

Accélérateurs de particules, Une Introduction

C'est une introduction: Nous n'allons qu'égratigner la surface des accélérateurs et de la physique associée.
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

Une partie du "jargon" peut-être en anglais

« Défi Technologique sur la recherche » – 2025

Début du Syllabus

- **Points généraux:**
 - Les accélérateurs en chiffres
 - Les accélérateurs en France
 - Accélérateur une sonde? → Longueur d'onde + spectre
 - Les applications des accélérateurs
 - Les unités
- **La relativité?**
- **Grande classe des accélérateurs**
- **Les éléments de base d'un accélérateur → vers un complexe**
 - (source/accélérateur/utilisateur)
- **Histoire (courte):**
 - La force de Lorentz (partie électrique/partie magnétique)
 - Le plus simple des accélérateurs (Continus)
 - historique sur les accélérateurs
- **Collisionneurs → le LHC**
 - Une caractéristique: l'emittance = qualité du faisceau
 - Un objectif: la luminosité

Cours et liens utiles

- **Quelques livres/cours techniques (de physique des accélérateurs):**

- *Principles of Charged Particle Acceleration*, S. Humphries, Une version électronique existe.
- *An introduction to particle accelerators*, E.Wilson
- *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, A.chao & M.Tigner
- *An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators*, D.A. Edwards and M.J. Syphers
- *Accelerator Physics*, S.Y.Lee
- *Particle Accelerator Physics – part I*, H. Wiedemann
- *The Physics of Particle Accelerators: an Introduction*, K. Wille
- *Fundamentals of Beam Physics*, J. Rosenzweig
- Un peu plus avancés:
 - *Particle Accelerator Physics – part II*, H. Wiedemann
 - *Beam Dynamics in high energy particle accelerator* – A.Wolfski (2014)

- **Autres cours (voir le web):**

- Ecole accélérateur de l'IN2P3 de Benodet
- CERN accelerator school, exemple: proceeding de 1992
- USPAS accelerator school,
- JUAS school, Cockcroft school
- Et beaucoup de cours sur le web aussi en Français

- **Liste d'accélérateur (Incomplet):**

- http://www.elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html

- **Sites généraux sur accélérateur:**

- Pour les applications des accélérateurs (nouveaux en 2014): <http://www.accelerators-for-society.org>
- De la Société Française de Physique (SFP): <http://accélérateurs.sfpnet.fr/>

- **Autres livres grand public (sélection):**

- Une sacrée particule, Leon Lederman/Dick Teresi
- Un demi-siècle d'accélérateurs de particules - 1950-2000, Pierre Marin
- la-physique des accélérateurs, Phu Anh Phi NGHIEM
- Arronax Le Cyclotron - La genèse : 1998-2008, Yves Thomas



- Ces références ont été employées pour les cours suivants et ce cours est hautement inspiré de matériels de plusieurs cours (E.Baron, A.Mueller, J.Collot, L.Luquin, Ecoles,...)

-A propos, **Wikipedia n'est pas une référence** mais peut servir pour dégrossir le travail de compréhension

Accélérateurs: Un peu de chiffres

- Il y a plus de **30 000 accélérateurs*** en exploitation dans le monde:
 - ~120 accélérateurs sont pour la recherche en nucléaire et physique des particules
 - Environ 70 sont utilisés comme source lumière (Anneau de stockage électron et accélérateurs linéaires) → Science des matériaux, biologie
 - Plus de 15000 accélérateurs pour la médecine
 - Radiothérapie (>14000), France (>500),
 - Proton-thérapie (>70) et avec particules chargées (>17)
 - Production de radio-isotopes (>250 en Europe, >1300 dans le monde)
 - Plus de 18 000 accélérateurs industriels (en 2007)
 - Implantation ionique (>9000),
 - Coupe et soudure par electron(>4000),
 - Stérilisation de la nourriture, tests non-destructifs,...
 - Vers l'écologie: traitement des eaux et gaz (nouveau projet)
- **Les Accélérateurs et la physique des acc. est une discipline en soit: C'est un champ qui s'étend rapidement et est large:**
 - Beaucoup d'applications
 - Physiques, théorie et technologie sont en expansion
 - **Des défis scientifiques et technologiques qui y sont associés**

* Nombre plutôt difficile à tracer car il y en a beaucoup et qui augmente. Les références bibliographiques récentes peuvent commencer avec U.Amaldi Europhysics New, June 31, 2000, le rapport "accelerators for America's future", 2013 et aussi le site web européen: <http://www.accelerators-for-society.org>, les données des sites de l'AIEA et PTCOG)



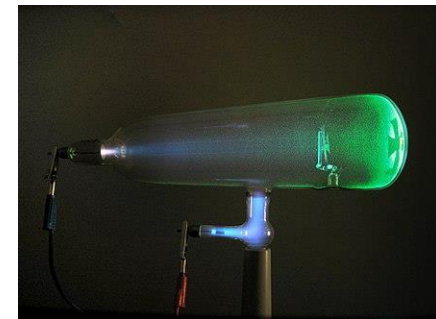
**Société Française
de Physique**
DIVISION ACCÉLÉRATEURS

SFP div. accélérateur



- Site web: <http://accelerateurs.sfpnet.fr/>
 - Objectif: rassembler les acteurs académiques, scientifiques et industriels de la Société Française de Physique intervenant dans le domaine des accélérateurs de particules.
 - Lien sur les accélérateurs, les métiers,...
 - Rencontres et journées accélérateurs
- En 2023, 150 ans de la SFP:
 - Evts a travers la France
 - Cela fait aussi ~150 ans que les tubes a vide de Crooke ont été inventés → « rayons cathodiques » (des électrons)

Tube de Crooke



La France accueille quatre grands accélérateurs



Société Française de Physique
DIVISION ACCÉLÉRATEURS



1 SOLEIL (Saint-Aubin)

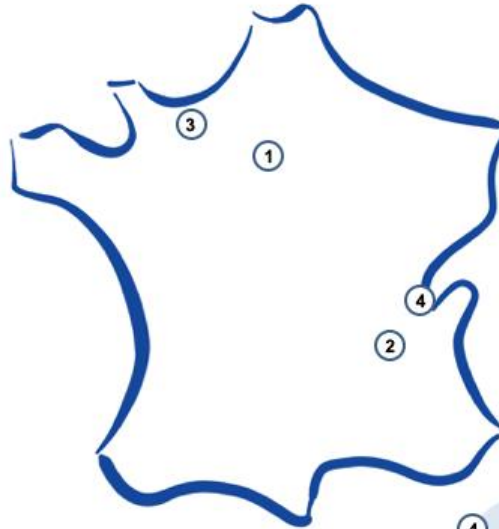
Source de lumière synchrotron de 3ème génération (depuis 2006)



©SOLEIL

- Linac 100 MeV
- Booster 3 Hz
- Anneau de stockage 2,75 GeV
- Circonférence 354 m
- Basse émittance 3,7 nm.rad

29 lignes de lumière



2 ESRF (Grenoble)

Source de lumière synchrotron de 3ème génération (depuis 1994). Soutenue et partagée par 22 pays



©ESRF

- Linac 200 MeV
- Booster 4 Hz
- Anneau de stockage 6 GeV
- Circonférence 844 m
- Emittance horizontale 4 nm.rad

Programme d'évolution

Phase 1 (2009 à 2015) Remise à niveau des lignes de lumière

Phase 2 (2015 à 2022) Reconstruction de l'anneau de stockage avec une émittance horizontale de 130 pm.rad

Arrêt décembre 2018 – retour utilisateur août 2020

Deux grandes installations européennes

3 GANIL (Caen)

Installation dédiée à la recherche et aux applications industrielles utilisant des faisceaux d'ions

Cinq cyclotrons.

5000 heures de faisceau par an.

3 faisceaux en parallèle, de 1 à 95 MeV/nucléon

SPIRAL2

Phase 1 (LINAC): accélération H+, D+ et ions

Phase 2 : production d'ions radioactifs en projet

Implication CEA - CNRS - Industrie



©GANIL



4 CERN (Genève) partiellement en France

Un complexe unique au monde d'accélérateurs de particules pour repousser les limites de la connaissance de l'univers (fondé en 1954).



©CERN

LHC : Large Hadron Collider
6,5 TeV par faisceau
Circonférence 27 km
Température -271 °C

Complexe accélérateurs : une chaîne de machines qui accélèrent les particules à des énergies croissantes :

- Linac 2
- PSB : PS Booster
- PS : Proton Synchrotron
- Quatre détecteurs :
 - ALICE, ATLAS, CMS et LHCb
 - AD : Décélérateur d'antiprotons
 - ISOLDE : Séparateur d'isotopes
 - CLIC : Collisionneur linéaire compact

Contribution CEA - CNRS :

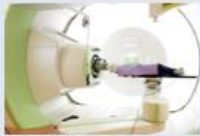
Quadrupôles magnétiques supraconducteurs et partie du système cryogénique de l'accélérateur. Aimants géants de ATLAS & CMS.

Participation aux études pour le FCC (Future Circular Collider) pour prendre le relais du LHC jusqu'à 100 TeV.

Une recherche française riche et variée

Accélérateurs pour la santé

- 5 **ARCHADE (Caen)** Projet hadronthérapie
- 6 **ARRONAX (Nantes)** Cyclotron haute intensité 70 MeV pour la recherche en médecine nucléaire et en radiochimie
- 7 **CAL (Nice)** Cyclotron 65 MeV pour la protonthérapie
- 8 **CPO – Institut Curie (Orsay)** Centre de protonthérapie
Nouveau cyclotron 230 MeV avec une gantry isocentrique

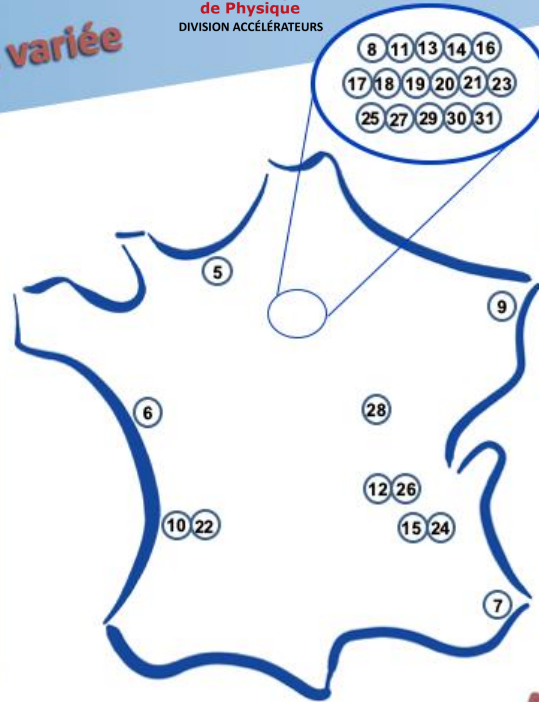


©CPO – Institut Curie



©ARRONAX

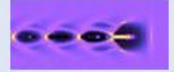
- 9 **CYRCE (Strasbourg)** Production de radio-isotopes pour le diagnostic ou le traitement médical



Laboratoires de pointe

Nouveaux concepts d'accélération

- 21 **APOLLON (Saday)** Impulsions laser 10 PW pour l'étude d'accélération d'électrons dans le domaine multi-GeV
- 22 **CELIA (Bordeaux)** Centre Lasers Intenses et Applications, **CENBG** Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan
- 23 **LULI, LOA, LPGP, LLR, LIDYL, DACM, LAL (Ile de France)** Techniques d'accélération par interaction laser-plasma
- 24 **LNCMI (Grenoble)** Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses



©CNRS - LPGP



©Apollon

Physique nucléaire

- 25 **CSNSM (Orsay)** Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière
- 26 **IPNL (Lyon)** Institut de Physique Nucléaire de Lyon
- 27 **IPNO (Orsay)** Production de faisceaux d'ions légers

Accélérateurs pour la recherche

- 10 **AIFIRA (Bordeaux)** CENBG - Production de faisceaux d'ions légers
- 11 **ALTO (Orsay)** Linac électron 50 MeV pour la physique nucléaire
- 12 **ANAFIRE (Lyon)** ANALyses et Faisceaux d'Ions pour la Radiobiologie et l'Environnement
- 13 **CLIO (Orsay)** Laser à électrons libres 50 MeV
- 14 **ELYSE (Orsay)** Accélérateur d'électrons picoseconde
- 15 **GENESIS (Grenoble)** LPSC - Générateur neutrons 14 MeV
- 16 **IPHI (Saclay)** Injecteur Protons Haute Intensité
- 17 **JANNUS (Orsay-Saday)** Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation
- 18 **PHIL (Orsay)** Banc de test photo-injecteur pour R&D
- 19 **SCALP (Orsay)** Synthèse et Caractérisation par des ions Accélérés pour la recherche Pluridisciplinaire
- 20 **ThomX (Orsay)** Source X Compton – Accélérateur et circulateur 50 MeV

Autres applications

Défense

- 28 **EPURE (CEA Valduc)** Installation pour la radiographie de matériaux de densité très élevée en mouvement très rapide dans le cadre du traité franco-britannique Teutatès
- 29 **ELSA (CEA Bruyères le Châtel)** Source X Compton – Linac électrons 30 MeV
- 30 **NENUPHAR et 4 MeV (CEA Bruyères le Châtel)** Accélérateurs d'ions



©CEA



©CEA

Patrimoine culturel

- 31 **New AGLAE (Paris)** Accélérateur électrostatique du Musée du Louvre – Laboratoire C2RMF

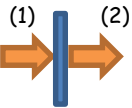
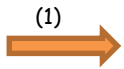
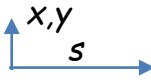


© C2RMF Louvre

En France, il y a aussi beaucoup d'accélérateurs industriels ou a usage médical

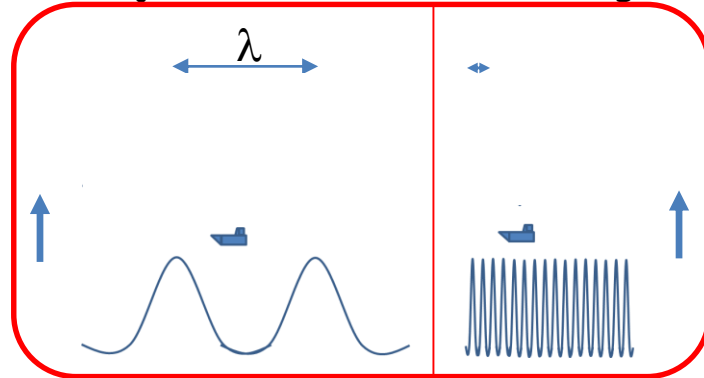
But des Accélérateurs: Produire un faisceau

- Les accélérateurs produisent et accélèrent un **faisceau de particules 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 ⁽¹⁾, est constitué de **particules ou ions chargés**:
 - Electrons et positrons (aussi des muons)
 - Ions légers: Protons, antiprotons
 - Ions lourds (de l'hydrogène (deutérium) aux ions uranium)
 - Faisceau Secondaire ⁽²⁾: faisceau généré à partir du premier
 - autres particules (similaire au premier)
 - Mais aussi neutre par exemple de photons, neutrons, neutrinos
- Le faisceau peut-être délivré ^(transporté) 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 délivrés sans interruption.
 - **faisceau pulsé**: Les paquets sont interrompus de manière périodique.
- Pourquoi produire des faisceaux?
 - **Science** → pour « sonder »
 - **Applications**



Accélérateur: une sonde?

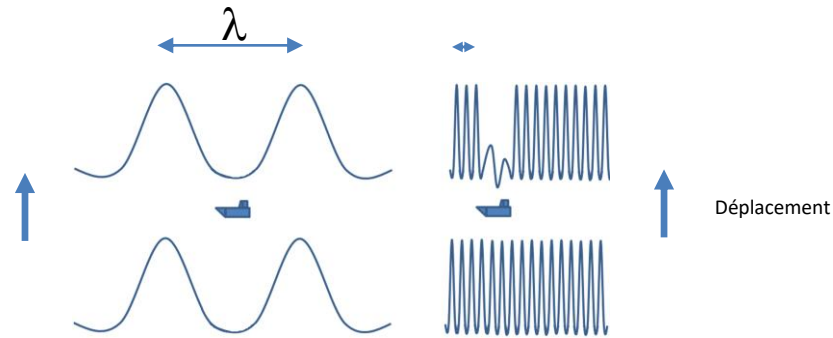
- Un concept: Pour étudier un objet, il faut utiliser une longueur d'onde plus petite que l'objet lui-même.



Attention: image qui n'a de valeur que son concept ;)

Accélérateur: une sonde?

- Un concept: Pour étudier un objet, il faut utiliser une longueur d'onde plus petite que l'objet lui-même.



Attention: image qui n'a de valeur son concept ;)

- En mécanique quantique, on peut appliquer la relation de De Broglie, c'est-à-dire que **la longueur d'onde**:

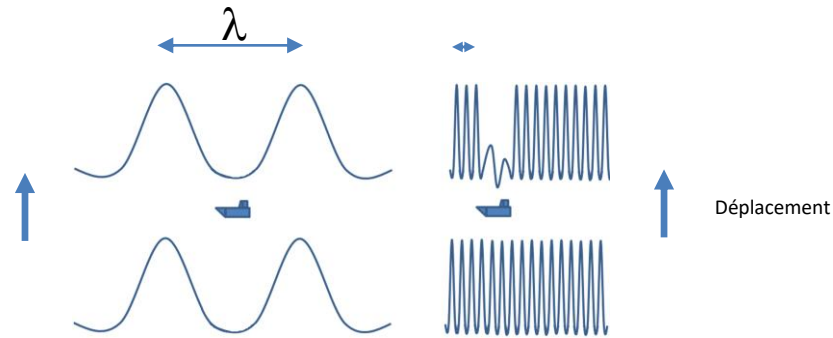
$$\lambda_{\text{Broglie}} = h/p$$

- λ = longueur d'onde De Broglie
- h = constant de planck ($\sim 4.1 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)
- p = moment de la particule ($p = mv^*$)

\vec{p} (\vec{p}) est la quantité de mouvement (en méca classique est en $[\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$, en phys. Accélérateur en $[\text{eV}]$), h classiquement est en $[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$ ou $[\text{J}\cdot\text{s}]$ et on utilise $[\text{eV}\cdot\text{s}]$ (plus tard nous discuterons des unités)

Accélérateur: une sonde?

- Un concept: Pour étudier un objet, il faut utiliser une longueur d'onde plus petite que l'objet lui-même.



