

Un grand merci à toutes mes sources d'informations :
1. Le www !!!!!
2. Eric Baron, Nicolas Pichoff, Hervé Saugnac, et bien d'autres...

Cavités accélératrices RF

Jean-Luc BIARROTTE – CNRS / IPN Orsay

Cavités accélératrices RF

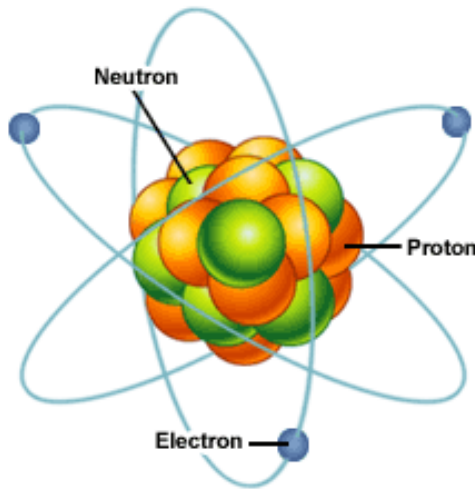
1. Accélérer une particule chargée
2. De l'accélération électrostatique à l'accélération RF
3. Fonctionnement d'une cavité accélératrice RF
4. Panorama non-exhaustif des cavités chaudes
5. Un exemple récent : le DTL de SNS
6. La supraconductivité
7. Les cavités supraconductrices : intérêts & limitations
8. Panorama non-exhaustif des cavités froides
9. Concevoir et construire un linac supraconducteur
10. Un exemple d'actualité : le "cryomodule B" SPIRAL-2

1. Accélérer une particule chargée

1.1. Energie d'une particule au repos

- Energie de masse

$$\Rightarrow E_0 = m_0 c^2$$



avec m_0 : masse de la particule (kg)

$c \approx 2.998 \times 10^8$ m/s : vitesse de la lumière

ex : électrons : $E_0 \approx 511$ keV

protons : $E_0 \approx 938.3$ MeV

ions lourds : $E_0 \approx A \times u_{ma}$

(1 $u_{ma} \approx 931.5$ MeV, A : nb nucléons)

- **1 eV** (électron-volt) = énergie gagnée par une particule de charge élémentaire 1.602×10^{-19} C (ex: électron, proton) soumise à une tension de 1 Volt

$$\underline{1 \text{ eV} \Leftrightarrow 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

1.2. Energie d'une particule en mouvement

- **Energie totale**

$$\Rightarrow E_{\text{tot}} = \gamma m_0 c^2$$

avec

γ : énergie réduite

β : vitesse réduite

v : vitesse de la particule

$$\gamma = \frac{E_{\text{tot}}}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

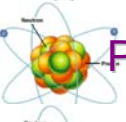
$$\beta = \frac{v}{c}$$

- **Energie cinétique**

$$\Rightarrow E_{\text{cin}} = E_{\text{tot}} - E_0 = (\gamma - 1) m_0 c^2$$



Particule au repos $\Rightarrow \beta = 0, \gamma = 1$



Particule non relativiste $\Rightarrow \beta \ll 1, \gamma \approx 1$



Particule ultra-relativiste (proche de la vitesse de la lumière) $\Rightarrow \beta \rightarrow 1, \gamma \rightarrow \infty$

1.3. La force de Lorentz

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électromagnétique est décrit par :

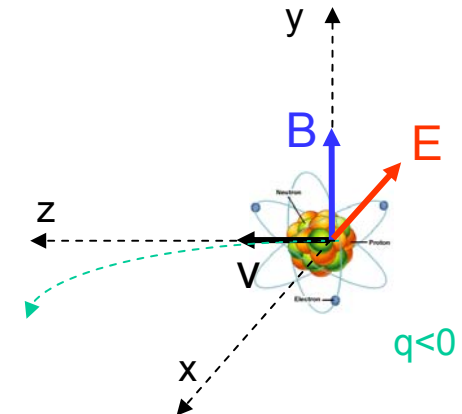
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

avec \vec{F} : force de Lorentz (N)

q : charge de la particule (C)

\vec{E} & \vec{B} : champs électriques & magnétiques (V/m, T)

\vec{p} : impulsion (kg.m/s) $\rho = m v = \beta \gamma m_0 c$



Remarque : B est en fait l'induction magnétique

$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ dans le vide, avec H : champ magnétique (A/m)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$: perméabilité du vide (H/m)

$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$: permittivité du vide (C²/N/m²)

1.4. Accélération d'une particule chargée

- **Impact de la force de Lorentz sur l'énergie d'une particule chargée**

$$\begin{aligned}\vec{p} \cdot \frac{d\vec{p}}{dt} &= \frac{1}{2} \frac{dp^2}{dt} = \frac{1}{2c^2} \frac{dE_{\text{tot}}^2}{dt} = \frac{E_{\text{tot}}}{c^2} \frac{dE_{\text{tot}}}{dt} = \gamma m_0 \frac{dE_{\text{tot}}}{dt} \\ &= \gamma m_0 \vec{v} \cdot q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) = \gamma q m_0 \vec{v} \cdot \vec{E}\end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{dE_{\text{tot}}}{dt} = q \vec{v} \cdot \vec{E}}$$

- **Pour accélérer / gagner de l'énergie:**

- Seul le champ électrique est utile
- Si $\vec{E} \perp \vec{v}$, il n'y a pas d'accélération
- Si $\vec{E} // \vec{v}$, l'accélération est optimale

=> Gain d'énergie ΔE_{tot} dans un champ électrique statique :

$$\Delta E_{\text{tot}} = qE \int v dt = qE \Delta x = \underbrace{q}_{\text{Nb charge élémentaire}} \Delta V \quad \Delta V \text{ tension appliquée}$$

(MeV) (MV)

1.5. Gain d'énergie et vitesse des particules

Exemple :

Considérons un électron (-1 eV) & un proton (+1 eV) au repos, et soumettons-les à une tension accélératrice de 10 MV.

- **Gain d'énergie** => 10 MeV dans chaque cas

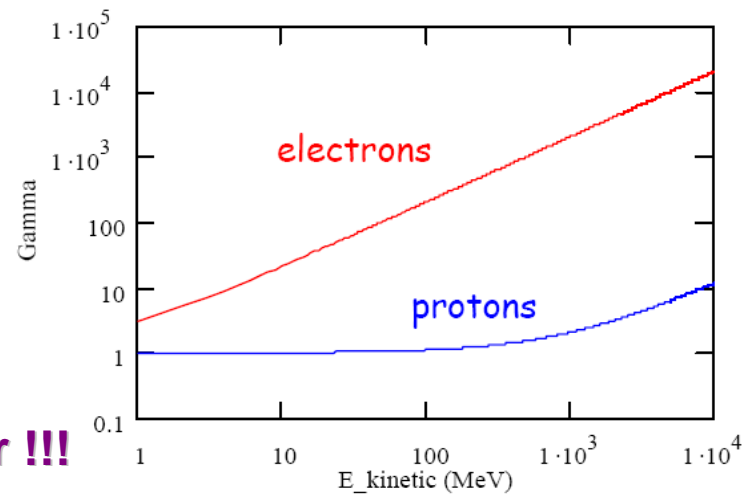
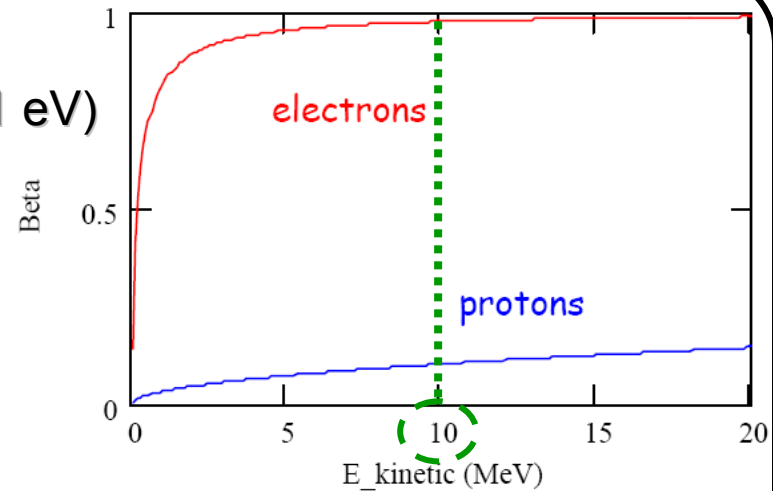
- **Gain de vitesse**

électron $\gamma_e = 1 + \frac{T}{m_0 c^2} = 1 + \frac{10}{0.511} \approx 20.6$

$$\beta_e = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.9988$$

proton $\gamma_p = 1 + \frac{10}{938.3} \approx 1.01$ $\beta_p \approx 0.145$

L'accélérateur et ses structures doivent être conçus selon le type de particule à accélérer !!!

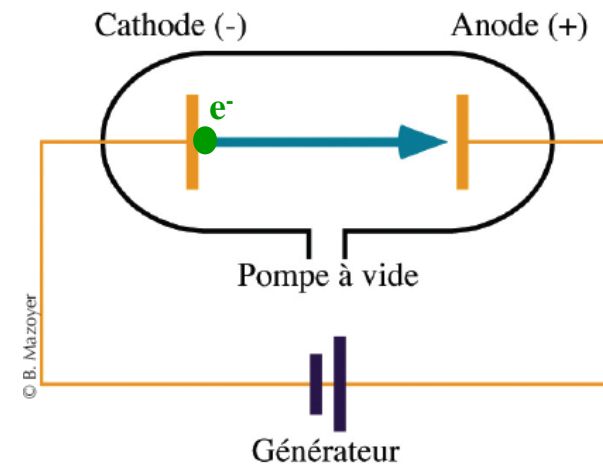
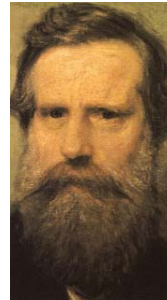


2. De l'accélération électrostatique à l'accélération RF

2.1. Premières expériences

1875: Expérience de W. Crookes

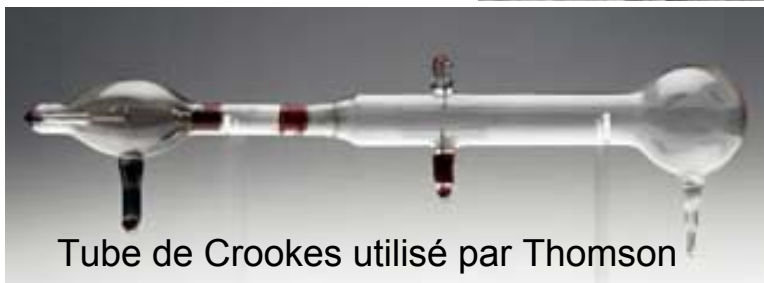
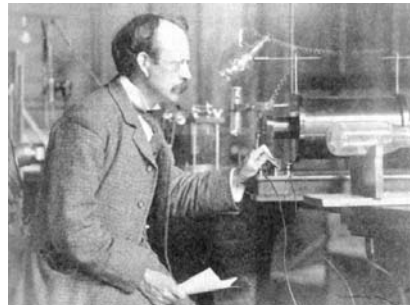
Étude de l'influence de la densité d'air sur la différence de potentiel à appliquer entre 2 plaques pour créer une décharge électrique



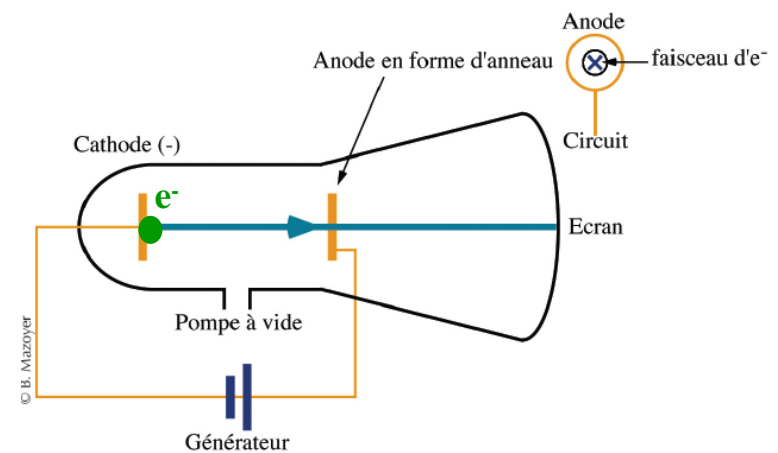
1897 : Expérience de J.J. Thomson

Anode trouée, écran au phosphore, et éléments magnétiques, tension 300 V

=> Découverte de l'électron



Tube de Crookes utilisé par Thomson



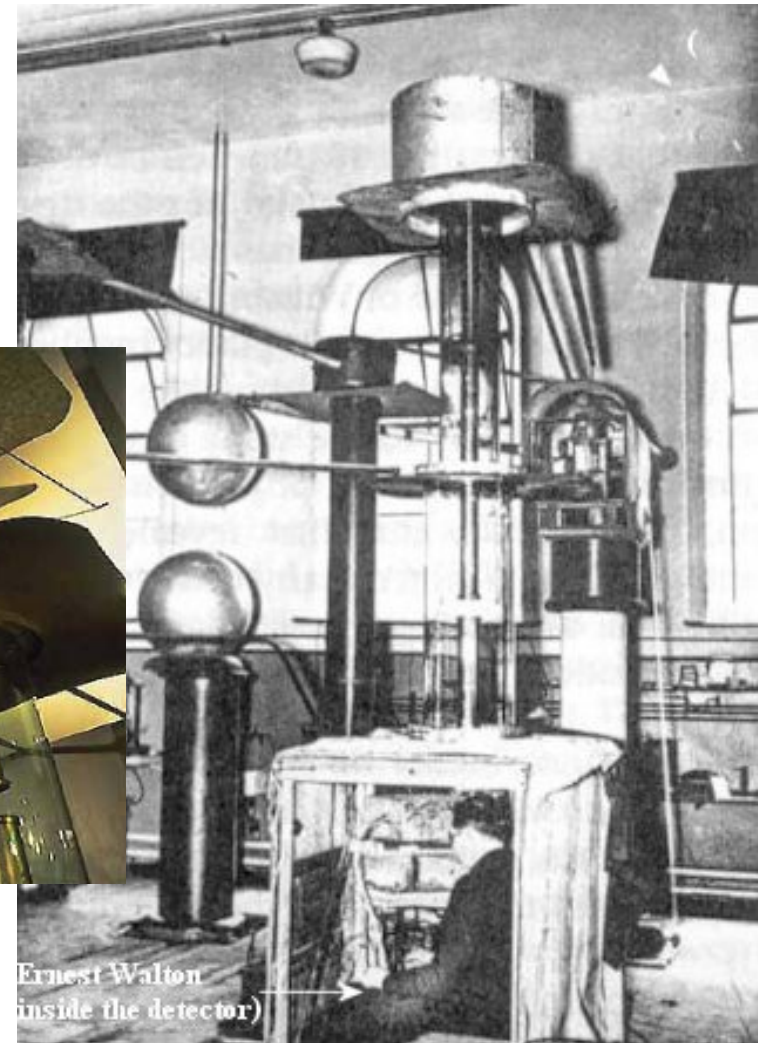
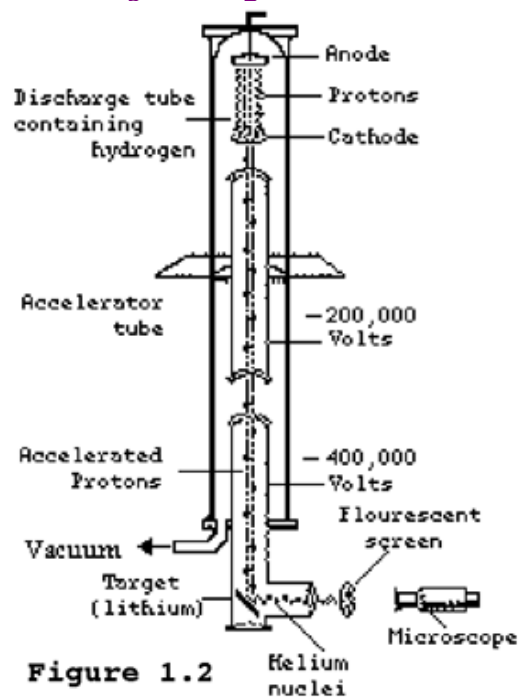
2.2. Accélérateur « Cockcroft & Walton »

1930's : 1^{er} accélérateurs Cockcroft & Walton

Accélérateurs électrostatiques chargés par une chaîne de condensateurs et de diodes en cascade

1930 : tension 200 kV – 1932 : tension 800 kV

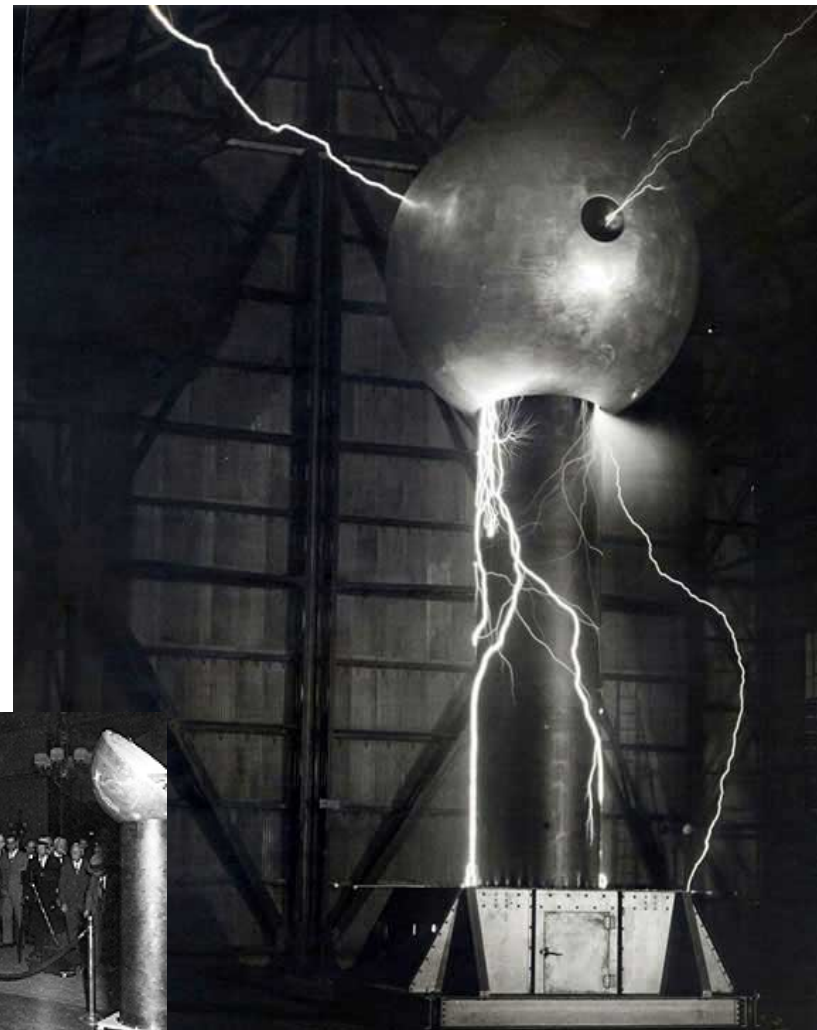
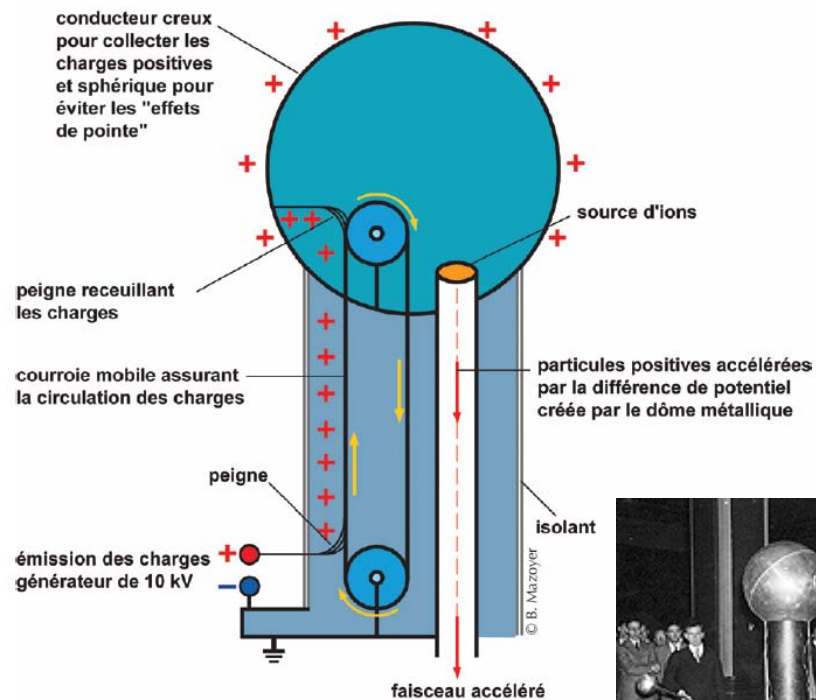
=> 1932 : Premières fissions réussies et identifiées (protons sur ${}_3^7\text{Li} \rightarrow {}_2^4\text{He}$)



