

# ANF Accélérateurs

17 – 21 mars 2025 CAES Fréjus

L. Perrot

luc.perrot@ijclab.in2p3.fr , 01 69 15 71 58



## UNE PETITE PRÉSENTATION

- Originaire de Lyon
- 93 à 97 : 4 ans d'université en physique à Lyon
- 97-98 : DEA (master 2) instru/modélisation en IdF
- 2001 : Thèse au LPSC Grenoble en neutronique
- 2002-2004 : Post-doc au CEA Saclay (exp n-ToF au CERN en neutronique)
- 12/2004 : Ingénieur de Recherche CNRS : instru/faisceau sur LISE au GANIL
- Depuis 12/2006 : IPN puis IJCLab : SPIRAL2, DESIR, MYRRHA, ALTO, PERLE ...
- Depuis 2015 : Responsable de groupes 5 personnes puis 22 personnes depuis 2020, adjoint du pôle accélérateur d'IJCLab depuis mai 2023

# AGENDA

- 0. Quelques éléments de base utile en accélérateur
- I. Une histoire des accélérateurs et des machines
- II. Transport des faisceaux de particules chargées

## UN PEU DE BIBLIOGRAPHIE POUR CEUX QUI VEULENT CREUSER

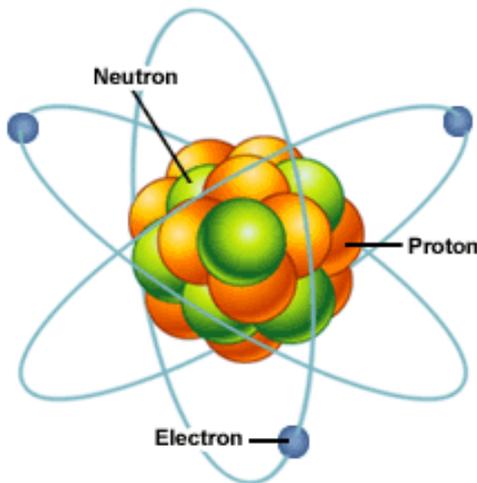
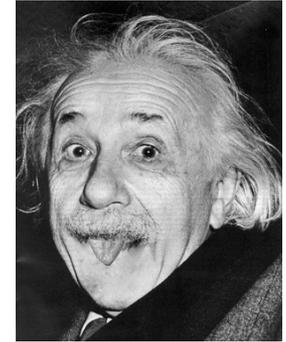
1. Les cours de l'école accéléraeur du CERN : <http://cas.web.cern.ch/cas>
2. Les cours de la Joint Universities Accelerator School (JUAS) : <https://www.esi-archamps.eu/fr/juas-presentation/>
3. E. Baron, Panorama des accélérateurs et de leurs utilisations, HAL Id: cel-0012288
4. K.L. Brown, D.C. Carey, Ch. Iselin and F. Rothacker, Transport, a computer program for designing charged beam transport systems, CERN 80-04
5. Bernhard Holzer, CERN-LHC, Introduction to accelerator Physics
6. Marc Muñoz, CELLS-ALBA, Introduction to charged particle optics, Jan 2010
7. Stanley Humphries, Principles of Charged Particle Acceleration, Wiley-Interscience, 1986
8. A.P. Banford, The Transport of Charged Particle Beams, Spon, 1966
9. P.J. Bryant, A Brief History and review of accelerators, CERN, Geneva, Switzerland
10. A. R. Steere, A Timeline of Major Particle Accelerators, Michigan State University, Department of Physics and Astronomy, 2005
11. M. Sands, The Physics of Electron Storage Rings, an Introduction, SLAC-121, UC-28 (ACC), 1970

## O- LES ÉLÉMENTS DE BASE

➤ Relation entre l'énergie et la masse :

$$E_0 = m_0 \times c^2$$

- $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$  est la vitesse de la lumière
- $m_0$  est la masse de la particule
- La mine d'or des caractéristiques des noyaux : <https://www.nndc.bnl.gov/>



Electrons :  $E_0 = 511 \text{ keV}$

Protons :  $E_0 = 938.3 \text{ MeV}$

Ions lourds :  $E_0 \approx A \times \text{uma}$

$1 \text{ uma} = 931.5 \text{ MeV}$ ,

A est le nombre de nucléons (protons + neutrons du noyau)

**1 eV** (électron-volt) = gain en énergie d'une particule de charge élémentaire  $e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  (ex: electron, proton) soumise à une tension de 1 Volt

$$\underline{1 \text{ eV} \Leftrightarrow 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

## O- LES ÉLÉMENTS DE BASE

➤ Energie totale :  $E_{tot} = \gamma m_0 \times c^2$ ,

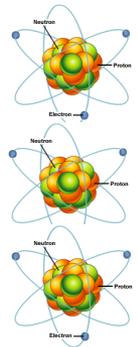
Avec le facteur de Lorentz  $\gamma = \frac{E_{tot}}{E_0} = \frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  et

La vitesse réduite  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $v$  est la Vitesse de la particule

on a aussi :  $E_{tot}^2 = E_0^2 + p^2 c^2$

➤ La quantité de mouvement :  $p = m v = \gamma m_0 v = \beta \gamma m_0 c$  (en MeV/c)

➤ L'énergie cinétique :  $E_{cin} = E_{tot} - E_0 = (\gamma - 1)m_0 c^2$



• Une particule à l'arrêt :  $\beta = 0, \gamma = 1$

• Une particule non relativiste :  $\beta \ll 1, \gamma \approx 1$

• Une particule ultra-relativiste (proche de la vitesse de la lumière) :  $\beta \rightarrow 1, \gamma \rightarrow \infty$

➤ Pour le cas non relativiste :  $E_{cin} \ll E_0, E_{cin} = \frac{1}{2} m_0 v^2$

## ➤ La force de Lorentz

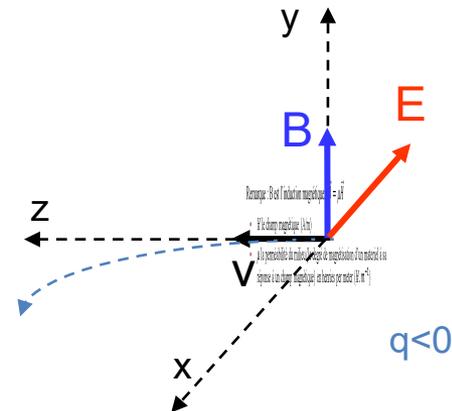
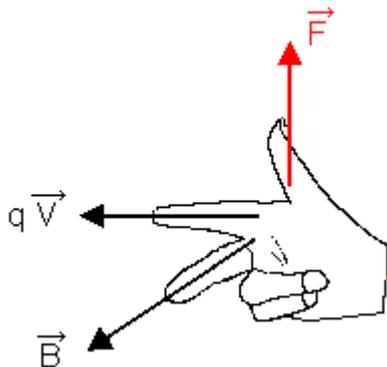
Expression general de la force appliquée à une particule chargée dans un champ électro-magnétique :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- $F$  la force de Lorentz en Newton
- $P$  la quantité de mouvement en  $\text{kg.m/s}$
- $Q$  la charge de la particule ( $\pm Ze$ ) en Coulomb
- $E, B$  les inductions électrique et magnétique (resp.  $\text{V/m}$  and  $\text{T}$ )

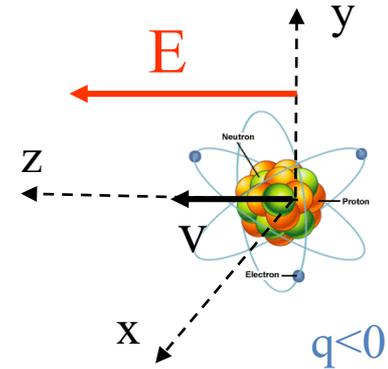
Remarque :  $B$  est l'induction magnétique:  $\vec{B} = \mu\vec{H}$

- $H$  le champ magnétique ( $\text{A/m}$ )
- $\mu$  la perméabilité du milieu (le degré de magnétisation d'un matériel à sa réponse à un champ magnétique) en henries per meter ( $\text{H.m}^{-1}$ )



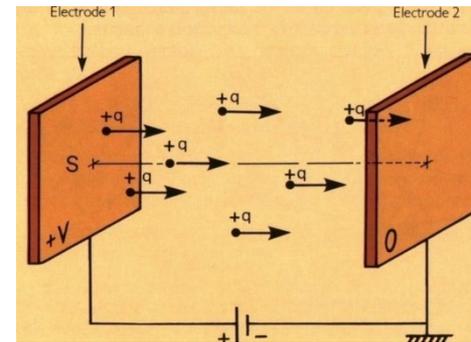
## Effets de la force de Lorentz sur l'énergie d'une particule chargée ?

$$\frac{dE_{tot}}{dt} = q \vec{v} \cdot \vec{E}$$



Pour accélérer (augmenter l'énergie d'une particule)

- Seul le champ électrique le permet
- Si  $\vec{E} \perp \vec{v} \Rightarrow$  pas d'accélération
- Accélération seulement si  $\vec{E} // \vec{v}$



Le gain en énergie  $\Delta E_{tot}$  dans un champ électrique statique :

$$\Delta E_{tot} (MeV) = qE \int v dt = q E \Delta x = q \Delta V \text{ avec } \Delta V \text{ le potentiel exprimé en MV}$$

Il s'agit de l'accélération ELECTROSTATIQUE

## Electron % proton

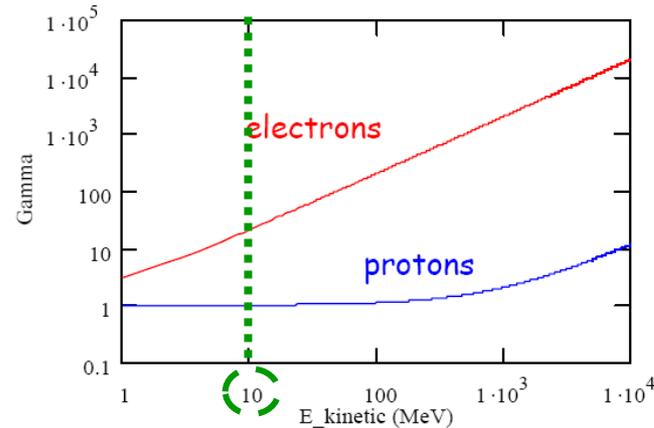
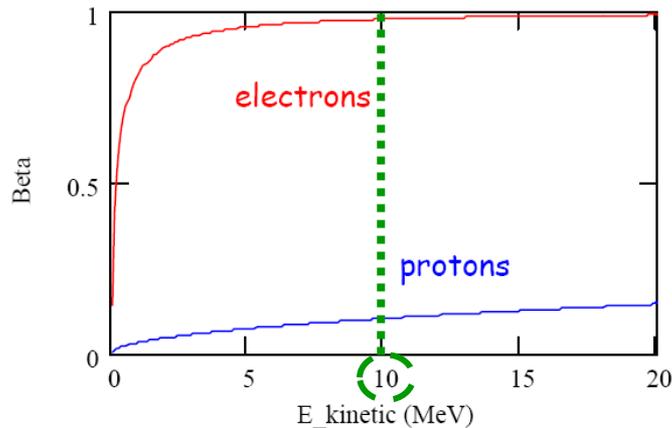
Considérons : un electron ( $q = -1$ ) et un proton ( $q = 1$ ) avec  $E_{initial} = 0$

On applique un potentiel accélérateur de 10MV

- Les deux particules auront un gain en énergie de 10MeV
- Mais la vitesse :

$$\text{Electron : } \gamma_e = 1 + \frac{E_{cin}}{m_0 c^2} = 1 + \frac{10}{0.511} \approx 20.6 \text{ and } \beta_e = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_e^2}} \approx 0.9988$$

$$\text{Protons : } \gamma_p = 1 + \frac{10}{938.3} \approx 1.0107 \text{ and } \beta_p \approx 0.145$$

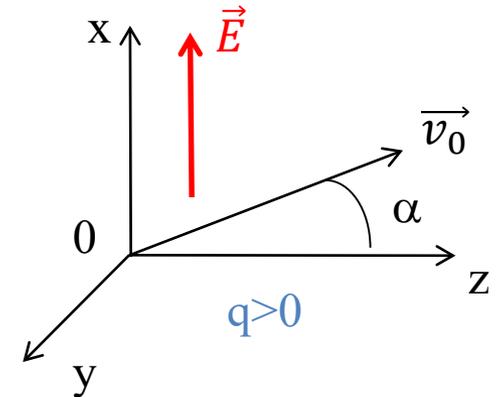


**La conception des machines depend des caractéristiques des particules**

- Trajectoire d'une particule dans un champ **électrique** :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E}$$

Trajectoire **parabolique** :  $x = \frac{qE_x}{2m_0} \frac{z^2}{(v_0 \cos \alpha)} + z \tan \alpha$



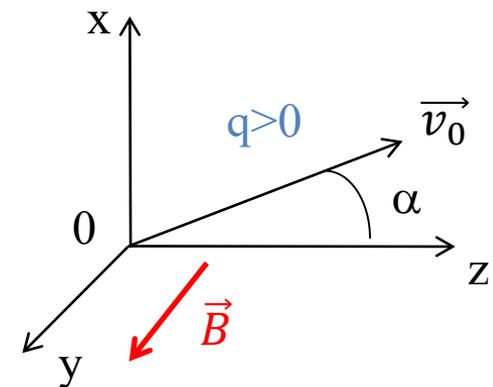
- Trajectoire d'une particule dans un champ **magnétique** :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Trajectoire **circulaire** :

$$\left(z - \frac{v_0 \sin \alpha}{\omega}\right)^2 + \left(z - \frac{v_0 \cos \alpha}{\omega}\right)^2 = \frac{v_0^2}{\omega^2} = \rho^2$$

$$\rho = \frac{v_0}{\omega} = \frac{P}{qB_y} \text{ centré en } x_c = \frac{v_0 \cos \alpha}{\omega}, z_c = \frac{v_0 \sin \alpha}{\omega}$$



## Quelques notions à retenir

La fréquence cyclotron :  $\omega = \frac{qB}{m}$

La fréquence de revolution :  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi\rho}{v_0} = \frac{2\pi m}{qB}$

La rigidité magnétique du faisceau :  $B\rho = \frac{P}{q}$

Numériquement :  $B\rho (Tm) = \frac{10^9}{c} \frac{P (GeV/c)}{q} = 3.3356 \frac{P (GeV/c)}{q}$

La rigidité électrique du faisceau :  $E\rho = \frac{v P}{c q}$

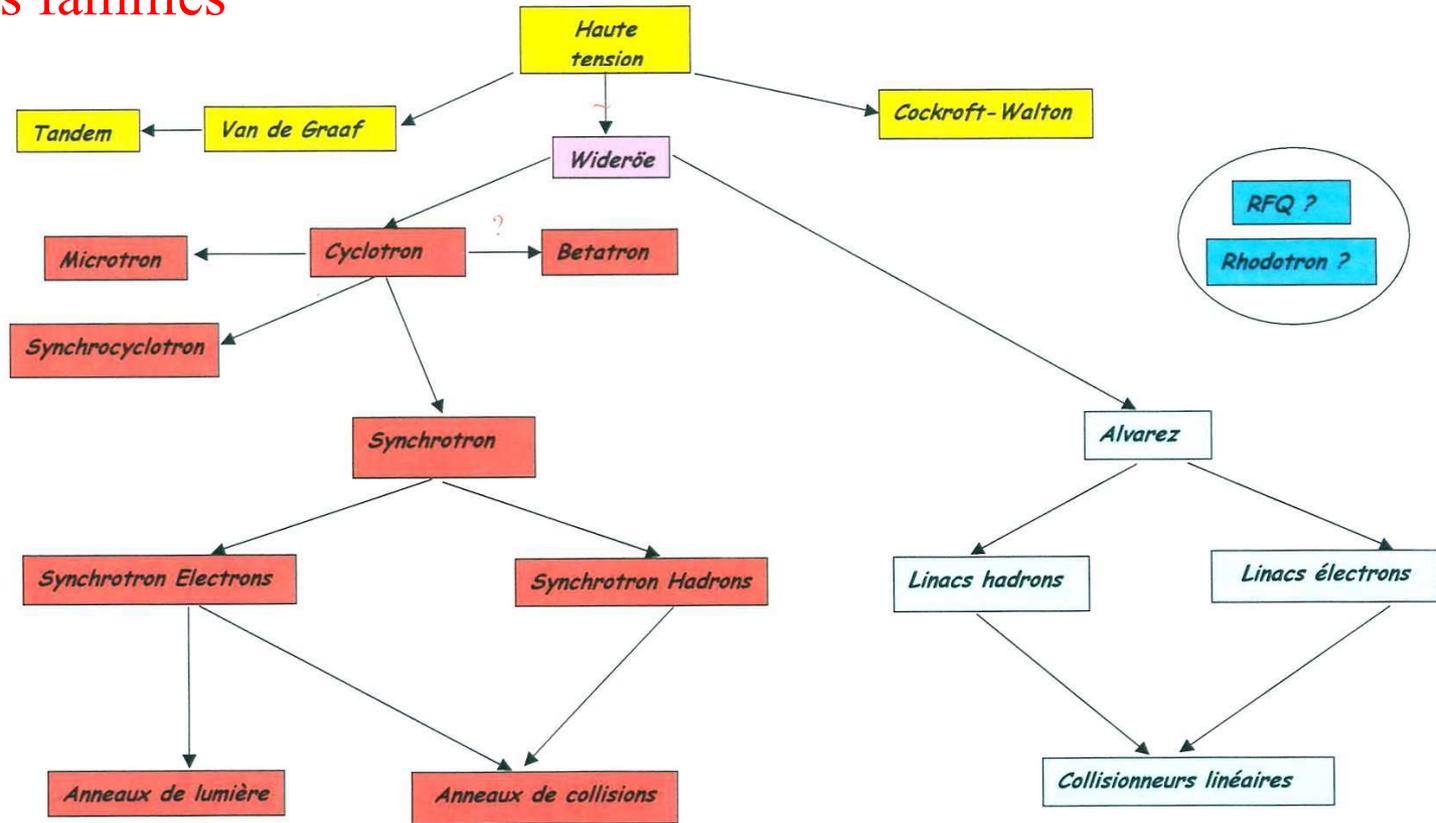
Numériquement :  $E\rho (MV) = \beta c \frac{B\rho (T.m)}{10^6} = \beta \frac{10^3 P (GeV/c)}{q}$

### Exemples :

- $^{12}\text{C}^{6+}$  at 95MeV/u :  $E_{tot} = 1140\text{MeV}$ ,  $B\rho = 2.8772\text{T.m}$ ,  $v = 12.6\text{ cm/ns}$
- $^{12}\text{C}^{1+}$  at 60keV :  $B\rho = 0.1222\text{T.m}$ ,  $v = 0.098\text{ cm/ns}$
- Protons at LHC : 7TeV  $B\rho = 23352.6\text{T.m}$ ,  $v = 29.979\text{ cm/ns} \approx c$