Attention: image qui n'a de valeur que son concept ;)

- En mécanique quantique, on peut appliquer la relation de De Broglie, c'est-à-dire que **la longueur d'onde**:

$$\lambda_{\text{Broglie}} = h/p$$

- λ = longueur d'onde De Broglie
- h = constant de planck ($\sim 4.1 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)
- p = moment de la particule ($p = mv^*$)

p (\vec{p}) est la quantité de mouvement (en meca classique est en $[\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$, en phys. Accélérateur en $[\text{eV}]$), h classiquement est en $[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$ ou $[\text{J}\cdot\text{s}]$ et on utilise plutôt $[\text{eV}\cdot\text{s}]$

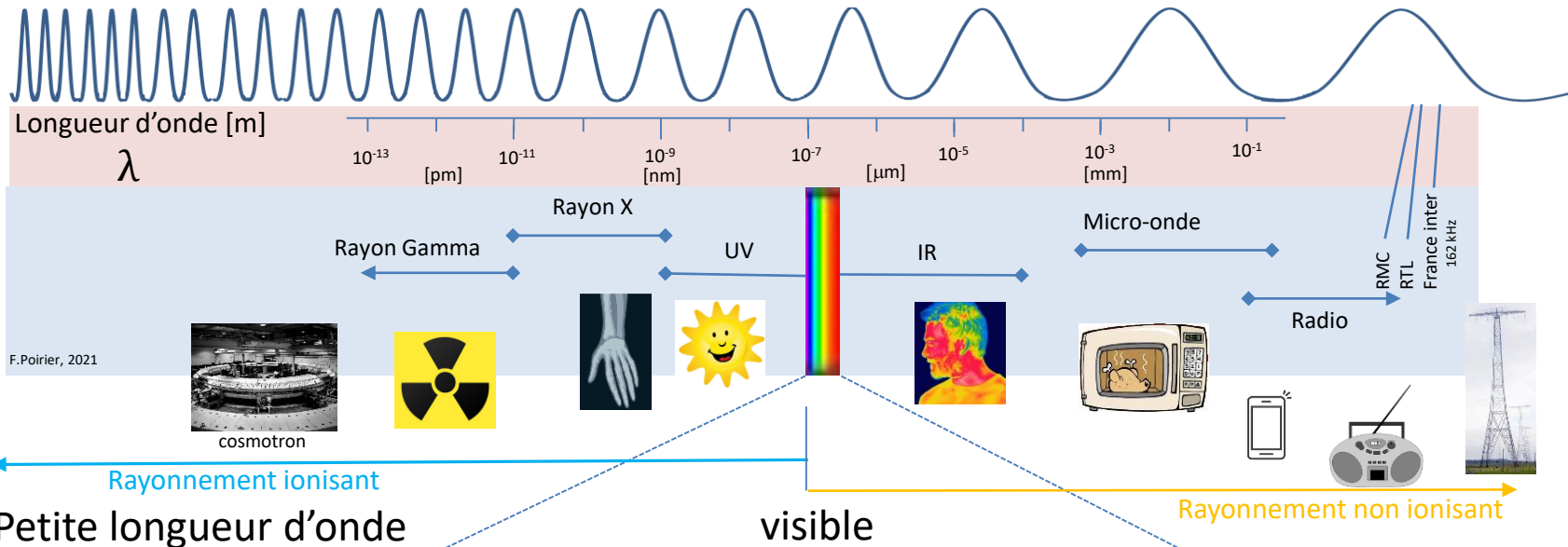
- Pour atteindre une bonne résolution de l'objet, l'énergie de la sonde doit être augmentée \rightarrow le moment p doit être élevé

- Résoudre un objet très petit, demande des particules avec un moment élevé**
- $P = E/c$ ** donc l'énergie (cinétique) des particules doit être élevée (ou adaptée à la "dimension" de l'objet à observer)**

*Techniquement si relatif, $\vec{p} = m_0\gamma\vec{v}$ ** pour les photons (sans masse) et pour les besoins ici on le présuppose (voir plus tard pour objet massif)

Longueur d'onde et objets

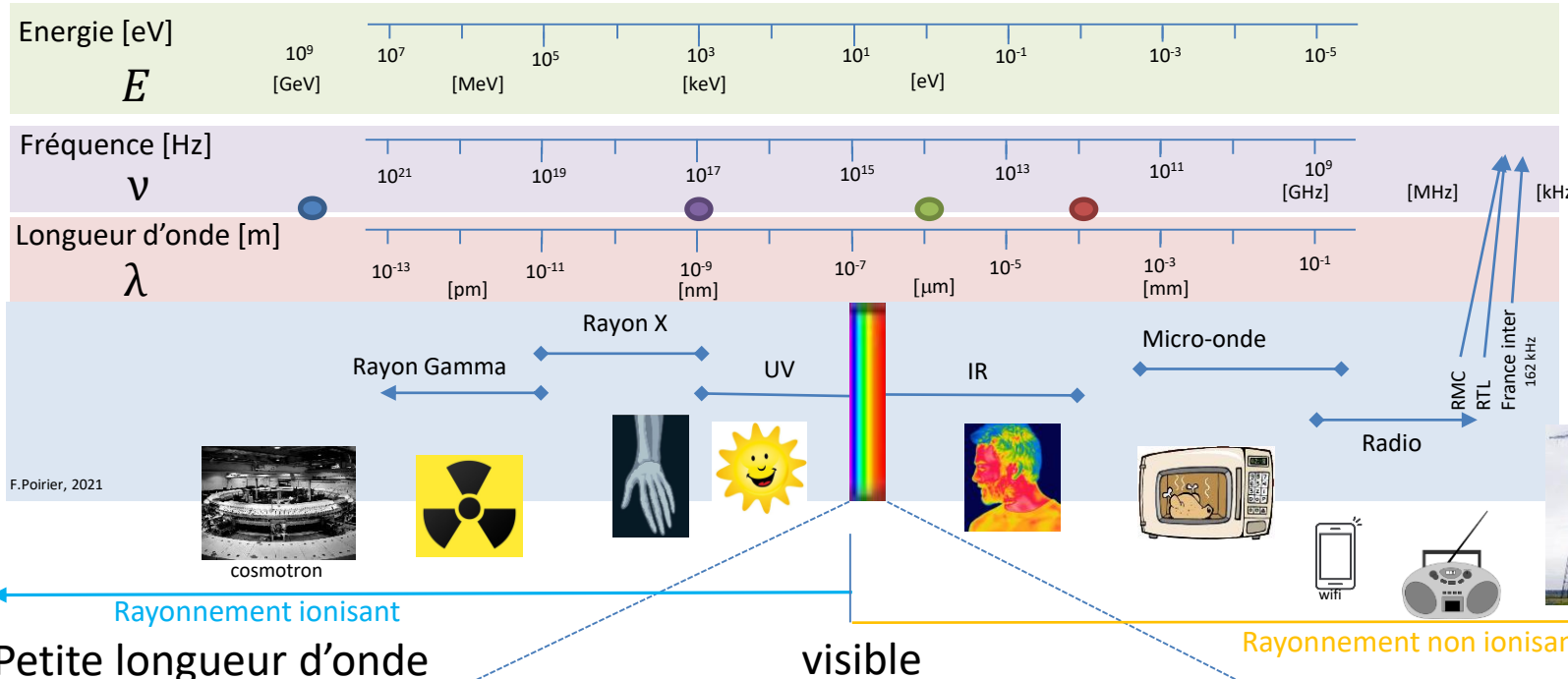
(spectre électromagnétique)



Ionisant: qui a suffisamment d'énergie pour arracher des électrons aux atomes ou aux molécules.

Equivalences pour les photons (spectre électromagnétique)

Haute énergie



$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

- 10^{-15} m: Taille noyau d'atome
- 10^{-9} m: molécule d'eau
- 10^{-6} m: bactérie
- 10^{-4} m: cheveux

Rayonnement ionisant

Rayonnement non ionisant

Petite longueur d'onde

visible

Haute fréquence

Basse fréquence



Ces équivalences utilisent les équations qui ne s'appliquent que pour les photons car ceux-ci n'ont pas de masse

Accélérateur: une sonde?

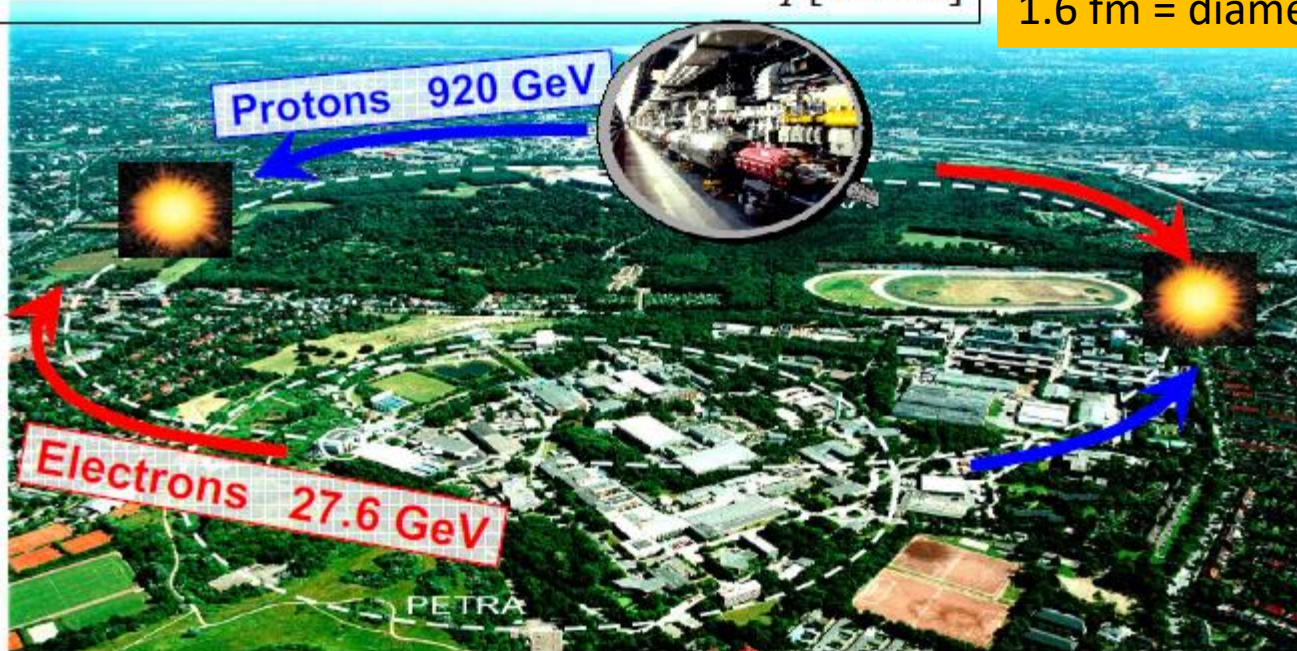
- Les électrons peuvent «facilement» être accélérés , et atteignent des vitesses relativistes rapidement
 - Longueur d'onde peut-être très petite.
 - Les électrons sont la base préféré pour étudier des objets vraiment petits
 - Un électron de 1 GeV/c de moment p donne une longueur de De Broglie de 10^{-15} m.
 - A comparer avec le noyau nucléaire: $\sim 10^{-14}$ m, ou la dimension du proton $\sim 10^{-15}$ m (*)
 - Les photons aussi mais peuvent nécessiter un peu de travail supplémentaire (faisceau secondaire) pour les créer a haute énergie et les ions sont employé mais sont plus difficile a accélérer...
- ***Les Accélérateurs sont les outils pour étudier l'infiniment petit***

(*) Attention: le terme de dimension pour les particules n'a pas vraiment de sens. C'est simplement pratique et adéquate ici de l'utiliser pour des objets composés ,que l'on "casse" en plus petit objet, tel que des noyaux, des protons, des ions,...

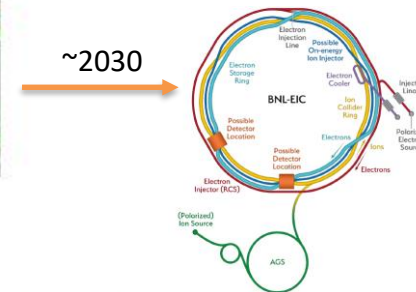
Grand microscope électronique

Resolution = de Broglie wavelength $\rightarrow \lambda[\text{fm}] = \frac{1.2}{p[\text{GeV}/c]}$ **

Une particule de 1 GeV peut sonder jusqu'au femtomètre
1.6 fm = diamètre du proton



L'énergie apportée ici permet de « casser » le proton en particules plus fondamentales



HERA: Hadron-Electron Ring Accelerator, 6.3 km ring, DESY

(physics: 1992-2007), max. E = 27.5 GeV for electrons, 920 GeV for protons

collision energy at center of mass frame = 318 GeV $\lambda[\text{fm}] = \frac{1.2}{318 \text{ GeV}/c} = 0.0038 \text{ fm}$

Accélérateurs ne sont pas seulement des sondes/microscopes...

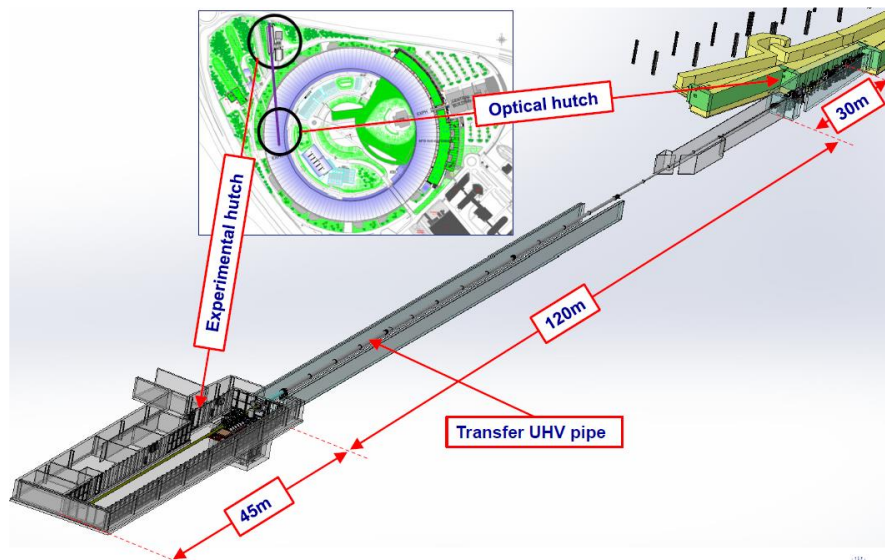
Utilisation des Accélérateurs

- **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/liquide)
- **science**
 - Physique des particules
 - Physique nucléaire
 - Physique de la matière condensée
 - Science des matériaux
 - Biochimie, Biologie
 - Archéologie

Recherche sur le SARS-COV avec des accélérateurs

- Plusieurs accélérateurs sont impliqués dans la recherche sur le SARS-COV.
- En France dès 2020, par exemple les anneaux Soleil et l'ESRF ont ainsi priorisés les recherches sur le coronavirus.

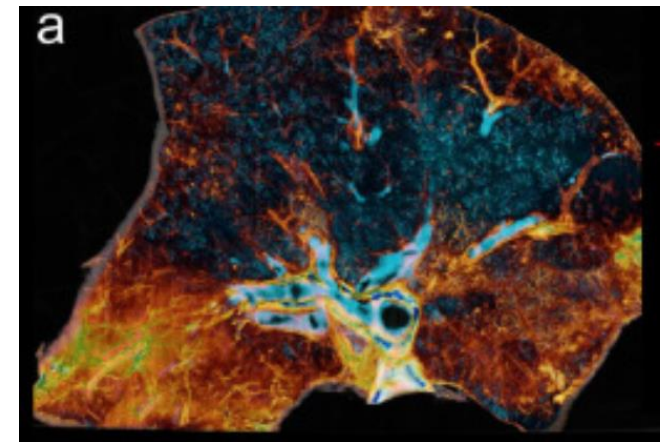
A l'ESRF, ligne faisceau BM18**



Page 6 BM18, The New ESRF-EBS Beamline For Hierarchical Phase-Contrast Tomography - F. Cianciosi, A.L. Buisson, P. Tafforeau

The European Synchrotron | ESRF

BM18: Tomographie* qui montre les alterations microvasculaire du poumon atteint de la COVID-19



Oct. 2022

*M.Ackermann *et al*, "The fatal trajectory of pulmonary COVID-19 is driven by lobular ischemia and fibrotic remodeling", Oct. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104296>

• Image source: Paul Tafforeau, ESRF; Claire Walsh, UCL; Maximilian Ackermann, Universitätsmedizin Mainz

** F. Cianciosi – A.L. Buisson – P. Tafforeau – P. Van Vaerenbergh, "BM18, The New ESRF-EBS Beamline For Hierarchical Phase-Contrast Tomography", July 2021

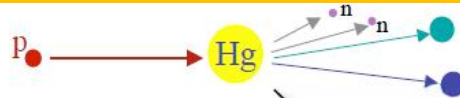
Quelques applications

Thérapie: γ, e^-, ions

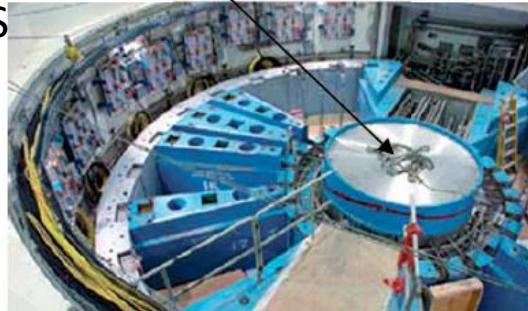


Ex en France: CPO Orsay

Réaction de Spallation: production de neutron

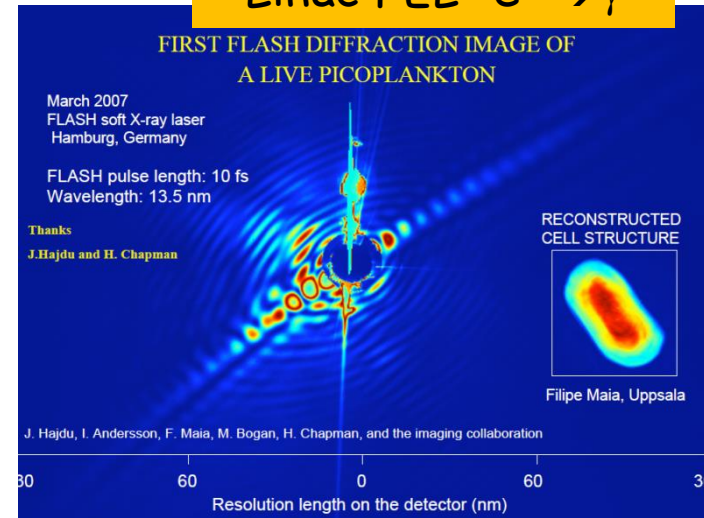


SNS

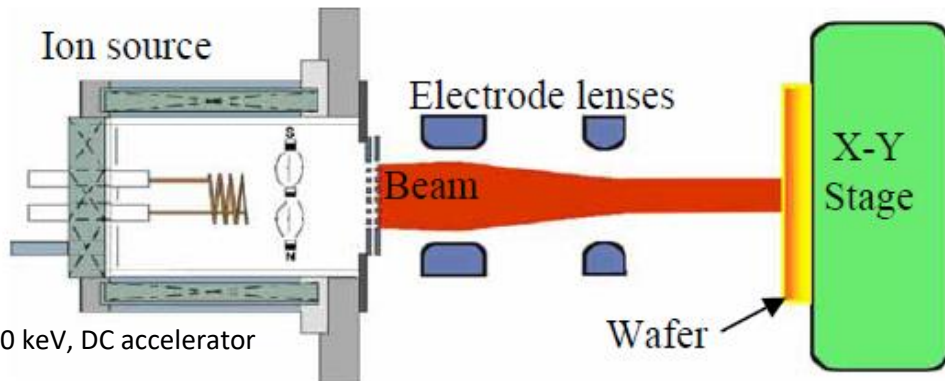


→ En Europe ESS (cible tungstene)