2.3. Accélérateur « Van de Graaf »

1930's : 1^{er} accélérateurs Van de Graaf

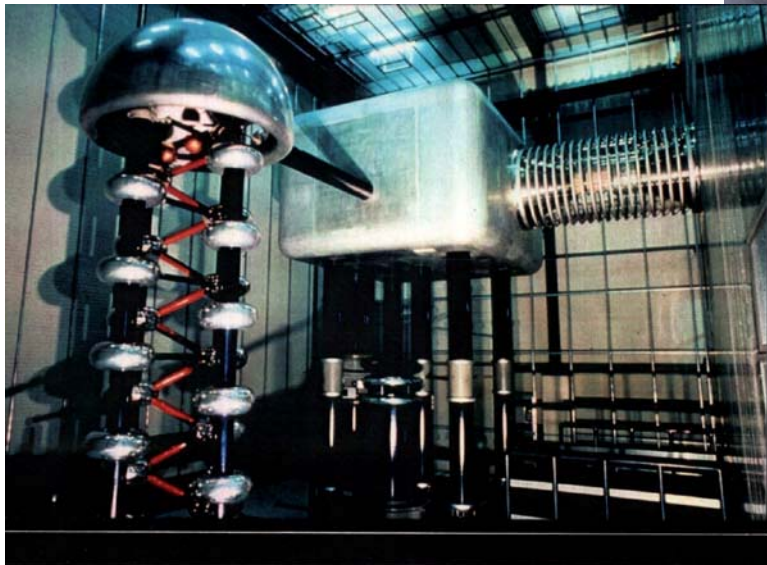
Accélérateur électrostatique chargé par courroie mobile
1929 : tension 80 kV – 1933: tension 7 MV



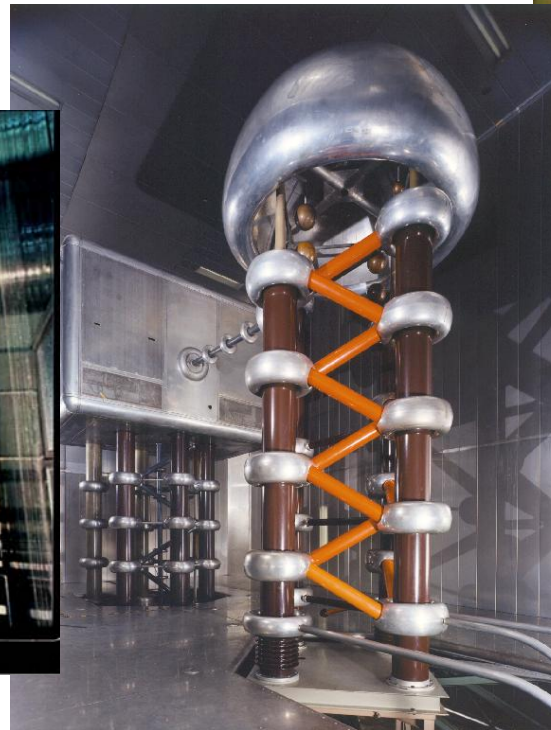
2.4. Accélérateurs électrostatiques d'aujourd'hui (1)

Des accélérateurs électrostatiques sont encore utilisés aujourd'hui, le plus souvent comme injecteurs de machines de plus haute énergie

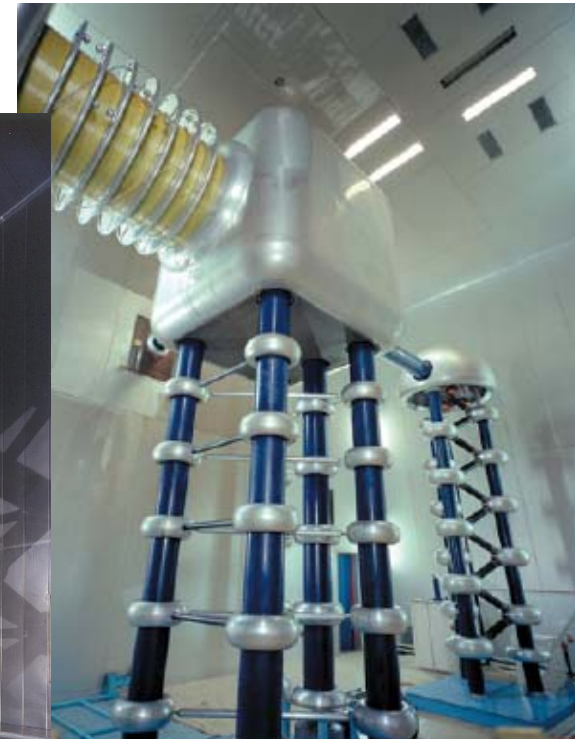
⇒ Injecteurs “Cockcroft & Walton”



PSI (800 kV)



ANL (750 kV)

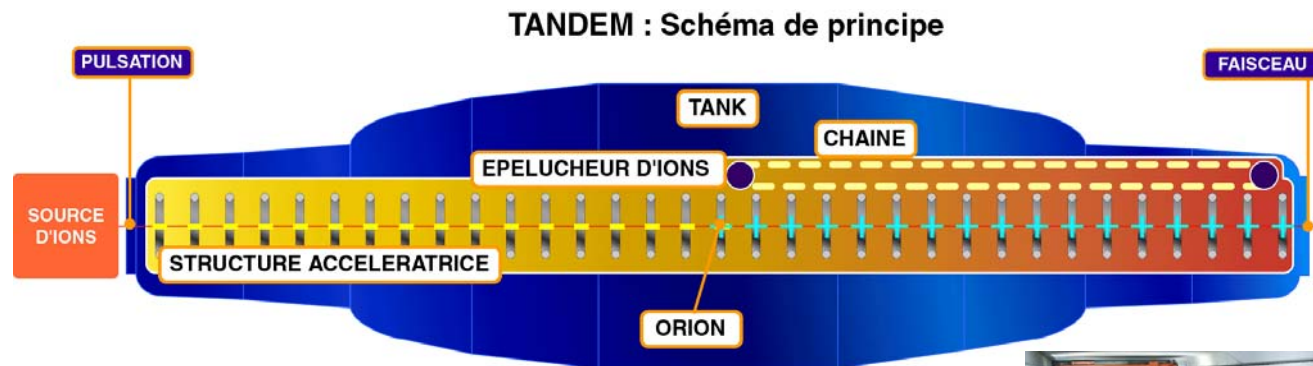


Fermilab (750 kV)

2.4. Accélérateurs électrostatiques d'aujourd'hui (2)

⇒ Tandems

Equivalents à 2 accélérateurs Van de Graaff en série, avec épluchage des ions au passage de l'un à l'autre



Orsay (15 MV)



Legnaro (13 MV)



Munich (14 MV)

2.5. Vers l'accélération RF

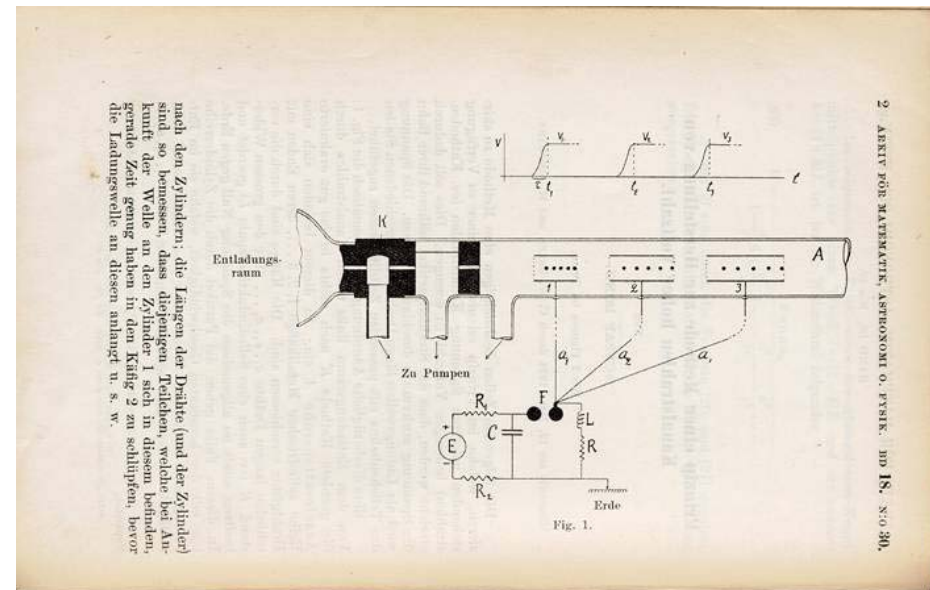
Limitation de l'accélération électrostatique:

Le gain d'énergie disponible pour le faisceau est directement proportionnel à la tension qu'il est possible de maintenir entre les 2 électrodes du système avant claquage... soit quelques MV au maximum dans le meilleur des cas...

1924: Publication de G. Ising

1^{er} pas vers l'accélération RF: établit le principe selon lequel, pour accélérer des particules, il est préférable de communiquer l'énergie désirée à ces particules non pas en une seule fois, mais par de nombreuses accélérations plus modestes.

Ce concept est à la base de tous les grands accélérateurs modernes

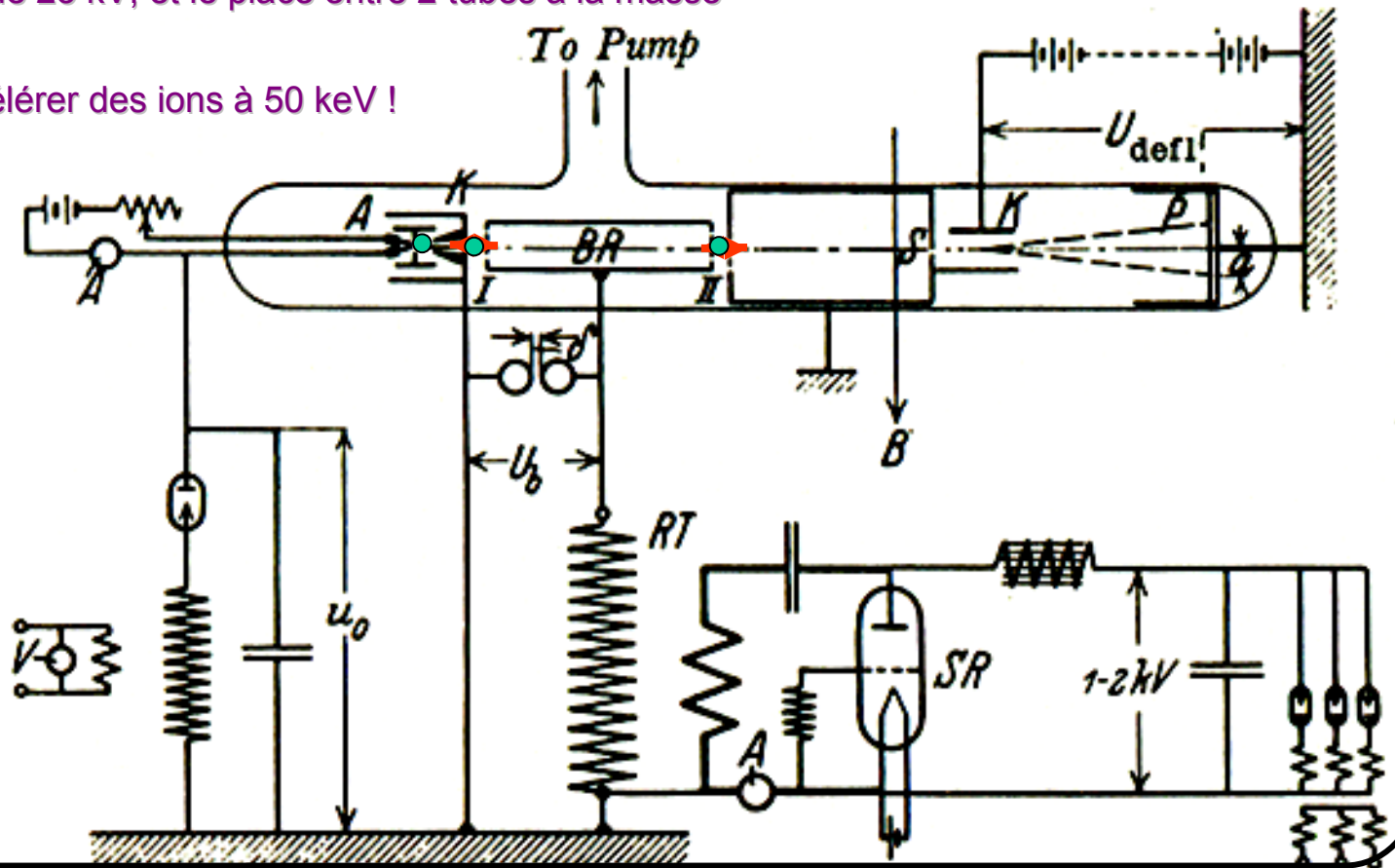


2.6. Expérience de Wideröe

1928: Expérience de R. Wideröe

Première démonstration expérimentale de l'accélération RF: il applique à un tube de glissement une tension alternative de 25 kV, et le place entre 2 tubes à la masse

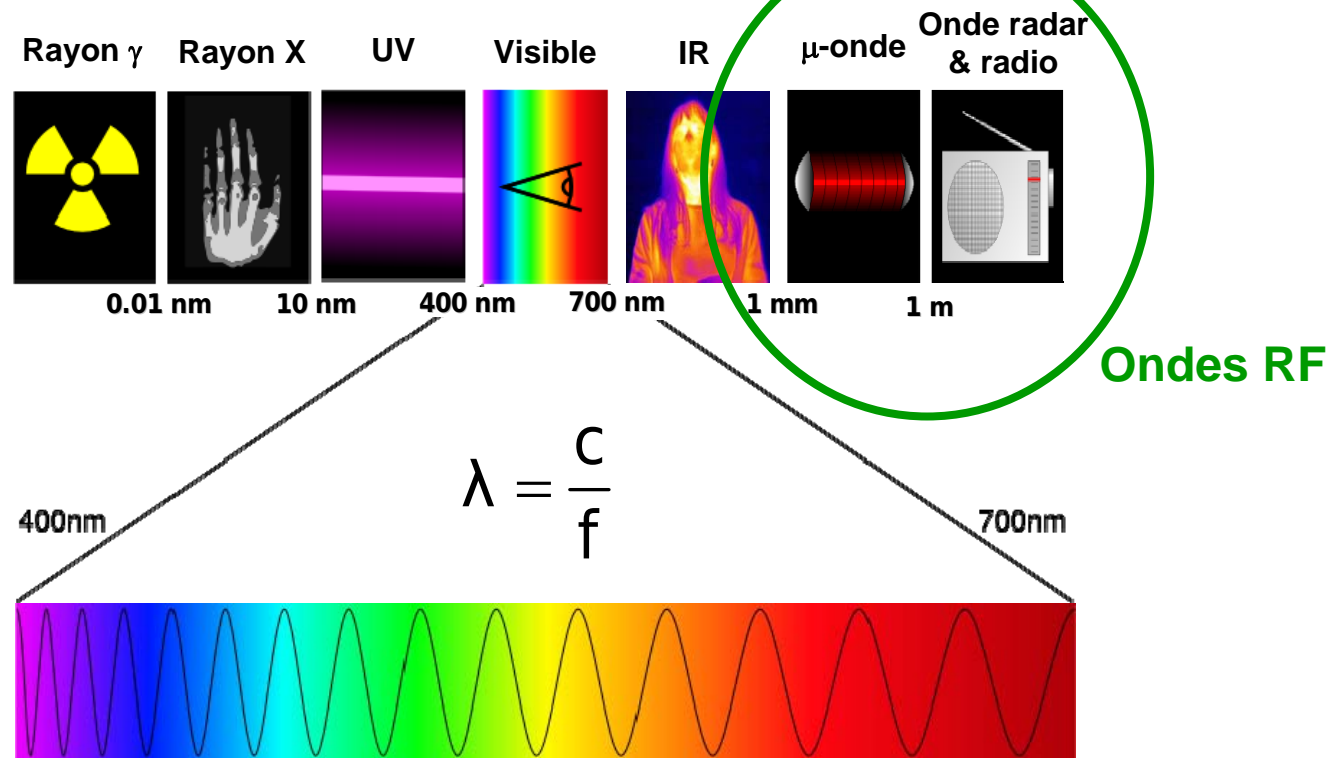
=> il parvient à accélérer des ions à 50 keV !



