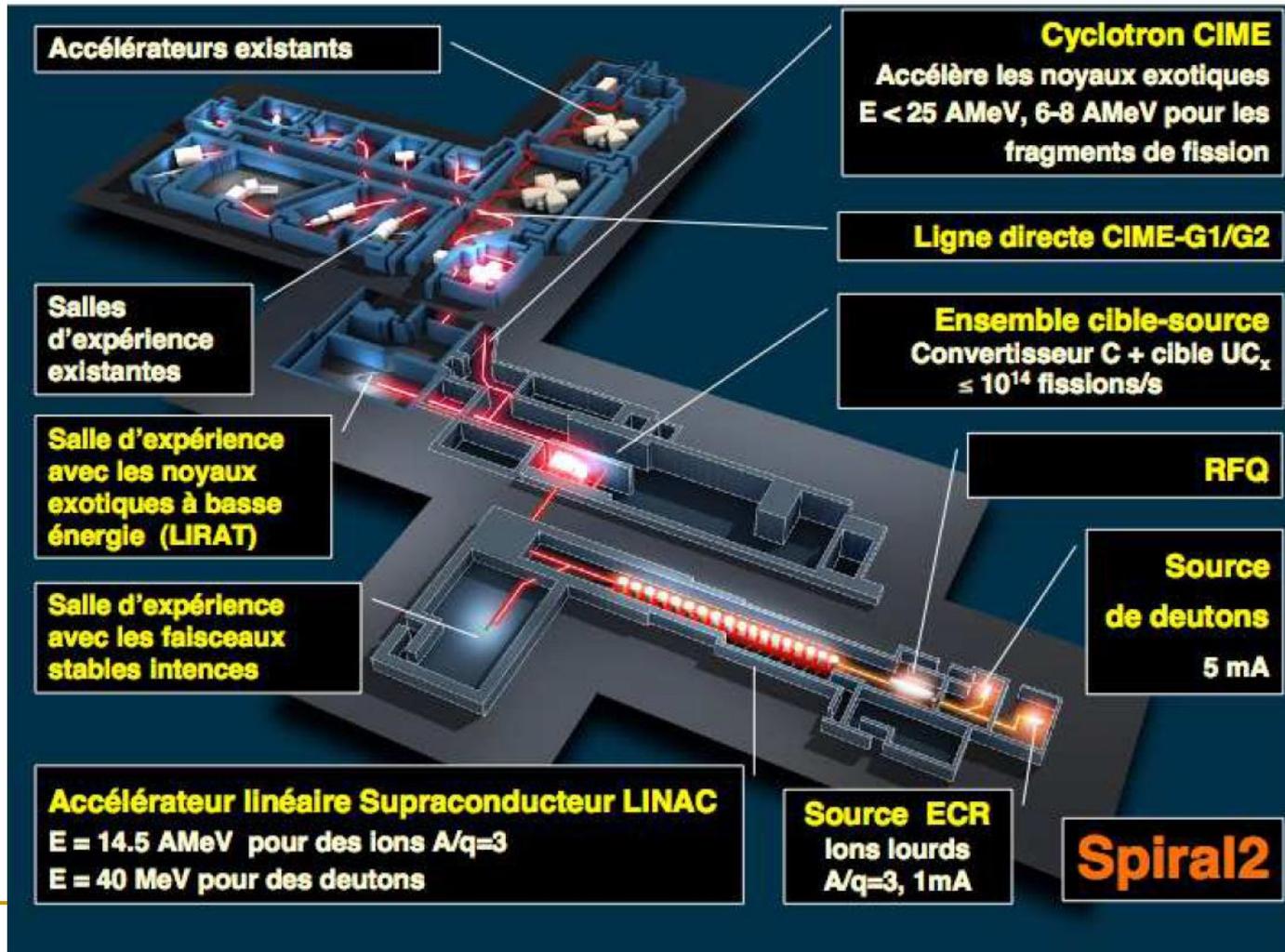
Cavité TTF
1,3 GHz - $\beta = 1$



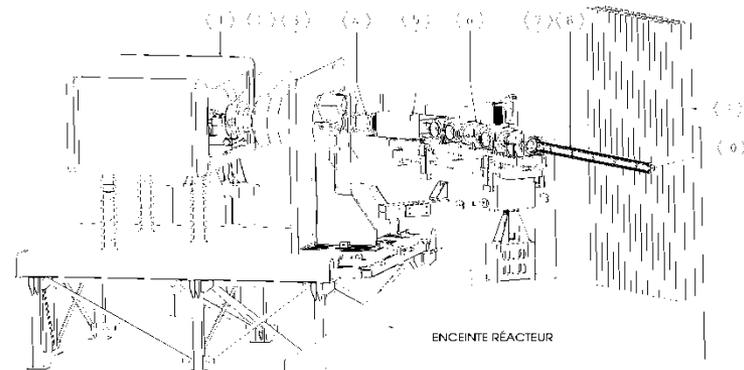
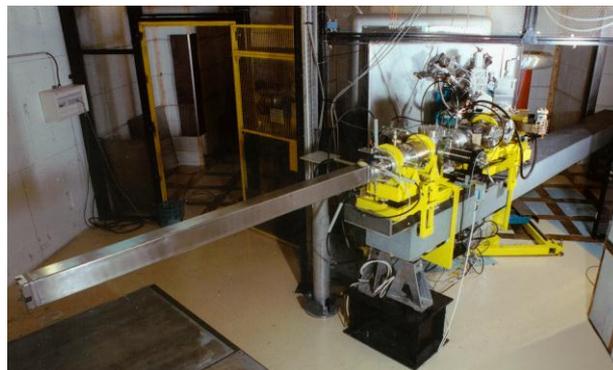
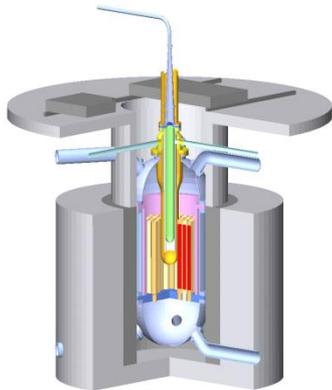
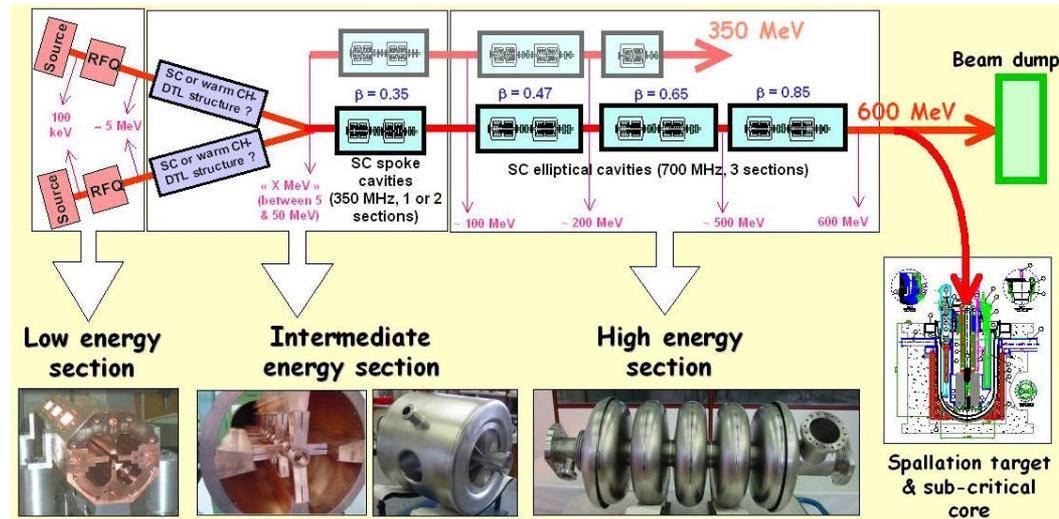
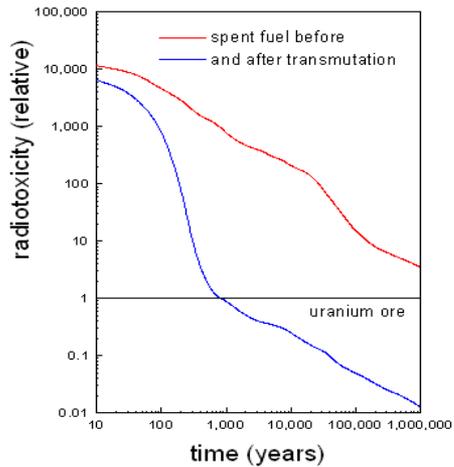
Cavité APT (Los Alamos)
700 MHz - $\beta = 0,64$

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

SPIRAL2



Accelerator Driven Systems (ADS)



Premier ADS: GENEPI LPSC

Le prochain: GUINEVERE (GENEPI3C)

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.

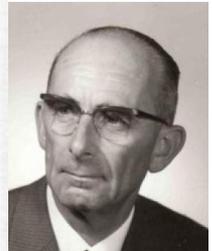
C'est ainsi qu'on tue une idée géniale.



Flegler

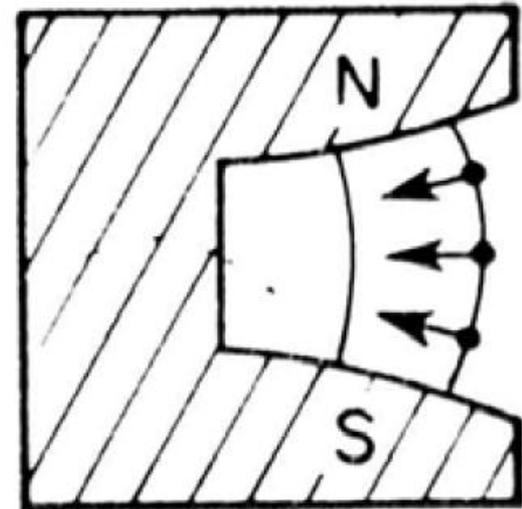


Wideröe



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



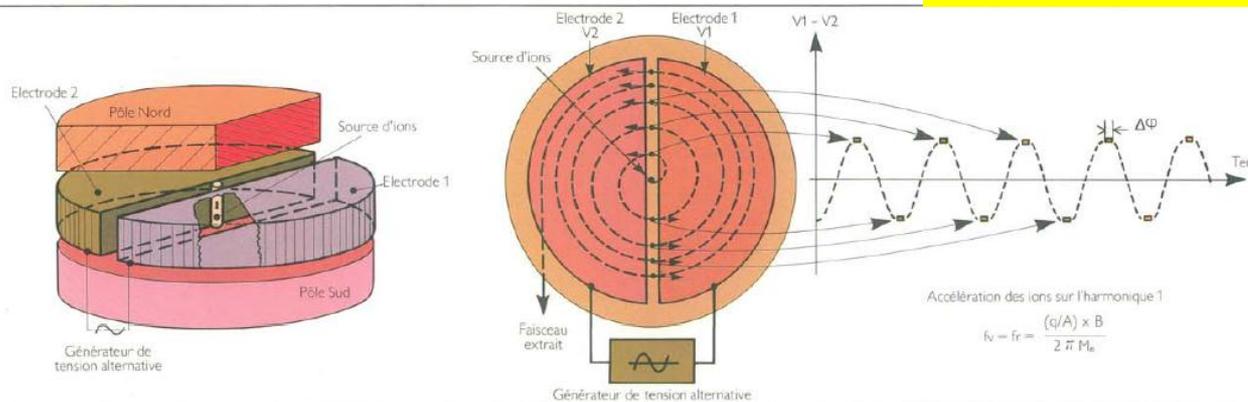
$$n = - \frac{R}{B} \frac{\partial B}{\partial R}$$