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Les grandes familles



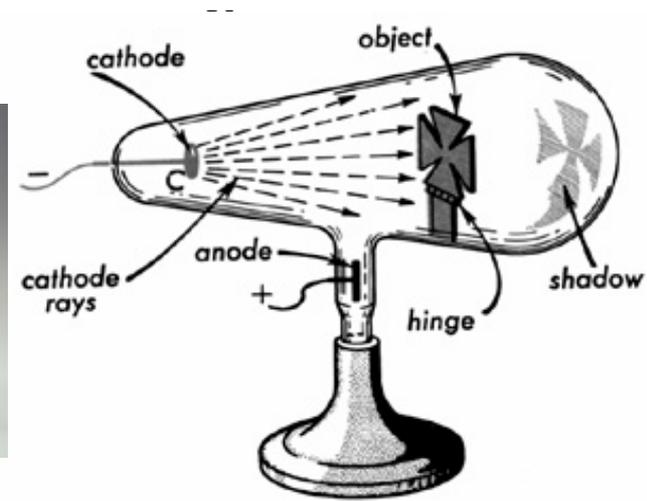
- **Machines continues**
- **Machines circulaires**
- **Machines linéaires**
- **Hors classification**

Ce classement suit un ordre grossièrement chronologique

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## La genèse (jusqu'à la 2ème guerre mondiale)

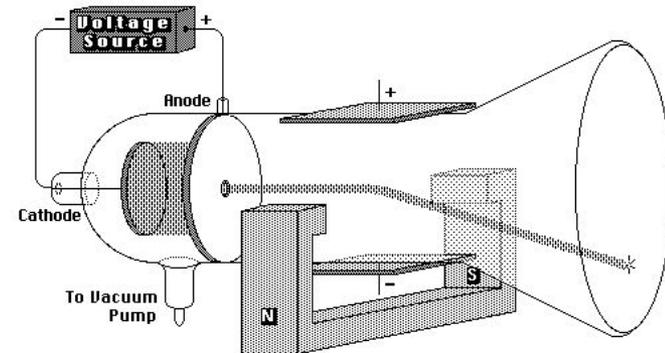
- Le premier : 1869  
le tube de Crookes ou  
tube à rayons cathodiques



- 1895 : W. C. Röntgen : (re)découverte des  
rayons X et l'interprétation correcte



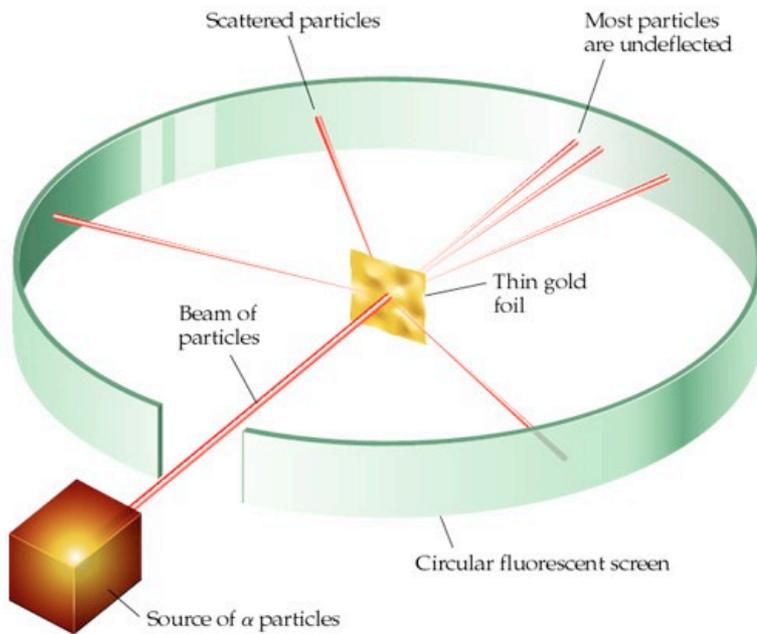
- 1897 : J.J. Thomson : découverte de  
l'électron



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

1911, Ernst Rutherford : le modèle de l'atome :

Observation et mesure des diffusions de particule  $\alpha$  sur une fine feuille de Mica et d'Or



## Observation

La plupart des  $\alpha$  ne sont pas déviés

Quelques  $\alpha$  défléchis à petits angles

Occasionnellement, l' $\alpha$  est rétrodiffusé par la feuille

## Interprétation

L'atome est essentiellement du vide

Le noyau est chargé positivement (comme  $\alpha$ )

Le noyau contient la majeure partie de la masse de l'atome

**Atome = un corps dur (le noyau) entouré d'un nuage d'électrons**

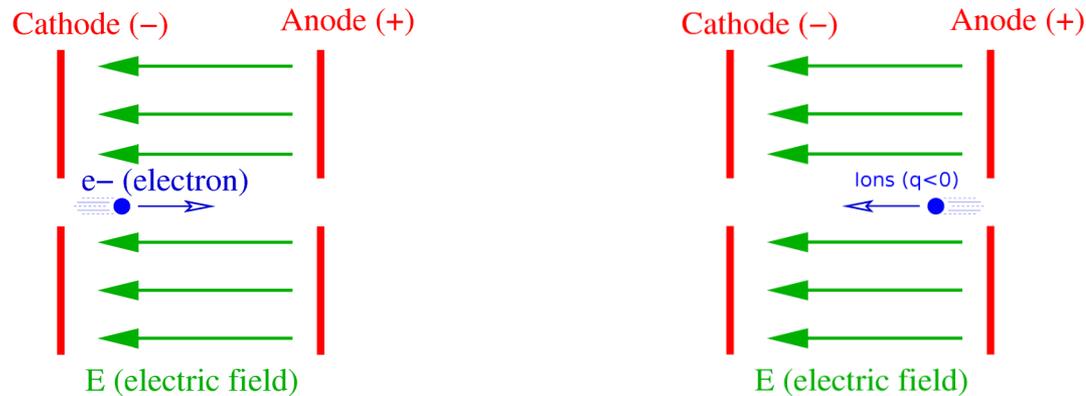
**Dans l'expérience de Geiger-Marsden, les  $\alpha$  sont une petite sonde** obtenue avec des fentes placées en amont de la feuille d'or



**La notion de petit sonde est la base des accélérateurs**

## Pourquoi et comment cette sonde ?

- Pour aller au-delà de ce qui est disponible naturellement, il faut accélérer
- Obtenir une meilleure résolution nécessite des hautes énergies
- Besoin d'un champ électrique pour accélérer les particules chargées
- L'étude de la matière nucléaire impose des Mégavolts (et plus) de champ



**Comment obtenir les hauts potentiels ? 2 voies : le continu et l'alternatif**  
**L'histoire des accélérateurs débute vers 1925-1930 (grande compétition)**

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

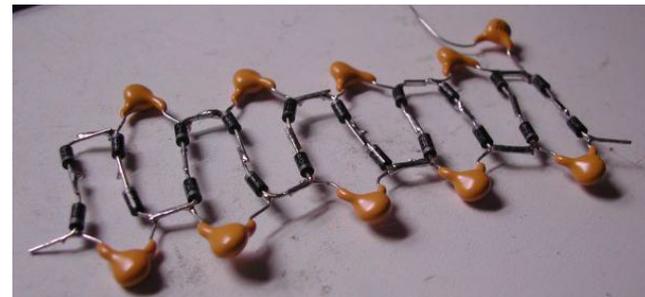
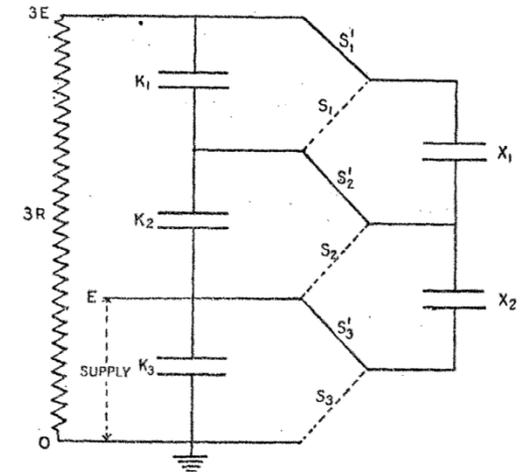
## Les accélérateurs électrostatiques

1930 : Le premier vrai accélérateur :  $\Delta E_{tot} = q \Delta V$

- Construit par John D. Cockcroft et E.T.S Walton in 1930 au laboratoire Cavendish à Cambridge
- Création et maintien de la tension.
- Accélération de protons jusqu'à 800kV.

Multiplicateur de tension composé d'un ensemble complexe de condensateurs connectés à des diodes de redressement agissant comme des interrupteurs.

**Cascade Greinacher  $\Leftrightarrow$  Cockcroft-Walton**

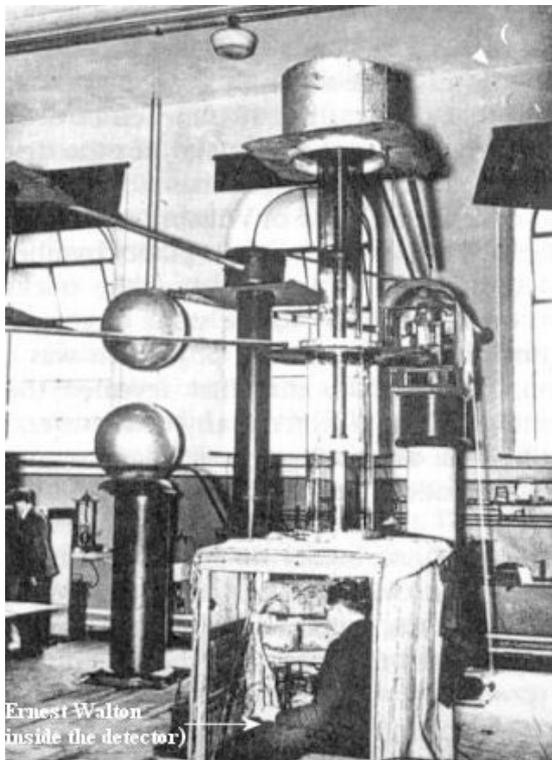


# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

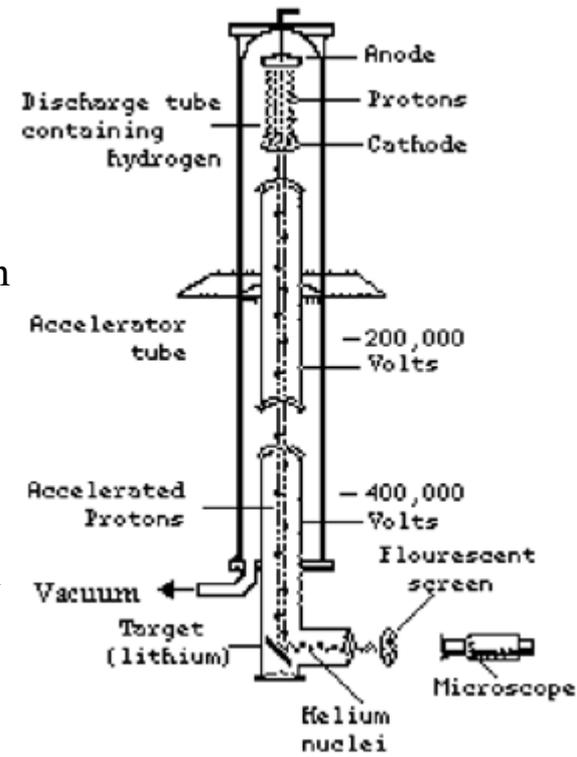
## Les accélérateurs électrostatiques

1932, Cockcroft et Walton produisent la désintégration nucléaire :

bombardement de lithium avec des protons accélérés :  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + \text{Energie}$



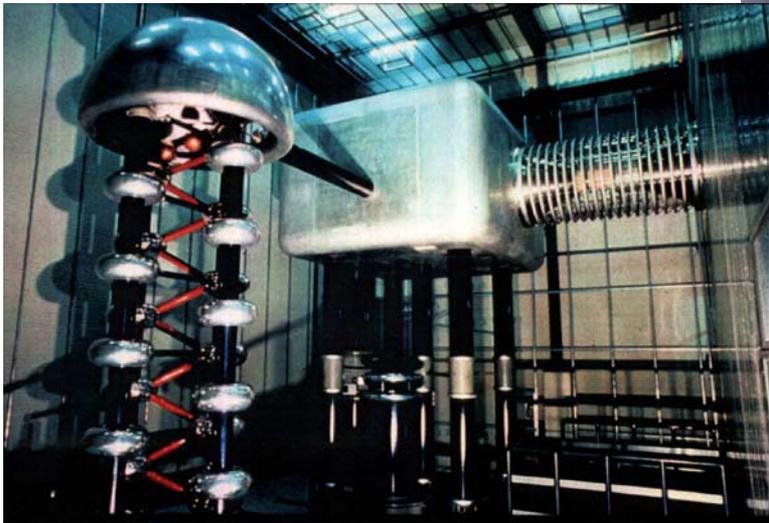
- Protons accélérés par une haute tension
- Protons frappent la cible de lithium sous un angle de  $45^\circ$
- Produits de réaction émis perpendiculairement au faisceau
- Détection avec un écran fluorescent au microscope
- Preuve de la relation d'Einstein  $E = mc^2$



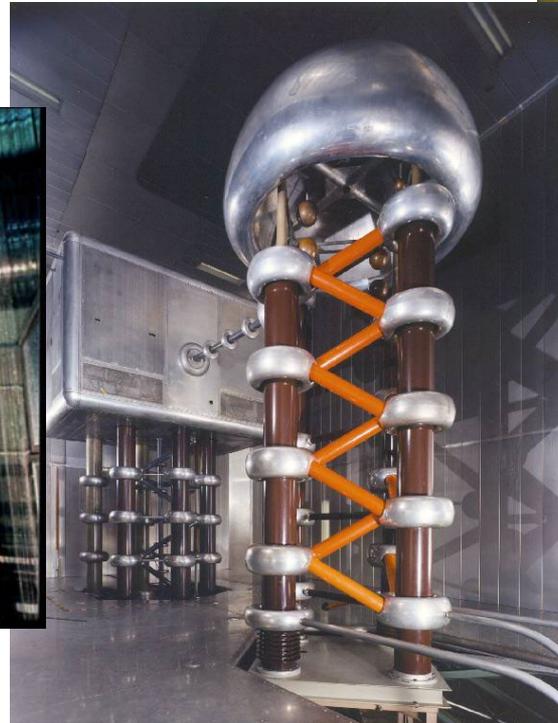
# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Les accélérateurs électrostatiques

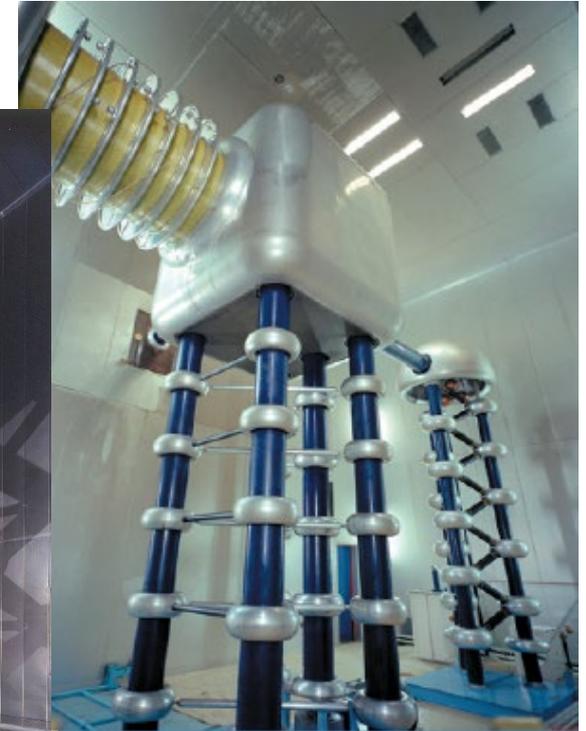
Principe du “Cockcroft & Walton” encore utilisés aujourd’hui comme injecteur de complexes d’accélérateur



PSI (800 kV)



ANL (750 kV)



Fermilab (750 kV)

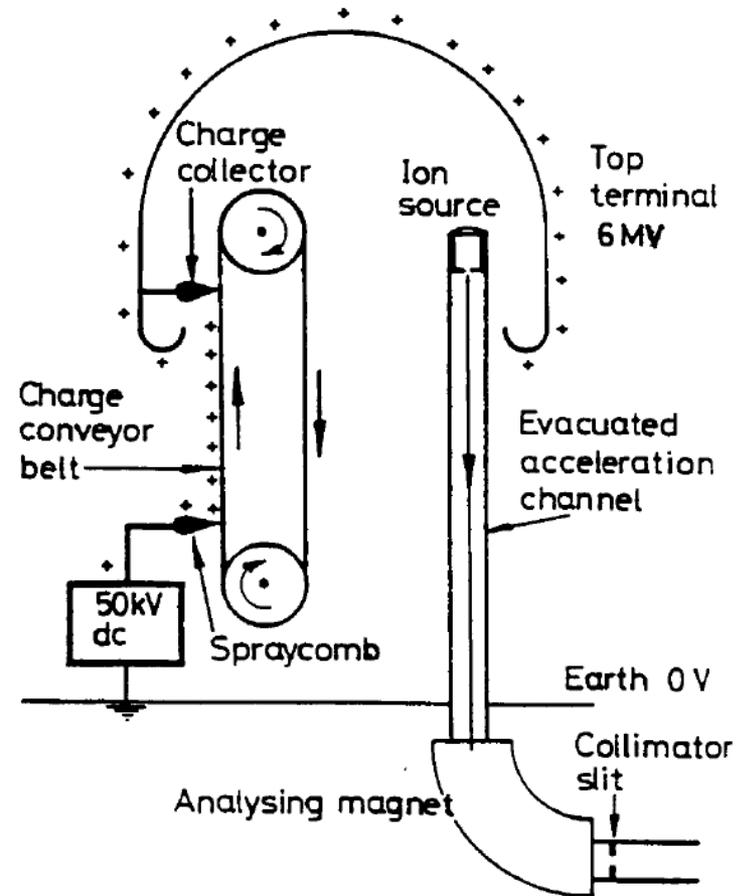
# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Les accélérateurs électrostatiques

1929 : Invention du générateur Van de Graaff

- Van de Graaff propose un générateur capable de produire de la haute tension
- Principe : les charges sont mécaniquement transportées le long d'une courroie depuis la source de basse tension au collecteur
- Les développements des tubes d'accélération ont pris qq années

1933 : Mise en opération avec 600keV protons



Usage des générateurs Van de Graaff : accélérateur static pour les ions

R.J. Van de Graaff, "A 1,500,000 volt electrostatic generator", Phys. Rev., 387, (Nov. 1931), 1919–20