3. Fonctionnement d'une cavité accélératrice RF

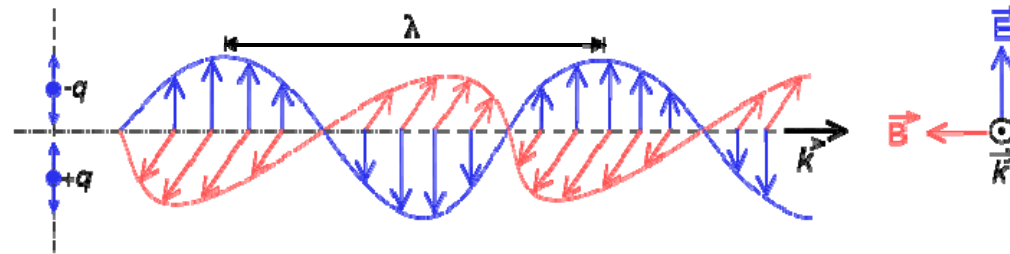
3.1. Les ondes RF

- **Une onde radio-fréquence (RF)** est une onde électromagnétique dont la fréquence d'onde (f) est par convention comprise **entre 9 kHz et 3000 GHz**, ce qui correspond à des longueurs d'onde (λ) de 33 km à 0,1 mm.



3.2. Equations de Maxwell

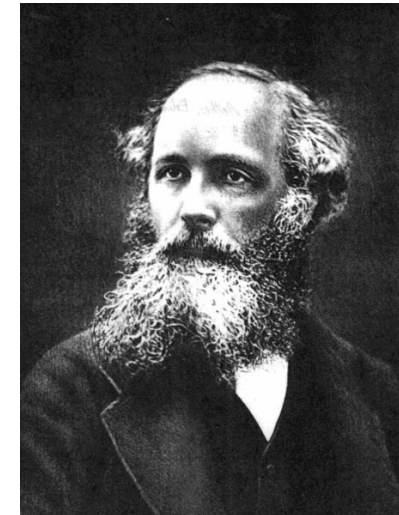
- **Onde électromagnétique** = oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique, qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière



- **Les variations des champs électrique et magnétique sont liées par les équations de Maxwell (1873)**

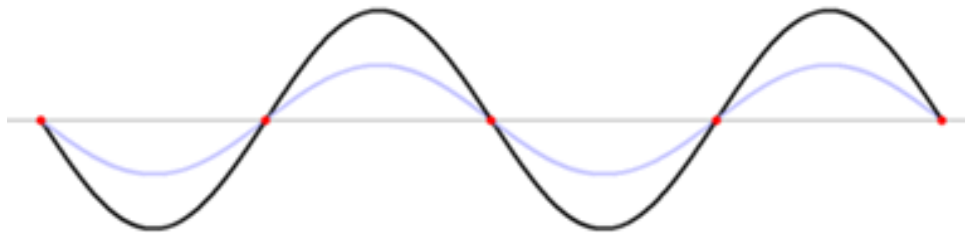
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Loi de Gauss (associe charge et champ électrique)} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{(pas de "charge magnétique", pas de pôle magnétique isolé)} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad \text{Loi d'Ampère (associe courant et champ magnétique)} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Faraday (interaction champ électrique et champ magnétique)} \end{array} \right.$$

avec ρ : densité de charge (C/m³) & j : densité de courant (A/m²)



3.3. Notion de cavité résonante

- **Cavité résonante** = volume de diélectrique (souvent du vide) entouré de parois conductrices, dans lequel les champs électromagnétiques, par réflexions successives, peuvent prendre diverses configurations spatiales à diverses fréquences => possibilité d'y créer des **ondes EM stationnaires**

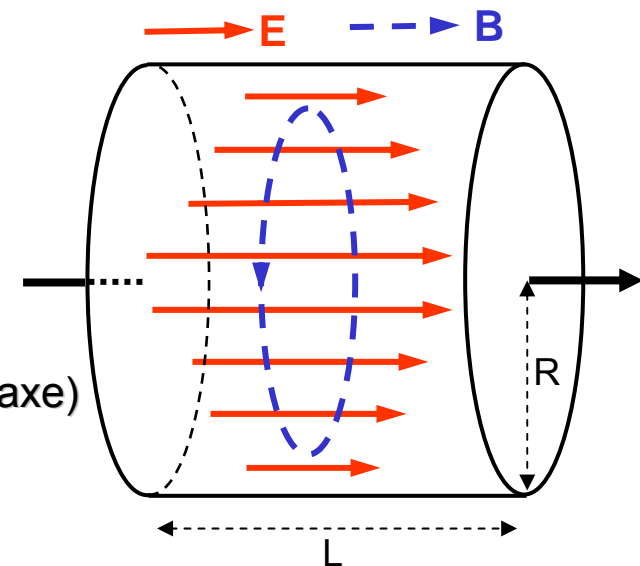


- **Ex: cavité "pillbox" de longueur L et rayon R**
=> Fréquence de résonance du mode accélérateur (E sur l'axe)

$$f_{\text{TM}010} = \frac{2.405 c}{2\pi R}$$

Ex : $f = 700 \text{ MHz} \rightarrow R = 16.4 \text{ cm}$

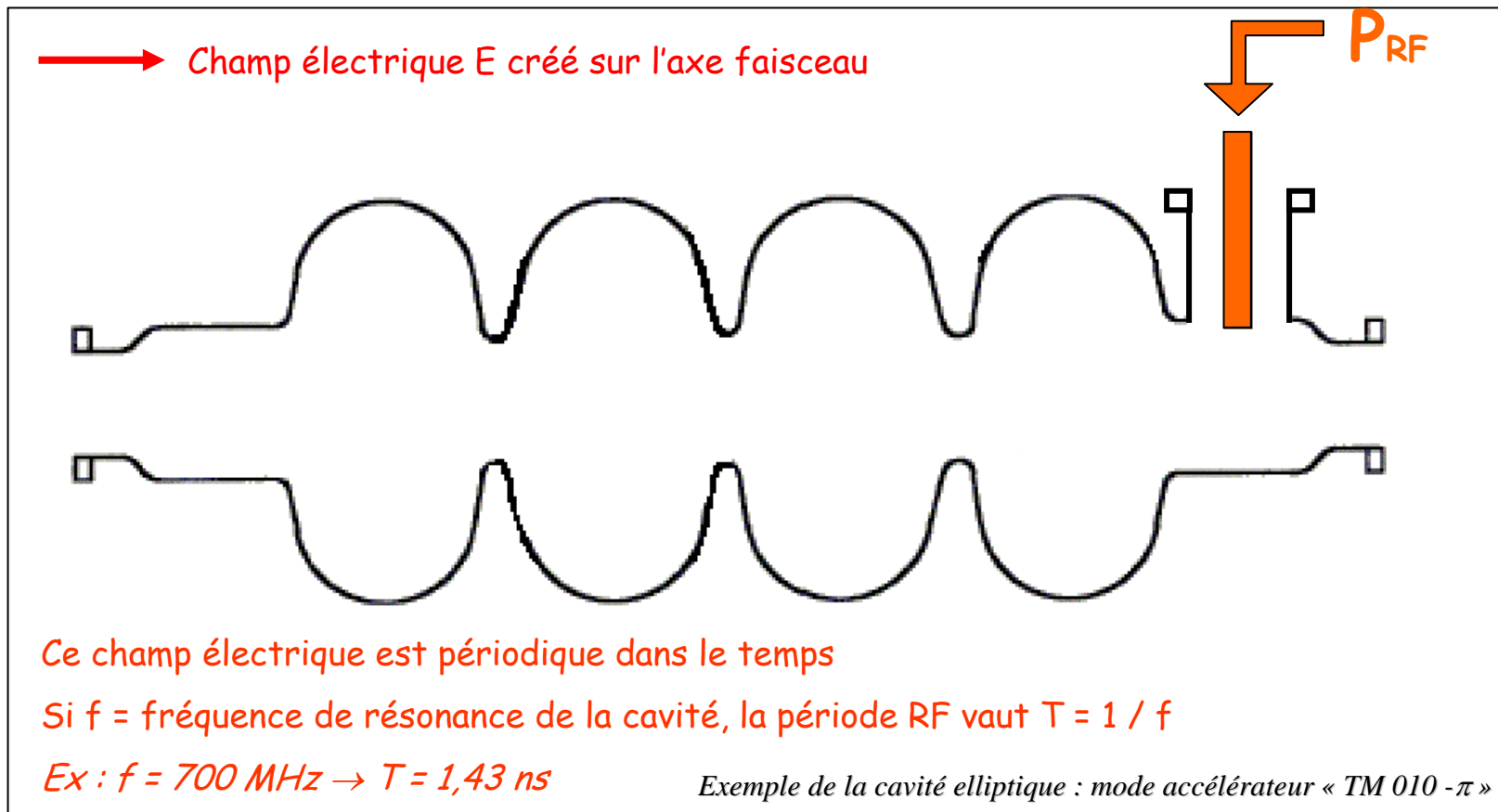
Fréquences basses = grandes cavités !



Cavité « pill-box » : mode TM 010

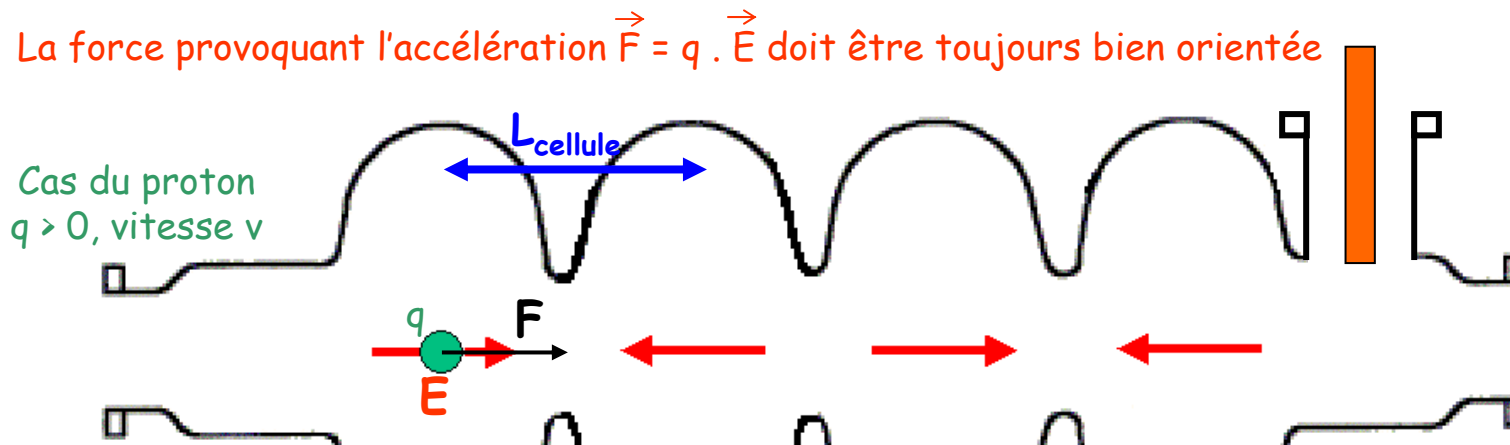
3.4. Principe de la cavité accélératrice (1)

- (1) Création d'un champ électrique radio-fréquence (RF) sur l'axe du faisceau, utilisable pour accélérer des particules chargées



3.4. Principe de la cavité accélératrice (2)

- (2) Passage d'une particule chargée : pour une accélération efficace, il faut que les champs RF soient correctement synchronisés avec la particule à accélérer



Condition de synchronisation :

Le temps mis par la particule pour traverser 1 cellule doit être égal à $T_{RF}/2 \Leftrightarrow \frac{L_{cell}}{v} = \frac{1}{2f}$

La longueur de cellule doit donc vérifier: $L_{cell} = \frac{v}{2f} = \frac{\beta c}{2f}$ ou $L_{cell} = \frac{\beta \lambda}{2}$

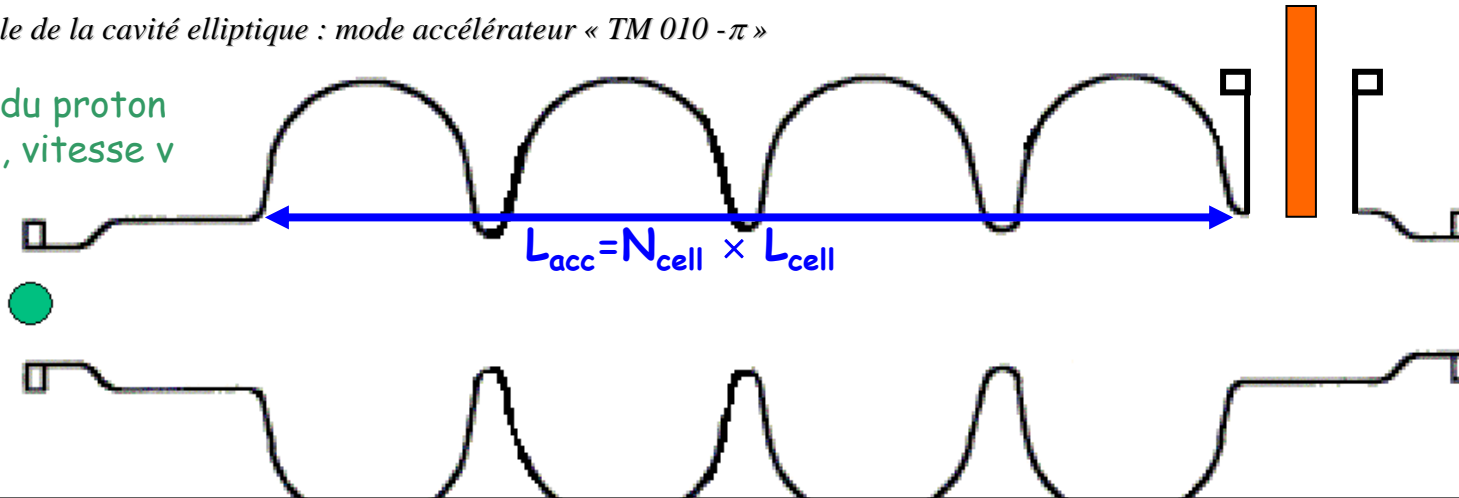
« Plus la vitesse est faible, plus L_{cell} et/ou f doivent être faibles »

Ex: $f = 700\text{MHz}$ & $\beta = 1 \Rightarrow L_{cell} = 21,4\text{ cm}$ (la moitié à $\beta = 0,5$)

3.4. Principe de la cavité accélératrice (3)

Exemple de la cavité elliptique : mode accélérateur « TM 010 - π »

Cas du proton
 $q > 0$, vitesse v



Energie gagnée par la particule :

$$\Delta U = q \times \int_{t_{\text{entrée}}}^{t_{\text{sortie}}} \vec{E} \cdot \vec{v} dt \quad \text{ou} \quad \Delta U = q \times E_{\text{acc}} \times L_{\text{acc}} \times \cos(\varphi)$$

E_{acc} : champ accélérateur (pour une particule de vitesse v)

L_{acc} : longueur « accélératrice » de la cavité

φ : déphasage particule / onde RF

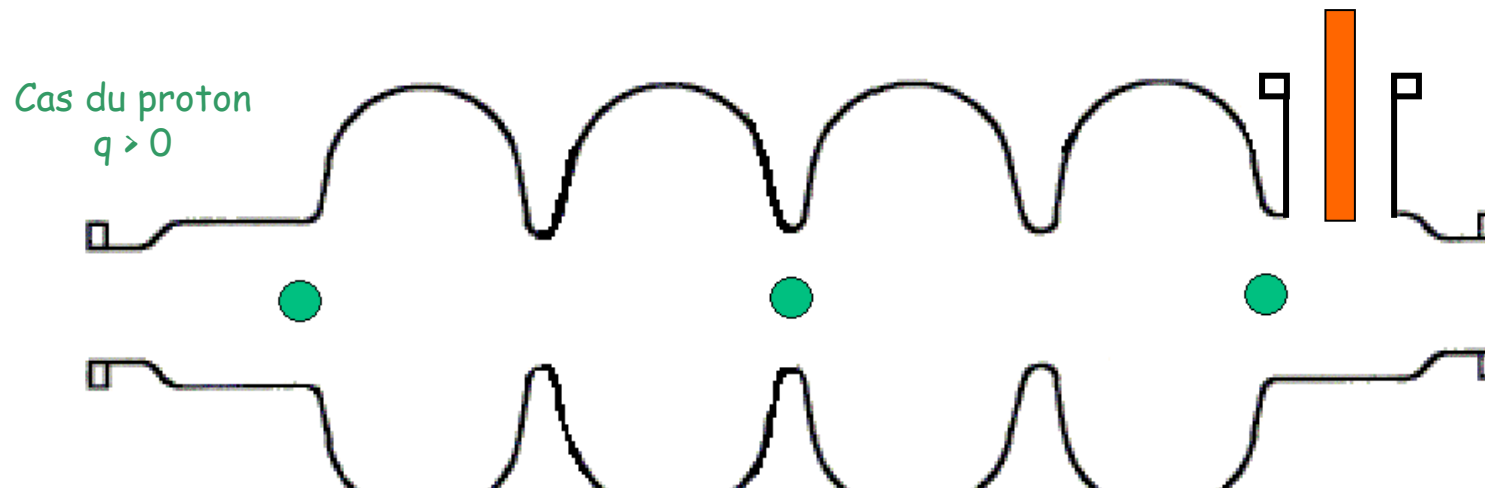
Ex : $f = 700\text{MHz}$; cavité 5 cellules $\beta = 0.65$; $E_{\text{acc}} = 10\text{MV/m}$; $\varphi = -30^\circ$

\Rightarrow Energie gagnée : $\Delta U = 1 \text{ eV} \times 10\text{MV/m} \times 0,7 \text{ m} \times 0.87 = 6 \text{ MeV}$



3.4. Principe de la cavité accélératrice (4)

- (3) Accélération d'un faisceau : les particules doivent être groupées en paquets correctement synchronisés avec la fréquence RF



Le temps entre 2 paquets doit être égal à une période RF (ou à un nombre entier de périodes RF)

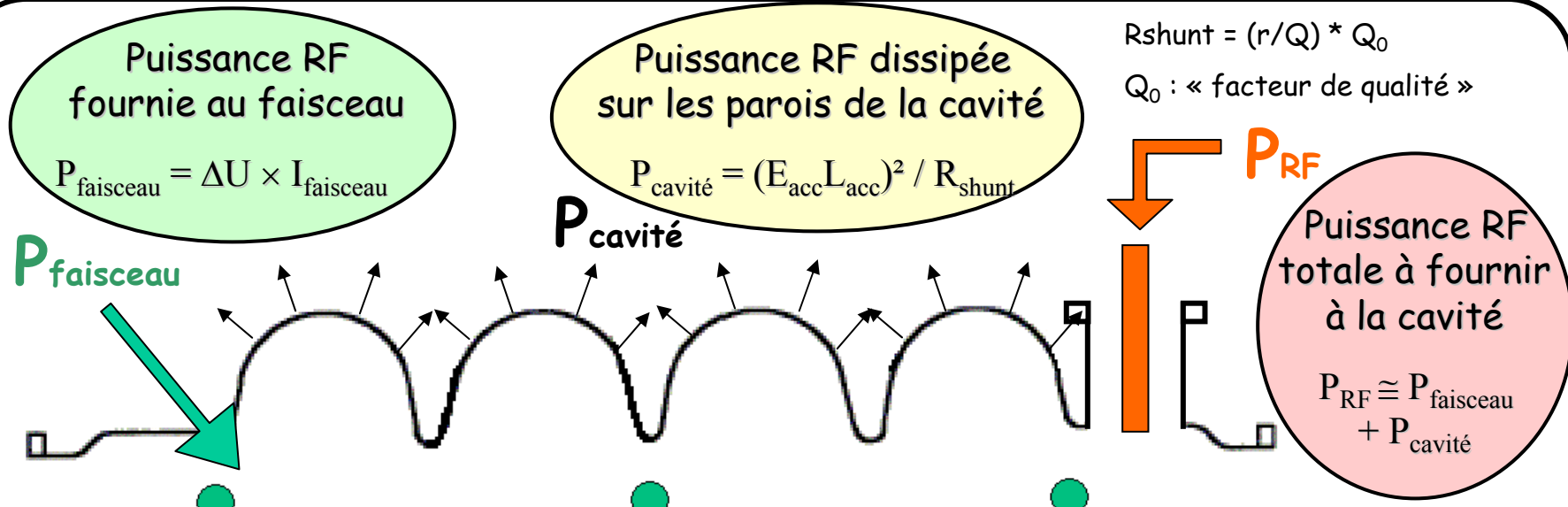
$$T_{\text{faisceau}} = n T_{\text{RF}} \quad (n=1,2,3\dots)$$

« La fréquence de résonance d'une cavité doit être un multiple entier de la fréquence de répétition du faisceau qu'elle accélère »

Ex: si $f_{\text{faisceau}} = 350 \text{ MHz}$ ($T_{\text{faisceau}} = 2,86 \text{ ns}$), alors la cavité doit résonner à :

$f = 350 \text{ MHz}$ ($T_{\text{RF}} = 2,86 \text{ ns}$), ou $f = 700 \text{ MHz}$ ($T_{\text{RF}} = 1,43 \text{ ns}$), ou $f = 1050 \text{ MHz}$ ($T_{\text{RF}} = 0,95 \text{ ns}$), etc.

