

# Des Accélérateurs de particules, vers les détecteurs à la mesure



C'est une introduction: Nous n'allons qu'égratigner la surface des accélérateurs et des diagnostics associés.

C'est une tentative pour vous donner une vue assez large.  
Les ingrédients de ce cours viennent d'un grand nombre de références et cours spécialisés.

Par définitions, ce cours est partial, incomplet et imparfait donc n'hésitez pas à poser des questions



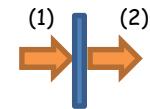
- Un grand merci à
  - mes collègues (P.Ausset, J.M. Conto, N.Delerue, E.Baron, A.Mueller,...)
  - aux membres du Réseau Instrumentation Faisceau (voir slide à la fin)
  - Nicolas Delerue (IJCLab) - et ses nombreuses informations et partage d'un cours « diagnostics » qu'il fait.

# Quelques références - Diagnostics:

- P.Strehl, “Beam Instrumentation and Diagnostics”, Springer-Verlag, Berlin 2003
- M.G. Minty, F. Zimmerman, “Measurement and Control of charged Particle Beams”, Springer-Verlag, Berlin 2006
- P.Forck, “Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics”, JUAS 2009
- M. Gasior et al, “Introduction to Beam Instrumentation and Diagnostics”, CERN-2014-009
- P.Ausset “Diagnostics pour Faisceau”, Benodet 2016
- J.M. Conto “Accélérateur de particule”, Benodet
- N.Delerue “Introduction aux Diagnostics pour acc.”, DU2I
- Et voir dans les slides

# But des Accélérateurs: Produire un faisceau

- Les accélérateurs produisent et accélèrent un **faisceau de particules élémentaires ou d'ions**:
  - Qui se déplacent globalement dans la même direction (et qui peuvent acquérir une grande énergie cinétique) selon axe longitudinal  $s$  (ici ou  $z^*$ )
  - **Faisceau Premier** <sup>(1)</sup>, est constitué de **particules ou ions chargés**:
    - Electrons
    - Ions légers: Protons, antiprotons
    - Ions lourds (de l'hydrogène (deutérium) aux ions uranium)
  - **Faisceau Secondaire** <sup>(2)</sup>: faisceau généré à partir du premier
    - neutre par exemple de photons, neutrons, neutrinos
    - ou autres particules (positrons, muons, anti-particule, ions)
- Le faisceau peut-être délivré <sup>(transporté)</sup> de plusieurs manières:
  - **Flux continu** d'une source de courant continue (CC ou DC en anglais). Le faisceau n'a pas de structure temporelle
  - **Paquets**: Le faisceau est **sous divisé en petit paquet** (bunch) constitué par les particules. Ces paquets peuvent être délivré sans interruption.
  - **faisceau pulsé**: Les paquets sont interrompus de manière périodique.
- Pourquoi produire des faisceaux?
  - **Science** → pour « sonder »
  - **Applications**



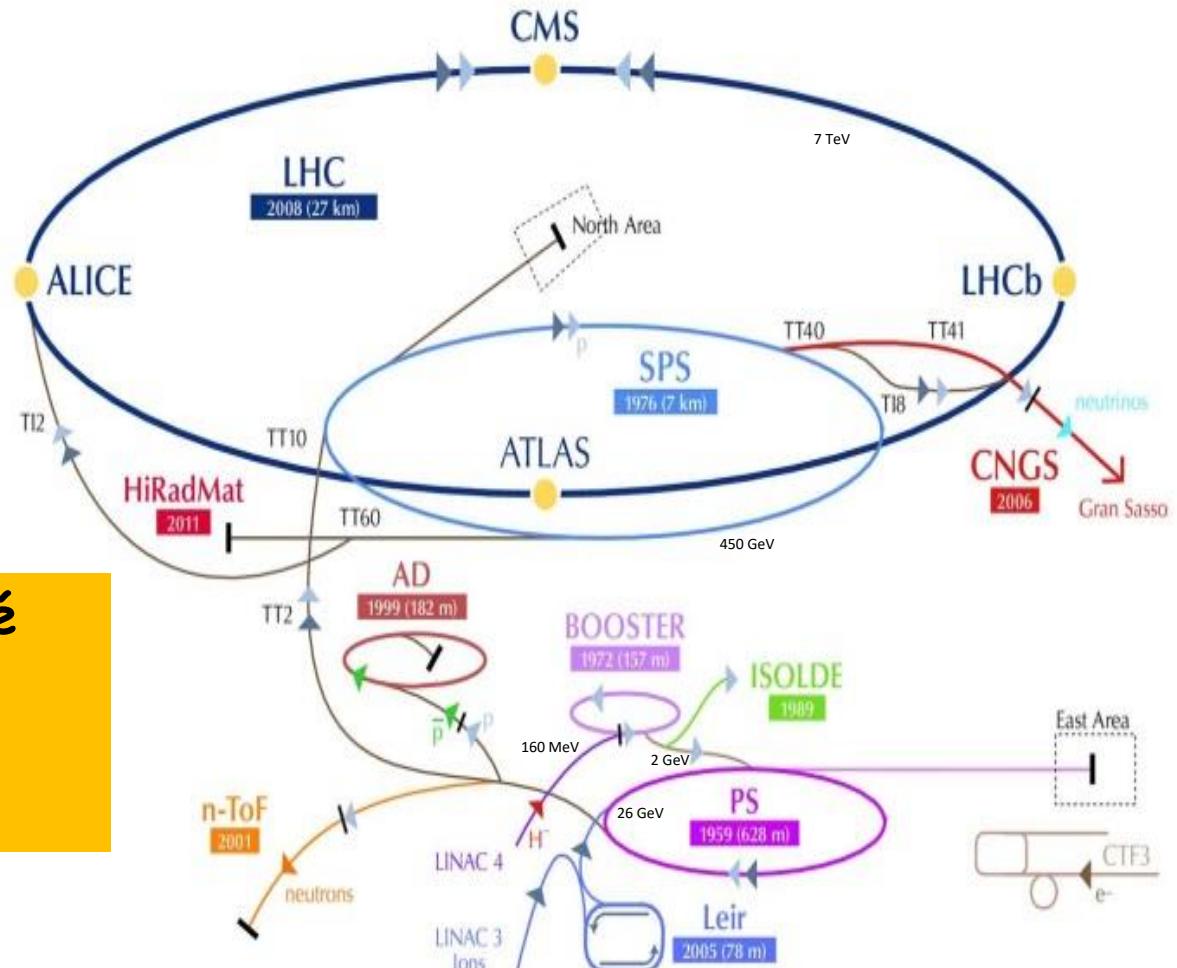
<sup>\*</sup>z pour l'axe local, pour les accélérateurs on utilise souvent la référence de la trajectoire des particules dans l'accélérateur soit l'axe  $s$  (voir aussi plus tard)

# Eléments d'un accélérateur

Schema de base:



La section  
"accélérateur" peut  
être très **complexe**



Peu importe la complexité  
de l'accélérateur, il a  
toujours des **composants**  
**clés**

# Eléments d'un accélérateur

Schema de base:



Un accélérateur moderne comprends les éléments principaux suivant:



- Elément d'accélération
  - Electrodes, Tube ou cavité radiofréquence (RF) créant un champ électrique qui augmente l'énergie des particules du faisceau
- Une source de particule chargée (électrons; protons; ions lourds, plus spécifique: positrons, anti-protons & muons)
- Eléments de Guidage du faisceau
  - Principalement magnétique pour maintenir la taille du faisceau, pour définir la trajectoire et orbite (champs magnétiques larges eg cyclotrons, ou plus petits eg Quadripôles, dipôles, solénoïdes,...)
- Système auxiliaire, particulièrement le « vide », les « diagnostics », sources de puissance (RF) et refroidissement (eg usine cryogéniques) ou des systèmes d'alignement, commande et contrôles, ...
  - Un vide de bonne qualité sera nécessaire par exemple pour éviter la diffusion (éclatement) du faisceau face à du gaz résiduel (molécules).
  - Les diagnostics permettent de vérifier les caractéristiques du faisceau (trajectoire, taille, énergie, ....)
- Installation Utilisateurs
  - Celles-ci sont des montages expérimentaux qui peuvent inclurent détecteurs, cibles, spectromètres, patients,...
  - Cas particuliers: Faisceau secondaire produit par une réaction nucléaire (exemple neutrons) ou par un processus électromagnétique (exemple: photons créés par Bremsstrahlung (rayonnement de freinage) ou rayonnement synchrotron)

# Quelques applications

## Thérapie



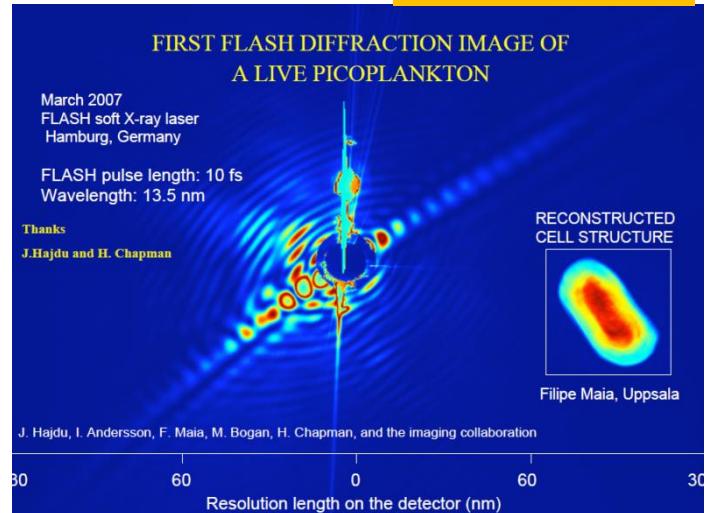
Ex en France: CPO d'Orsay, CAL de Nice

## Réaction de Spallation: neutron

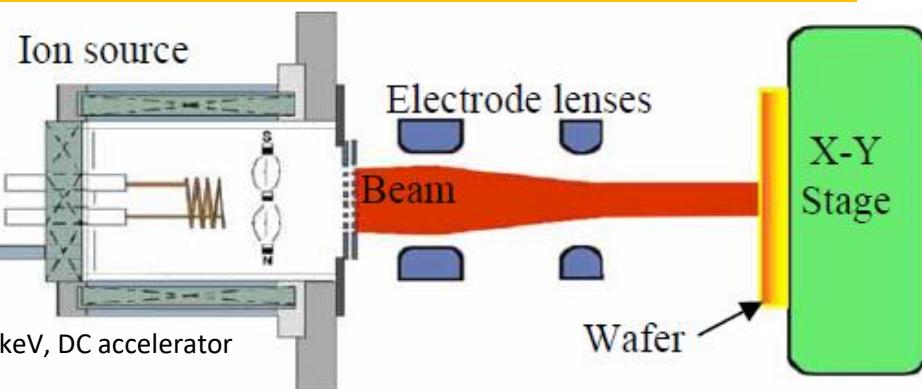


Ex en Europe: ESS de Lund (Suède) avec une cible en tungstène.