Cyclotrons

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



Ernest et quelques amis

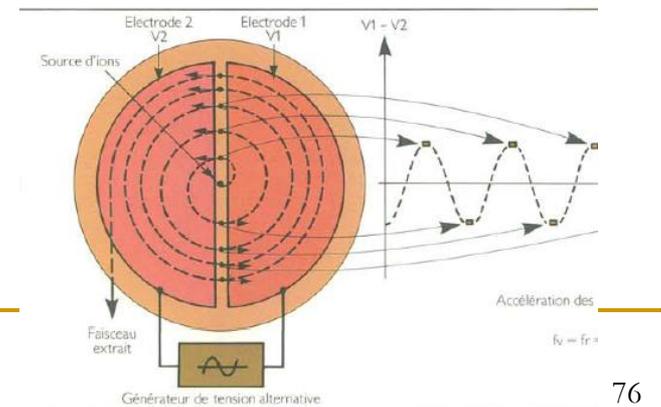


Dynamique dans un cyclotron

- 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

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

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



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

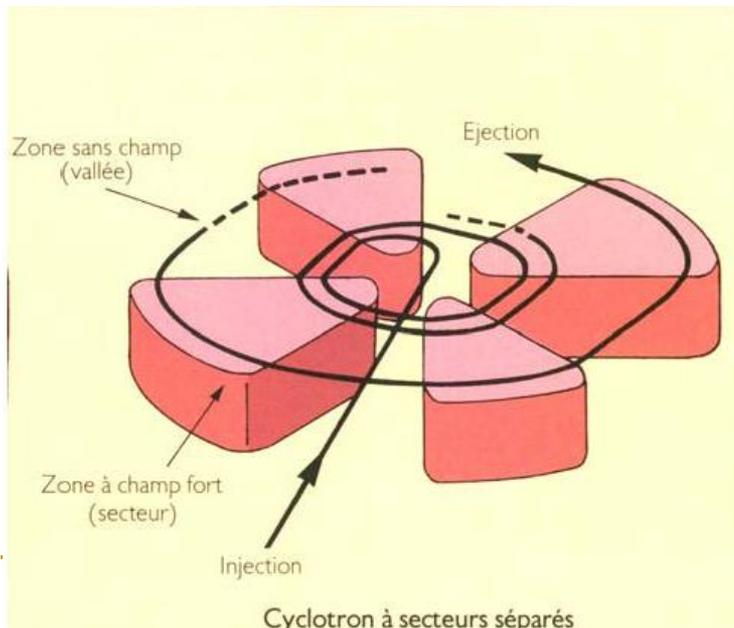
$$B\rho = \frac{mv}{q} \Rightarrow T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2}{m}(B\rho)^2$$

$$\frac{T_{\max}}{A} = \left(\frac{q}{A}\right)^2 \frac{(B\rho)_{\max}^2}{m_{\text{nucl}}} \equiv K \left(\frac{q}{A}\right)^2$$

$$T_{\text{MeV}/A} \approx 48(B\rho)_{\max}^2 \left(\frac{q}{A}\right)^2$$

Cyclotron à secteurs séparés

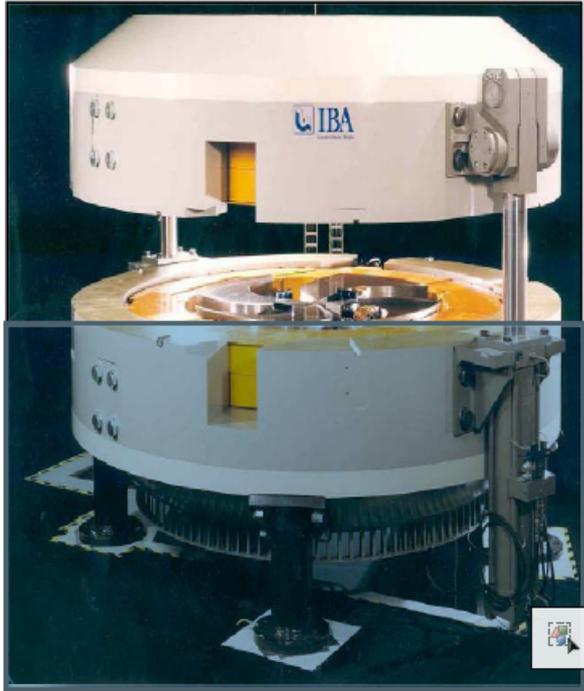
- Résout les aspects isochronisme (dont les effets relativistes)
- Assure la focalisation via les faces



PSI

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

27 - -

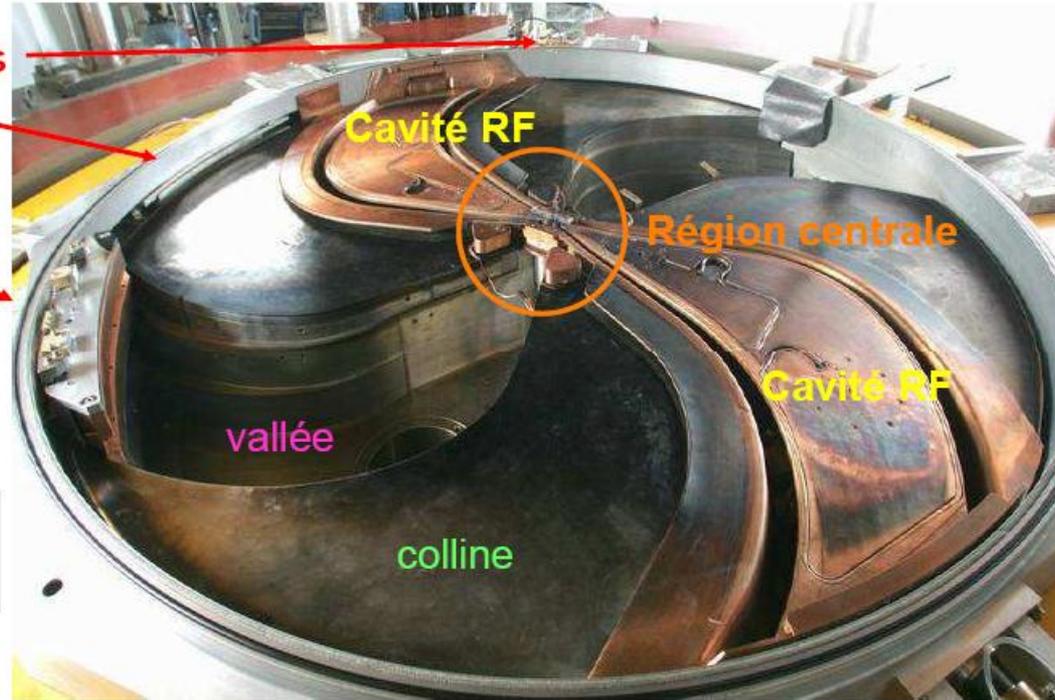
Cyclotron protons du CPO


institutCurie

Le cyclotron: le plan median

Système d'extraction:

- quadrupoles permanents
- correcteur de gradient
- défecteur

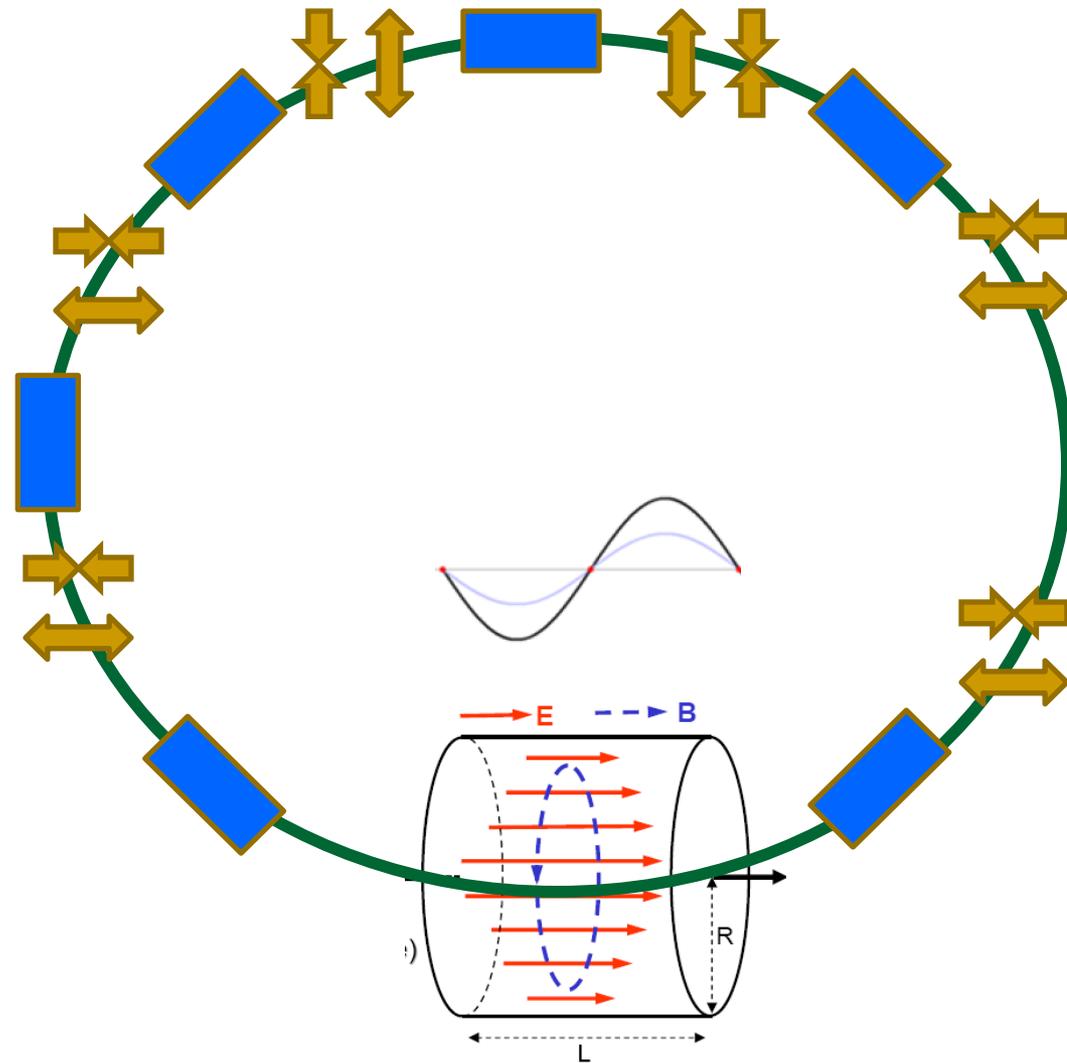


28 - -

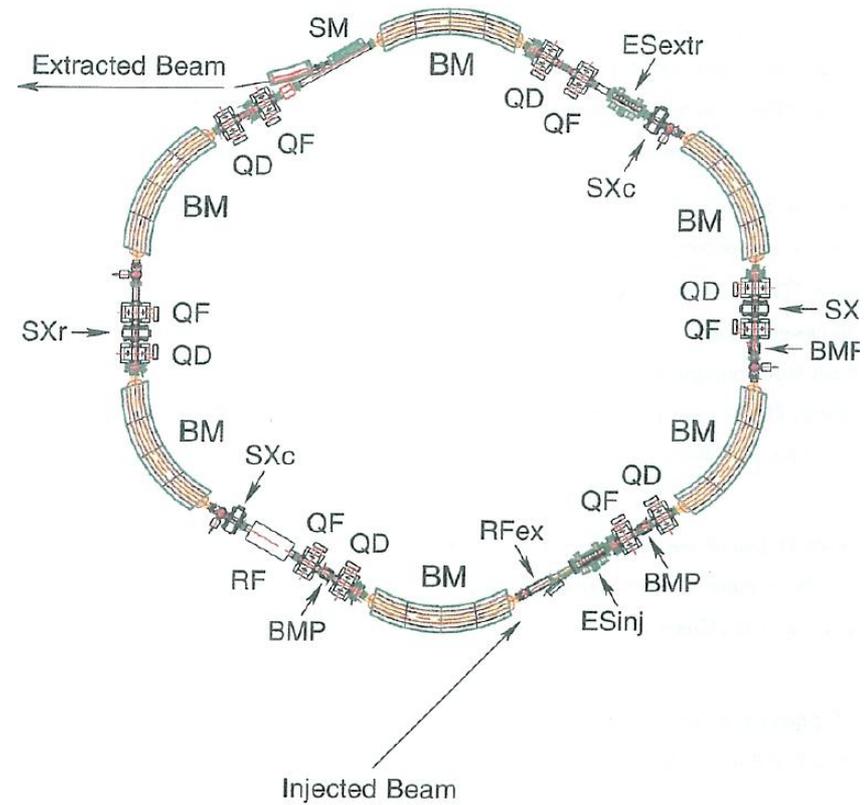
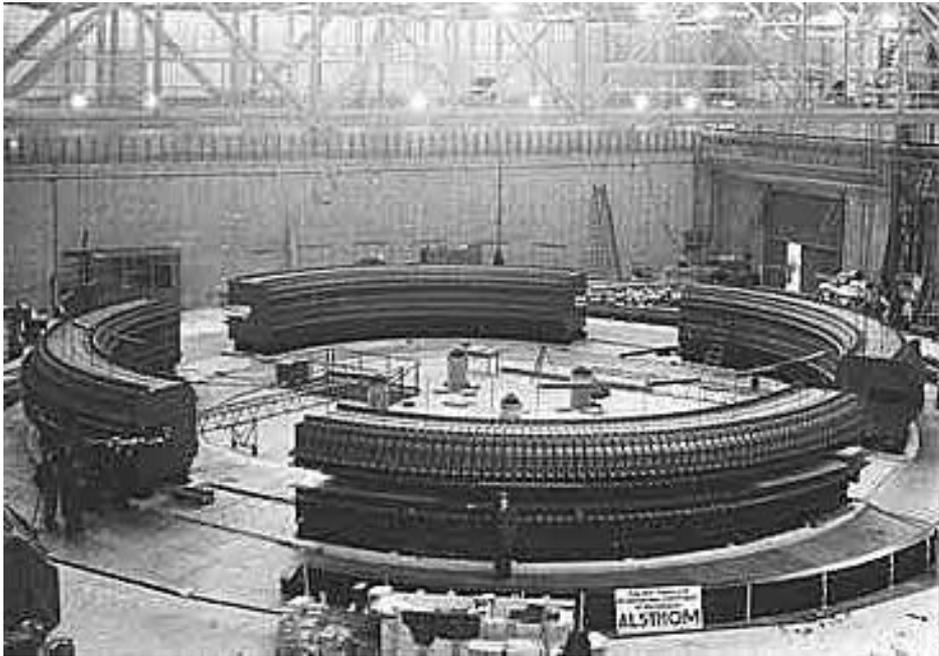
Synchrotron

Le synchrotron **PAR** les nuls

- La cavité résonne et piège le champ électromagnétique
- On est en régime d'ondes stationnaires
- La conformation des champs définit le mode (ici TM_{010})
- FODO+dipôles



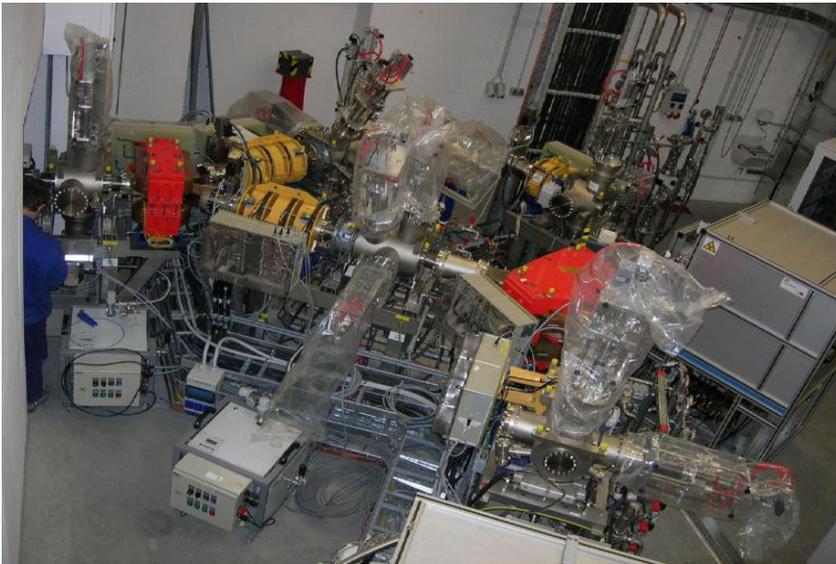
Les synchrotrons



• Saturne1 (focalisation faible)

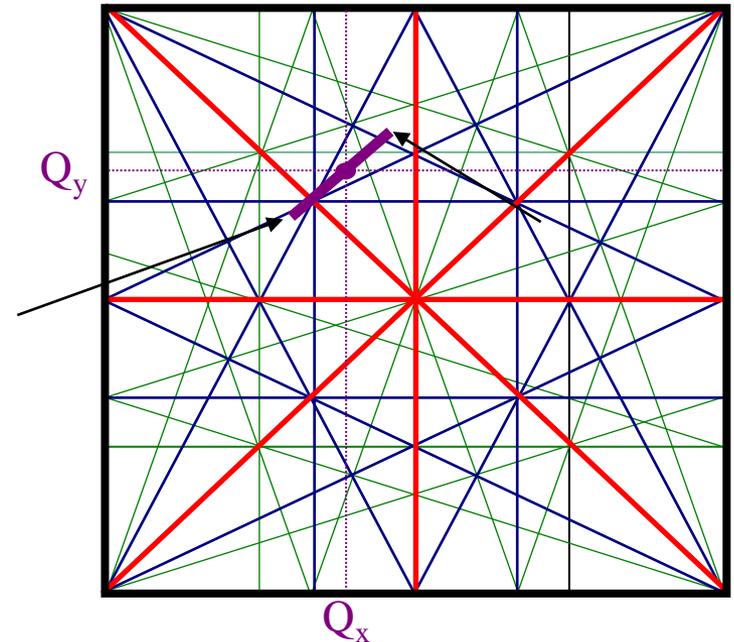
• HICAT (Hadronthérapie par faisceau carbone, Heidelberg)