Linac FEL- $e^- \rightarrow \gamma$

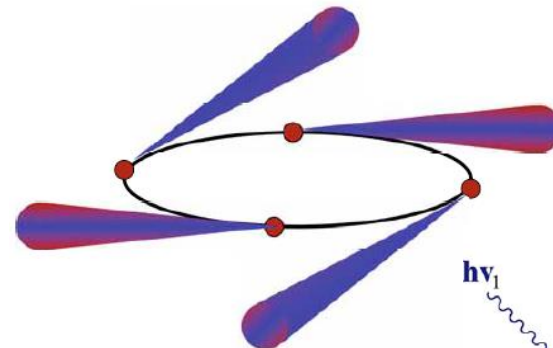


Implantation ionique tranche de Si: doping



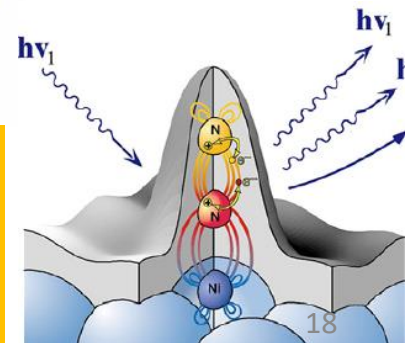
750 keV, DC accelerator

→ Ecran plat, électronique haute densité, solidification de surface



Source de lumière synchrotron (ESRF, Soleil)

Microscopy spectroscopy



Quelques applications

lithographie par faisceau d'ion
 → création de structure nanométrique

lithographie e- → sub 20nm

TSMC (Taiwan), fournisseur exclusif Apple, annonce qu'il peut descendre à 3nm (construction d'une usine en 2021) → photolithographie. La puissance est radicalement réduite avec ces tailles (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)

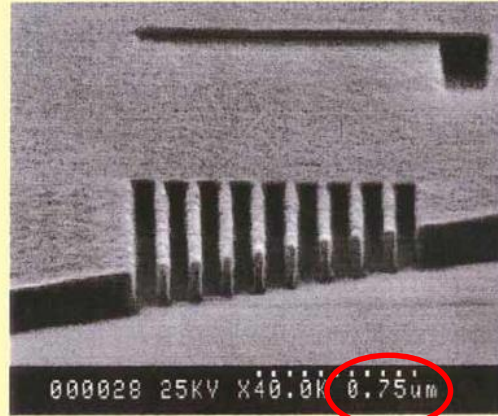
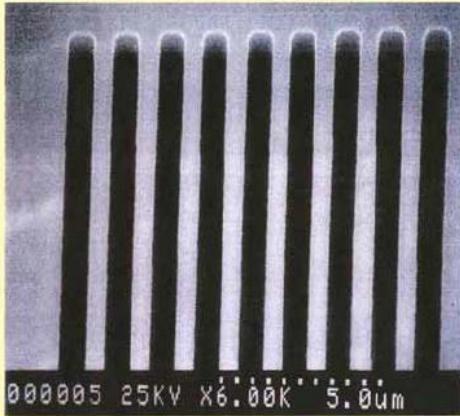
in 180 nm Shipley DUV resist UVIIHS

W. Bruenger
 FHG ISIT
 Nov 1999

Stencil Mask

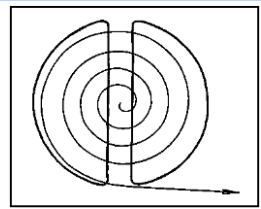
Wafer

75 keV He⁺ ions
 0.46 μC/cm²
 exposure dose



Ici Reduction a 750 nm

Production de radioélément pour la thérapie et l'imagerie



Accélération

Faisceau de Particules



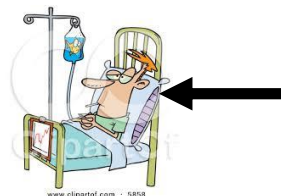
Irradiation de la cible
 Production de radioéléments
 dans la cible par transmutation

Extraction chimique
 Séparation
 Purification
 Marquage

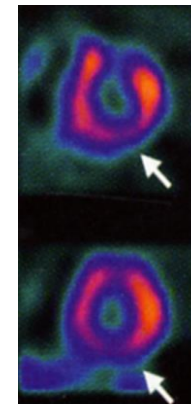


Élément
 radioactif
 médical

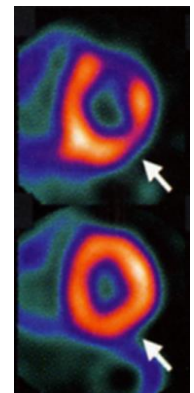
Patient



Imagerie tomographique du cœur



⁹⁹Tc-MIBI
 SPECT



⁸²Rb-PET

ARRONAX

* Not actual size

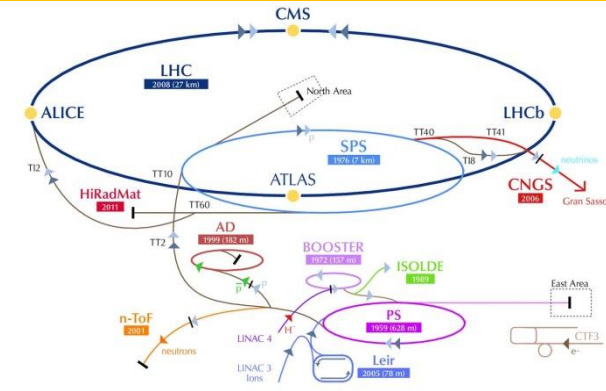
Applications- Big science

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

Physiques des particules

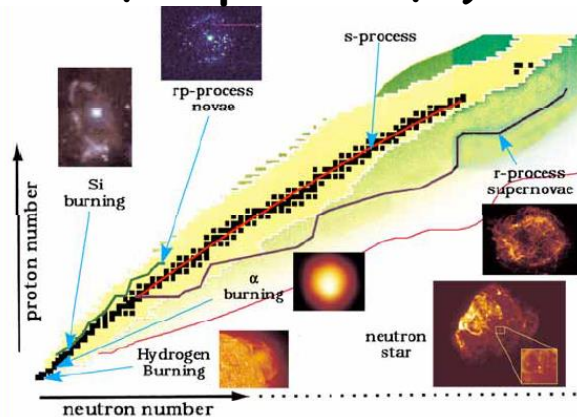


Complexe du LHC - découverte du Higgs, recherche en super symétrie,...

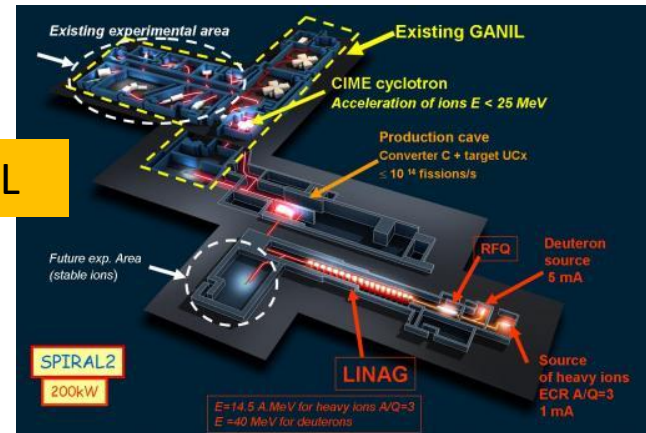


Explorer la structure nucléaire et les réactions loin des régions de stabilité des noyaux → eg Participation du noyau dans les évènements Astrophysiques (éruption rayon-X, SuperNova, ...)

Physique nucléaire



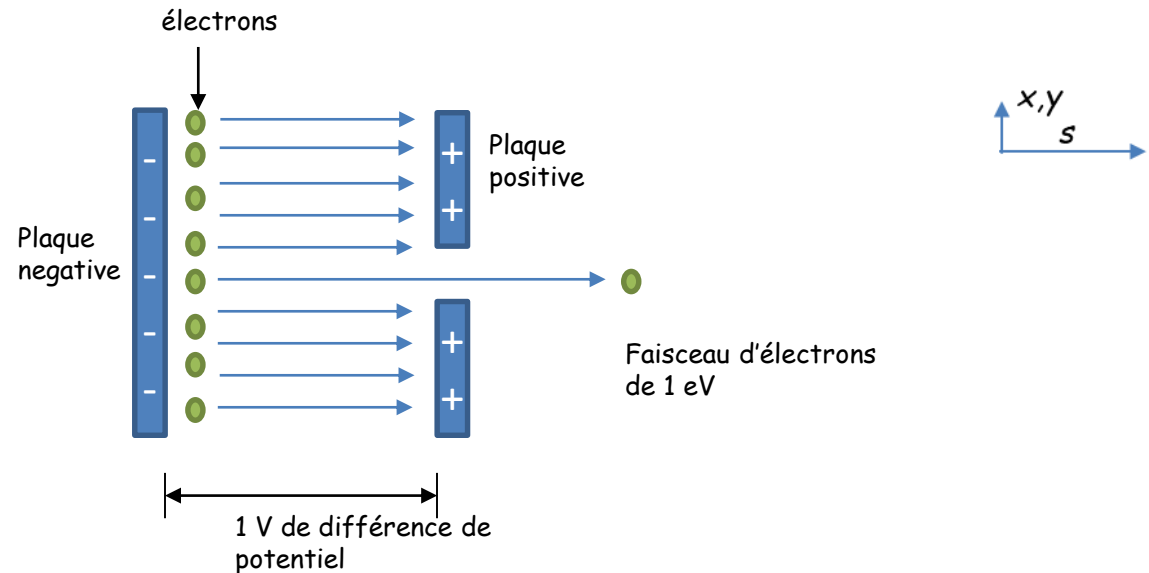
GANIL



Unités de base

- L'énergie dans un accélérateur est usuellement exprimée en unité d'"**électron Volts**":
 - $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ 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_α = 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 keV , MeV , GeV
- Les Particules sont dans la plupart des accélérateurs accélérées à des vitesses relativistes, et nous aurons besoin d'utiliser la **mécanique 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. $c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Mécanique relativiste: en physique, une mécanique (non quantique) dont les déplacements sont comparables à la vitesse de la lumière

Gamma et beta!

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 a une particule: soit l'énergie cinétique E_c (ou E_k ou T)

$$E = E_k + E_0$$

- De meme, on a:

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

Ici, nous n'avons rien inventé



- On pose:

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

alors

$$E = \gamma \times E_0$$

γ (gamma) est le rapport de l'énergie totale d'une particule a son énergie au repos.

γ indique aussi l'apport en énergie cinétique que l'on donne a la particule

γ 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 γ sous une autre forme:

γ peut aussi s'écrire en fonction de la vitesse de la particule et de la vitesse de la lumière

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

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

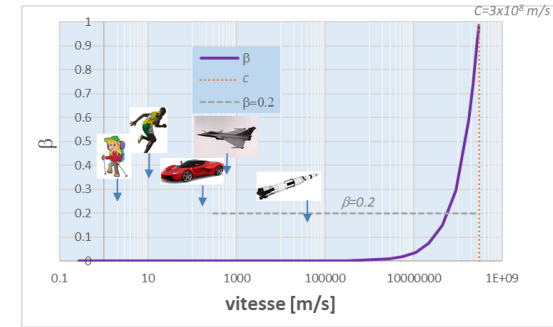
c est la vitesse de la lumière dans le vide. $c \sim 3 \times 10^8$ m/s
 v est la vitesse de la particule

β – Beta (de Lorentz)

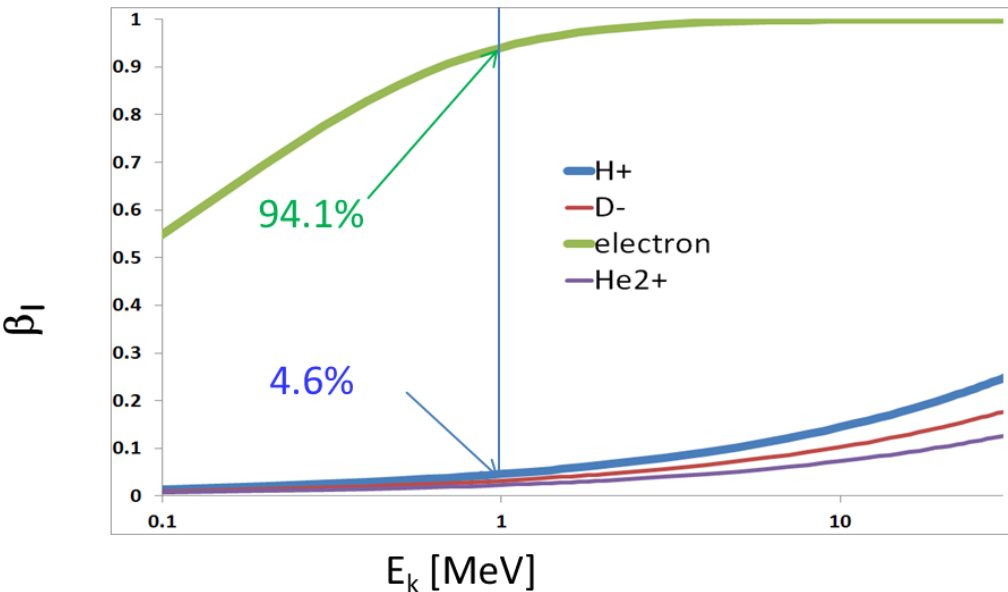
- On peut introduire aussi le rapport de la vitesse de la particule à la vitesse de la lumière:

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

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



- $\beta \ll 1$ (=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 β 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 $E_k = 70$ 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 $\beta = 1$ eg photons qui voyage à la vitesse de la lumière
- Quand une particule est très relativiste, on préfère employer γ qui a alors un « certain pouvoir » indicateur.

Que retenir?

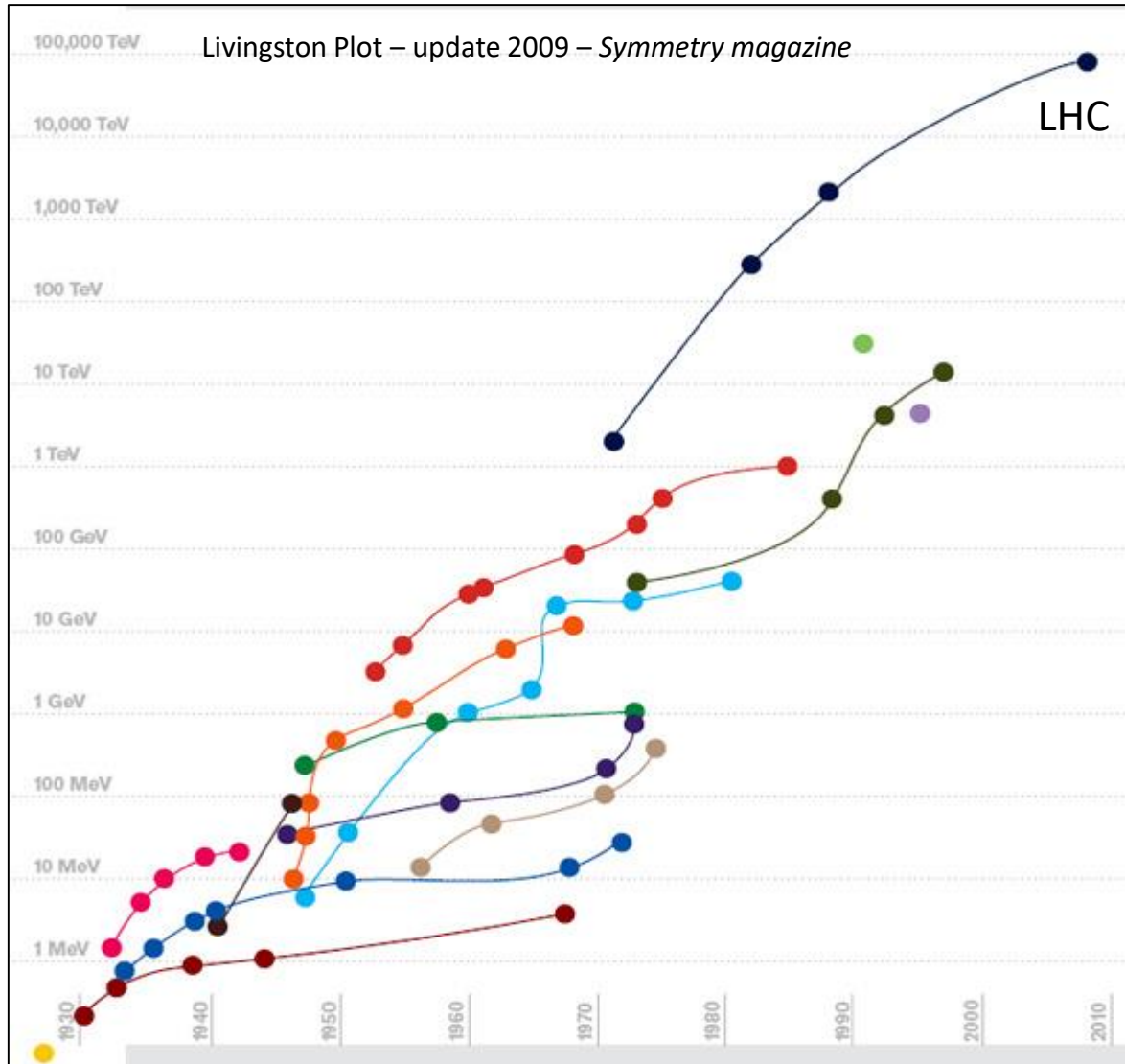
$$\gamma = \frac{E_k}{E_0} + 1$$

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

- E_k et E_0 sont en eV (ou une unité d'eV) et gamma et beta deviennent facile a calculer
- γ (Gamma) est le rapport de l'énergie cinétique sur l'énergie au repos
- β (Beta) est le rapport de la vitesse du projectile a celle de la lumière

Ces facteurs seront réutilisés par exemple pour classer les accélérateurs selon leur utilisation a hautes ou basses énergies (~vitesses)

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: Rutherford experiment
- 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."

