



Les accélérateurs des Particules

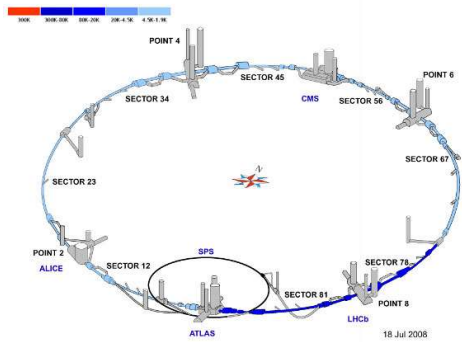
Agnès Dominjon

LAPP-IN2P3-CNRS, Université de Savoie, Annecy, France

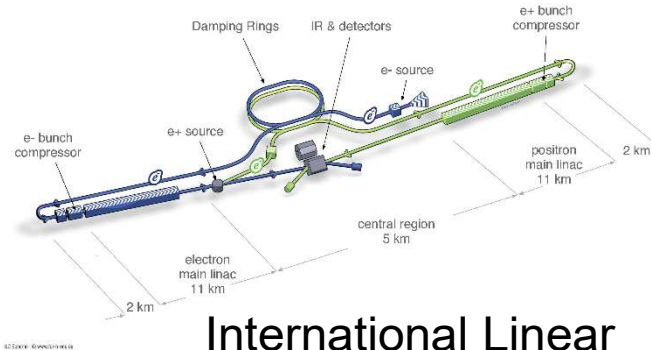


Les types d'accélérateurs

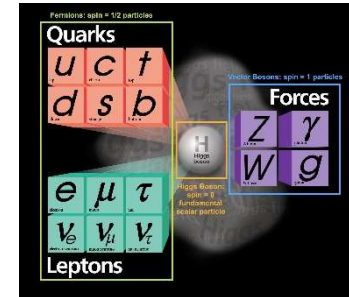
- Les collisionneurs pour étudier les particules, l'univers, la matière noire et l'espace-temps



LHC



International Linear Collider (ILC)



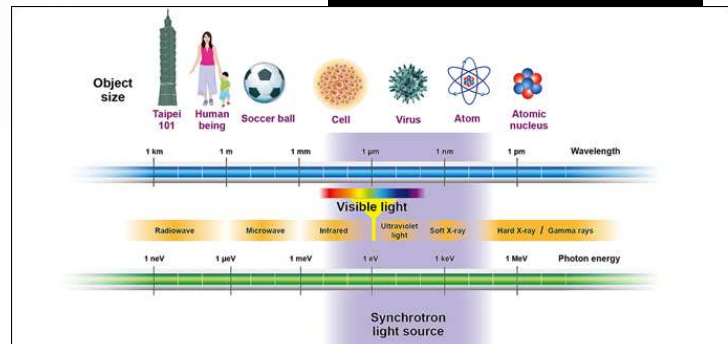
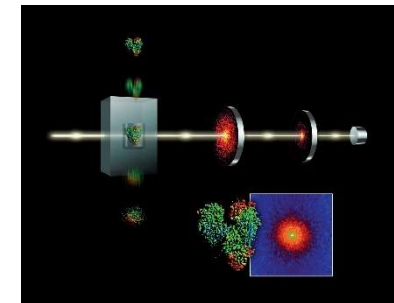
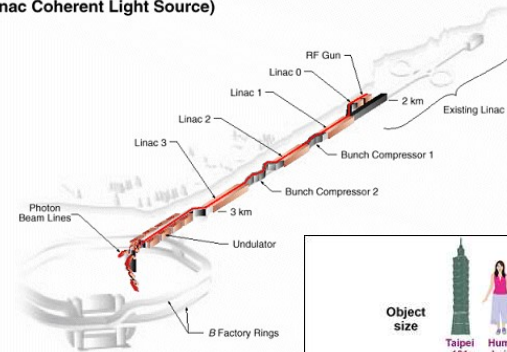
Crédit image: symmetry magazine

- Production rayonnement synchrotron et laser pour étudier la matière, les molécules et les protéines



European Synchrotron Radiation Facility (ESRF): Grenoble

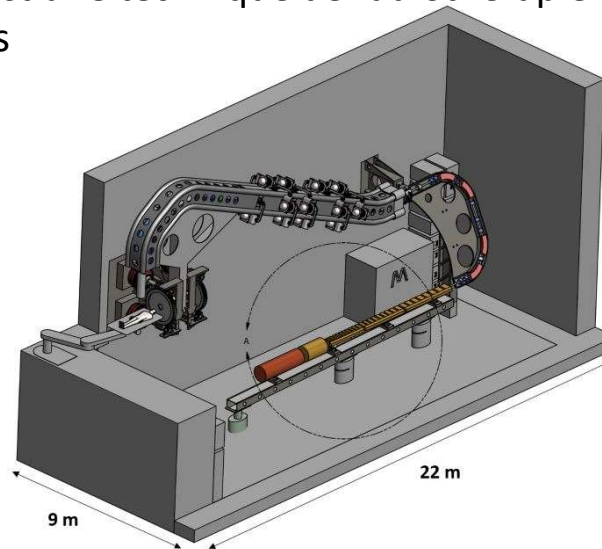
The LCLS (Linac Coherent Light Source)