HIT: les sources d'ion, le linac



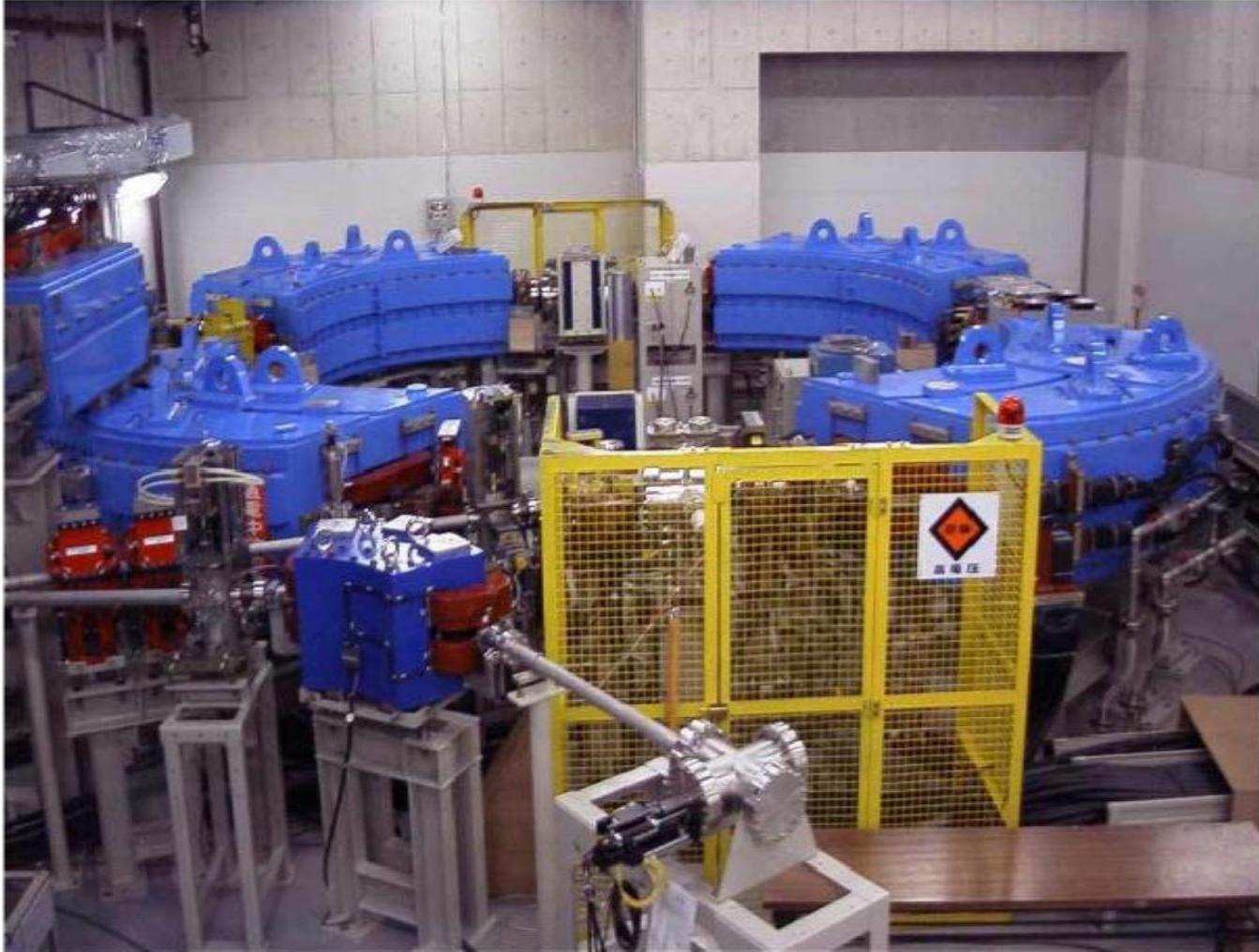
Autres caractéristiques

- 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

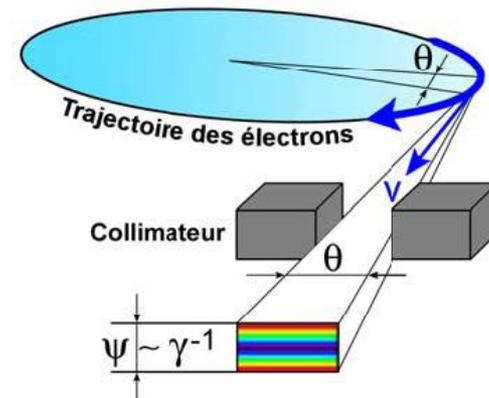
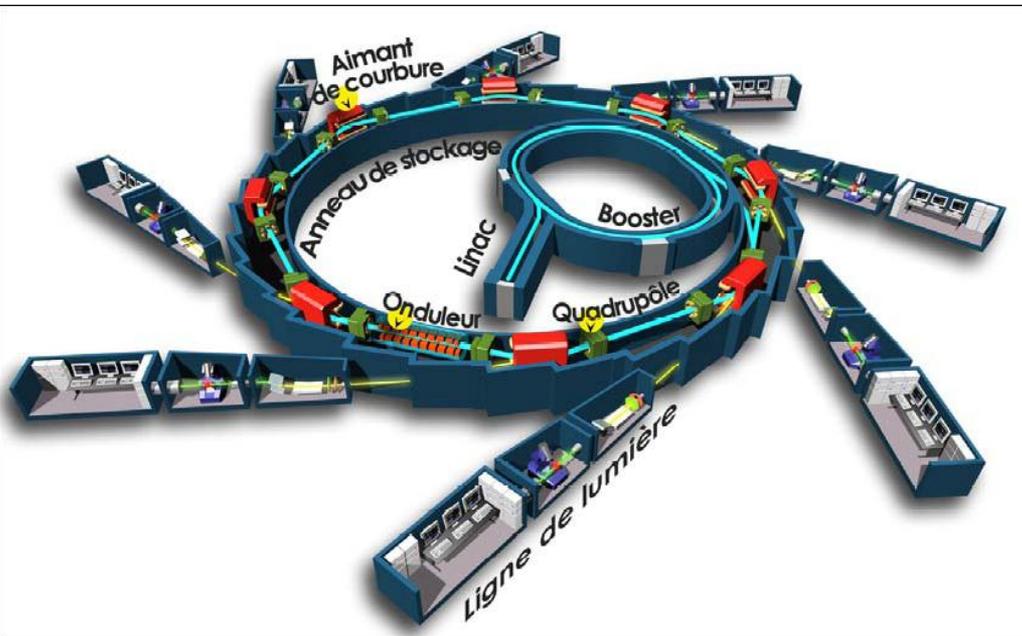
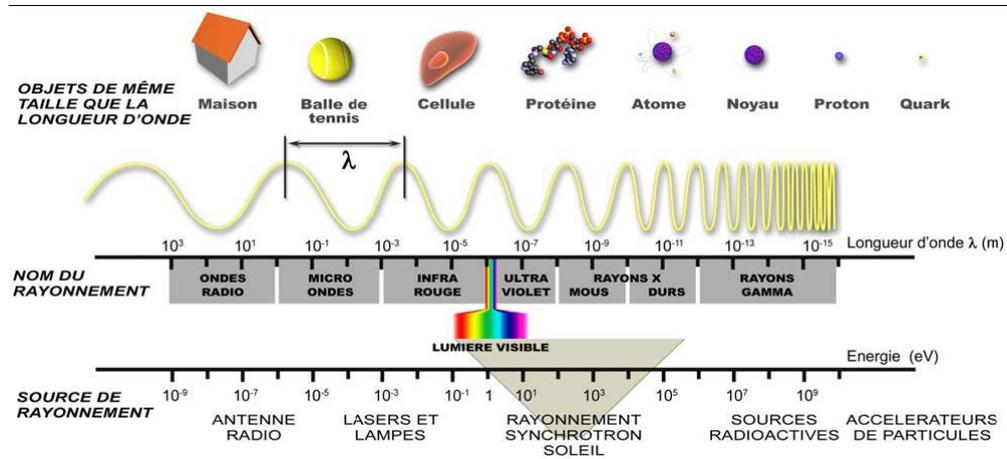
- Le rayonnement synchrotron: rayonnement électromagnétique émis par des particules chargées et déviées
- En $E^4/m^4 \rightarrow$ électrons
- Nuisance ou opportunité?

Quelques exemples de perte d'énergie par rayonnement synchrotron

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

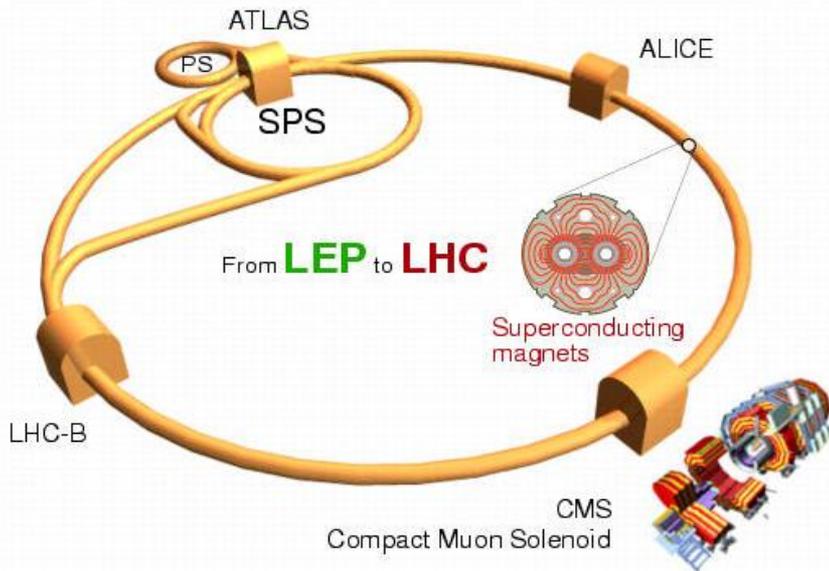
	Circonférence de l'anneau en m	Energie E de la machine en GeV et en keV	Rayon de courbure ρ en m	Energie U_0 perdue par tour en keV
Super-ACO (Orsay)	72	0,8 GeV = $0,8 \cdot 10^6$ keV	1,70	21,3
SOLEIL (Saclay)	354	2,75 GeV = $2,75 \cdot 10^6$ keV	5,36	944
ESRF (Grenoble)	844	6 GeV = $6 \cdot 10^6$ keV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



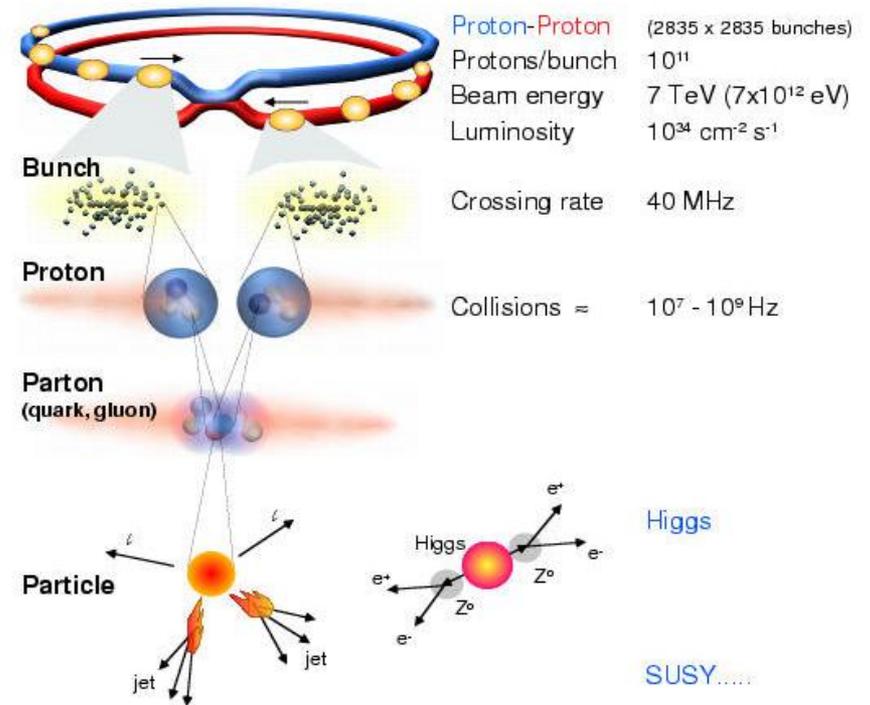
Collisionneurs: synchrotrons et anneaux de stockage