## EU-XFEL

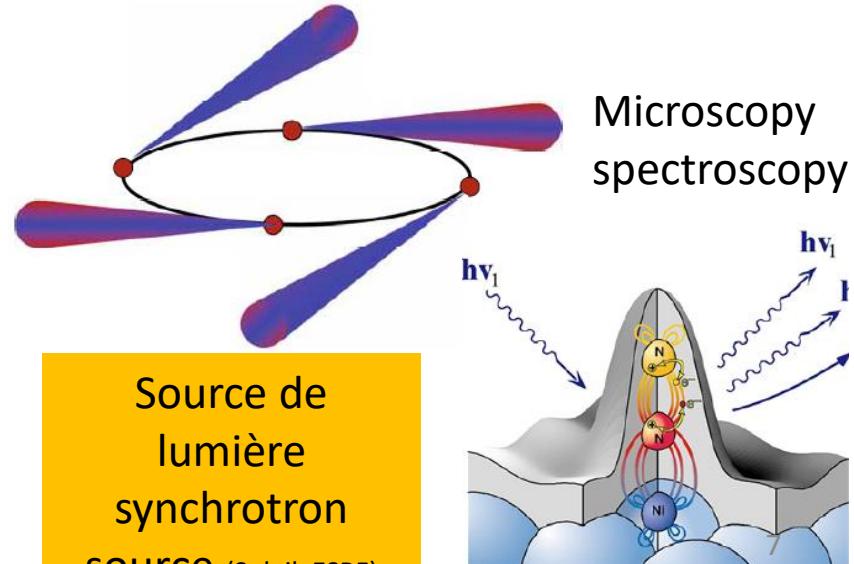


## Implantation ionique tranche de Si: doping

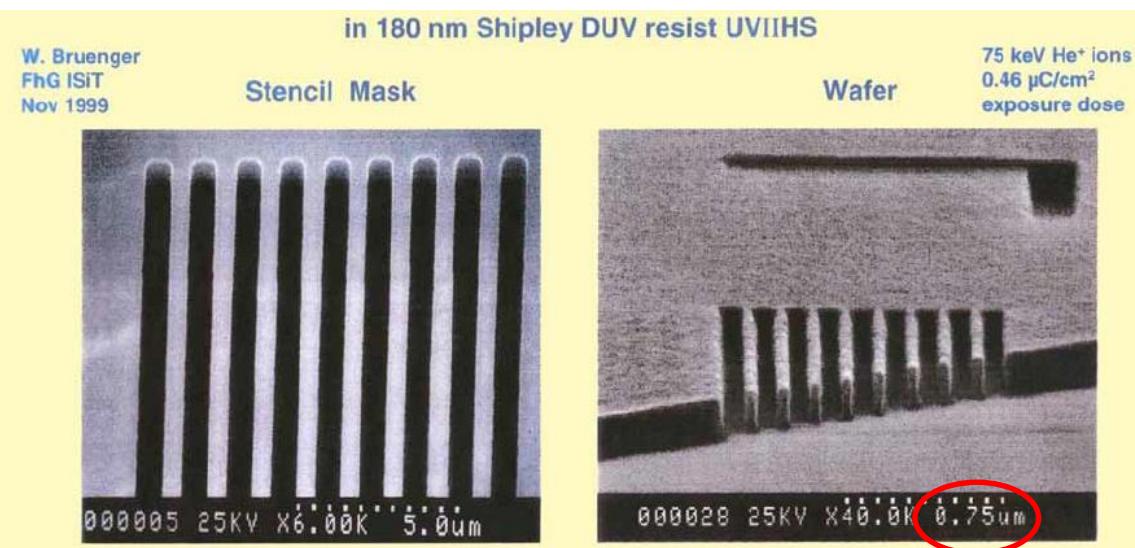


→ Ecran plat, électronique à haute densité

## Source de lumière synchrotron source (Soleil, ESRF)



# Quelques applications



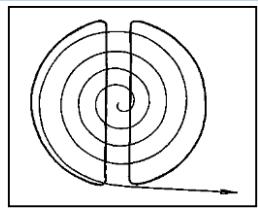
lithographie par faisceau d'ion  
→ création de structure  
nanométrique

Pour référence, pour la photolithographie (qui utilise des photons sur des masques qui peuvent être créé par la lithographie électronique). La puissance employée est radicalement réduite avec ces distances (moitié) entre élément du CPU (commercial)\*:

- TSMC (2014): 20nm iPhone 8
- TSMC (2015): 13.5 nm
- TSMC (2018): 7 nm – iPhone 12 (2019)
- TSMC (2022): 3 nm – iPhone 16 (2024)

Réduction à 750 nm ici

## Production de radionucléides pour la thérapie et l'imagerie



Accélération



Patient



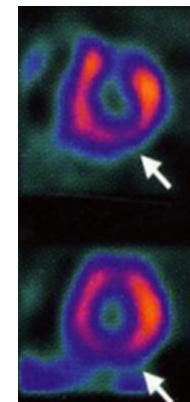
Elément  
radioactif  
médical



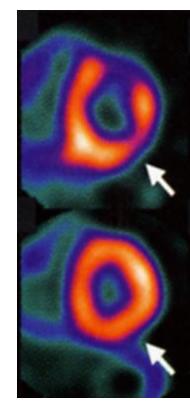
Extraction chimique  
Séparation  
Purification  
Marquage

ARRONAX

## Imagerie tomographique du cœur



<sup>99</sup>Tc-MIBI  
SPECT



<sup>82</sup>Rb-PET

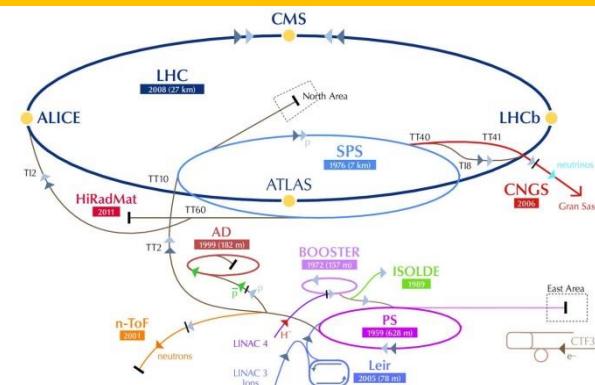
# Applications- Big science

A la chasse à la nouvelle physique eg créant des particules qui ne sont pas accessible facilement (que dans un environnement contrôlé).

Physiques des particules

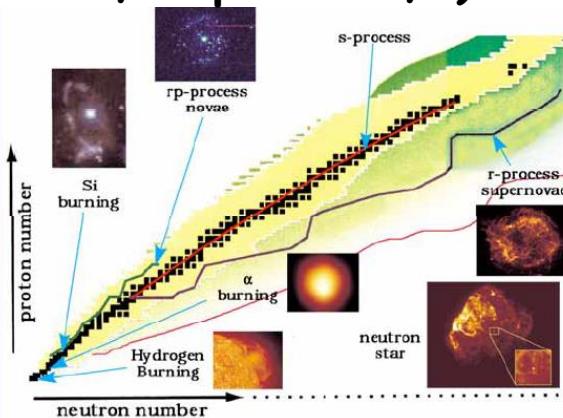


Complexe du LHC - découverte du Higgs, recherche en super symétrie,...

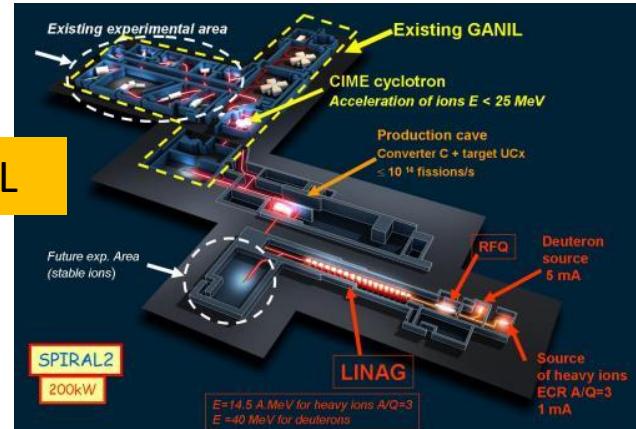


Explorer la structure nucléaire et les réactions loin des régions de stabilité des noyaux → eg Participation du noyau dans les évènements Astrophysiques (éruption rayon-X, SuperNova, ...)

Physique nucléaire



GANIL



# Utilisation des Accélérateurs

- **Médical**
  - Production d'isotope radioactif (diagnostics/imageries et thérapies)
  - Diagnostics rayon-X
  - Thérapie rayon-X et électron
  - Thérapie avec des particules chargées (proton, C,...)
- **industrie**
  - soudure
  - Diagnostics rayon-X
  - Implantation d'ions (semi-conducteurs, durcissement de surface)
  - Analyse de matériaux (structure, composition)
  - Modification des matériaux; structures des pneus, nettoyage aliments
  - Sécurité & Défense, et l'environnement (nettoyage des gaz/liquides)
- **science**
  - Physique des particules
  - Physique nucléaire
  - Physique de la matière condensée
  - Science des matériaux
  - Biochimie, Biologie
  - Archéologie, Patrimoine

