

# Les accélérateurs de particules 1

## Les accélérateurs linéaires

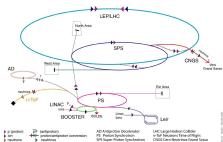
A. Chancé

CEA Saclay DRF/IRFU/SACM

13 juillet 2016

- 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 celles de la lumière, avant de les faire entrer en collision à des énergies extrêmement élevées. Les particules produites dans ces collisions sont ensuite détectées 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 inespéré, sur notre vie quotidienne.

Les accélérateurs de particules sont par exemple utilisés dans la fabrication de puces en silicium pour l'électronique, le découpage et le soudage par faisceaux 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 détectation des médicaments et d'objets dangereux, la stérilisation de produits alimentaires 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



**Recherche sur les matériaux**  
Un faisceau de particules est utilisé indépendamment 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.

Epuration des gaz de combustion

Energie et Environnement



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

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



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

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



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



**Renforcement des matériaux**  
Les faisceaux de particules sont utilisés pour l'analyse non destructrice d'objets d'art et de vintage antiques.

Patrimoine culturel  
Authentification d'œuvres d'art  
Inspection de fret et sécurité  
Caractérisation des matériaux



**Énergie**  
Les accélérateurs sont utilisés dans la mise au point de la fusion et de réacteurs nucléaires plus sûrs ainsi que dans le traitement des déchets nucléaires.

Energie nucléaire plus propre et plus sûre

Technologies pour la fusion  
Remplacement de réacteurs de recherche vieillissants  
Perspectives



## 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:

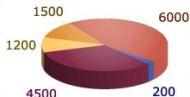
Sterilisation, imaging

### Research accelerators:

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

### Radiotherapy:

Cancer treatment with X-rays, protons and other particles



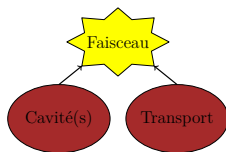
### Ion implantation, surface modifications:

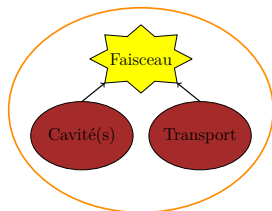
Controlled semiconductor doping; Changing properties of surfaces

### Radioisotope production:

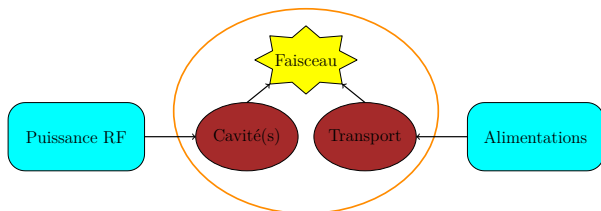
Cancer treatment; imaging organs for medical use



