

Les accélérateurs de particules 1

Les accélérateurs linéaires

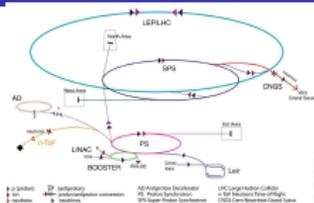
Antoine Chancé

CEA Saclay DRF/IRFU/DACM

13 juillet 2022

- 1 Quelques généralités
- 2 Les accélérateurs électrostatiques
- 3 L'accélération résonnante
- 4 Les accélérateurs linéaires
- 5 Grandes installations

Pour la recherche fondamentale



Goal of Accelerator Science :
Answer FUNDAMENTAL Questions



We humans have long been obsessed with four great questions:

*the nature of matter,
the origins of the Universe,
the nature of Life,
the workings of mind.*

Herbert A. Simon

*Nobel Laureate in Economics
from the Lecture in 1986*



Qui rend aussi de grands services à la société



Initialement conçus pour étudier les trajectoires de l'univers, les accélérateurs de particules accélèrent des particules chargées à des vitesses proches de celle de la lumière, avant de les faire entrer en collision à des énergies extrêmement élevées. Les particules produites dans des collisions sont ensuite observées et analysées pour révéler la structure de la matière. Aujourd'hui, les accélérateurs de particules sont beaucoup plus que des instruments de recherche fondamentale - leur utilisation dans l'industrie et la médecine se traduit par un impact considérable, souvent inaperçu, sur notre vie quotidienne.

Les accélérateurs de particules sont par exemple utilisés dans la fabrication de puces en silicium pour l'électronique, la découpe et le soudage par faisceau d'électrons, le renforcement des matériaux, le diagnostic médical, le traitement des cancers, le contrôle de la pollution atmosphérique et du rangement chimique. L'analyse et la caractérisation des matériaux sont également la clé de la fabrication de produits alimentaires et de matériel médical et l'inspection de fret. Des applications vertes des sources d'énergie alternatives pourraient également voir le jour à moyen terme.

Pour que la science continue à améliorer notre société grâce à des applications toujours plus efficaces et innovantes, il est essentiel d'apporter un soutien constant à la recherche et au développement des accélérateurs.

Physique fondamentale
Science des matériaux
Physique du solide et de la matière condensée
Biologie et chimie

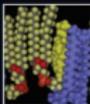
Recherche et Développement

Epuration des gaz de combustion
Energie et Environnement

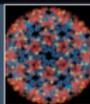
Traitement des cancers
Production de radionucléides pour l'imagerie médicale
Santé et Médecine

Implantation d'ions pour l'électronique
Durcissement de surfaces et de matériaux
Soudage et découpe
Traitement de déchets et de matériel médical
Conservation des aliments
Applications industrielles

Patrimoine culturel
Authentification d'œuvres d'art
Inspection de fret et sécurité
Caractérisation des matériaux
Energie nucléaire plus propre et plus sûre
Technologies pour la fusion
Remplacement de réacteurs de recherche vieillissants
Perspectives



Recherche sur les matériaux
Un faisceau de particules est utilisé pour analyser la structure 3D de matériaux.



Médecination de protéines
Les lasers synchrotron permettent aux scientifiques d'étudier la structure 3D des protéines, ce qui aide à concevoir de nouveaux médicaments.



Contrôle de l'émission de gaz nocifs
Le traitement des gaz de combustion par faisceau d'électrons permet d'éliminer les polluants.



Hadronthérapie
Les faisceaux de protons et d'ions lourds sont très efficaces pour le traitement des tumeurs profondes.



Tomographie par émission de positrons (TEP)
Les radio-isotopes utilisés pour l'imagerie TEP sont produits par des accélérateurs.



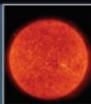
Électronique
La plupart des composants électroniques sont produits par irradiation d'ions.



Renforcement des matériaux
Les matériaux composites sont renforcés par irradiation d'ions.



Patrimoine culturel
Les faisceaux de particules sont utilisés pour l'analyse non destructive d'œuvres d'art et de vestiges archéologiques.



Energie
Les accélérateurs sont utilisés dans la mise au point de la fusion et des réacteurs nucléaires plus sûrs et plus propres.

Impact des accélérateurs sur la société

Qui rend aussi de grands services à la société (2)



Accelerators in Use

There are about 13,000 accelerators in use around the world

Nowadays the majority of accelerators are used in different types of applications. However, we will mainly go through their use as a tool for exploring the interior of matter.

General industrial use:

Sterilisation, imaging

Research accelerators:

Particles, synchrotron light used in biomedical, physics, chemistry, biology, material research

Radiotherapy:

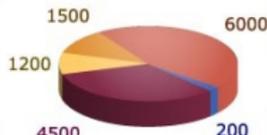
Cancer treatment with X-rays, protons and other particles

Ion implantation, surface modifications:

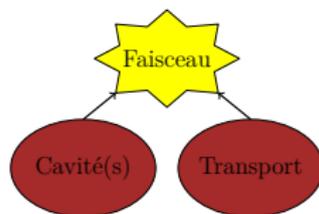
Controlled semiconductor doping; Changing properties of surfaces

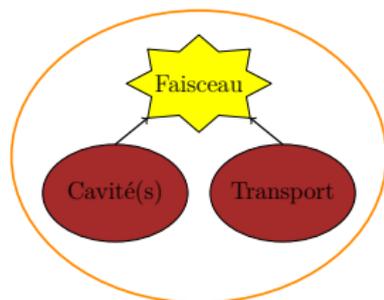
Radioisotope production:

Cancer treatment; imaging organs for medical use

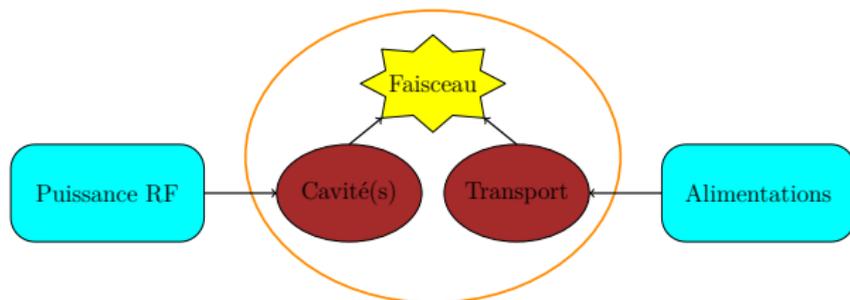




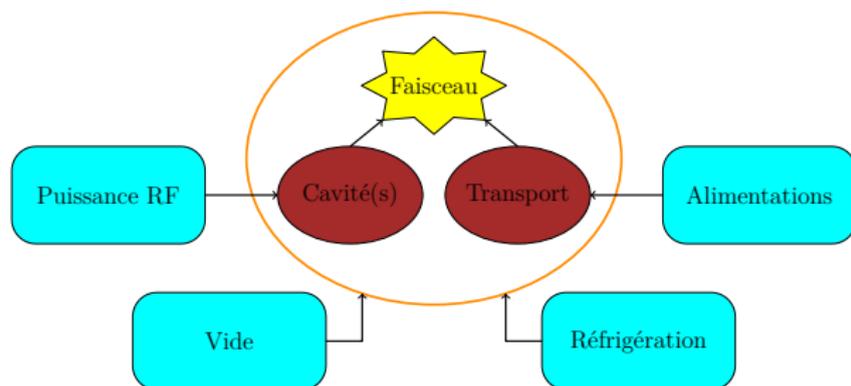




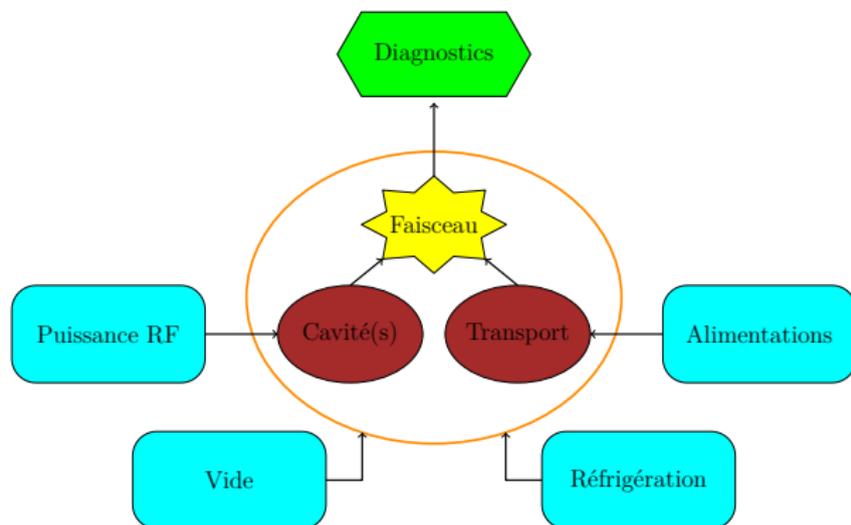
Principales composantes



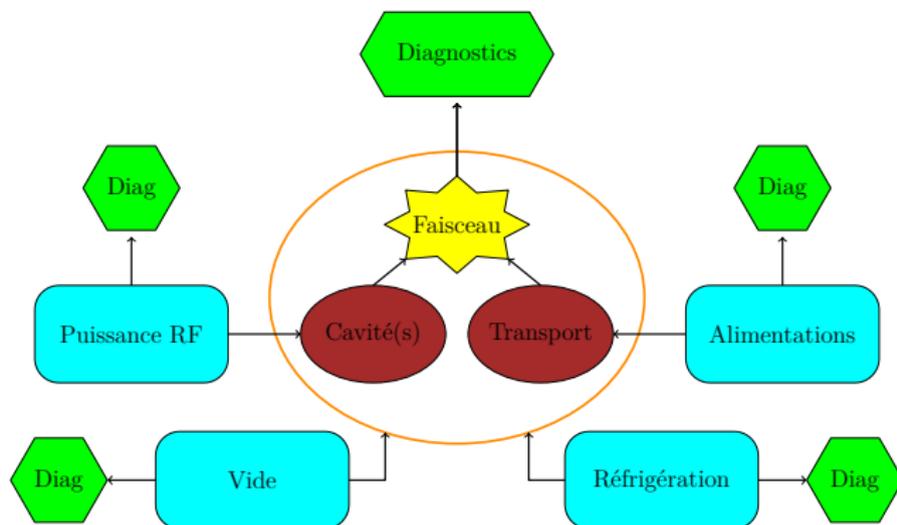
Principales composantes



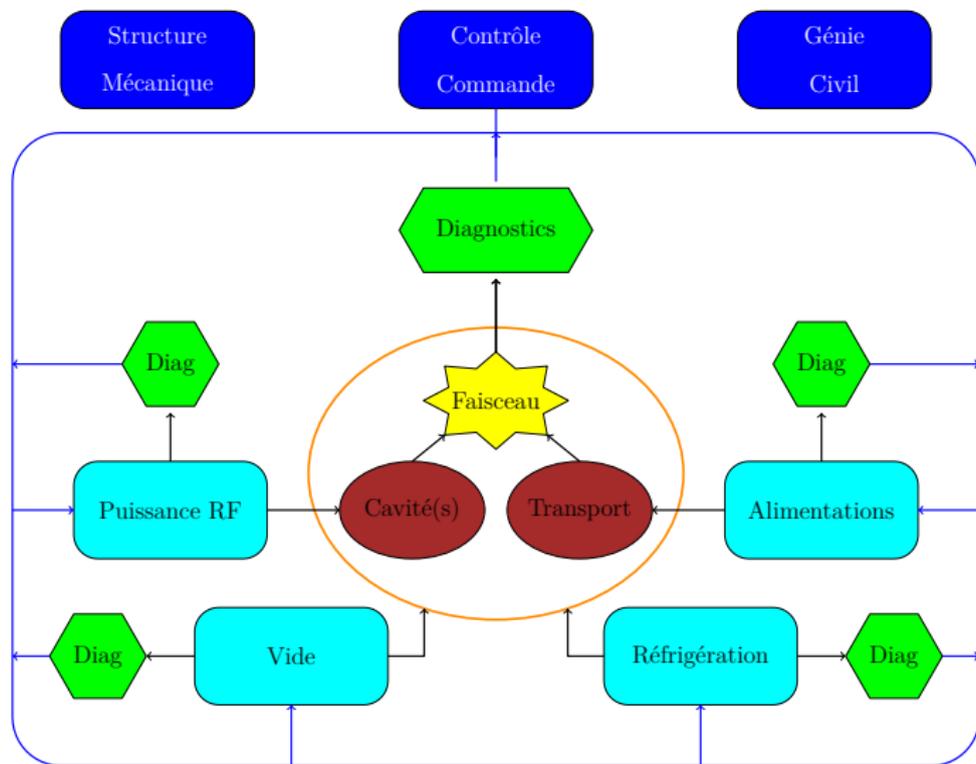
Principales composantes



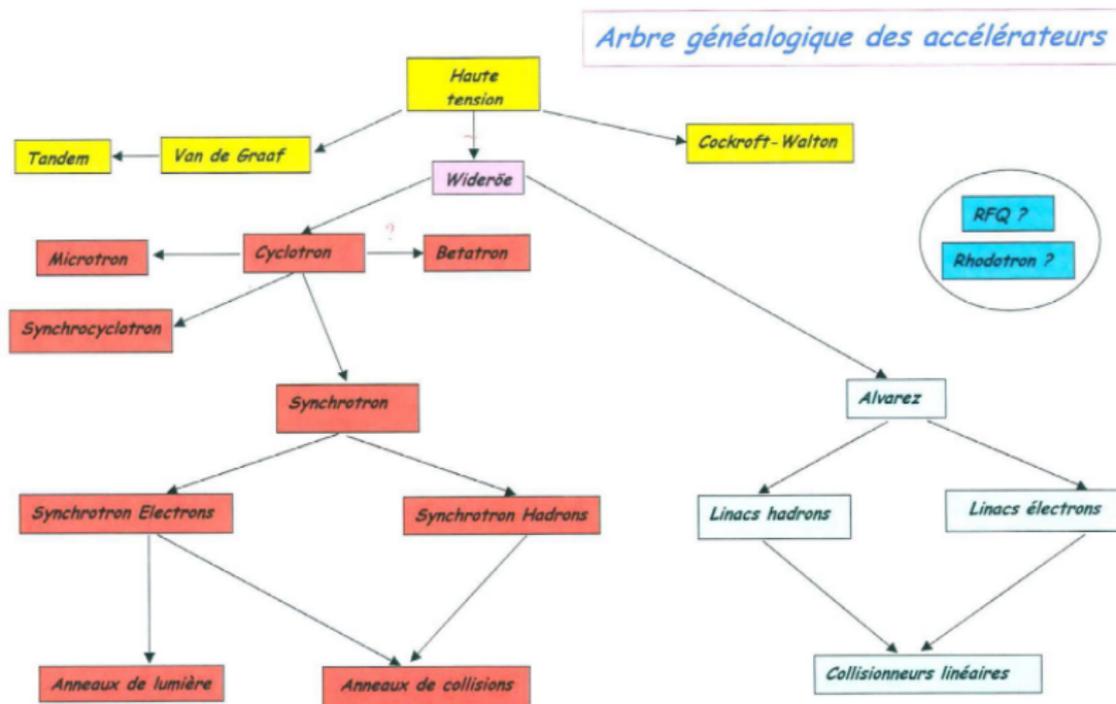
Principales composantes



Principales composantes



La grande famille des accélérateurs

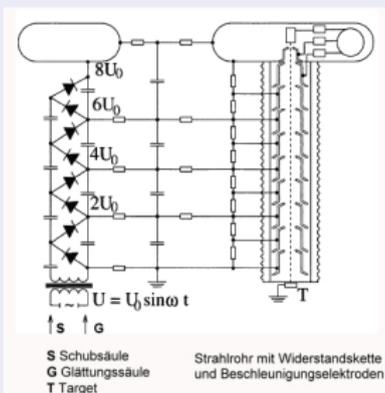


Eric Baron - GANIL

Le Cockroft-Walton

- 1930 : **Augmentation de la tension accélératrice** avec la cascade de Greinacher.
- 1932 : Cockroft et Walton : première désintégration de Li par des protons de 400 keV.
- Système encore utilisé comme **injecteur de hadrons** bien que remplacé le plus souvent par un RFQ (Quadripôle radiofréquence).