Eléments d'un accélérateur

Schema
de base:

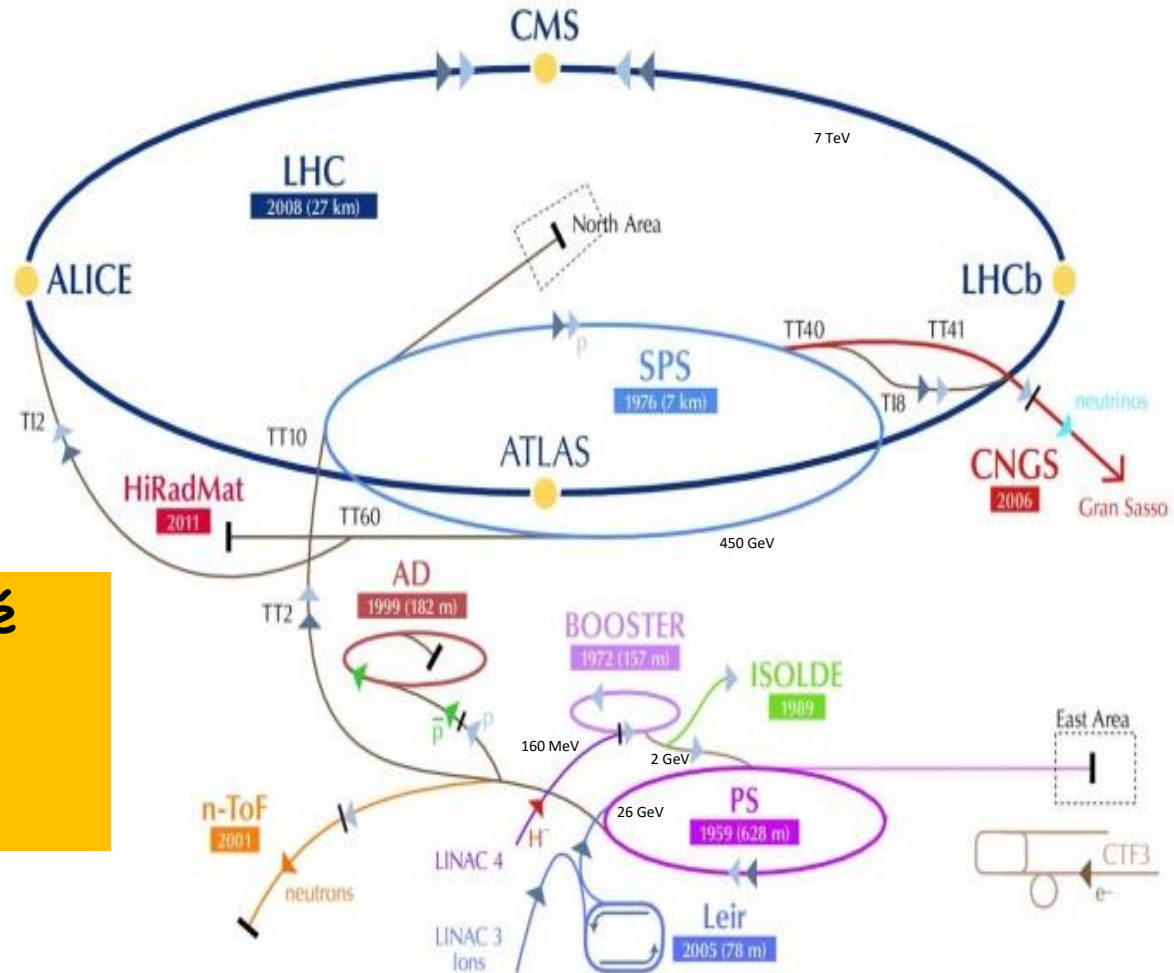
Source

Accélérateur

Utilisateur
(détecteur, cible,...)

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

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



La complexité ici de l'accélérateur est du au fait que l'on veut préparer le faisceau , dans chaque section, afin de garder un maximum d'ions pour les plus hautes énergies.

Eléments d'un accélérateur

Schema
de base:



Un accélérateur moderne comprends les éléments principaux suivant:

- 1 – Elément d'accélération
 - **Electrodes, Tube ou cavité radiofréquence (RF)** créant un champ électrique qui augmente l'énergie des particules du faisceau
- 2 – Une source de particule chargée (électrons; protons; ions lourds, plus spécifique: positrons, anti-protons & muons)
- 3 – Elément de Guidage du faisceau
 - Principalement magnétique pour maintenir la taille du faisceau, pour définir la trajectoire et orbite (champs magnétiques larges eg cyclotrons, Quadripôles, dipôles, solénoïdes,...)
- Système auxiliaire, particulièrement le « vide », les « diagnostics », sources de puissance (eg usine cryogéniques) ou des systèmes d'alignement, ...
 - Un vide de bonne qualité sera nécessaire par exemple pour éviter la diffusion (éclatement) du faisceau face a 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 inclure **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)

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 :

The diagram shows the Lorentz force equation $F_L = q (E + v \times B)$ inside a yellow rectangular box with a green border. Three blue arrows point from text labels to parts of the equation: one from 'Charge' to the 'q', one from 'Vecteur champ Electrique' to the 'E', and one from 'Vecteur champ magnétique' to the 'B'.

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

On peut l'écrire aussi comme cela:

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

C=1

Force de Lorentz

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

soit

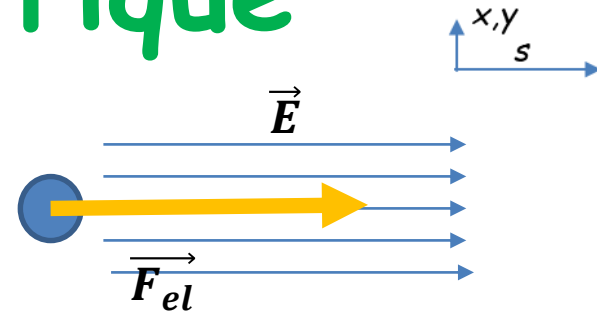
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{el} = q\vec{E} \\ \vec{F}_{mag} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \end{array} \right.$$

Deux composantes de cette force bien distinctes dans cette formulation:

- 1) \vec{E} = le champs électrique en unités de force par unité de charge, newtons / coulomb = **volt/m**
- 2) \vec{B} = densité du flux magnétique ou induction magnétique, avec des unités du newtons/ampère/m = weber / m² = **Tesla** (10 kGauss)

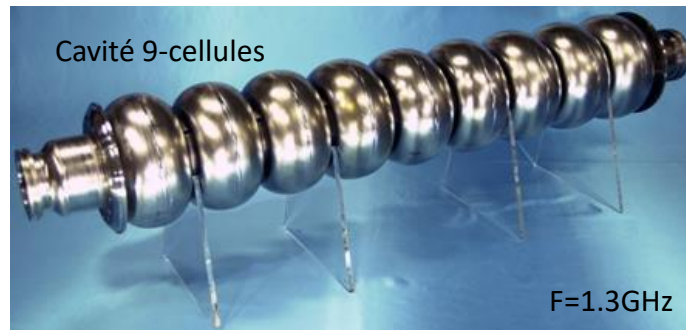
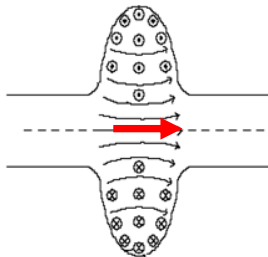
Composante électrique

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



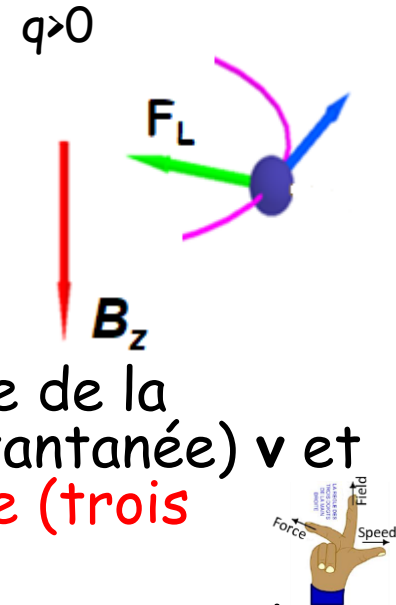
- Une particule de charge positive sera accélérée dans le même sens que le champ électrique \vec{E}
- Nous avons donc ici le moyen d'utiliser le champ électrique pour donner une impulsion aux particules ou de l'énergie cinétique (voir plus tard)
- Aujourd'hui pour appliquer le champ accélérant, il peut-être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

Champ
elec. dans
la cellule
de la cavité



Composante magnétique

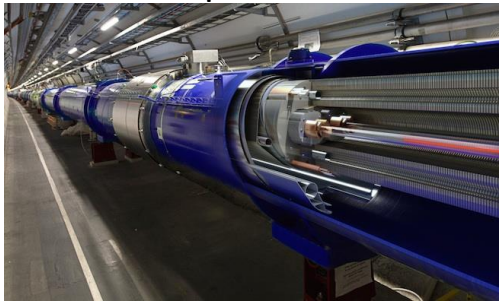
$$\vec{F}_{mag} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$



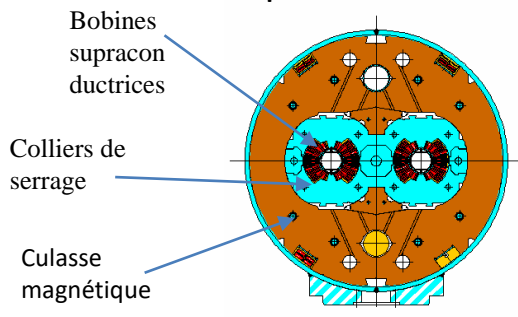
- *Champ magnétique \vec{B}* : Celui-ci courbe la trajectoire de la particule en fonction du vecteur vitesse local (instantanée) \vec{v} et du vecteur champ \vec{B} selon la règle de **la main droite (trois doigts)**
- Nous avons ici un moyen d'agir sur la trajectoire des particules (et donc de les dévier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

Aimant de courbure supraconducteur (Dipole) du LHC: Champ= 9 Tesla

1232 dipoles au LHC



Coupe de l'aimant



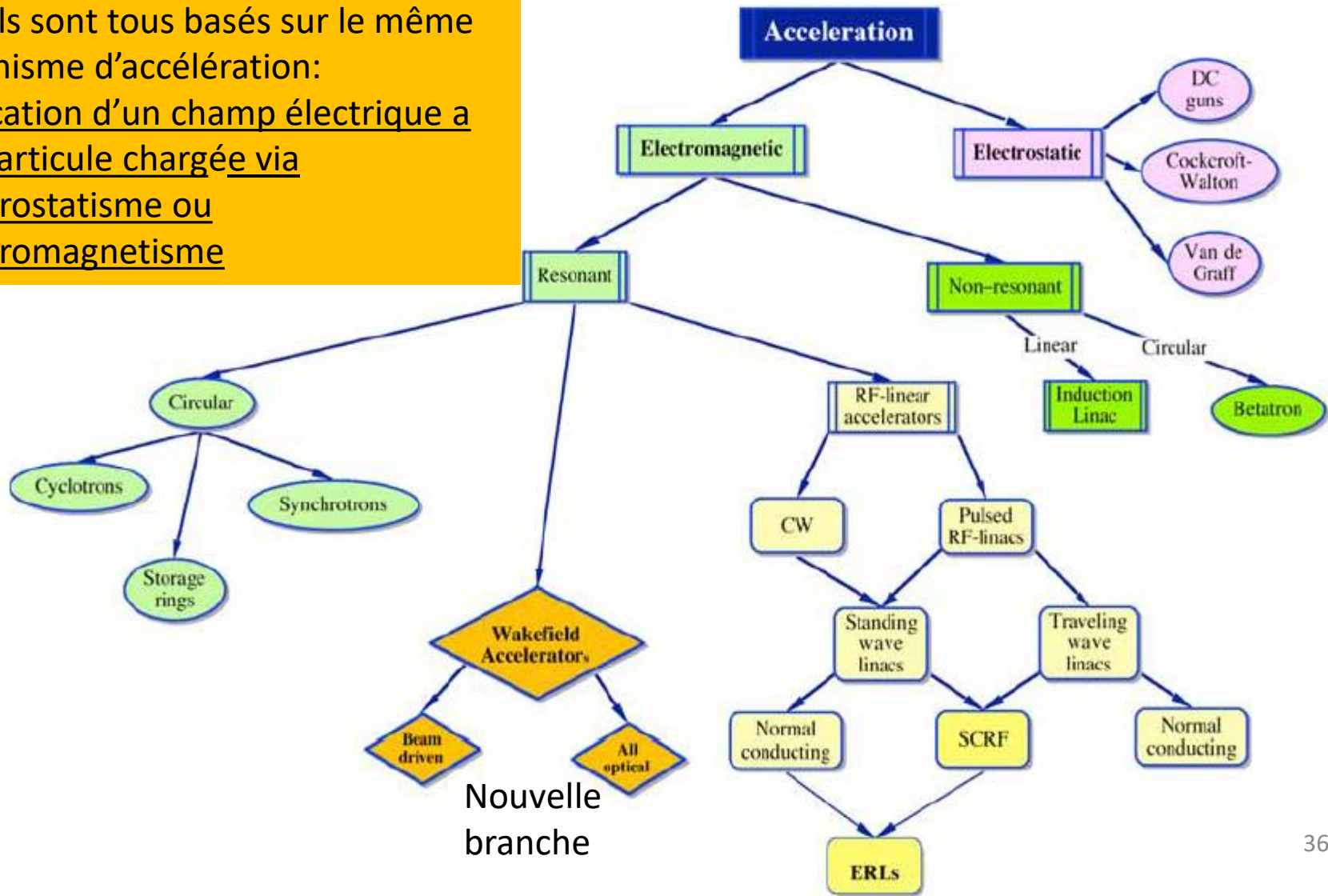
1 seul assemblage de longueur= ~15 m pour 27.5t, refroidi a 1.9K:
 - Long=peu d'espaces sans champ
 - Froid=pas de resistance électrique
 2 Tubes a vide = 56 mm de diamètre

$B_{terrestre} = 4.7e-5$ T
 $B_{experience_typique_avec_fil}(10A) = 1e-4$ T

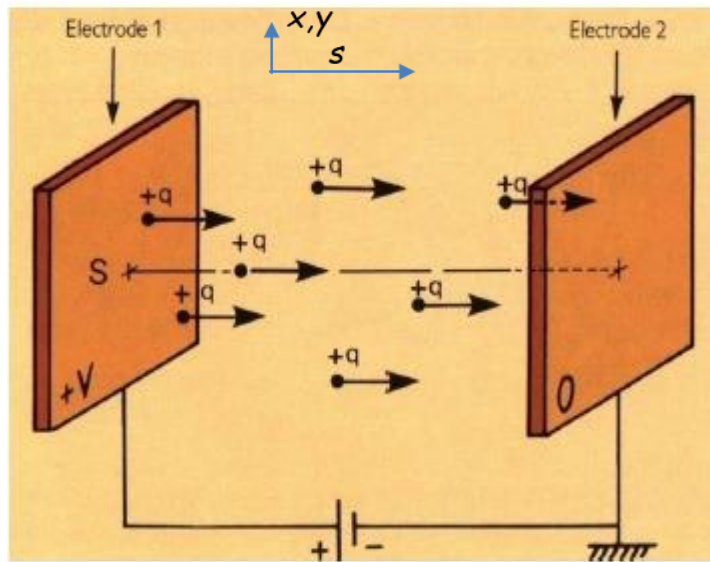
Classification (branche, taxonomie)

Les accélérateurs peuvent être classés selon plusieurs designs principaux mais ils sont tous basés sur le même mécanisme d'accélération:

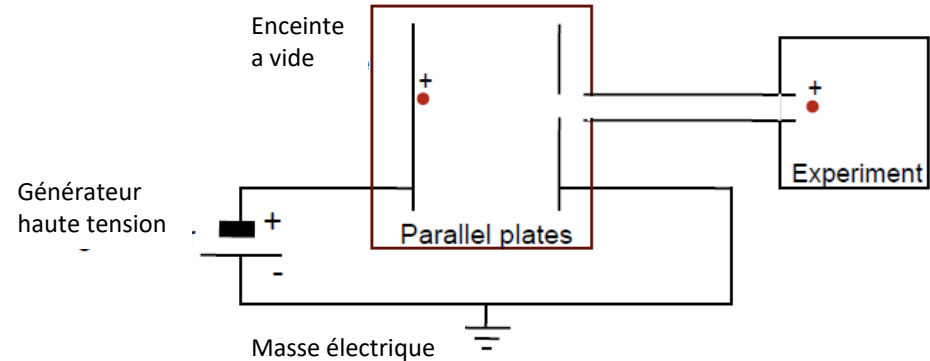
Application d'un champ électrique a une particule chargée via l'électrostatisme ou l'électromagnétisme



Le plus Simple des acc. - Electrostatique - CC



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

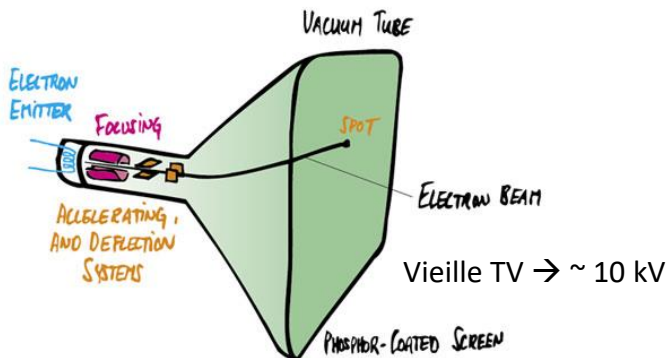


Le gain en énergie δW (ou ΔE_{cin}) de q dans un champ électrique généré par un potentiel V (ou U) est:

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

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

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

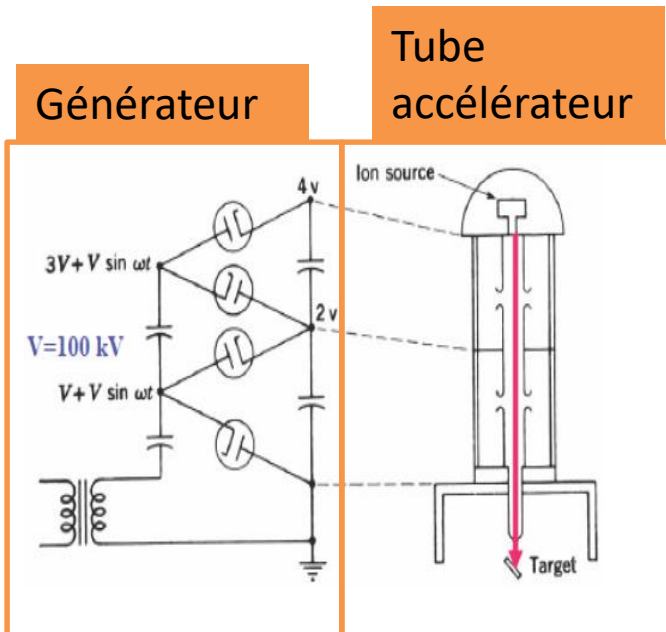


Accélérateur → Besoin d'un champ électrique fort → générateurs!

Acc. Cockcroft-Walton

- 1932: Cockcroft et Walton conçoivent un circuit pour générer une haute tension.
- La haute tension était utilisée pour accélérer des protons sur une cible en lithium.
- 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.