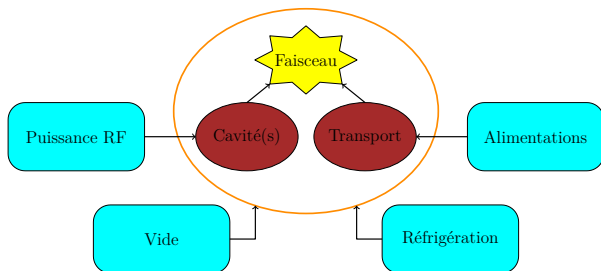




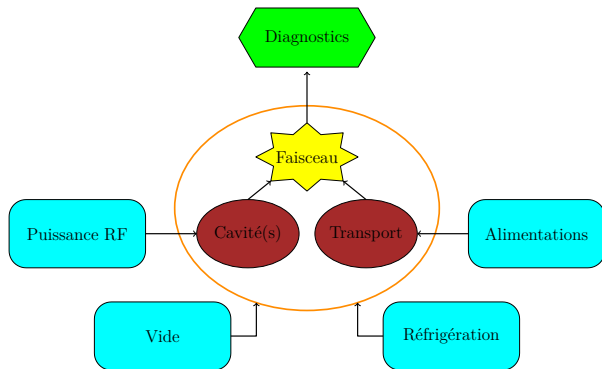
# Principales composantes



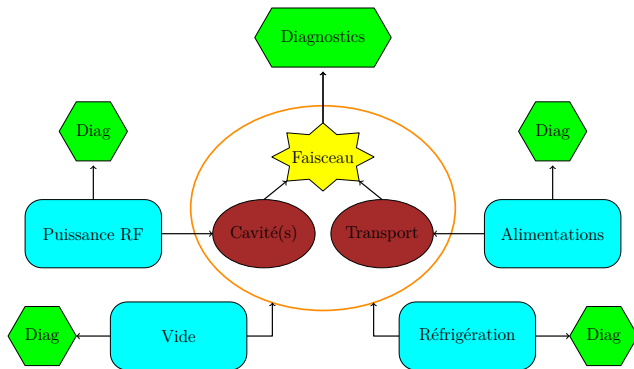
# Principales composantes



# Principales composantes

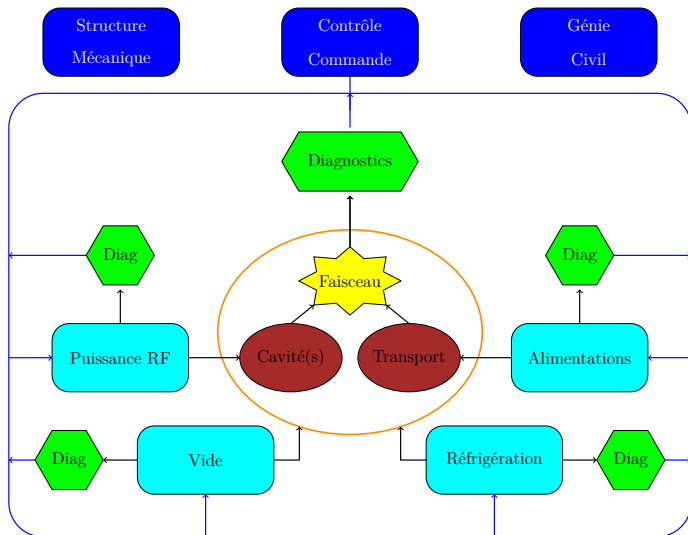


# Principales composantes





# Principales composantes



# Les accélérateurs : réponse à un besoin

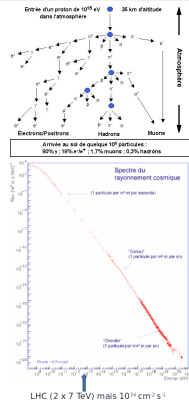
## 1927 E. Rutherford à la Royal Society :

*... 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. ...*

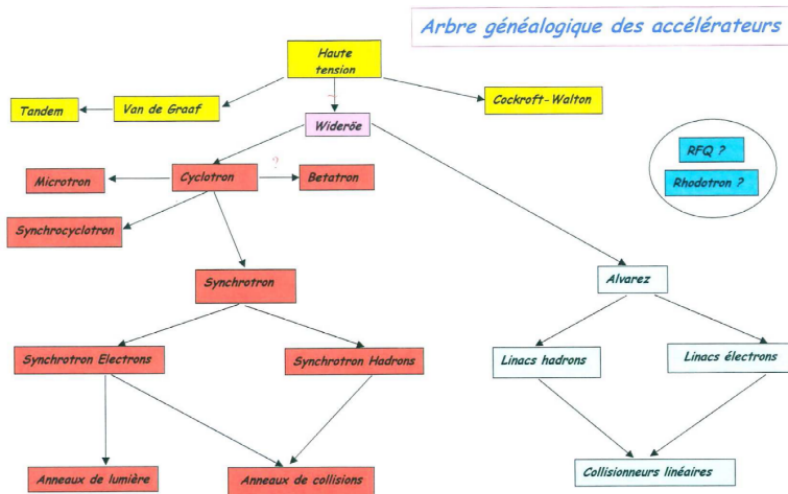
### ● Jusque là, les physiciens disposaient :

- De particules  $\alpha$  ( $<10$  MeV) et  $\beta$  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