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

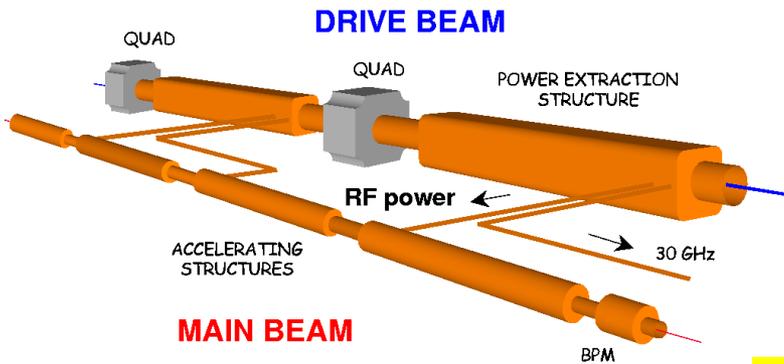
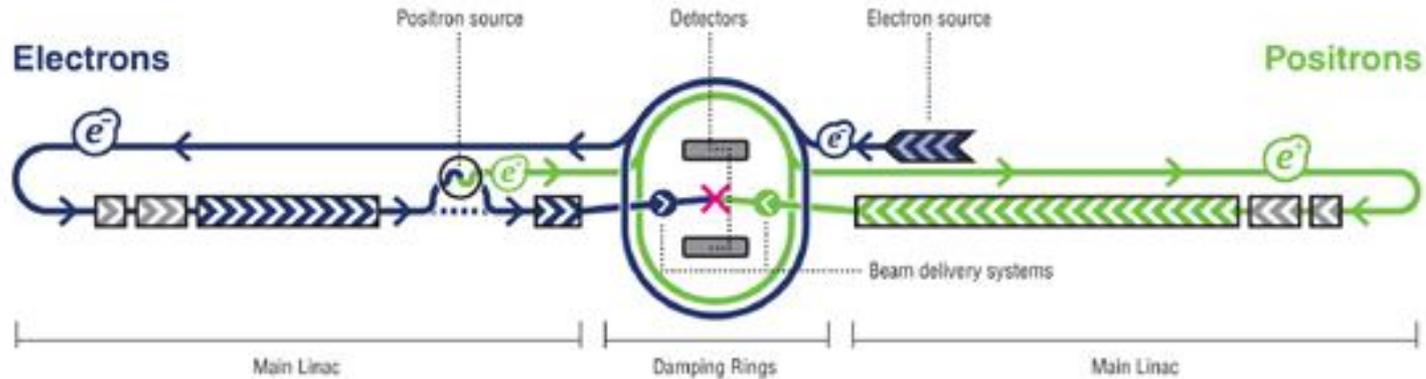


Selection of 1 in 10,000,000,000,000

Source: CERN et A Müller

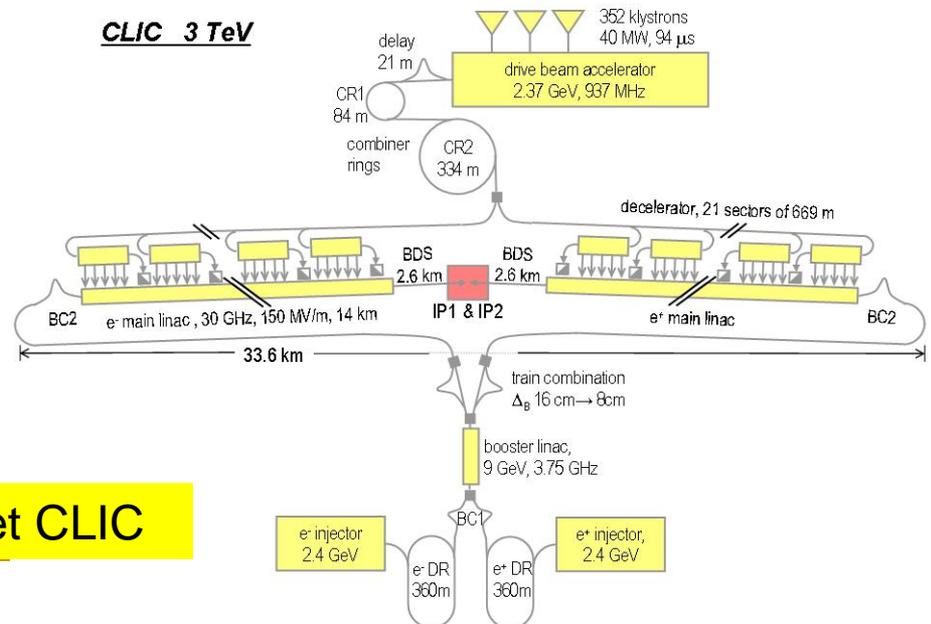
Collisionneurs linéaires e^+/e^- : au-delà du LHC

Les machines circulaires deviennent inutilisables



ILC et CLIC

CLIC 3 TeV



Diagnostics (P Ausset)