Van de Graaf

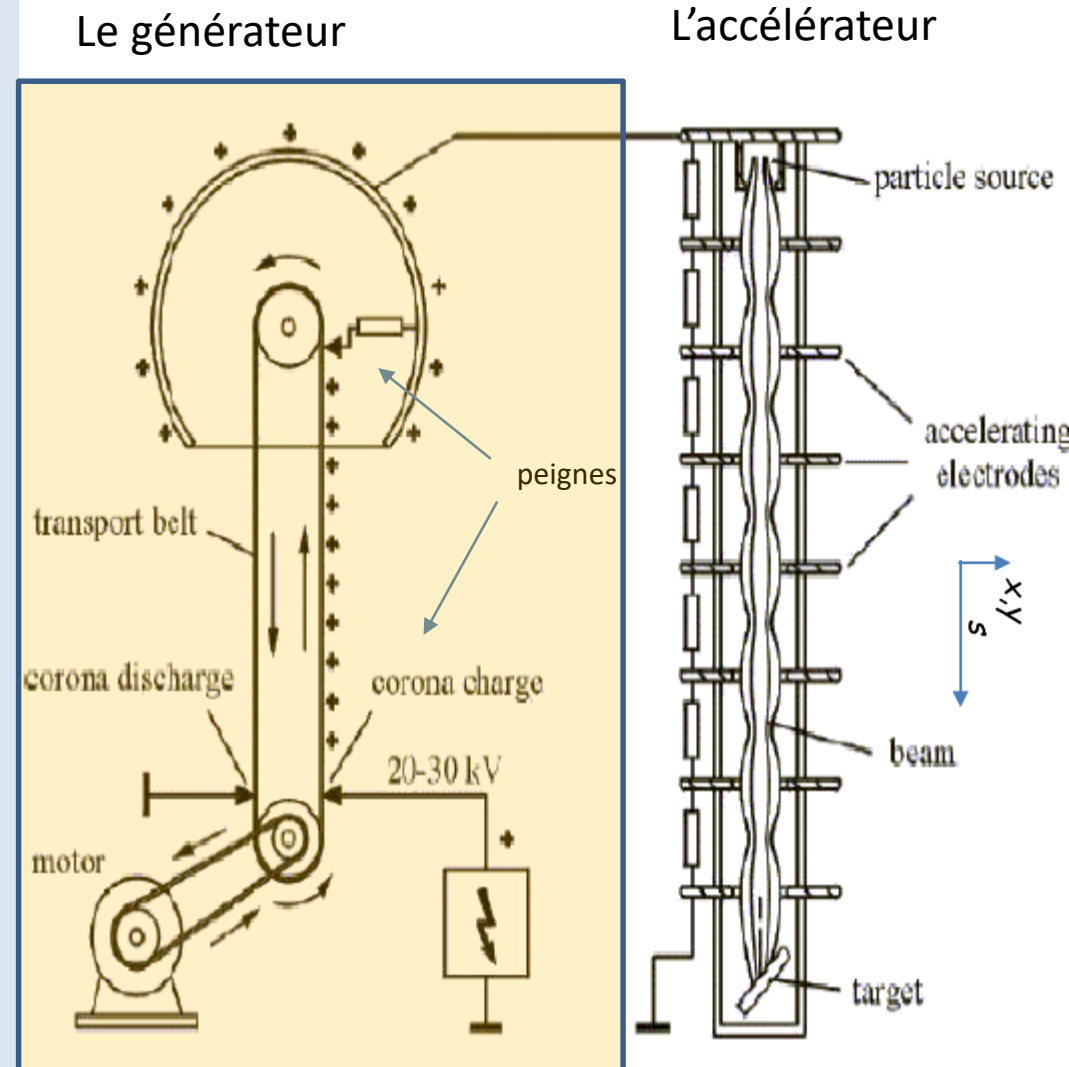
C'est un collecteur de charge :

- 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 pressurisée (10 atm) → gaz → SF6
- Invention d'électrodes spécifiques "gigognes" (composant le plus critique aujourd'hui)



Van de Graaf moderne

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



source

Electrodes
espacées



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

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

$$\beta_l = 0.015 - 0.07$$

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

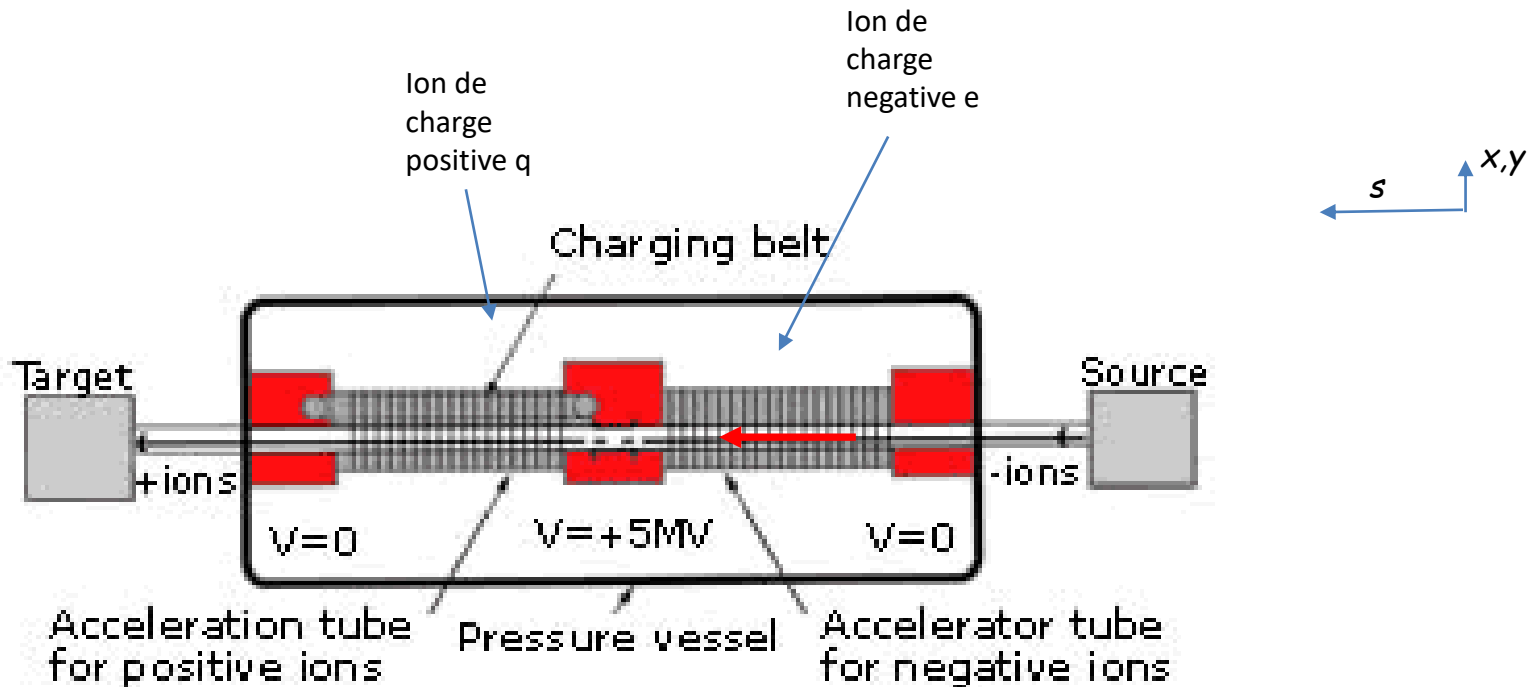
$$\beta_l = 0.11$$

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



Tandem

- 2 étages d'accélération:
 - Accélère des ions négatifs sous une haute tension
 - Les ions passent a 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 a haute pression (les ions accélérés sont eux dans le vide)
- L'énergie cinétique finale dépend de la charge des ions négatif/positif accélérés

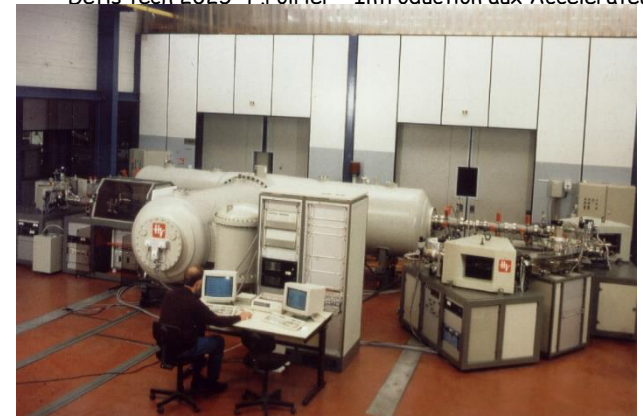


Tandem



Oak Ridge
(Tennessee)
tandem vertical,
USA

Tandem
horizontal
Van de
Graaff KVI,
Netherlands



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

$$\beta_t = 0.2$$



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.

$$\beta_t = 0.25$$

September 2021

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

Limitation des accélérateurs électrostatiques

- **Limitations**
 - Décharge Corona (local et momentanée, si non contrôlée, ionisation près des conducteurs)
 - Décharge dans le gaz d'isolation
 - Décharge a la surface
 - Une (deux) étape(s) d'accélération
- Accélérateurs Electrostatiques habituellement accélèrent jusqu'à 25 MV (avec le gaz approprié soit SF₆), dans l'air → ~ 2MV
- Accélérateurs construit pour opérer a 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 → cavités

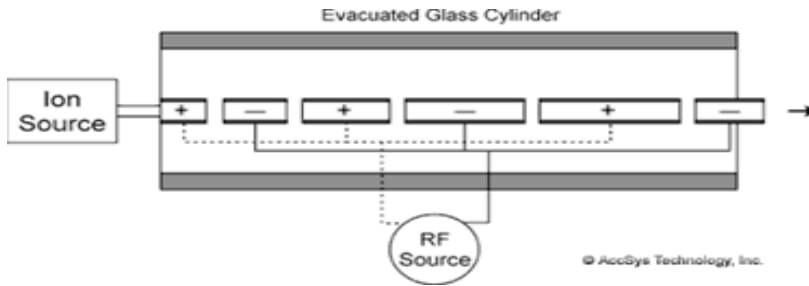
Accélérateur RF: Linac de Wideröe

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)



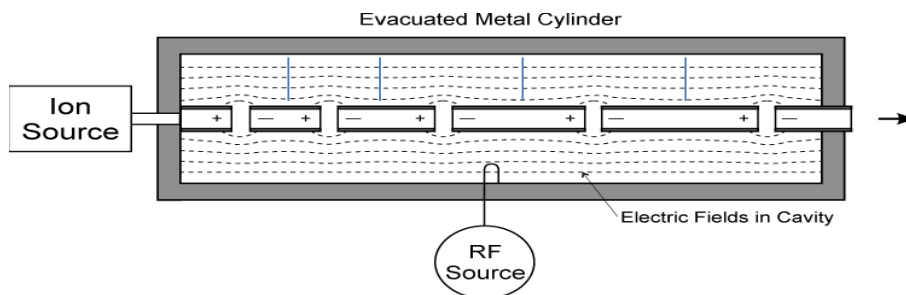
La fréquence utilisable est limitée vers ~100 MHz, puissance élevée perdu a travers les parois (effet antenne)

Condition
d'isochronisme

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

L_i : separation
 λ_{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.

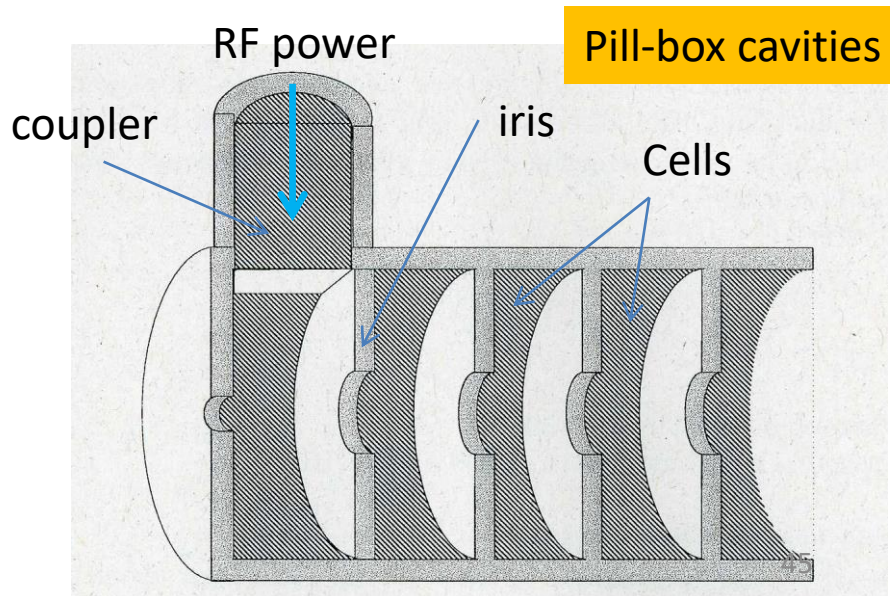


Cela constitue
les premières
cavité
résonnantes

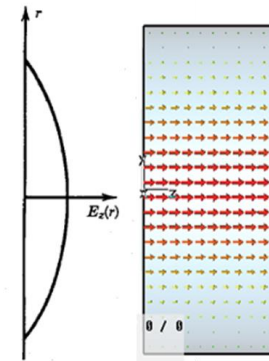
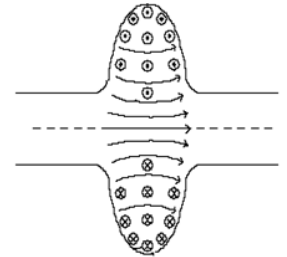


Cavités accélérantes

- Depuis les années 50s, les cavités résonnantes ont évolué 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 β_1 .
 - A haut β_1 , les particules sont relativistes \rightarrow distance entre interstices ne change pas
 - A bas, les cavites sont adaptes \rightarrow variétés de cavités existantes
 - Géométrie adaptée aux besoins (fréquence fixe ou non, puissance, champs, gradient,...)
 - Utilisation supraconductivité (voir slide plus tard)



Géométrie modifiée



Mode résonant adapté à l'accélération: champ électrique longitudinal au bon moment

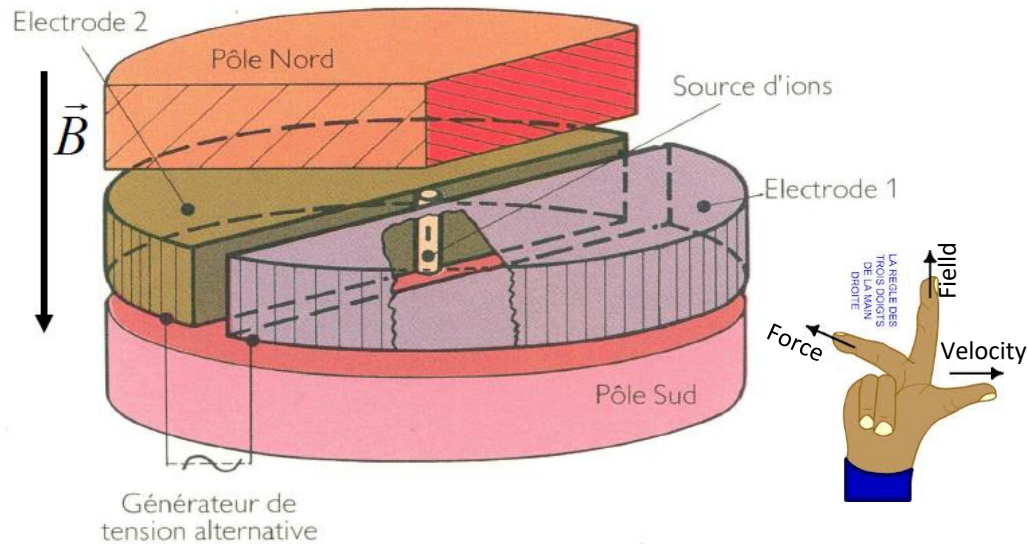
Il existe aussi des cavités non-accélérantes: Pour de la déflexion ou du bunching et aujourd'hui il y a même des cavités employées pour du diagnostics faisceau

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 a des tensions différentiels et deviennent donc des électrodes qui permettent l'accélération.
 - Les ions prennent le même temps a 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 a 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 a 1 GeV.

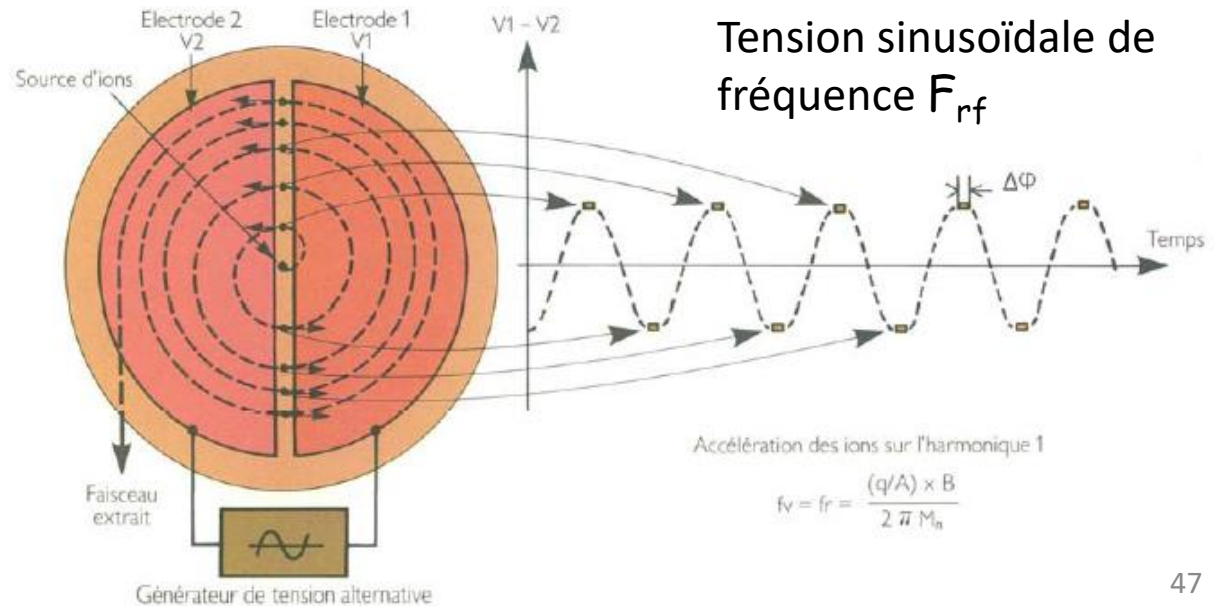
* $\beta = v/c$ ($c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s, célérité de la lumière)

Cyclotron classique



- Champ uniforme perpendiculaire au mouvement et indépendant du temps
- Electrodes semi-circulaire, tension alternative à une fréquence F_{rf}