# "An accelerator is as good as its diagnostics"

Pour tous ces accélérateurs, il faudra des instruments pour pouvoir observer ce qu'il s'y passe, afin:

de mettre en route

De régler les différents systèmes

de maintenir les performances de l'accélérateur



d'adapter à la demande

d'optimiser les faisceaux

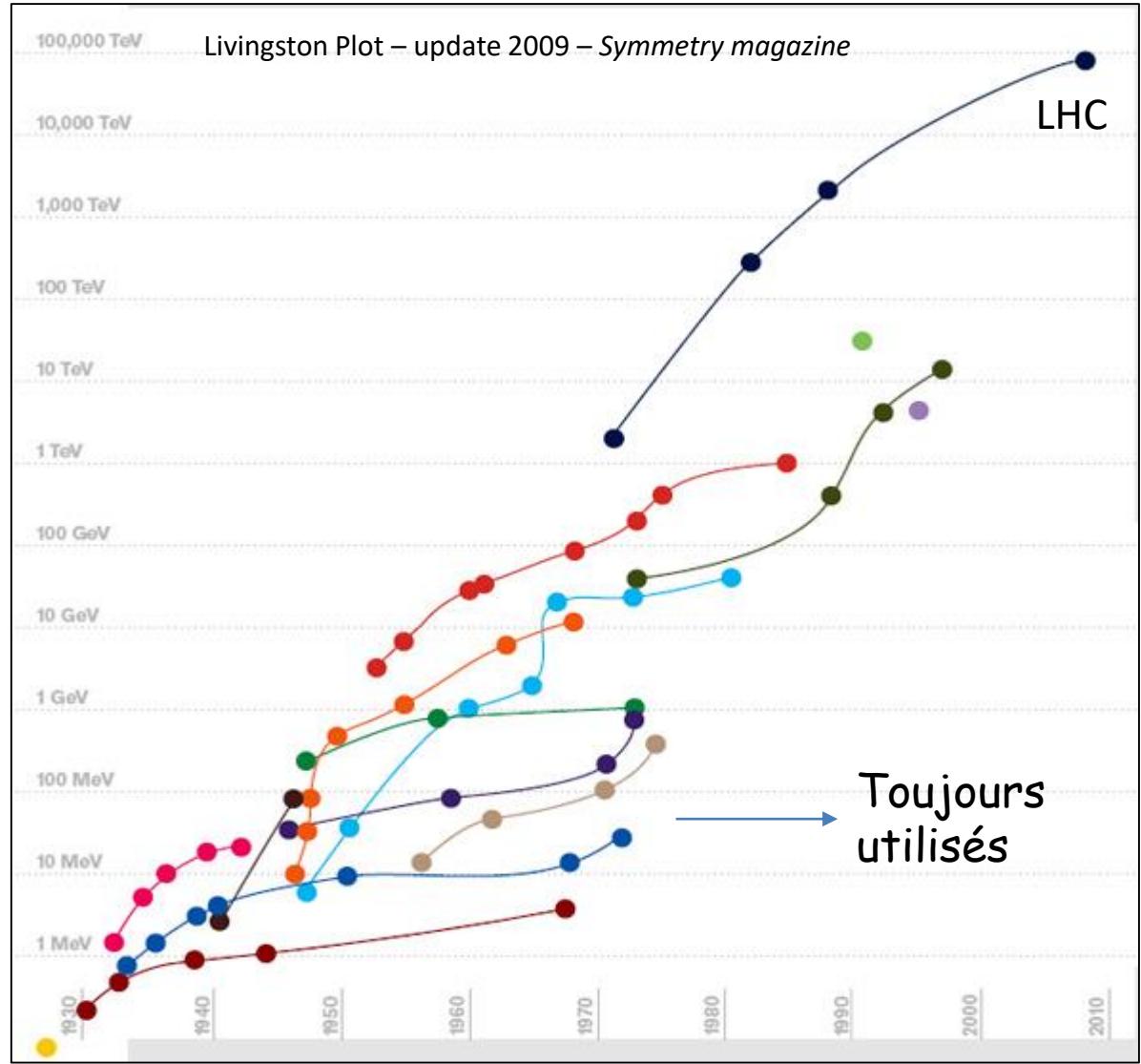
d'éviter des endommagements

préparer les futures modifications et l'évolution de l'accélérateur

→ Caractéristiques des faisceaux

Deuxième partie du cours: les diagnostics

# Histoire des Accélérateurs (1)



Livingston, avait remarqué que l'avancée de la technologie des accélérateurs augmente les records en énergie apportée par un facteur 10 tous les 6 ans.

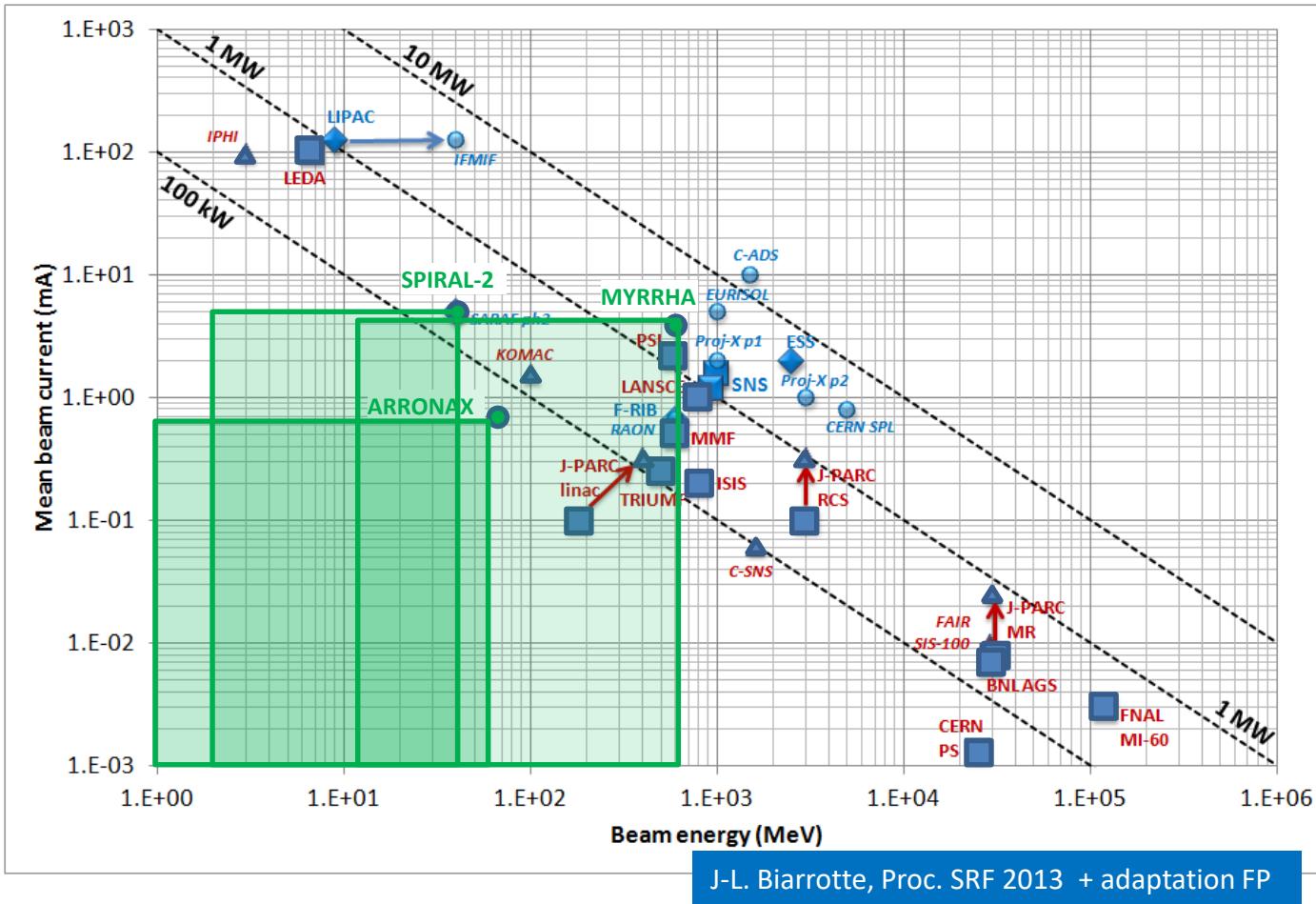
- ~1869: tube de crooke (~150 ans)
- ~1910s: Expérience de Rutherford
- 1928: R.Wideroe Premier accélérateur dédié
- 1931: E.Lawrence Cyclotron
- 1932: Accélérateur Cockcroft Walton
- 30s Van de Graaf (sphère)
- 1946: Première onde progressive
- Aujourd'hui: cavités RF et aimants supra
- Demain: Linacs et accélérateurs "Wakefield" (onde de traine)

- First accelerator
- Cyclotrons
- Cockcroft-Walton electrostatic accel.
- Van de Graaff electrostatic accelerators
- Betatrons
- Synchrocyclotrons
- Linear accelerators
- Electron synchrotrons
- Proton synchrotrons
- Storage ring colliders
- Linear colliders

"l'énergie du collisionneur est tracée pour un collisionneur proton équivalent a une cible fixe."

# $P_{\text{faisceau}} [\text{W}] = \text{Intensité} [\text{A}] \times \text{Energie} [\text{eV}]^*$

Tendance des faisceaux délivrés → vers plus de puissance



- Un faisceau avec beaucoup de particules aura une plus haute puissance
- Un faisceau acquiert de la puissance avec le gain en énergie (à travers les cavités).
- Certains faisceau sont si puissant qu'il transforme l'accélérateur en « perceuse »

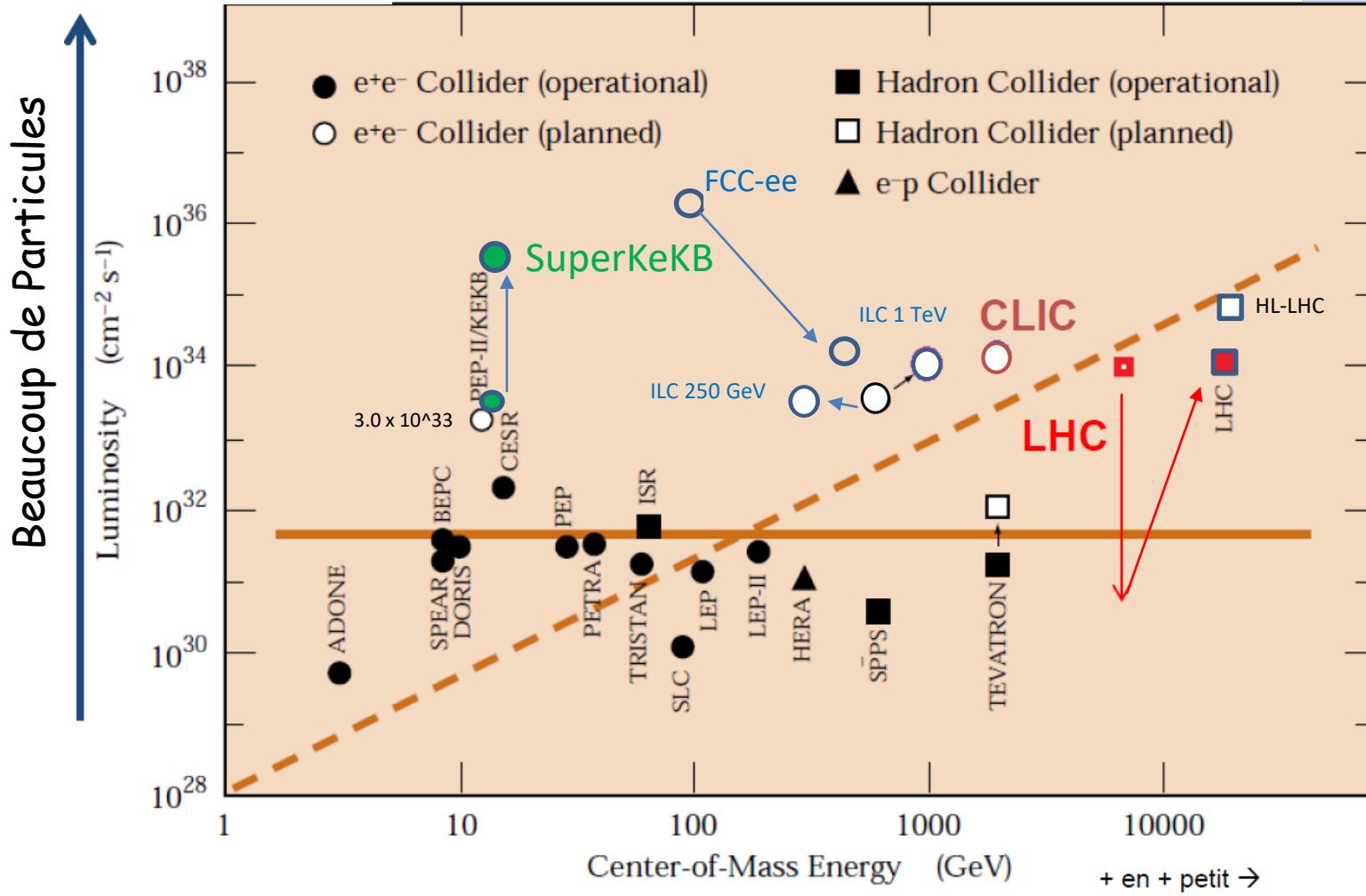
\* Pour proton,  
○ Ou  $P_b[W] = E_b[\text{eV}] \times dN/dt$   
○ avec N nombre de particules  
○ L'intensité est renormalisée à la charge équivalente du proton/e- (charge=1)