3.5. Bilan de puissance dans la cavité accélératrice



Ordres de grandeur (cavité 700 MHz - $\beta = 0.65$ - 5 cellules - 10MV/m - $\varphi = -30^\circ$ - faisceau protons 10 mA)

Cas cavité froide ($Q_0 \sim 10^{10}$) : $P_{\text{faisceau}} = 6 \text{ MeV} \times 10 \text{ mA} = 60 \text{ kW}$

$P_{\text{cavité}} \approx 16 \text{ W}$ à évacuer à 4K (équivalent 4kW) ou à 2K (équ. 10kW)

Cas cavité chaude ($Q_0 \sim 3 \cdot 10^4$) : $P_{\text{faisceau}} = 60 \text{ kW}$ aussi

$P_{\text{cavité}} \approx 5,5 \text{ MW} !!!$ ← irréalizable en continu...!!!!

=> **Nécessité de limiter le champ et/ou le cycle utile RF dans les cavités chaudes**

3.6. Limitations en champ accélérateur

Limitation principale en champ accélérateur

- Cavités chaudes (Cu) :
champ **électrique** de surface E_{pk}

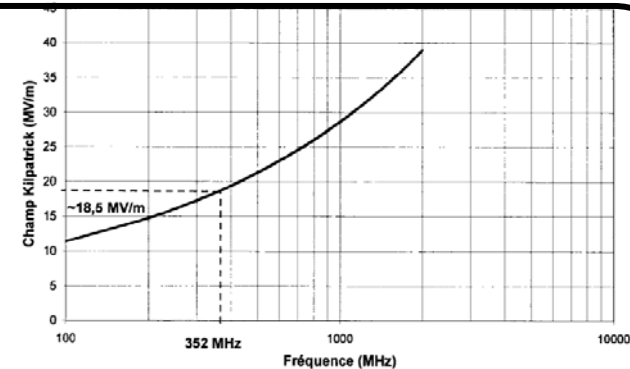
Champ limite « Kilpatrick » en $f^{1/2}$ au-delà duquel il y a risque de claquage ; on peut travailler jusqu'à 1.5 - 2.5 Kp au maximum dans d'excellentes conditions de vide et d'états de surface

- Cavités froides supraconductrices (Nb) :
champ **magnétique** de surface B_{pk}

Champ magnétique critique = 220 mT ; on peut travailler jusqu'à 100 -180 mT au maximum dans d'excellentes conditions de vide, de propreté et d'états de surface

Le champ accélérateur envisageable diminue avec le β de la cavité

Paramètres géométriques (r/Q , E_{pk}/E_{acc} , B_{pk}/E_{acc} , G) se dégradent lorsque le β diminue.



Ordres de grandeur:

Cavité $\beta = 1 \Rightarrow E_{pk}/E_{acc} \sim 2, B_k/E_{acc} \sim 4$

Cas cavité froide :

$E_{acc} \text{ max} \sim 120 \text{ mT} / 4 = 30 \text{ MV/m}$

$E_{pk} \sim 60 \text{ MV/m}$

Obtient-on mieux avec une cavité chaude ? \Rightarrow Oui si $f > 2 \text{ GHz}$



Ordres de grandeur pour une cavité froide:

$\beta = 1 \Rightarrow E_{acc} \text{ max} = 30 \text{ MV/m}$

$\beta = 0.5 \Rightarrow E_{acc} \text{ max} = 20 \text{ MV/m}$

$\beta = 0.1 \Rightarrow E_{acc} \text{ max} = 12 \text{ MV/m}$

3.7. Cavités chaudes ou Cavités froides ? (1)

- Cavités froides adaptées pour:

- Fonctionnement à haut gradient accélérateur

En tout cas aux fréquences « classiques » (< 2 GHz), et à des bêtas pouvant descendre jusqu'à quelques %

- Fonctionnement avec un faisceau continu, ou de haut cycle utile

Lorsque le cycle utile est assez élevé pour que le bas rendement de l'usine cryogénique devienne non significatif dans le bilan de puissance de l'accélérateur (i.e. devant les puissances RF et faisceau)

- Fonctionnements spécifiques

Besoin de flexibilité dans l'accélération (ions de divers q/A , de diverses énergies), besoin de fiabilité...

3.7. Cavités chaudes ou Cavités froides ? (2)

- Cavités chaudes adaptées pour :

- Fonctionnement à très basse énergie

Là où les pertes faisceau sont non-négligeables (ex: RFQ à forts courants), là où le facteur de remplissage ($L_{\text{acc}} / L_{\text{totale}}$) doit être suffisamment élevé pour assurer un bon transport du faisceau

- Fonctionnement avec un faisceau de faible cycle utile

Lorsque le cycle utile est assez faible pour que les échauffements RF ne soient plus limitatifs en terme de champ accélérateur, et que le rendement électrique de l'accélérateur redevient bon (faisceaux de fort courant crête préférés)

- Fonctionnements spécifiques

Fonctionnement à fréquence variable (ex: synchrotrons), à très haute fréquence (>2GHz), avec des très grandes cavités (ex: cyclotrons), à faible champ accélérateur...

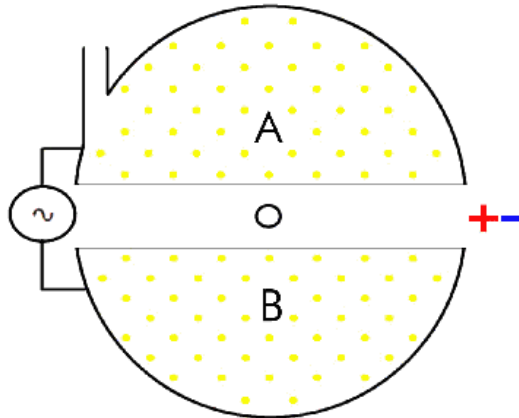
4. Panorama non-exhaustif des cavités chaudes

4.1. Cavités cyclotron (1)

Principe de base du cyclotron

- > Champ magnétique constant
- > Accélération à fréquence RF constante

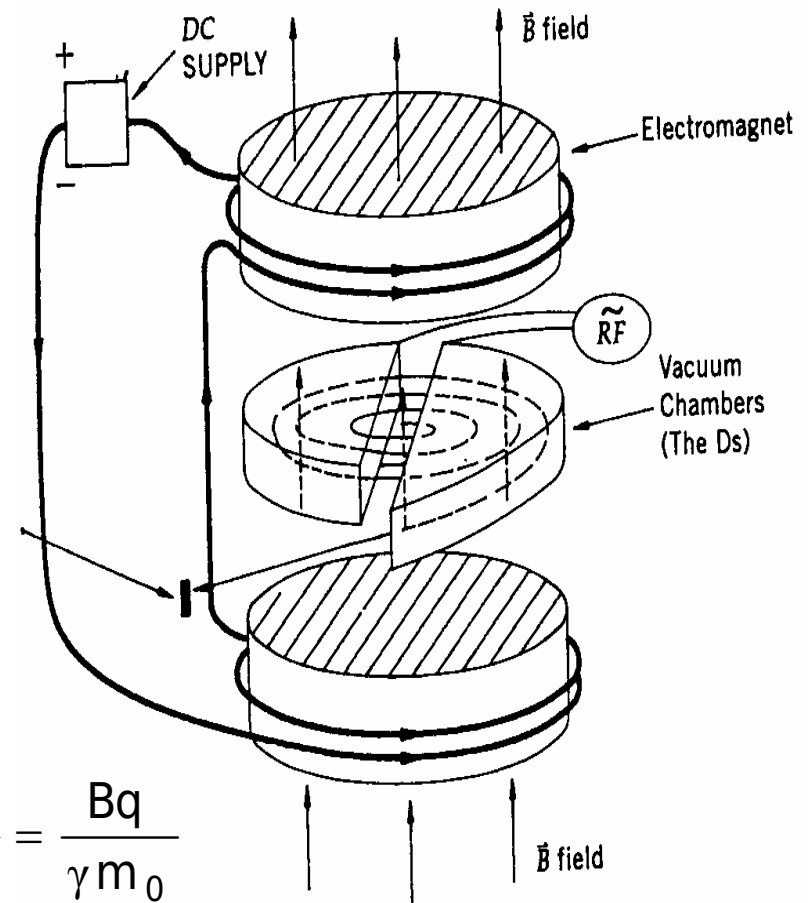
[Animation](#)



Condition de synchronisme

$$\frac{T_{RF}}{2} = \frac{\pi \rho}{v} \quad \omega_{RF} = \frac{v}{\rho} = \frac{\beta c B}{(B\rho)} = \frac{\beta c Bq}{\rho} = \frac{Bq}{\gamma m_0}$$

-> il faut que $\gamma \cong 1$, i.e. avoir un faisceau non-relativiste



4.1. Cavités cyclotron (2)

1930: 1^{er} cyclotron par E.O. Lawrence

11 cm de diamètre, 80 keV

1931: 28 cm, 1 MeV

1932: 69 cm, 4.8 MeV

1939: 1.5 m, 19 MeV

...

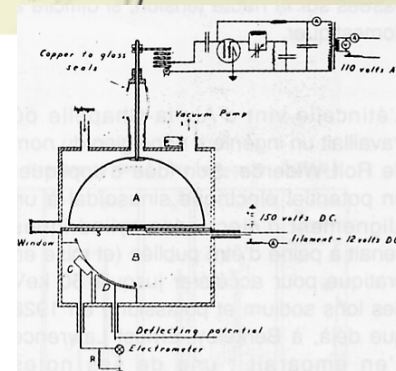
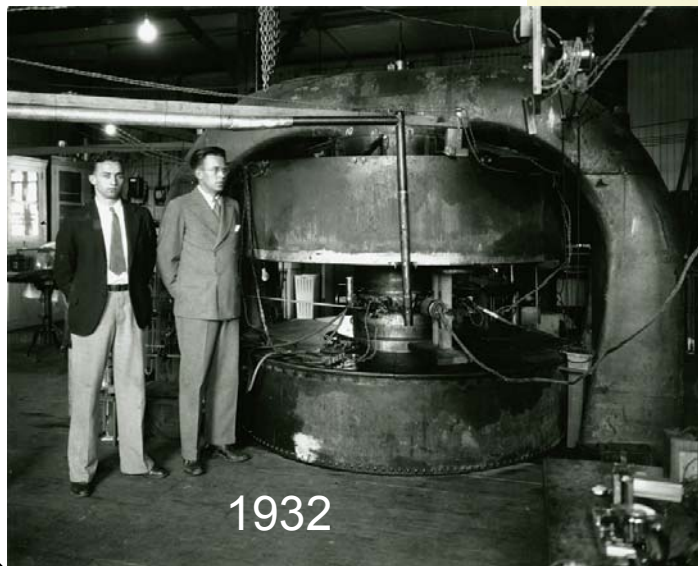
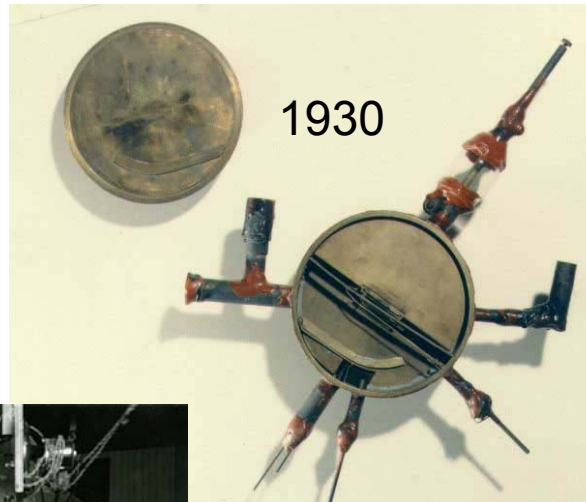
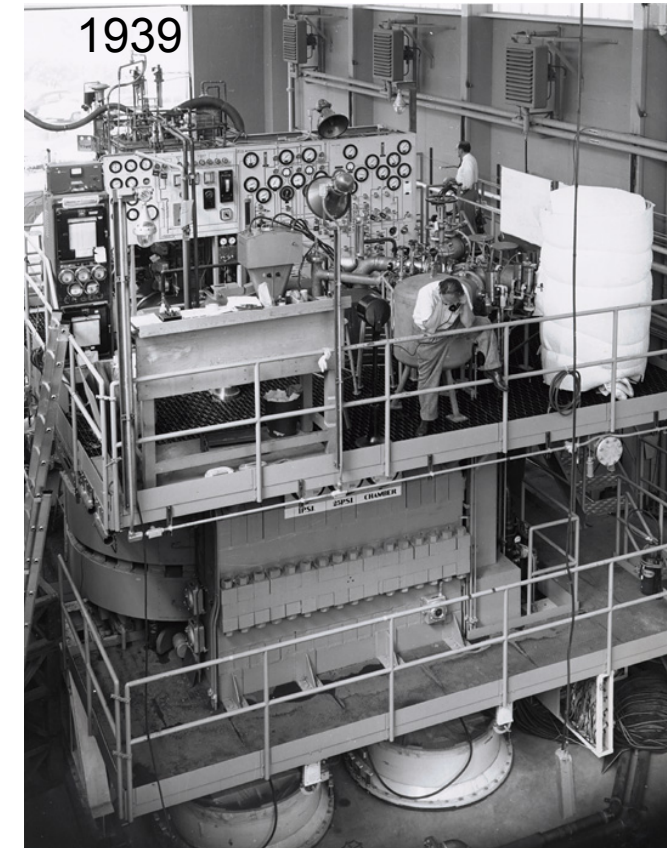
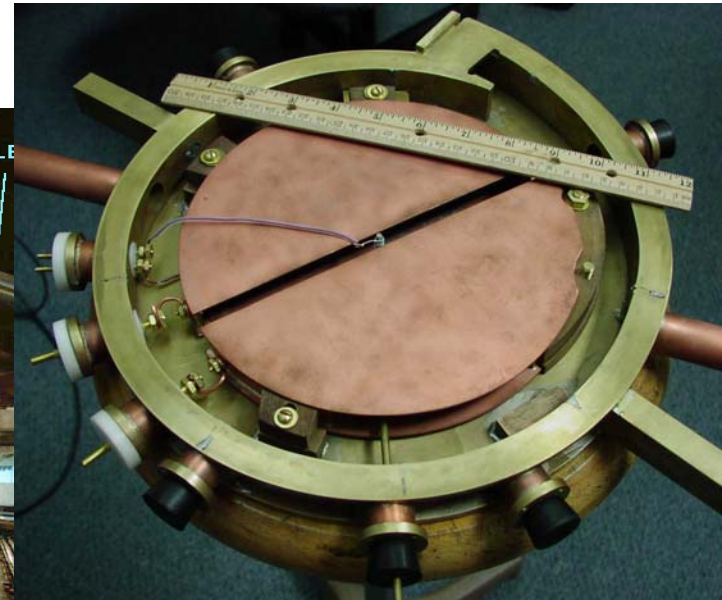
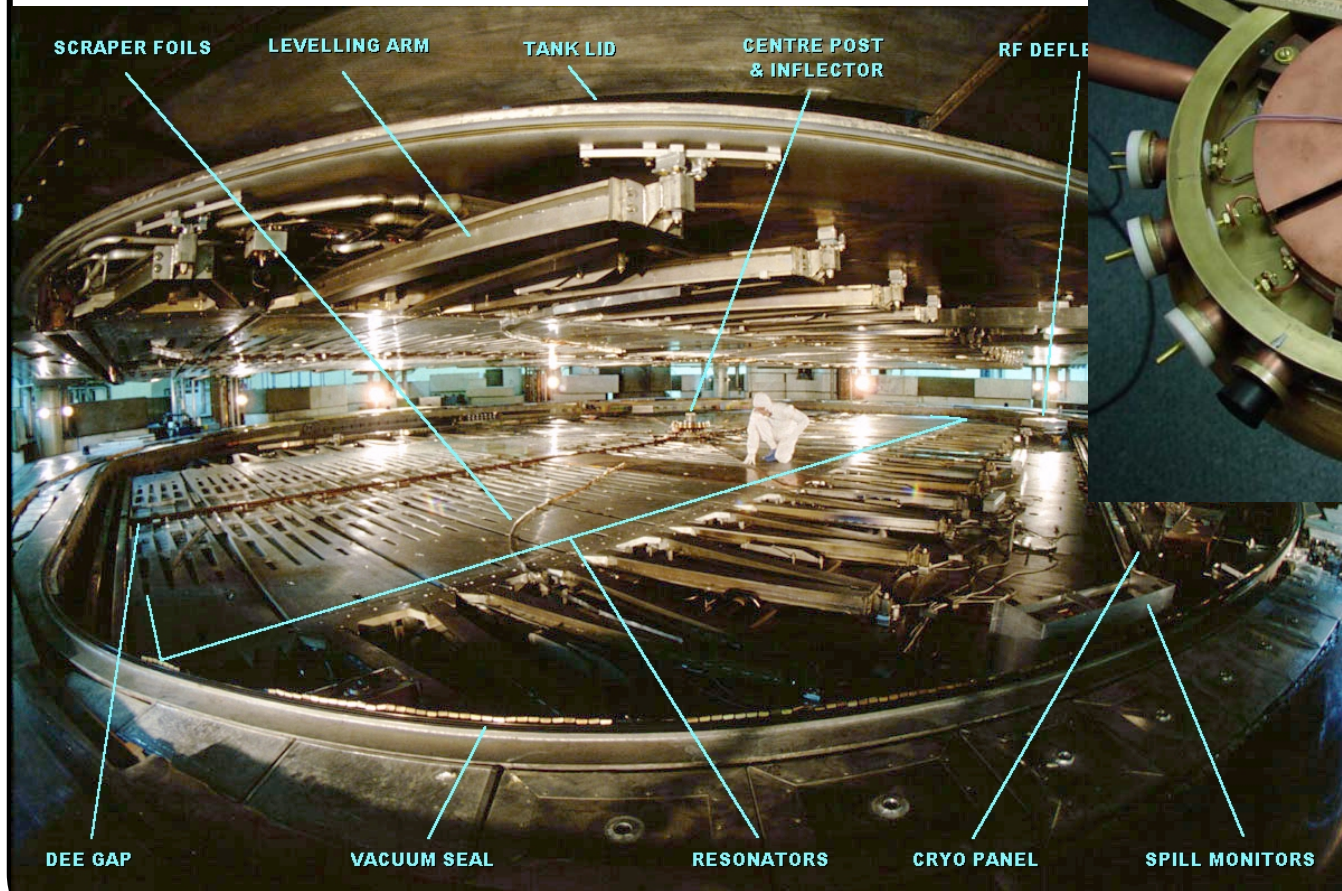