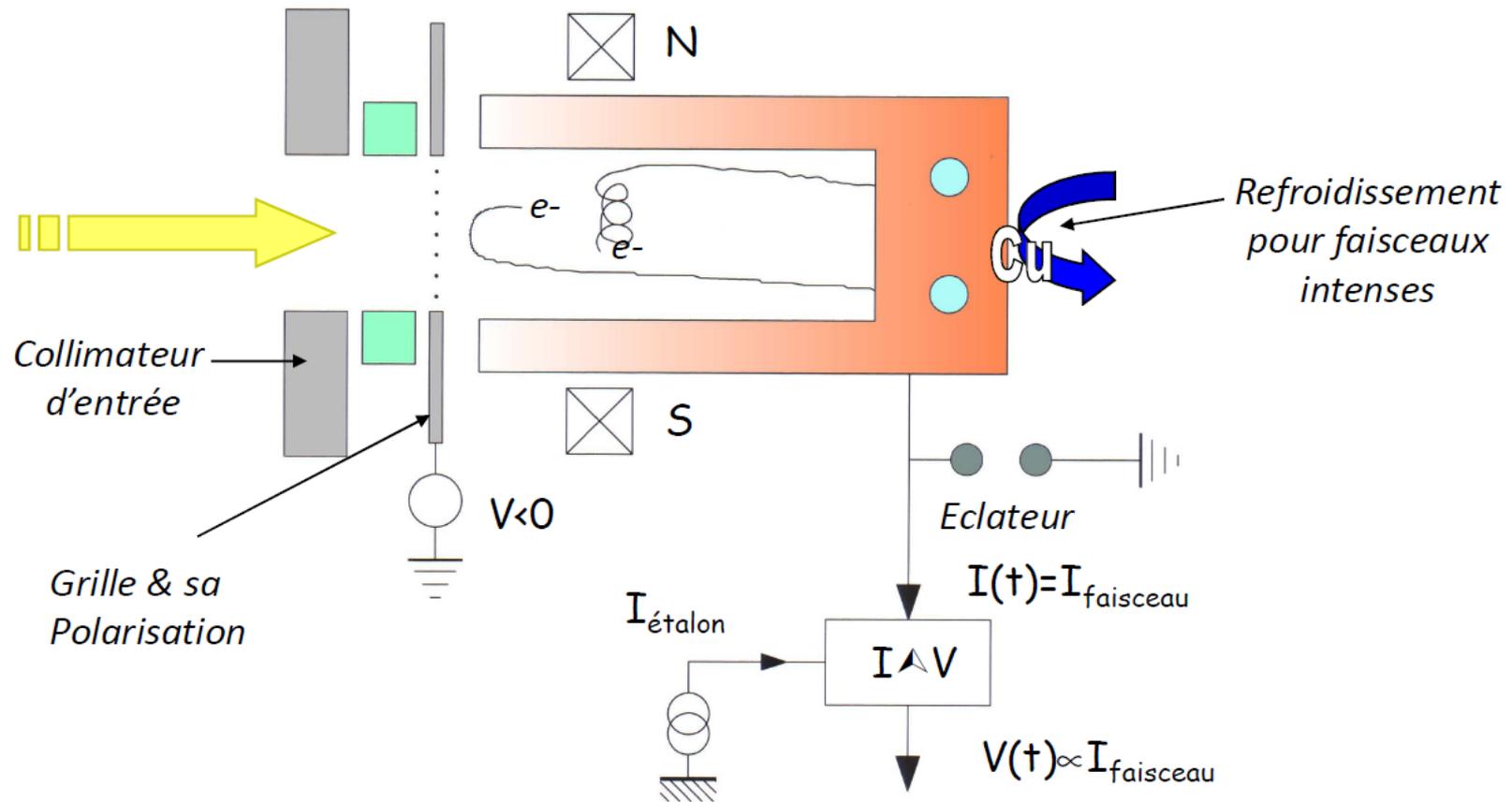
Quelques exemples

Intensité

Profil

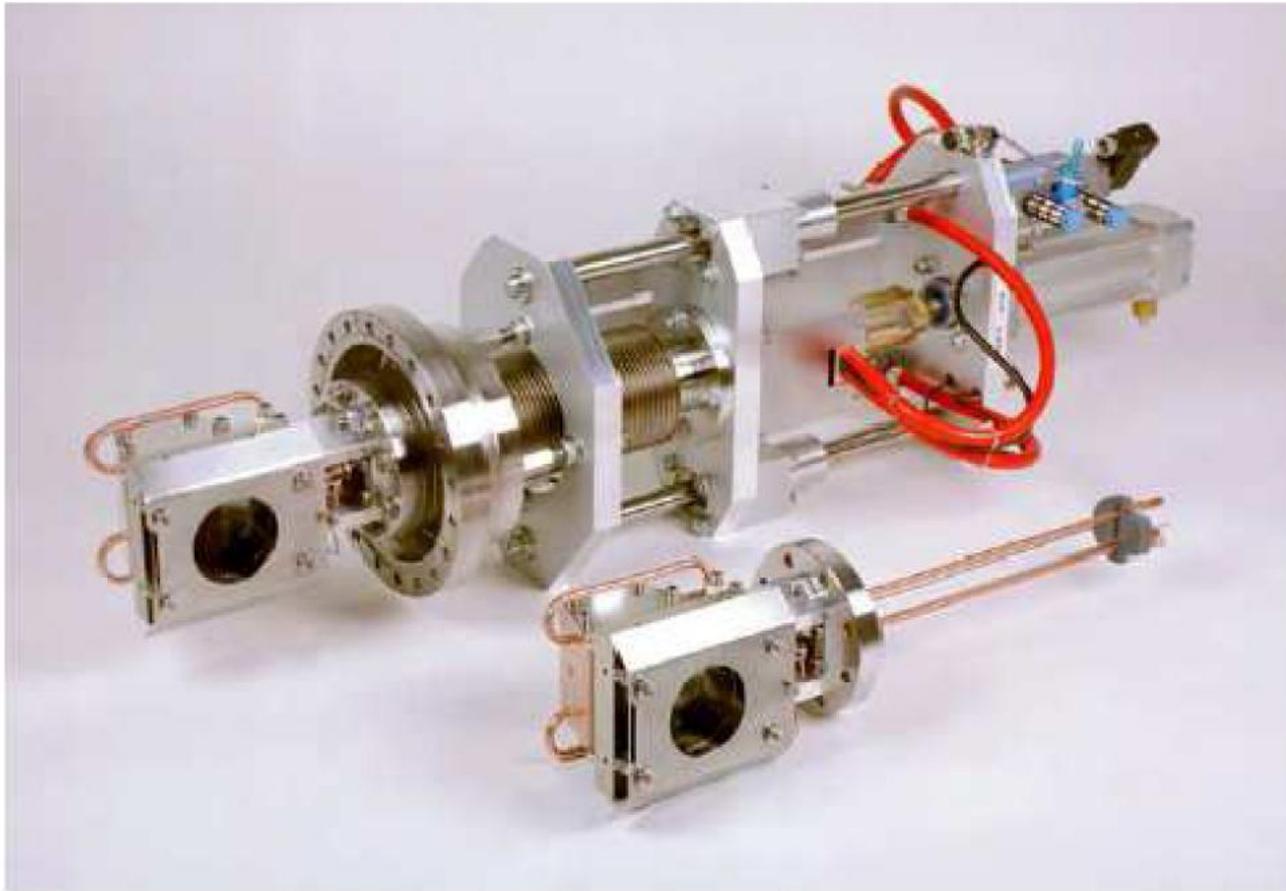
Emittance

Coupe de Faraday: intensité



Exemples de Réalisation

Les cages de Faraday pour forts faisceaux

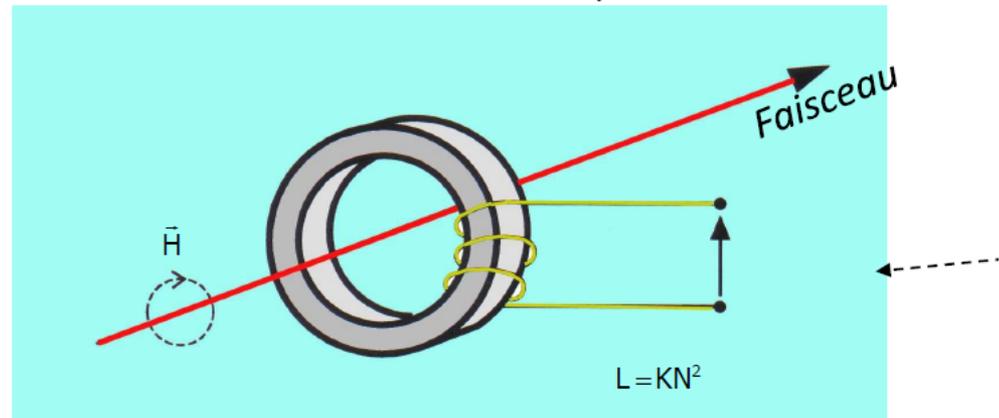


Cage de Faraday et bloc d'arrêt de 25 KW. Linac de GSI. (Bride 150 mm²)

Transformateur d'intensité

Propriétés:

- Utilise le champ H associé au faisceau
- Non destructif du faisceau
- Moniteur absolu.
- Large bande passante possible: ~ 1 GHz
- Utilisable pour toutes les particules accélérées chargées
- Nombreuses réalisations commerciales disponibles



Mesure de courant par électrode capacitive

- Non interceptif.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Nécessite en pratique un étalonnage.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée aux machines à protons (longueur du bunch \gg longueur de l'électrode)
- Contrôle de la forme des bunches, mesure de la phase faisceau / R.F.

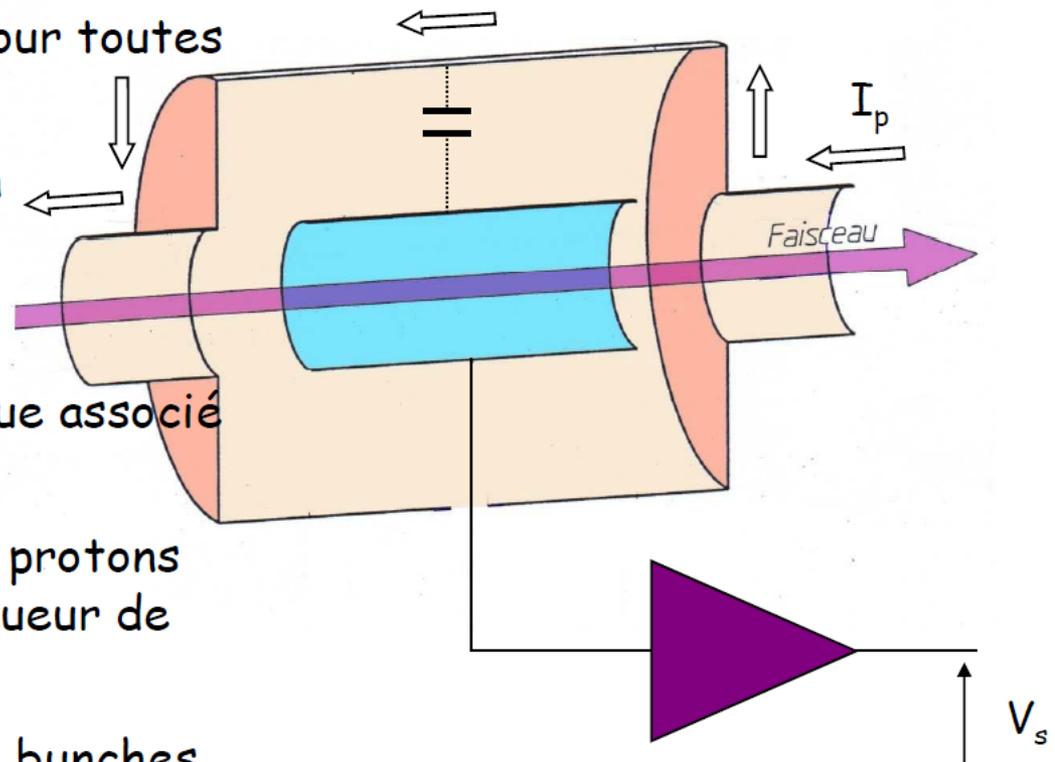


Schéma de principe d'une P.U. capacitive

Détection de position (pick up capacitif)



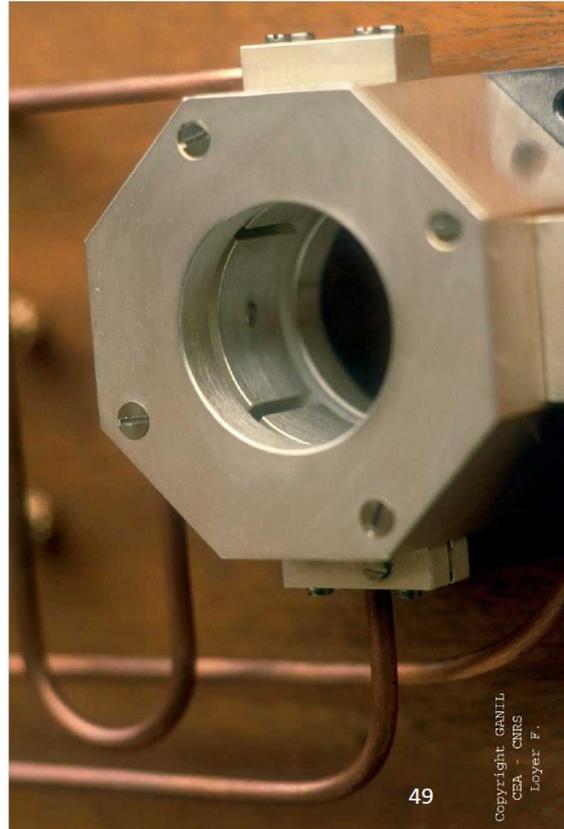
INSTRUMENTATION

Sonde de Position Capacitive

Utilisation : mesure de la position du centre de gravité du faisceau d'ions dans le canal d'injection du cyclotron injecteur

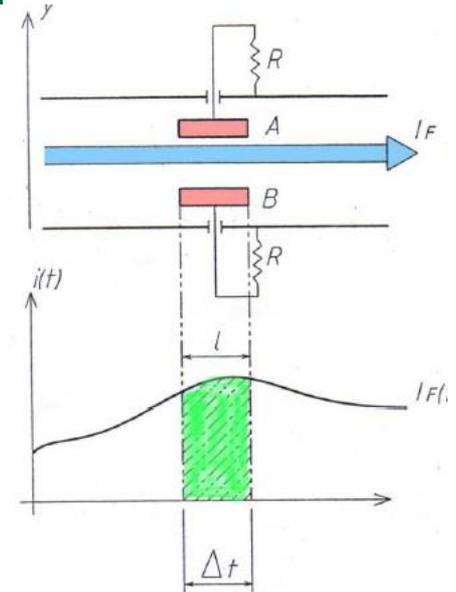
Principe : détection synchrone sur l'harmonique 2 de la structure HF du faisceau (fréquence intermédiaire à 10kHz) puis extraction de la position du faisceau par transformation de la différence d'amplitude des signaux en différence de phase.

Performances : pour 10nAe à 30keV/u
- ouverture : 30mm
- résolution : 0,1mm (intégration 1s)
- précision absolue : 0,5mm au voisinage du centre ($<R/3$)



49

copyright GANIL
CEA - CNRS
Loyer P.



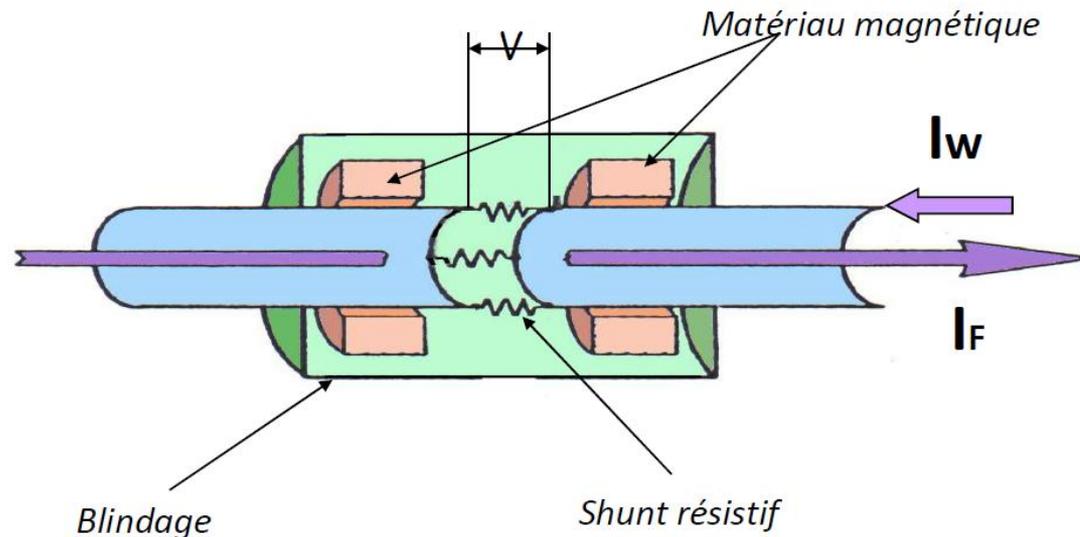
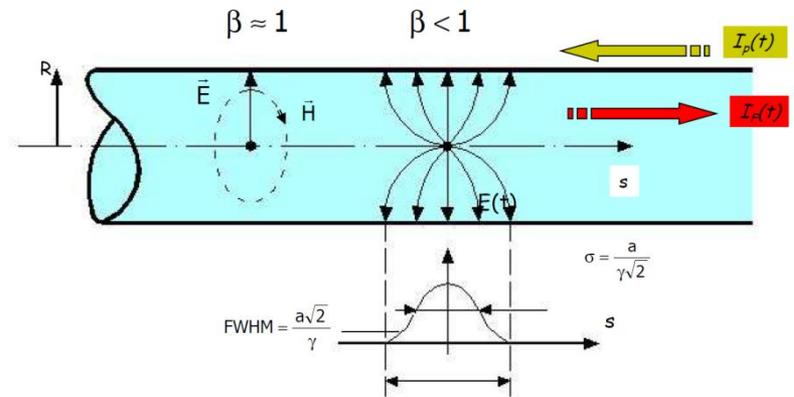
- Non interceptif.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée aux machines à protons (longueur du bunch \gg longueur de l'électrode)