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Les accélérateurs électrostatiques

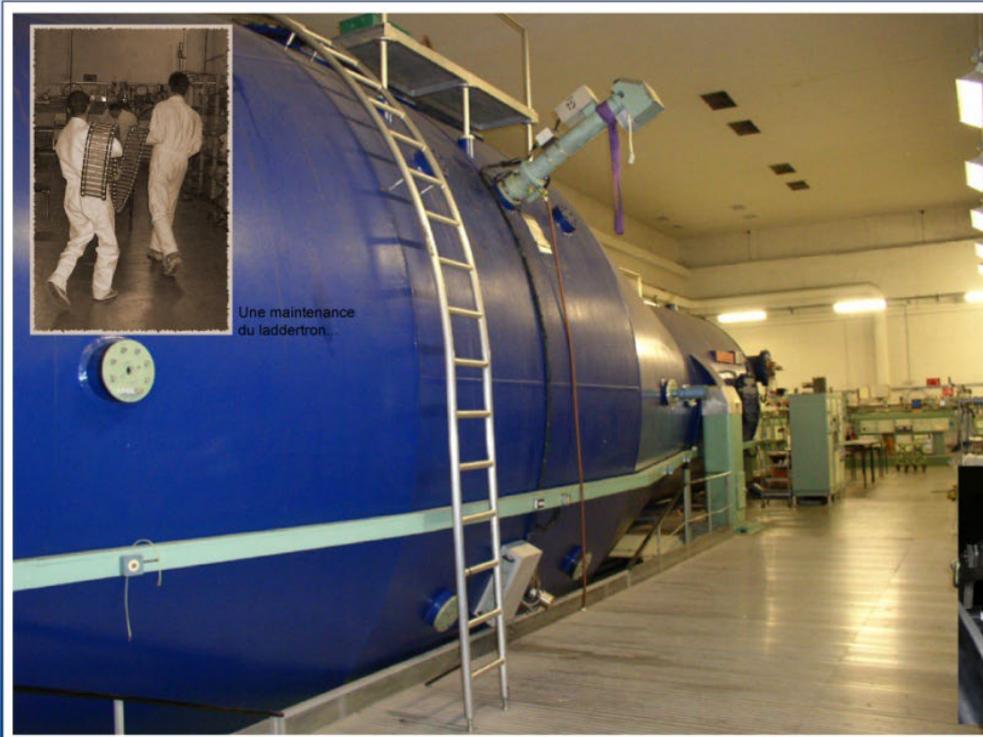
- Limitation : les claquages. Résolue en plaçant les électrodes dans un tank sous pression de 9-10 atm d'azote, fréon  $\Rightarrow$  HV jusqu'à 10MV

Aujourd'hui, c'est du SF6 mais gaz à effet de serre (législation évoluée)

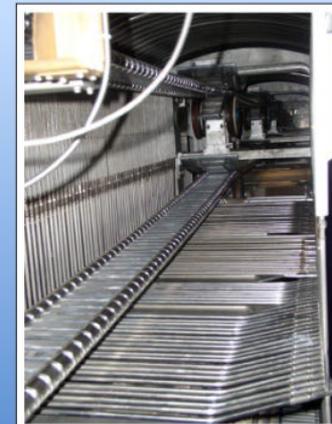
- $E_{max} = 30MeV$  avec les Tandem (ex: ALTO)

### Principe

- Source terminale
- Trave qui accélère
- $\Rightarrow$  ions
- Ions à



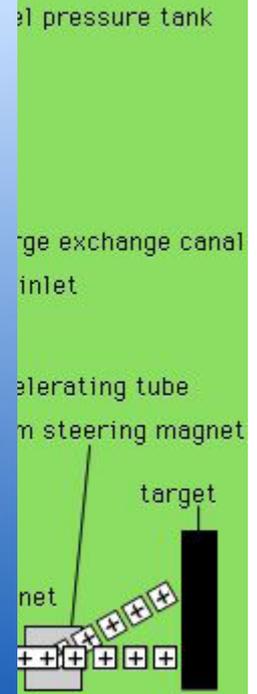
Une maintenance du laddertron...



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



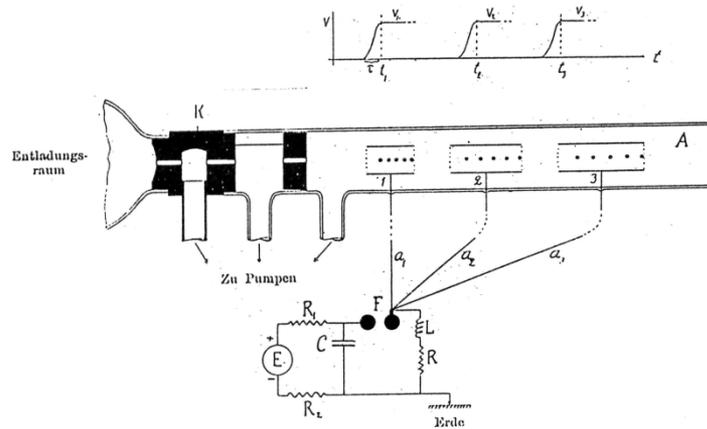
Une vue du terminal, à l'arrivée du laddertron



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## La 2ème branche de la famille

- Limitation des accélérateurs électrostatiques : Tension maximum accessible (ex HT=30MeV dans les Tandems). Difficultés de maintenir la haute tension dans les petits gap (à cause des **claquages**). Grosse contrainte pour les besoins de la physique des hautes énergies => Nécessité d'une alternative
- 1924 : Concept de l'accélération avec de la RF par Gustav Ising en Suède. Appliquer la même tension de façon répétitive (champ alterné) => **Accélération résonante**.

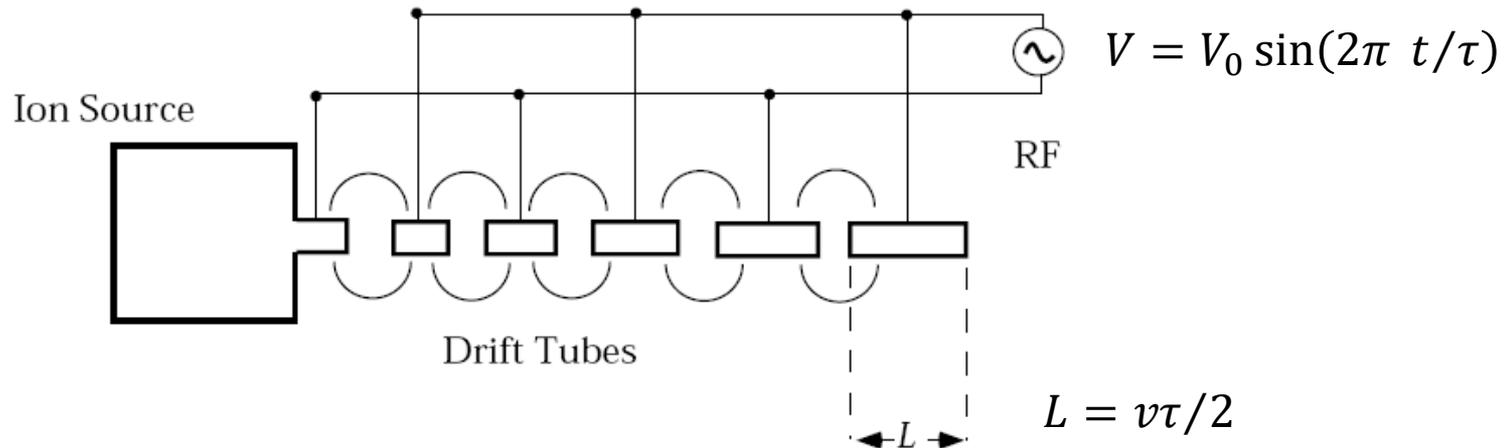


- L'invention d'Ising est le principe de base de tous les accélérateurs à haute énergie

- Différence :
  - Cockcroft et Walton = champs statiques (conservateurs)
  - Ising = champs variables dans le temps (non conservateurs)



## Les accélérateurs RF : LINAC, Betatron et Cyclotrons



- Mais quand  $v$  croit, la longueur des tubes croit => **Aie aie !**
- $f_{RF}$  peut croître : mais à haute fréquence la structure des drift-tube est perdue (attention, on est ici avant la 2<sup>ème</sup> guerre !)
- Difficultés surpassées après guerre par fermeture de la structure pour former une cavité (en machine circulaire) ou une série de cavités (en linéaire)
- Zone de travail typique : MHz à qq dizaines de GHz (LHC par exemple)

**Il existe plusieurs variantes de la conception de la structure accélératrice**

**mais principe d'Ising de 1924 conservé**

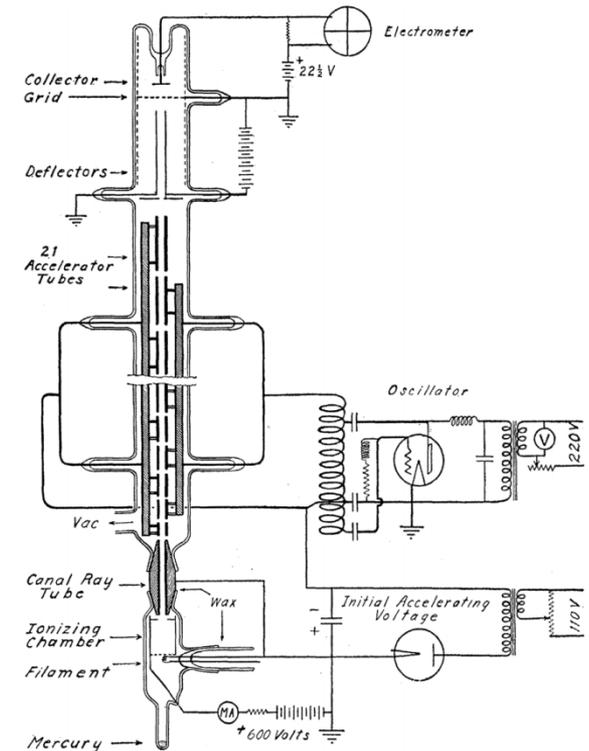
# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Les accélérateurs RF : LINAC, Betatron et Cyclotrons

1931 à Berkeley, Sloan et Lawrence construisent un LINAC avec 21 tubes: ions mercure à 1 MeV

Version optimisée :

- 30 tubes,  $\Delta E/\text{tube}=42\text{kV}$ ,  $f=7\text{MHz}$
- Ions mercure jusqu'à 1.26MeV
- **Arghh !** 50cm sur le dernier tube

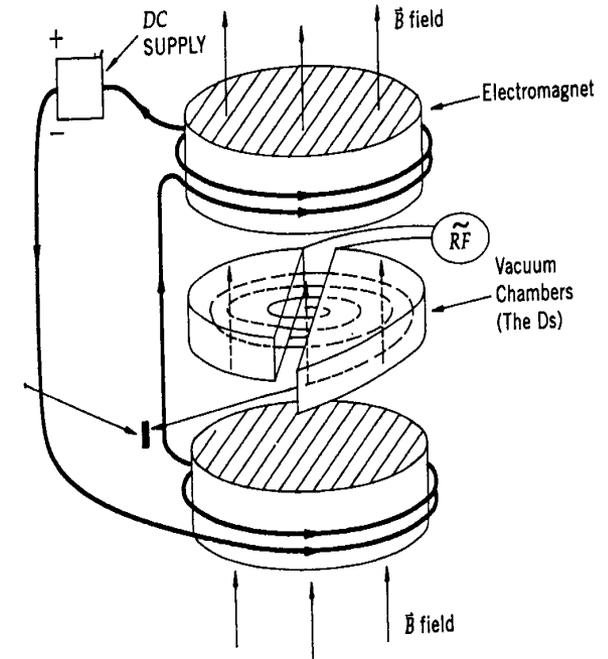


- Avant guerre, difficultés technologiques variées :
  - Contraintes de vide sur plusieurs mètres
  - Difficultés de fabrication des oscillateurs RF
- LINAC mis en sourdine dans les années 30
- Accent mis à Berkeley sur le **cyclotron** par Lawrence

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : le Cyclotron

- Structure répétitive : les particules passent plusieurs fois dans le même champ (RF est constante)
- Potentiel plus faible employé
- Grande puissance d'accélération accessible
- Application d'un B constant. Les particules suivent une orbite circulaire pour les ramener dans le champ accélérateur plusieurs fois

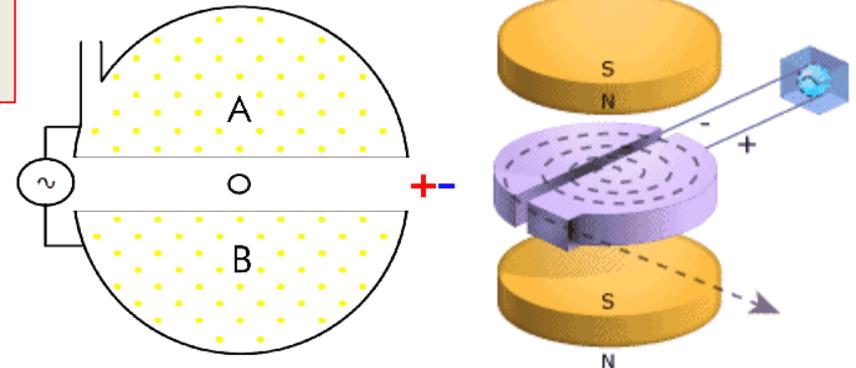


Condition de synchronisation :  $T_{rf} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi\rho}{v}$

Fréquence cyclotron  $\omega_{rf} = \frac{qB}{\gamma m_0}$

Limitation en énergie par le relativiste

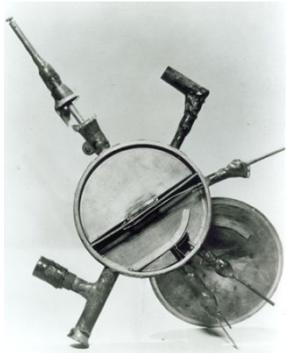
Avec cet accélérateur circulaire, des énergies considérablement plus élevées ont pu être atteintes et la nouvelle invention a conduit à un développement rapide de la technique de l'accélérateur.



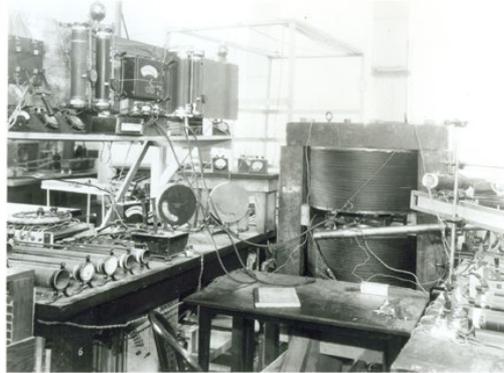
# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : le Cyclotron

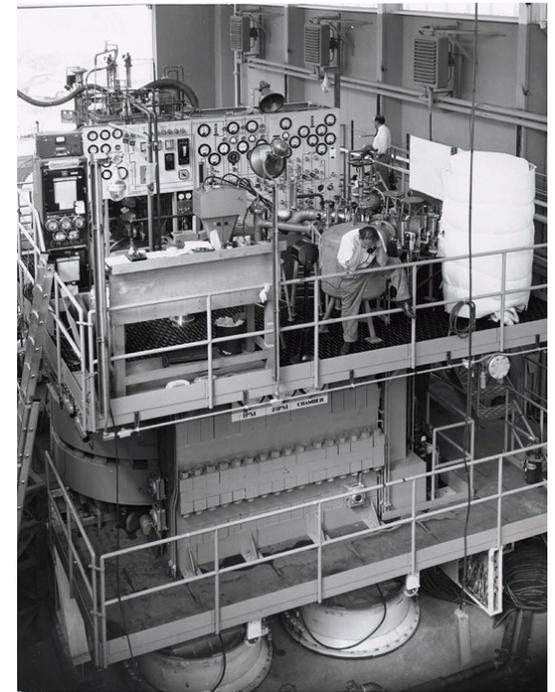
1930 : le 1er ! 80keV,  
Diamètre=11cm



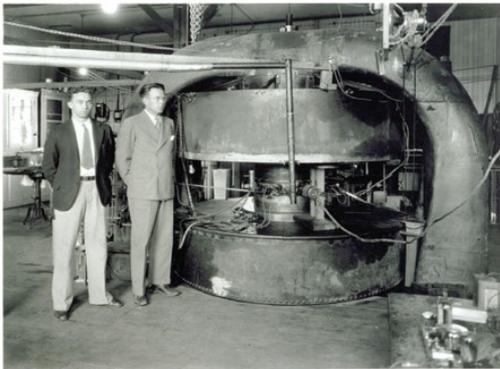
1931-1932 : 1.1MeV protons  
D=28cm. 1ère expérience



1939 : 100 $\mu$ A protons à 20  
MeV, D=1.5m



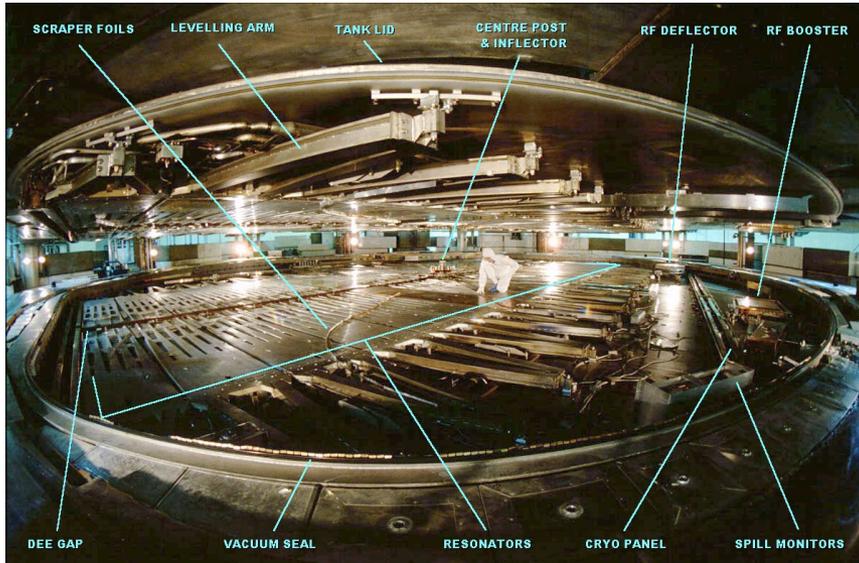
1933 : D=69cm, 4.8 MeV



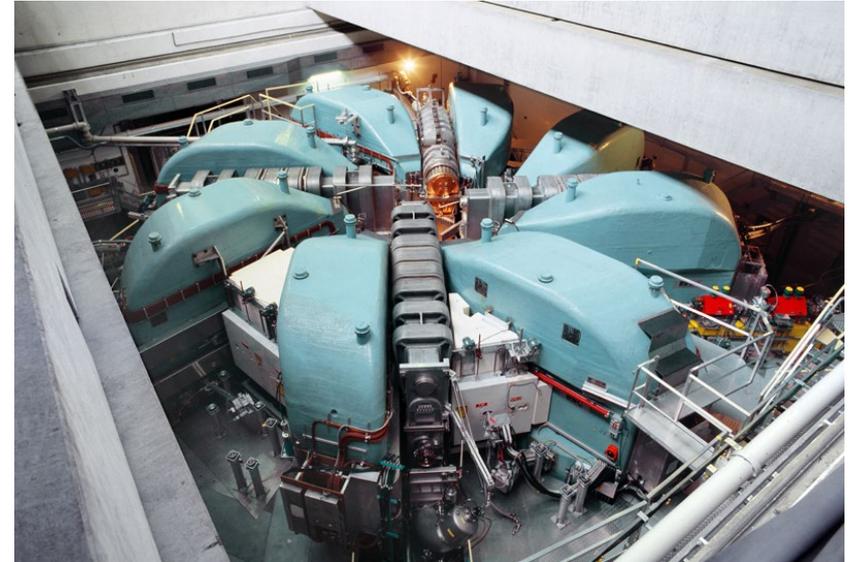
**Jusqu'en 1940, applications dédiées aux besoins médicaux: isotopes radioactifs Na, Al et P; pendant la guerre pour le projet Manhattan**

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : le Cyclotron, aujourd'hui



TRIUMF, Vancouver, Canada. 1974  
H- à  $E = 520\text{MeV}$ ,  $f = 23\text{ MHz}$ ,  $0.6\text{T}$   
Physique fondamentale, les matériaux, la production de radionuclides, la proton thérapie ...