\* Pour ions,  
○  $P_b[W] = (A/q) \times \langle I \rangle \times E_b/A [\text{MeV/u}]$   
○ Avec masse  $A_{\text{mu}}$  (i.e. ions) et charge Q,

# Collisionneurs 2f: Luminosité et Energie

~capacité à faire un grand nombre d'interaction

Record SuperKeKB Lumi:  
juin 2022:  $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}/\text{s}$   
Dec 2024:  $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}/\text{s}$



~capacité à produire une réaction spécifique (nouvelles particules)

# Le collisionneur hadronique large

- 2 anneaux, 27 km de circonférence, 4 points de croisement (interaction) du faisceau
- Proton-protons, faisceau de 7TeV/faisceau (prévu),  $F=11.245\text{kHz}$
- Ces anneaux sont composés d'un grand nombre d'éléments magnétiques/cavités, diagnostics, vide

Module cryostat de 4 cavités



8 cavités RF 400MHz, 2 MV/cav (5MV/m) a 4.5K  $\rightarrow$  apport 16MeV/tour

Point de collision

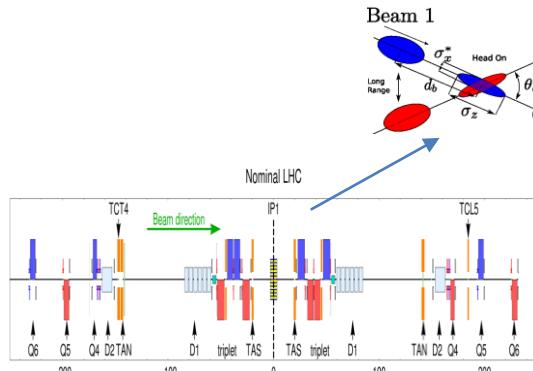
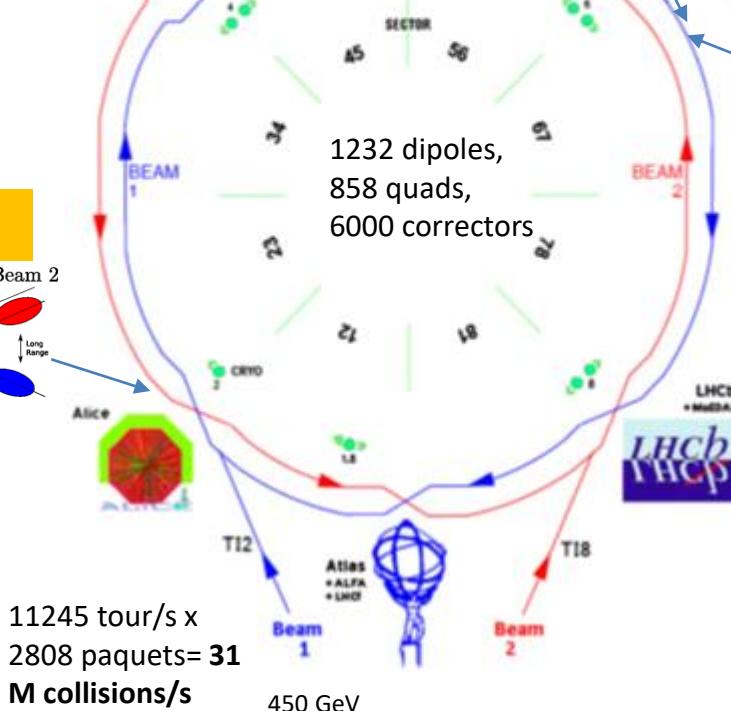


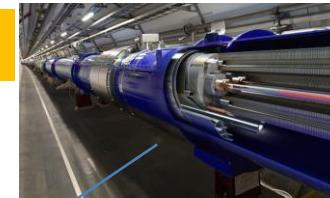
Schéma des aimants du point de collision

1070 moniteurs pour le contrôle de l'orbite (BPM)

RF & Beam  
Instrumentation

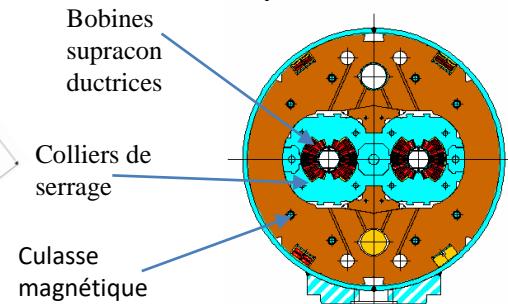


Section courbe



8.65 T

Coupe de l'aimant



Module cryostat avec la section de courbure

1 seul assemblage de longueur= ~15 m pour 27.5t, refroidi à 1.9K:  

- Long=peu d'espaces sans champ
- Froid=pas de résistance électrique

 2 Tubes à vide = 56 mm de diamètre

C' était l'intro!

Plongeons un peu plus dans les accélérateurs:

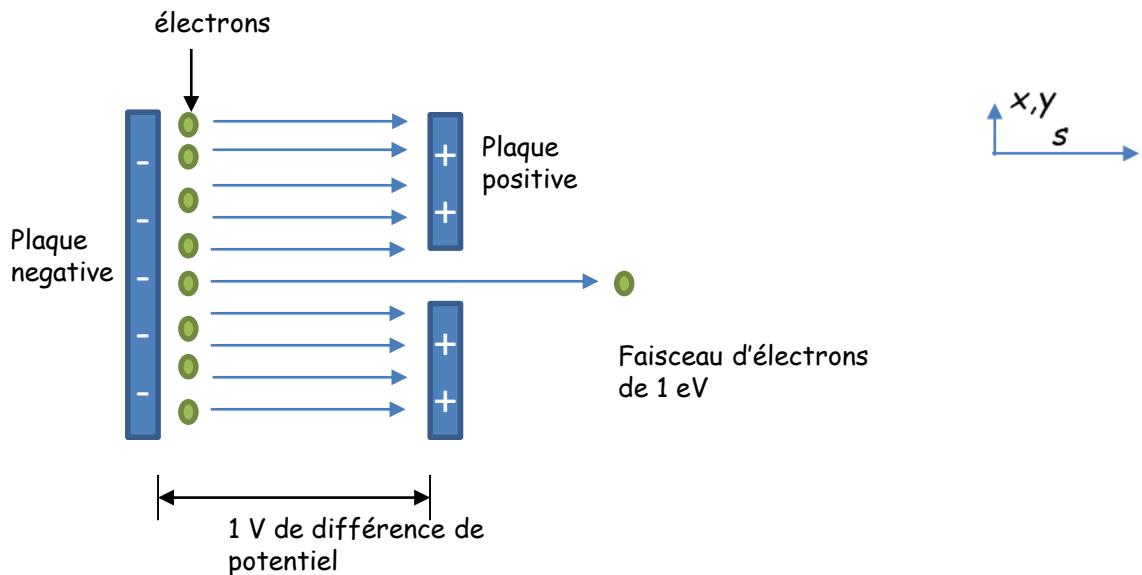
- L'accélération
- Les éléments magnétiques

- Et d'abord quelques rappels

# Unités de base

- L'énergie dans un accélérateur est usuellement exprimée en unité d'**"électron Volts"**:
  - $1\text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Joules}$  (en Système International:  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ )

En fait, c'est l'énergie qu'aurait un électron sous un champ électrique différentiel de 1V:



- Nous utiliserons donc les unités d'énergie:
  - $\text{keV} = 10^3 \text{ eV}$
  - $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$
  - $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$

# Unités de base

- De la même manière et il en découle:
  - L'unité du moment\*,  $p$ , est en  $eV/c$
  - Pour les masses (au repos), les unités sont en  $eV/c^2$  eg:
    - $M_p$  = masse du proton =  $938 \text{ MeV}/c^2$
    - $M_{e^-}$  = masse de l'électron =  $511 \text{ keV}/c^2$
    - $M_a$  = masse de l'alpha =  $3.727 \text{ GeV}/c^2$
    - Note:  $1eV/c^2 = 1.783 \times 10^{-36} \text{ kg}$ 
      - utiliser des eV nous permet d'éviter tous les exposants!!!

ENERGIE	MOMENT	MASSE
$1 \text{ ev} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$	$1 \text{ eV}/c = 5.36 \times 10^{-28} \text{ kg.m/s}$	$1 \text{ eV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-36} \text{ kg}$

- En pratique, pour les hautes énergies, le facteur  $c$  est souvent oublié et on a  $c = 1 \rightarrow$  cela veut dire que l'on parle souvent en employant seulement MeV, GeV
- Les Particules sont dans la plupart des accélérateurs accélérées à des vitesses relativistes, et nous aurons besoin d'utiliser quelques notion **relativiste#** pour décrire nos particules

\* Quantité de mouvement ou impulsion qui est en fait une énergie divisée par une vitesse  
 $c$  est la vitesse de la lumière.  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

# Equations Relativistes

- On va admettre que l'énergie totale  $E$  d'une particule est la composante de deux énergies :
  - L'énergie propre que l'on appelle énergie au repos  $E_0$
  - L'énergie de mouvement que l'on donne à une particule: soit l'énergie cinétique  $E_c$  (ou  $E_k$  ou  $T$ )

$$E = E_k + E_0$$

# Equations Relativistes

- On va admettre que l'énergie totale  $E$  d'une particule est la composante de deux énergies :
  - L'énergie intrinsèque (propre) que l'on appelle énergie au repos  $E_0$
  - L'énergie de mouvement que l'on donne à une particule: soit l'énergie cinétique  $E_k$  (ou  $E_c$  ou  $T$ )

$$E = E_k + E_0$$

- De même, on a:

$$E = \frac{E}{E_0} \times E_0$$

Ici, nous n'avons rien inventé



- On pose:

$$\gamma = \frac{E}{E_0}$$

alors

$$E = \gamma \times E_0$$

$\gamma$  (gamma) est le rapport de l'énergie totale d'une particule à son énergie au repos.