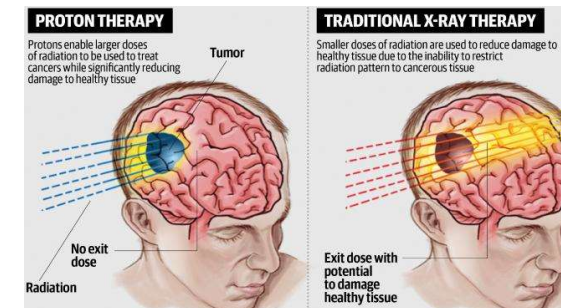
Crédit images: LCLS website et internet

Les types d'accélérateurs

- La **protonthérapie** est une technique de radiothérapie ultra précise qui utilise des faisceaux de protons



Sketch of TULIP *all-linac* solution
(courtesy of Mohammad Vaziri—TERA Foundation).



Crédit images: web

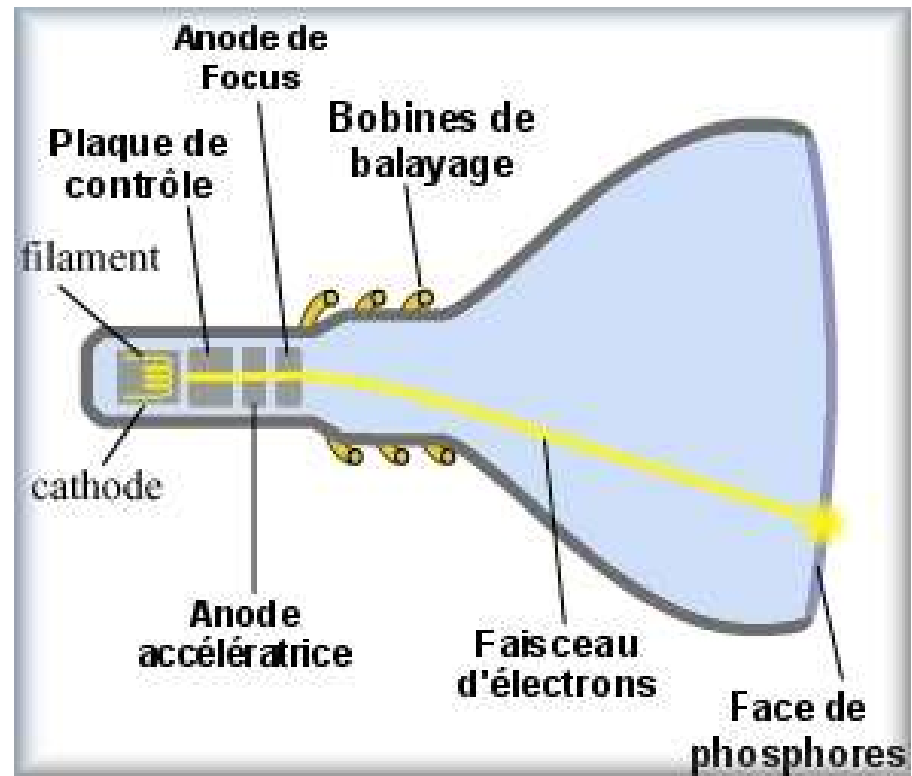
- **Accélérateurs dans l'industrie et autres applications**

- Les cartons de lait et les emballages de chips sont soudés par des faisceaux de particules (polymérisation).
- L'industrie des puces informatiques repose sur une technique appelée dopage, dans laquelle les ions bore et phosphore sont implantés dans des couches de silicium à l'aide d'accélérateurs.
- Les réacteurs nucléaires peuvent-ils être protégés contre les accidents? Oui, si les accélérateurs de particules les contrôlent.
- Les accélérateurs de muons nous permettent de voir littéralement à travers les murs. Les muons peuvent facilement passer à travers des conteneurs en acier épais et lourds, mais réagiront avec les matières nucléaires.

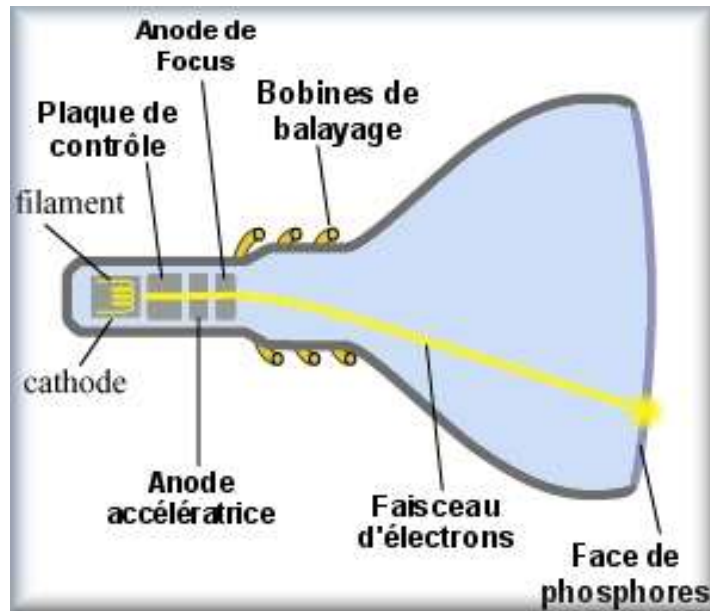


Radura symbole sur les package de la nourriture: faisceau des électrons pour tuer les bactérie E.Coli.