Schéma de principe



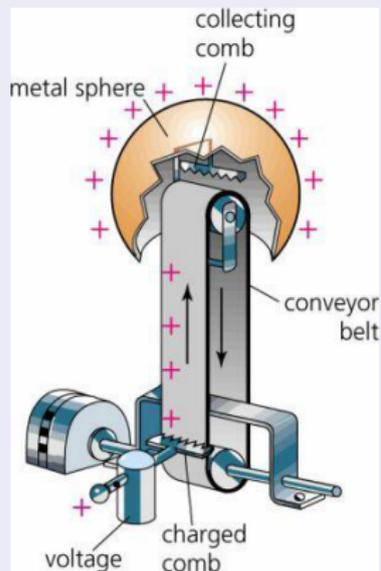
L'injecteur 810 kV du cyclotron Mega-Watt (PSI-Suisse)



Le générateur électrostatique

- 1929 : Robert Van de Graaf travaille à Princeton sur un principe de bande transportant des charges électriques.
- 1931 : 1.5 MV sont atteints au moyen de 2 machines.

Schéma de principe



Exemples

Whimshurst (1880)



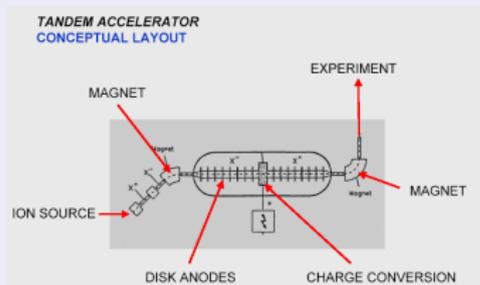
Van de Graaf



L'accélérateur tandem

- **Principe** : Accélérer des ions négatifs, les "éplucher" pour les transformer en ions positifs et ainsi les accélérer une seconde fois.
- Avantages et inconvénients :
 - ☺ **2 accélérations successives.**
 - ☺ La source d'ions ainsi que la cible restent **à la masse.**
 - ☹ **Intensité réduite** (ions négatifs).

Schéma de principe



AGLAE : le Tandem du Louvre

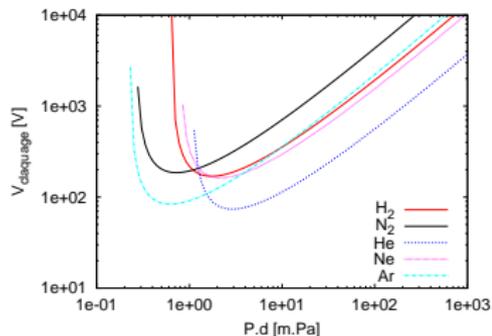


Limitations et avantages

- 😊 **Tous types d'ions.**
- 😊 **Très faible dispersion en énergie.**

Potentiel limité (loi de Paschen)

- Pour éviter les claquages :
 - Augmenter les dimensions.
 - Augmenter l'isolation par des gaz de forte rigidité électrique sous pression.
 - Opérer sous vide.



Des installations de plus en plus grandes

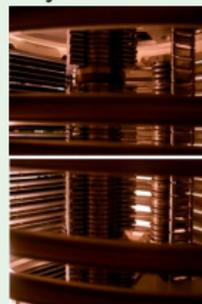
1933 : 1.2 MV



5 MV



Tandem Daresbury : 30 MV



L'accélération résonnante

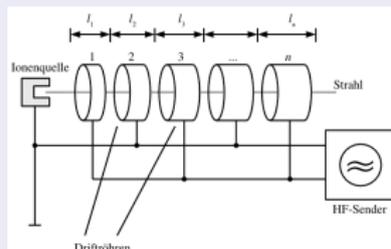
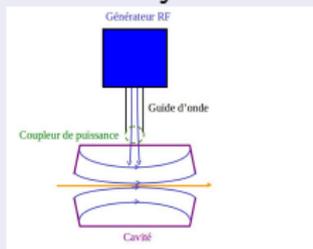
Motivation

Additionner un grand nombre d'accéléérations successives dans des cavités résonnantes plutôt que d'augmenter la tension.

- Proposé par Gustaf Ising en 1924.
- Réalisé par Widerøe en 1928.
- **Pratiquement tous les accélérateurs** d'aujourd'hui.

La cavité résonnante

Confiner de manière stable une onde radiofréquence (RF) dans un secteur de l'accélérateur et y faire transiter le faisceau.



Cavité résonnante : la pill-box

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$$

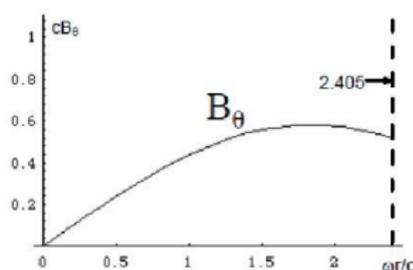
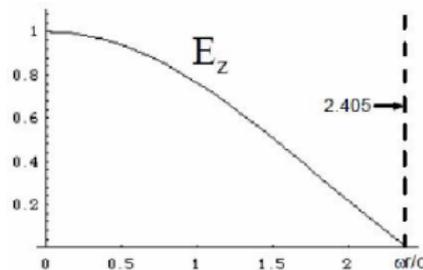
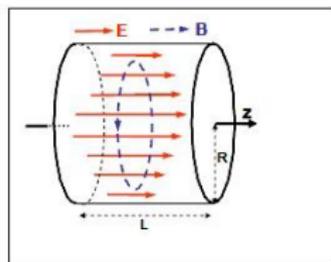
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

$$E_z(r, z, t) = R(r)e^{i\omega t}$$

$$E_z(r, t) = E_0 J_0(k_r r) \cos \omega t$$

$$B_\theta(r, t) = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t$$

$$k_r = 2\pi/\lambda$$



Dans le vide en utilisant $\nabla \times \nabla \times E$
(idem pour B).