Figure 4
Schéma du premier cyclotron
Le diamètre du dee est de 5 pouces



4.1. Cavités cyclotron (3)

Exemples de cavités cyclotron

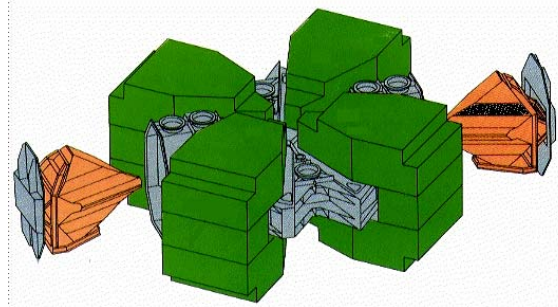
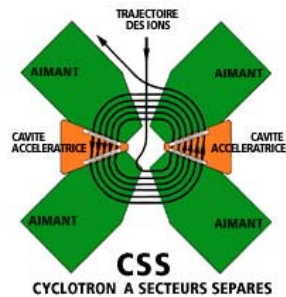


Cyclotron p 1.5 MeV 2T
(projet de fin d'étude)

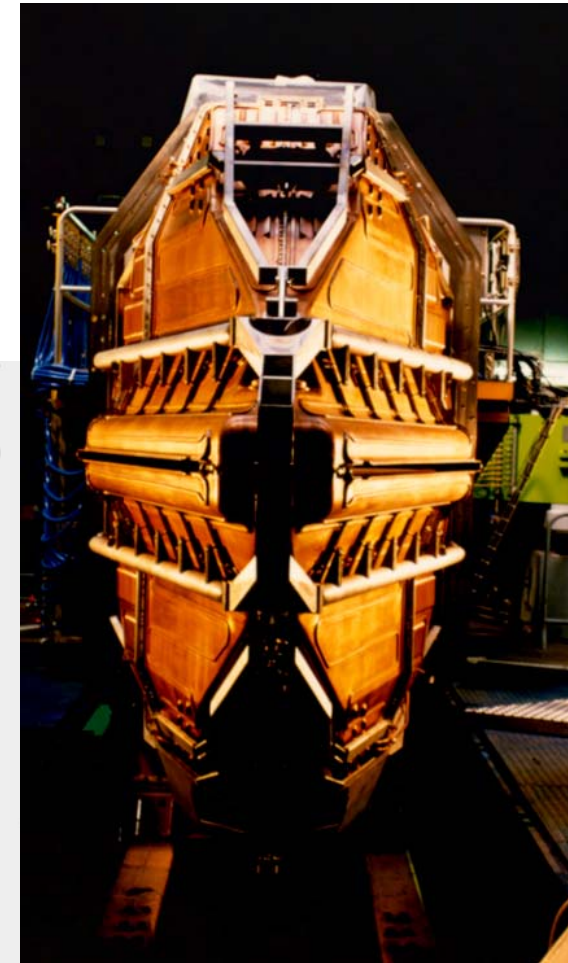
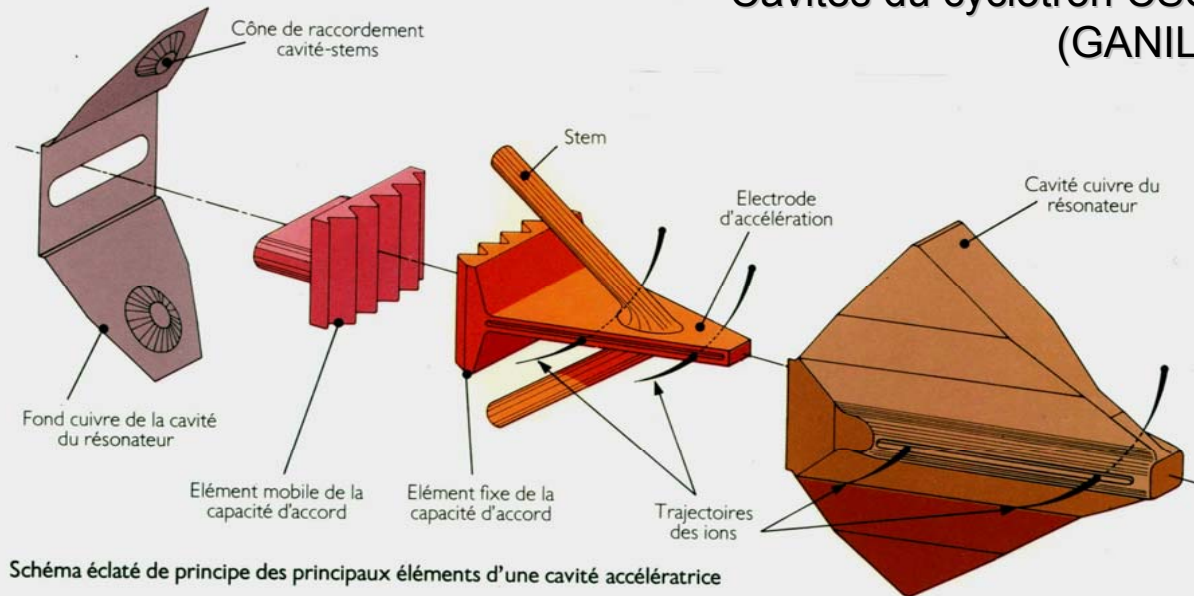
Intérieur du cyclotron
TRIUMF, le plus grand
du monde (H-, 520 MeV)
 $f=23$ MHz, 0.6T (1974)

4.1. Cavités cyclotron (4)

Exemples de cavités cyclotron (suite)



Cavités du cyclotron CSS (GANIL)



4.1. Cavités cyclotron (5)

Exemples de cavités cyclotron (suite)



Cavités du cyclotron CIME
(GANIL, 9.6 – 14.5 MHz, $V_{\max}=100\text{kV}$)



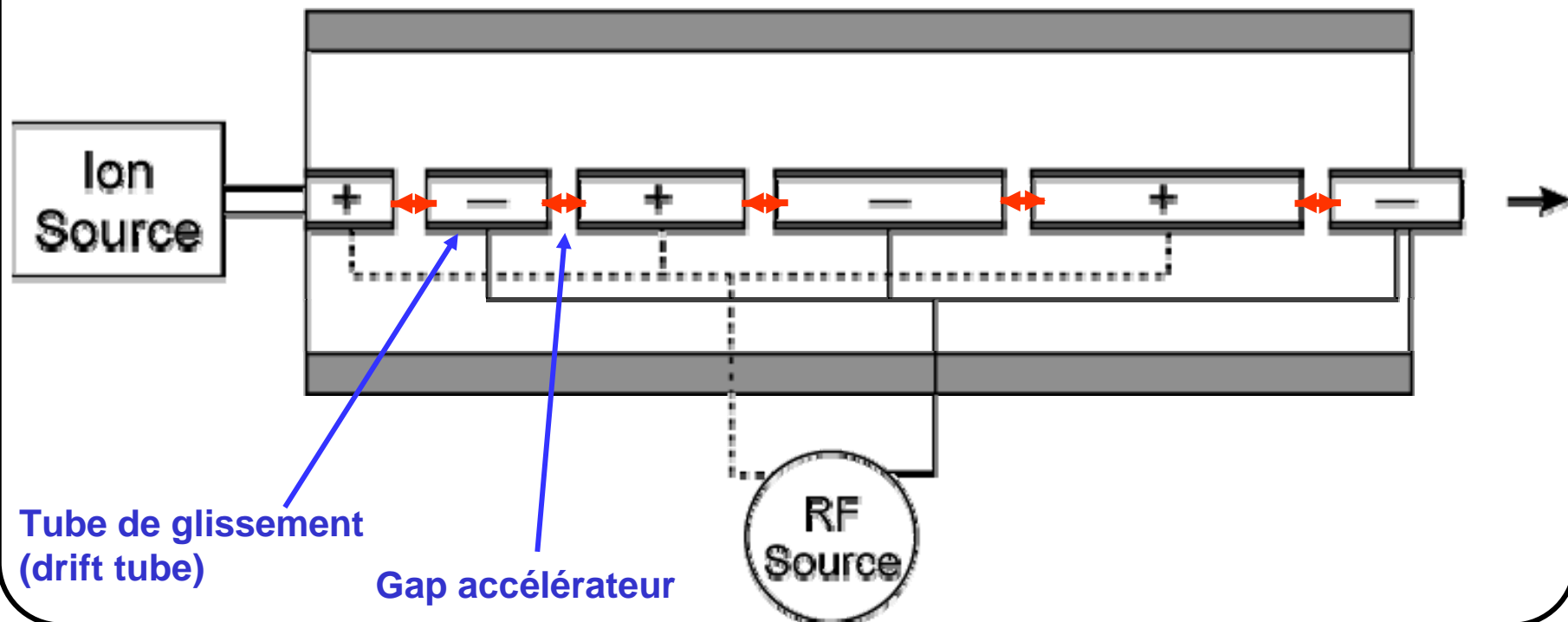
Cyclotron PSI
(p, 590 MeV, 2mA, 50.6 MHz)

4.2. Les DTL « Drift Tube Linac » (1)

1931 : 1^{er} linac DTL de type Wideröe par D.H. Sloan & E.O. Lawrence

Structure à 30 tubes de glissement, alimentée par source 42 kV à 10 MHz, fonctionnant en mode π

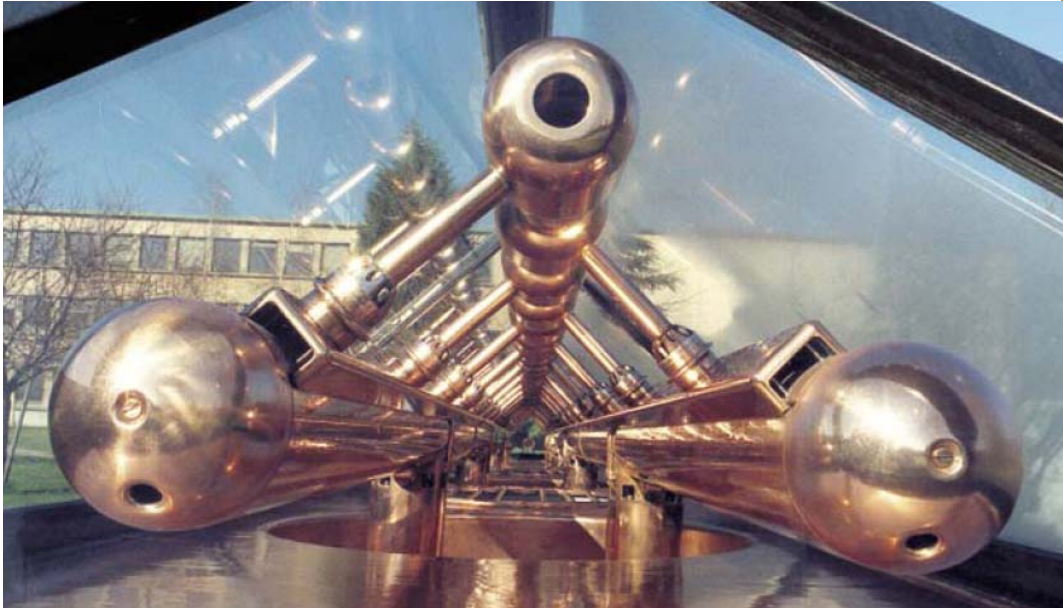
-> 1 μ A d'ions mercure à 1.26 MeV



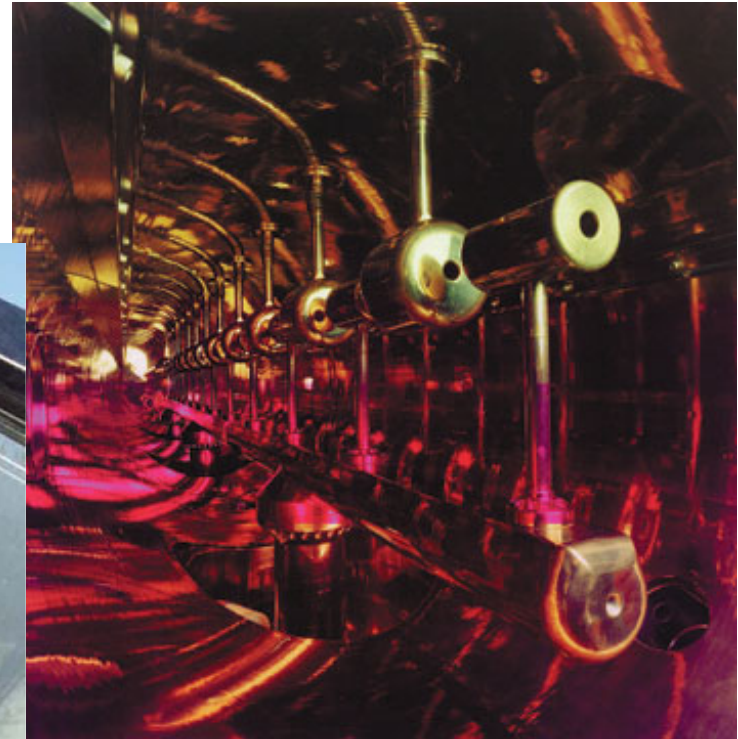
4.2. Les DTL « Drift Tube Linac » (2)

Exemples de “structures Wideröe”

Pour la plupart, elles sont aujourd’hui remplacées par des structures plus efficaces (RFQ, DTL Alvarez, IH-DTL...)



Injecteur d’ions lourds Alice (Orsay)
24.4 MHz, 56 électrodes (1970)



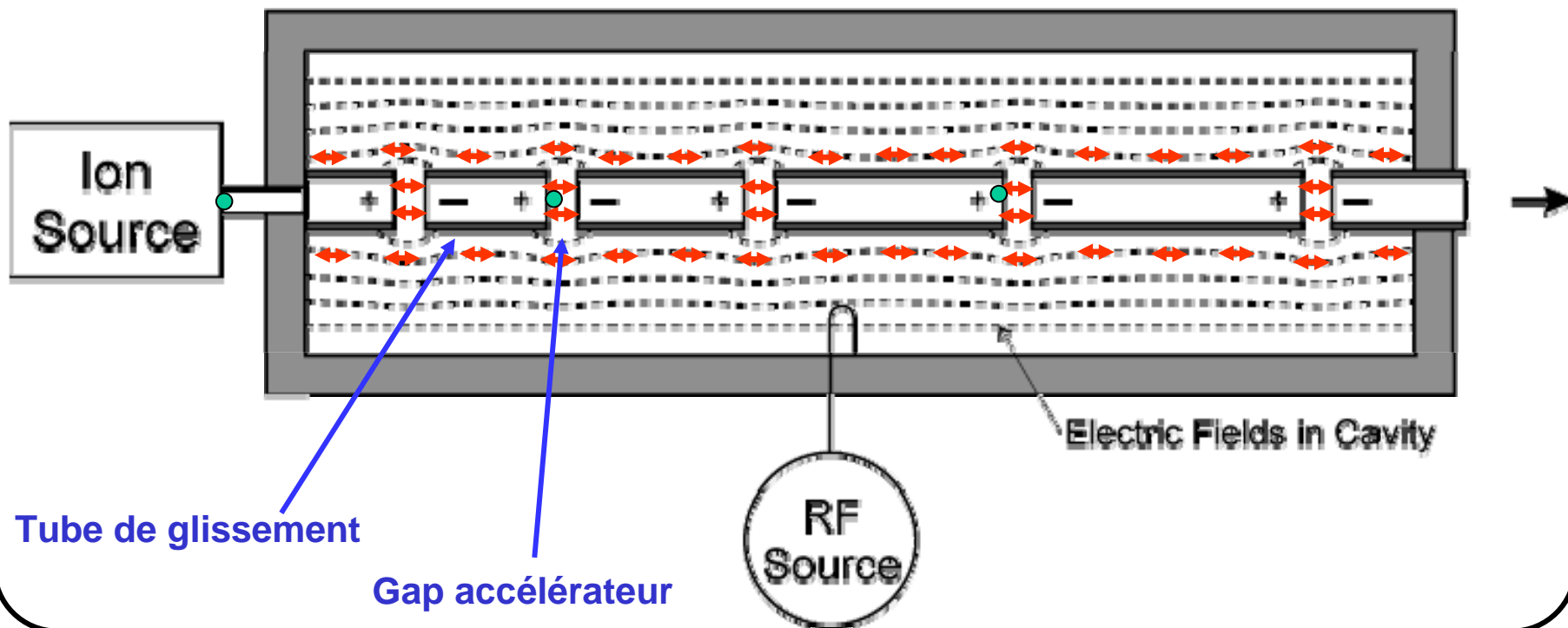
Injecteur d’ions lourds Unilac (GSI)
27 MHz (1971)

4.2. Les DTL « Drift Tube Linac » (3)

1946 : 1^{er} linac à protons par L.W. Alvarez

DTL = longue cavité « pill-box » où l'on insère des tubes de glissements pour cacher au faisceau les champs de mauvaise polarité; fonctionne sur le mode $TM_{010-2\pi}$

Rendu possible grâce aux développements militaires de sources de puissance RF pour radars > 10MHz



4.2. Les DTL « Drift Tube Linac » (4)

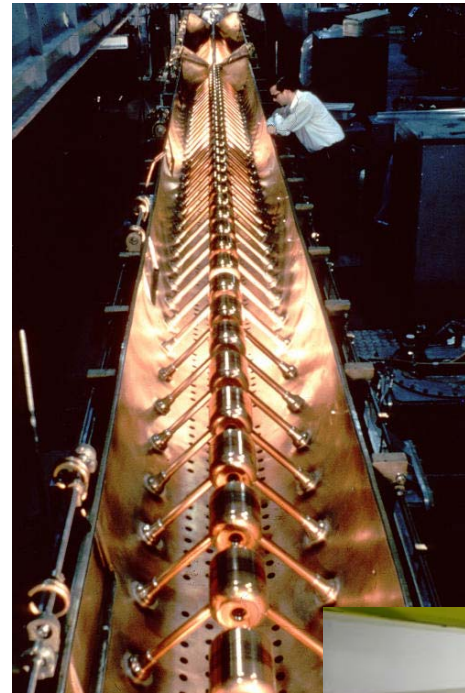
Exemples de “DTL Alvarez”

Structures simples et efficaces, encore très utilisées aujourd’hui (CERN, SNS, Fermilab, J-Parc...)