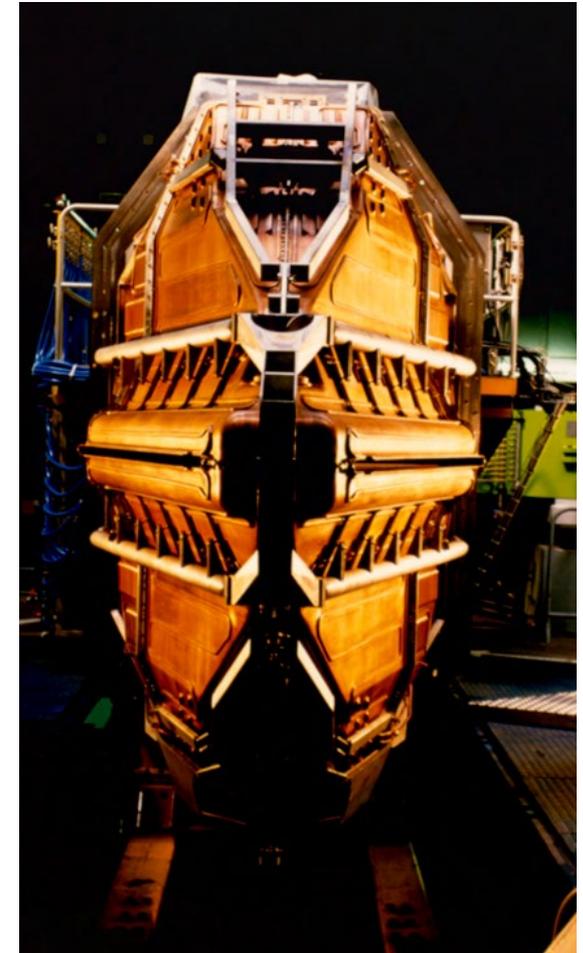
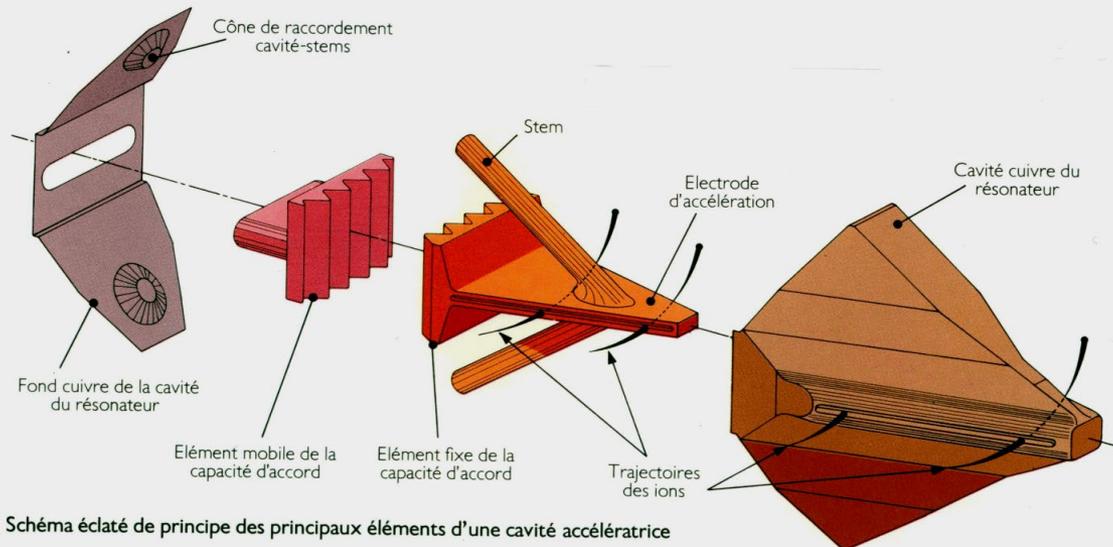
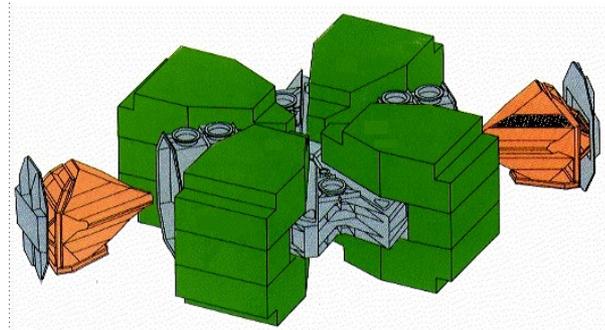
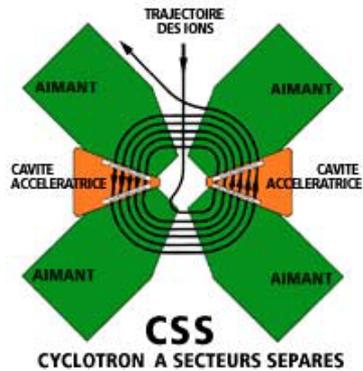


PSI, Villigen, Suisse  
P à  $E = 590\text{MeV}$ ,  $f = 50.6\text{ MHz}$ ,  $2\text{mA}$   
4 cavités accélératrices  
Physique fondamentale, les matériaux, la production de radionuclides, la proton thérapie ...

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : les cyclotrons GANIL

Grand Accélérateur National d'Ions Lourds à Caen, CEA-CNRS (depuis 1983)



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : les cyclotrons GANIL

Cavités CIME du GANIL  
 $f = 9.6 - 14.5 \text{ MHz}$ ,  $V_{max} = 100 \text{ kV}$



Voir présentation Angie Orduz

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : une petite branche : le Betatron

1940, D.W. Kerst construit le premier Betatron à l'université de l'Illinois

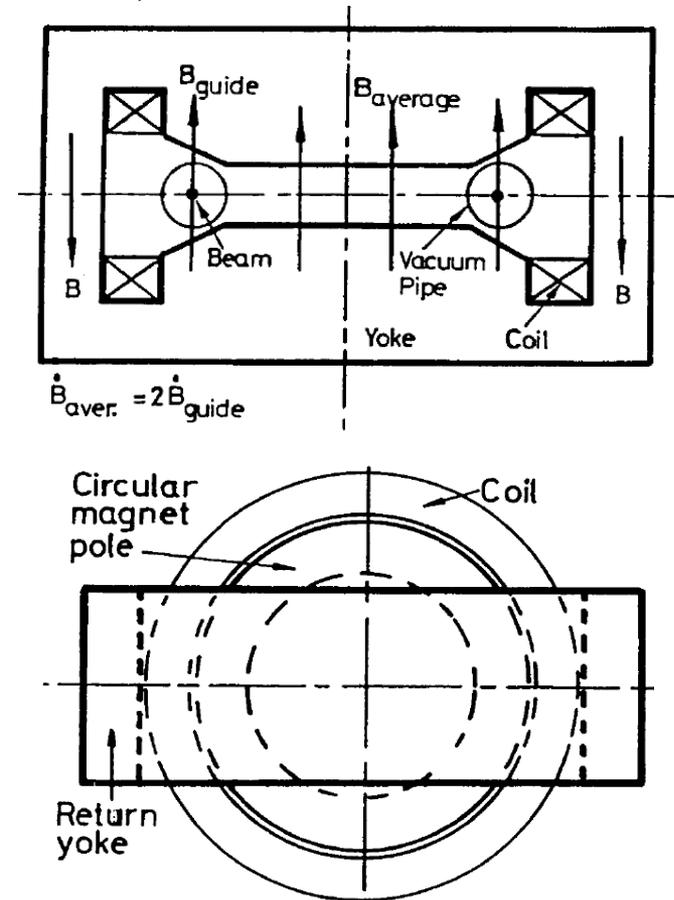
=> électrons à 2.3 MeV (voir. D. W. Kerst Phys. Rev. 60, 47)

- Uniquement pour les électrons (particules beta) et la production de rayons X
- Utilisation de l'induction par l'accélération (loi de Faraday  $\vec{rot} \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$ )
- Augmentation du champ magnétique avec une orbite fermée :

$$mv = q\rho B(\rho) \text{ with } B(\rho) = \frac{1}{2}B_{moyen}$$

- Induit un champ électrique
- Les particules gardent la trajectoire

L'énergie maximum (300MeV) est limitée par la force du champ magnétique due à la saturation du fer et des dimensions en pratique de l'aimant



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Accélérateur RF : une petite branche : le Betatron

Une histoire courte : de 1940 à 1950

En 1942, 25 MeV, 4 tonnes

En 1950, 300-MeV, 400 tonnes

Le premier : 2.3MeV



Accélération lente :  $31\text{eV}/\text{tour} \Rightarrow 1\text{M tours (1500km)}$  en 5ms puis éjection

Rayons X produits par interaction directe des e- beam sur une cible métallique

Applications : Industrie et médical

Mais les betatrons ouvrent la voie des synchrotrons (**ESRF, SOLEIL ...**)

## Les développements majeurs (après la 2ème guerre)

**Objectifs simples :**

**Augmenter l'énergie et l'intensité**

Nécessité de focalisation dans les plans transversaux et longitudinaux (d'énergie).

Dans les premiers cyclotrons, par exemple, le champ était rendu aussi uniforme que possible pour constater que le faisceau était **instable**. l'augmentation de la masse **relativiste** au-dessus des énergies autour de 25MeV pour (Protons ou Deutons) désaccorde les particules (**perte de synchronisme** avec le champ RF).

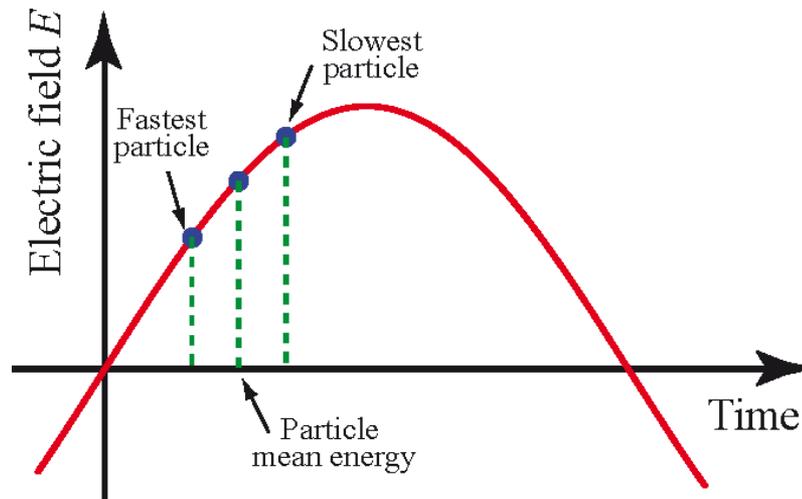
1945 : nouveau principe découvert (URSS et U.S. presque simultanément).

Etablissement d'une relation entre la synchronicité des particules en orbite et les champs électriques RF dépendant du temps

## Les développements majeurs (après la 2ème guerre)

### Quel est ce principe ?

- Gain en énergie par tour égal à la masse au repos de l'électron, fréquence cyclotron au tour  $(n-1)^{\text{ème}}$  est  $\omega_{n-1} = \frac{qB}{n m_0}$ .
- Si la fréquence RF  $\omega_{rf}$  est un multiple de la fréquence de revolution de la particule alors l'accélération de la particule est synchronisée
- Il s'agit du principe de la stabilité en phase et ouvre la voie des synchrotrons
- Une étape intermédiaire : les synchro-cyclotrons



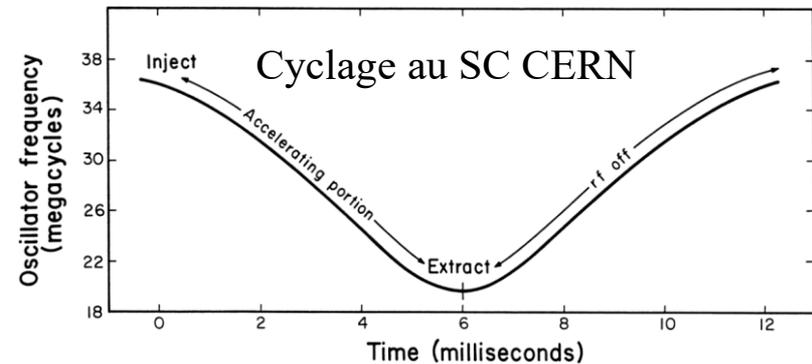
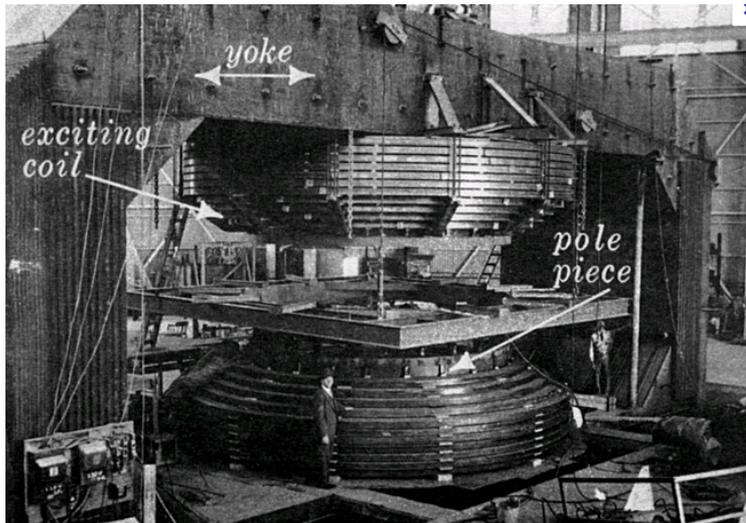
# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Synchro-cyclotron (E. McMillan et indépendamment par V. Veksler)

- Proche du cyclotron mais la RF est synchronisée avec les particules
- Le taux de répétition dans les synchro-cyclotrons réduit de fait l'intensité du faisceau

Le 1<sup>er</sup> synchrocyclotron fut une adaptation du cyclotron de 184-inch de Berkeley

- Novembre 1946 :  $V_{dee} = 20kV$ ,  $d$  à 190MeV,  $\alpha$  à 380MeV
- 1957 jouvence :  $E_p=730MeV$ ,  $E_d=460MeV$ ,  $E_\alpha=910MeV$
- Dédié à la physique des  $\pi$ -meson et aux irradiations médicales

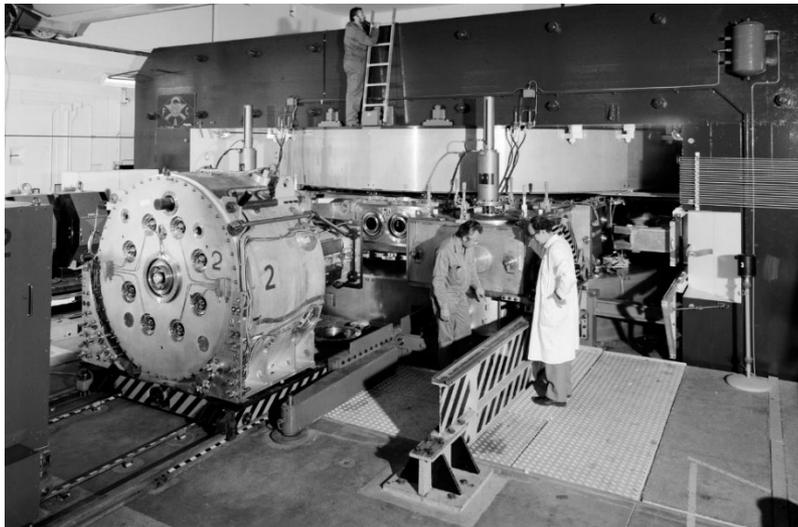


Protons:  $I_{crête} = 120\mu A$ ,  $\bar{I} = 750nA$ , temps d'accélération = 6ms, 75000 tours,  $D = 724km$   
 $f = 64$  impulsion/sec, durée impulsion = 500 $\mu s$

## Synchro-cyclotron



I.V. Kurchatov  
au JINR, Dubna Russia  
1949 : 6meters, 680MeV



- 1957: 1<sup>ère</sup> machine du CERN : 600MeV Protons SC
- 1964: employé pour la physique nucléaire à partir du démarrage du PS
- 1967: usage pour ISOLDE seulement
- Arrêté en 1990 (musée du CERN)

Aimant de 2500 tonnes entre lesquels les protons circulent dans une grande chambre à vide.

$f$  varie de 16.6 MHz à 30.6MHz par cycle de 12ms

## Du synchrocyclotron au synchrotron

Jusqu'aux années 50, la **focalisation du faisceau était faible** (weak) ou focalisation à gradient constant (**constant-gradient focusing**).