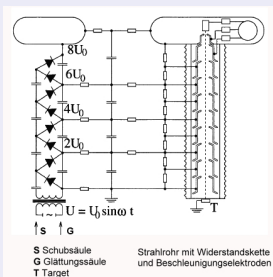


Eric Baron - GANIL

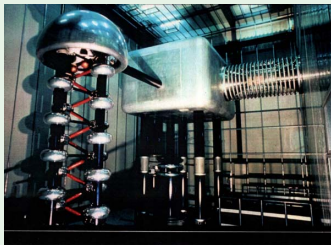
# Le Cockroft-Walton

- 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



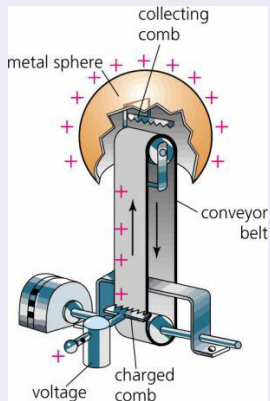
## L'injecteur 810 kV du cyclotron Mega-Watt (PSI-Suisse)



# Le générateur électrostatique

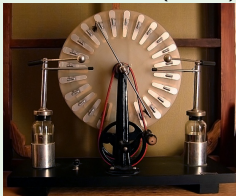
- 1929 : Robert Van de Graaf travaille à Princeton sur un principe de bande transportant des charges électriques.
- 1931 : 1.5 MV sont atteints au moyen de 2 machines.

## Schéma de principe

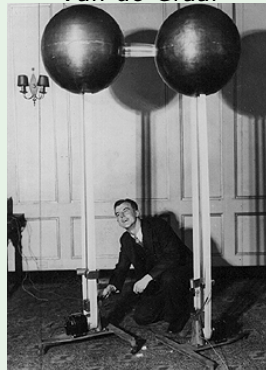


## Exemples

Whimshurst (1880)



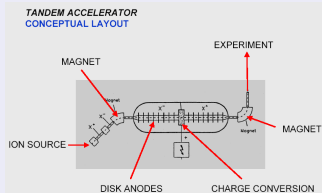
Van de Graaf



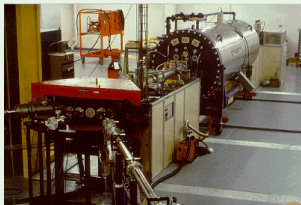
# L'accélérateur tandem

- **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

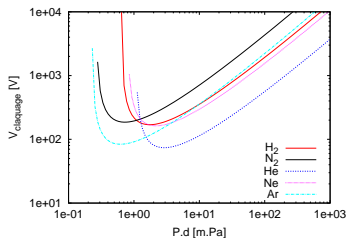


# Limitations et avantages

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

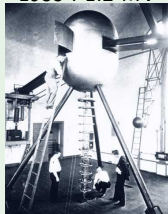
## Potentiel limité (loi de Paschen)

- 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

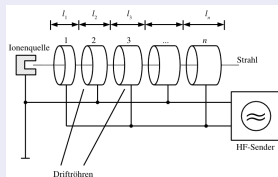
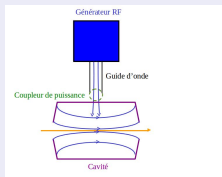
## Motivation

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

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

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

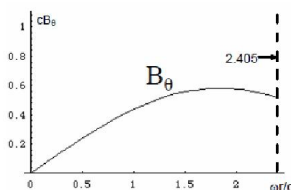
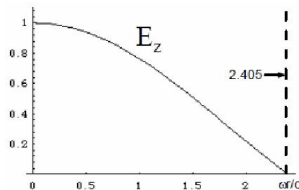
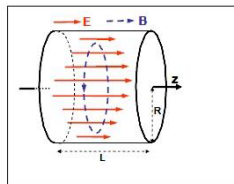
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

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

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

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

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



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

Conditions aux limites dans le cas  
de conducteurs parfaits.

Pour  $E_z$ .

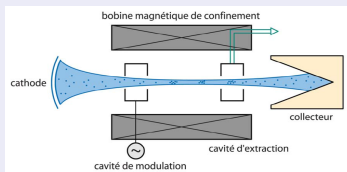
Solutions axisymétriques.

