

Les accélérateurs de particules 1

Les accélérateurs linéaires

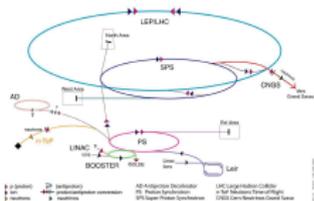
A. Chancé

CEA Saclay DRF/IRFU/SACM

23 juillet 2018

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

Pour la recherche fondamentale



Goal of Accelerator Science :
Answer Fundamental Questions

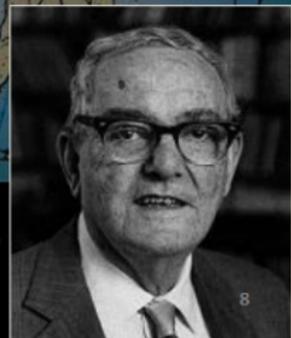
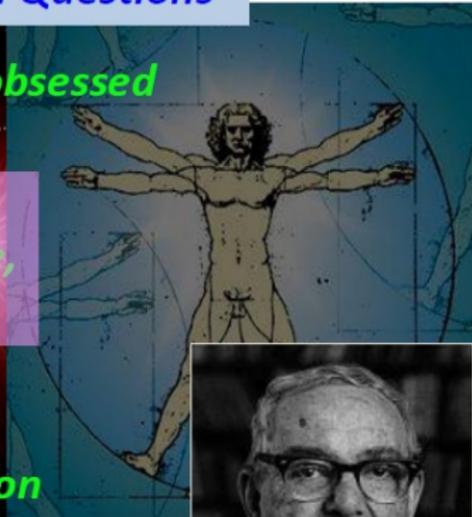


We humans have long been obsessed with four great questions:

**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 lois fondamentales 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 ces collisions sont ensuite observées et analysées pour révéler la structure de la matière. Aujourd'hui, les accélérateurs de particules sont développés plus que des instruments de recherche fondamentale - leur utilisation dans l'industrie et la médecine se multiplie 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 changement climatique. L'analyse et la caractérisation des matériaux sont également des applications de plus en plus importantes, la production de produits agricoles et de matériel médical et l'inspection de fret. Des applications vers 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

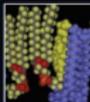
Epuration des gaz de combustion

Energie et Environnement

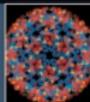
Traitement des cancers
Production de radionucléides pour l'imagerie médicale
Santé et Médecine

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
Perspectives
Caractérisation des matériaux
Energie nucléaire plus propre et plus sûre
Technologies pour la fusion
Remplacement de réacteurs de recherche vieillissants



Recherche sur les matériaux
Un faisceau de particules est l'outil indispensable pour étudier la matière à l'échelle atomique.



Modélisation de protéines
La lumière synchrotron permet aux scientifiques d'étudier la structure 3D des protéines comme celle du virus Chikungunya.



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



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



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



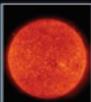
Électronique
La plupart des composants électroniques (puces, transistors) sont fabriqués par irradiation d'ions.



Renforcement des matériaux
Les faisceaux de particules sont utilisés pour l'analyse non destructive d'objets d'art et de structures architecturales.



Patrimoine culturel
Les faisceaux de particules sont utilisés dans la prise en compte de la conservation des œuvres d'art et de structures architecturales.



Energie
Les accélérateurs sont utilisés dans la prise en compte de la fusion et de réacteurs nucléaires plus sûrs et plus résistants que l'acier.

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:

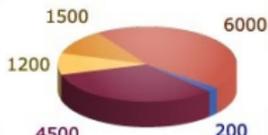
Cancer treatment with X-rays, protons and other particles

Ion implantation, surface modifications:

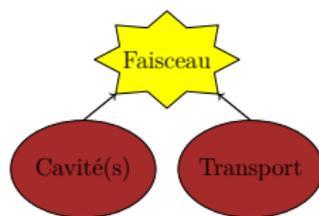
Controlled semiconductor doping; Changing properties of surfaces

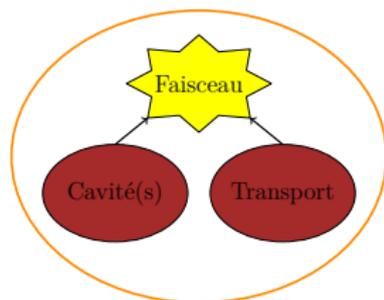
Radioisotope production:

