

Profs au CAVIL



Les accélérateurs de particules

Bertrand Jacquot

1H30



Les accélérateurs de particules

Sommaire

- Les différents types d'accélérateurs de particules

Accélérateurs Electrostatiques (Source de particules chargées, Van De Graaf)

Accélérateurs Radiofréquence (Linac, Cyclotron, Synchrotron,...)

- Les concepts

Energie, relativité restreinte *, rigidité magnétique,

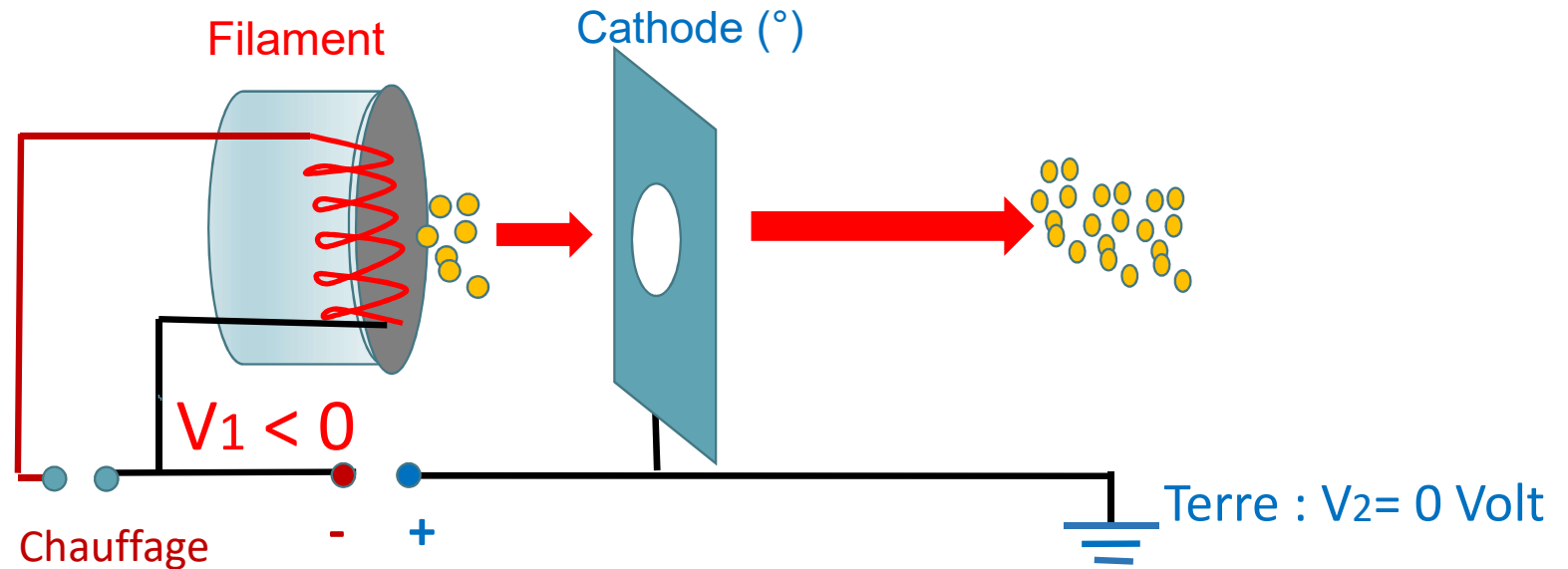
- Les composants d'un accélérateur de particules

Les quadripôles magnétiques et les dipôles magnétiques

Le spectromètre magnétique

L'accélérateur le plus simple :

Un accélérateur d'électrons à 10-50 keV



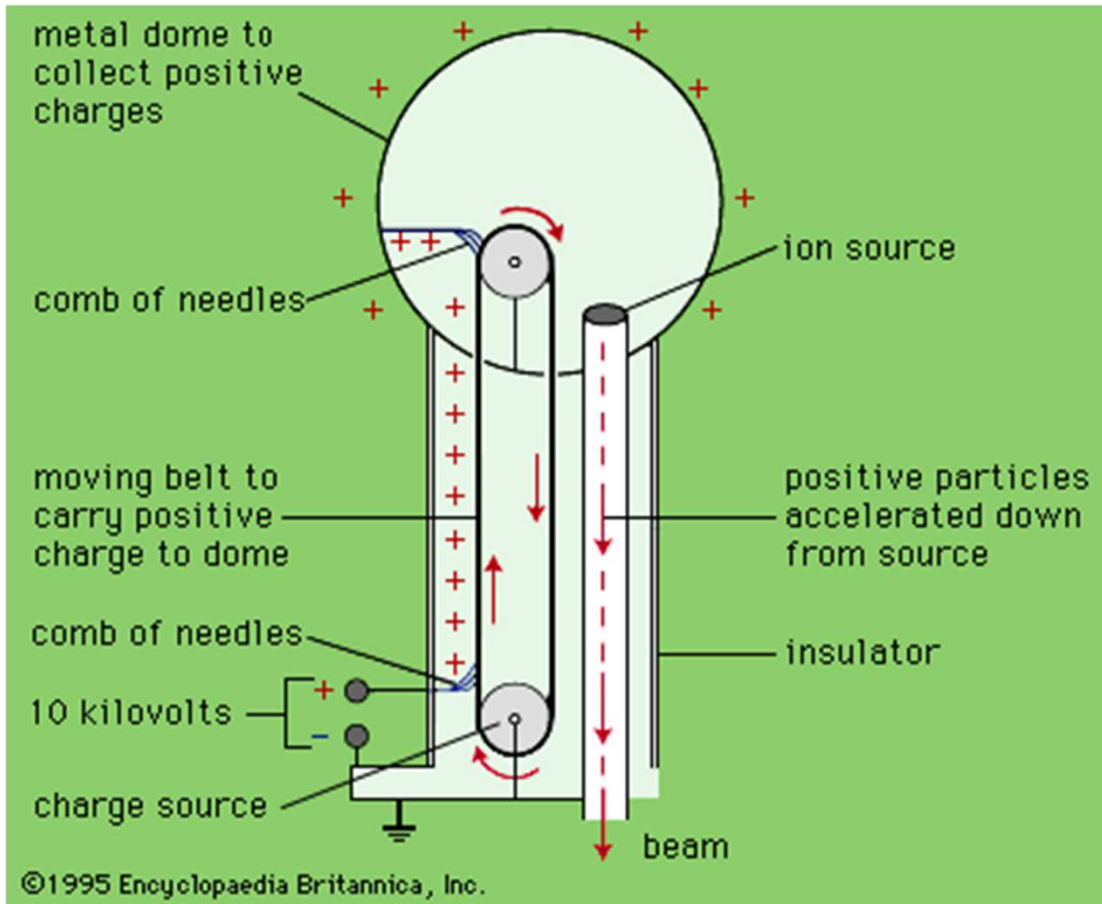
Différence de potentiel (statique) : définit l'énergie des électrons $E_k = q V = e_0 (V_2 - V_1)$

ACCELERATEUR ELECTROSTATIQUE : faisceau continu

Energie limitée par la tension max V

Un accélérateur électrostatique puissant : Le « Van de Graaf »

faisceau continu d'ions (protons, ion lourds) , $E_k < 20 \text{ MeV}$



Le Van de Graaf avec un **Champ Electrique Statique**

D.D.P. obtenue par frottements d'une courroie avec un peigne polarisé

$V \sim 10 \text{ MVolt}$ peuvent être obtenus

Isolation réalisée avec du gaz SF6 (moins de claquages)



Le Tandem Van de Graaf d' ORSAY (Essonne)

Accélérateur électrostatique

15 MégaVolt

Permet d'accélérer des faisceaux d'ions pour la physique nucléaire



7 accélérateurs de ce type en France
(Van de Graff ou Graf) Tandem Van de



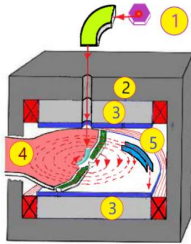
Saclay



Aix En Provence

Les accélérateurs Radio Fréquence

- Principe de l'accélération Radio-Fréquence



- Cyclotron



- Synchrotron



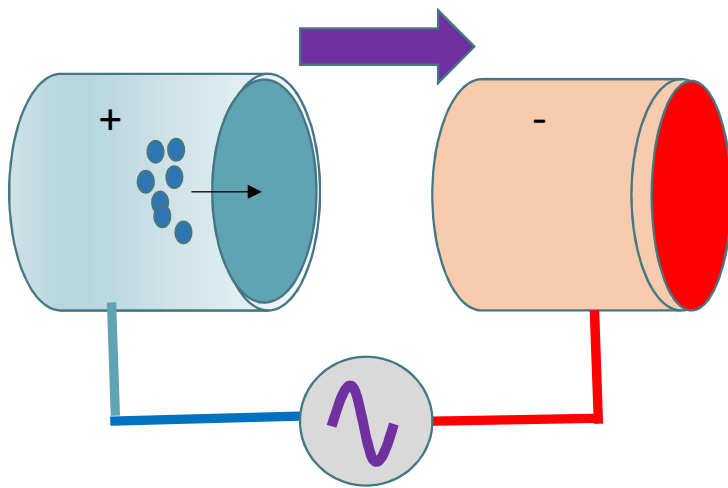
- Linac (Spiral2)



Comment dépasser les limites en énergie des acc. électrostatiques

L'accélération Radio Fréquence : $V_{RF} = \sin(\omega t)$

2 tubes creux en cuivre



$V_{RF} = V_0 \sin(\omega t)$
Tension alternative

- Champ électrique sinusoïdal entre les 2 tubes

Champ électrique $E = (V_2 - V_1) / d$

Positif
ou
Négatif

Accélération
ou
Déccélération

- Pas de **champ électrique** dans les tubes $E = \text{Grad } V = e_z \cdot dV/dz = 0$

- **Synchroniser les particules pour obtenir une accélération**
(envoyer les particules chargées au bon moment)

L'accélération Radio Fréquence: $V_{RF} = V \sin(\omega t)$

Exemple: accélérateur avec des tubes de polarité opposées :