Position et intensité Current wall monitor

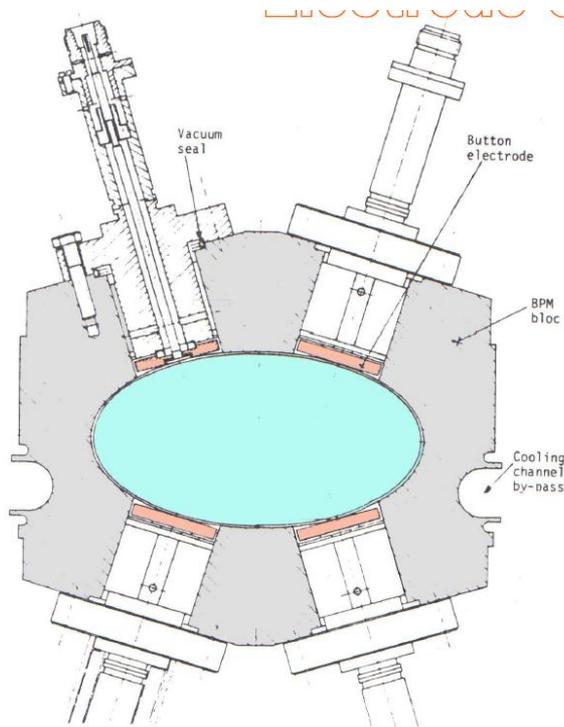
Propriétés:

- Utilise le courant de paroi.
- Non destructif du faisceau
- Large bande passante possible: plusieurs GHz.
- Possibilité d'obtenir la position du faisceau

CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ASSOCIE AU FAISCEAU

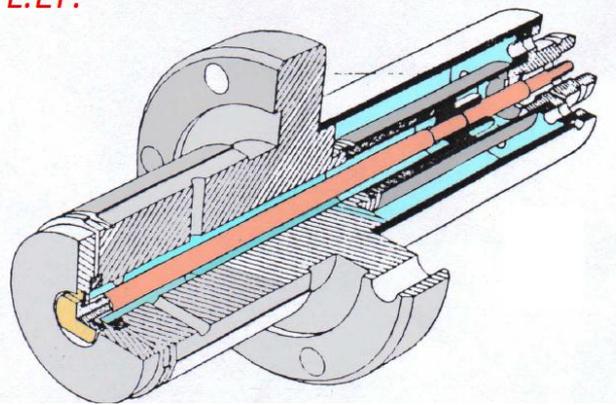


Mesure de position par électrodes bouton



Bloc BPM typique pour machine

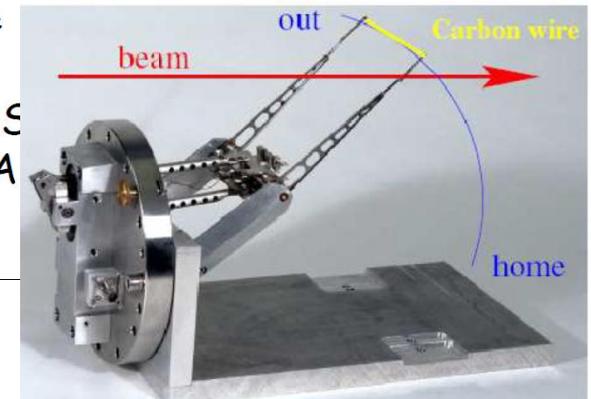
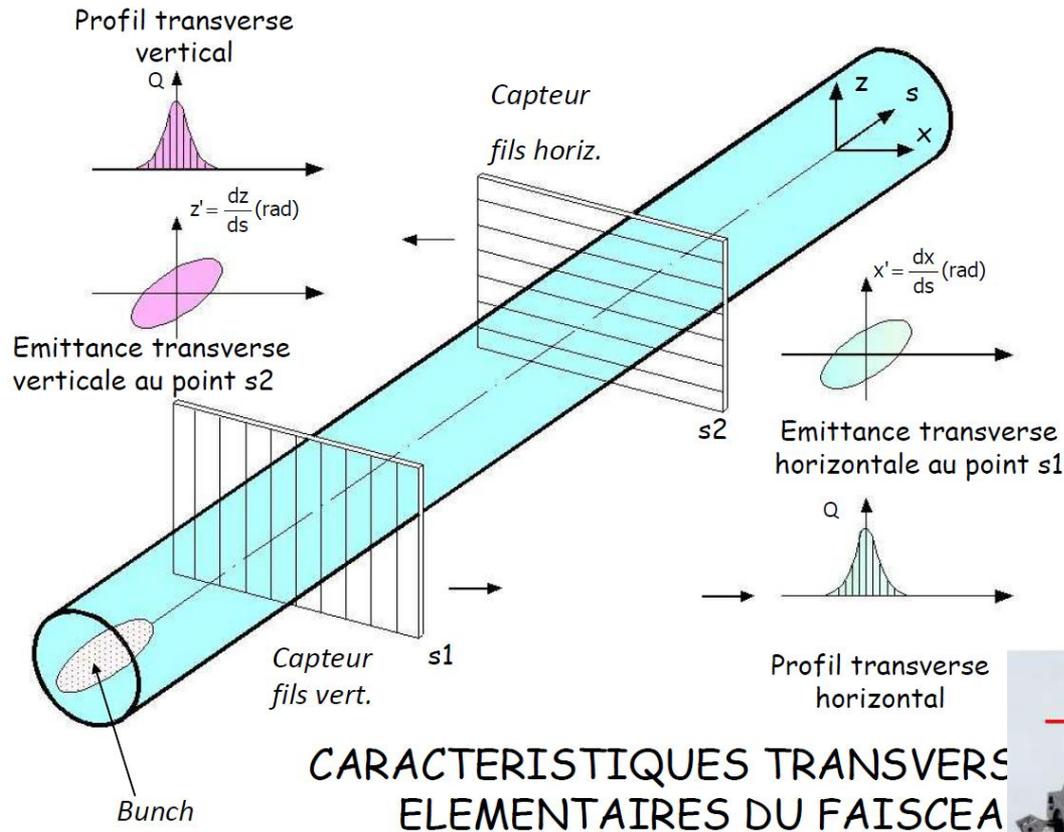
L.E.P.



- Non interceptif. Moniteur pouvant fonctionner pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée généralement aux machines à électrons et aux machines à rayonnement synchrotron (longueur du bunch \sim longueur de l'électrode)
- Contrôle de l'orbite fermée du faisceau, asservissement de position du faisceau
- Réponse non linéaire : nécessite un étalonnage.

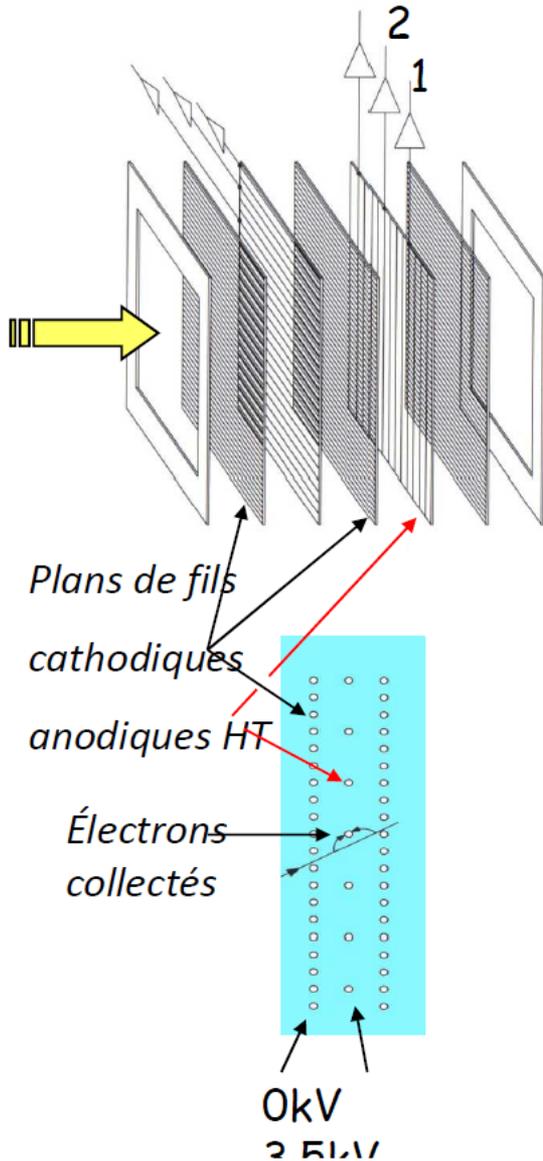
Grilles: mesures de profil et d'émittance

Fils mobiles: wire scanners

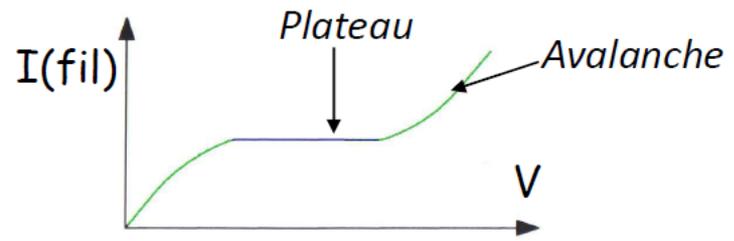
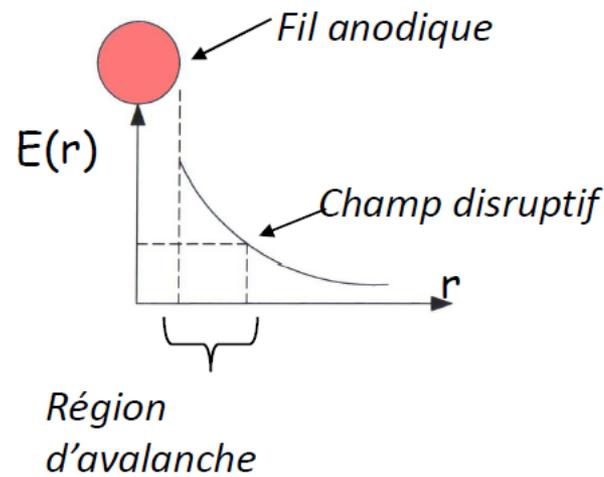