Cancer treatment; imaging organs for medical use

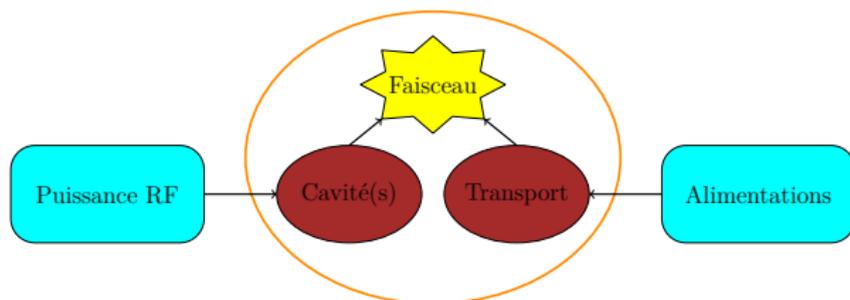




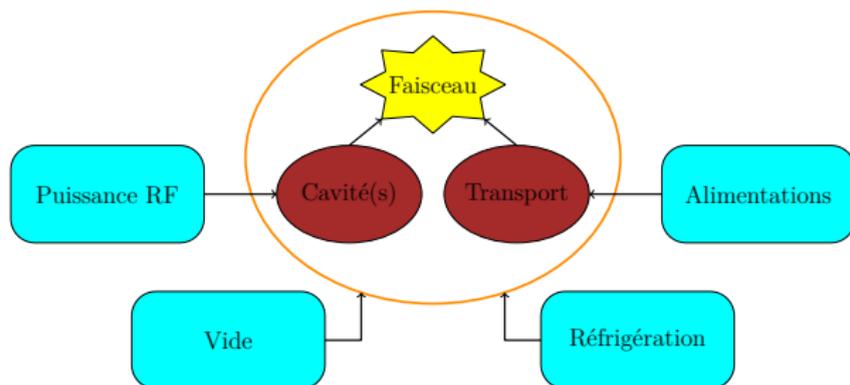




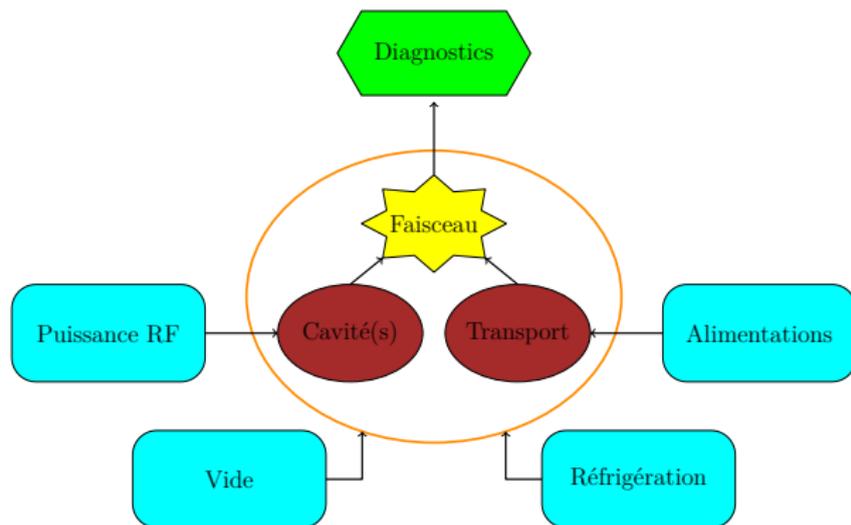
Principales composantes



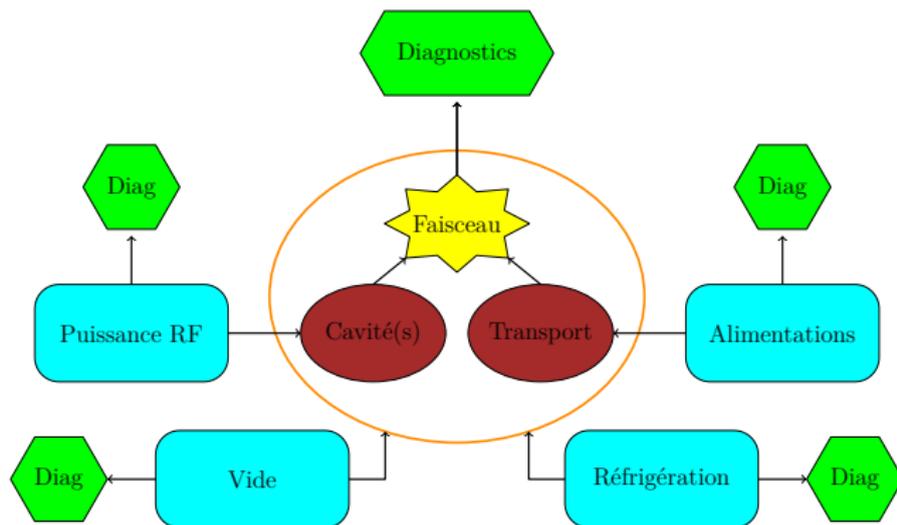
Principales composantes



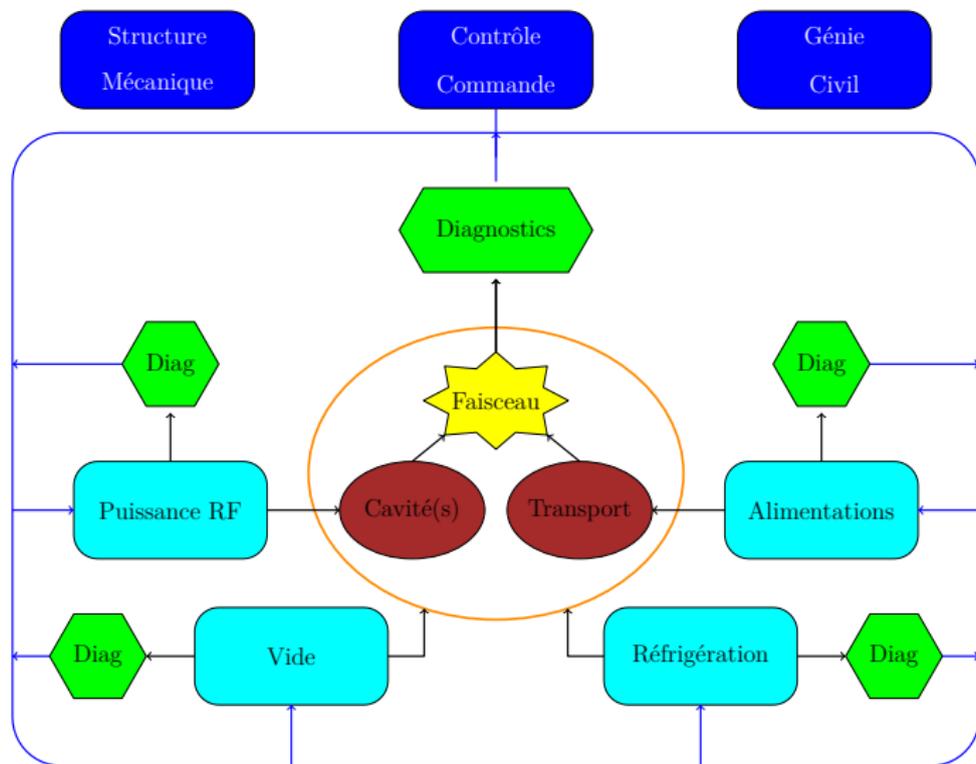
Principales composantes



Principales composantes



Principales composantes



Les accélérateurs : réponse à un besoin

1927 E. Rutherford à la Royal Society :