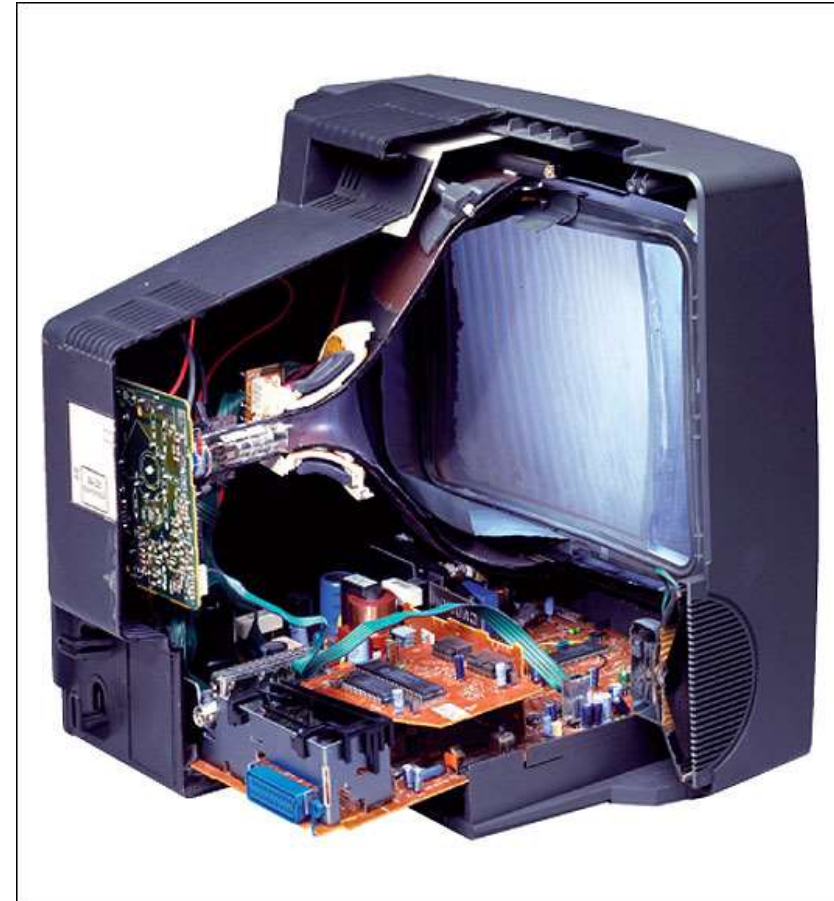
Quel est le plus simple des d'accélérateurs?



Quel est le plus simple des d'accélérateurs?



Crédit images: web



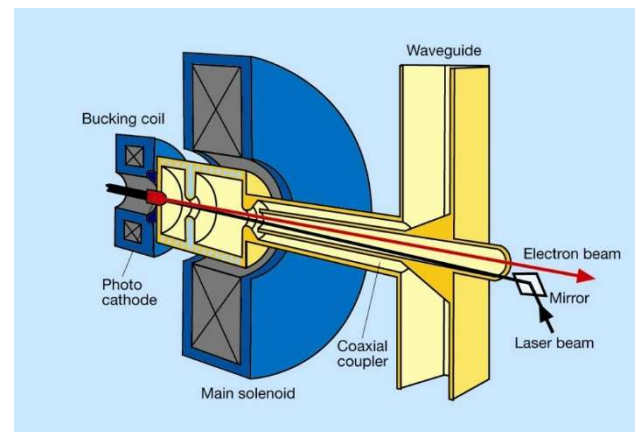
La télévision

Les accélérateurs: les sources

1 eV est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 V, dans le vide: $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