Conditions aux limites dans le cas
de conducteurs parfaits.

Pour E_z .

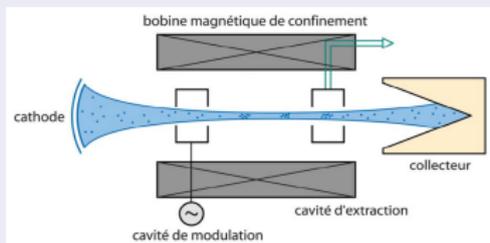
Solutions axisymétriques.

J_0, J_1 fonctions de Bessel.

Produire de la puissance RF : le klystron

- On utilise un accélérateur d'électrons !
- Modulation de vitesse du faisceau (non relativiste).

Principe du klystron



U 150 kV–500 kV
 I 100 A–500 A
 f 0.2 GHz–20 GHz
 $P_{\text{ave}} < 1.5$ MW
 $P_{\text{peak}} < 150$ MW
rendement 40-70%

Exemples de klystron

1937 : 1^{er} klystron

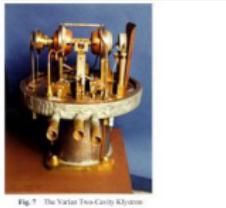


Fig. 7 - The Varian True-Grid Klystron

1948 : 20 MW 1 μ s



Fig. 8 - The First Megawatt Klystron

45 MW pic 3 GHz



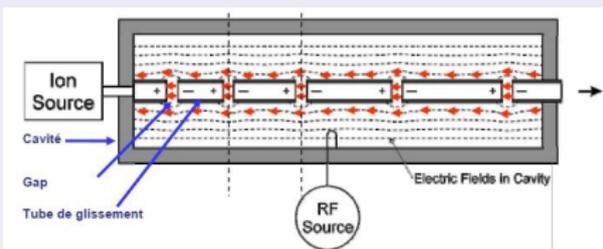
Les premiers linacs

- Widerøe (1928 pendant sa thèse ! K^+ à 50 keV) et Sloan (1931 Hg 1.26 MeV) : accélération résonnante.

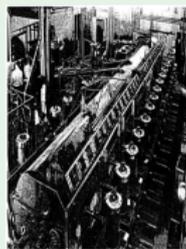
Limitations à l'époque

- Absences de sources haute fréquence (> 10 MHz).
- Puissance électromagnétique perdue par rayonnement.
- 1947 : Luis Alvarez place les tubes de glissement (DTL) dans une cavité résonnante à 202.56 MHz (émetteur radio de l'US army). Devenu un standard dans les linacs.

Principe du Drift Tube Linac



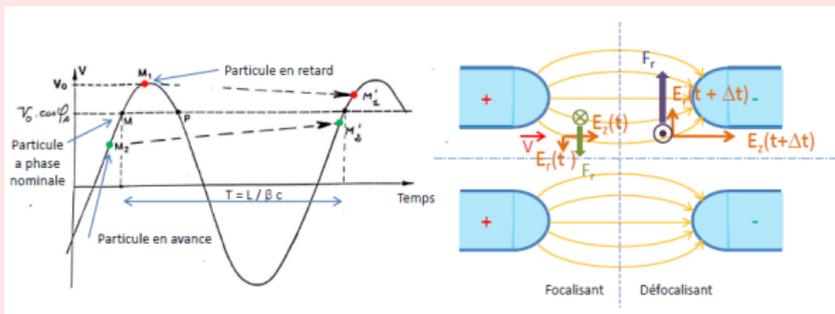
Linacs de Sloan et Alvarez



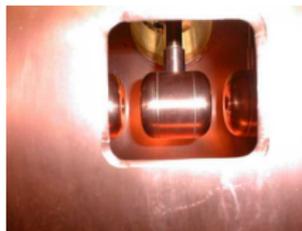
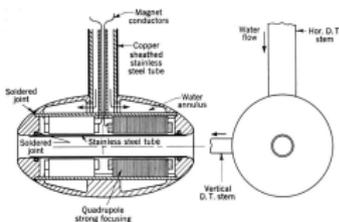
Problème de stabilité du tube de glissement

Incompatibilité focalisation transverse/longitudinale

- Les particules doivent être sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Stabilité longitudinale \rightarrow Défocalisation transverse.



\Rightarrow Quadripôles (lentilles magnétiques) dans chaque tube.

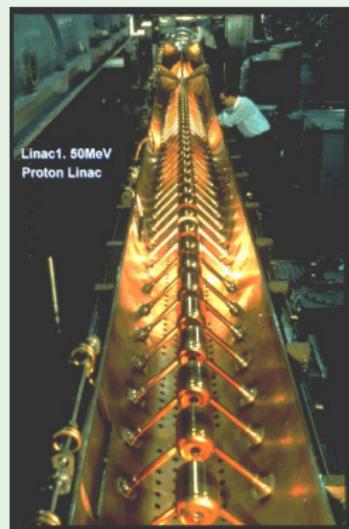


Le Drift Tube Linac (DTL)

- Facilité d'injection et d'éjection.
- Protons de 10 MeV à 100 MeV ($0.1 < \beta < 0.4$).
- Énergie fixe pour un type d'ion.

Exemples de DTL

1957 : Lawrence Radiation Lab.