... if it were possible in the laboratory to have a supply of electrons and atoms of matter in general, of which the individual energy of motion is greater even than that of the alfa particle, ... this would open up an extraordinary new field of investigation. ...

● Jusque là, les physiciens disposaient :

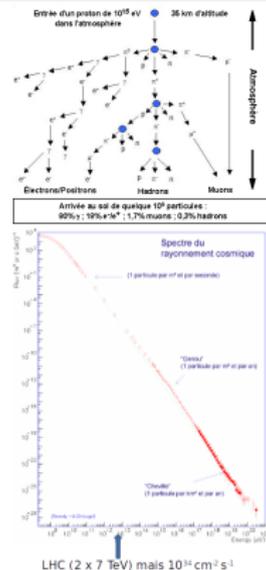
- De particules α (<10 MeV) et β issues de la radioactivité.

⇒ Faible énergie.

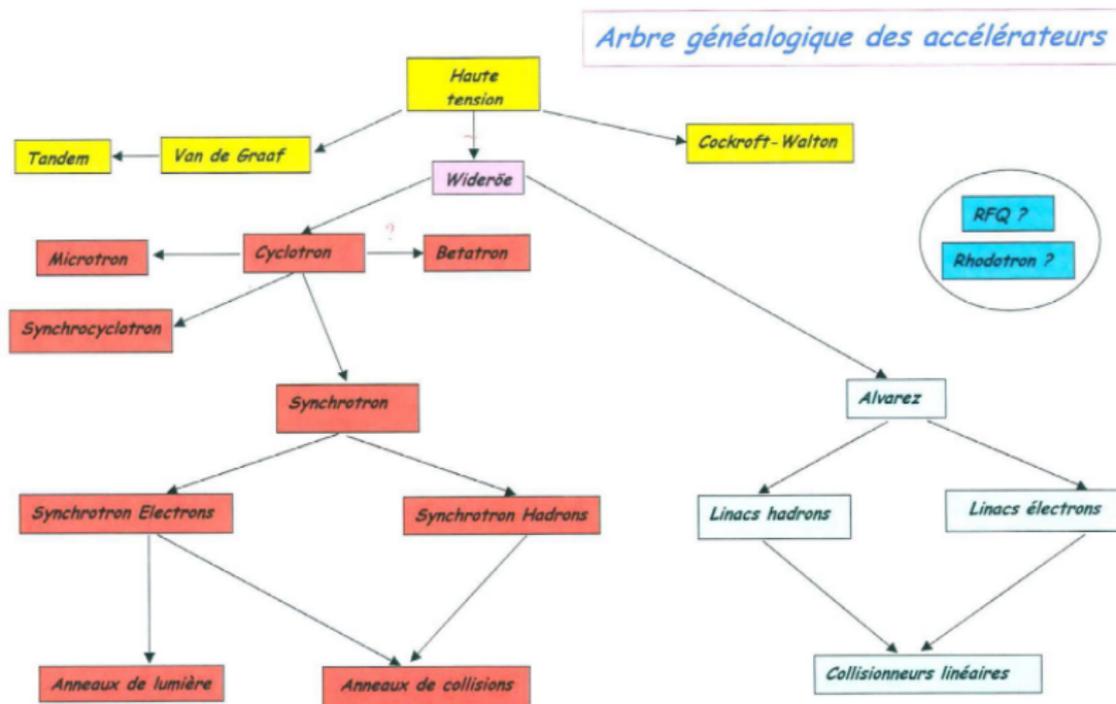
- De particules cosmiques.