- **Les photo-injecteurs pour les électrons**

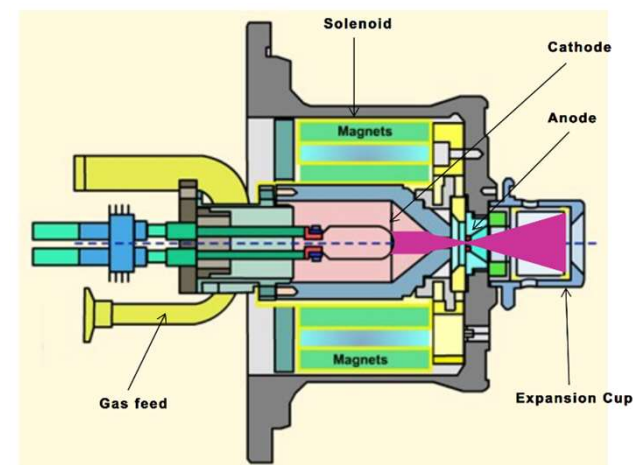
- Les photo-injecteurs utilisent la photoémission comme moyen de production du faisceau d'électrons
- Faisceau avec 10^8 - 10^{11} électrons, énergie \sim MeV
- Longueur du faisceau \sim 100 nm - mm
- Taux de répétition: Hz - MHz



Crédit image: Desy

- **La source duoplasmatron des protons du CERN**

- $\text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Énergie 90 keV (1.4% c \sim 4000 Km/s)
- $3 \cdot 10^{14}$ protons par faisceau
- Un centimètre cube d'hydrogène gazeux à température ambiante contient avec $P = 10^5 \text{ Pa}$, $V = 10^{-6} \text{ m}^3$, $T=293 \text{ K}$ en utilisant $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, $n = 4 \cdot 10^{-5}$ moles, $N = 4 \cdot 10^{-5} \times 6 \cdot 10^{23} = 2.4 \cdot 10^{19}$ molécules donc presque $5 \cdot 10^{19}$ atomes of hydrogène

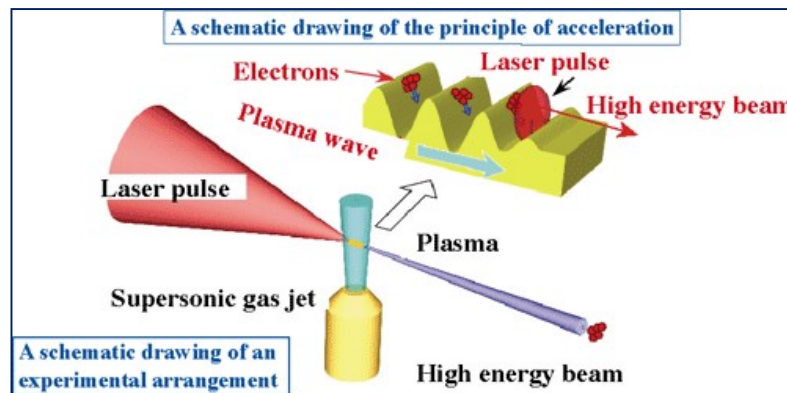
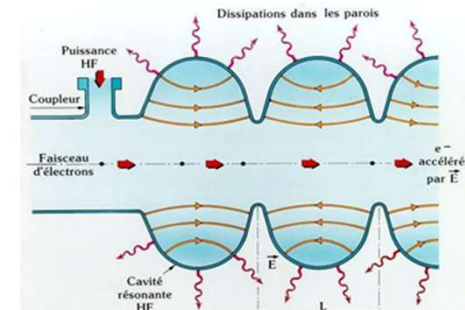
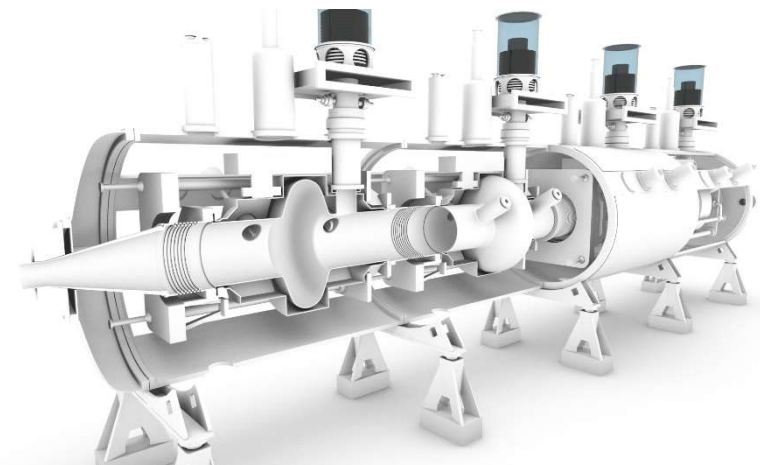


Crédit image: CERN

c = vitesse de la lumière

Les accélérateurs: cavités d'accélération

- Cavité radiofréquence (RF)
- **Une cavité radiofréquence (RF)** est une enceinte métallique qui abrite un champ électromagnétique. Son rôle principal est d'accélérer des particules chargées.
- Les cavités radiofréquences sont des résonateurs, un peu comme les caisses de résonance des instruments de musique, qui permettent de stocker et d'amplifier le champ électrique destiné à accélérer un faisceau de particules chargées dans un accélérateur.
- Le gradient d'accélération des cavités RF est limité à 100 MV/m. Futur accélérateur comme accélérateur de plasma vise à 1-100 GV/m