$\gamma$  indique aussi l'apport en énergie cinétique que l'on donne à la particule

$\gamma$  est appelé le **facteur de Lorentz** et est un paramètre clé pour les accélérateurs et les diagnostics

- On peut aussi redécomposer l'énergie totale avec l'énergie cinétique et son énergie au repos , et on a:

$$\gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{E_k + E_0}{E_0} = \frac{E_k}{E_0} + \frac{E_0}{E_0}$$

$$\gamma = \frac{E_k}{E_0} + 1$$

# Le facteur de Lorentz

- Vous avez certainement déjà rencontré  $\gamma$  sous une autre forme:

$\gamma$  peut aussi s'écrire en fonction de la vitesse de la particule et de la vitesse de la lumière

$$\gamma = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

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

*c* est la vitesse de la lumière dans le vide.  $c = \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$   
*v* est la vitesse de la particule

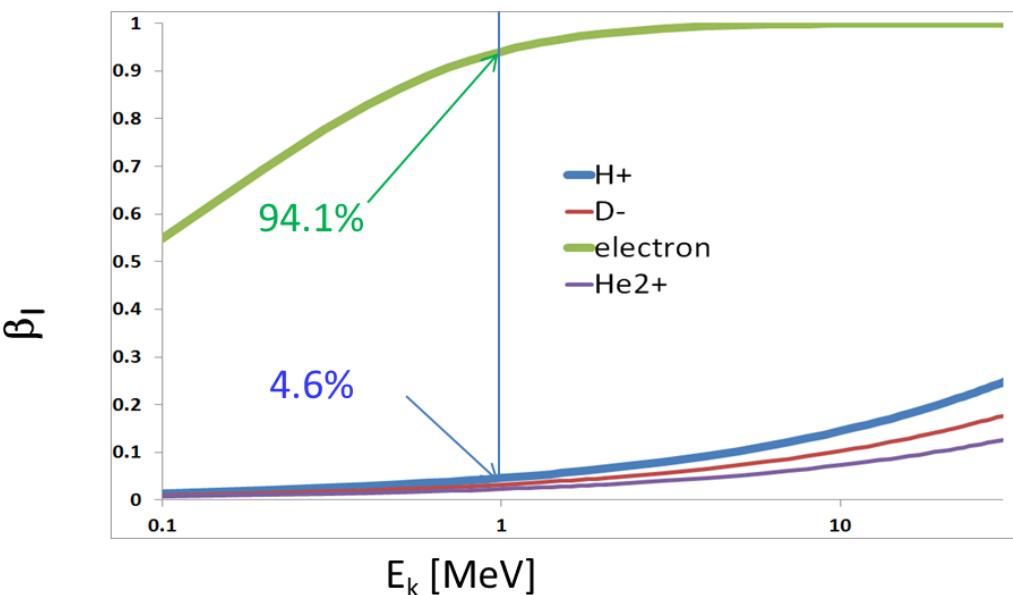
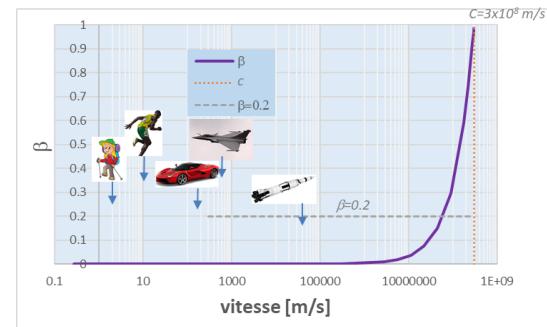
# β – Beta (de Lorentz)

- On peut introduire aussi le rapport de la vitesse de la particule à la vitesse de la lumière:

$$\beta_l = \frac{v}{c}$$

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

- $\beta \ll 1$  ( $=0.01$ ) particule très lente, particule non relativiste.
- $\beta > 0.2$  la particule devient relativiste et il faut prendre en compte les effets
- $\beta = 1 \rightarrow$  particule à la vitesse de la lumière



- Le  $\beta$  augmente en fonction de l'énergie cinétique de la particule et/ou de l'ions
- Les particules deviennent relativistes à hautes énergies.
  - Pour le H- (proton + 2e-) à  $E_c = 70$  MeV, ( $m_0 = \sim 939.3$  MeV),  $\beta_l = \sim 36.6\%$
- Aucune particule avec une masse ne peut voyager à la vitesse de la lumière dans le vide ( $\beta < 1$ ).
- Les particules sans masses satisfont toujours  $\beta = 1$  et photons qui voyage à la vitesse de la lumière
- Quand une particule est très relativiste, on préfère employer  $\gamma$  qui a alors un « certain pouvoir » indicateur.

## Force d'application → Force électromagnétique

- L'accélération  $a$  d'une masse  $m$  demande une force  $F$ :

$$F = m \cdot a$$

- En d'autre terme pour déplacer une particule, il faut appliquer une force !!!
- Dans le modèle standard de l'interaction de la physique, la **seule** force que nous pouvons contrôler/manipuler au niveau technologique est la force électromagnétique provenant de l'interaction avec le champ électromagnétique.

# Force de Lorentz → Force d'application

- La force de Lorentz est la force électromagnétique appliquée a des particules/ions chargées (quand celles-ci sont dans le champs de la force)
- Si la charge subit simultanément un champ magnétique  $\vec{B}$  et un champ électrique  $\vec{E}$ , on applique cette force
- Force de Lorentz ( $F_L$ ) agit sur une charge  $q$  se déplaçant a la vitesse  $v$ :

Charge

$$F_L = q ( E + v \times B )$$

Vecteur champ Electrique

Vecteur champ magnétique

On peut l'écrire aussi comme cela:

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

c=1

# Force de Lorentz

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

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{el} + \vec{F}_{mag}$$

soit

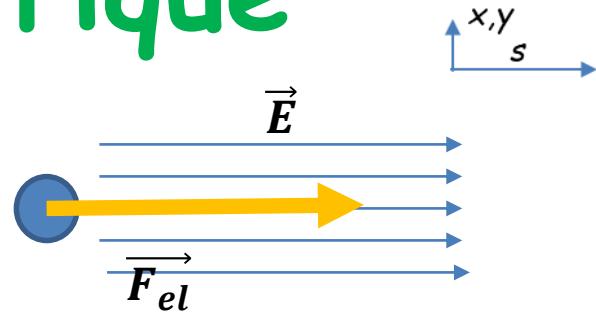
$$\left. \begin{array}{l} \vec{F}_{el} = q\vec{E} \\ \vec{F}_{mag} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \end{array} \right\}$$

Deux composantes de cette force bien distinctes dans cette formulation:

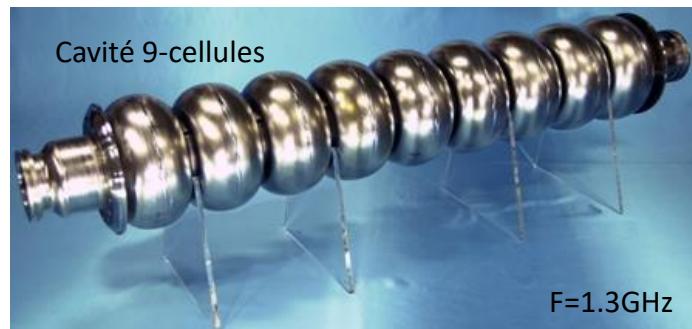
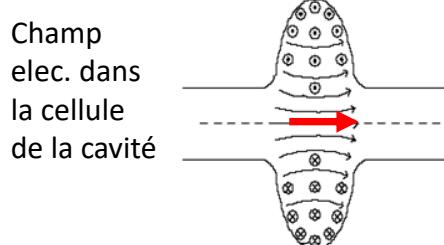
- 1)  $E$  = le champs électrique en unités de force par unité de charge, newtons / coulomb = **volt/m**
- 2)  $B$  = densité du flux magnétique ou induction magnétique, avec des unités du newtons/ampère/m = weber / m<sup>2</sup> = **Tesla** (=10 kGauss)

# Composante électrique

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E}$$



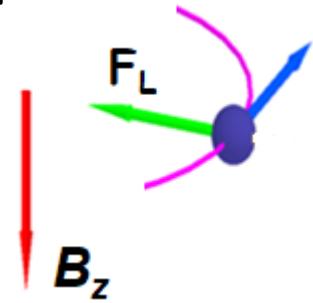
- Une particule de charge positive sera accélérée dans le même sens que le champ électrique  $\vec{E}$
- Nous avons donc ici le moyen d'utiliser le champ électrique pour **donner une impulsion aux particules ou de l'énergie cinétique** (voir plus tard)
- Aujourd'hui pour appliquer le champ accélérant, il peut-être employé des cavités résonnantes qui fournissent une différence de potentiel de plusieurs MV ( $10^6$  Volt).