$J_0, J_1$  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<sup>er</sup> klystron



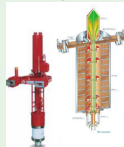
Fig. 7 - The Varian Free-Beam Klystron

1948 : 20 MW 1 $\mu$ s



Fig. 8 - The First Megawatt Klystron

45 MW pic 3 GHz



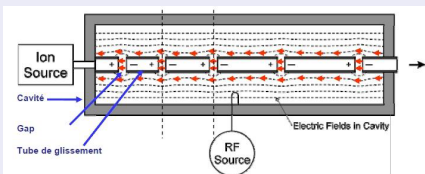
# Les premiers linacs

- 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



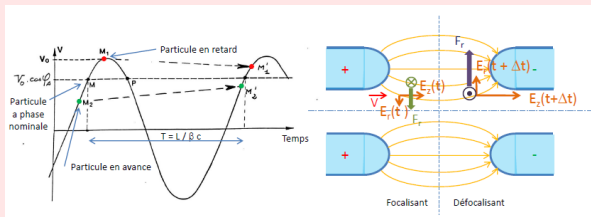
## Linacs de Sloan et Alvarez



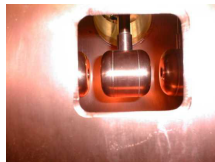
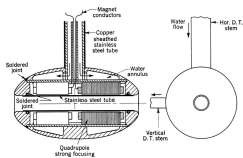
# Problème de stabilité du tube de glissement

## Incompatibilité focalisation transverse/longitudinale

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



$\Rightarrow$  Quadripôles (lentilles magnétiques) dans chaque tube.

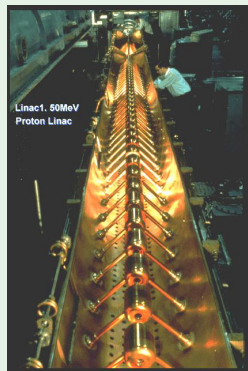


# Le Drift Tube Linac (DTL)

- 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

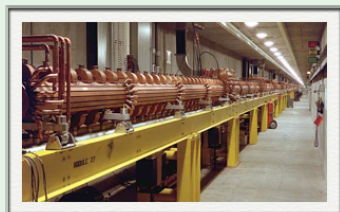
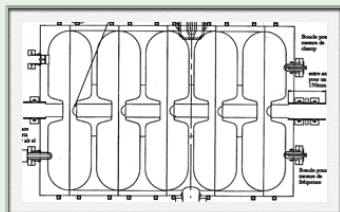
1957 : Lawrence Radiation Lab.



# 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  $\pi$  entre 2 cavités (inversion du champ entre 2 cavités).
- Focalisation externe par des quadripôles placés à l'extérieur.

## Exemples de CCL

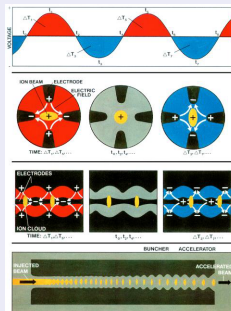
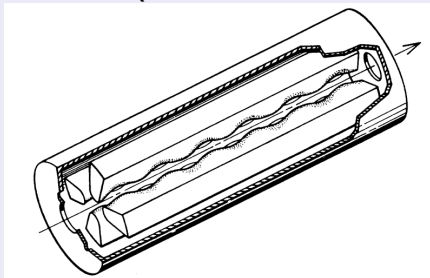


# Le Radio-Frequency Quadrupole (RFQ)

- 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 jusqu'à quelques MeV.
- Remplace les Cockroft-Walton comme injecteur.

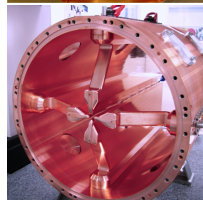
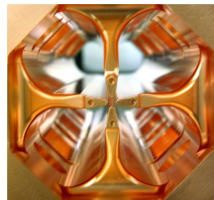
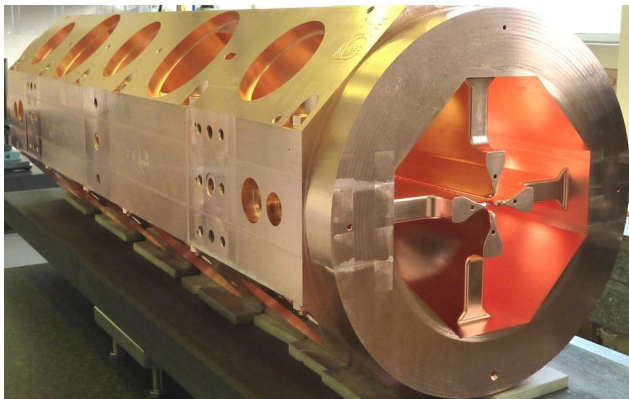
## Principe du RFQ