Crédit images: CERN

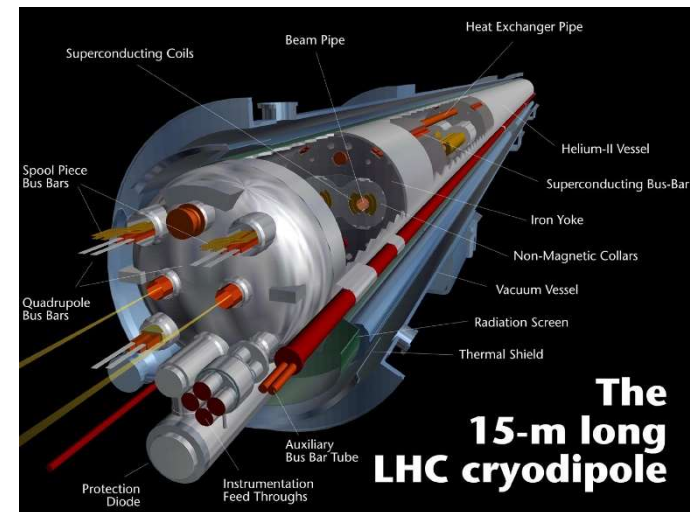
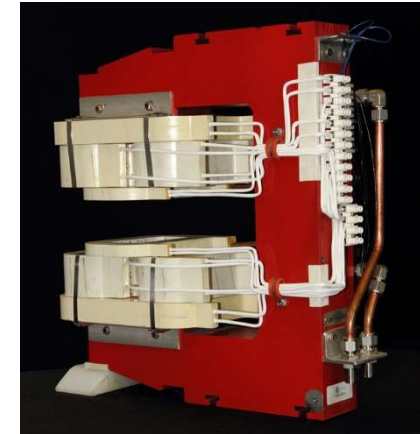
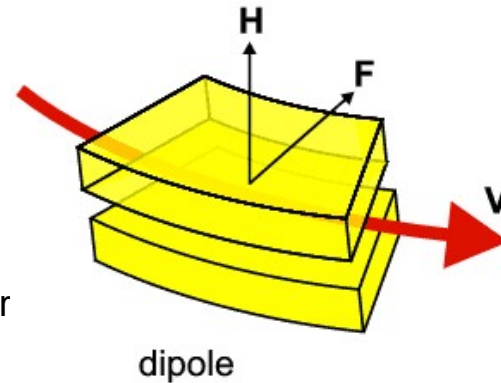
Les accélérateurs: les aimants

- Les dipôles

- Les aimants dipôles servent à incurver la trajectoire des particules.
- La force de Lorentz, ou force électromagnétique, est la force subie par une particule chargée dans un champ électromagnétique.

- $F = qE + q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

- LHC dipôles: champs magnétique dans les dipôles: 8.3T ($\approx 200000x$ le champ magnétique terrestre)
- Technologie supraconductrice: He à $-271.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (1.9K). Plus froid que l'espace intersidéral (2.7K)



Crédit image: CERN

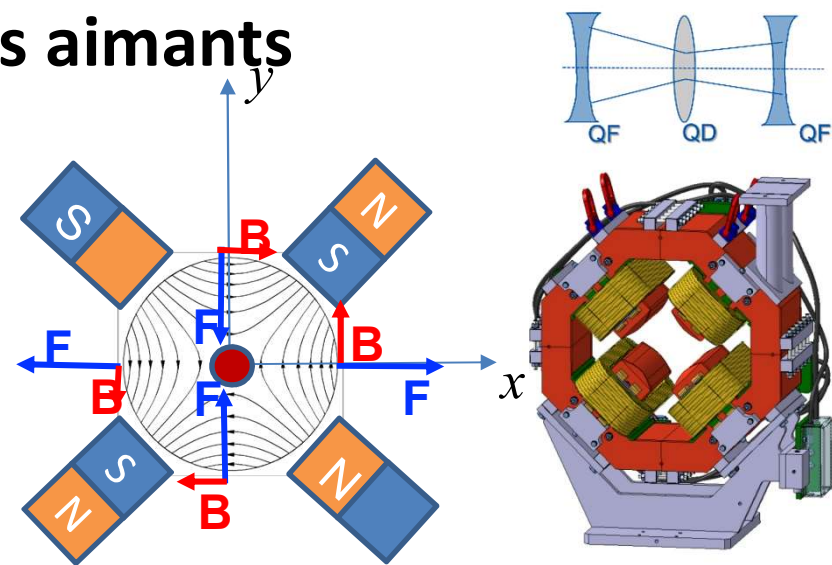
Les accélérateurs: les aimants

- **Les quadripôle -> focalisation**

- Les quadripôles permettent de resserrer le faisceau. Grâce à leurs quatre pôles magnétiques disposés symétriquement autour du tube de faisceau, les quadripôles peuvent comprimer le faisceau verticalement ou horizontalement.

- **LHC quadripôles**

- Technologie supraconductrice, He à -271.3 °C (1.9K)
- Trois quadripôles forment un système appelé triplet interne pour focaliser les faisceaux lorsque qu'ils pénètrent dans les détecteurs. Les triplets internes, les rendant 12,5 fois plus fins, leur largeur passant de 0,2 millimètres à 16 micromètres.