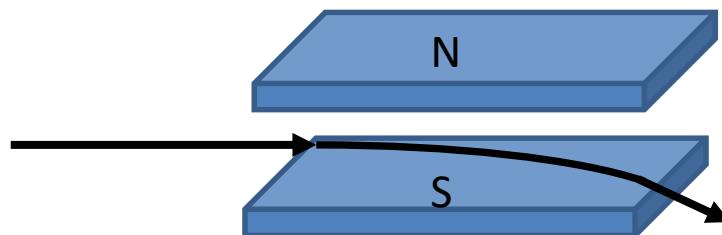
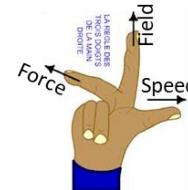
# Composante magnétique

q&gt;0

$$\overrightarrow{F_{mag}} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$



- *Champ magnétique  $\vec{B}$ :* Celui-ci courbe la trajectoire de la particule en fonction du vecteur vitesse local (instantanée)  $\vec{v}$  et du vecteur champ  $\vec{B}$  selon la règle de **la main droite (trois doigts)**
- Nous avons ici un moyen d'agir sur la trajectoire des particules (et donc de les dévier individuellement)
- Dans les accélérateurs pour appliquer cette force nous employons des aimants. Exemple dipôle qui dévie la particule:



# Rigidité magnétique

De l'équation d'équilibre avec la force centrifuge ( $F_c$ ), sur un cercle de rayon  $\rho$  on peut obtenir l'équation pour le champ magnétique  $B$  :

$$F_c = \gamma \cdot m_0 \cdot \frac{v^2}{\rho} = qvB$$

$$B\rho = \frac{mv}{q}$$

# Rigidité magnétique

De l'équation d'équilibre avec la force centrifuge ( $F_c$ ), sur un cercle de rayon  $\rho$  on peut obtenir l'équation pour le champ magnétique  $B$  :

$$\gamma \cdot m_0 \cdot \frac{v^2}{\rho} = qvB$$

$$B\rho = \frac{mv}{q}$$

à 68 MeV -  $B\rho_{H^+} = 1.213 \text{ T.m}$ ,  $B\rho_{H^-} = 1.212 \text{ T.m}$ ,  $B\rho_{He2^+} = 1.193 \text{ T.m}$

- Cette quantité est appelée **rigidité magnétique  $B\rho$  (Bero)** et est une **caractéristique de la particules** c.a.d. qu'elle indique la « **capacité** » de la particule à avoir une **trajectoire modifiée** (rayon) par un champ de 1T:
  - Si masse élevée, rigidité est élevée (haute)
  - Si charge basse, rigidité est élevée
  - Haute Rigidité = demande plus de courant dans les aimants (chaud) pour modifier la trajectoire
- **Concept important** → ex champs magnétiques des cyclotrons mais aussi dans les lignes de faisceau ou il y a beaucoup d'éléments magnétiques (dipôles, quadripôle,...)

Rule of thumb:

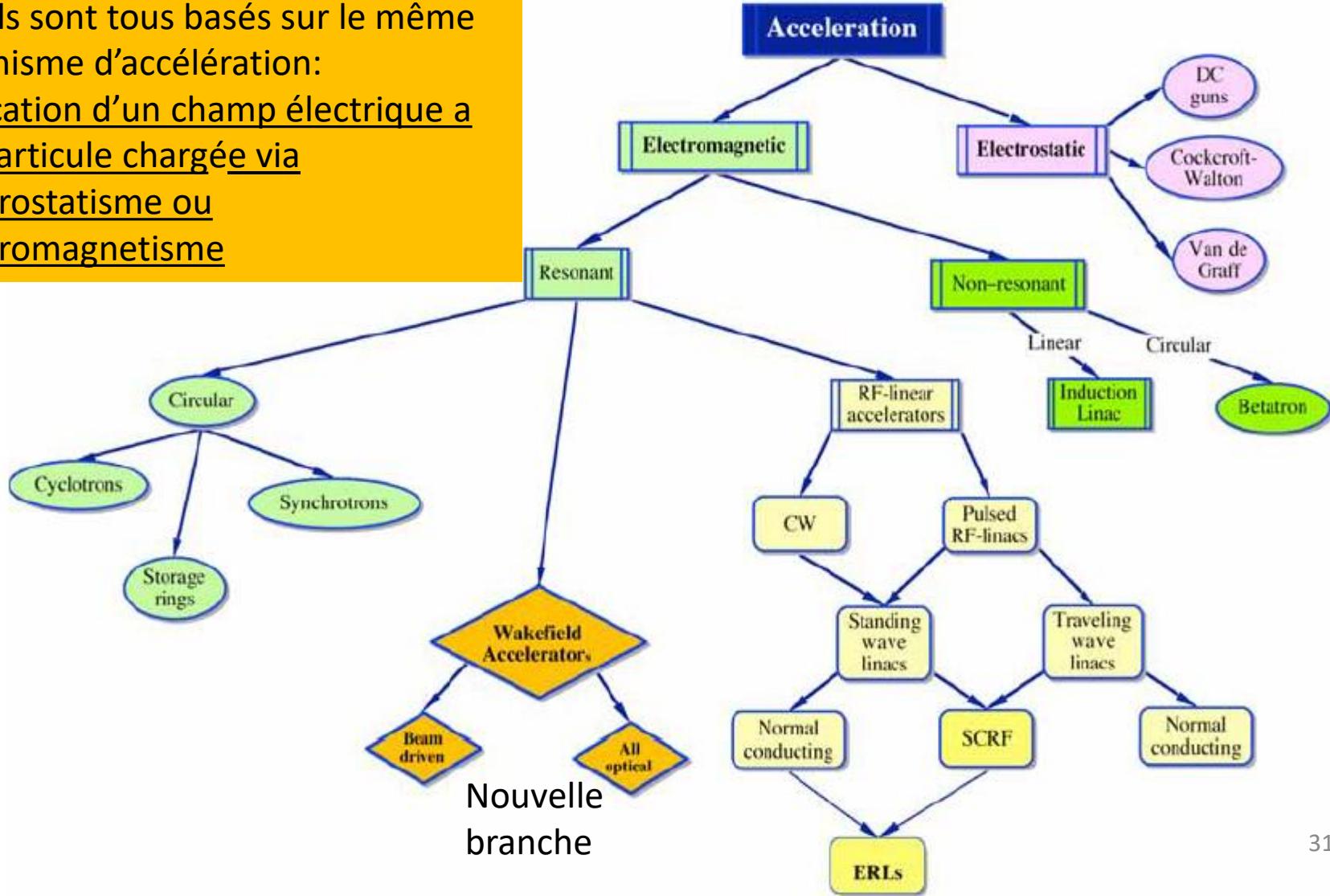
$$B\rho[T.m] = 3.3356p [GeV/c]$$

$$E_k \gg m_0 c^2$$

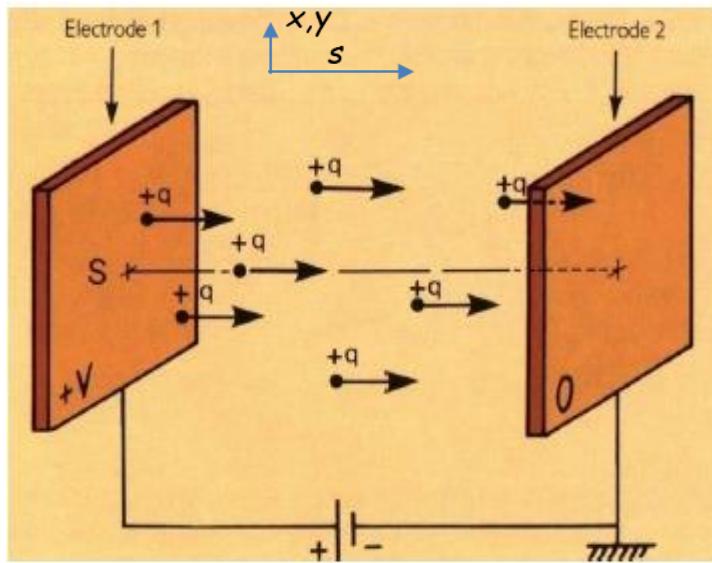
# Maintenant les accélérateurs

# Classification (branche, taxonomie)

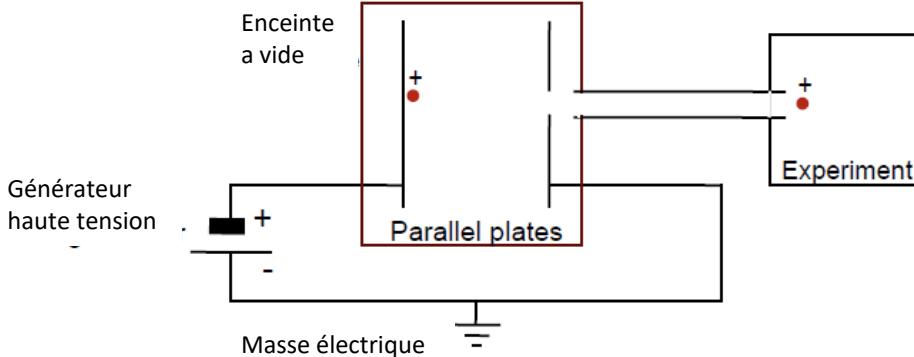
Les accélérateurs peuvent être classés selon plusieurs designs principaux mais ils sont tous basés sur le même mécanisme d'accélération:  
Application d'un champ électrique à une particule chargée via l'électrostatisme ou l'électromagnétisme



# Le plus Simple des acc. - Electrostatique - CC

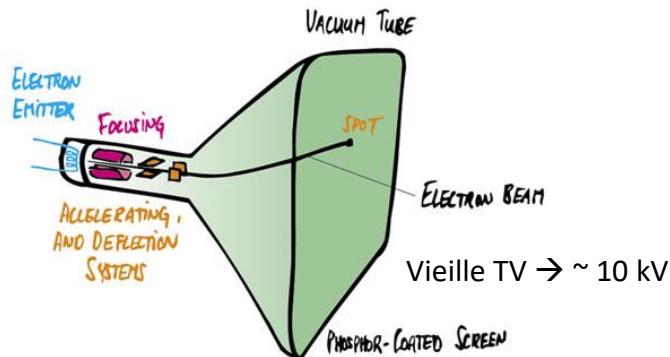


Ex: Acceleration de charge entre deux électrodes avec une différence de potentiel électrique. Ici  $q$  est positif.



Le gain en énergie gain  $\delta W$  (ou  $\Delta E_{cin}$ ) de  $q$  dans un champ électrique généré par un potentiel  $V$  (ou  $U$ ) est:

$$\delta W = q \times e \times V$$



$\delta W = 1 \text{ eV}$  est l'énergie d'un électron qui a été accéléré sous une tension de  $1 \text{ V}$ .