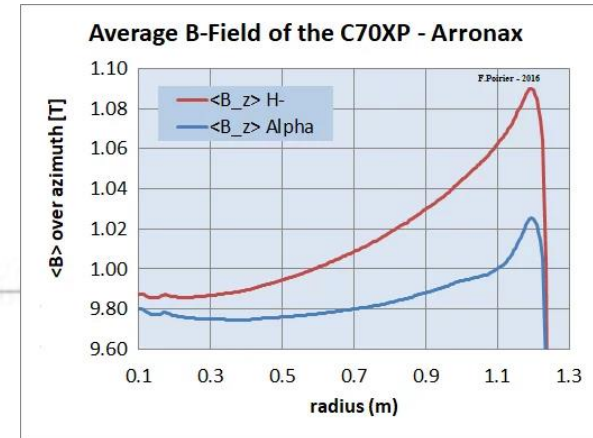
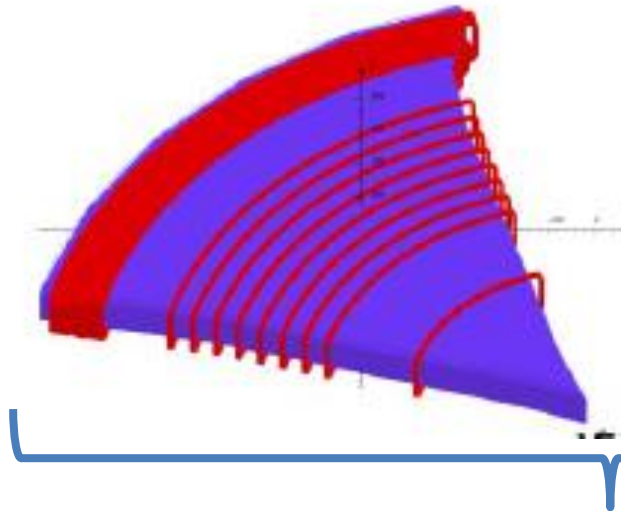
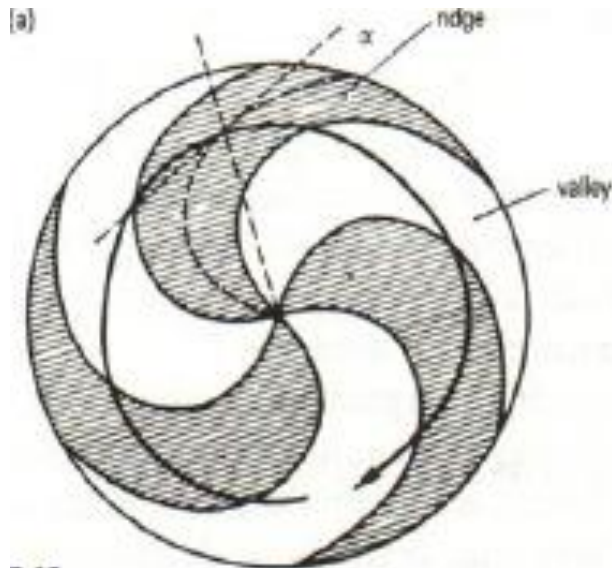
L'ion est créé dans une source ici localisée au centre et est accéléré répétitivement selon une trajectoire en spirale, ($m = \gamma m_0$ augmente) à cause de l'énergie cinétique qui augmente: Les particules avec le plus grand rayon sont les plus énergétiques



Cyclotrons modernes

- Pour garder l'**isochronisme** (synchronisation entre la fréquence machine et le passage des ions) le **champ magnétique B doit être modifié** quand γ augmente
 - Deux manières de procéder (pas complètement identiques):
 - Adaptation de la forme du champ magnétique (forme de spirale)
 - Et/ou ajout de bobines pour augmenter localement le champ

Cyclotrons adaptés pour l'isochronisme

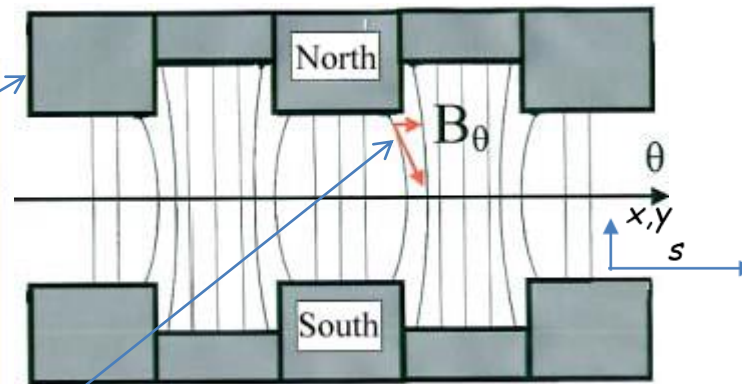
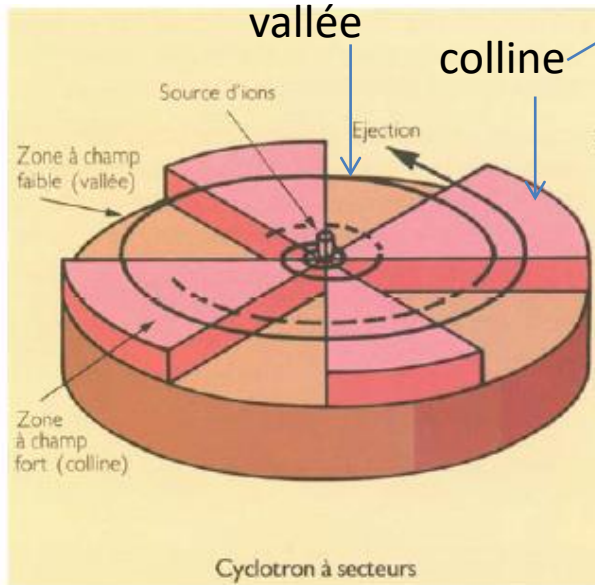


Par exemple: Le C70 d'ARRONAX (Nantes) est un cyclotron à 4 secteurs avec des bobines de compensation. Il atteint $E_k \sim 70$ MeV.

AVF Cyclotrons (1)

- Pour obtenir de la **focalisation transverse**:
 - Et maintenir les ions a l'intérieur du cyclotron
 - Utilisation d'une **succession de champs faibles et forts** (vallées et collines). Ce sont des **cyclotrons a secteurs** ou **champ azimuthal Variant (AVF)**

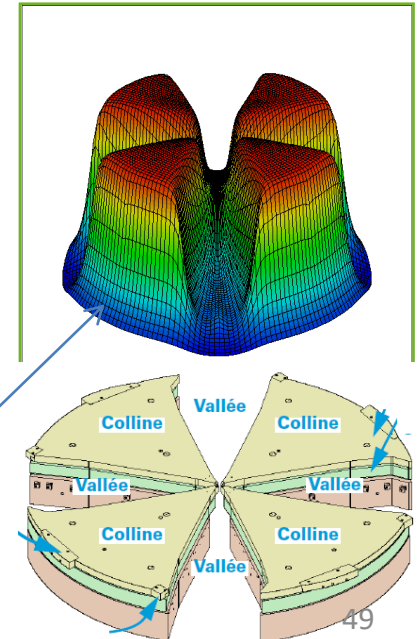
2) Cyclotrons à secteurs



Introduction d'une composante globale de focalisation dans le champ azimuthal

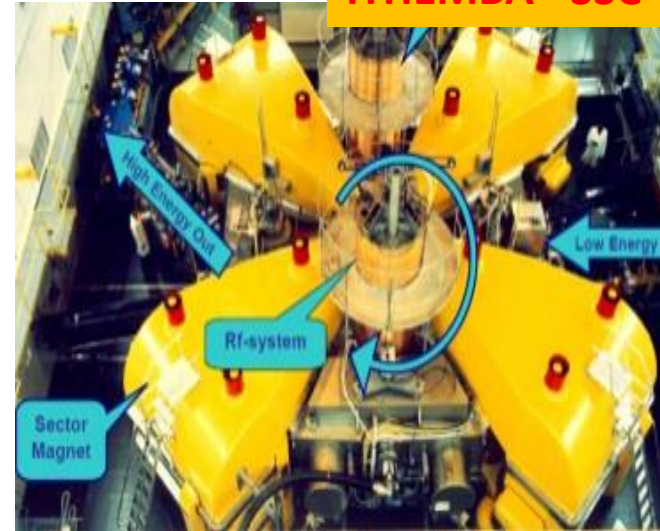
colline, champ fort

Champ simulé du C70 d'Arronax



Quelques Cyclotrons

ITHEMBA - SSC



PSI – inj2



Cyclotron à secteurs séparés

CYCLOTRONS pour protons:

- C70 ARRONAX - AVF, France - 70 MeV, 750 μ A
- iThemba - SSC, South Africa - 66 MeV, 300 μ A
- PSI - inj2, Switzerland - 72 MeV, 2.2 mA
- TRIUMF, Canada - 65 MeV, 100 μ A
- CNL, US - 68 MeV, 15 μ A
- K70 riken, Japan - 70 MeV, ? μ A

C70 ARRONAX



Cyclotron à secteurs



D'autres types d'accélérateurs : Application répétée de champs électriques variant via les cavités

$$\beta_l < 0.2$$

$$\beta_l > 0.2$$

$$\beta_l = \sim 1$$

Proton et autres ions

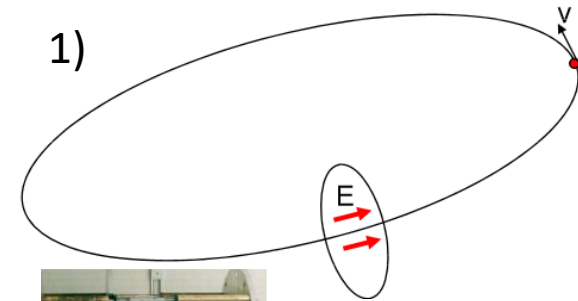
Electron (très rapidement relatif)

- **1) Synchrotron:** Les particules sont maintenues sur une trajectoire circulaire unique (contrairement au cyclotron). Il y a aussi quelques sections droites. La fréquence et la force des aimants sont ajustées en fonction de l'augmentation de l'énergie cinétique. → Largement utilisé pour les accélérateurs de haute énergie
- **2) Accélérateur Linéaire (linacs):** machines dites "droites". Elles emploient l'idée de donner une impulsion aux particules chargées plusieurs fois. Ceci demande un potentiel alternatif. Les faisceaux sont systématiquement des paquets. Le champ électrique est généré par une Radio-Fréquence (RF).

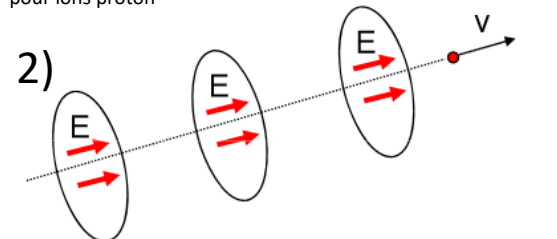
Une **radio-fréquence** (RF) d'accélérateur :

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

Deux approches:



Ex: cellule de Cavité (400MHz) cuivre (avant dépôt niobium) pour ions proton



Ex: Cavité niobium pour accélérateur e-

Gain en énergie et Défi

Gain en énergie:

- Dans les accélérateurs précédents, nous avons à faire à une tension sinusoïdale qui change au cours du temps. Le gain en énergie ΔW , contrairement aux électrodes à champ électrostatique va être dépendant de ce que les ions/particules subissent:

$$\Delta W = \sim qV_{acc} \cos \phi$$

- Plusieurs paramètres sont aussi introduit dans le calcul du gain en énergie (toujours une simplification):
- ϕ est la phase synchrone, mesuré par rapport au maximum de la sinusoïde
- L'amplitude de la tension V est la composante importante de l'apport en énergie mais nous n'avons accès qu'à une partie de celle-ci (il y a un ratio en plus).

Défi technologique:

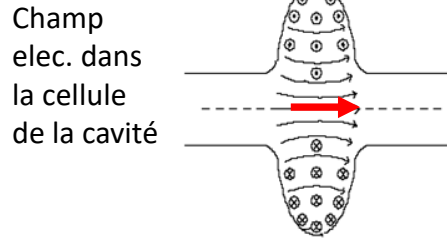
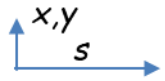
D'autres caractéristiques entre en jeu, qui vont limiter l'efficacité de transfert de puissance des cavités vers le faisceau (hors du cours).

- L'efficacité de transfert est si importante pour les accélérateurs → Défi technologique depuis plusieurs décades → **supraconductivité**
- L'apport de puissance Radio-Fréquence dans les cavités est aussi un défi technologique majeur:
 - Jusqu'à présent, il était employé des klystrons pour les puissances nécessaires à apporter à haute fréquence → les accélérateurs ont commencé à employer la **technologie des semi-conducteurs**. Ex: synchrotron soleil



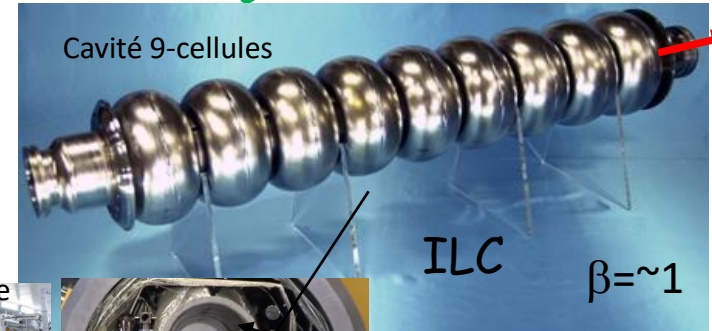
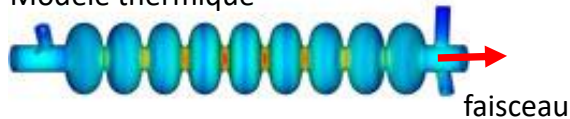
700 modules de
300W à 352MHz →
total: ~190kW

Cavités Cool-ed (Supraconductrice)



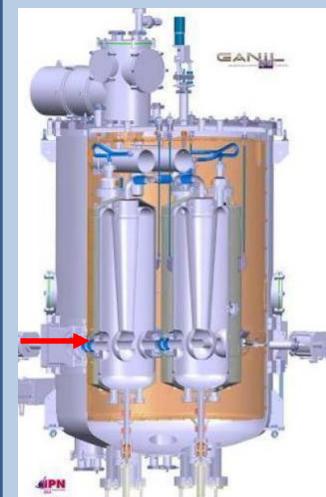
Cavité refroidie=moins de perte de puissance et donc moins besoin d'apporter de la puissance électrique au faisceau. Pour 3MV, $P_{chaud}=225kW$, $P_{supra}=0.75W$

Modèle thermique



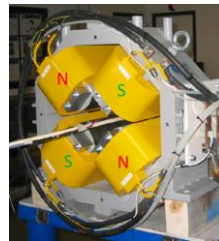
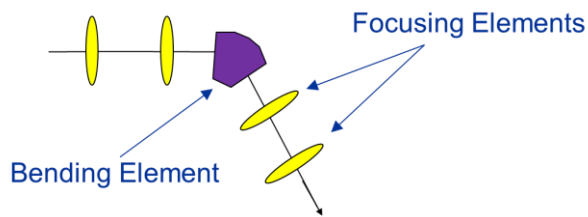
- Cavité a 9-cellules (ici un exemple) dite « SRF »
 - Plusieurs accélérateurs dont le collisionneur linéaire international (projet futur: ILC). Technologie matériaux : Nobium
 - Placée dans un **cryomodule supraconducteur (SC)** soit a ~2-4K
- L'ILC disposera de ~16000 cavités d'1m de long (1.3 GHz)
- Avantages du SC:
 - **Moins de dissipation de puissance** que l'équivalent « chaud » soit des opérations moins chère
 - Possibilité d'accélérer a haut cycle (>1%) et **haut champ électrique** (>31 MV/m)
 - **Ouverture des iris large** i.e. moins d'activation s'il y a perte de particules et moins de « wakefields » (vague de traine) induites
- Technologie de plus en plus utilisée mais:
 - Fabrication compliquée, technologie très sensible aux pertes de particules, système cryogénique

SRF du GANIL



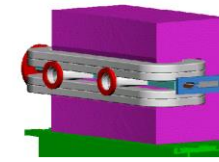
A propos, il n'y a pas que l'accélération qui compte

- Les éléments magnétiques sont présent dans tous les accélérateurs:
 - Vu par exemple avec le cyclotron (champ global dipôle qui courbe la trajectoire des particules)
 - Plusieurs fonctions pour les aimants:
 - Modifier la trajectoire des particules (ex: dipôle)
 - Garder les particules ensemble ou Modifier la taille faisceau (ex: quadripôle)
 - Garder ou modifier la chromaticité énergétique du faisceau (ex: sextupole)

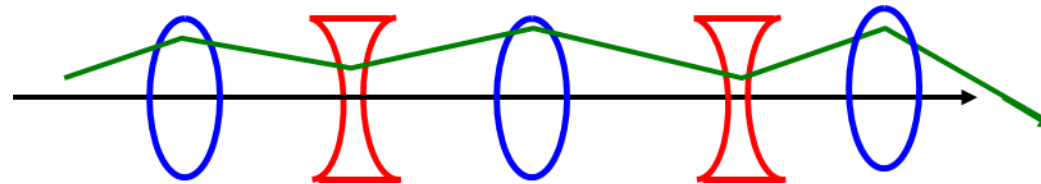


Quadripôles

Dipôles



Plusieurs quadripôles, permettront de garder une taille faisceau dans un plan: l'enveloppe du faisceau change (attention chaque particule individuelle aussi)



Position transverse de la particule et angle de la trajectoire sont modifié

Un injecteur: linac 4

Un accélérateur va être constitué de plusieurs éléments d'accélération



200 µg/cm² carbon foil

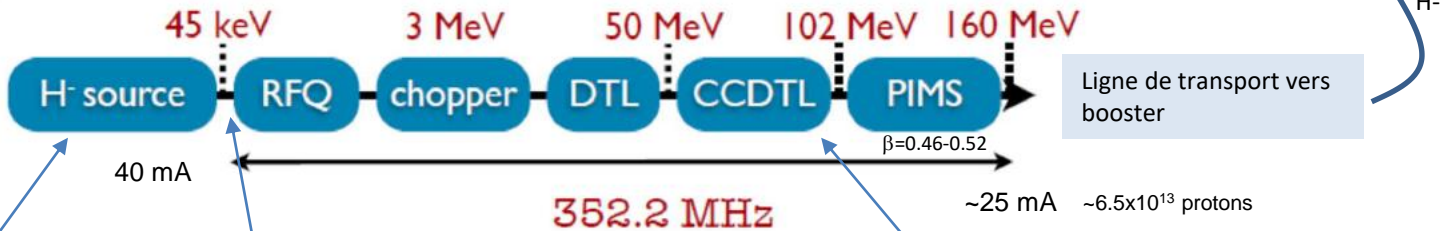
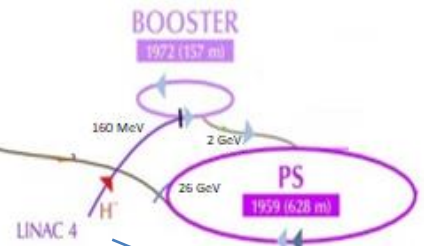
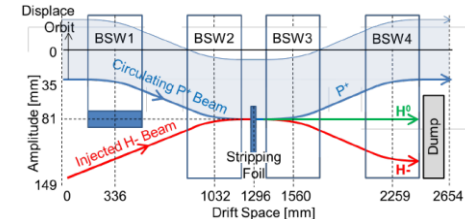
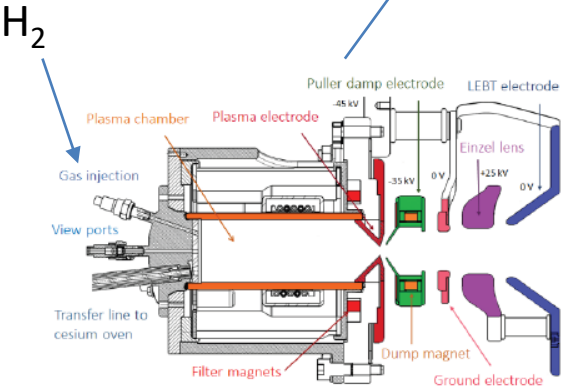
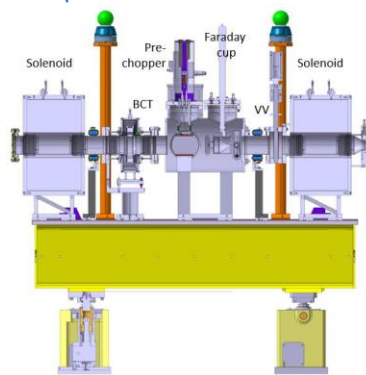


Fig. 1.3: Linac4 basic architecture.