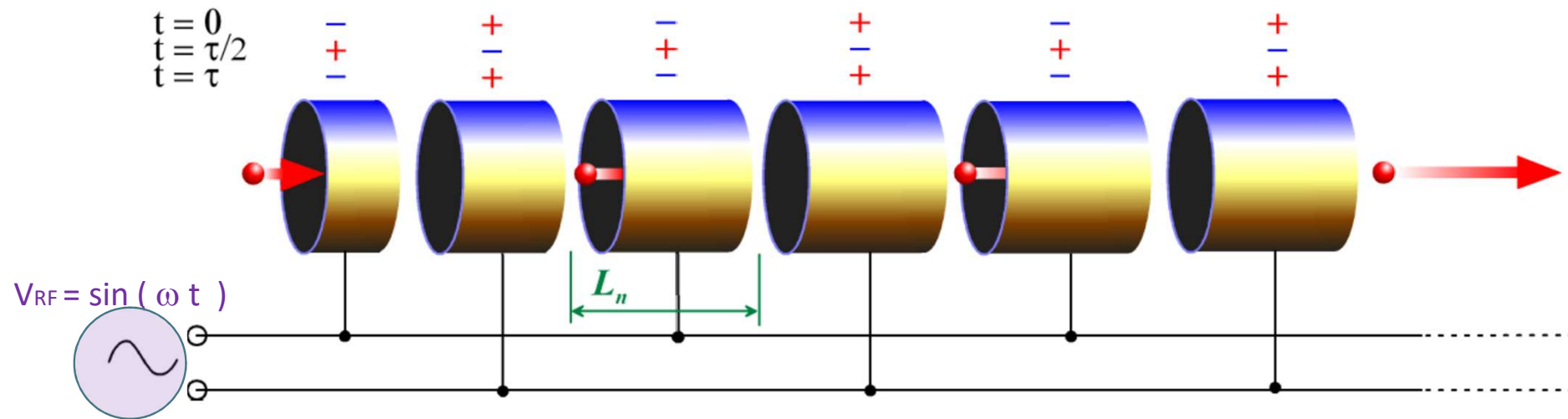
- Envoyer des particules positives quand le 1^{er} tube est négatif (en phase avec la fréquence RF)

→ SYNCHRONISATION : les particules mettent toujours le même temps pour traverser un tube

-Construire des tubes de longueurs croissantes:

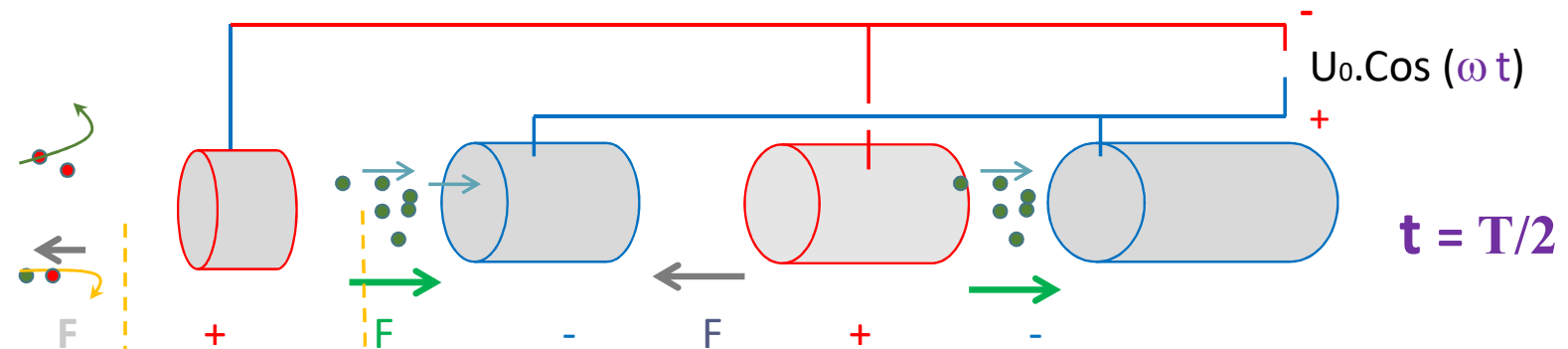
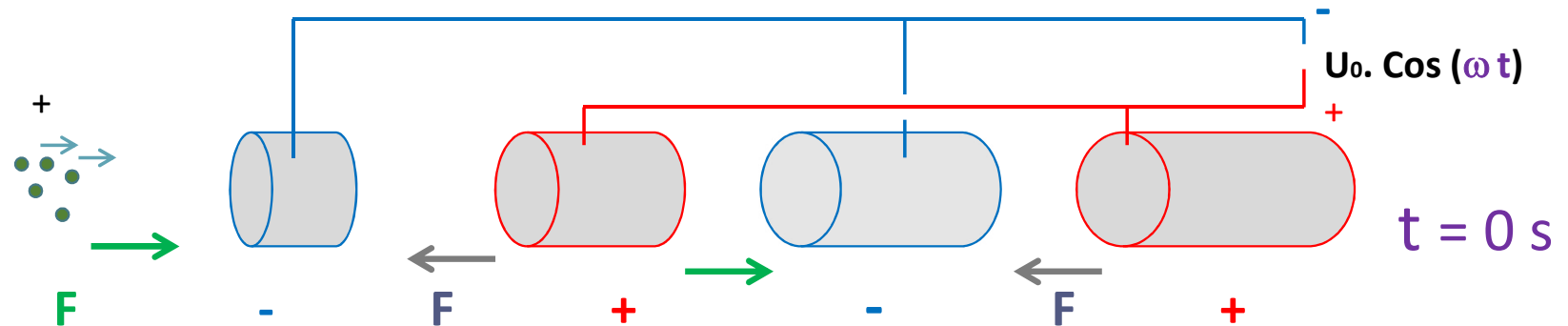
le temps de parcours entre chaque tube correspond à 1 Demi Période : $T/2$

$$T_2 - T_1 = L / \langle v \rangle = T/2 = 1/2F = \pi / \omega$$



Accélération de protons avec champs électriques sinusoidaux

Accélérateur Radio-Fréquence



$\Delta T = L_1/v$
 $\Delta T = T_{rf}/2$

les longueurs L_1 , L_2 , sont
définies tel que: $L_1 = v_1 \cdot T/2$

Période $T = 1/F$
 $\omega = 2\pi F$

Un exemple d'accélérateur pour protons avec des tubes
(recherche en physique)

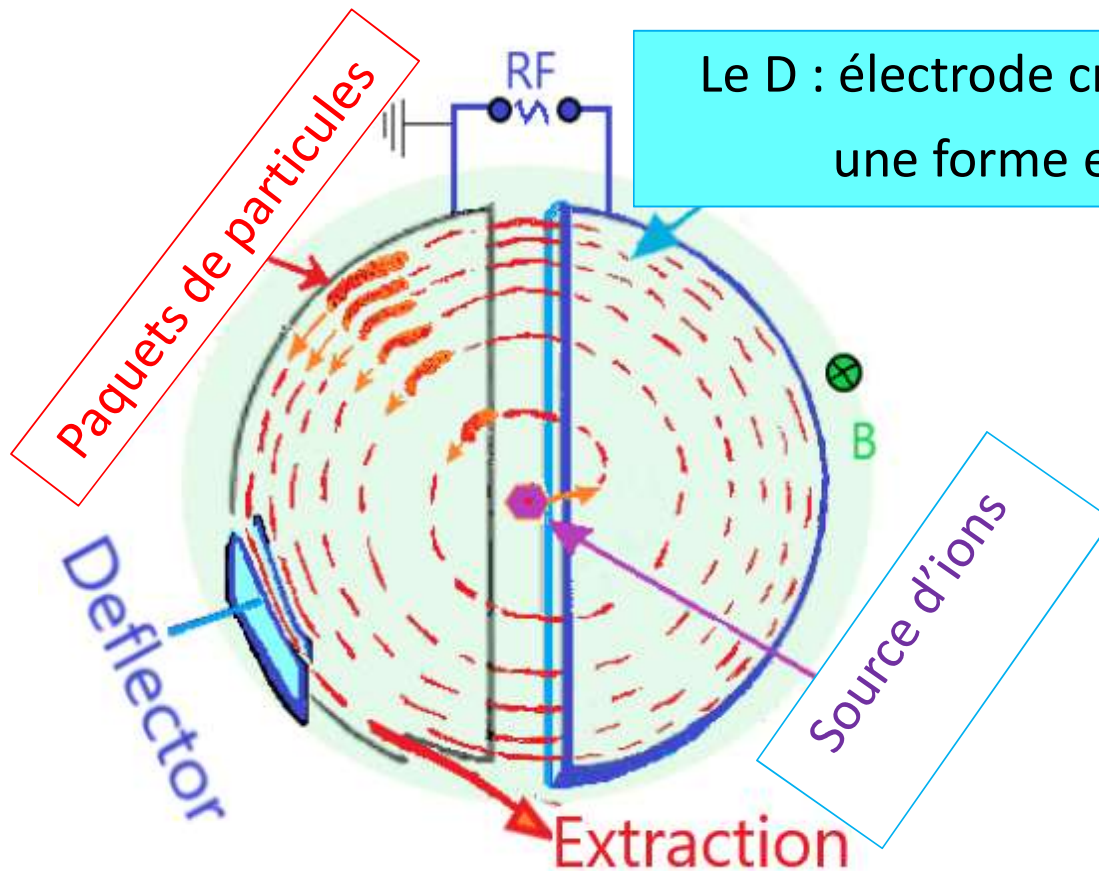
le Drift Tube Linac



CERN



Le cyclotron : pour faisceau d'ions, $E_k \ll \text{GeV}$

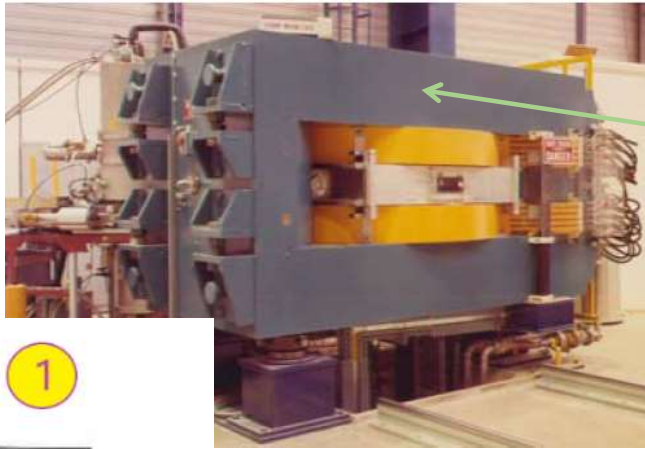


Le D : électrode creuse avec une forme en D

Cyclotron = Accélérateur radiofréquence

Les particules doivent être synchronisées avec l'accélération RF (le D)