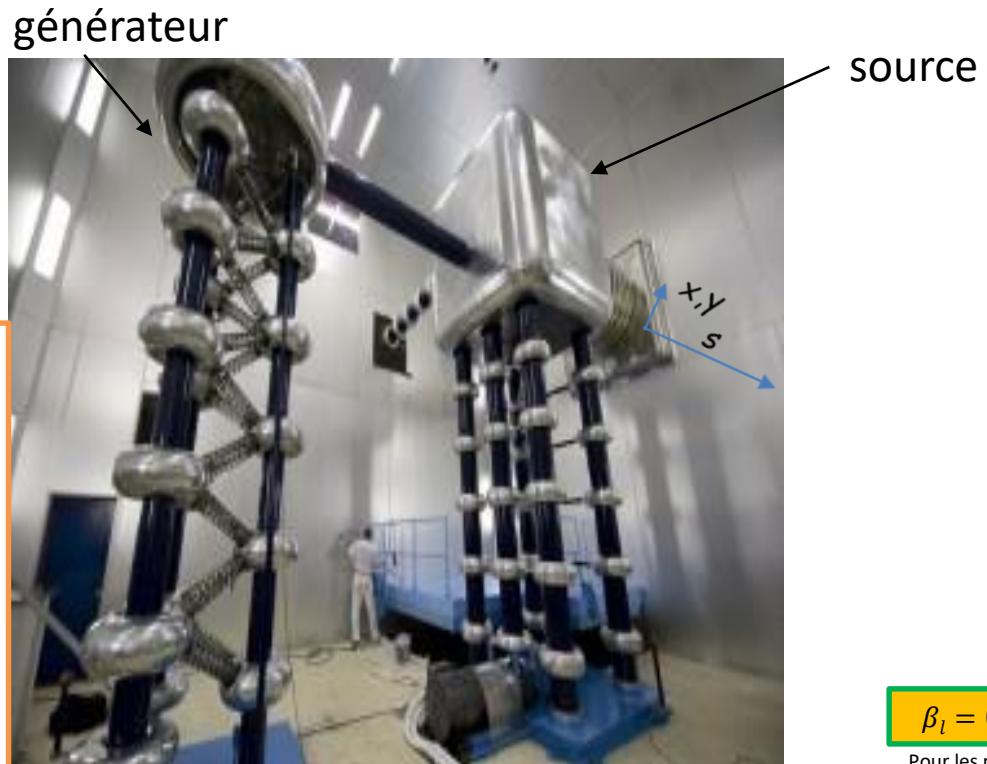
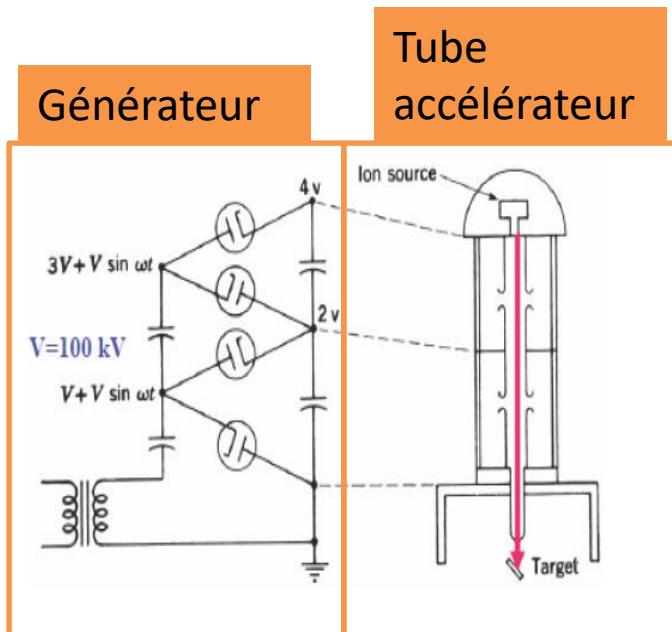
Ici  $e$  est la charge fondamentale et absolu pour un ion par exemple,  $W$  est exprimé pour une charge

Accélérateur → Besoin d'un champ électrique fort → générateurs!

# Acc. Cockcroft-Walton

- 1932: Cockcroft et Walton conçoivent un circuit (cascade de Greinacher) pour générer une haute tension.
  - La haute tension était utilisée pour accélérer des protons sur une cible en lithium (700 keV).
- Ceux-ci sont des **injecteurs d'accélérateurs de haute énergie et intensité.**

Accélérateur constitué de:



Le pré-injecteur Cockcroft-Walton de Fermilab jusqu'à 2012. *Image courtesy of Michael Monaxios.*

$$\beta_l = 0.03$$

Pour les protons

# Van de Graaf

C'est un collecteur de charge :

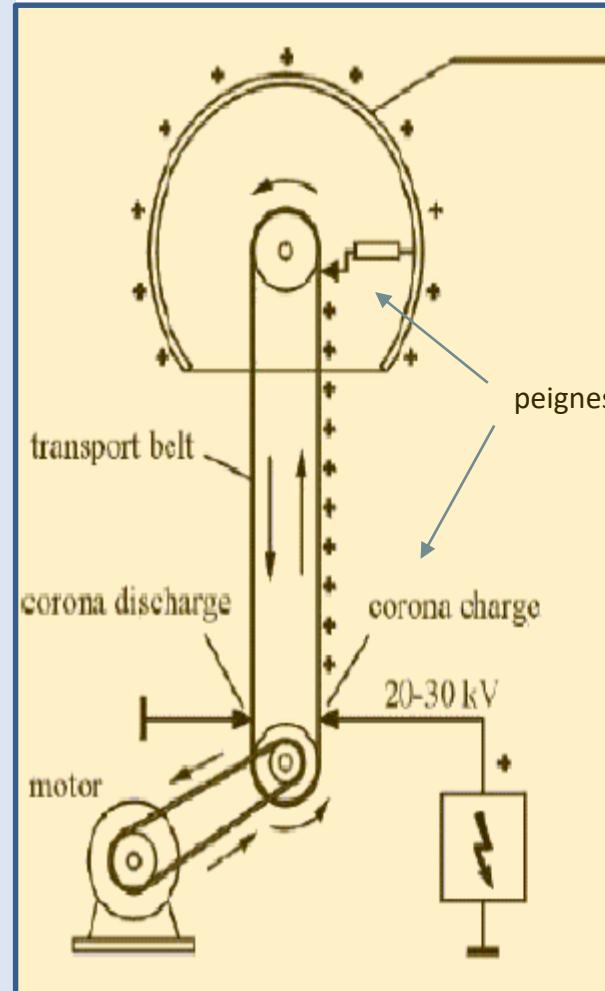
- Les peignes reçoivent les charges
  - Décharge sur une pointe (corona)
- **Une ceinture déplace les charges**
- Une surface sphérique accumule les charges.
  - Le plus grand, le plus de charges
  - Surface la plus lisse possible afin d'éviter les claquages

Développé en 1931 (Robert.V.d.G),

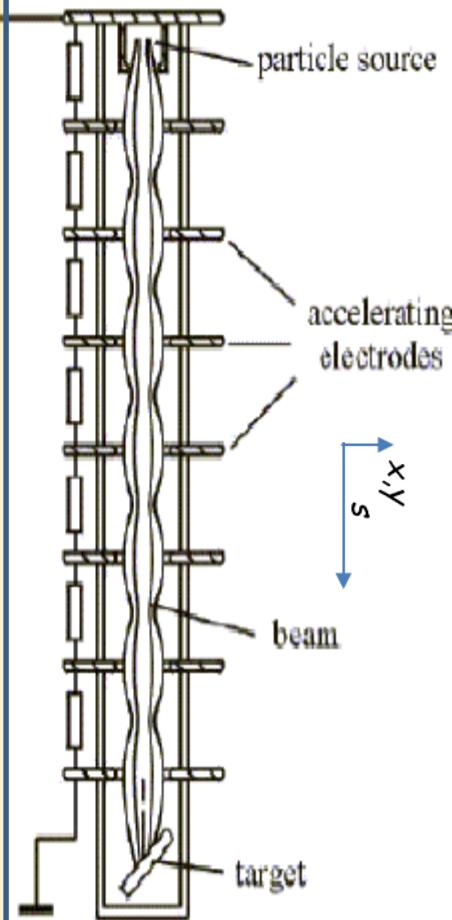
**Amélioration Constante de l'instrument au fil des années:**

- Triboélectricité (elec. statique) au début → charges émises par une alim. tension continue (10s kV)
- Matériaux (ceinture et peignes)
- Air → air pressurisé (10 atm) → gaz → SF6
- Invention d'électrodes spécifiques “gigognes” (composant le plus critique aujourd’hui)

## Le générateur



## L'accélérateur



# Van de Graaf moderne

Le générateur et l'accélérateur sont encapsulé dans la même enceinte



Van de Graaf a HMI (Berlin, Germany), 6 MV

$$\beta_l = 0.11$$

source

Electrodes  
espacées



SAFIR: Van de Graaf a INSP (nano science - Paris):

- 100 keV jusqu'à 2.5 MeV
  - 1 nA à 100  $\mu$ A
- $10^4 - 2 \times 10^7$  protons/s

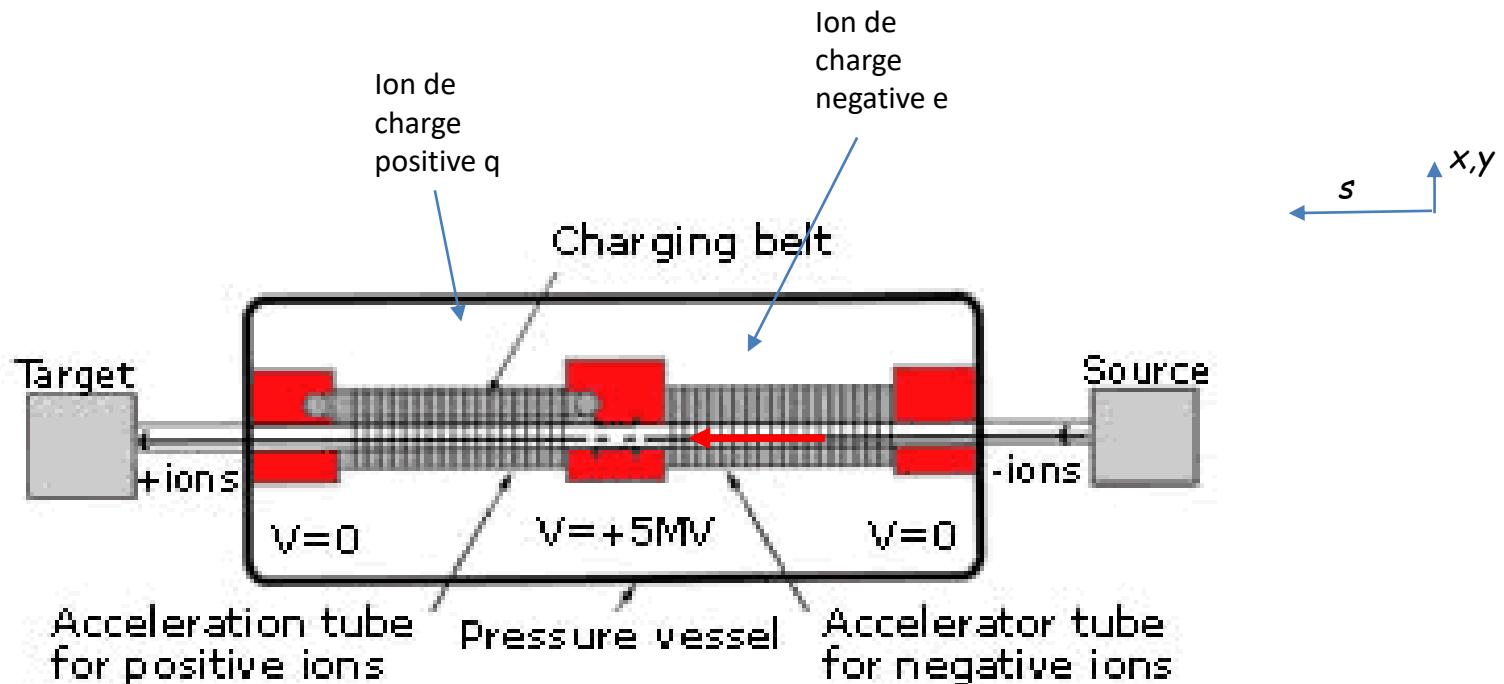
$$\beta_l = 0.015 - 0.07$$

Bâtiment du CEHMTI  
(Conditions Extrêmes et  
Matériaux à Orléans). Van  
de Graaf de 3MV (avant  
2014)