Gamme typique d’énergie : 2 – 100 MeV



Le DTL d’Alvarez (Berkeley, 1946) :
200 MHz, p 4->32 MeV, 12 m



DTL Linac 1,
(CERN, 1958) :
202 MHz, p 50 MeV

DTL Linac 2,
(CERN, 1978) :
202 MHz, p 50 MeV

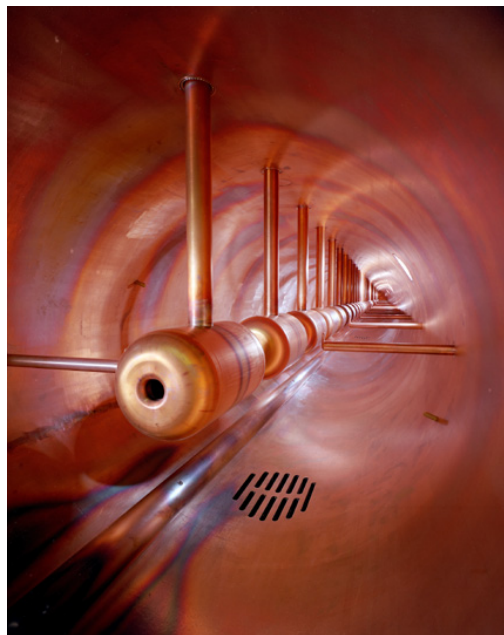


4.2. Les DTL « Drift Tube Linac » (5)

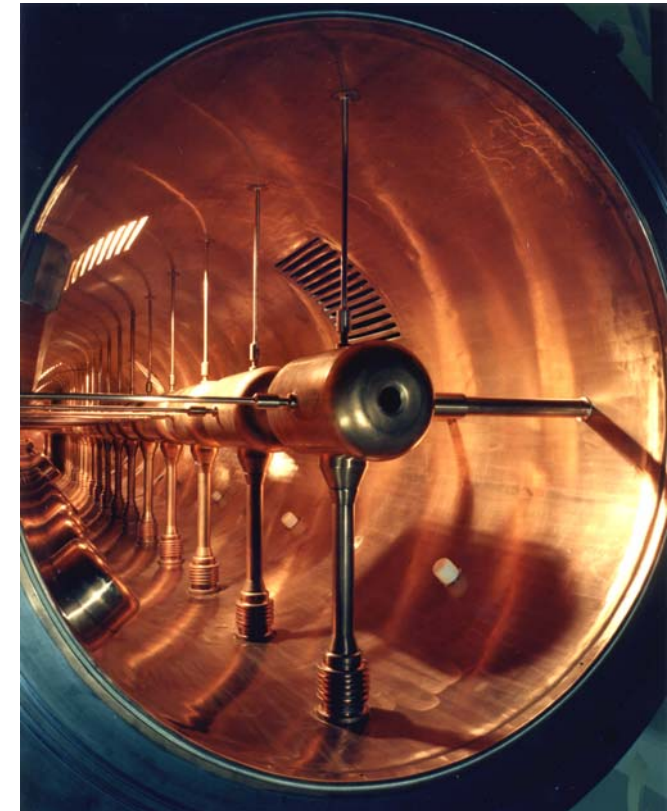
Exemples de “DTL Alvarez” (suite)



Saturne DTL (Saclay) :
-> 20 MeV, 200 MHz



Fermilab DTL :
-> 116 MeV, 425 MHz



AGS DTL (Brookhaven) :
-> 200 MeV, 201.25 MHz

4.3. Le CCL « Coupled Cavity Linac » (1)

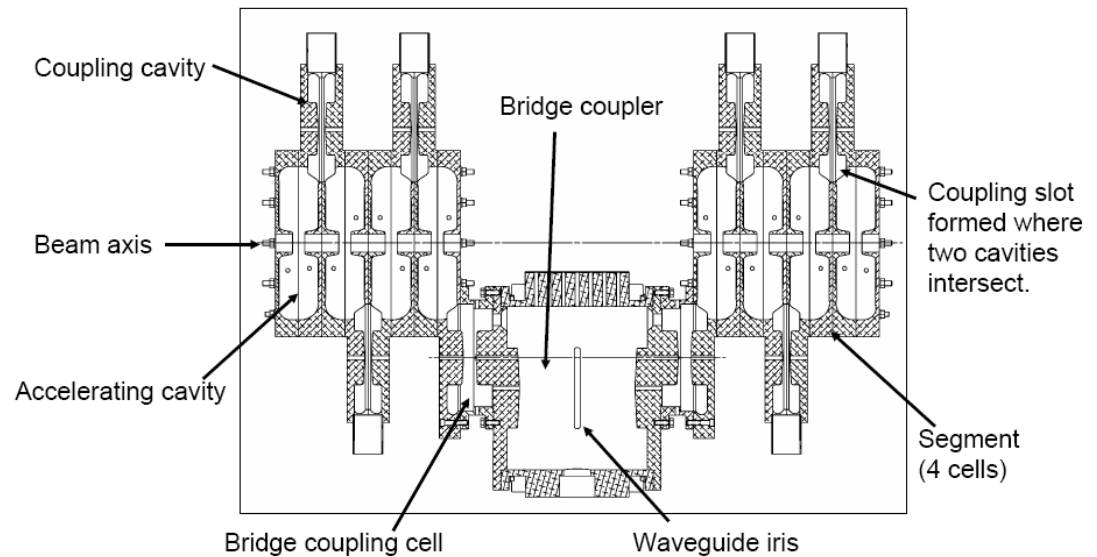
Années 60 : apparition des “CCL”

Plus efficaces que les DTLs aux hautes énergies (à partir de 100 MeV environ)

Succession de cavités indépendantes fonctionnant en mode $TM_{010-\pi}$, la puissance RF est distribuée grâce aux cavités de couplage

Ex: “SCL” (Side Coupled Linac) mis au point à Los Alamos (pour LAMPF)

1972 : LAMPF linac = CW 750 keV
+ DTL 100 MeV + SCL 800 MeV

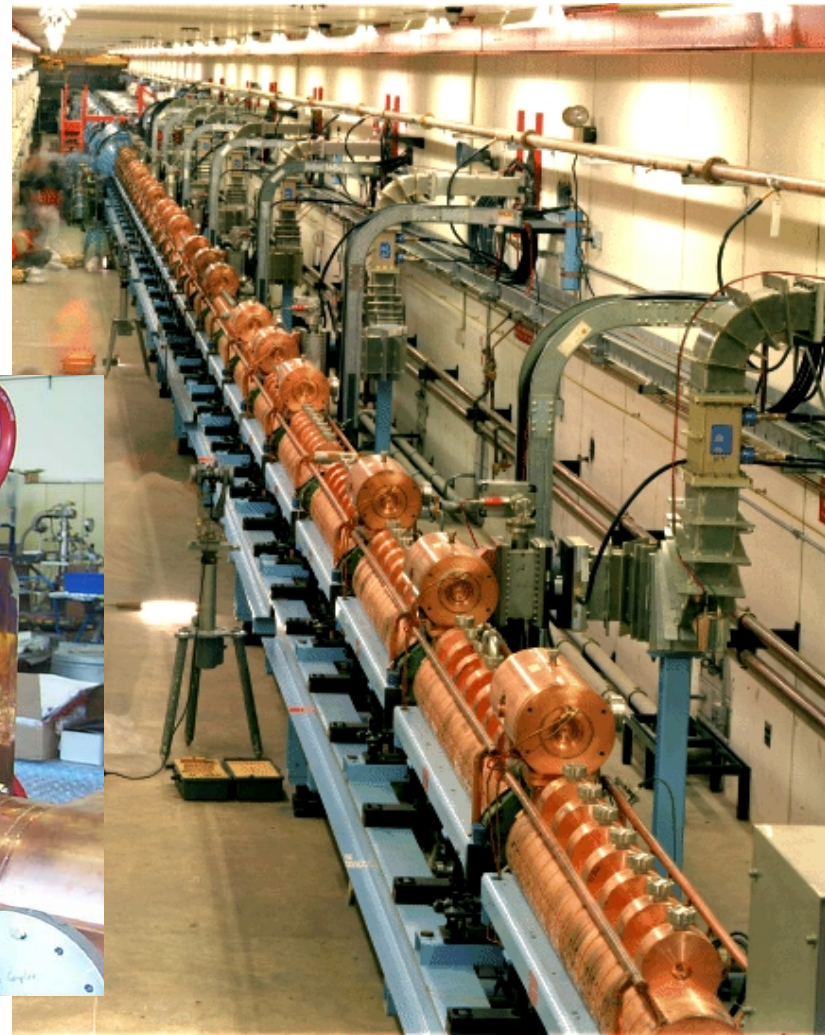
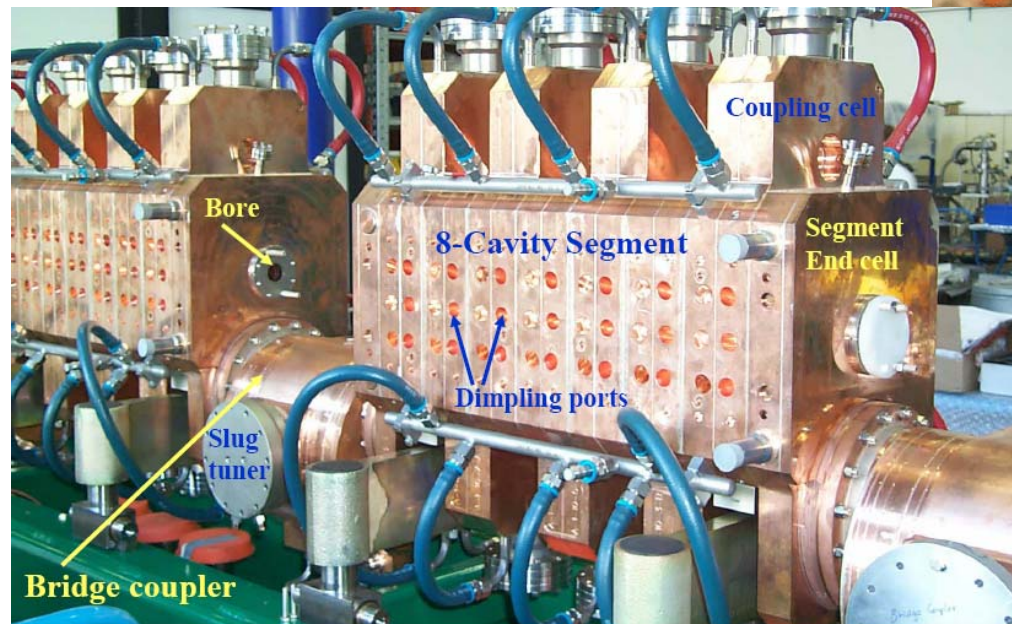


4.3. Le CCL « Coupled Cavity Linac » (2)

Exemples de “CCL”

Fermilab CCL :
p, 116- \rightarrow 400 MeV, 805 MHz

CCL de SNS :
H-, 87- \rightarrow 186 MeV, 805 MHz

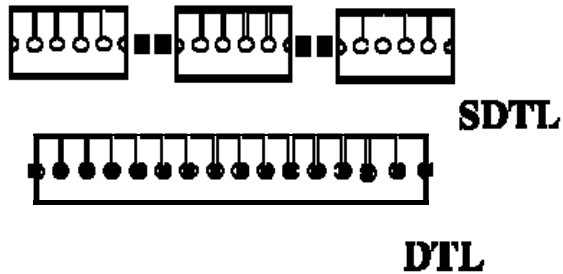


4.4. Structures dérivées du DTL & du CCL

S-DTL “Separated Drift Tube Linac”

DTL de type Alvarez avec tanks courts et quadrupôles déportés à l’extérieur

Gamme typique d’énergie : 20 – 200 MeV



J-Parc S-DTL :
p,50->190 MeV, 324 MHz

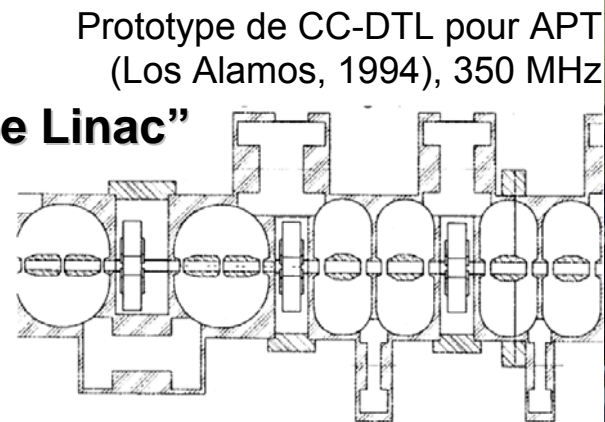


CC-DTL “Coupled Cavity Drift Tube Linac”

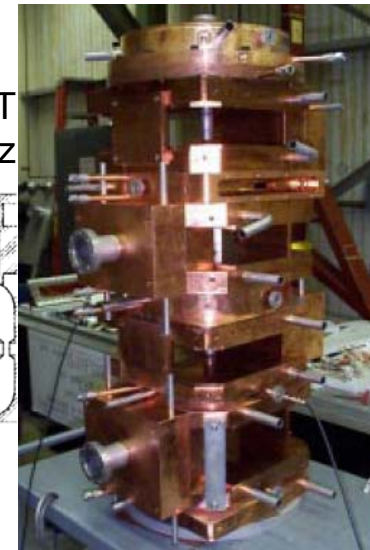
Combinaison S-DTL Alvarez + CCL

Très bonne impédance shunt,
mais très complexe à construire

Gamme typique d’énergie : 20 – 200 MeV



LANL-APT CCDTL (from 6.7 MeV)



4.5. Le RFQ « Radio-Frequency Quadrupole » (1)

1970 : invention du concept de RFQ par Kapchinskii & Teplyakov

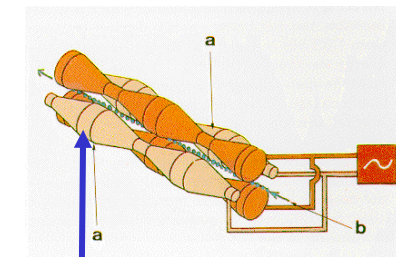
Structure résonante sur le mode TE_{210} -> champ électrique quadripolaire focalisant

Modulation des lames (« vanes ») / barres (« rods »)

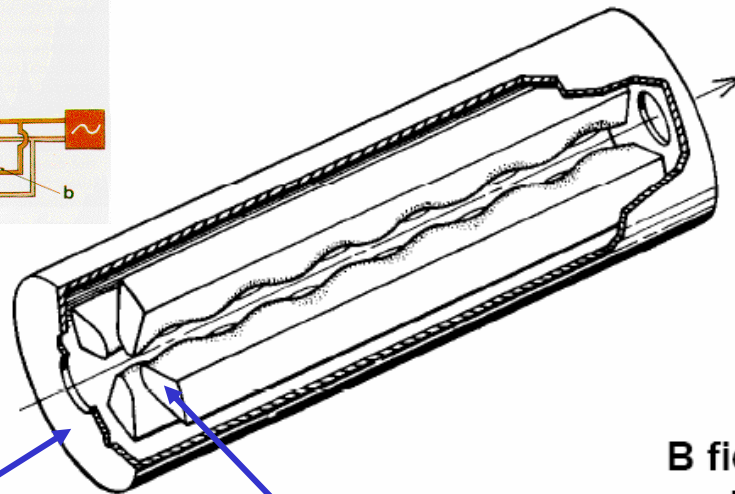
-> champ électrique longitudinal utile pour le groupement et l'accélération du faisceau

Utilisé pour les ions de basse énergie ($\beta < 0.1$)

Devenu incontournable pour l'accélération des ions de forte intensité

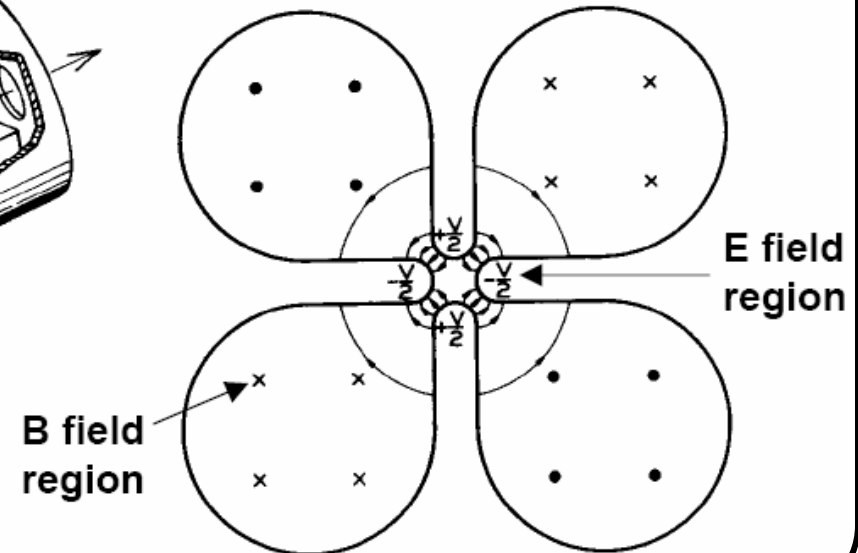
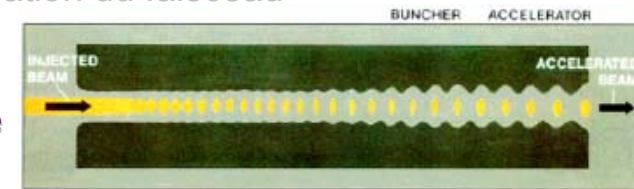