Le cyclotron : les composants



1) Une Source d'ions

Electro-Aimant (B_z):

2) Culasse

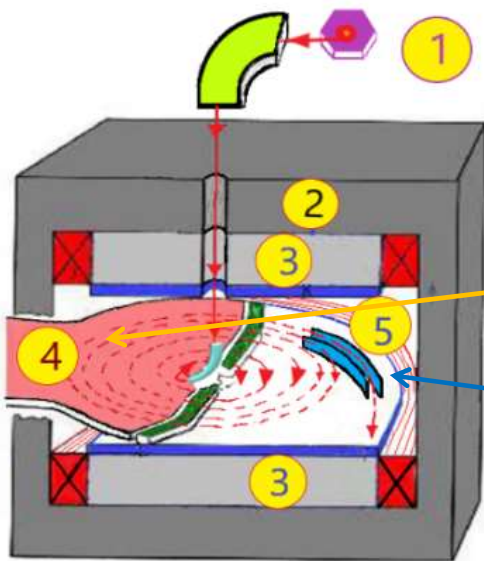
3) Poles

+ Bobines

4) Cavité résonnante
radio fréquence

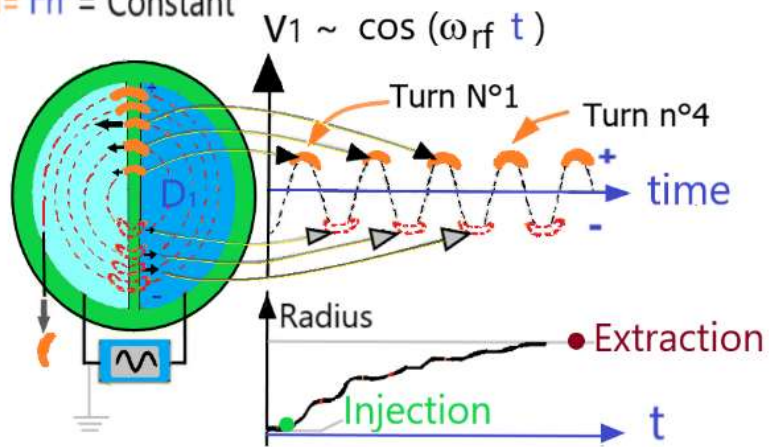
Le D

5) Déflecteur Electrostatique



Le cyclotron : comment synchroniser l'accélération RF

$F_{\text{revolution}} = F_{\text{rf}} = \text{Constant}$



Equation dans le champ magnétique B_z (non relativiste)

Coordonnées cylindriques $(\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_z, \mathbf{e}_\theta)$

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q (v_\theta \cdot B_z) \cdot \mathbf{e}_r$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q (v_\theta \cdot B_z) \cdot \mathbf{e}_r$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left(\frac{\|\mathbf{v}\|^2}{R} \right) \cdot \mathbf{e}_r$$

$$R = m v_\theta / q B_z$$

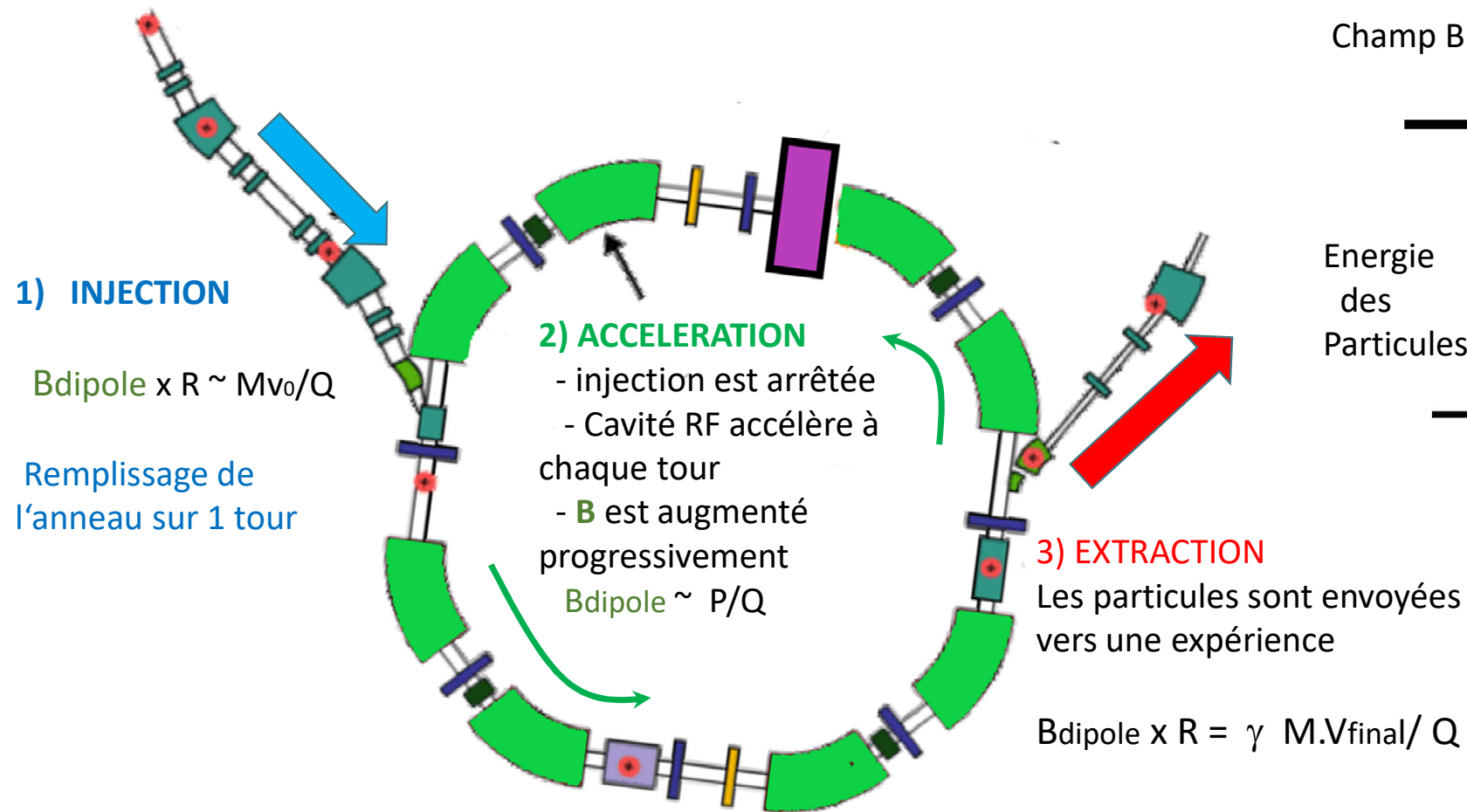
$$F_{\text{revolution}} = \frac{v}{2\pi R} = \frac{q B_z}{2\pi m}$$

Comment synchroniser avec l'accélération RF ?

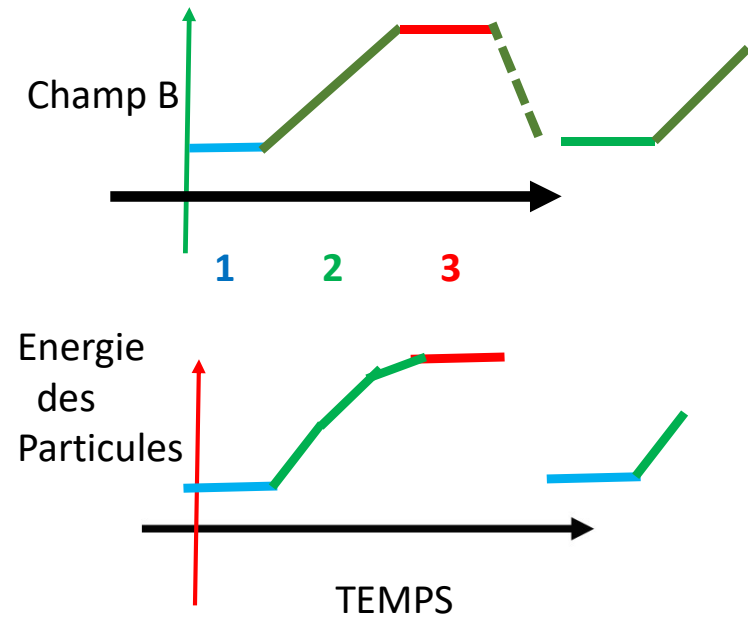
F_{RF} = multiple de la fréquence de révolution

$$F_{\text{RF}} = H \cdot F_{\text{revolution}}$$

Le synchrotron : faisceau « pulsé », à très haute énergie



Cycles du synchrotron



Le CERN:

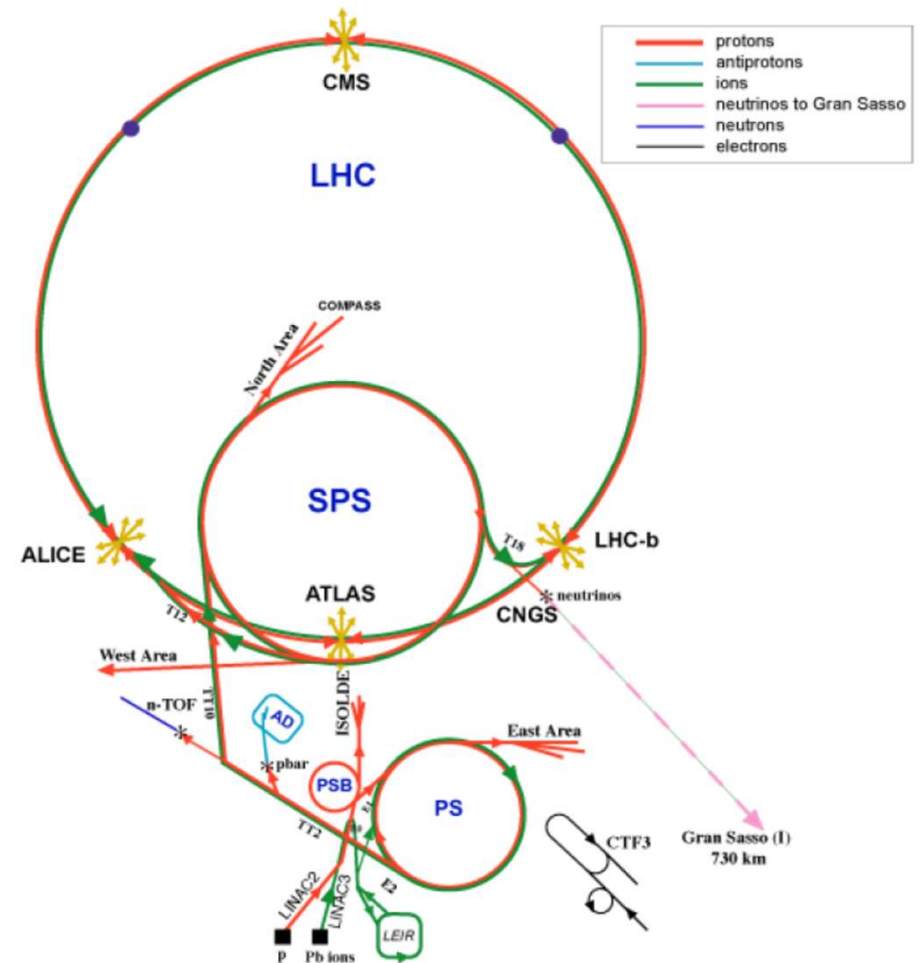
Une cascade de 4 synchrotrons pour atteindre une énergie de $E_k = 7 \text{ TeV}^*$

- Source de Protons
- RFQ : Quadripôle Radio Fréquence
- Linac
- Synchrotron N°1 PS Booster
- Synchrotron N°2 PS C= 628m
- Synchrotron N°3 SPS C=7 km
- Synchrotron N°4 LHC C=27 km

$\text{TeV}^* = \text{Tera electronVolt} = 10^{12}$

$\text{GeV} = \text{Giga electronVolt} = 10^9$

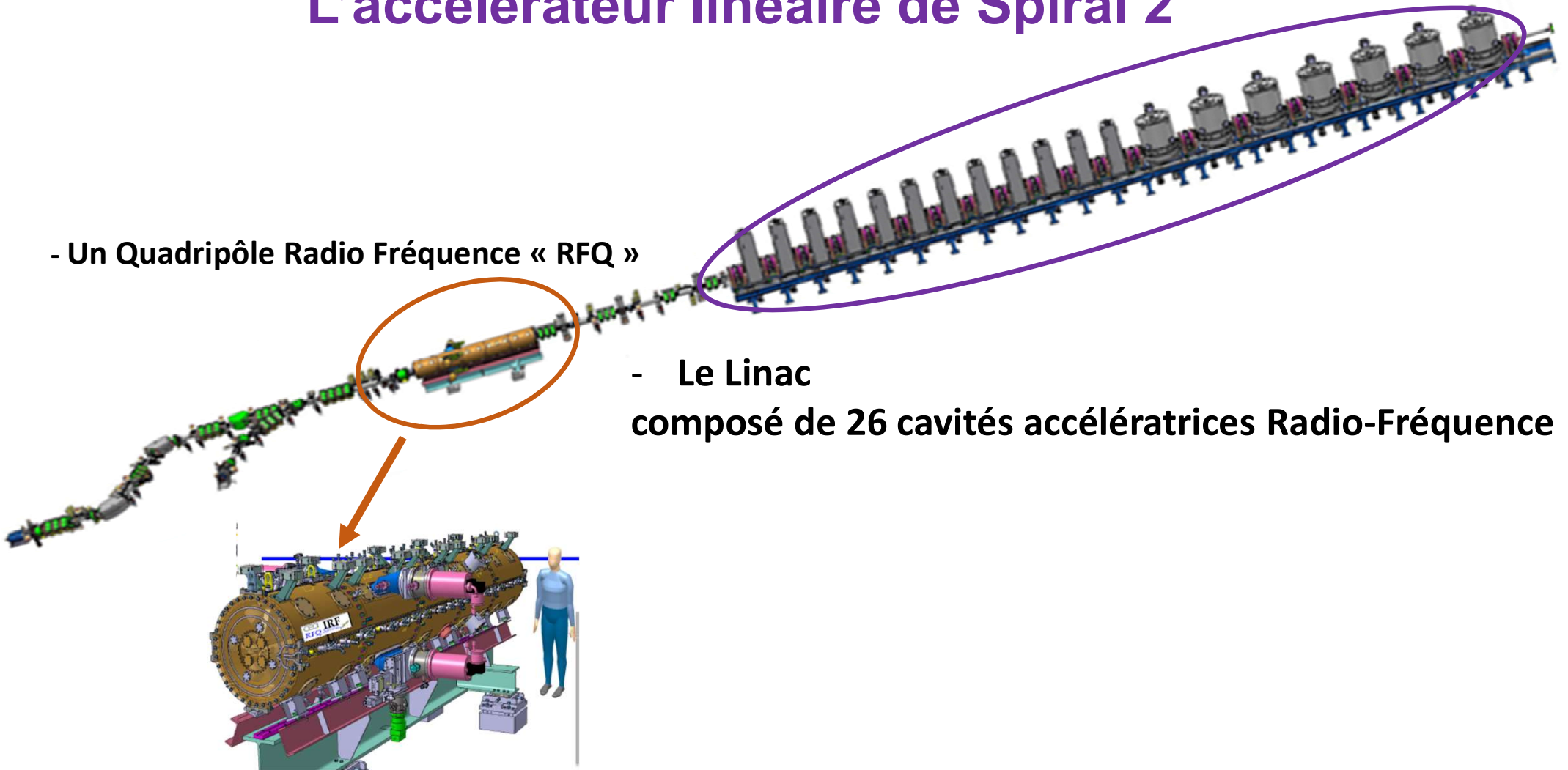
Dans le LHC Vitesse d'injection = 99,999700% de c $E_k = 400 \text{ GeV}$
 Vitesse finale = 99,999999% de c $E_k = 7000 \text{ GeV} = 7 \text{ TeV}$



L'accélérateur linéaire de Spiral 2

- Un Quadripôle Radio Fréquence « RFQ »

- Le Linac
composé de 26 cavités accélératrices Radio-Fréquence

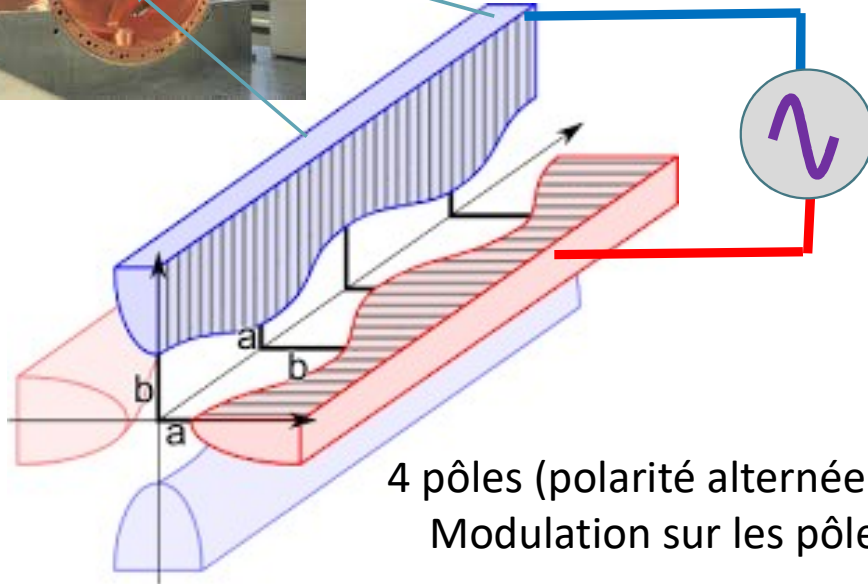
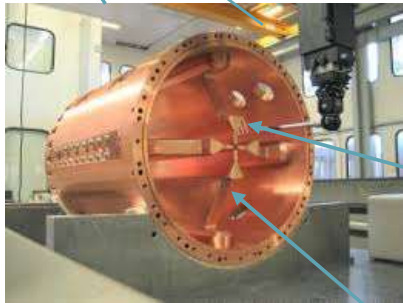




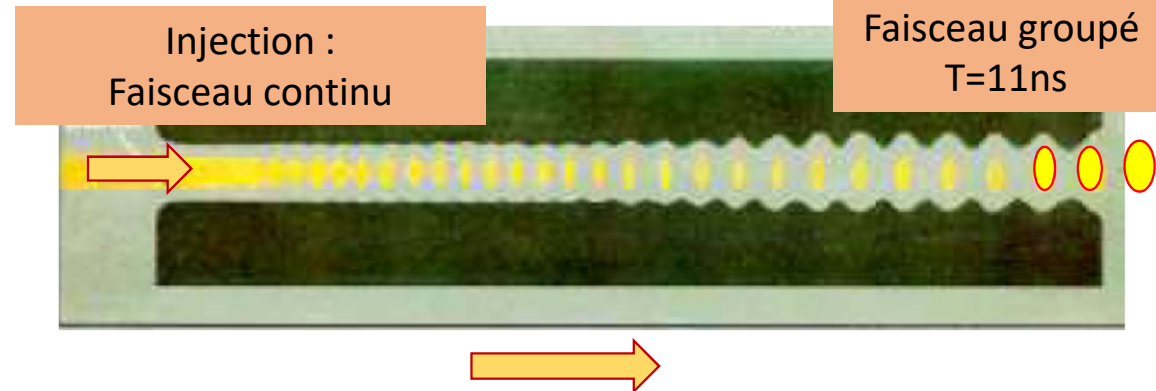
Le RFQ du linac de Spiral 2

Profs au **GANIL**

- Un **Q**uadripôle **R**adio **F**réquence **RFQ** ($F=88\text{MHz}$)
 Accélère les particules
 Focalise les particules
 Groupe (idéal pour la synchronisation // accélération dans le linac)