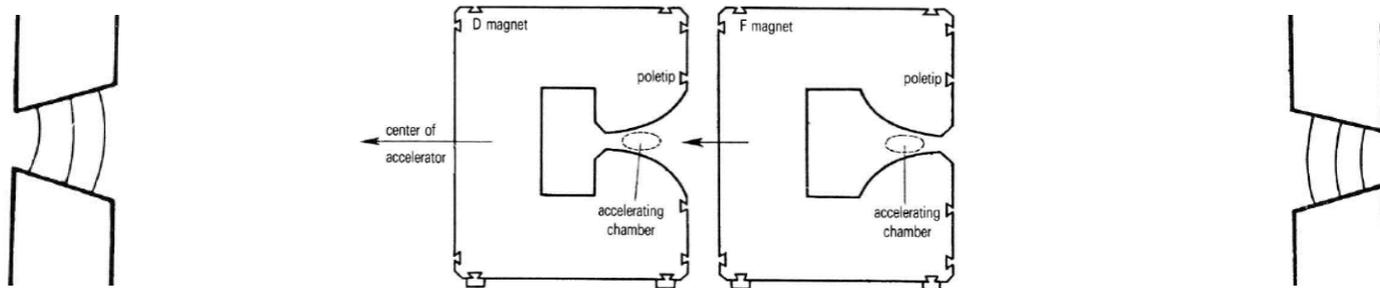
- Dans ce cas, le champ magnétique diminue doucement avec l'augmentation du rayon de la particule le long de la circonférence de la machine.
- Les tolérances sur le gradient de champ requises étaient très fortes ( $\frac{\Delta B}{B} \approx 10^{-4}$ ) limitant la taille de l'accélérateur
- Les ouvertures des chambres à vide demandées devenaient très larges et les contraintes sur l'aimant très fortes et coûteuses
- **Limitation autour du GeV au début des années 1950**

1952 : BNL (US), E. Courant, M. Livingston and H. Snyder propose la **focalisation forte strong focusing**, nommé également **focalisation à gradients alternés**. (pour faire simple, on met des quadrupôles, j'y reviendrai plus tard).

**Ce nouveau principe a révolutionné la conception du synchrotron, permettant d'utiliser des aimants plus petits et d'envisager des énergies plus élevées.**

## Synchrotron

- En façonnant les faces polaires de telle sorte qu'une section transversale ait la forme d'une hyperbole, ils ont pu obtenir un gradient uniforme à travers l'ouverture magnétique. Selon la force du gradient, les particules traversant un tel champ convergeront (focalisées) ou divergeront (défocalisées).
- En utilisant une combinaison de secteurs magnétiques de focalisation, de défocalisation et sans champ, ils ont découvert un moyen de forcer le faisceau à converger plus.
- Nous reviendrons plus loin sur cette propriétés et Marc-Hervé Stodel détaillera la conception.

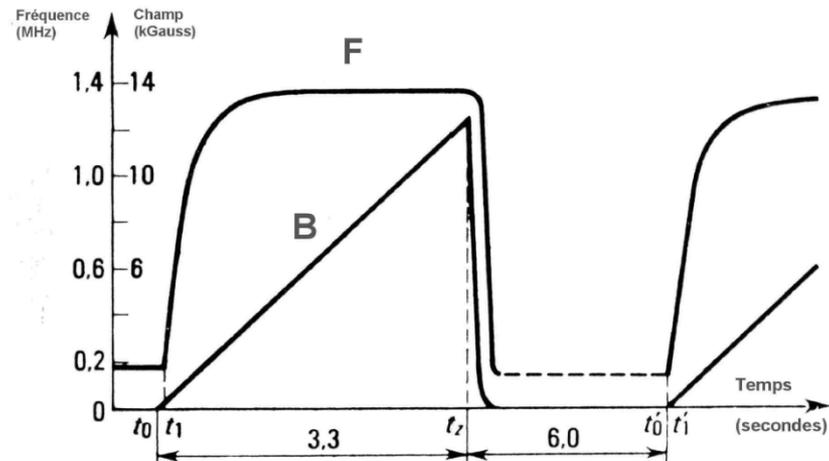
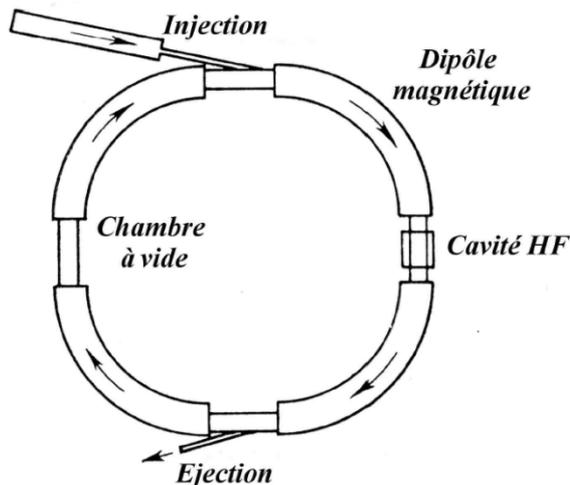
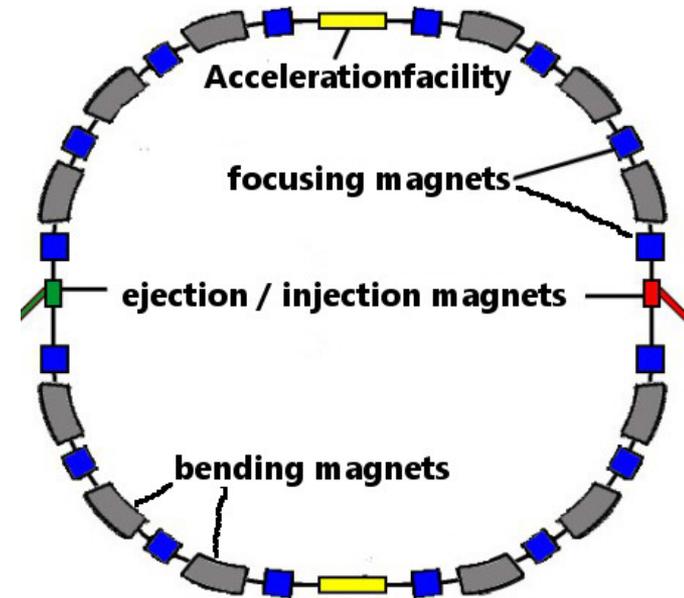


- Dans le synchrotron, on mélange courbure (déflexion) et focalisation => aimant en C. Les deux contributions peuvent être séparées par des aimants de courbure et des quadripôles.
- Courant, Livingston et Snyder : séquence de secteurs de focalisation, de défocalisation et zone sans champ => effet de focalisation dans les deux plans transversaux.

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Synchrotron

- Tous les synchrotrons sont basés sur ce principe
- Sur une orbite circulaire, l'amplitude des oscillations autour de l'orbite centrale sont petites  $\Rightarrow$   $\searrow$  des dimensions des aimants  $\Rightarrow$   $\searrow$  des tailles des chambres à vide  $\Rightarrow$   $\searrow$  coûts  $\Rightarrow$  machine circulaire (ring)
- Accélération obtenue par l'insertion d'une cavité dans la machine  $\Rightarrow$  le champ des aimants change avec la rigidité magnétique (l'énergie) des particules.



## Synchrotron

- 1947 : 1<sup>er</sup> synchrotron à électrons par General Electric Research Laboratory (GERL) à 70 MeV => radiation synchrotron observé pour la 1<sup>ère</sup> fois (voir plus loin)
- 1952 : 1<sup>er</sup> synchrotron à protons à BNL à 1GeV (3GeV in 1954)



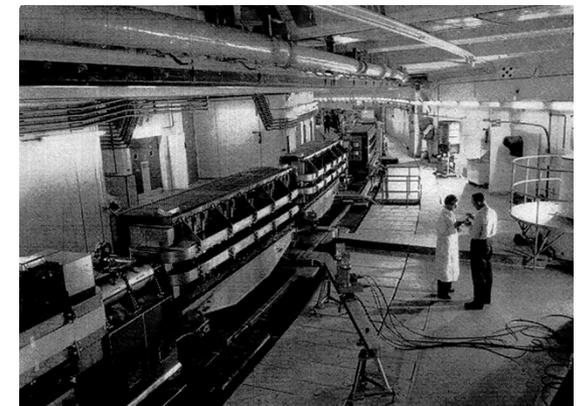
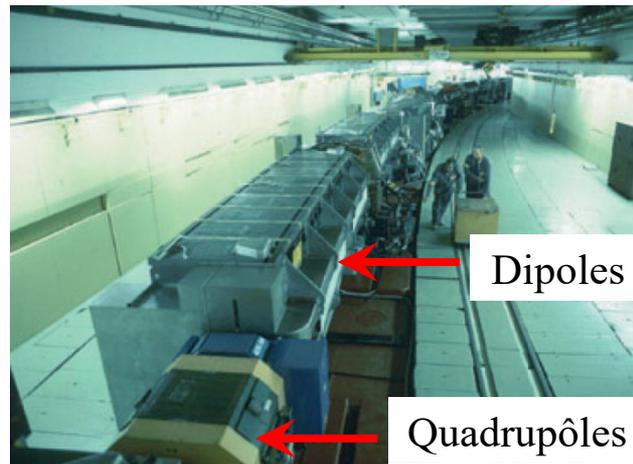
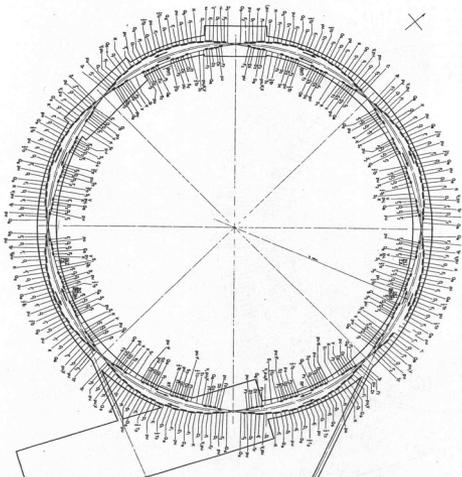
La synchronisation entre les modules accélérateur RF et les aimants entraîne des challenges en ingénierie.

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Synchrotron

CERN lance le **PS** sur ce principe très vite pour aller à 28GeV (au lieu de 10GeV en focalisation faible déjà prévu) : <https://cerncourier.com/a/a-comparison/>

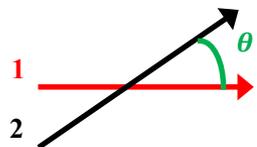
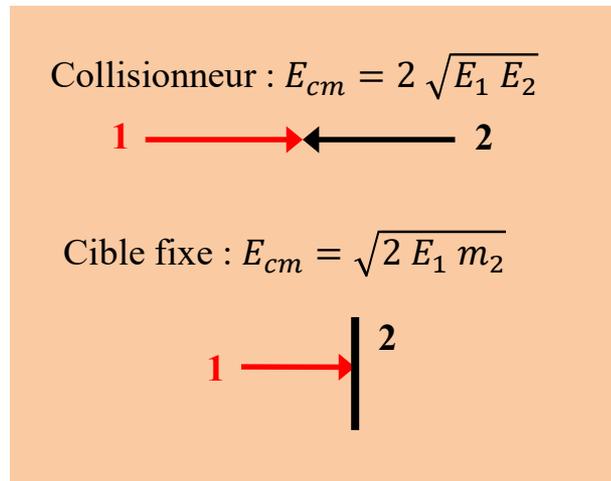
- Protons générés par l'ionisation d'un gaz d'hydrogène et accélérés à 500keV avec un générateur de type Cockcroft-Walton. Le faisceau de protons était injecté dans un LINAC à 3 étages jusqu'à l'énergie de 50MeV.
- Puis injection dans le synchrotron (champ magnétique de 140G à l'injection).
- Tolérances d'alignement en transverse inférieures à 1mm.
- 16 cavités RF réparties sur la circonférence de 628m (diamètre = 200m)
- Répartition de 100 aimants dont le champ croît de 14kG en 1seconde ( $E_p$  de 50MeV à 28GeV) => puis éjection et retour des champs à 140G en 1". Le cycle se répète chaque 3", 450000tours, 54keV/tour
- Taille du faisceau dans le PS = 6mm de diamètre et  $\Delta E/E = \pm 15MeV$  à 28GeV



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Le collisionneur à anneau de stockage

- Widerøe en 1943. L'idée lui est venue lorsqu'il réalisa que pour le cas de particules non relativistes (par exemple 2 voitures entrant en collision), 2 particules d'égales énergies se collisionnant dégagent 4 fois l'énergie d'une particule de même énergie collisionnant la même particule à l'arrêt.
- En physique expérimentale, l'énergie disponible permettant de créer de nouvelles particules est l'énergie libérée dans le centre de masse.



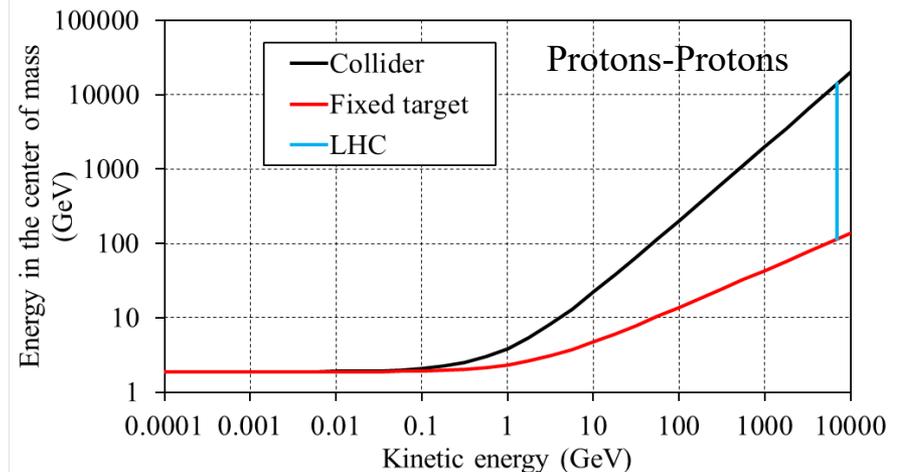
$$E_{cm}^2 = (E_1 + E_2)^2 - \|\vec{p}_1 + \vec{p}_2\|^2$$

$$E_{cm} = [m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 (1 - \beta_1 \beta_2 \cos \theta)]^{1/2}$$

Ex: LHC  $E_{protons} = 7TeV$

**Collisionneur :  $E_{cm} = 14TeV$**    **$\times 120$**

**Cible fixe :  $E_{cm} = 0.118TeV$**



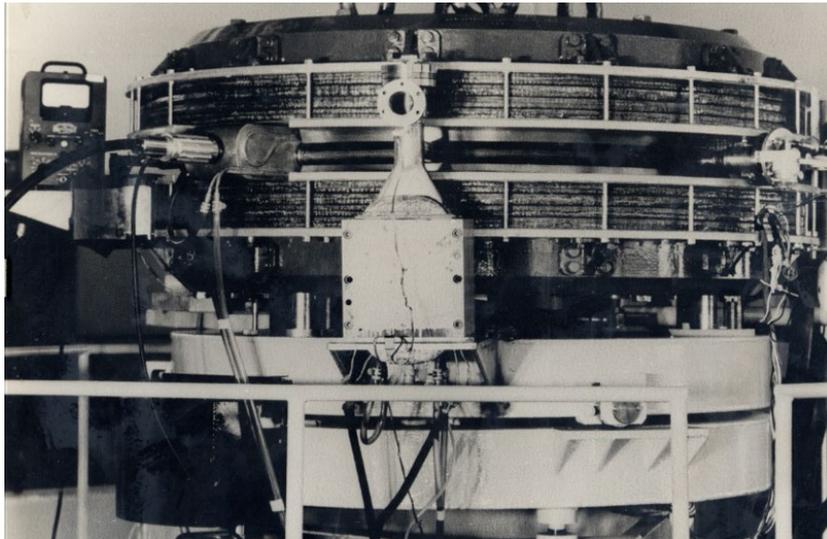
# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Le collisionneur à anneau de stockage

Les anneaux de stockage dominent la recherche en physique des hautes énergies.

1961 : ADA (Anelli di Accumulazione) à Frascati

- collisionneur à anneau simple,
- particules+anti-particules



ADA : 250MeV  $e^+ - e^-$   
1961-1964

1972-1983 : ISR (Intersecting Storage Rings) au CERN :

- le premier anneau double
- protons - antiprotons



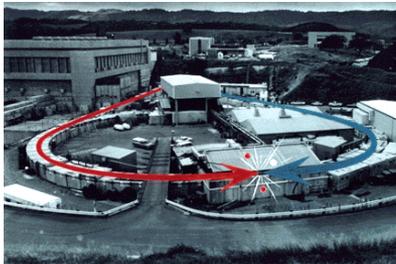
ISR : 31GeV  $P - \bar{P}$   
1972-1983

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Le collisionneur à anneau de stockage

Enorme succès des collisionneurs en physique fondamentale

Découverte du  $J/\psi$  au SPEAR-SLAC (4GeV  $e^+e^-$ ) par B. Richter et simultanément par Ting à BNL (prix nobel 1976).



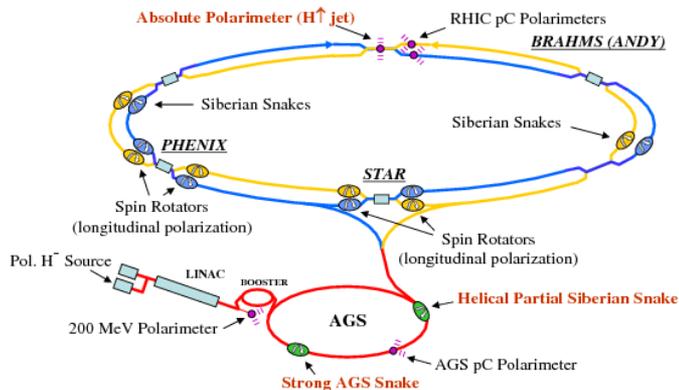
SPEAR-SLAC

Découverte du W et Z au CERN sur l'anneau  $p - \bar{p}$  par C. Rubbia et S. van der Meer (Nobel 1984)

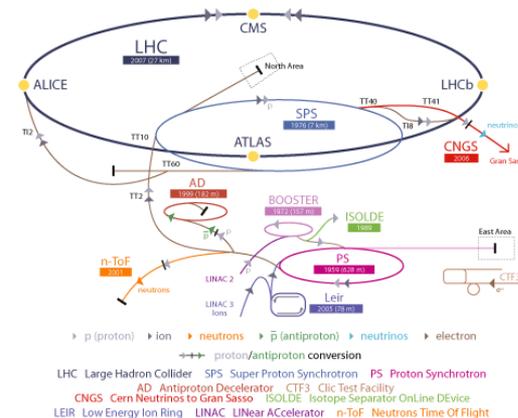


SPS-CERN 450GeV Protons C=7km

RHIC à BNL : P de 255 GeV et ions lourds jusqu'à 100GeV/u, C=3834m acc. supra



LHC au CERN : P à 7TeV et  $^{208}\text{Pb}$  à 2.75TeV, C=26.659km acc. supra.