« rod »



Cavité resonante

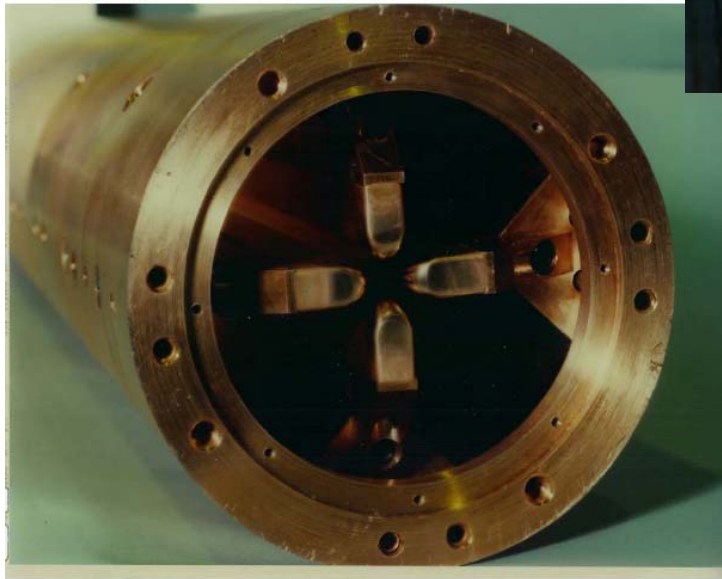
« vane »



4.5. Le RFQ « Radio-Frequency Quadrupole » (2)

Exemples de “4-vanes RFQ”

1^{er} RFQ (Los Alamos, 1980) :
p 30 mA, 100->640 keV, 425 MHz

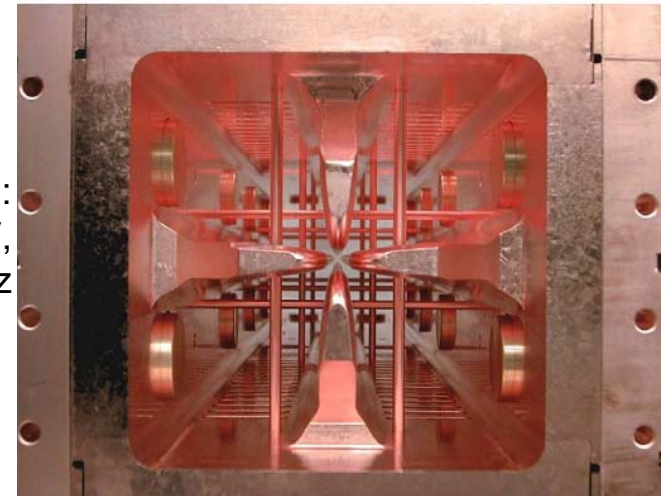


~15 cm

LEDA RFQ (Los Alamos, 1999) :
p 100 mA CW, 0.75->6.7 MeV, 350 MHz, 8m

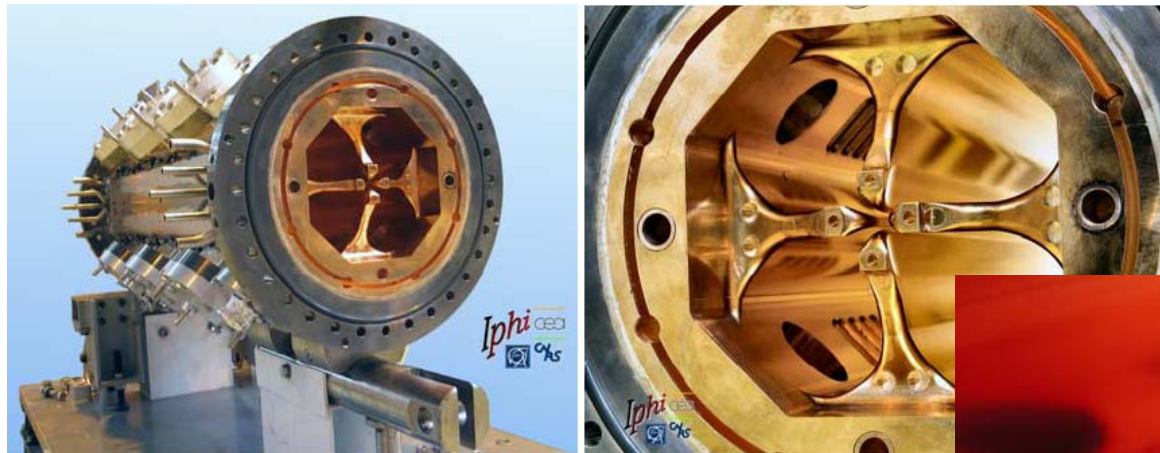


SNS RFQ :
H-, 0.65->2.5 MeV,
402.5 MHz



4.5. Le RFQ « Radio-Frequency Quadrupole » (3)

Exemples de “4-vanes RFQ” (suite)



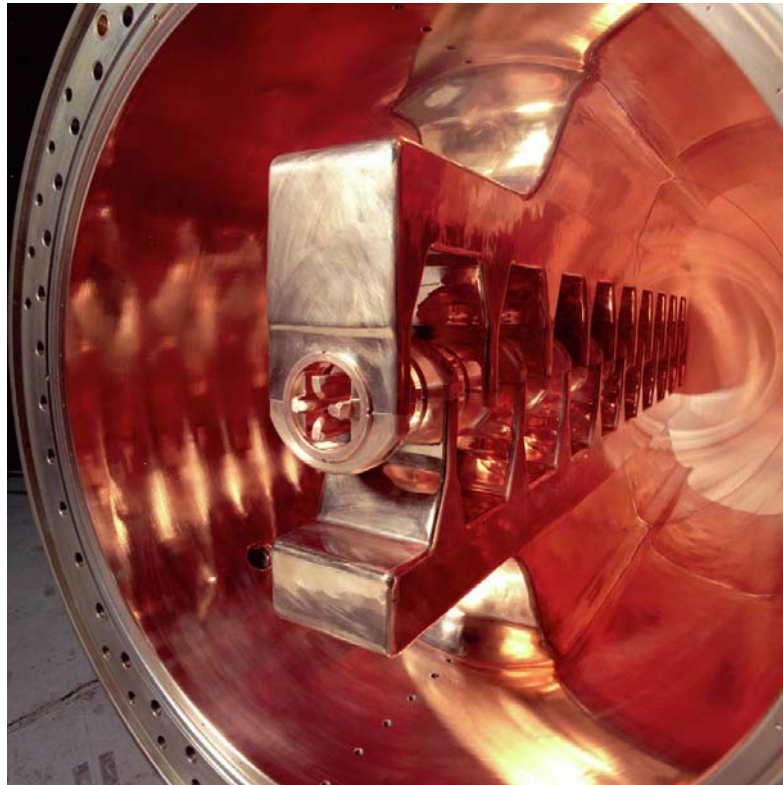
IPHI RFQ (Saclay) :
0.1- \rightarrow 3 MeV, 352 MHz



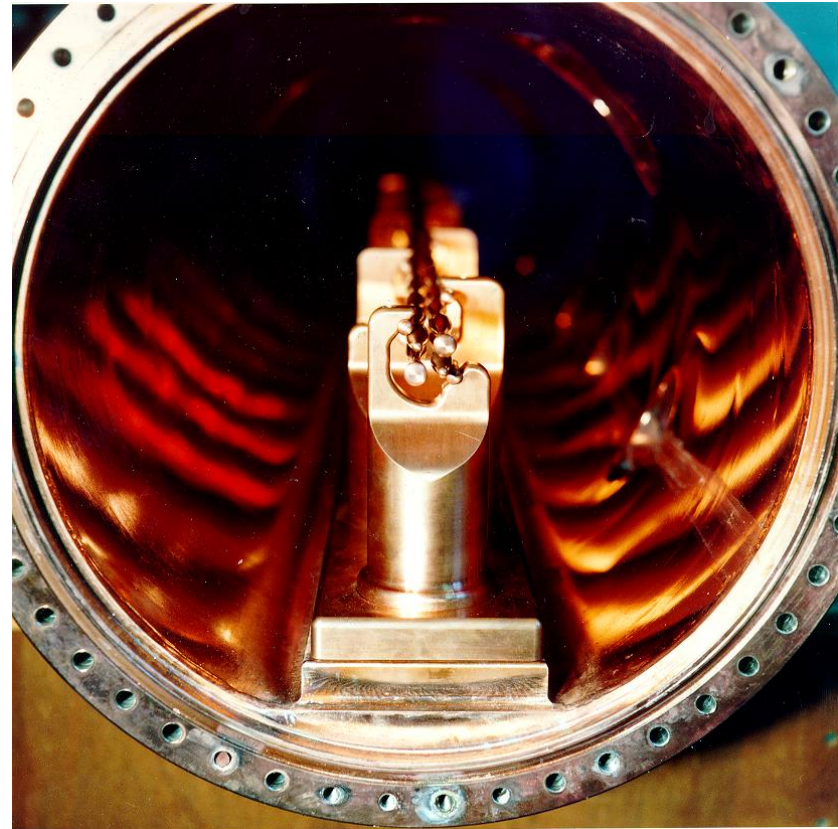
Puissances dans IPHI 5 MeV	6 mA operation (XADS)	100 mA operation (IPHI)
Dissipated power on copper	1200 kW	1200 kW
Beam loading power	30 kW	500 kW
Total RFQ power	1230 kW	1700 kW

4.5. Le RFQ « Radio-Frequency Quadrupole » (4)

Exemples de “4-rods RFQ”



Unilac RFQ (GSI) :
2- \rightarrow 120 keV/u, 36.1 MHz



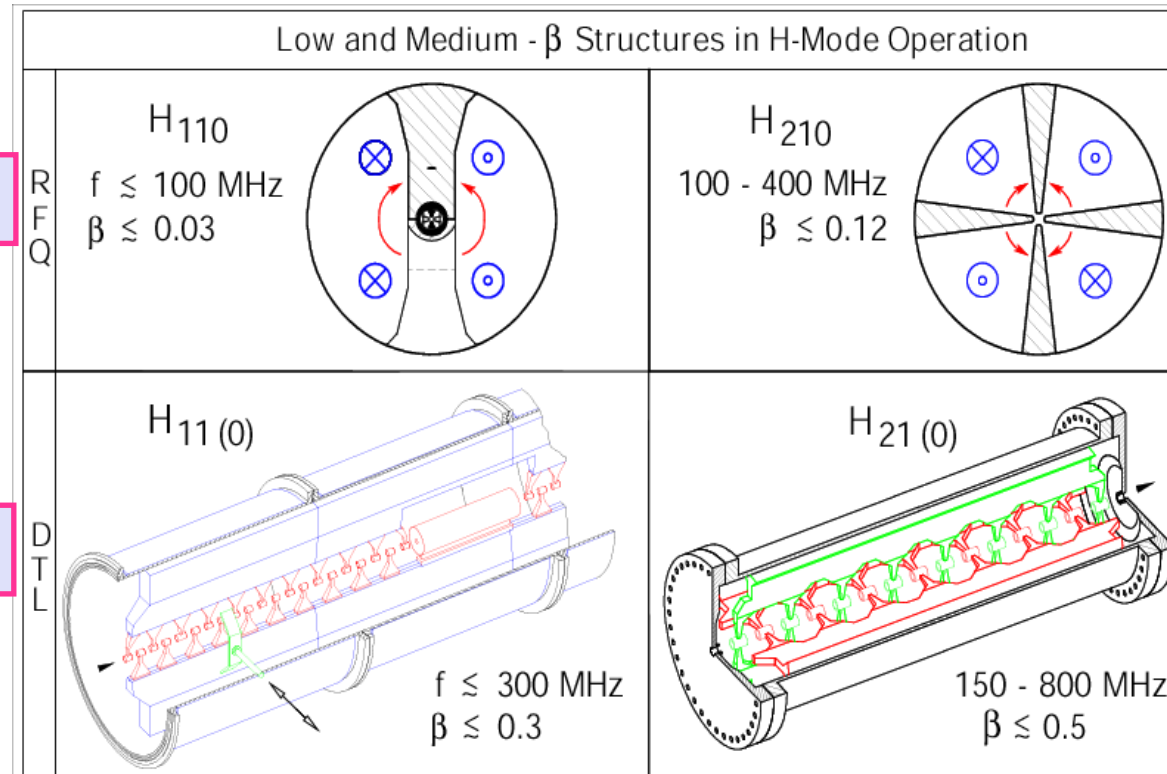
MSL RFQ (Suède) :
10- \rightarrow 300 keV/u, 108.5 MHz

4.6. Les structures de type H (1)

Structures de type H (ou TE "Transverse Electrique")

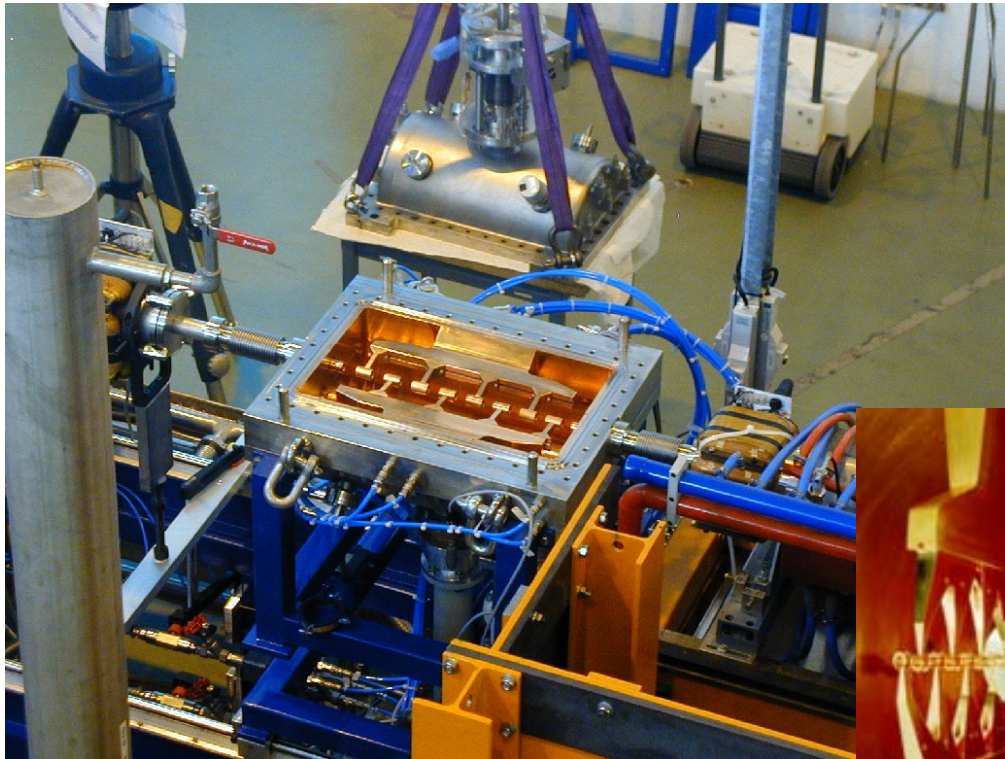
Inspirées du RFQ -> avantage = champ électrique focalisant

Développées notamment à IAP Frankfurt - Utilisables jusqu'à 50 / 100 MeV

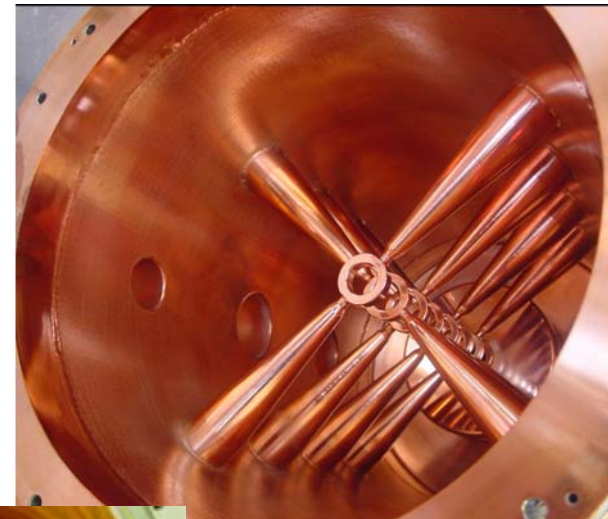


4.6. Les structures de type H (2)

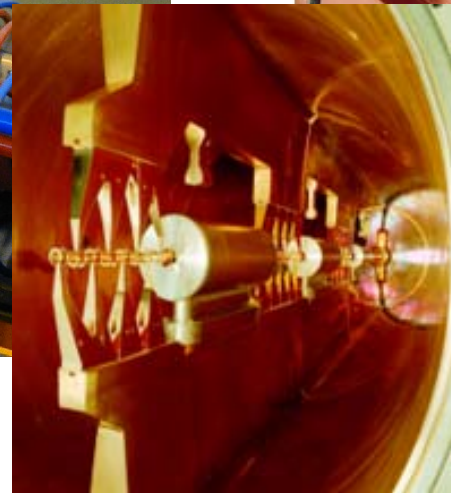
Exemples de "IH-DTL" & "CH-DTL"