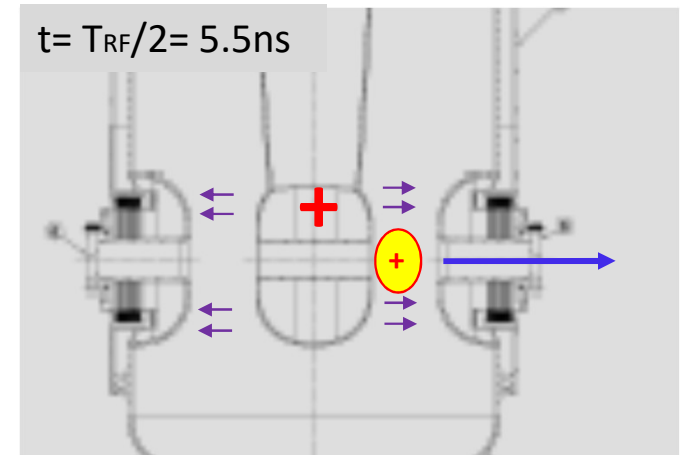
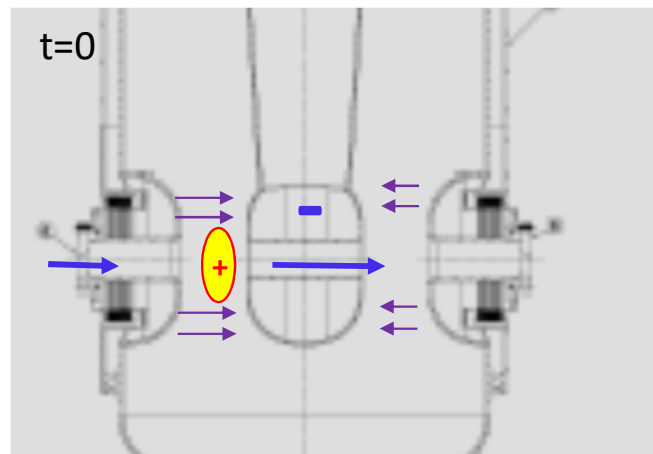


4 pôles (polarité alternée) génère un Champ Electrique transverse $E_x E_y$: focalise
 Modulation sur les pôles champ longitudinal E_z : accélère et groupe



Les cavités du Linac de Spiral 2

- Des cavités supraconductrices résonnantes ($F=88\text{MHz}$)
Accélèrent les particules groupées par le RFQ



-2 zones d'accélération avec un champ électrique \vec{E}

Une électrode creuse sans champ électrique ou circulent les particules

- Les parois de la cavité **en supraconducteur** (nobium refroidi à $T=4$ Kelvins)

diminue les pertes de puissance (effet Joule) : $P_{\text{pertes}} = R I^2$ avec $R \sim 0$

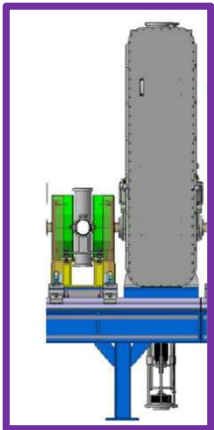
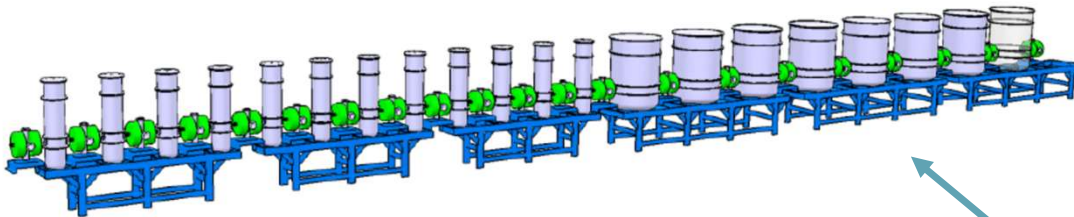
- Le volume de la cavité conçu pour résonner à la fréquence RF: $F_{\text{excitation}} = F_{\text{propre}}$
réduit la puissance requise



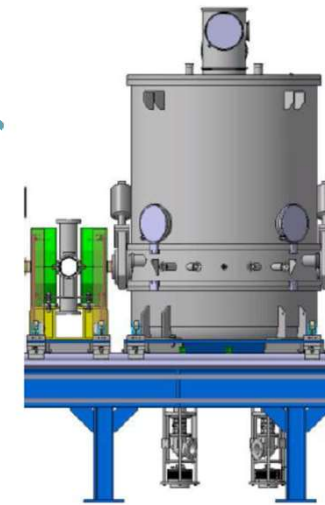
Linac Spiral2

2 modèles de cavités accélératrices
basse vitesse et haute vitesse

Profs au **GANIL**



Géométrie optimale pour $\beta=v/c=0.07$
7% de vitesse de la lumière



Géométrie Optimale pour $\beta=v/c=0.12$

Accélérateur Radio fréquence **versus** Electrostatique

Accélérateur Radio fréquence

$$E \sim \sin(\omega t)$$

Faisceau en paquet: synchronisation requise

Addition d'une multitude d'accélération

Avec des cavités accélératrices résonantes

Presque pas de limite en énergie

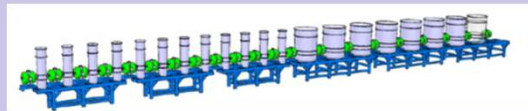
Utilisation

CYCLOTRONS

LINAC

SYNCRHOTRONS

...



Accélérateur Electrostatique

Champ électrique statique

Faisceau continu

Très haute tension requise (limite)

limite en énergie (claquage)

Utilisation

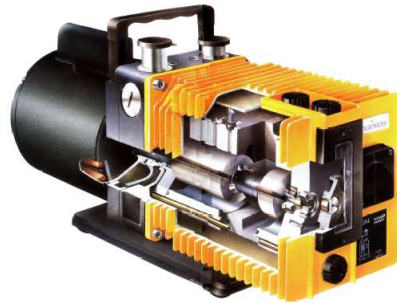
Pré-accélération (source)

Van de Graaf

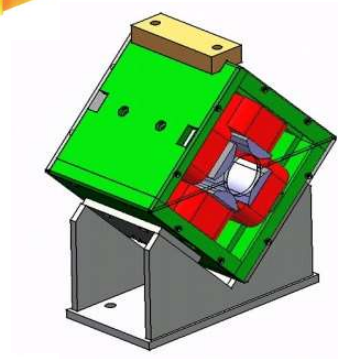
Tandem Van de Graaf

Les composants d'un accélérateur de particules

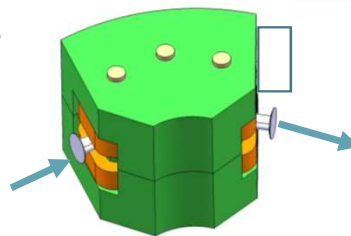
Les pompes à vide



Les quadripôles magnétiques



Les dipôles magnétiques



...Cavités accélératrices RF, ...sources de particules chargées, cryogénie (supra...)

Le vide dans un accélérateur de particules

Objectif : Réduire les interactions des particules accélérées avec les atomes de l'air

Pression résiduelle requise dans un accélérateur : de 10^{-9} à 10^{-13} bar suivant le type d'accélérateur
Technologies : Pompes, Analyseurs de gaz, vanne d'isolement, Jauges de pression


TECHNOLOGIES DU VIDE

| Pompes primaires (200) | |
|--|--|
| A Huile | Sèches |
|  Pascal 2015 (Alcatel) |  XDS35 (Edwards) BA100 (Busch) |
|  Duo M10 (Pfeiffer) |  ACP120 (Pfeiffer) |

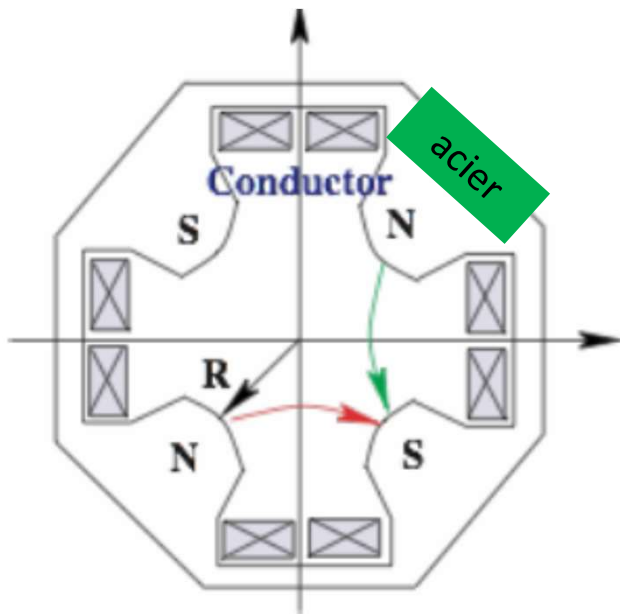
| Pompes secondaires (200) | |
|---|---|
| Cryogénique | Turbomoléculaire |
|  CT8 (Brooks) |  Coolvac (Leybold) |
|  V750 (Agilent) |  STP603 Edwards (Agilent) |