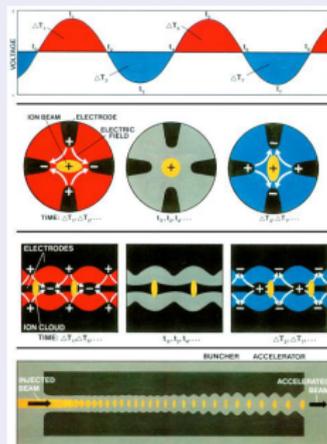
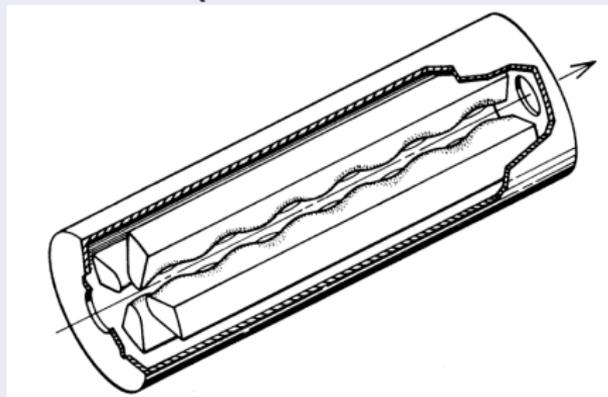


Le Radio-Frequency Quadrupole (RFQ)

- RFQ : concept inventé en 1970 par Kapchiski et Teplyakov.
- Permet à la fois la **focalisation**, la **mise en paquets** avec un fort taux de capture et l'**accélération** jusque quelques MeV.
- Remplace les Cockroft-Walton comme injecteur.

Principe du RFQ

RFQ avec ses vanes



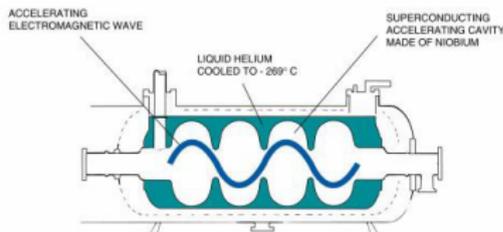
Le RFQ : une fabrication très délicate

- **Tolérances d'usinages très strictes** (dixièmes de mm).
- **Échauffement délicat** à maîtriser si fonctionnement en continu.
- Vidéo : Montage Spiral2



Les cavités supraconductrices

- ☺ **Très faibles pertes dues** à la résistance de surface (très grand facteur de qualité $Q_0 > 10^9$).
 - Onde stationnaire avec un besoin réduit en puissance crête.
- ☺ **Bon rendement.**
- ☺ Fréquence de fonctionnement standard (1.3 GHz).
- ☺ Taille des iris importante.
 - Tolérances mécaniques aisées.
 - Faible champ de sillage.
- ☺ Possibilité de **longs trains d'impulsions**.
 - Correction dynamique possible pendant le train de pulse.



Les cavités supraconductrices (2)

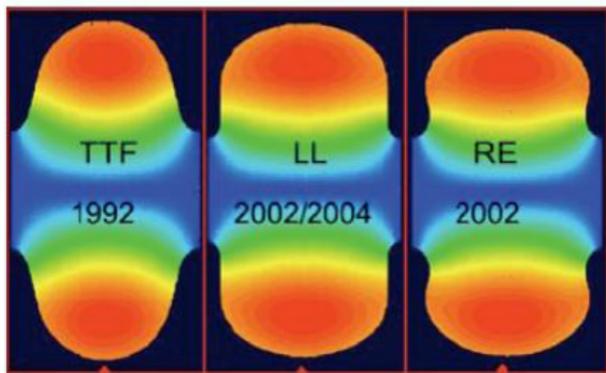
⊙ Le champ E_{acc} est **limité par le champ B_{crit}** sinon la cavité transite (perte de la supraconductivité).

- ⇒ Optimisation de la forme.
- ⇒ État de surface le plus lisse possible.
- ⇒ Couches minces/nouveaux matériaux.

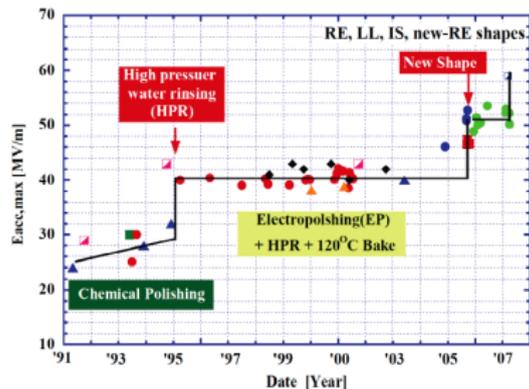
● Maximum : ≈ 60 MV/m pour une cavité seule.

● Maximum : ≈ 35 MV/m pour une structure multi-cavités.

Optimisation de la forme

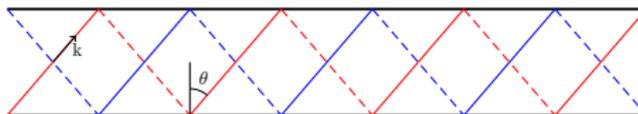


État de surface



Cavités à onde progressive

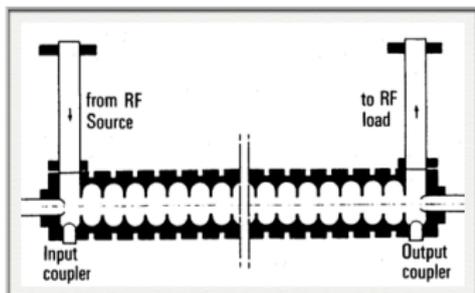
- Pour des faisceaux ultra-relativistes.
- Dans les guides d'onde, la vitesse de phase est supérieure à c , donc a fortiori à la vitesse des particules.



$$v_g = c \sin \theta < c$$

$$v_\varphi = \frac{\omega}{k_{\parallel}} = \frac{c}{\sin \theta} > c$$

- ⇒ On couple l'onde à des structures résonnantes.
- ⇒ Vitesse des particules égale vitesse de phase.
- Les électrons voient donc tout le long de la structure une phase accélératrice.