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

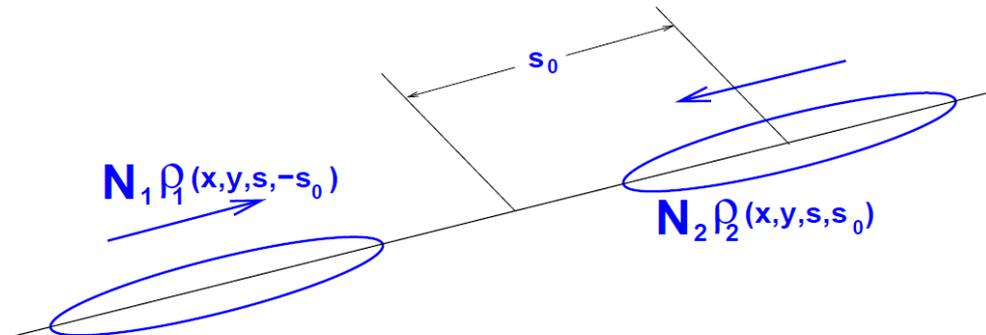
## ➤ La luminosité : un terme employé sur les anneaux de stockage

Le taux d'événement  $\frac{dN_{exp}}{dt}$  dans un collisionneur est proportionnel à la section efficace d'interaction  $\sigma_{exp}$  et le facteur de proportionnalité est la luminosité  $\mathcal{L}$  :  $\frac{dN_{exp}}{dt} = \mathcal{L}\sigma_{exp}$ .

$$\mathcal{L}(cm^{-2}s^{-1}) = f n \frac{n_1 n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \text{ avec : } \begin{cases} f = \text{la fréquence de révolution } \sim c/2\pi\rho = c/C \\ n = \text{le nombre de paquet dans l'anneau} \\ s = 4\pi \sigma_x \sigma_y \text{ la surface au point d'interaction} \\ n_1, n_2 = \text{le nombre de particules par paquet} \end{cases}$$

Ex: SPS ( $p, \bar{p}$ )  $\mathcal{L} = 6 \cdot 10^{30}$ , Tevatron ( $p, \bar{p}$ )  $\mathcal{L} = 10^{32}$ , LHC ( $p, p$ )  $\mathcal{L} = 10^{34} cm^{-2}s^{-1}$

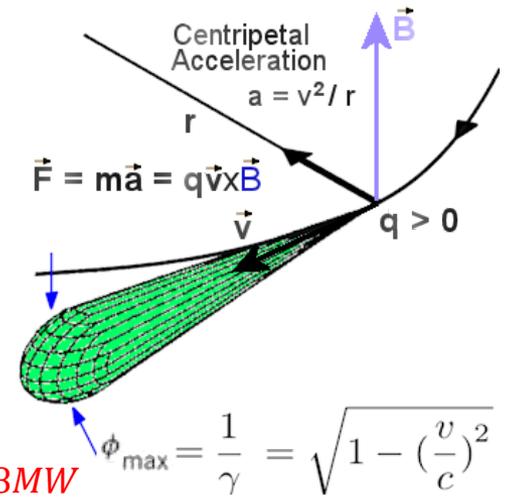
Il y a des limitations : les interactions dans le faisceau, le gaz résiduel



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## ➤ Le rayonnement synchrotron

Une particule chargée à une énergie relativiste se déplaçant dans un champ magnétique perd une fraction de son énergie par une émission de rayonnement



➤ Pour les électrons, l'énergie perdue par tour :  $U_0 = 8.85 \cdot 10^{-5} \frac{E_b^4}{\rho}$

LEP au CERN :  $E_b = 100\text{GeV}$  and  $\rho = 3026.42\text{m}$ ,  $U_0 = 2923\text{MeV}$ ,  $P_{\text{perdue}} = 18\text{MW}$

➤ Pour les protons :  $U_0 = 7.8 \cdot 10^{-18} \frac{E_b^4}{\rho}$ .

LHC au CERN :  $E_b = 7\text{TeV}$  et  $\rho = 2568\text{m}$ ,  $U_0 = 7.3\text{keV}$ ,  $P_{\text{perdue}} = 7.2\text{kW}$

□ Limite en énergie  $U_0 = E_b$ : pour le LEP  $E_c(e^-) \sim 325\text{GeV}$ , au LHC  $E_c(P) \sim 6905\text{TeV}$

- Pour faire simple : si Masse  $\searrow$  Rayonnement  $\nearrow$ , si E  $\nearrow$  Rayonnement  $\nearrow$
- L'énergie perdue est compensé par le système RF (cavité accélératrice)
- Les composants de l'anneau doivent pouvoir supporter la puissance dissipée
- Ce rayonnement est largement utilisé en recherche : SOLEIL, ESRF, SwissFEL ...

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

**Depuis 40 ans, complexification des installations d'accélérateurs pour augmenter l'énergie et l'intensité pas à pas (ex. Les grands synchrotrons CERN, RHIC, J-PARC)**

**Les LINAC et/ou RFQ sont les premiers étages (pour différentes raisons)**

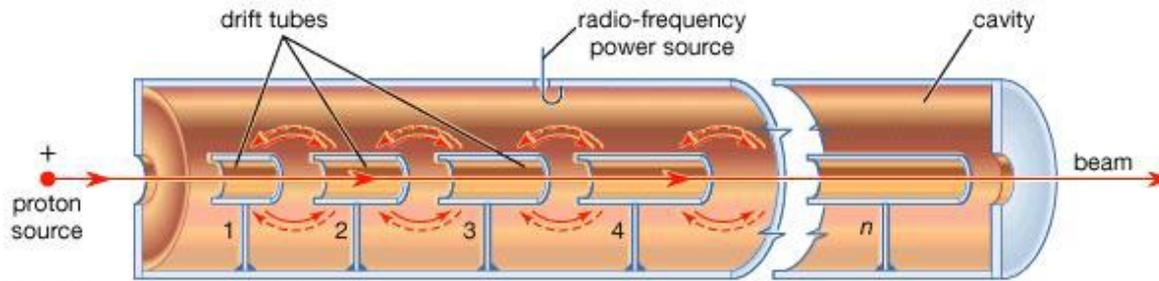
Longue éclipse des structures linéaires (type Wideröe) durant les années 1930

- ⇒ Progrès des technologies très hautes fréquences pendant la 2<sup>nd</sup>e guerre avec les radars
- ⇒ Nouvelles possibilités ouvertes pour les structures LINAC
- ⇒ 1946 Alvarez à Berkeley : LINAC protons à 32 MeV.
- ⇒ Structure de base des injecteurs protons et ions lourds pour les synchrotrons de 50MeV à 200MeV (particules non relativistes)

C'est le DTL (Drift Tube LINAC)

Alvarez (Berkeley 1946)

200MHz, P 4 to 32 MeV, L=12m

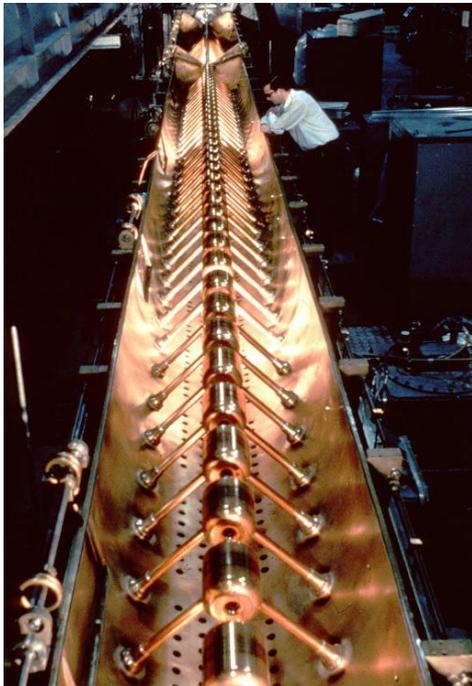


# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Le bestiaire des DTL

Conception simple et efficace. Employé aujourd'hui au CERN, SNS, Fermilab, J-PARC

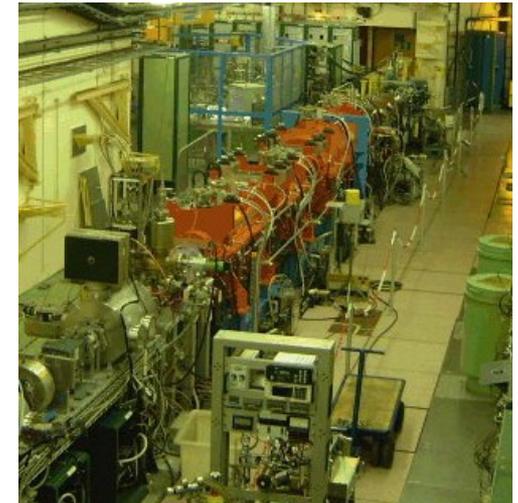
DTL LINAC 1, (CERN, 1958)  
202 MHz, P 50 MeV



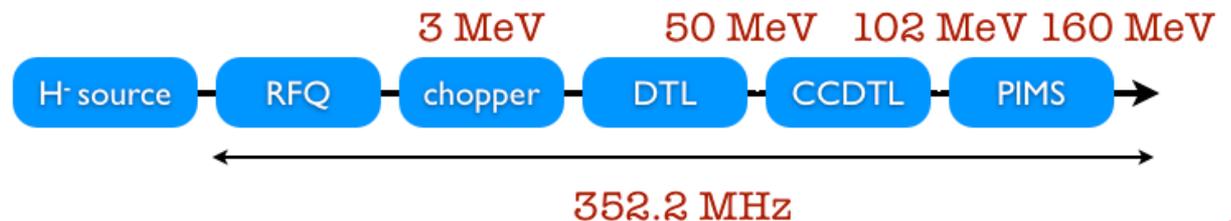
DTL LINAC 2, (CERN, en 1978), 202 MHz, P 50 MeV



DTL LINAC 3, (CERN, en 1994), 202 MHz,  $^{208}\text{Pb}^{53+}$   
4.2 MeV/u



Aujourd'hui : LINAC4 au CERN

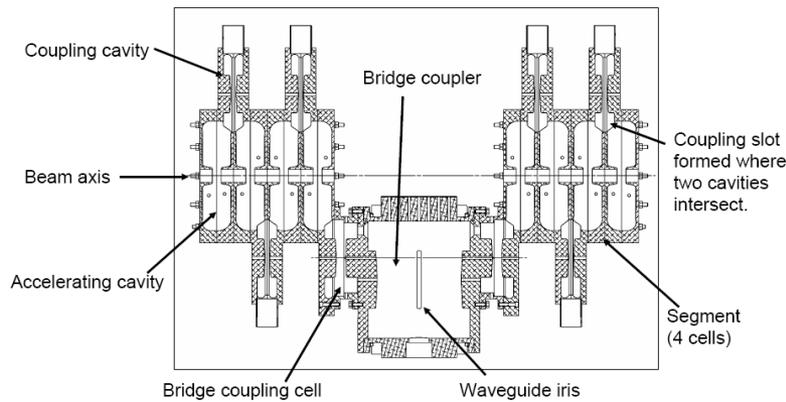


# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## Des configurations exotiques de LINAC

### ➤ Coupled Cavity LINAC or CCL (après 1960)

Cavités indépendantes avec un pont

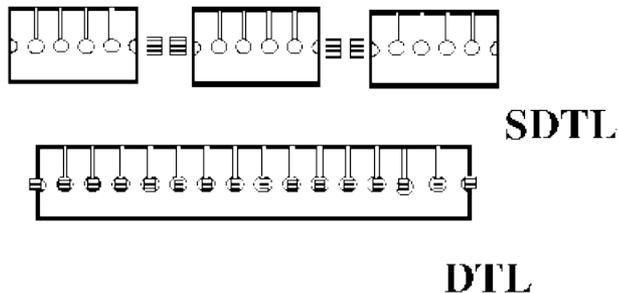


CCL at Fermilab : Protons  
116 à 400 MeV à 805 MHz



### ➤ Separated Drift Tube LINAC or S-DTL

Petits tanks et quadrupôles externes for  $20 < E < 200 \text{ MeV}$

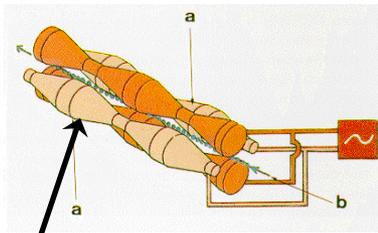
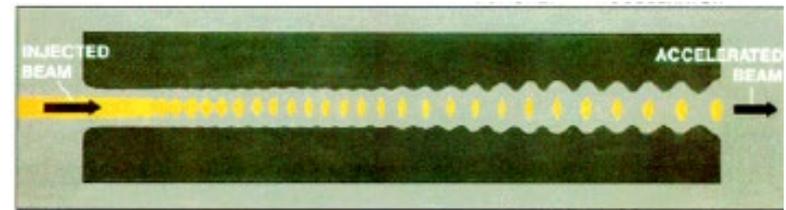


J-Parc: P 50 à 190MeV, 324MHz

# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## 1970 : l'ère du RFQ (radio-frequency quadrupole)

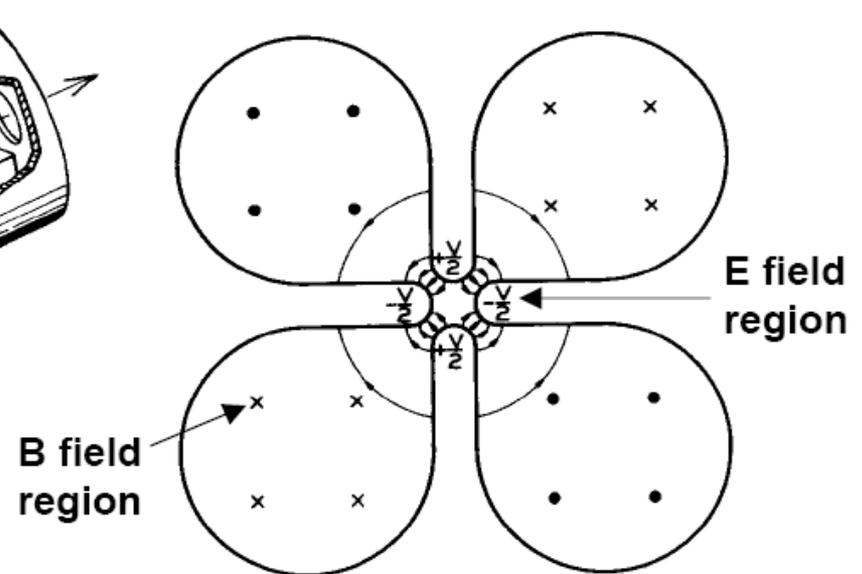
- Suggéré en 1970 par I. Kapchinski et V. Telyakov
- Pertinent à très basse énergie en remplacement des injecteurs type Cockcroft-Walton
- Combine la focalisation et l'accélération dans le même champ RF
- Employé pour mettre en paquet le faisceau ( $\beta < 0.1$ )



Rod=barre

Cavité

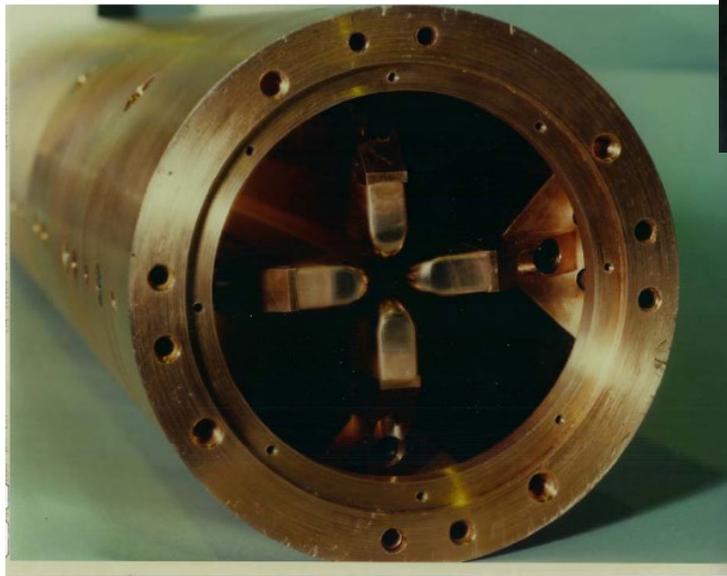
Vanne



# I- UNE HISTOIRE DES ACCÉLÉRATEURS

## 4-vanes RFQ

1<sup>er</sup> RFQ (Los Alamos, 1980) :  
p 30 mA, 100->640 keV, 425 MHz

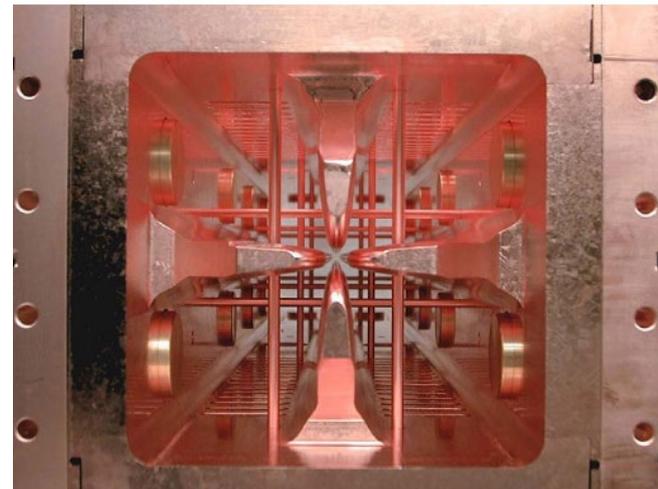


~15 cm

LEDA RFQ (Los Alamos, 1999) :  
P 100 mA CW, 0.75->6.7MeV, 350MHz, 8m

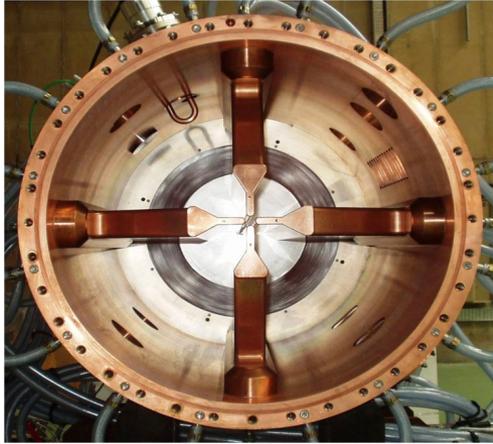


SNS RFQ :  
H-, 0.65->2.5 MeV, 402.5 MHz

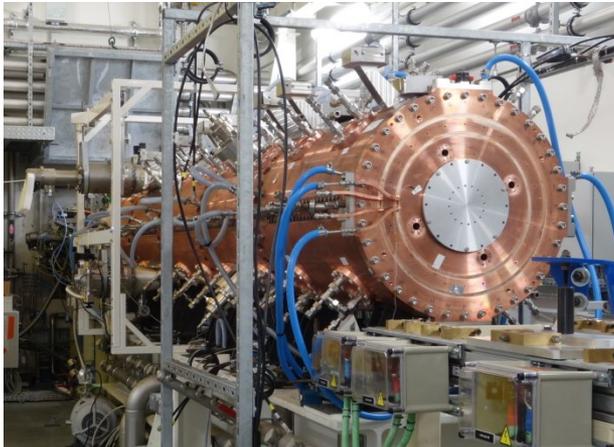


## 4-vanes RFQ en France

RFQ SPIRAL2 (GANIL) :  
0.02->0.75 MeV/u, 88 MHz



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



5MeV IPHI power

	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

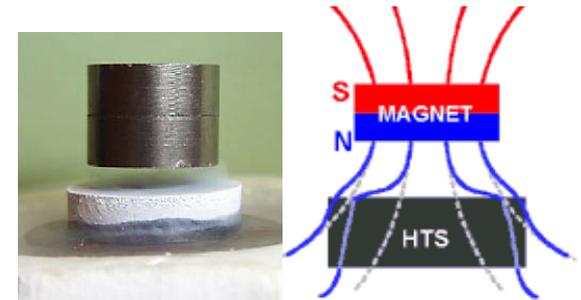
**D'autres conceptions de RFQ sont employées ou en développement**

## La supraconductivité dans les accélérateurs (cf. Patricia Duchesne)

L'utilisation de la supraconductivité dans les machines permet les énergies les plus élevées possible.