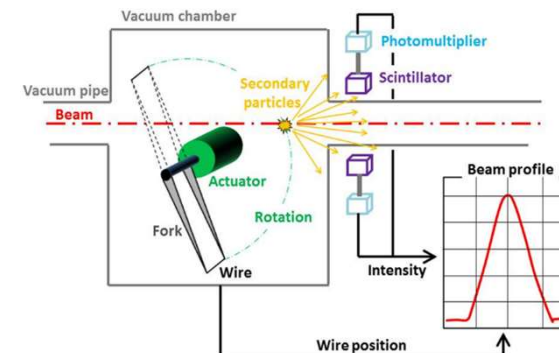
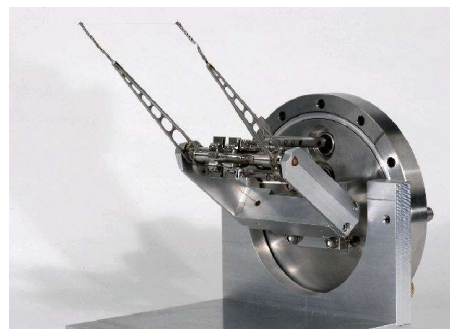
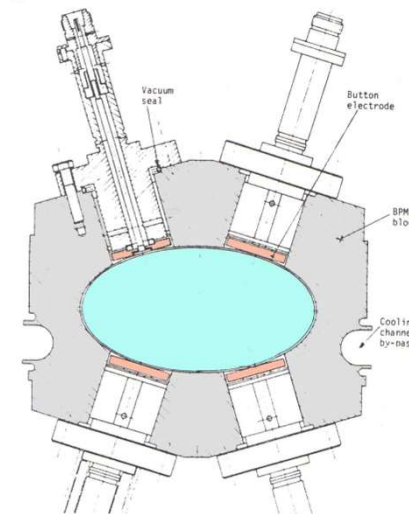
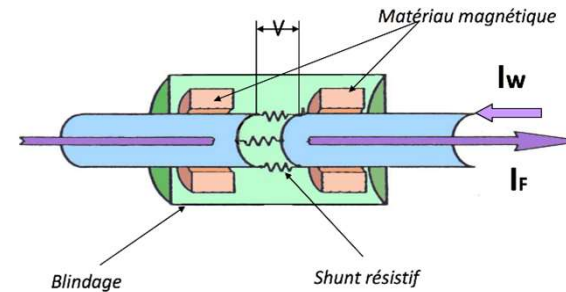


Crédit image: CERN

Les accélérateurs: les diagnostics de faisceau

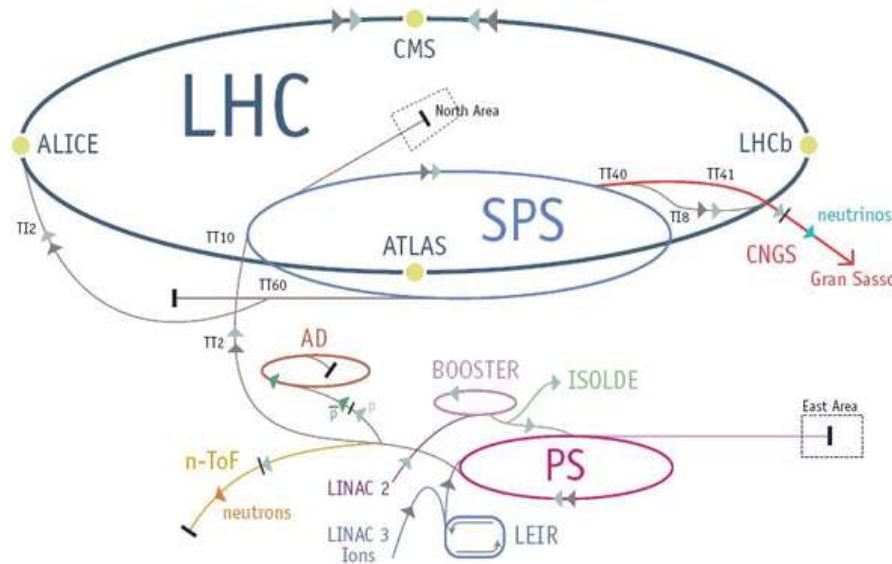
- **Les diagnostics de faisceau**

- **La mesure de l'intensité**
- Wall current monitor: utilise le courant de paroi. Non destructif du faisceau
- **La détection de position**
- Electrode capacitive « Bouton »: Utilise le champ électrique associé au faisceau. Contrôle de l'orbite fermée du faisceau, asservissement de position du faisceau
- **Profile transverse**
- Wirescanner constitué d'un fil fin en tungstène, carbone ou béryllium traversant le faisceau très rapidement (10 m/s)