1947 : structure 3 GHz



Vers de hauts gradients avec des structures résistives

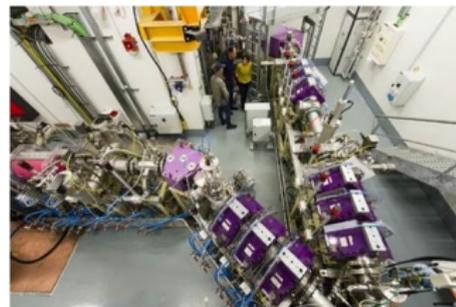
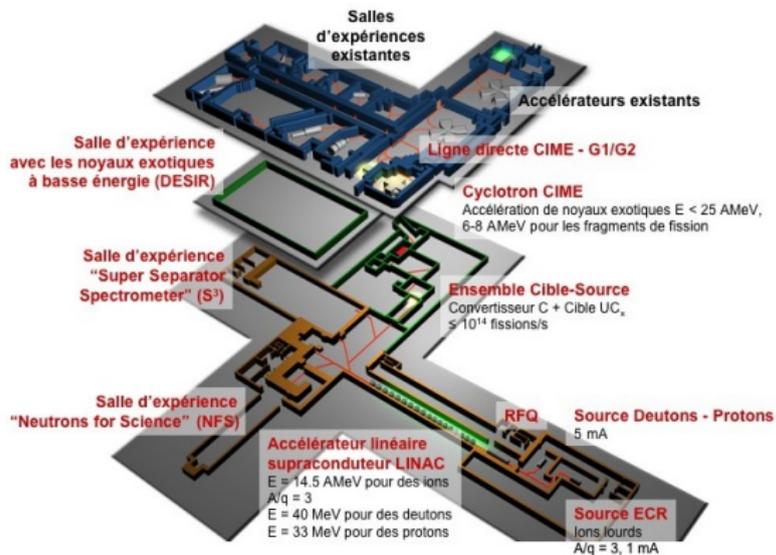
- ☺ Champ E_{acc} limité par les claquages > 100 MV/m.
- ☹ Il faut des **fréquences élevées** > 10 GHz et des **impulsions très courtes** $< 1 \mu\text{s}$ pour avoir des gradients élevés.
 - \Rightarrow Fonctionnement en onde progressive ($t_{\text{remplissage}} = \int \frac{dz}{v_g}$).
- ☹ **Pertes surfaciques importantes** car parois résistives.
 - \Rightarrow Très forte puissance RF requise.
 - \Rightarrow Dimensions transverses réduites.
 - \Rightarrow Usinage plus difficile et fort champ de sillage.
 - \Rightarrow Nécessité d'amortir les modes de fréquence plus élevées.

Structure CLIC

- $E_{\text{acc}} \approx 100$ MV/m
- $f = 11.424$ GHz
- Length : 29 cm
- Impulsion de 230 ns
- $P_{\text{crête}} = 55.5$ MW



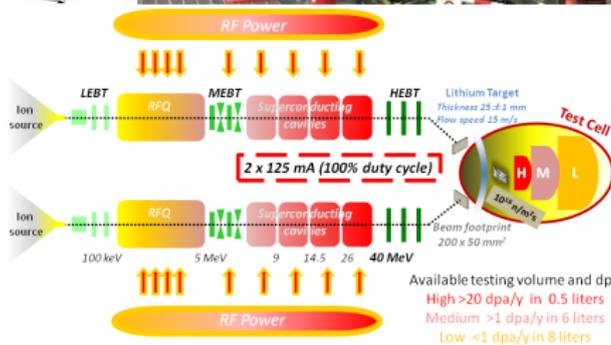
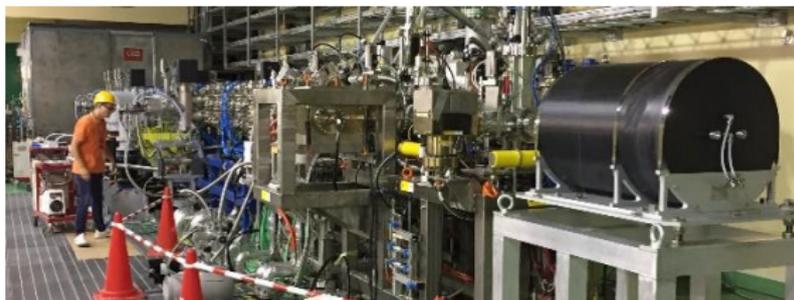
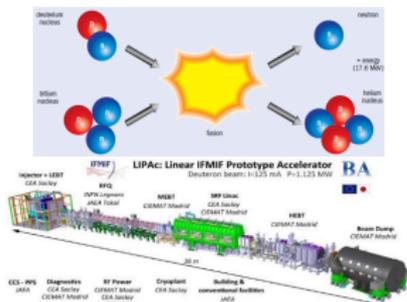
SPIRAL2 au GANIL : pour la physique nucléaire