⇒ Faible flux+cascade.

⇒ Besoin d'un flux **intense** de particules **énergétiques**.



La grande famille des accélérateurs

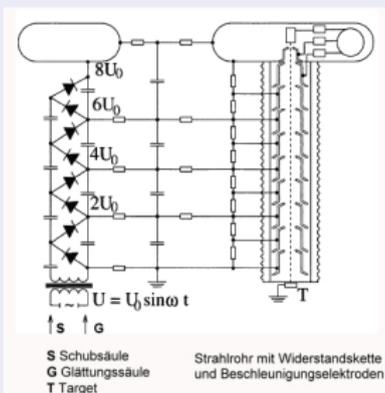


Eric Baron - GANIL

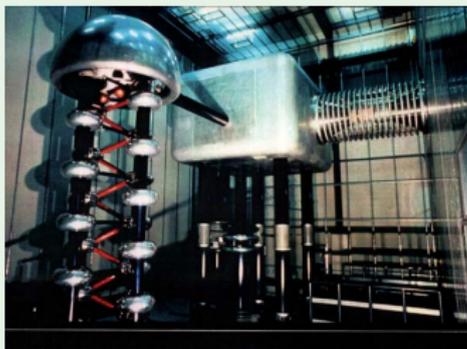
Le Cockroft-Walton

- 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.

Schéma de principe



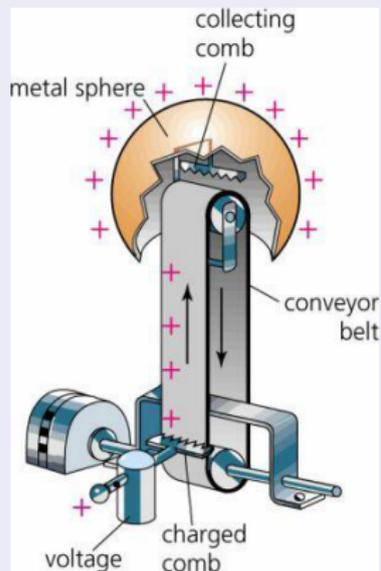
L'injecteur 810 kV du cyclotron Mega-Watt (PSI-Suisse)



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

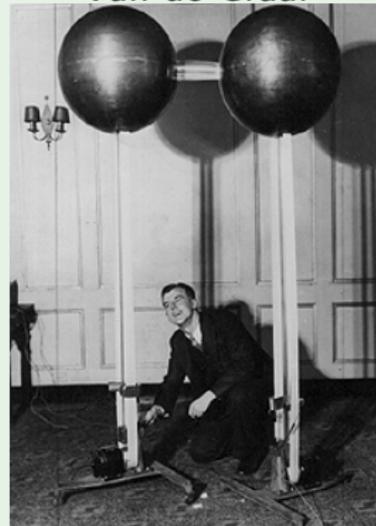


Exemples

Whimshurst (1880)



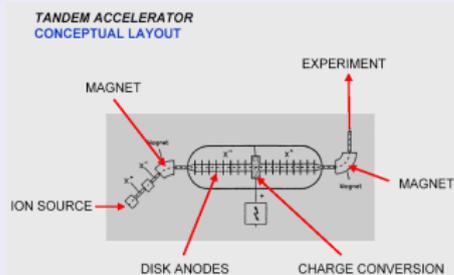
Van de Graaf



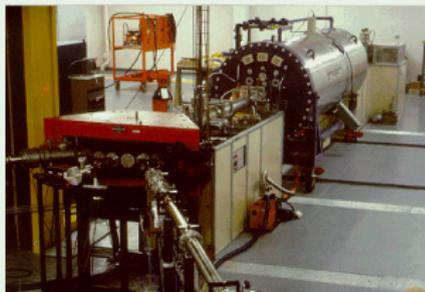
L'accélérateur tandem

- **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 a la masse.
 - ☹ Intensité réduite (ions négatifs).