Profils transverses

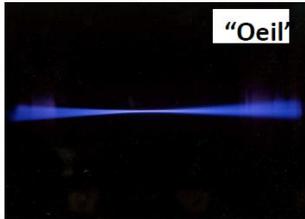
Détecteurs destructifs



chambre à ionisation

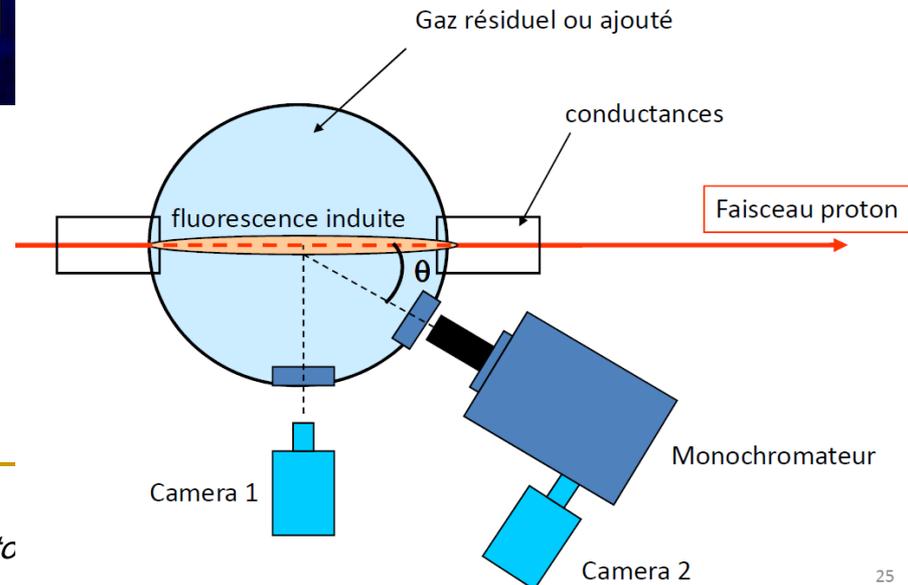
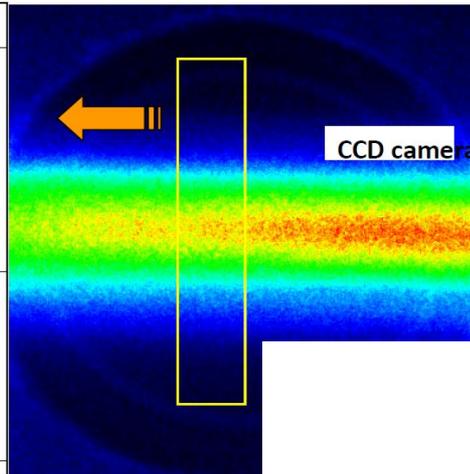
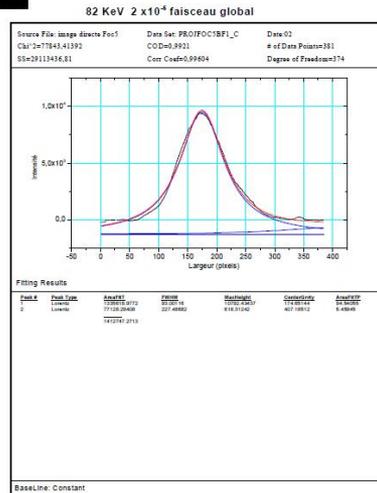


IPHI: mesure de profil par fluorescence



par fluorescence

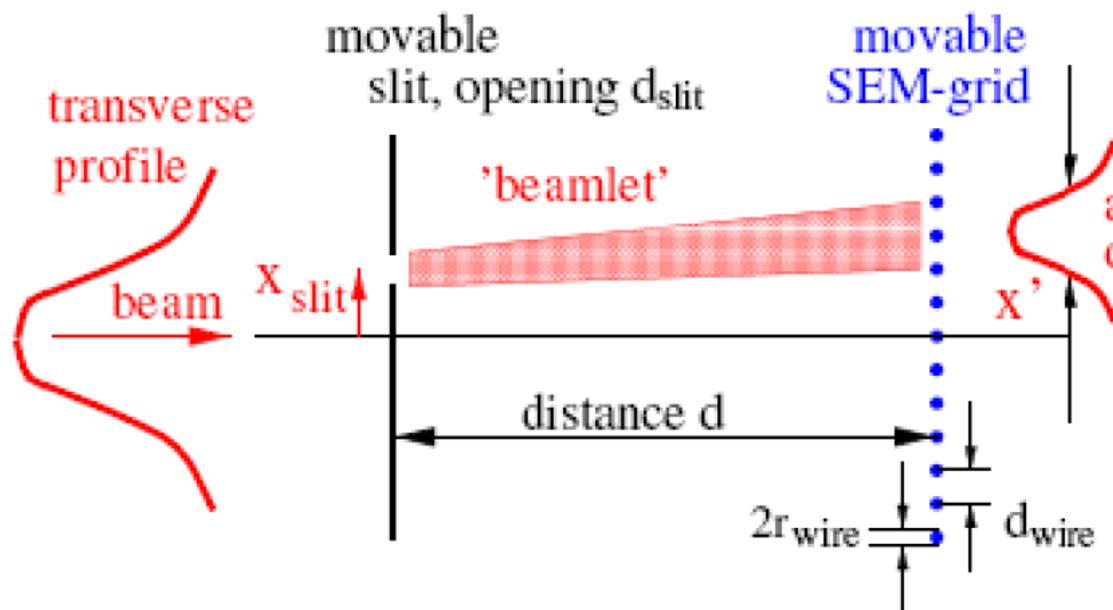
Interaction: faisceau proton / gaz résiduel
(Hydrogène: 2.10^{-3} Pa)



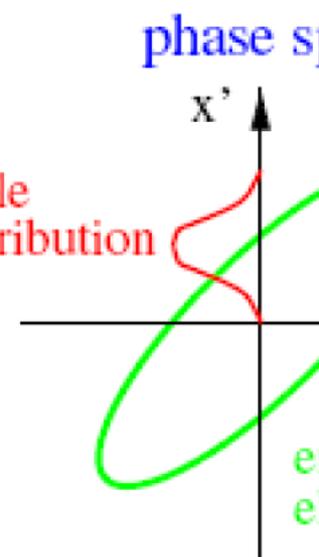
La Mesure de l'émittance transverse

EMITTANCEMETRE DE TYPE "fente - profil"

Hardware

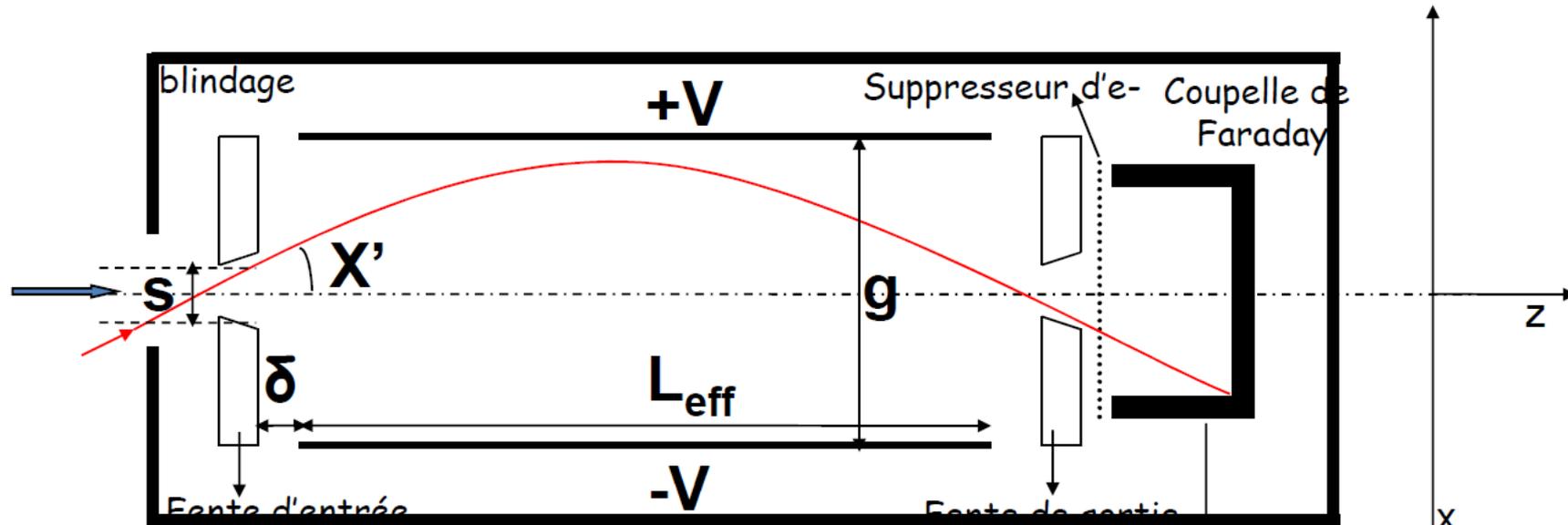


Analy.



La Mesure de l'émittance transverse

EMITTANCEMETRE DE TYPE SCANNER

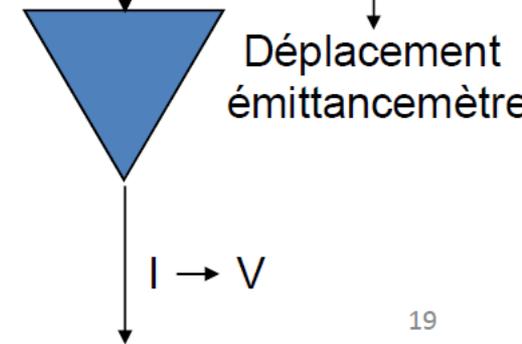


-Tension V nécessaire pour qu'un ion (charge q) d'énergie $q.U$ entrant avec un angle x' passe par la fente de sortie:

$$V = 2.U. x'.(g / L_{eff})$$

-Tension V_m nécessaire pour l'angle maximum x'_m analysable:

$$V_m = (8.g^2.U) / (D^2 - 4. \delta^2) \text{ pour } X'_m = (2.g) / (D + 2.\delta)$$



Merci de votre attention