| Analyseurs (20) | |
|---|---|
|  Microvision (MKS) |  Prisma (MKS) |

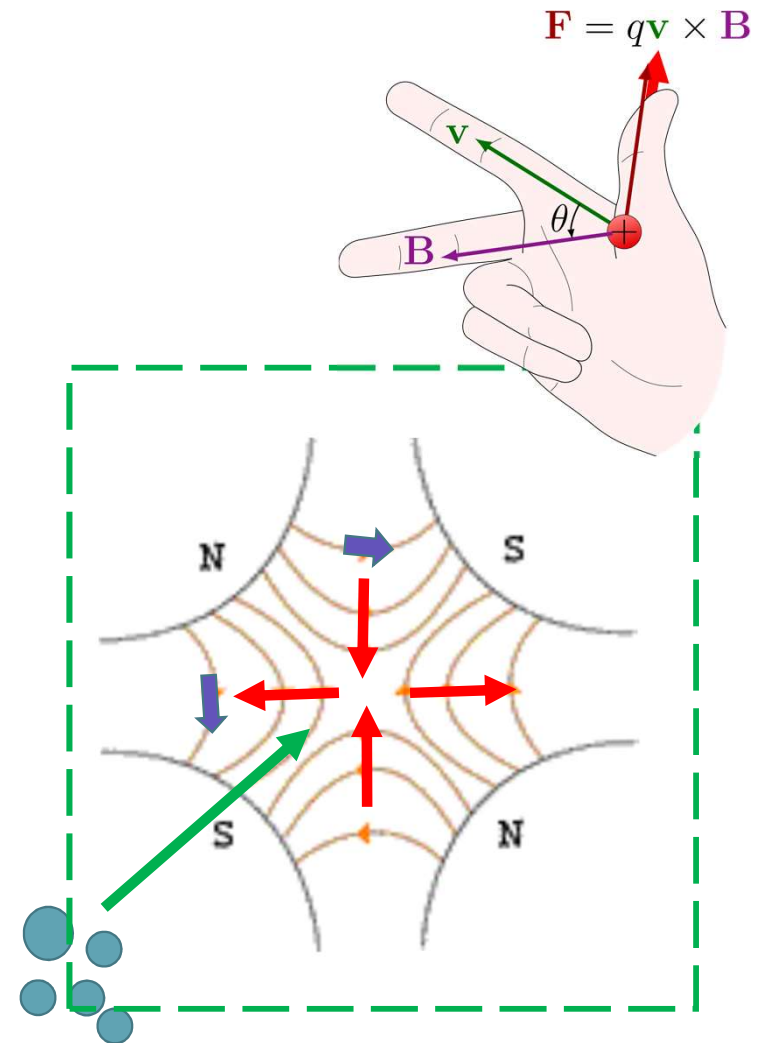
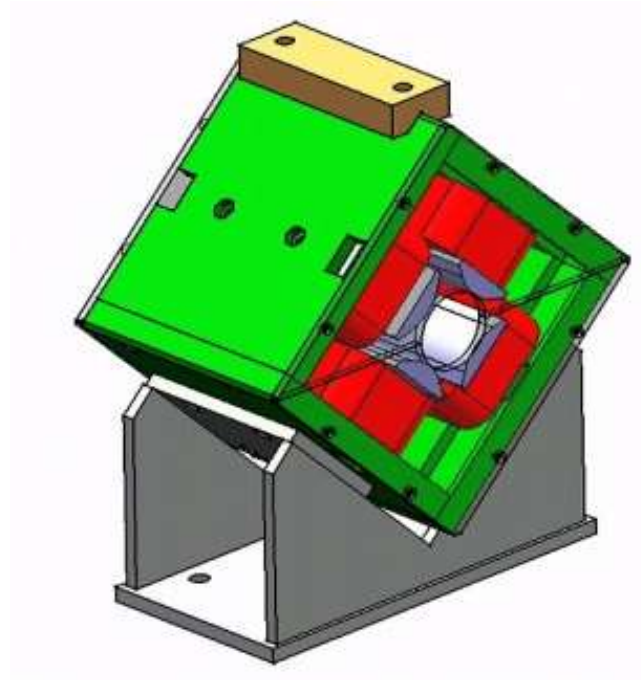
| Vannes (600) | |
|---|--|
|  tiroir série 10 (VAT) |  Équerre, série 26 (VAT) |
|  Vannes rapides, série 75 (VAT) | |

| Jauges (600) | |
|---|---|
| Primaires | |
|  TPR10 (Pfeiffer) |  PI2 (Alcatel) |
| Secondaires | |
|  422 (MKS) |  Bayard Alpert (SVT) |
|  PBR260 (Pfeiffer) | |
| Contrôleurs | |
|  TPG 300 (Pfeiffer) |  937 (MKS) |

Les quadripôles magnétiques focalisation et défocalisation

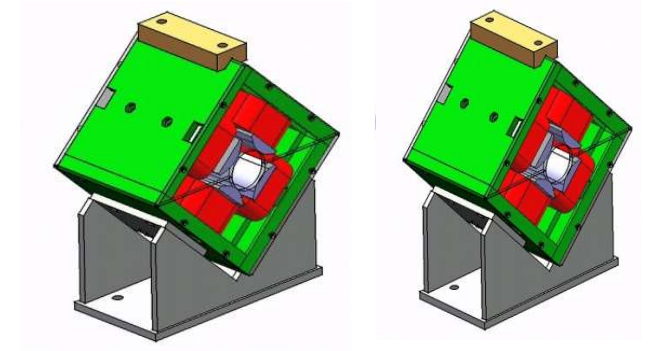


$B_x = G.Y$ champ horizontal
 $B_y = G.X$ champ vertical
 $B_z = 0$

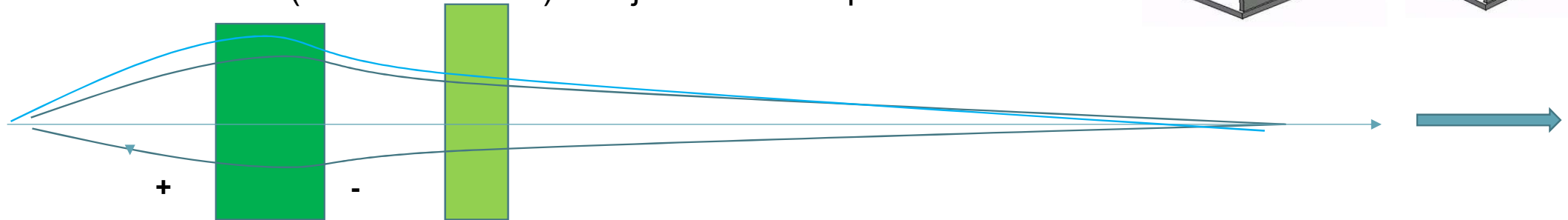


Forces dans un quadripôle

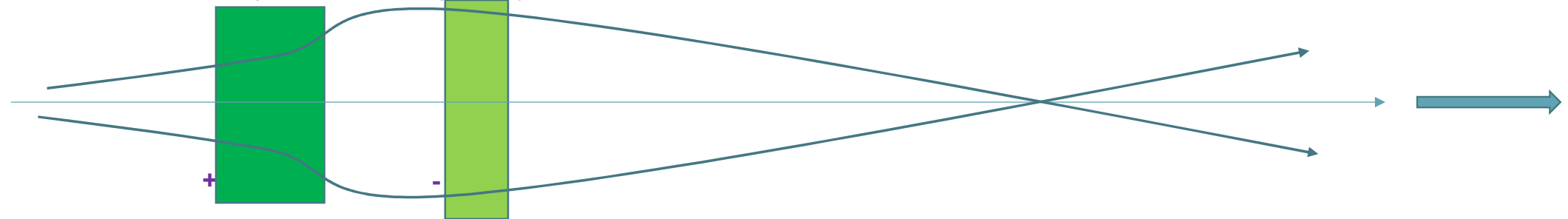
Focalisation avec 2 quadripôles magnétiques de polarité alternée



Plan horizontal (vue du dessous) : trajectoires de 4 particules



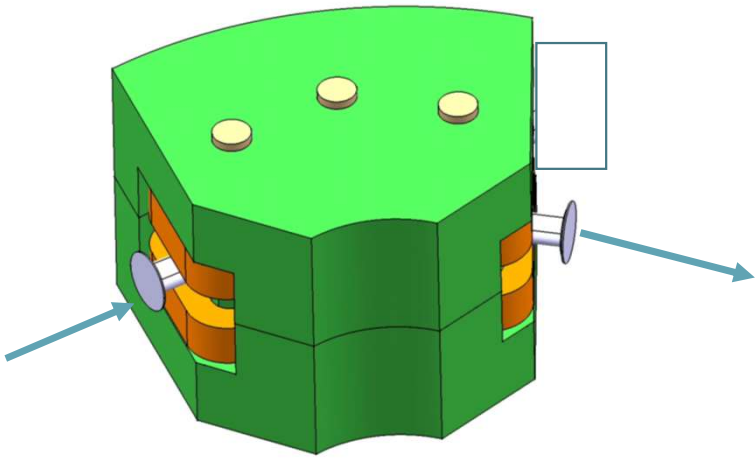
Plan vertical (vue de côté) : trajectoire de 3 particules



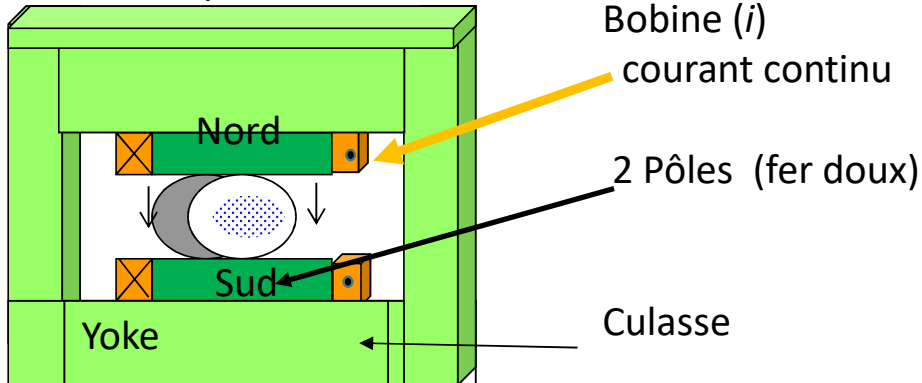
$B_x = G.Y$ champ horizontal
 $B_y = -G.X$ champ vertical
 $B_z = 0$

$F_x \sim q V_z . B_y \sim x$
 $F_y \sim q V_z . B_x \sim y$

Les dipôles magnétiques



Vue en coupe



Intérêts :

1) Dévier les particules d'un angle donné

- (guidage vers une expérience)

2) Faire tourner les particules dans un accélérateur circulaire (cyclotron, synchrotron)

3) Analyser la nature des particules (m,v, q)

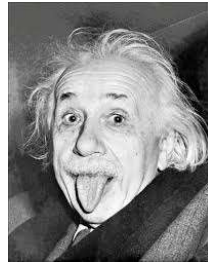
Rayon de courbure $R = Mv / q B$

Mesure de la trajectoire circulaire R dans B connu

Mesure de B et $R =$ Mesure de Mv/Q

$$Mv / Q = B \times R$$

Les concepts dans les accélérateurs de particules

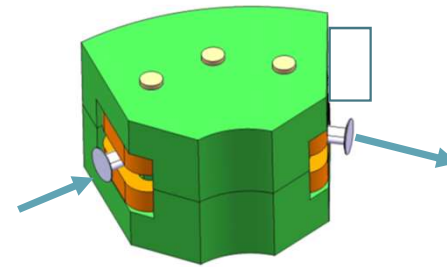


-La relativité restreinte

-Force magnétique versus force électrique

-La rigidité magnétique (le $B\rho$)

-Les spectromètres pour mesurer (m , v ou q) (le $B\rho$)



La relativité dans les accélérateurs de particules : vitesse proche de celle de la lumière

-Le temps est relatif: dépend du référentiel ???