Schéma de principe



AGLAE : le Tandem du Louvre

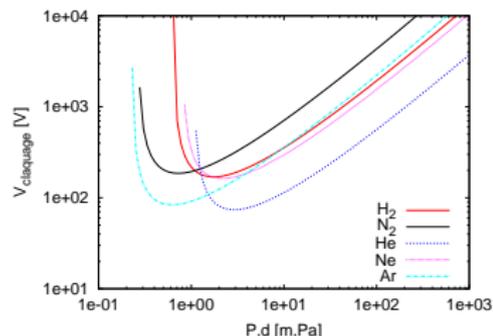


Limitations et avantages

- ☺ 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

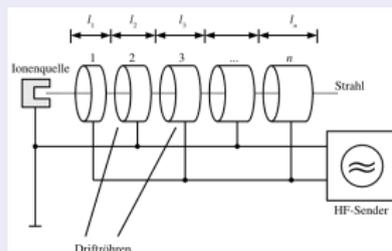
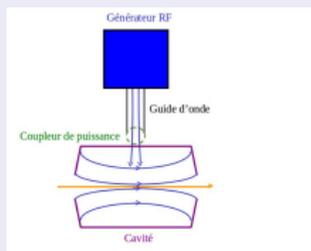
Motivation

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 Wideroe en 1928.
- **Pratiquement tous les accélérateurs** d'aujourd'hui.

La cavité résonnante

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



Cavité résonnante : la pill-box

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

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

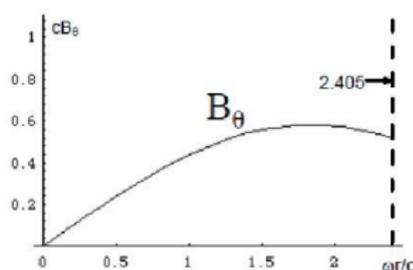
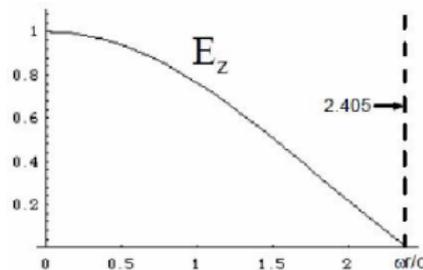
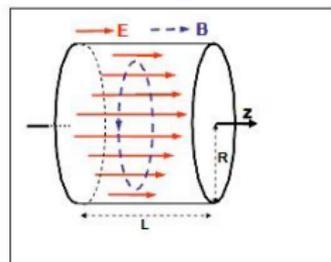
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

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

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

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

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



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 .

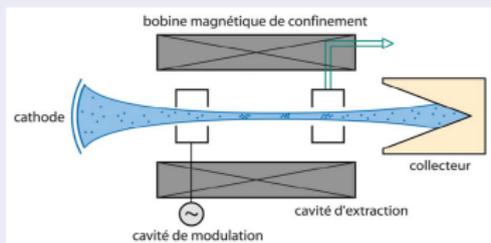
Solutions axisymétriques.

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 150-500 kV
 I 100-500 A
 f 0.2-20 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 Free-Beam Klystron