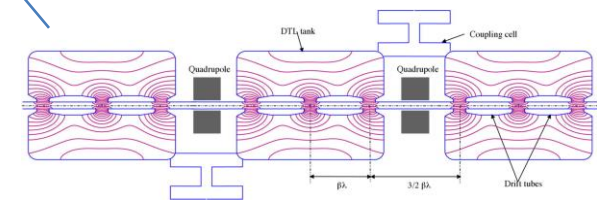
source



Banc intermediaire avec aimants et mesures



DTL: Drift tube linac en cuivre (chaud)



CCDTL: coupled cell DTL

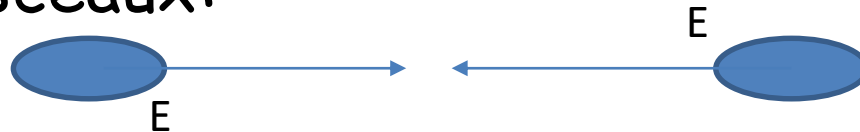


PIMS: PI Mode Structure, 352MHz – see R. Wegner et al, "PIMS—A simple and robust accelerating structure for high intensity proton Linacs"

Collisionneurs

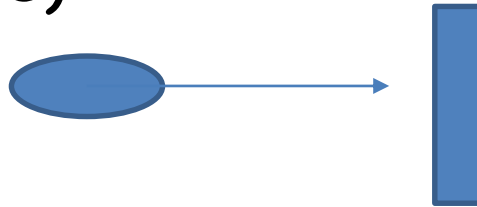
- Les accélérateurs peuvent faire collisionner les particules/ions de plusieurs manières:

- 2 faisceaux:



$$\sqrt{s} = E_{cms} = 2E$$

- 1 faisceau sur cible fixe (eg production de radio-isotope):



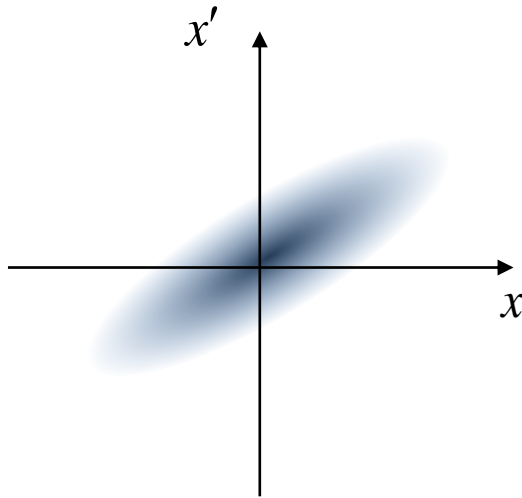
$$\sqrt{s} = E_{cms} = \sqrt{2m_{target}E_{beam}}$$

- Les 2 faisceaux permettent d'accéder à une énergie plus élevée: adapter à l'exploration à des plus hautes énergies

Trivia:

- The first e-e+ collider was commissioned in 1961 with ADA, Frascati, Italy
- Sometime, when accelerators physicists talk about colliders, they refer to the first kind (2 beams)!

Emittance Transverse

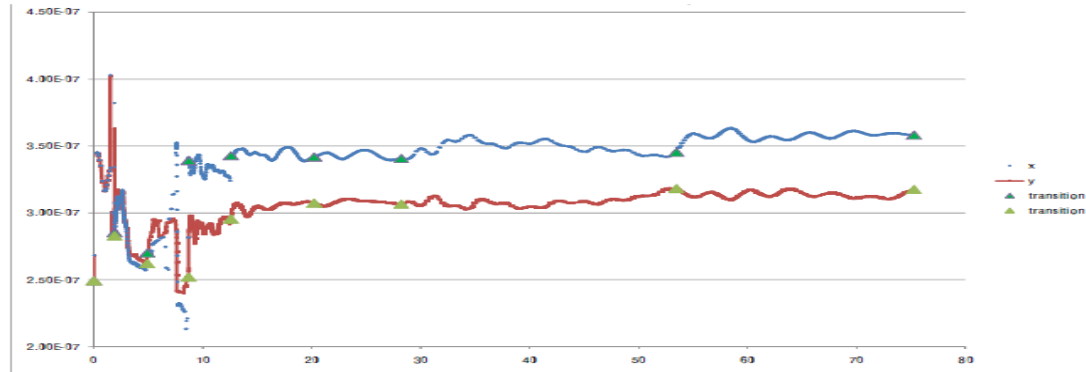


- Emittance=
 - Est une caractéristique fondamentale du faisceau (dimensionnement/divergence)
 - Synonyme de qualité faisceau (dans certain cas)
 - C'est l'espace de phase (aire) occupé par l'ensemble des particules, divisé par π

$$\varepsilon_w = \frac{A_{ww'}}{\pi} \quad w = x, y$$

Dans les accélérateurs, nous cherchons à avoir l'émittance la **plus petite possible** et si possible dès la source car elle est transportée dans tout l'accélérateur (~invariant*) Elle va définir la taille du faisceau dans tout l'accélérateur et aussi et surtout au point d'interaction

L'emittance dans le linac4



Emittance transverse nominale le long du linac4

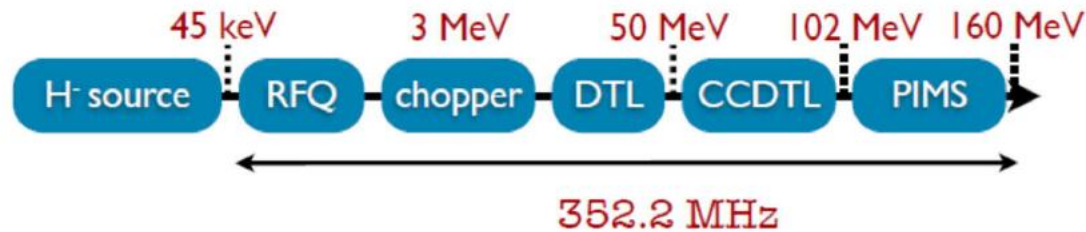
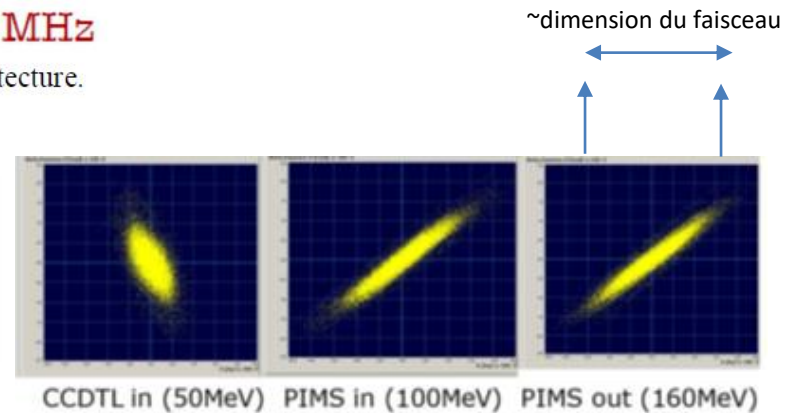
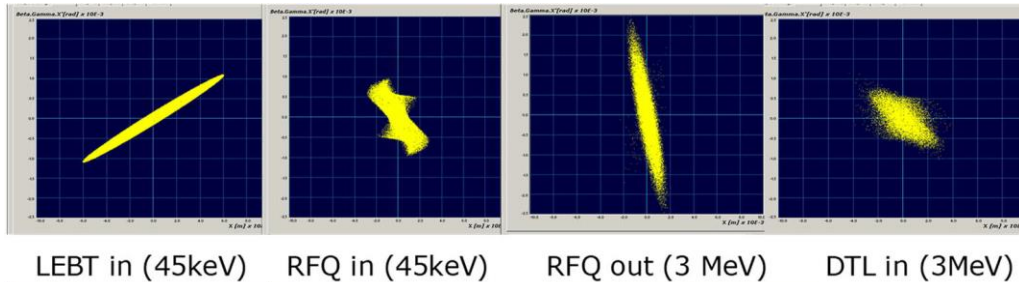


Fig. 1.3: Linac4 basic architecture.

Espace de phase (emittance) le long du linac4



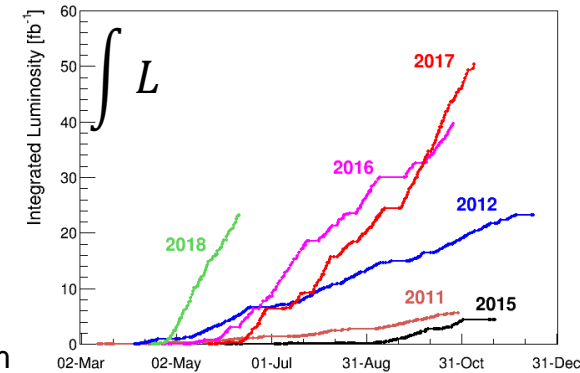
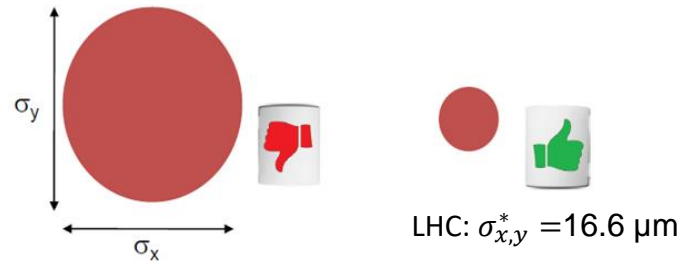
Luminosité (collisionneur)

- Afin d'obtenir une luminosité instantanée L élevée (et donc un grand nombre d'interaction), il faut des faisceaux très petits aux points de collisions (IC)

L_{peak} (design LHC) = $1.18 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}/\text{s}$

Où:
 n_b = nombre de paquet
 N = particules par paquet
 f_{rep} = fréquence de répétition
 $\sigma_{x,y}$ = taille transverse (gaussien)
 R_D =facteur d'ajustement géométrique (ex: Xing, sablier)

$$L = \frac{n_b N^2 f_{\text{rep}}}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} R_D$$



Run	Years	Average integrated Luminosity ATLAS/CMS [fb ⁻¹]
Run 1 total:	2010–2011–2012	29.2
Run 2 total:	2015–2016–2017–2018	159.8
Run 3 total (so far):	2022–2023–2024 (~2025–2026)	195.9
Total:		384.9

Donc on va chercher a rétrécir (densifier) les faisceaux.
 Ceci dépend fortement de l'emittance initiale et de ce qu'il s'est passé dans l'accélérateur car

$$\sigma_x^* = \sqrt{\varepsilon_x^* \beta_x^*}$$

Emittance a l'IC

Focalisation a l'IC

Où:
 $\beta_{x,y}^*$ = vient des aimants de focalisation (fonction Beta) proche de l'IC
 $\varepsilon_{x,y}^*$ = émittance du faisceau a l'IC

En vrai il y a un autre terme supplémentaire par exemple $\sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x + \rho \delta}$ mais on le fait tendre vers 0 a l'IC avec $\rho \delta_{x,y} =$ fonction de dispersion (ρ) et l'étendu (spread) du moment = 0

1 barn = 10^{-24}cm^2

Le collisionneur hadronique large

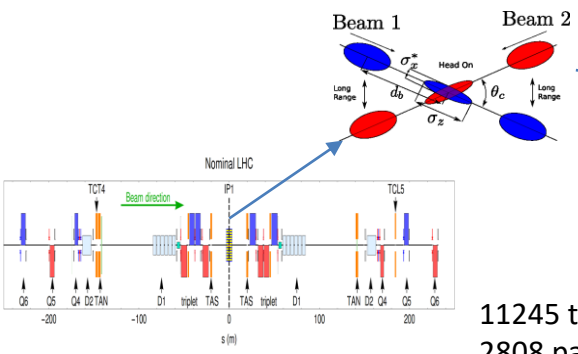
- 2 anneaux, 27 km de circonférence, 4 points de croisement (interaction) du faisceau
- Proton-protons, faisceau de 7TeV/faisceau (prévu), $F=11.245\text{kHz}$
- Ces anneaux sont composés d'un grand nombre d'éléments magnétiques/cavités, diagnostics, vide,...

Module cryostat de 4 cavités



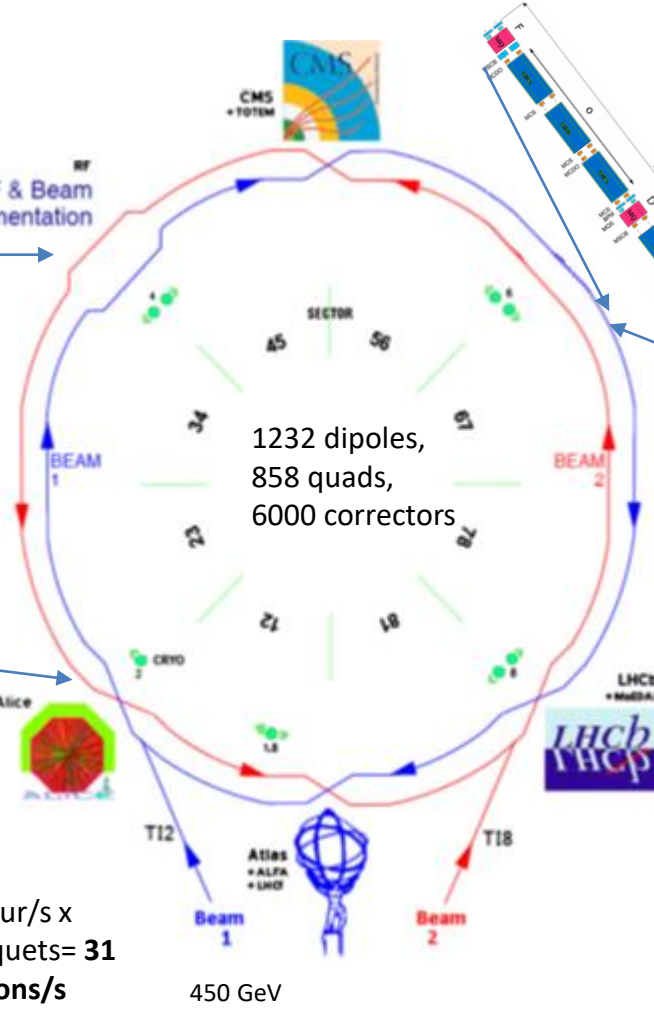
8 cavités RF 400MHz, 2 MV/cav (5MV/m) a 4.5K --> apport 16MeV/ tour

Point de collision

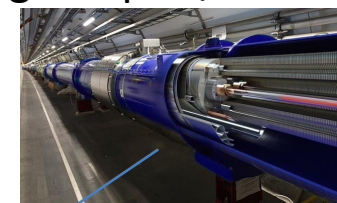


Schema des aimants du point de collision

11245 tour/s x 2808 paquets= 31 M collisions/s

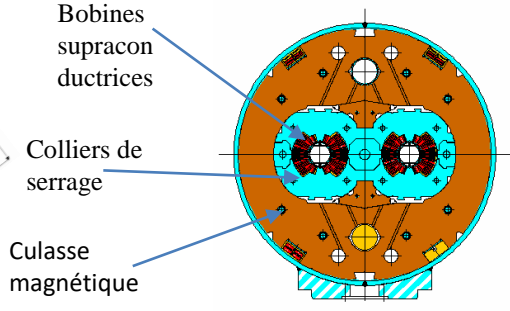


450 GeV



8.65 T

Coupe de l'aimant

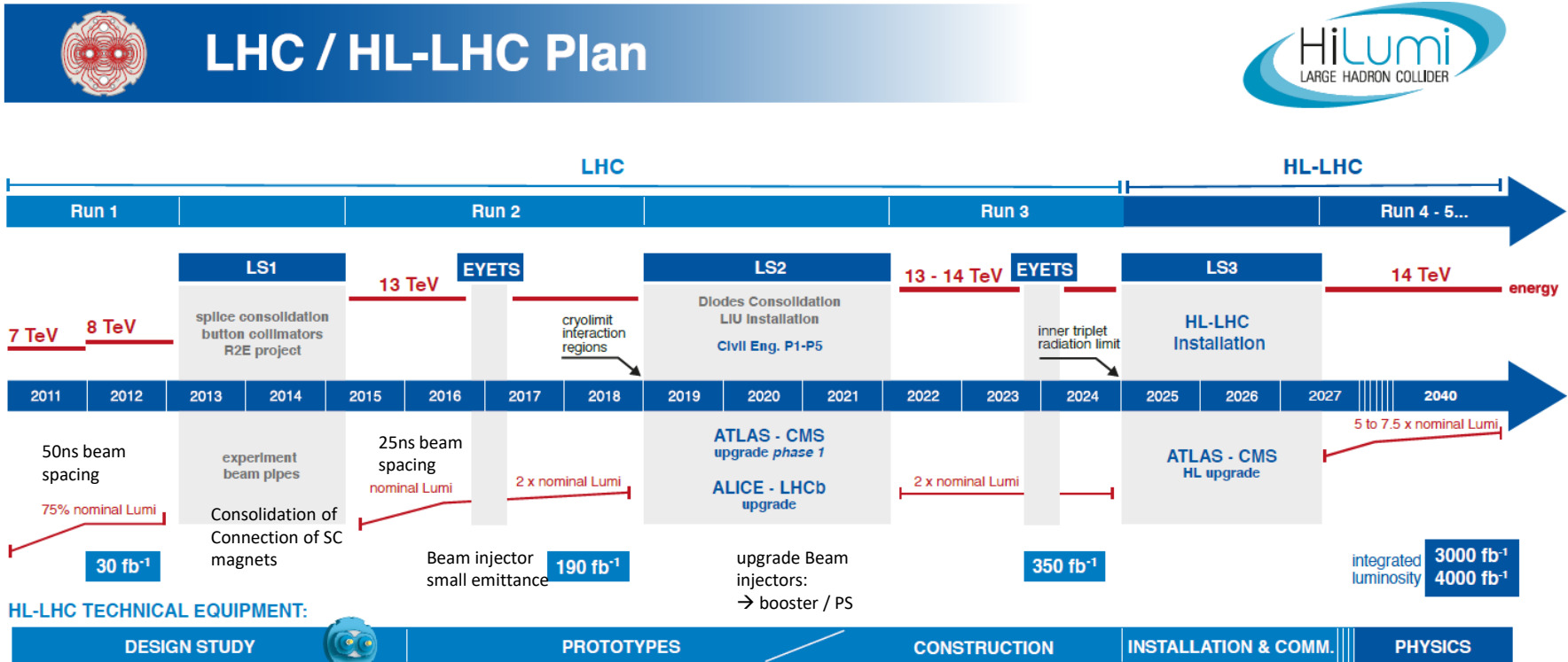


Module cryostat avec la section de courbure

1 seul assemblage de longueur= ~15 m pour 27.5t, refroidi a 1.9K:
 - Long=peu d'espaces sans champ
 - Froid=pas de resistance électrique
 2 Tubes a vide = 56 mm de diametre