RFQ avec ses vannes



# Le RFQ : une fabrication très délicate

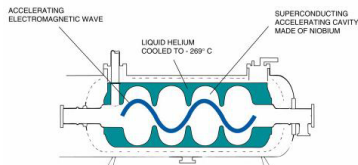
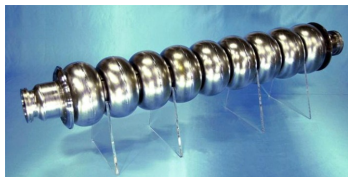
- Tolérances d'usinages très strictes (dixièmes de mm).
- Échauffement délicat à maîtriser si fonctionnement en continu.
- video montage





# Les cavités supraconductrices

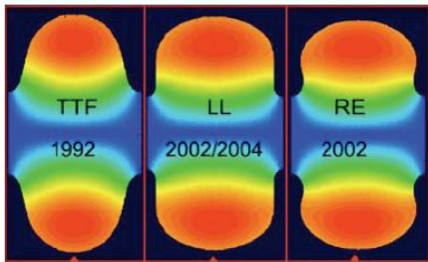
- ☺ **Très faibles pertes dues** à la résistance de surface (très grand facteur de qualité  $> 10^9$ ).
  - Onde stationnaire avec un besoin réduit en puissance crête.
- ☺ **Bon rendement.**
- ☺ Fréquence de fonctionnement “classique” (1.3 GHz).
- ☺ Taille des iris importante.
  - Tolérances mécaniques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



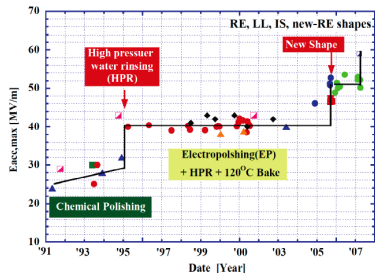
# Les cavités supraconductrices (2)