1948 : 20 MW 1 μ s



Fig. 8 - The First Megawatt Klystron

45 MW pic 3 GHz



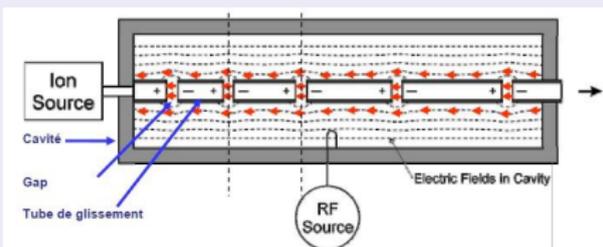
Les premiers linacs

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

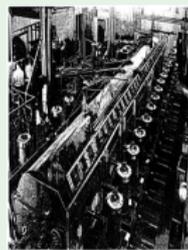
Limitations à l'époque

- 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 DTL



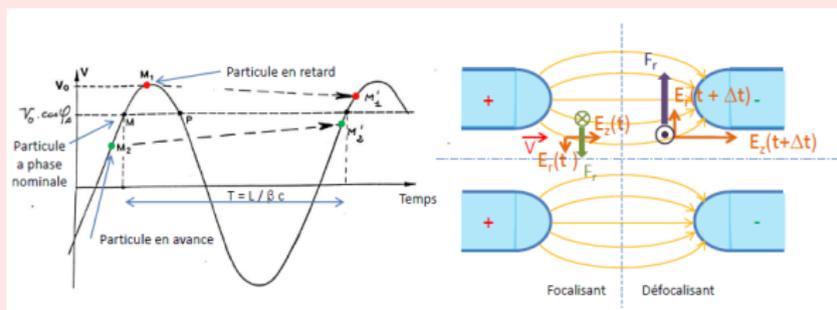
Linacs de Sloan et Alvarez



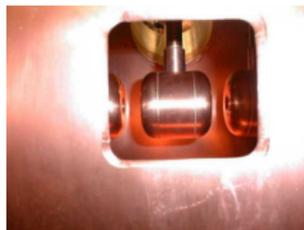
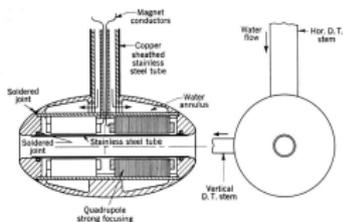
Problème de stabilité du tube de glissement

Incompatibilité focalisation transverse/longitudinale

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



⇒ Quadripôles (lentilles magnétiques) dans chaque tube.

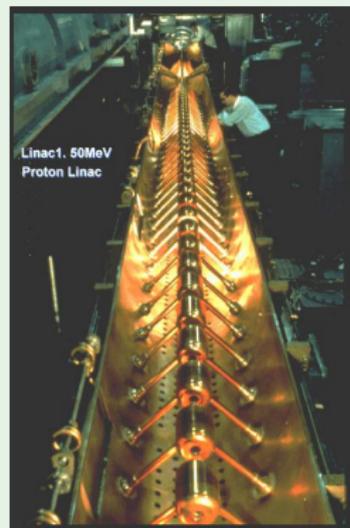


Le Drift Tube Linac (DTL)

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

Exemples de DTL

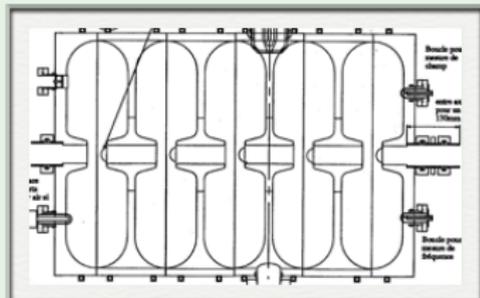
1957 : Lawrence Radiation Lab.



Le Linac à Cavités Couplées (CCL)

- Utilisé pour accélérer les faisceaux de grande vitesse ($\beta > 0.4$).
- Cellules couplées entre elles par des fentes ou ds cavités externes.
- Déphasage de π entre 2 cavités (inversion du champ entre 2 cavités).
- Focalisation externe par des quadripôles placés à l'extérieur.

Exemples de CCL

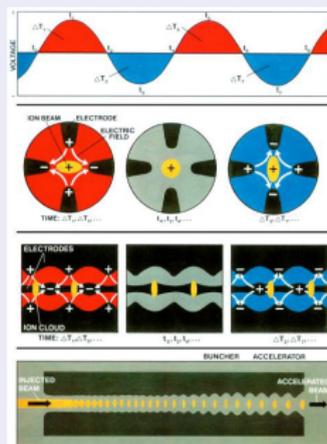
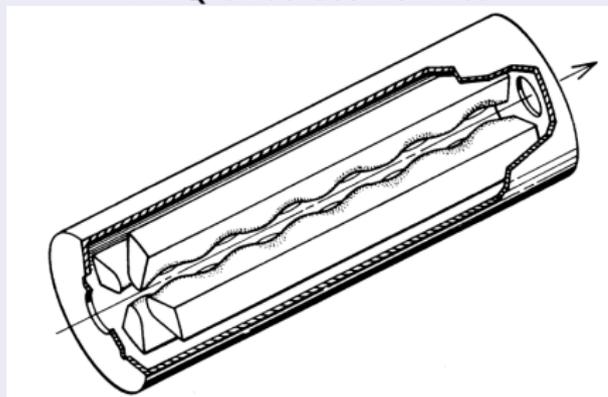


Le Radio-Frequency Quadrupole (RFQ)

- 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.

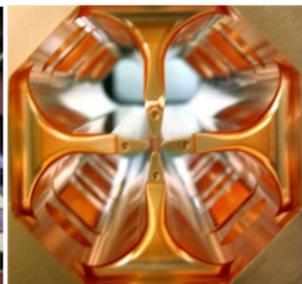
Principe du RFQ

RFQ avec ses vannes



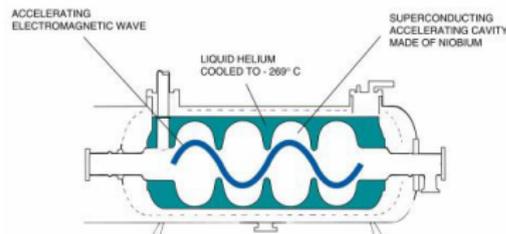
Le RFQ : une fabrication très délicate

- Tolérances d'usinages très strictes (dixièmes de mm).
- Échauffement délicat à maîtriser si fonctionnement en continu.
- video montage