Crédit image: CERN

LHC



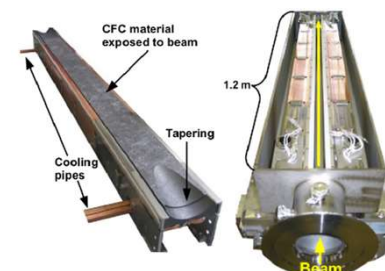
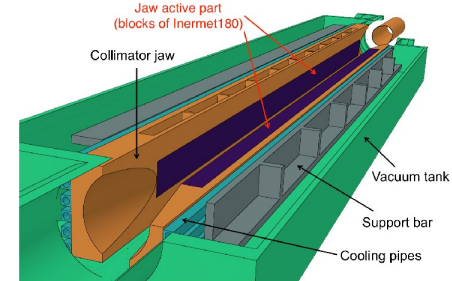
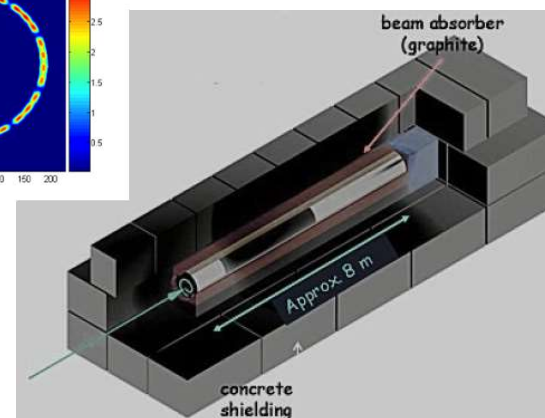
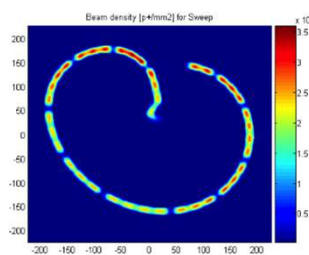
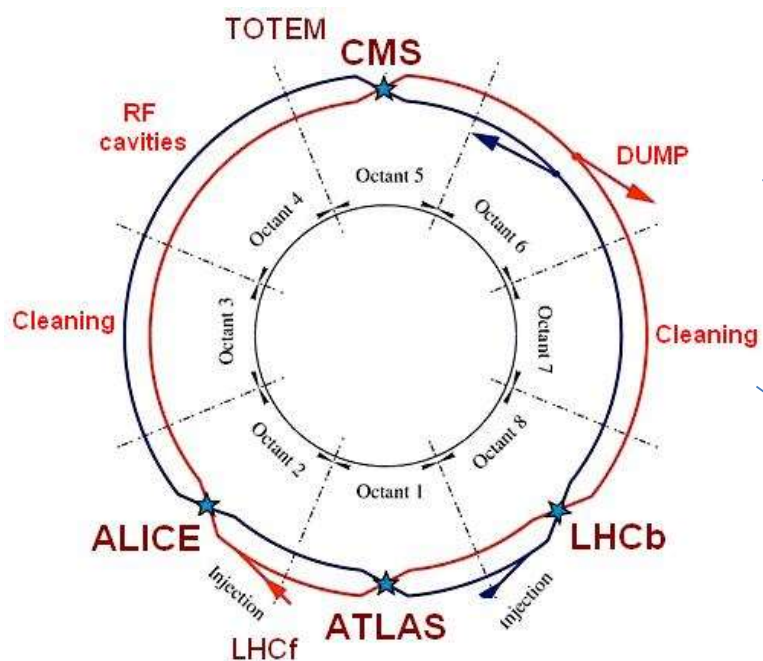
c = vitesse de la lumière

- Linac2: 50 MeV (0.31% c)
- PSB: 1.4 GeV (92% c)
- PS: 26 GeV (99.93% c)
- SPS: 450 GeV (99.998% c)
- LHC: 7 TeV (99.9999991% c)



- 2808 paquets de protons par faisceau ($1.15 \cdot 10^{11}$ pour paquet)
- 100 milliards de protons par paquet
- 11245 tours par seconde
- Epaisseur d'un paquet: $\approx 1\text{ mm} \rightarrow 20\mu\text{m}$ aux points de collision (1/2 cheveu)
- Energie de chaque faisceau: 7 TeV (pour l'instant 6.5)
- $1\text{TeV} = 1\text{ Tera électron-Volt} = 10^{12}\text{ eV}$ (énergie d'un moustique en vol)
- Energie concentrée dans un espace 10^{12} fois plus petit qu'un moustique
- Energie du faisceau : $320\text{ MJ} \approx \text{TGV à } 150\text{ km/h}$ ou 4000 gâteaux aux chocolat ou 77.4 kg de TNT. Le faisceau est capable de fondre presque 500 Kg de cuivre.
- Avec un total de 104 km de lignes sous vide, le LHC représente l'un des systèmes à vide les plus grands du monde
- Au plus fort de sa consommation le CERN utilise environ 200 mégawatts d'électricité, ce qui représente environ un tiers de l'énergie nécessaire pour alimenter la ville de Genève