LHC runs

- L'utilisation de l'accélérateur sur plusieurs années avec des phases d'opération (run) et des phases d'arrêt (long shutdown LS) pour améliorations/maintenances
- Run 3 a commencé en
 - février 2022 avec mise en route du linac 4 (mi-fev) et consécutivement des autres injecteurs.
 - Fin fev: mise en route des derniers aimants* du LHC (sans faisceau)
 - Début mai: collision a 450 GeV
 - juin pour l'énergie nominale 6.8 TeV (basse intensité)
 - 12 Aout 2022: 2440 paquets (bunches) atteint après une augmentation sur plusieurs semaines du nb de paquet
- La prochaine phase de grande amélioration est le HL-LHC (Haute Luminosité) vers 2025



HL-LHC CIVIL ENGINEERING:

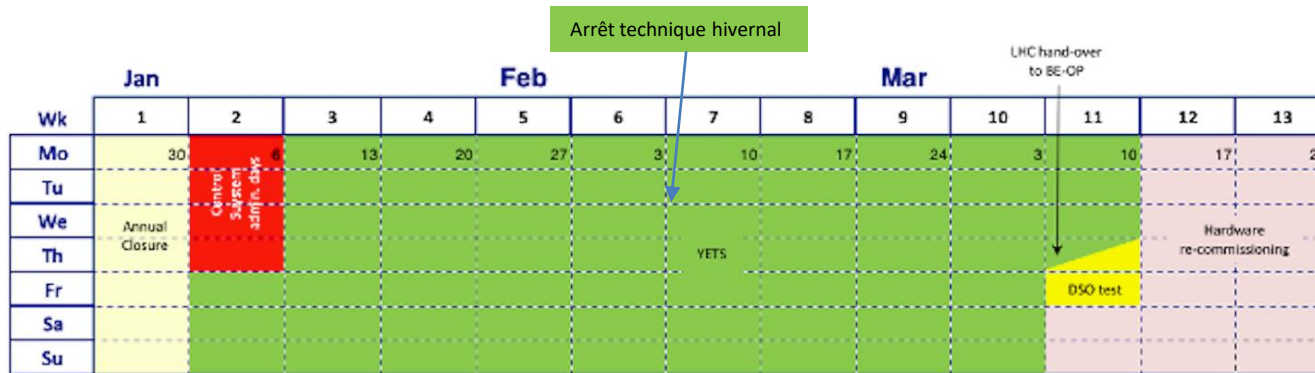


Linac 4: nouveau en 2016, a 160 MeV
 Booster et PS: mis a jour en 2019-2020 (PS) avec nouveaux aimants, diag, refroidissement,...) afin de preparer run 4

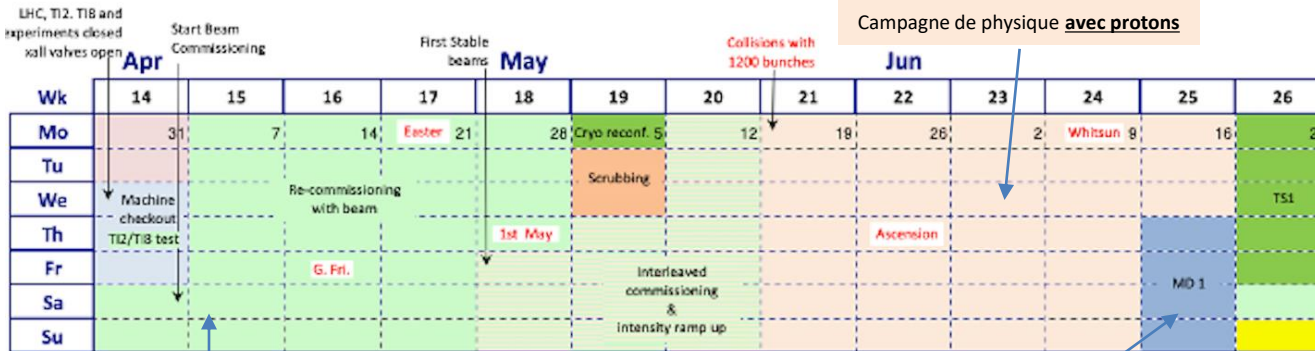
*Powering tests and magnet training in the last of the LHC's eight sectors: 4 weeks

Agenda LHC 2025

- **Arrêt technique hivernal:** partie en vert allant jusqu'à la fin de la semaine 11 représente
- **Remise en service du matériel** et de la vérification de la machine au cours des semaines 12, 13 et 14
- **Injection du premier faisceau** est prévue pour le 5 avril
- Remise en service avec faisceau et de la montée en intensité des faisceaux
- **Campagne de physique** avec protons



Le "Run 2024" s'est terminé le 23 Nov.



Puis oxygène, puis proton, puis Nov., ions plomb → arrêt le 8 dec.

Des défis et la suite

- Les challenges:
 - Quelques défis technologiques explicités avant, ex: aimants, RF
 - Pour LHC:
 - Des étapes d'exploration avec un nouvel accélérateur: défi nouvelle physiques, défi technologique ingénierie
 - D'opération: Sur la longueur de 26.7km, le faisceau doit être positionné mieux que 1mm alors que l'on se bat contre:
 - Interaction faisceau-faisceau, collimation, réglage (tuning)/désalignement/vibration.
 - Effets collectifs des ions dans le faisceau, nuages d'électron
 - De radioprotection: limitation de l'activation
- Pour les accélérateurs, il y a aussi des tendances:
 - Plus d'intensité et plus stable → Myrrha
 - Plus d'énergie (et au delà) → ILC/CLIC/FCC?
 - Plus compact → wakefield
 - Plus de précision/plus rapide → Thérapie flash
 - Plus de diagnostics: les yeux des accélérateurs. Ils doivent être les moins disruptifs possibles
 - Plus durable (FCC) et moins énergivore → ERL
- Le futur des collisionneurs HE:
 - ILC/CLIC/FCC?
 - Plus long terme: wakefield machine?

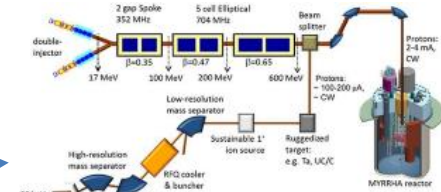
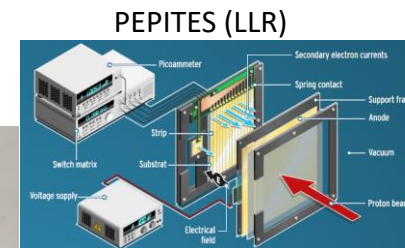
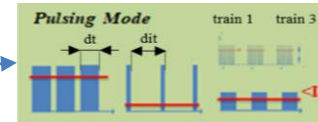
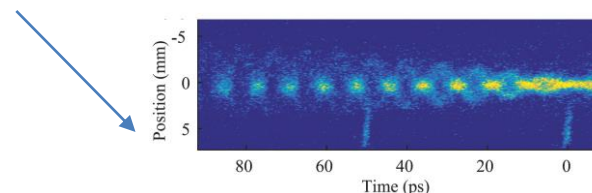


Figure 1: Layout of the MYRRHA proton driver.



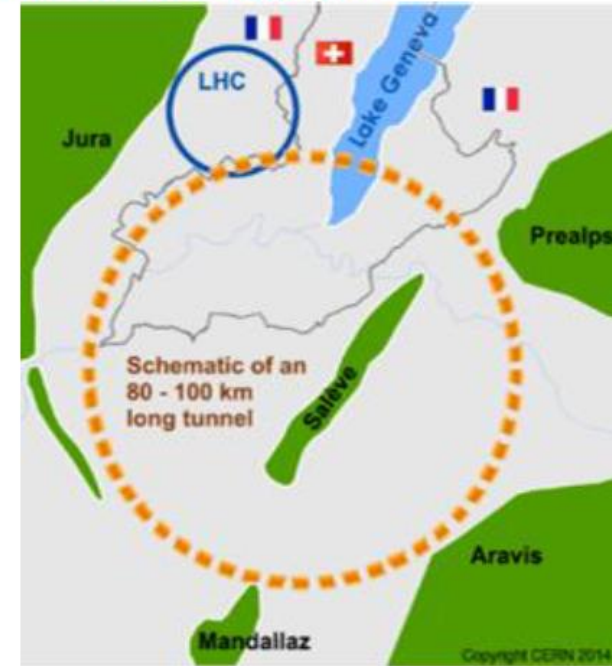
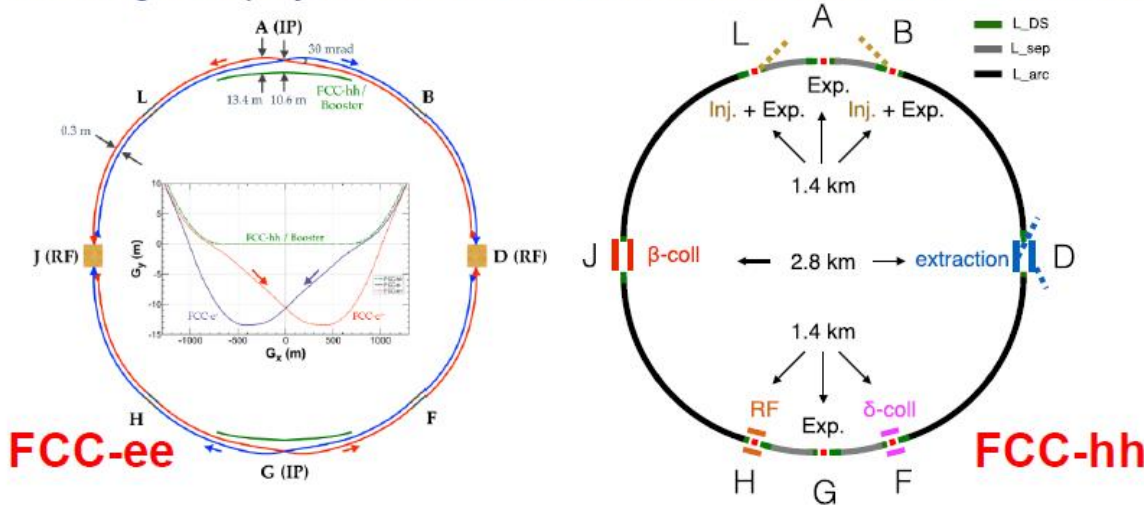
Diamants (LPSC)



The FCC integrated program inspired by successful LEP – LHC programs at CERN

Comprehensive long-term program, maximizing physics opportunities

- Stage 1: FCC-ee (Z, W, H, tt) as Higgs factory, electroweak & top factory at highest luminosities
- Stage 2: FCC-hh (~100 TeV) as natural continuation at energy frontier, with ion and eh options
- Complementary physics
- Common civil engineering and technical infrastructures
- Building on and reusing CERN's existing infrastructure
- FCC integrated project allows seamless continuation of HEP after HL-LHC



FCC-ee
~ 15 years operation

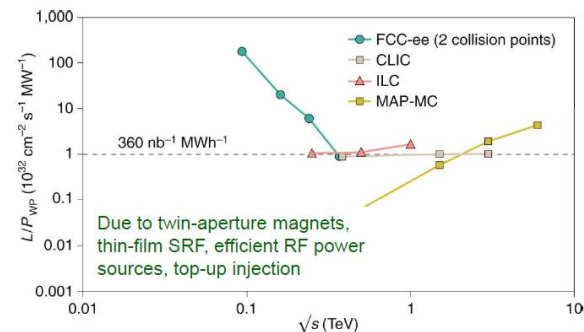
10 years

FCC-hh
~ 25 years operation

FCC-ee dismantling, CE & infrastructure adaptations FCC-hh

- Feasibility Study: 2021-2025
- If project approved before end of decade → construction can start beginning 2030s
 - FCC-ee operation ~2045-2060
 - FCC-hh operation 2070-2090++

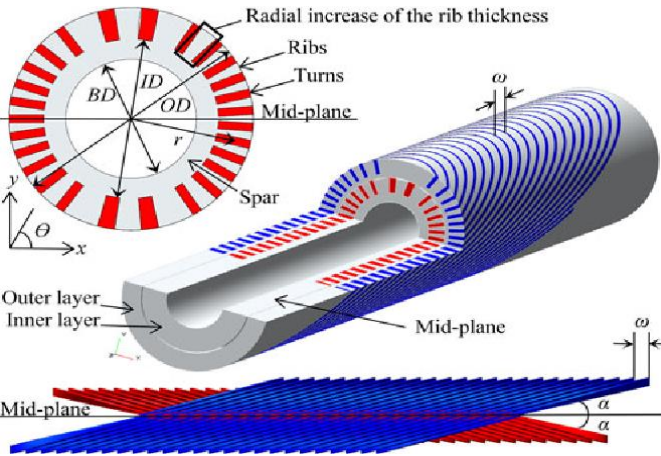
Luminosity vs. electricity consumption



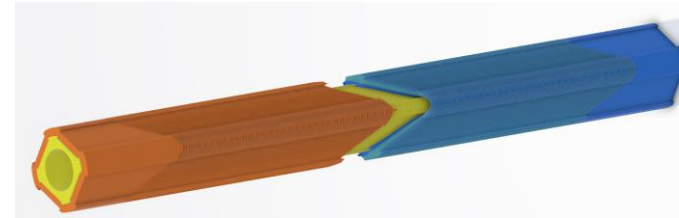
Autre défis technologiques

Diminution de la puissance employée

- Un exemple pour FCC au LAPP (Annecy), proposition de quadripôle de technologie CCT-HTS:
 - CCT (Canted Cosine Theta), un aimant basé sur deux champs solénoïdes opposés, employant des rubans de matériaux supraconducteur haute température (30°K)



HTS CCT sextupole – M.Koratzinos



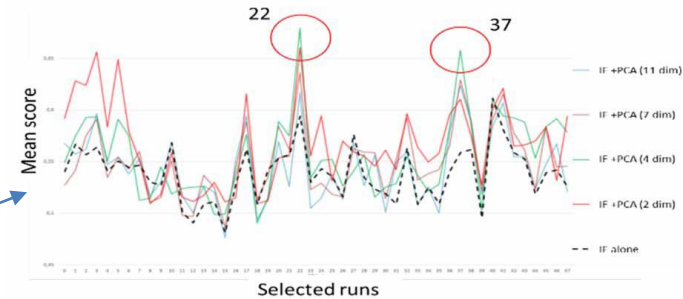
Quadrupole mechanical model CAD in 2 parts - LAPP

Technologie HTS Etat de l'art → Consommation de puissance de l'anneau=100MW. 76% avec techno de base (cuivre). Avec HTS cela diminuerai a ~8MW (10%) a l'énergie du "top".

Utilisation de l'IA et apprentissage automatique (*,**)

- Dans le design des accélérateurs
- Dans les opérations, exemple détection d'anomalies
- Jumeaux numériques

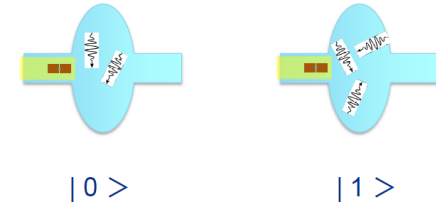
Score de la combinaison d'algorithmes "foret d'isolation" (IF) avec Analyse en composante principale multi-dimensionnelle (PCA)



**First Anomalies exploration from Data Mining and Machine Learning at the Aronax Cyclotron C70XP", F.Poirier et al, doi: 10.18429/JACoW-IPAC2023-TUPM036
 ** "Neural Networks for Modeling and Control of Particle Accelerators", A.Edelen et al.

Technologie des cavités pour les ordinateurs quantiques

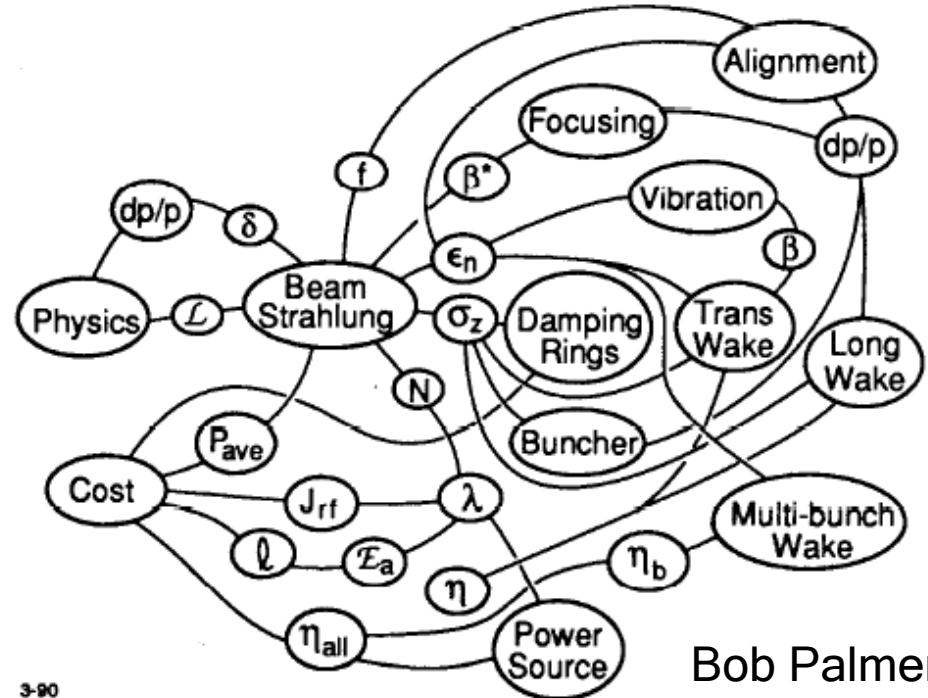
- Encoder des q-bit dans une cavité



Conception des accélérateurs

Ici a été présenté quelques morceaux des travaux, études et défis liés aux faisceaux pour les accélérateurs. Un défi particulièrement exigeant et complexe vient de la nécessité de prendre en compte un grand nombre de paramètres dans le design des accélérateurs et qui concerne la dynamique des faisceaux

« La conception des collisionneurs est complexe dû aux inter-relations entre les différents paramètres et les contraintes molles de leurs valeurs. »



Bob Palmer
1990

3-90