# Tandem

- 2 étages d'accélération:
  - Accélère des ions négatifs sous une haute tension
  - Les ions passent à travers une feuille ou une région de haute pression pour enlever les électrons
  - Accélère des ions positif vers la masse (terre)
- Les électrodes sont enfermées dans une enceinte avec un gaz à haute pression (les ions accélérés sont eux dans le vide)
- L'énergie cinétique finale dépend de la charge des ions négatif/positif accélérés



# Tandem



Oak Ridge  
(Tennessee)  
tandem vertical,  
USA

$\beta_l = 0.25$

September 2021  
Red=busy

Tandem  
horizontal  
Van de  
Graaff KVI,  
Netherlands



Un des plus haut tandem  
était à Daresbury, UK, 42  
m de long, 20 MV



Agenda très occupé : Tandem van de Graaff en utilisation au BNL,  
USA: 24 m long, 2x15 MV → injecteur du « Relativistic Heavy ions  
collider » (RHIC) source

Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
			1 Available	2 Available	3 Available	4 Busy
5 Busy	6 Busy	7 Available	8 Available	9 Available	10 Available	11 Busy
12 Available	13 Available	14 Available	15 Available	16 Available	17 Available	18 Busy
19 Busy	20 Available	21 Available	22 Available	23 Available	24 Available	25 Available
26 Busy	27 Busy	28 Busy	29 Busy	30 Busy		

# Limitation des accélérateurs électrostatiques

- **Limitations**
  - Décharge Corona (local et momentanée, si non contrôlée, ionisation près des conducteurs)
  - Décharge dans le gaz d'isolation
  - Décharge à la surface
  - Une (deux) étape(s) d'accélération
- Accélérateurs Electrostatiques habituellement accélérèrent jusqu'à 25 MV (avec le gaz approprié soit SF6), dans l'air  $\rightarrow \sim 2\text{MV}$
- Accélérateurs construit pour opérer à basse énergie et ne peuvent pas accélérer vers les hautes énergies.
- Pour aller plus haut en énergie il faut employer d'autres techniques:
  - utilisation tension sinusoïdale
  - puissance RF  $\rightarrow$  cavités

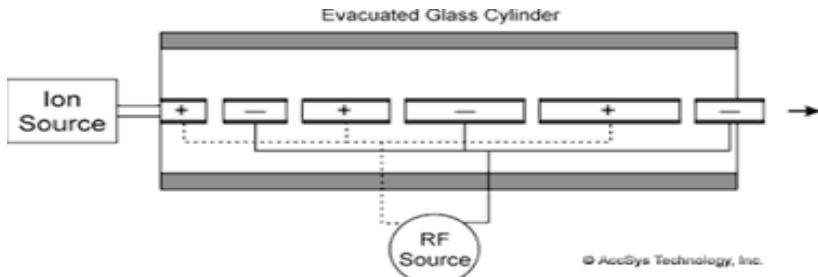
# Accélérateur RF: Linac de Wideröe

En 1925, Ising conçoit et en 28 Wideröe construit le **premier accélérateur linéaire** (linac). Cet invention révolutionnaire est basé sur le schéma **des tubes de glissement** (drift tubes).

- Les tubes alternés sont connectés aux terminaux opposés du générateur RF



R. Wideröe  
(1902-1996)



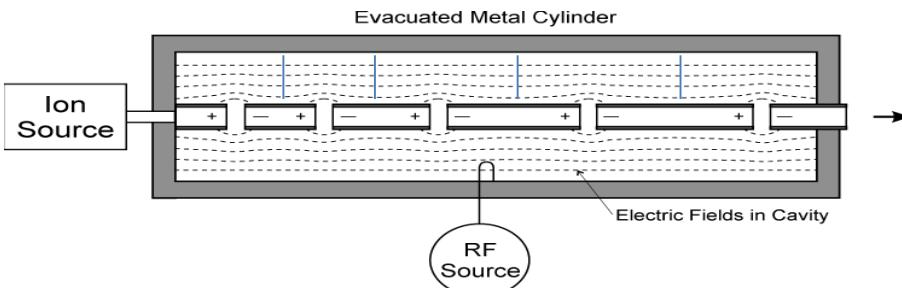
La fréquence utilisable est limitée vers ~100 MHz, puissance élevée perdue à travers les parois (effet antenne)

Condition d'isochronisme

$$L_i = \beta_{li} \frac{\lambda_{RF}}{2}$$

$L_i$ : séparation  
 $\lambda_{RF}$ : longueur d'onde RF=cste

En 1946, Alvarez surmonte cet inconvénient en incluant la structure dans un tube métallique : ceci crée une cavité dans laquelle le champ est confiné.



Cela constitue les premières cavité résonnantes



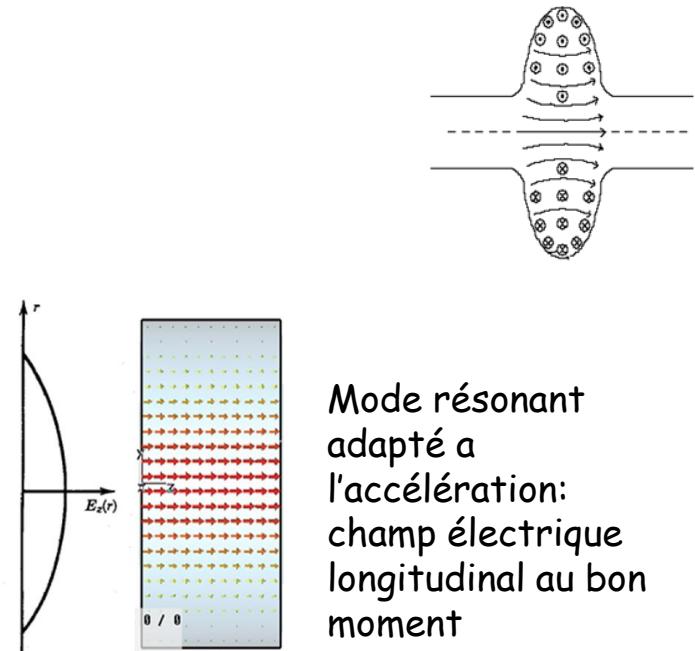
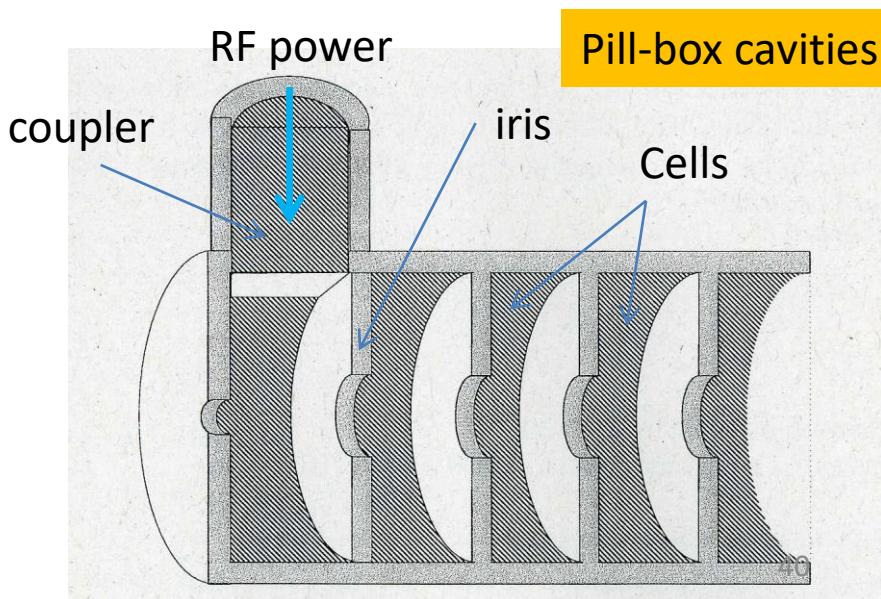
Une **radio-fréquence** (RF) d'accélérateur :

Onde RF qui par convention est entre 9 kHz et 3000 Ghz soit longueur d'onde = 33 km à 0.1 mm.

# Cavités

- Depuis les années 50s, les cavités résonnantes ont évoluées et ont été adaptées pour être des structures RF plus efficaces:
  - Fréquence plus élevée (plus d'impulsion)
  - Mise en place d'ondes stationnaire (ou traversante) dans les cavités, à géométrie adaptée au  $\beta_{\parallel}$ .

Géométrie modifiée



# Cyclotrons ( $\beta_{ion} < 0.9$ )\*

- **Cyclotron Classique ( $\beta < 0.2$ )**: Les ions sont accélérés entre deux demi-chambres (Dee) où un champ magnétique global  $\vec{B}$  courbe leur trajectoire.
  - Ces Dees, sont mis à des tensions différentielles et deviennent donc des électrodes qui permettent l'accélération.
  - Les ions prennent le même temps à tous les rayons pour effectuer leur tours (=fréquence d'accélération fixe).
- **Synchrocyclotron ( $\beta > 0.6$ )**: La fréquence d'accélération est modulée. C'est-à-dire que la fréquence de base décroît au fur et à mesure que les ions acquièrent de la masse (énergie). Le faisceau d'ions est pulsée.
- **Cyclotron moderne**
  - **Isochrone** pour garder une synchronisation entre le passage des ions et le changement de tension: le champ magnétique augmente avec le rayon
  - **A Champ Azimutal Variant** : Les ions sur un rayon voient le champ magnétique qui passe par des hautes et des basses valeurs. Ceci permet de prendre en compte les limitations des cyclotrons classique et même d'aller jusqu'à  $\beta=0.6-0.8$
- Machines pour Ions de 8-9 MeV jusqu'à ~590 MeV. Pas pour les électrons.
- Existence de projets pour des cyclotrons à 1 GeV.