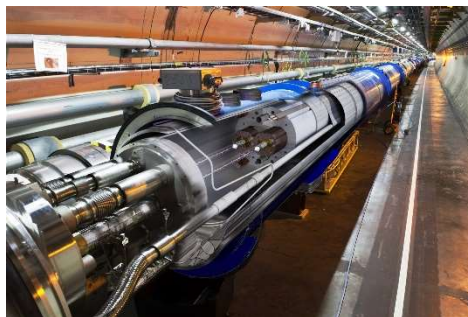
LHC: Les systèmes de protection



- Les faisceaux de particules comportent un risque important pour la machine.
- Le système de protection de faisceau (**beam dump**) dirige le faisceau dans un bloc de graphite refroidi à l'eau de 7 m de long et de 70 x 70 cm de large. L'énergie des protons dans cette décharge de faisceau est convertie en énergie thermique.
- **Les collimateurs** installés dans le LHC protègent les équipements sensibles contre les particules égarées

LHC: histoire

- **10 Septembre 2008**: Circulation du 1er faisceau
- **19 septembre 2008**: Défaillance d'une connexion électrique entre un dipôle et un quadripôle
- **23 octobre 2009**: Redémarrage !!
- **23 novembre 2009**: 1ères collisions à 900 GeV
- **30 mars 2010**: Collisions à 7 TeV
- **5 avril 2012**: Collisions à 8 TeV
- **4 Juillet 2012**: CERN a annoncé une nouvelle particule dont la masse se situait dans la région des 126 GeV -> le Boson de Higgs.
- **Novembre 2013**: Prix Nobel pour le Boson de Higgs à François Englert et Peter Higgs
- **20 mai 2015**: 1ères collisions à 13 TeV

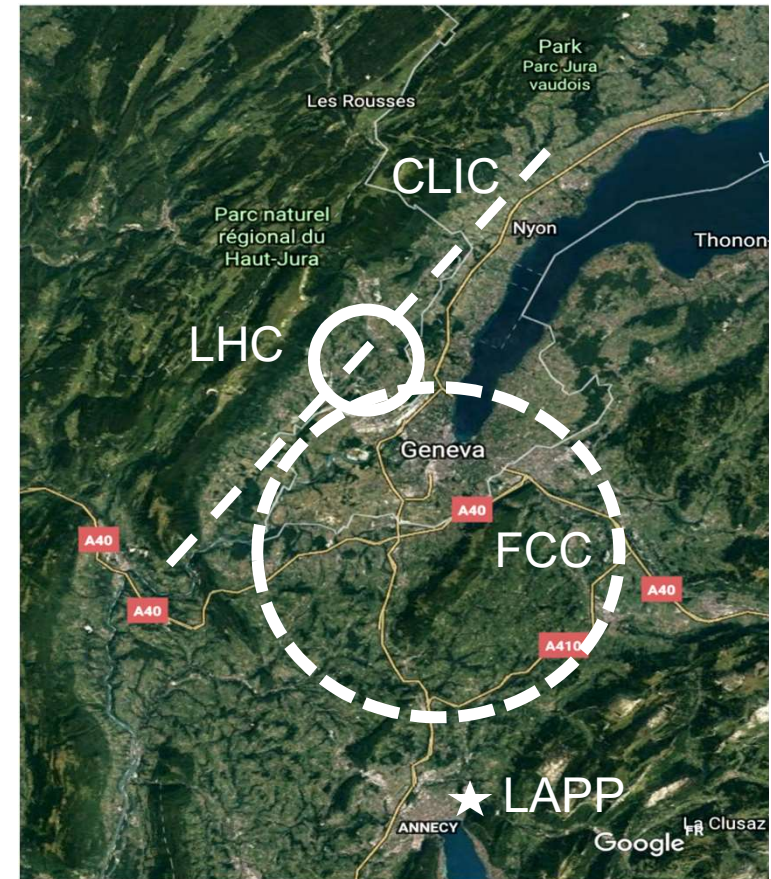


Crédit images: CERN

Lapp et les accélérateurs

Projets future

- **FCC** pour *Future Circular Collider*, c'est le nom du projet qui regroupe un ensemble d'études pour des **futurs grands accélérateurs de particules circulaires** de l'ordre de **100 km à 50 TeV**
- Le **Compact Linear Collider (CLIC)** est un accélérateurs de particules en projet au CERN. Le **CLIC** sera un **accélérateur linéaire** de **50 km** permettant de faire des collisions entre de électrons et des positrons à **3 TeV**.
- Le groupe du LAPP étudie la faisabilité de la stabilisation en dessous du nanomètre pour CLIC et les simulations et de développer de nouveaux collimateurs pour le système de collimation de FCC



Projet existant au Japon: ATF2-KEK

- ATF2 (Accelerator Test Facility 2, démonstration de la faisabilité de produire un faisceau de 40 nm)
- Le groupe du LAPP a créé un capteur de vibrations dédié à la mesure et au contrôle vibratoire.