Il faudrait utiliser le temps propre τ pour chaque particule pour exprimer les équations du mouvement et les quantités conservées (\mathbf{P} , Energie)

$$\tau = t_{\text{labo}} / \gamma$$

$$\frac{d}{d\tau} = \gamma \frac{d}{dt}$$

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

-La quantité de mouvement relativiste \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = m \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \gamma m \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

(à basse vitesse $P_{\text{classique}} = m\mathbf{v} = m \frac{d\mathbf{r}}{dt}$, à haute vitesse on ne doit pas utiliser t mais τ)

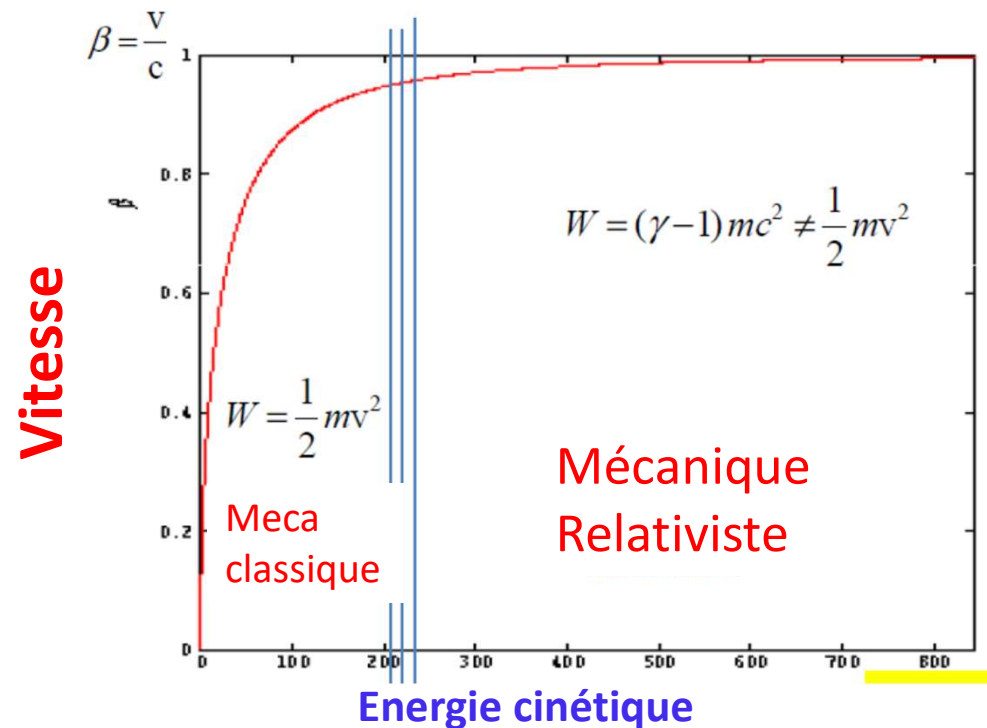
$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{d}{dt} m \gamma \mathbf{v} = \mathbf{F}$$

La relativité dans les accélérateurs

-L'énergie totale d'une particule $E_{\text{totale}} = \gamma m c^2$

-L'énergie au repos ($v=0$, $\gamma=1$) $E_0 = m c^2$

-L'énergie Cinétique $E_{\text{cinétique}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{repos}} = (\gamma - 1) m c^2$



Augmenter l'énergie :

permet d'approcher
asymptotiquement
la vitesse c .

A haute énergie
La vitesse n'évolue
presque pas.
(voir LHC@CERN)

Concept : Forces magnétiques versus forces électriques

Forces générées par les champs : $\vec{F} = q [\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$

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

Travail des Forces ΔW (changement d'énergie) sur la trajectoire d'une particule

$$\Delta W = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r}$$
$$\Delta W = \int q \left[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right] \cdot d\vec{r} = \int q \vec{E} \cdot d\vec{r} + \int \left[\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{B} \right] \cdot d\vec{r} = \int q \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$= 0 \quad (\vec{v} \times \vec{B}) \perp d\vec{r}$

Seul le champ électrique \vec{E} change l'énergie

Le champ magnétique \vec{B} n'induit pas de changement d'énergie ΔW (F_{Lorentz} et le produit vectoriel)

Définition : La rigidité magnétique $B\rho = \gamma m v / q$

Comment calculer la trajectoire d'une particule dans 1 dipôle magnétique ?



$$\frac{dp}{dt} = m\gamma \frac{dv}{dt} = q (v_{\theta} \cdot B_z) \cdot e_r \quad m\gamma \frac{v^2}{R} = q \cdot v B_z$$

$$B_z \cdot R = \gamma m \frac{v}{q}$$

Objectifs : Calculer facilement la trajectoire dans un champ B uniforme $R = B\rho / B$

Régler les champs magnétiques B des dipôles

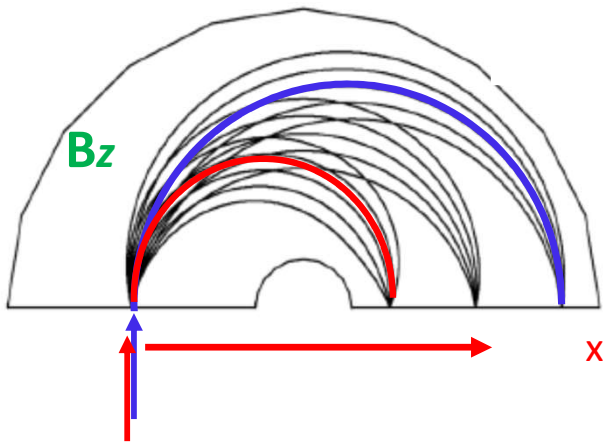
Pour les particules d'intérêt (m,v ,q) , on calcule le « BéRO » : $B\rho = \gamma m v / q$
unité du $B\rho$: le Tesla.mètre

Comment faire tourner une particule de $B\rho = 2.00$ Tesla.mètre sur un rayon $R=1m$?

$$B_z = B\rho / R = 2.00 \text{ Teslas}$$

Avec un champ magnétique de 2.00 T.

Le spectromètre avec 1 dipôle de 180° et un champ B_z uniforme



Position d'une particule à la fin du dipôle magnétique de 180°

$$x_1 = 2 R_1 = B_{\rho 1} / B_z = 2 m \frac{v_1}{q B_z}$$

Position d'une particule N°2 à la fin du dipôle de 180°

$$x_2 = 2 R_2 = 2 m \frac{v_2}{q B_z}$$

$$x_2 - x_1 = 2 \left(m \frac{v_2}{q B_z} - m \frac{v_1}{q B_z} \right) \sim k. (B_{\rho 2} - B_{\rho 1})$$

on peut expliciter pour tout spectromètre $x_2 - x_1 = D. (B_{\rho 2} - B_{\rho 1}) / B_{\rho 1}$

D est la dispersion du spectromètre (D s'exprime en mètre)

Mesurer x et B_z : donne des informations sur B_{ρ} , c.a.d. sur (m, q, v)