- Un métal supraconducteur est un métal dans lequel les électrons circulent sans résistance
- Pas de puissance dissipée par le flux de courant
- Les électrons du métal atteignent un état quantique particulier
- Apparition à très basse température (qq Kelvins)

Meissner effect



1911 : découverte de la supraconductivité

⇒ Long chemin de R&D pour son usage dans les cavités et aimants des accélérateurs

- 1977 : 1<sup>er</sup> LINAC supra à Stanford : 1.3GHz, 50MeV, 27m
- 1986 – 1992 : Machines supra avec des cavités à 5MV/m (CEBAF, LEP, HERA)
- Aujourd'hui, la plupart des cavités sont supra (SOLEIL, LHC, SNS, J-PARC ...)

**Accès à la haute intensité et grand cycle utile**



## Applications des accélérateurs

Les accélérateurs pour la recherche = 3% des machines

### Où sont ils alors ?

- Médical : diagnostics et traitements des cancers (électrons, X, protons, hadrons)
- La prospection des minerais et du pétrole avec la production de neutrons dans de petits accélérateurs
- Faisceaux de particules chargées pour le traitement des semi-conducteurs.
- Sources intenses de rayons X pour la stérilisation (médical et alimentaire)
- Faisceaux de particules chargées pour l'analyse en sciences des matériaux
- Production de radio-isotopes
- Datation
- Industrie
- Sécurité
- Armement

Application	Machines (2007)	nombre de ventes/year
Thérapie du cancer	9100	500
Ion implantation	9500	500
Découpe, soudure par e-	4500	100
Rayons X et irradiation e-	2000	75
Radioisotopes	550	50
Tests non destructifs	650	100
Analyse par faisceau d'ion	200	25
Génération de neutrons	1000	50
Total	27500	1400

## En résumé : quelles sont les types de machine dans nos environnements ?

- Machines électrostatiques (ex: spectrométrie de masse, irradiation): IJCLab, IP2IB, LPSC
- 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 (KeK), physique des particules
  - Machines à rayonnement synchrotron (SOLEIL, ESRF)
- Des linacs protons très forte puissance
  - ESS, IFMIF (irradiation, production de neutrons),
  - MYRRHA (réacteurs pilotés par accélérateurs)
- Des machines médicales
  - Cyclotron CPO, synchrotron CNAO, MedAustron, Heidelberg, Japon ...
- Des collisionneurs à ions ou protons : LHC et peut être FCC ou l'ILC
- Des tas de machines (ThomX, ELI, ERL ...)

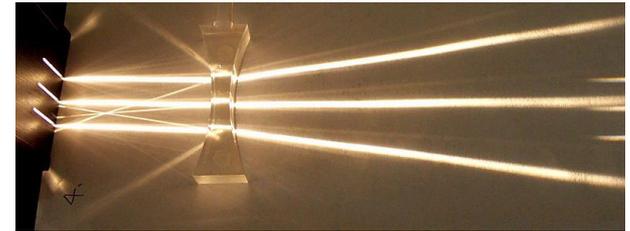
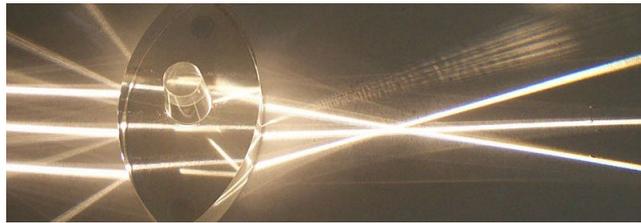
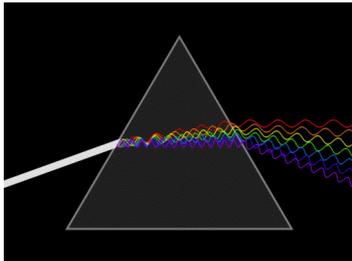
## En résumé : l'accélérateur, c'est pleins de sous-systèmes et donc pleins de compétences

- Une **source** de particules chargées: électrons, protons, ions, protons
- Des éléments d'**accélération** :
  - un tube accélérateur (machine électrostatique)
  - des cavités accélératrices haute fréquence (100MHz-3GHz)
- Des éléments de **guidage** :
  - Lentilles de focalisation (électrostatiques, quadrupôles électriques ou magnétiques)
  - des éléments de courbure (déflecteurs électrostatiques, dipôles magnétiques)
- Des **diagnostics** de faisceau : courant, de position, tailles (l'**électronique** associée)
- Des systèmes de **vide** plus ou moins poussé, mais toujours très propre
- Des **amplificateurs** de haute fréquence pour apporter l'énergie dans les cavités
- Un système cryogénique pour les éléments supraconducteurs
- Des “infrastructures”, des **bâtiments**, de la **sûreté**, du **contrôle commande** ...
- Et bien sur les utilisateurs : chercheurs, ingénieurs, industriels, médecins, police, armée
- .....

### Généralités

Analogie entre optique des faisceaux  $\Leftrightarrow$  optique géométrique

- Déflexion : rayons lumineux avec prismes  $\Rightarrow$  faisceaux avec aimants dipolaires
- Focalisation : rayons lumineux avec lentilles  $\Rightarrow$  faisceaux avec quadrupôles



- Approche équivalente de celle en optique corpusculaire
- Les structures sont conçues pour induire déflexion et focalisation des particules chargées
- Les fonctions de déflexion et de focalisation peuvent être séparées ou combinées
- Des systèmes électriques ou magnétiques sont placés autour de la trajectoire centrale
- Les systèmes assurent les dimensions transverses et longitudinales au faisceau

### Du magnétique ou de l'électrique ?

Un principe à gros trait :

- Magnétique à haute énergie (haut  $\beta$ )
- Electrique à basse énergie (bas  $\beta$ )

**Dans tous les cas, le choix est piloté par la faisabilité et les coûts !**

$$\text{De } \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0, \text{ on déduit : } \left| \frac{F_E}{F_B} \right| = \left| \frac{q \vec{E}}{q \vec{v} \times \vec{B}} \right| = \frac{|\vec{E}|_{V/m}}{\beta c_{m/s} |\vec{B}|_T}$$

On a :  $|\vec{E}|_{max} \sim 10^5 \text{ V/cm} = 10^7 \text{ V/m}$  pour des distances entre électrodes de qq centimètres

Donc pour  $\beta \sim 1$ , on a  $B = 0.03T$  et pour  $\beta = 0.01$ , on a  $B = 3T$ .

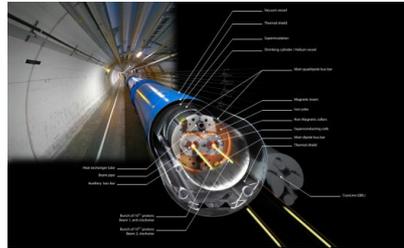
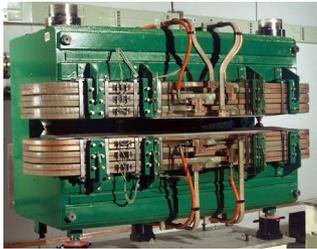
- Dans la plupart des machines circulaires, on utilise des électro-aimants à température ambiante (en fer) induisant  $|\vec{B}|_{max} \sim 1.8 \text{ T}$
- Dans les machines à très haute énergie ( $\beta \sim 1$ , ex LHC) en protons ou ions lourds, on utilise des aimants supraconducteurs avec des champs supérieurs à 10T

## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

### Des éléments pour guider le faisceau (voir cours de M.H. Stodel et Valerio Calvelli)

- Dévier, séparer les faisceaux : les aimants dipolaires ou les déflecteurs électrostatiques

T° ambiante



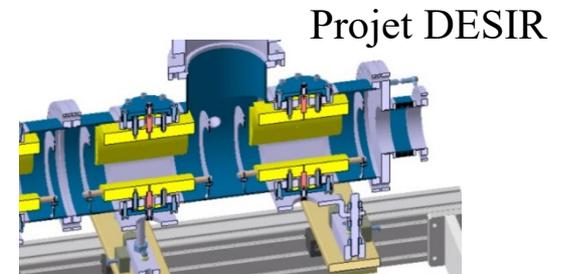
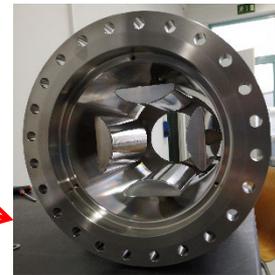
Supraconducteur  
Aimant au LHC  
 $\rho=2804\text{m}$ ,  $L=15\text{m}$   
 $N=1232$   
 $B\rho=23352.6\text{Tm}$   
 $B=8.33\text{T}$

- Le guidage : focalisation, défocalisation avec les quadrupôles



Magnétique  
SPIRAL2

Electrostatique



- Les corrections des erreurs et imperfections

Sextupôle



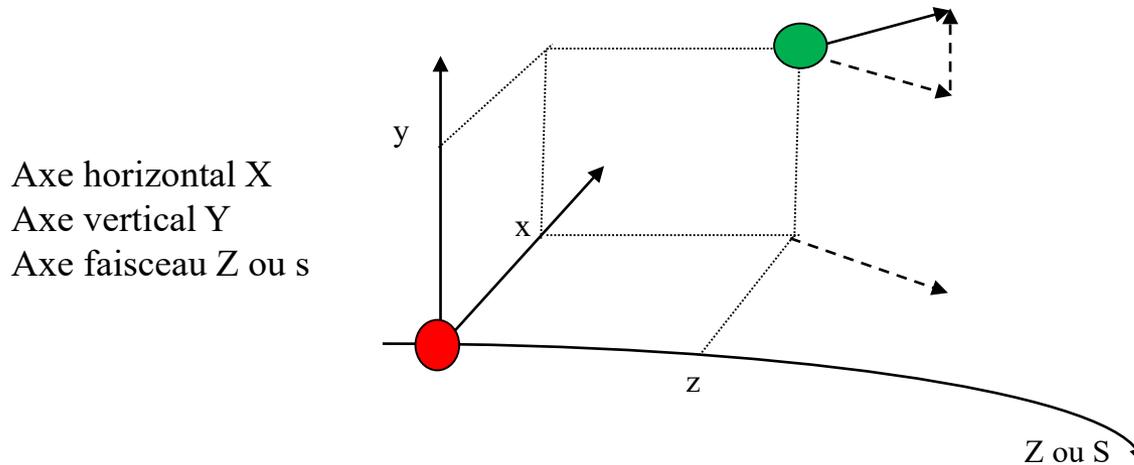
Multipole du  
HRS de  
DESIR



## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

### Mais un faisceau, c'est quoi ?

Un jeu de particules avec différentes conditions dans l'espace  $(x, x', y, y', z, z')$



Axe horizontal X  
Axe vertical Y  
Axe faisceau Z ou s

$x, y = \text{position}$

$x', y' = \text{divergence} = \frac{P_{x,y}}{P_z}$

$z = \text{phase, temps ou longueur}$

$z' = \frac{P - P_0}{P_0} = \text{l'énergie/moment}$

La particule **rouge** est celle qui se balade centrée dans le jeu  $(x_0, x_0', y_0, y_0', z_0, z_0')$

La particule **verte** est celle qui se balade ailleurs  $(x, x', y, y', z, z') \neq (x_0, x_0', y_0, y_0', z_0, z_0')$

Et il peut ne pas y avoir qu'une particule rouge et verte mais pleins d'autres qu'on ne pourra pas distinguer individuellement.

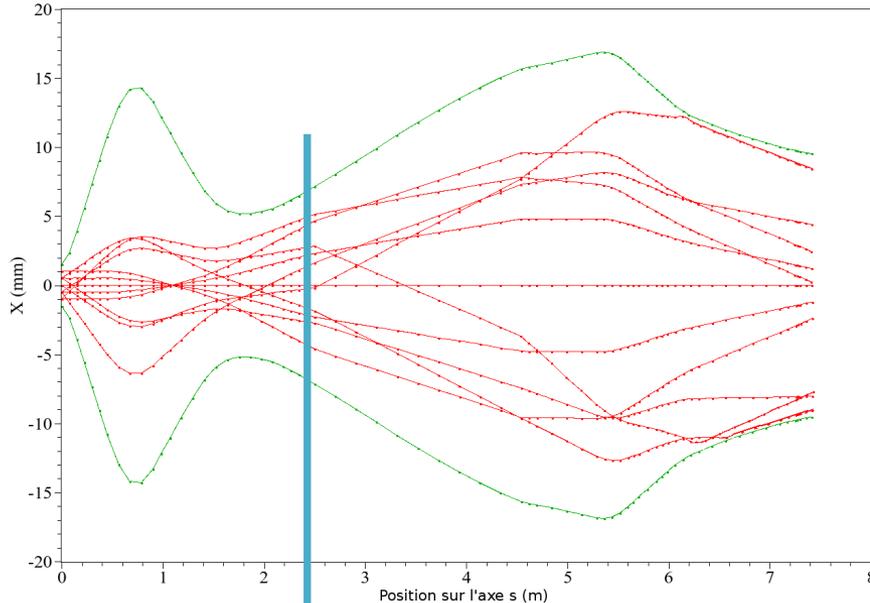
Elles peuvent aussi interagir entre elles ! **Aie, ça complique.**

Dans tous les cas, on est avec  $x, x', y, y'$  petits  $\Rightarrow$  Conditions de Gauss

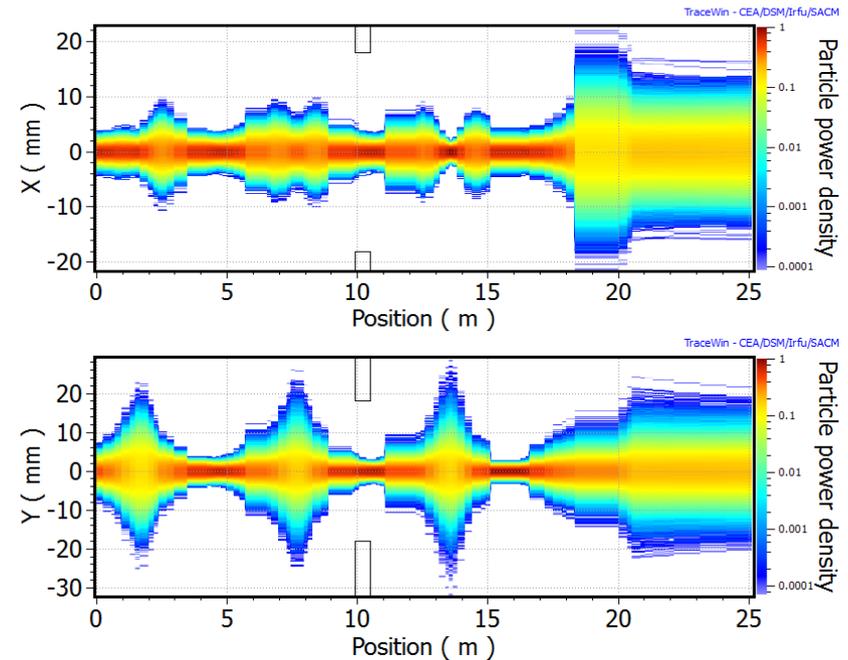
## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

### Mais un faisceau, c'est quoi ?

- Le transport de particules est ce qu'il arrive à cet ensemble de particules le long d'une ligne (la vie **des trajectoires**)
- Si on regarde de loin toutes ces trajectoires, on voit une **enveloppe**.



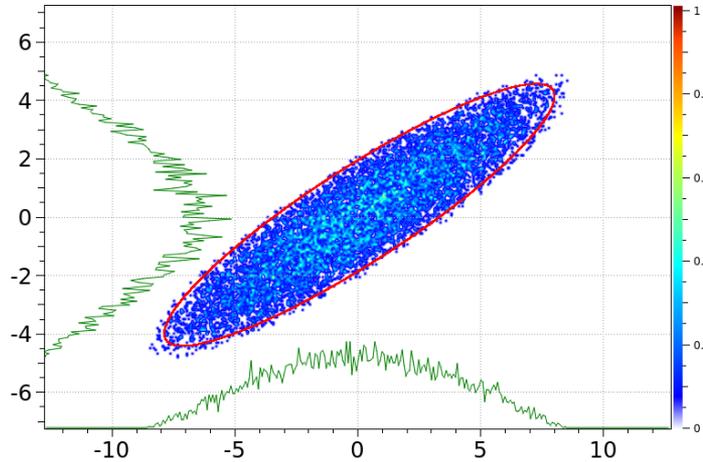
Stoppons là et regardons  
comment se répartissent  
les particules



## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

Mais alors l'émittance dans tout ça !