Les cavités supraconductrices

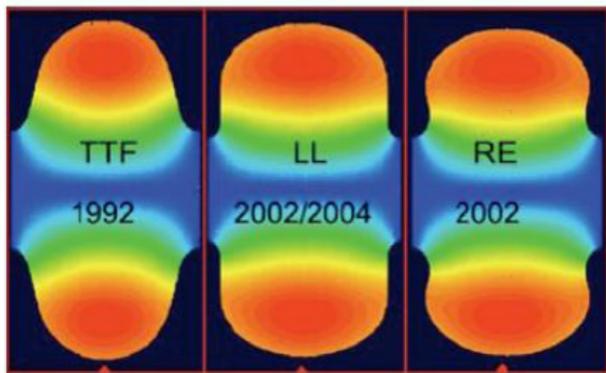
- ☺ **Très faibles pertes dues** à la résistance de surface (très grand facteur de qualité $> 10^9$).
 - Onde stationnaire avec un besoin réduit en puissance crête.
- ☺ **Bon rendement.**
- ☺ Fréquence de fonctionnement “classique” (1.3 GHz).
- ☺ Taille des iris importante.
 - Tolérances mécaniques aisées.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



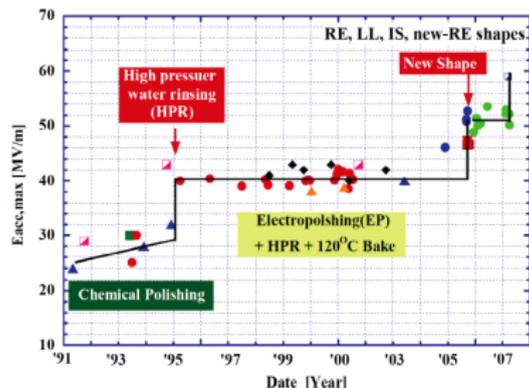
Les cavités supraconductrices (2)

- ☹ 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.
- Maximum : ≈ 60 MV/m pour une cavité seule.
- Maximum : ≈ 35 MV/m pour une structure multi-cavités.

Optimisation de la forme

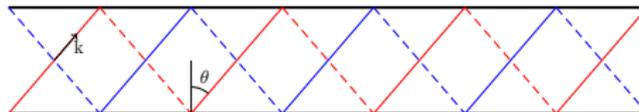


État de surface



Cavités à onde progressive

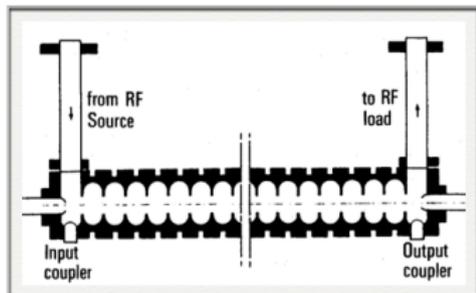
- Pour des faisceaux ultra-relativistes.
- Dans les guides d'onde, la vitesse de phase est supérieure à c , donc a fortiori à la vitesse des particules.



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

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

- ⇒ On couple l'onde à des structures résonantes.
- ⇒ 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

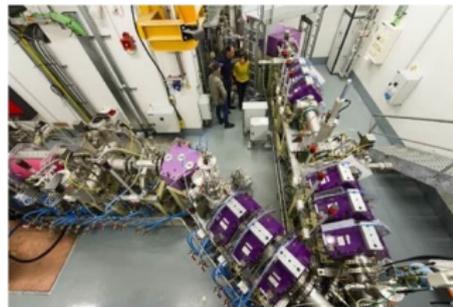
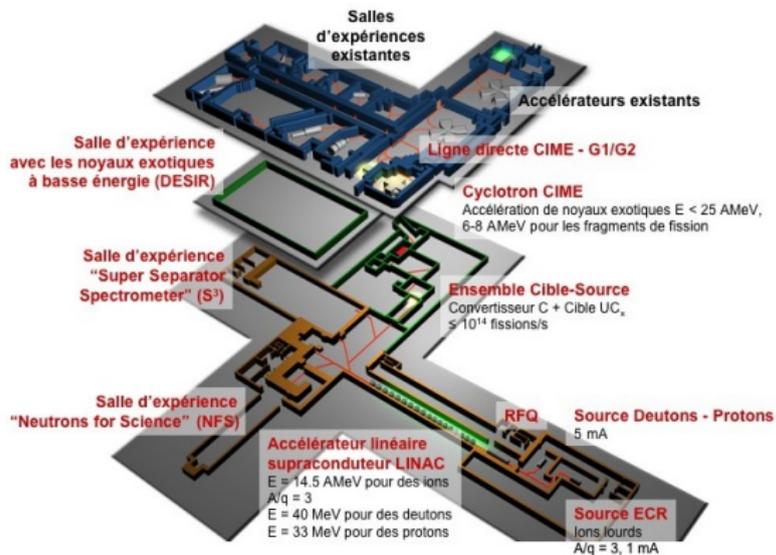
- ☺ Champ E_{acc} limité par les claquages > 100 MV/m.
- ☹ Il faut des fréquences élevées > 10 GHz et des impulsions très courtes $< 1\mu s$ pour avoir des gradients élevés.
 - ⇒ Fonctionnement en onde progressive ($t_{remplissage} = \int \frac{dz}{v_g}$).
- ☹ Pertes surfaciques importantes car parois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