Les accélérateurs de particules

Bertrand Jacquot

Durée 1H30



Une application des accélérateurs de particules: Radiothérapie

Un accélérateur linéaire RF électrons pour la médecine

1 accélérateur linéaire $\sim 40\text{cm}$
 $\sim 10\text{ MeV}$

Dans un bras rotatif

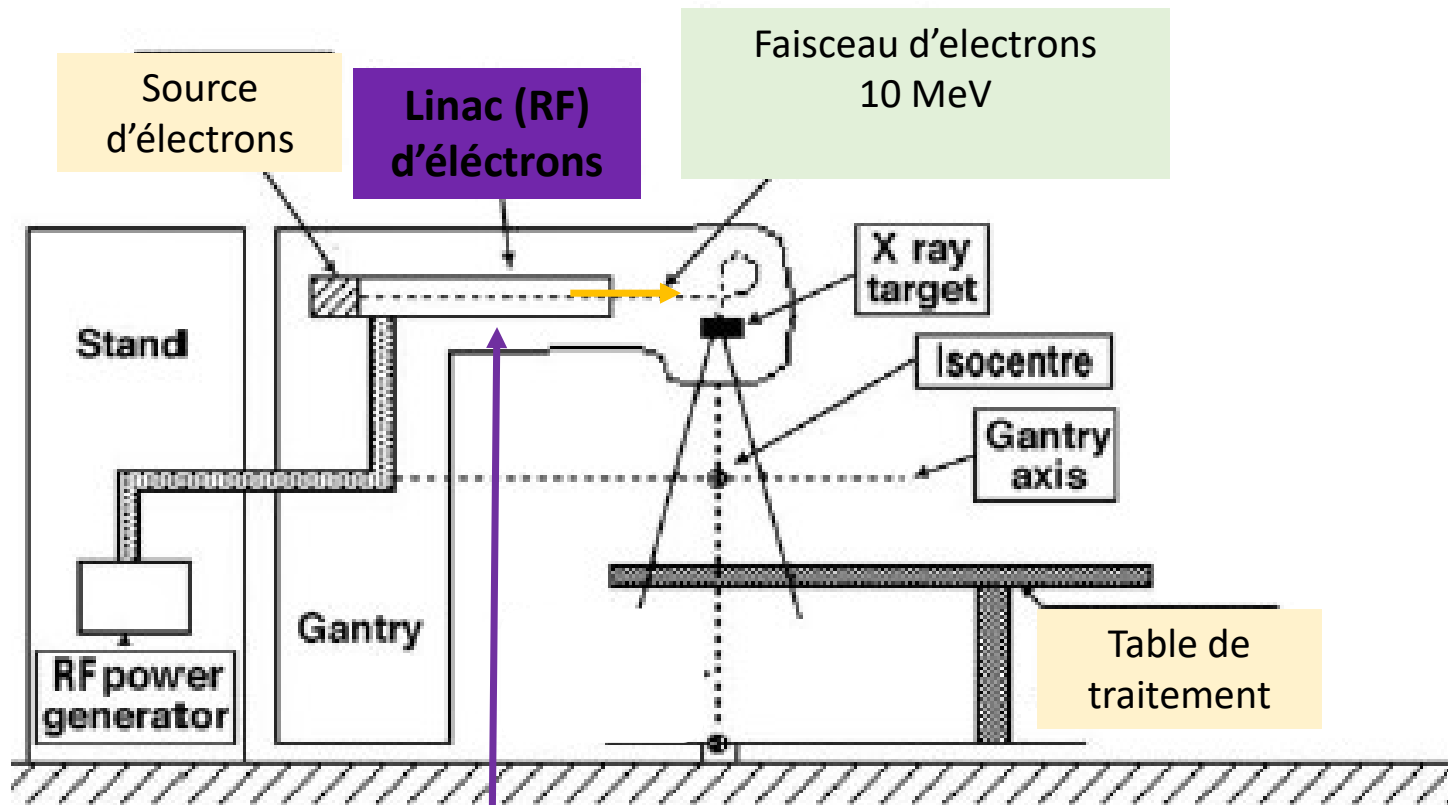


Le faisceau d'électron est arrêté sur
une cible en tungstène
génère des photons
Permettant d'irradier et de tuer les
cellules cancéreuses :

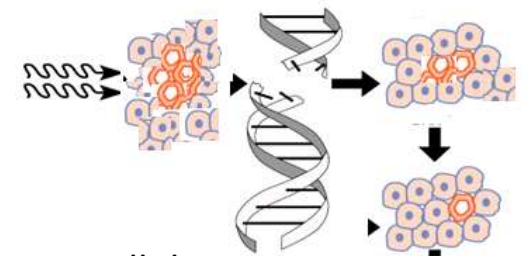
**400 accélérateurs en France
de ce type**



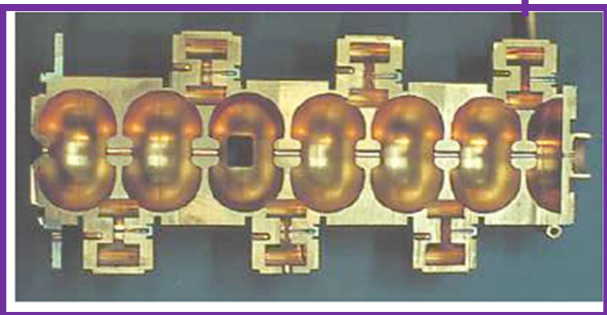
Radiothérapie avec un petit Linac à électrons : « rayons »



Irradiation avec des photons de haute énergie



Génère des dommages aux cellules
les cellules cancéreuses sont plus
affectées que les cellules normales



Les différents types d'accélérateurs : la course à l'énergie maximale

La course à l'énergie maximale :

découverte de nouvelles particules à chaque nouveau record en énergie...

Energie Max dans 1 Van der Graf : 40 MeV (Tandem)

Energie Max dans un cyclotron : 600 MeV protons

EMax Synchro-cyclotron $\sim 1000\text{MeV}=1\text{GeV}$

EMax Synchrotron LHC $7000\text{ GeV} = 7\text{ TeV}$

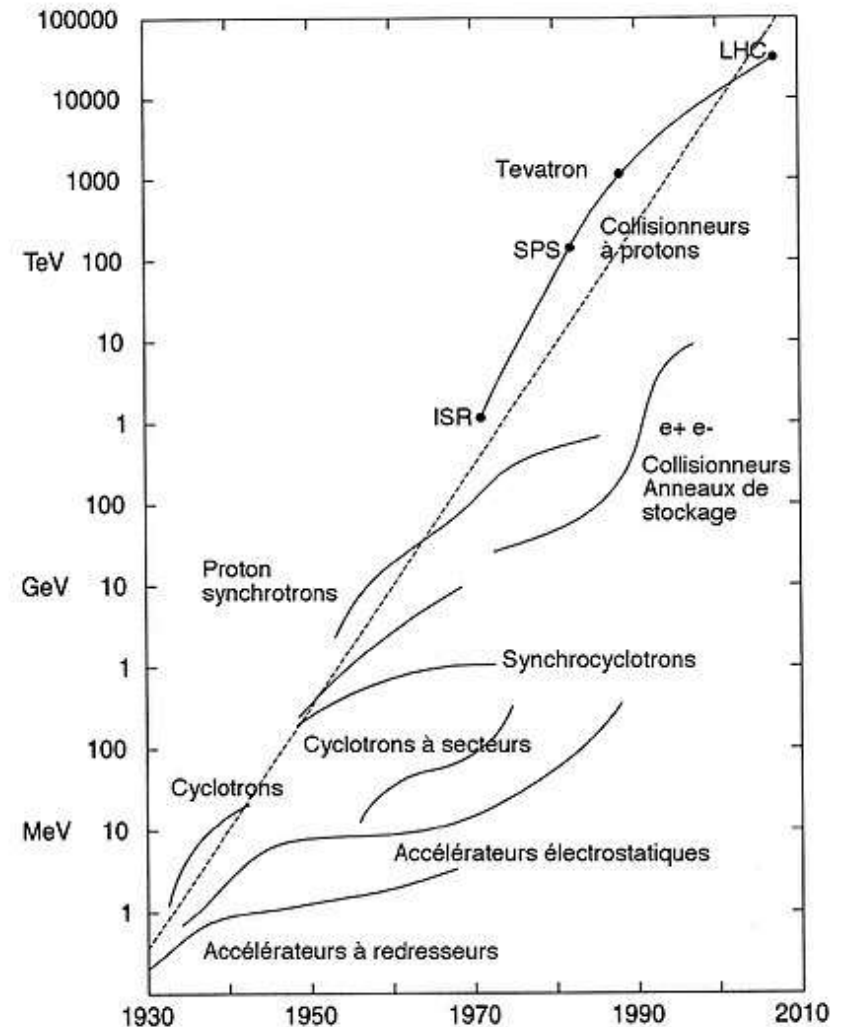
Dernières découvertes d'une particule dans un accélérateur:

Preuve de l'existence des quarks au SLAC (Californie) : 1968,...

Z_0 et W^+ et W^- au Cern : 1983

t Quark top au Fermilab (USA) : 1995

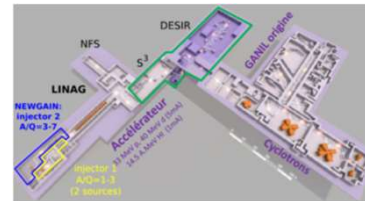
H Le boson de Higgs au Cern: 2012



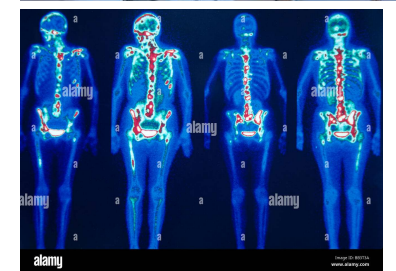
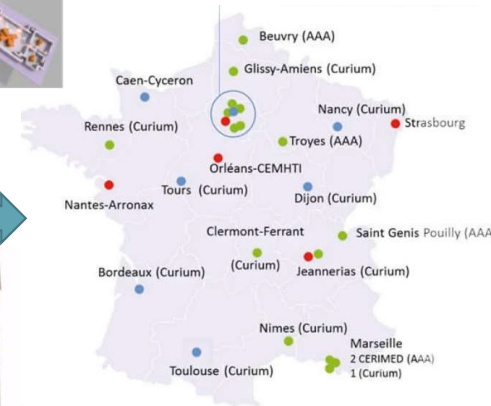
Les accélérateurs en France

2 synchrotrons d'électrons pour la recherche (rayonnement synchrotron = source X monochromatique)
ESRF_GRENOBLE (500 pers) , SOLEIL_SACLAY (450 pers.)

5 cyclotrons + 1 linac pour les ions dédiée à la recherche
GANIL_CAEN (~ 280 pers)



31 Cyclotrons à protons pour produire des radio-isotopes pour la médecine
PARIS, NANTES, MARSEILLE,, CAEN_CYCERON, ...
($^{18}\text{F}^*$ pour les scintigraphies et autres imageries, ...)



3 synchro-cyclotrons pour irradier des patients
avec des protons (« proton thérapie »)
CAEN (ARCHAD) , CPO_ORsay, NICE



7 accélérateurs d'ions de petite dimension recherche (matériaux, datation,...)

(14-2MV Van de Graaf) ALTO, ANDROMEDE, ARTEMIS, New AGLAE (région parisienne), ASTER(Aix en Provence)

7MV tandem & 4MV : Applications militaires CEA-DAM (région parisienne)

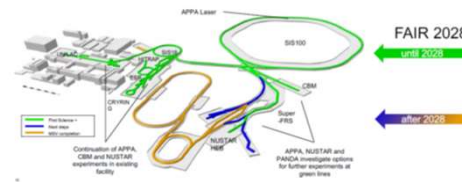


Les grands accélérateurs en Europe

CERN (Suisse France) : 5 très grand synchrotrons protons et ions pour la recherche

PSI (Suisse) : Cyclotron à proton le plus puissant du monde pour la recherche

+Linac à électrons SwissFEL + cyclotron médical



GSI-FAIR (Allemagne) : Synchrotrons à ions pour la recherche

DESY (Allemagne) (Deutsches Elektronen-Synchrotron) est un important centre de recherche Europe en physique des particules et en rayonnement synchrotron. DESY à Hambourg.

3 Synchrotron médicaux

irradier des patients avec des ions (C,O,Ne) : hadronthérapie

Heidelberg (Allemagne) , (Autriche), Pavie (Italie)



1 très gros projet européen: ESS (suède) , LINAC 2GeV pour la production de neutrons de haute énergie pour la recherche