Spiral2 SC linac

IFMIF/EVEDA : pour la fusion

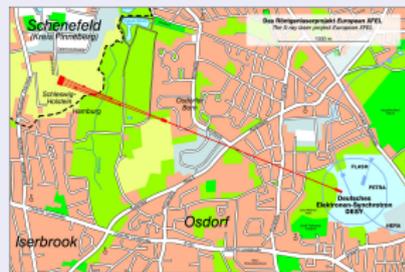
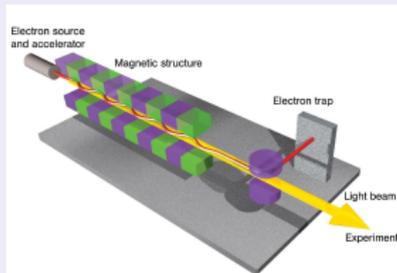
- IFMIF/ EVEDA : usine à neutrons de 14 MeV au Japon pour le test de matériaux pour les réacteurs à fusion.



XFeL : une source de rayons X (laser à électrons libres)

X-FeL en quelques chiffres

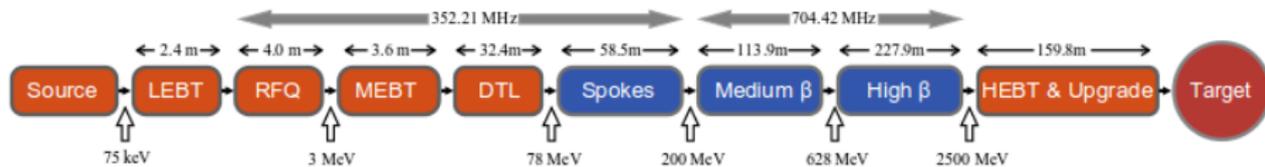
- 1er faisceau : 2017
- 2 km
- 17.5 GeV
- 101 modules
- $\lambda_{\nu} = 0.05 \text{ nm} - 6 \text{ nm}$



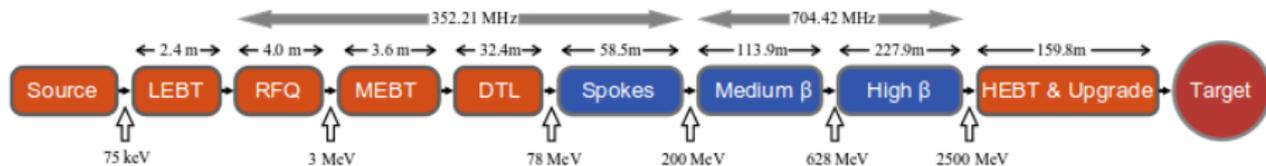
Le cryomodule : 12 mètres de long



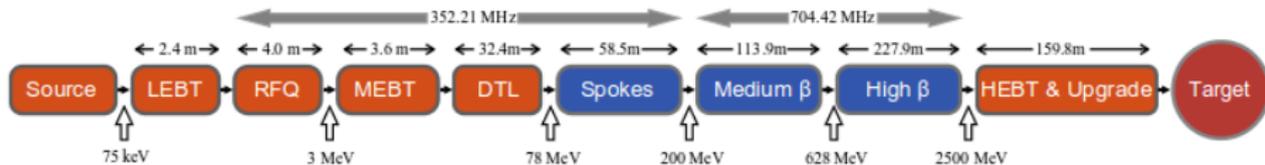
ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière



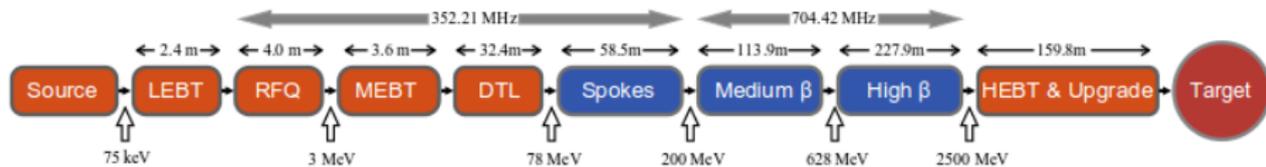
ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière



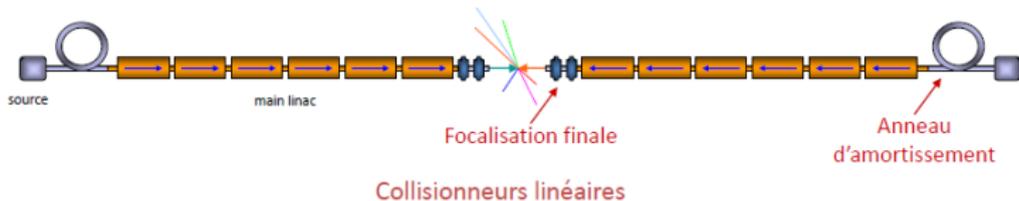
ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière



ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière

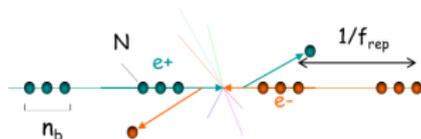


Des collisionneurs linéaires : ILC ou CLIC



- **Moins de perte par rayonnement synchrotron** (dû à la courbure de la trajectoire).
- Énergie acquise en un seul passage.
 - ⇒ Fort gradient d'accélération afin de limiter la taille de la machine.
- **Collision unique.**
 - ⇒ Faisceau très dense pour obtenir une bonne **luminosité**.

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



- ⇒ Taille du faisceau très petite (nanomètre!), fréquence de répétition élevée, alignement et stabilité de la machine critiques.
- ⇒ Efficacité énergétique à optimiser.