Structure CLIC

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



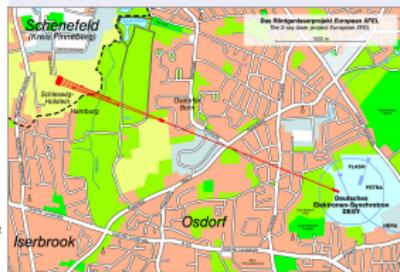
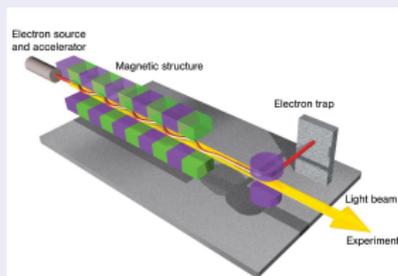
SPIRAL2 au GANIL : pour la physique nucléaire



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

X-FeL en quelques chiffres

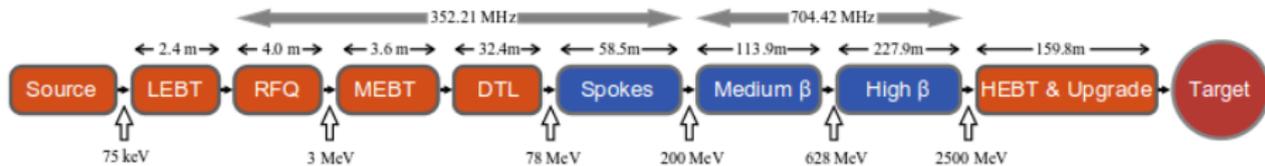
- 1er faisceau : 2017
- 2 km
- 17.5 GeV
- 101 modules
- $\lambda_{\nu} = 0.05 - 6 \text{ nm}$



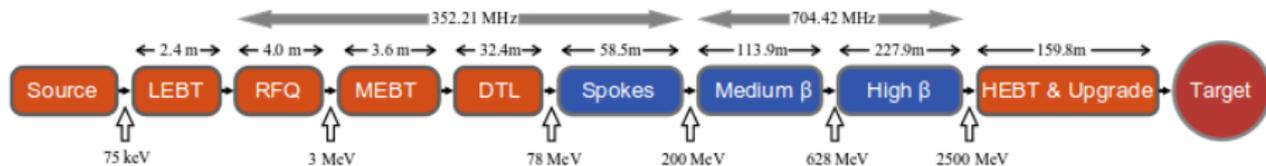
Le cryomodule : 12 mètres de long



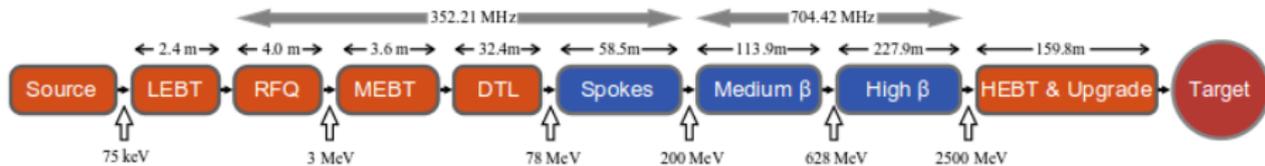
ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière



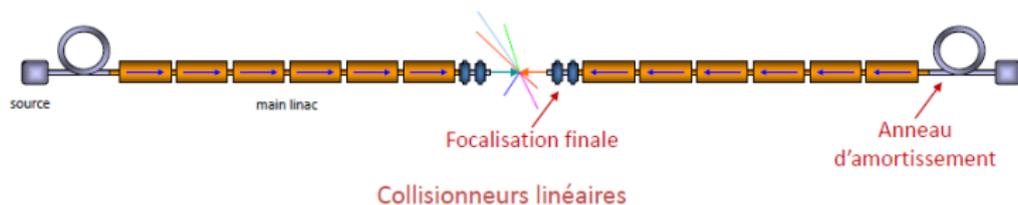
ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière



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

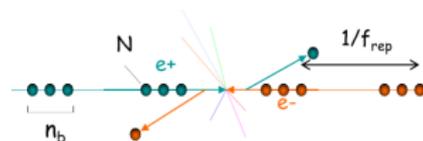


Des collisionneurs linéaires : ILC ou CLIC



- 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.