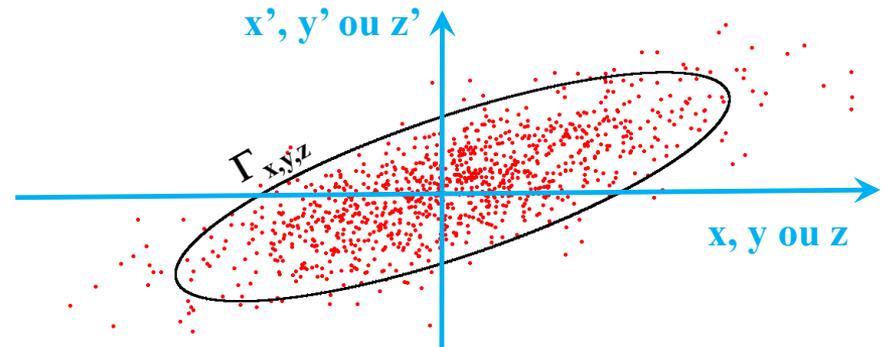
La répartition  
peut être



Chaque particule du faisceau a un point dans l'espace des phases  $(x, x')$ ,  $(y, y')$  et  $(z, z')$

- Dans chaque plan, la surface occupée par toutes les particules définit l'extension de phase ou l'émittance du faisceau
- Dans le cas général, l'espace de phase complet est de 6 dimensions  $(x, x', y, y', z, z')$

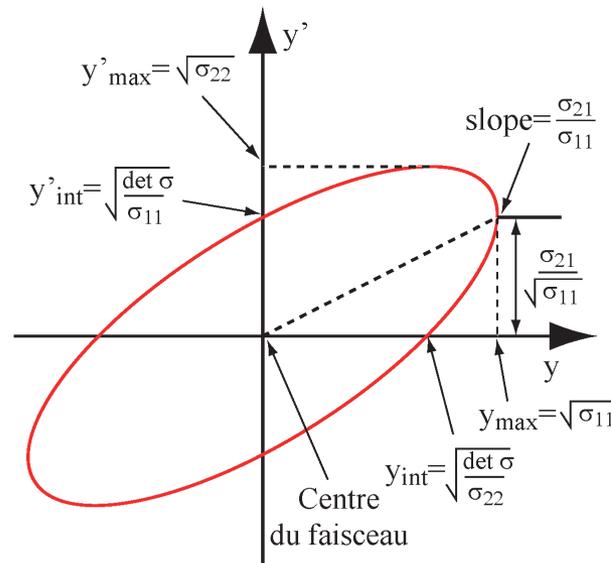
- On définit les courbes  $\Gamma_{x,y,z}$  contenant les particules
- Il existe une loi de transformation durant le mouvement (dit théorème de Liouville)



## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

**Mais alors l'émittance dans tout ça !**

- Les courbes  $\Gamma_{x,y,z}$  sont des ellipses :  $\gamma_y y^2 + 2\alpha_y y y' + \beta_y y'^2 = \frac{\varepsilon_y}{\pi}$  avec  $y = x, y$  ou  $z$
- $\varepsilon_y$  est la surface de l'ellipse
- $\alpha_y, \beta_y, \gamma_y$  sont les paramètres de Twiss avec  $\beta_y \gamma_y - \alpha_y^2 = 1$



On aime bien connaitre expérimentalement ce genre de chose

### Le théorème de Liouville

On introduit l'émittance normalisée :

$$\varepsilon^* = \beta\gamma\varepsilon = \text{constante (gnnn, ici } \beta\gamma \text{ c'est Lorentz pas Twiss)}$$

$\varepsilon^*$  ne varie pas avec l'énergie,  $\varepsilon$  est l'émittance géométrique

- La densité de particules dans l'espace de phase est constante au cours du mouvement
- La surface (l'émittance  $\varepsilon^*$ ) est conservée

Donc :

- L'émittance  $\varepsilon_{x,y}$  diminue avec l'accélération
- L'émittance  $\varepsilon_{x,y}$  n'est jamais nulle (il y a forcément plusieurs particules hein ?)
- La taille et divergence d'un faisceau ne peuvent être nulles

### Et les unités dans tout ça ?

- Dans le SI,  $\varepsilon$  est exprimé en mètre.radians
- Selon la machine, on va parler en mm.mrad, nm.rad microm.rad ... il faut juste être capable de faire la gymnastique
- Sans parler que les gens bien souvent ne précisent pas le nombre d'écart type pour l'émittance et c'est valable même d'un labo à l'autre !

## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

### Et dans la vraie vie ! (voir cours Nicolas Delerue)

Il existe différentes solutions pour la mesure

- Purement par réglage des éléments de réglage amont : méthode des gradients, méthodes 3 profils
- Avec un diagnostic dédié : « pepper-pot » ou scanner-allison (cf cours N. Delerue)

- On mesure :  $\sigma_{x,y}, \sigma_{x',y'}, \sigma_{xx',yy'}$

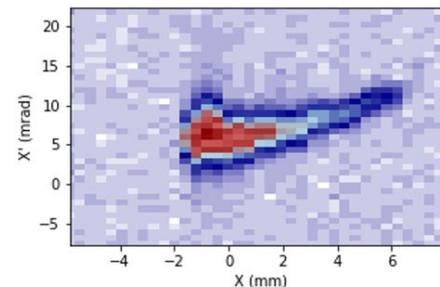
- On détermine alors :

$$\varepsilon_{RMS,x} = \sqrt{\sigma_x^2 \times \sigma_{x'}^2 - \sigma_{xx'}^2}$$

$$\beta_x = \frac{\sigma_x^2}{\varepsilon_{RMS}} \quad \text{et} \quad \gamma_x = \frac{\sigma_{x'}^2}{\varepsilon_{RMS}}$$

Même chose dans le plan vertical

Mais ce n'est pas toujours facile !  
Ex: mesure sur le HRS pour le projet DESIR



- Mais les gens précisent rarement le nombre d'écart type ( $k$ ) pour les valeurs d'émittance et c'est valable même d'un labo à l'autre !

$$\varepsilon = k \cdot \varepsilon_{RMS}$$

### La vie du faisceau dans les structures => l'optique ou la dynamique faisceau

Théoriquement : on simplifie les aspects grandement

- On prend l'équation du mouvement :  $\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$
- On se souvient de l'équation de Lorentz :  $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$
- On se dit que s'il n'y a pas de  $\vec{E}$ , on s'embrouillera moins mais que le principe restera le même
- Avec seulement le champ magnétique  $\vec{B}$ , on fait un développement de Taylor sur x, y et z, on néglige tous les termes supérieurs à 1. Attention, ça peut faire mal aux yeux !!
- On résout tout ce bazar en ne gardant que les termes de premier ordre (optique de Gaus)
- Après avoir bien transpiré, on détermine les équations du mouvement (Hill pour faire chic)

.....

### La vie du faisceau dans les structures => l'optique ou la dynamique faisceau

Au premier ordre, les mouvements du plan horizontal et vertical sont indépendants :

$$\text{Equations de Hill : } x'' + K_x(z)x = h\delta = f(z) \text{ et } y'' + K_y(z)y = 0$$

- Pour un aimant à indice (ex. PS au CERN) :  $K_x(z) = (1 - n)h^2$  et  $K_y(z) = nh^2$   
où  $n = -\frac{1}{hB_{y0}} \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} \right)_0$
- Pour un aimant dipolaire  $n = 0$ , :  $K_x(z) = h^2$  et  $K_y(z) = 0$
- Pour un quadrupôle  $K_x(z) = \frac{G}{B\rho}$  et  $K_y(z) = -\frac{G}{B\rho}$  avec  $G = -nh^2B\rho$  et  $[G] = [-nh^2B\rho] = m^{-2}Tm = T/m$
- Pour une zone sans champ (drift) :  $K_x(s) = K_z(s) = 0$  et  $x'' = z'' = 0$

$$h = \frac{1}{\rho} = \frac{q}{P_0} B_{y0}(z) \text{ (rappel : } B\rho = P/q)$$

Et c'est là qu'on sait qu'on a perdu le public !

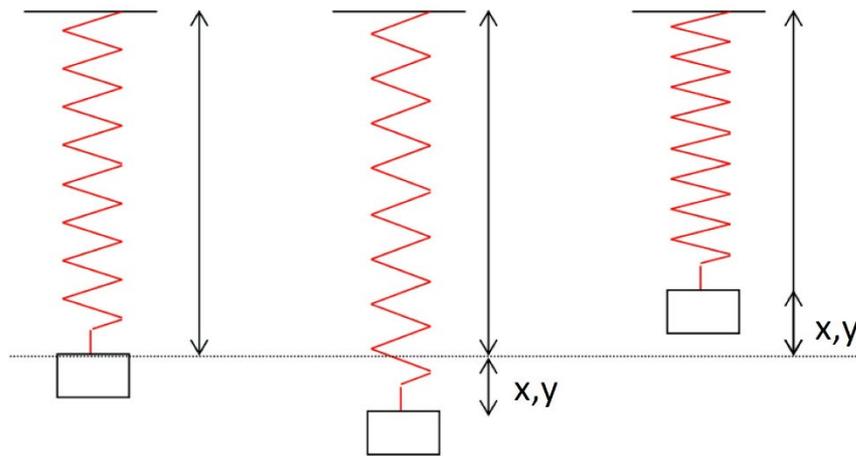
## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

La vie du faisceau dans les structures => l'optique ou la dynamique faisceau

Au premier ordre, les mouvements du plan horizontal et vertical sont indépendants :

$$\text{Equations de Hill : } x'' + K_x(z)x = h\delta = f(z) \text{ et } y'' + K_y(z)y = 0$$

Problème compliqué résolu en un problème plus simple : oscillateur harmonique



Solutions connues (vrai pour x et y)

$$\begin{aligned} y(z) &= y_0 \cos(\sqrt{K_{y0}}z) + y'_0 / \sqrt{K_{y0}} \sin(\sqrt{K_{y0}}z) \\ y'(z) &= -\sqrt{K_{y0}}y_0 \sin(\sqrt{K_{y0}}z) + y'_0 \cos(\sqrt{K_{y0}}z) \end{aligned} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} y(z) \\ y'(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{K_{y0}}z) & \sin(\sqrt{K_{y0}}z) / \sqrt{K_{y0}} \\ -\sqrt{K_{y0}} \sin(\sqrt{K_{y0}}z) & \cos(\sqrt{K_{y0}}z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}$$

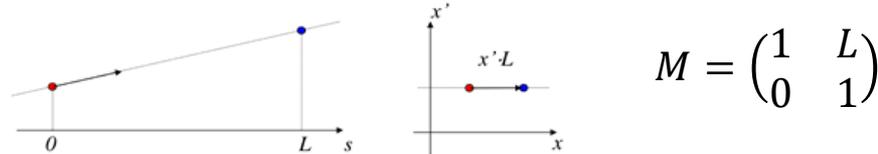
## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

### La vie du faisceau dans les structures => l'optique ou la dynamique faisceau

Chaque élément décrit par une matrice de transformation

#### Zone sans champ ou Drift

$L$  la longueur



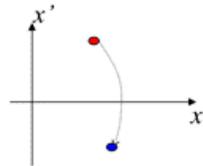
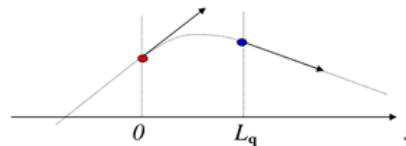
#### Quadrupole

$B_x = Gy$  et  $B_y = Gx$

$L_q$  la longueur

$G(T/m)$  le gradient

$K = qG/P$  la force

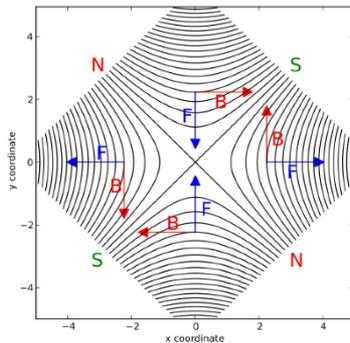


$K > 0$  focalisation

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{K_{y0}}z) & \sin(\sqrt{K_{y0}}z)/\sqrt{K_{y0}} \\ -\sqrt{K_{y0}} \sin(\sqrt{K_{y0}}z) & \cos(\sqrt{K_{y0}}z) \end{pmatrix}$$

$K < 0$  défocalisation

$$M = \begin{pmatrix} \cosh(\sqrt{|K_{y0}}|z) & \sinh(\sqrt{|K_{y0}}|z)/\sqrt{|K_{y0}}| \\ \sqrt{|K_{y0}}| \sinh(\sqrt{|K_{y0}}|z) & \cosh(\sqrt{|K_{y0}}|z) \end{pmatrix}$$



⇒ Le quadrupole focalise dans un plan et défocalise dans l'autre

## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

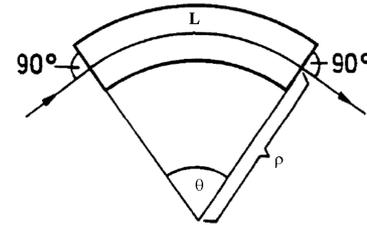
### La vie du faisceau dans les structures => l'optique ou la dynamique faisceau

#### Dipôle

$L$  la longueur magnétique,  $\rho$  Le rayon de courbure, angle de rotation  $\theta = \frac{L}{\rho}$

Aimant **secteur**

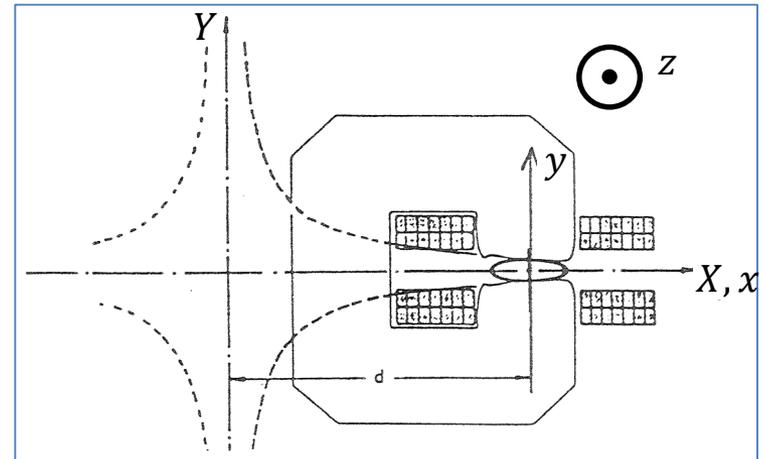
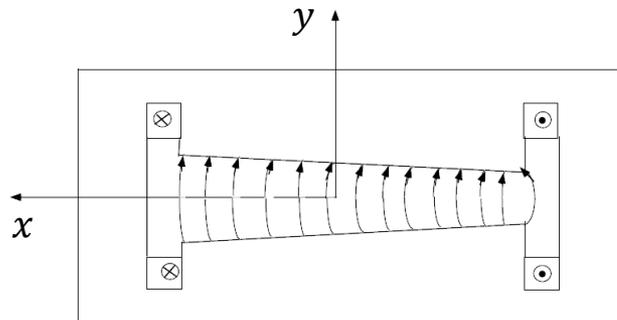
$$T_x = \begin{pmatrix} \cos \theta & \rho \sin \theta & \rho(1 - \cos \theta) \\ -\sin \theta / \rho & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } T_y = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Aimant à **fonction combiné** (ex. PS au CERN) :

$$n = -\frac{1}{hB_{y0}} \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} \right)_0 \neq 0 \text{ mais attention au signe de } n !$$

- $n \leq 0$  : focalisant en horizontal , défocalisant en vertical
- $0 < n < 1$  : focalisant en horizontal et vertical
- $n \geq 1$  : défocalisant en horizontal et focalisant en vertical

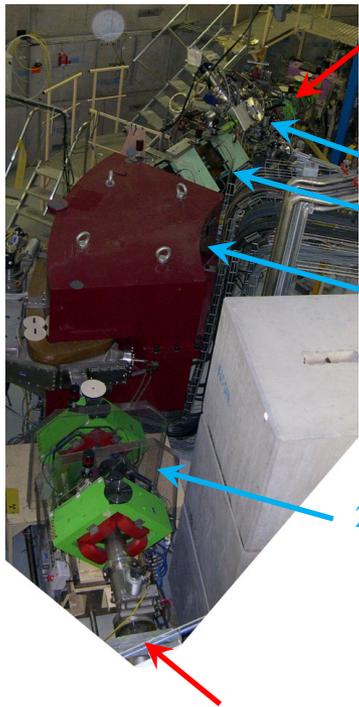


## II- TRANSPORT DES FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGÉES

La vie du faisceau dans les structures => l'optique ou la dynamique faisceau

Principe de base du spectromètre

Le spectromètre LISE à GANIL



Faisceau primaire

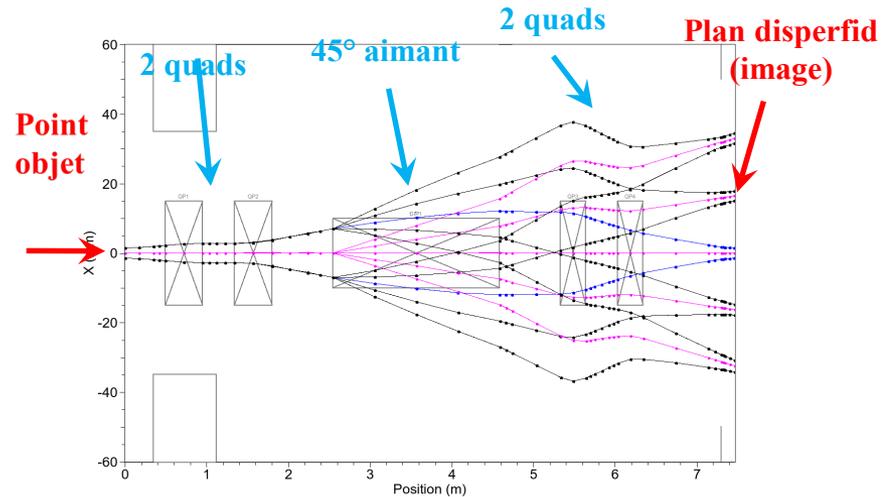
Cible (objet)

2 quadrupôles

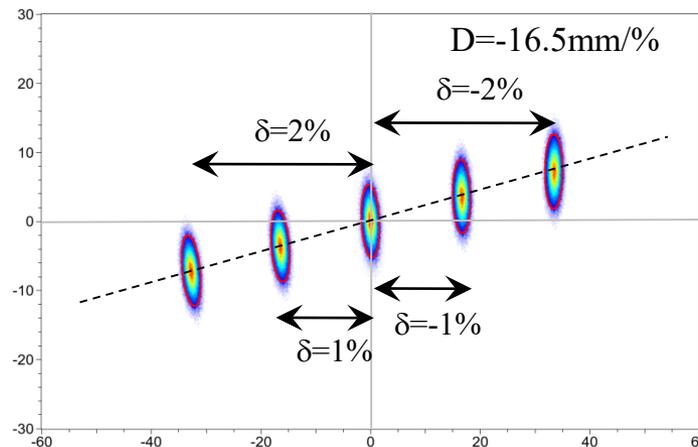
Aimant 45°

2 quadrupôles

Plan dispersif (image)



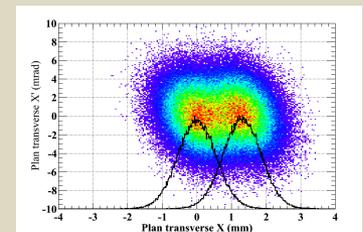
Chaque tâche peut être un faisceau secondaire produit dans la cible avec  $\delta = 1\%$



Résolution :

$$R = \frac{\Delta P}{P} = \frac{G \times \text{Largeur}_x}{D}$$

$$R_{LISE} \sim 0.01\%$$



---

MERCI POUR  
VOTRE ATTENTION