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

## Optimisation de la forme

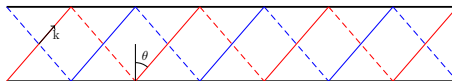


## État de surface



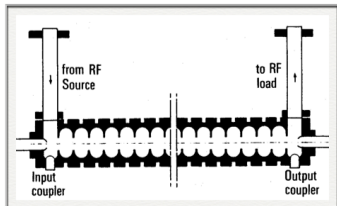
# Cavités à onde progressive

- 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

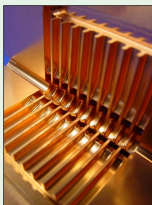


# Vers de hauts gradients avec des structures résistives

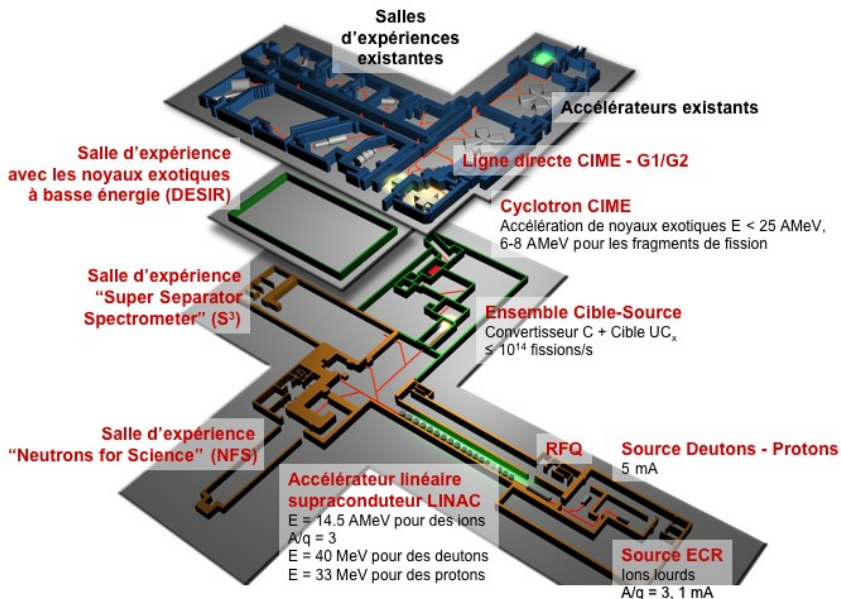
- ☺ Champ  $E_{acc}$  limité par les claquages  $> 100$  MV/m.
- ☹ Il faut des fréquences élevées  $> 10$  GHz et des impulsions très courtes  $< 1\mu s$  pour avoir des gradients élevés.
  - ⇒ Fonctionnement en onde progressive ( $t_{remplissage} = \int \frac{dz}{v_g}$ ).
- ☹ Pertes surfaciques importantes 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

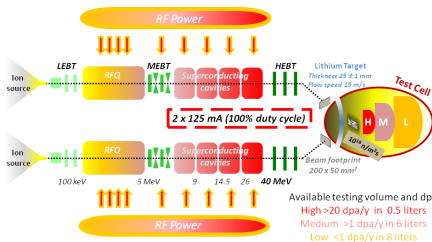
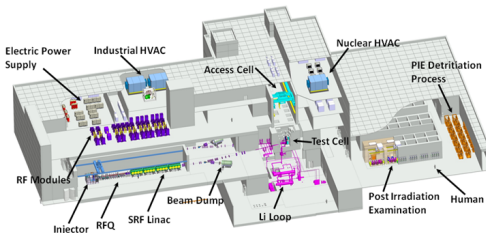
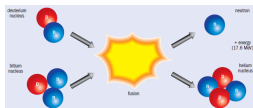


# SPIRAL2 au GANIL : pour la physique nucléaire



# IFMIF/EVEDA : pour la fusion

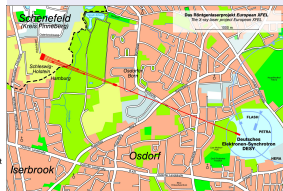
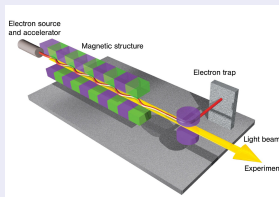
- IFMIF/ EVEDA : usine à neutrons de 14 MeV au Japon pour le test de matériaux pour les réacteurs à fusion.



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

## X-FeL en quelques chiffres

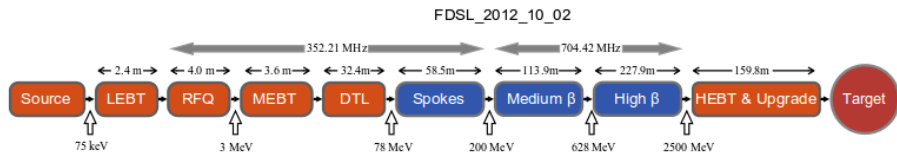
- Prévu pour 2017
- 2 km
- 17.5 GeV
- 101 modules
- $\lambda_{\nu} = 0.05 - 6 \text{ nm}$



## Le cryomodule : 12 mètres de long



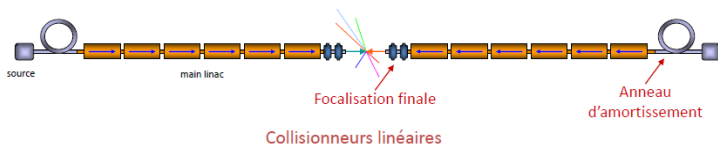
# ESS : une source de spallation pour l'étude de la matière



EUROPEAN  
SPALLATION  
SOURCE

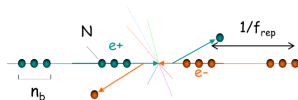


# Des collisionneurs linéaires : ILC ou CLIC



- 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.