Rex-Isolde IH (CERN),
202.6 MHz



CH-DTL prototype
(Frankfurt), 352 MHz

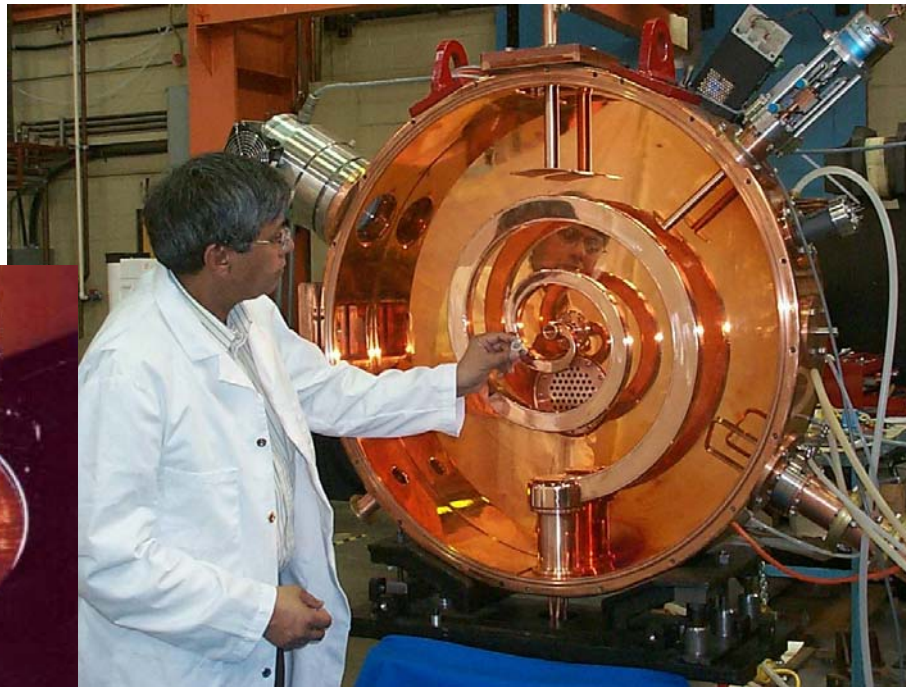


Unilac IH (GSI),
36.1 MHz

4.7. Autres structures pour ions lourds



Regroupeur type quart d'onde (GANIL), 24 – 60 MHz



Regroupeur type split-ring (TRIUMF), 35 MHz



Résonateur 7-gap (Rex-Isolde), 101.3 MHz

4.8. Structures à ondes progressives (1)

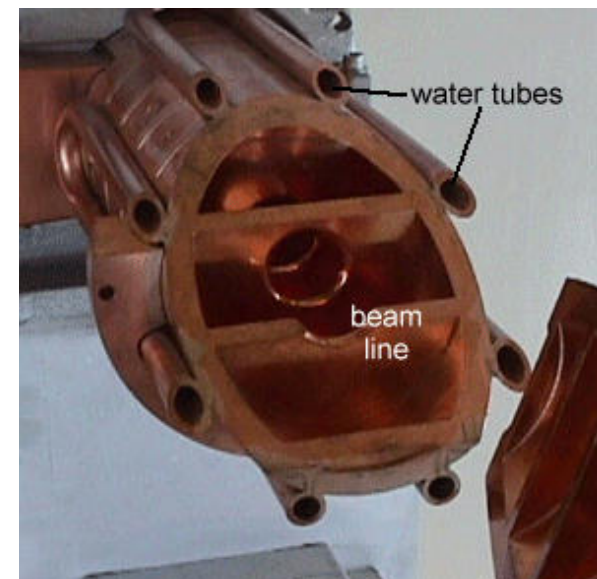
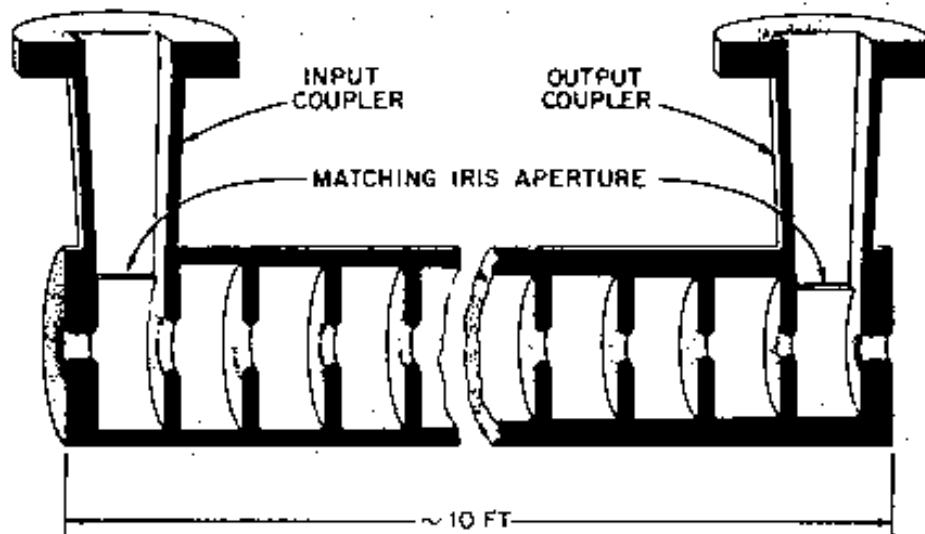
Années 50 : développement du "guide à iris"

Guide d'ondes (ondes progressives) dans lequel on intercale des « iris » pour ralentir la vitesse de phase de l'onde, et l'adapter à la vitesse du faisceau

Fonctionnement le plus souvent en mode $\pi/2$ ou $2\pi/3$

Utilisé pour les vitesses proches de $\beta=1$ (électrons)

Exemple: SLAC 50 GeV, 3 km, le plus long linac du monde (pour l'instant !)



Structure à iris SLAC, 2.86 GHz

4.8. Structures à ondes progressives (2)

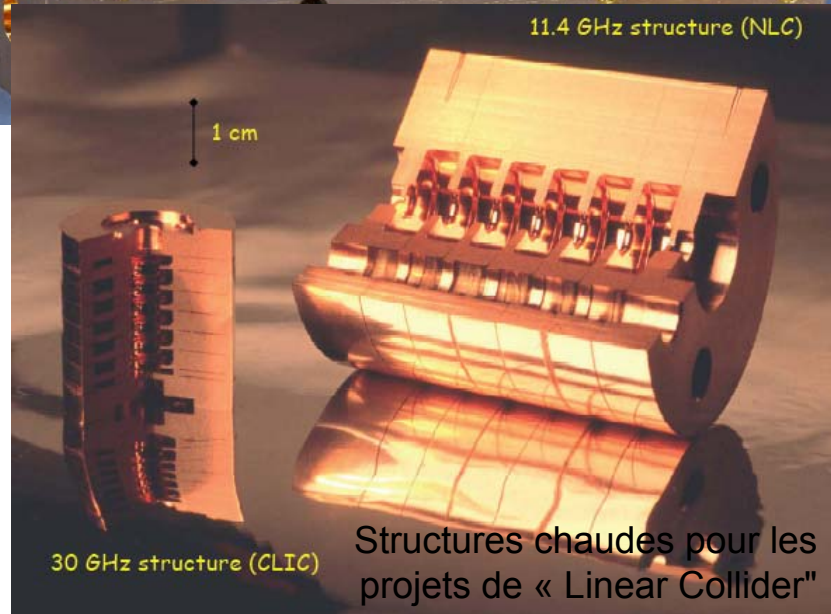
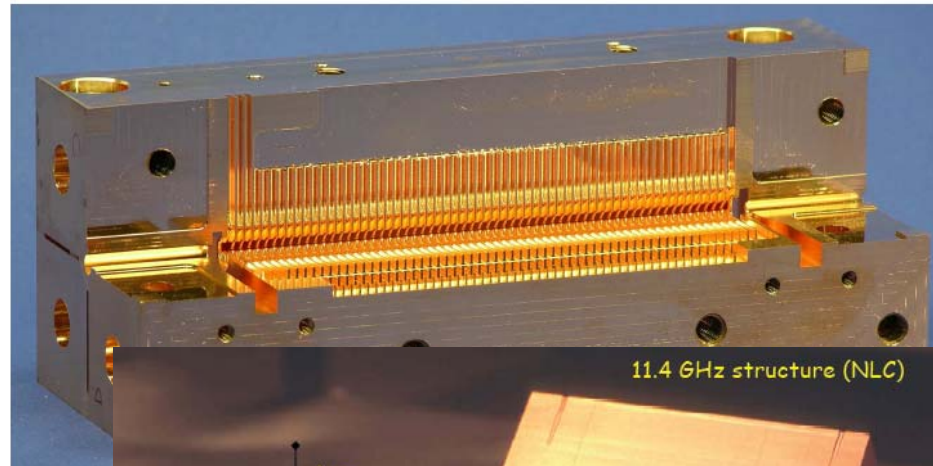
Exemples de structures à ondes progressives

Structure HDS pour CLIC (2004);
30 GHz, >150 MV/m !!!!! 🤖

LIL (injecteur LEP), réutilisé
pour ALTO à Orsay, 3 GHz



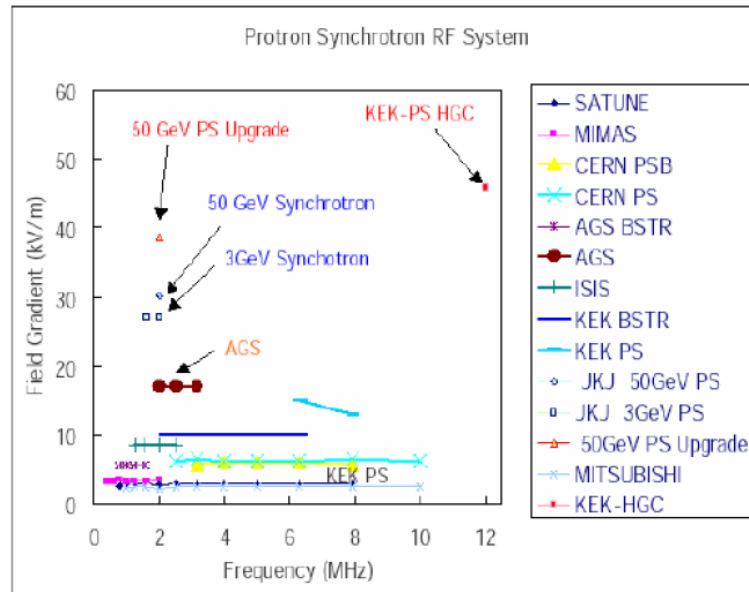
Injecteur ESRF, 200 MeV, 3 GHz



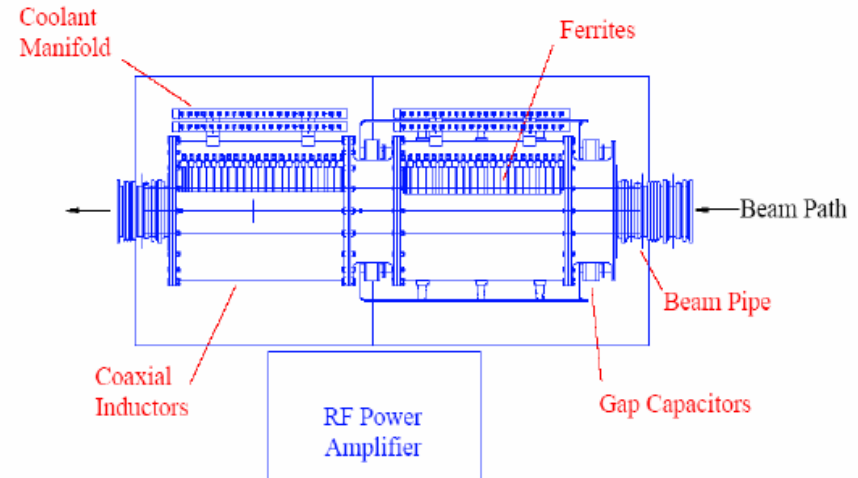
4.9. Cavités RF pour synchrotrons (1)

Cavités accélératrices à ferrite

-> Utilisées quand une variation de fréquence RF est nécessaire pour s'adapter au changement de vitesse du faisceau



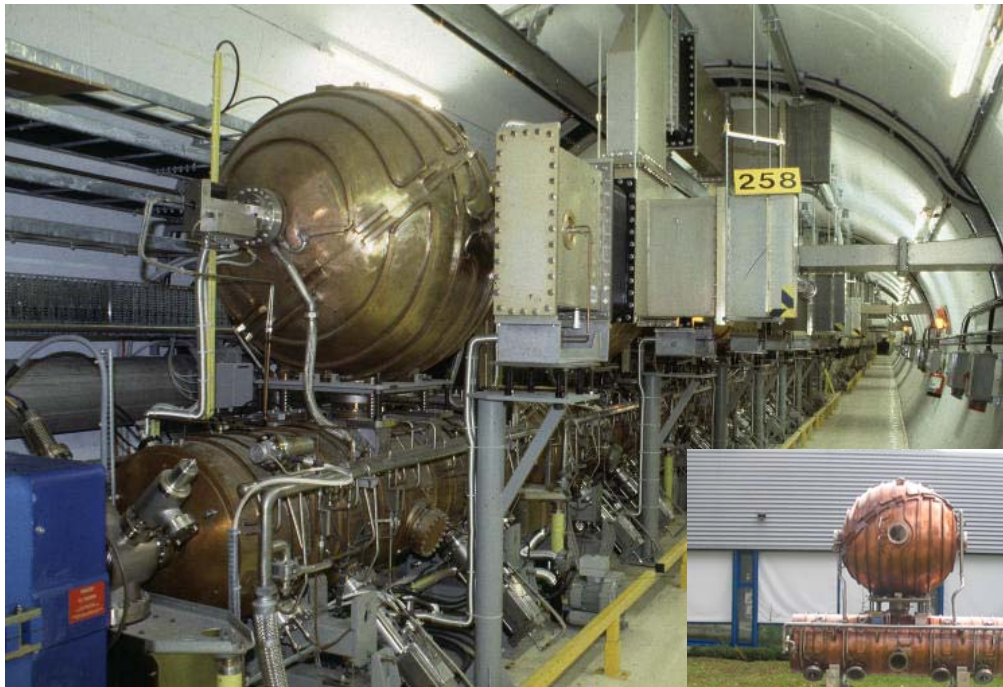
Cavité accélératrice à ferrite du RCS de SNS, 1.23 – 1.67 MHz



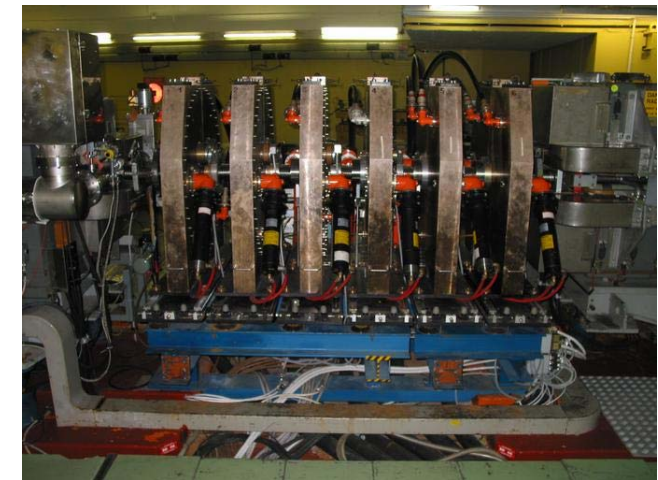
4.9. Cavités RF pour synchrotrons (2)

Vaste zoologie de cavités pour synchrotrons

- > Cavités dédiées à l'accélération (TW, SW), au regroupement, à diverses manipulations RF...
- > Attention à l'excitation des modes supérieurs parasites

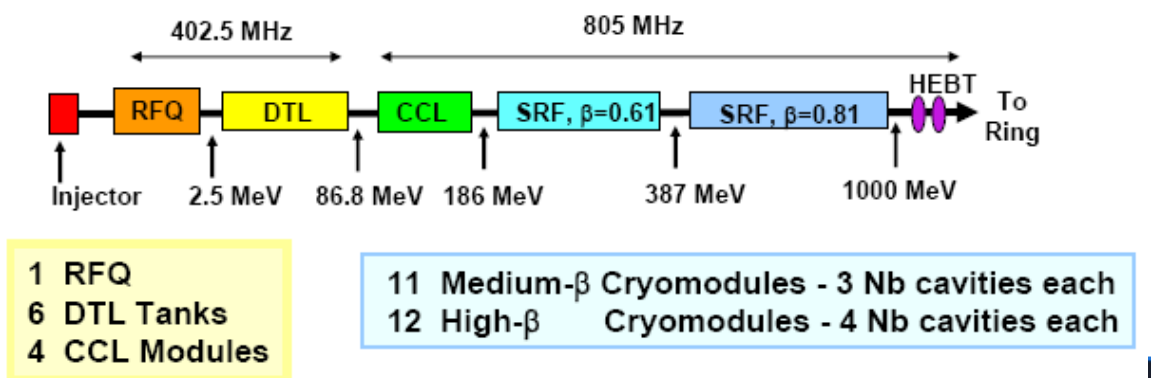


Cavités LEP1(CERN), 352 MHz
-> accélération



6 cavités 200 MHz au PS (CERN)
-> mise en forme longitudinale
avant extraction

5. Un exemple récent : le DTL de SNS

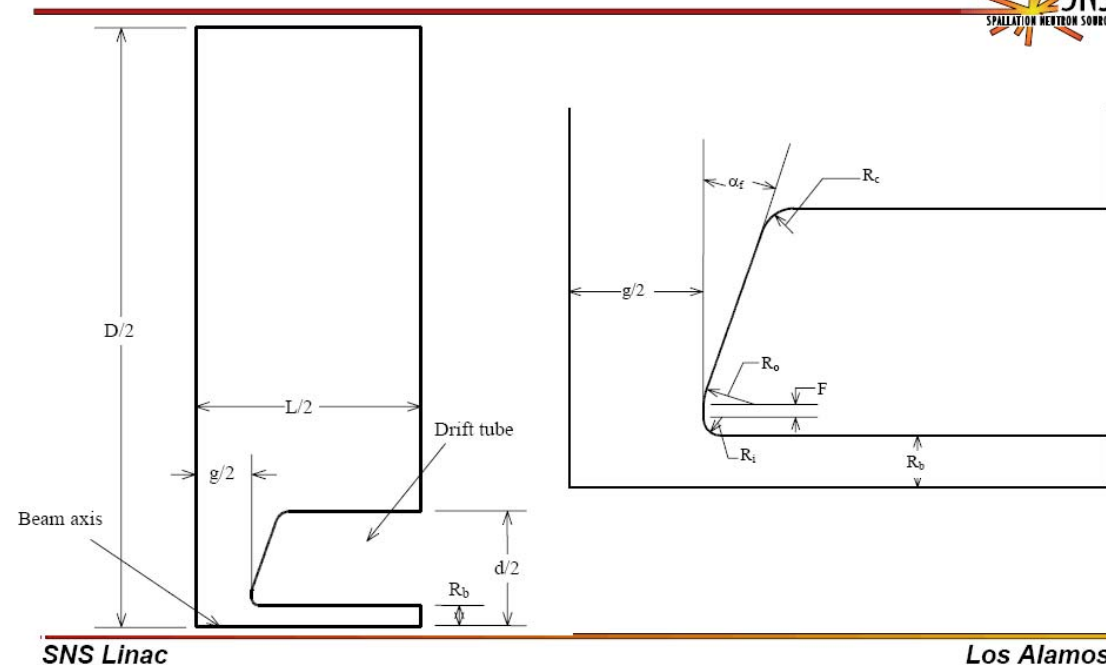


5.1. Optimisation des cellules DTL

Critères principaux d'optimisation

- Obtenir la bonne fréquence de résonance (402.5 MHz ici)
- Assurer le principe de synchronisme ($L_{\text{cell}} = \beta\lambda$)
- Limiter le champ électrique pic de surface (limite K_p)
- Minimiser l'impédance shunt (et donc la puissance dissipée)
- Garder assez de place pour placer les quadrupôles dans les tubes de glissement
- Assurer un diamètre suffisant pour le passage du faisceau

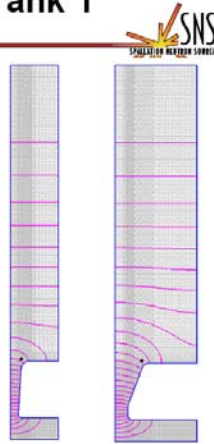
DTL Cell Geometry



5.2. Design obtenu

Properties of SNS DTL Tank 1

- Length = 4.1523 m, Diameter = 43.44 cm
- Drift-tube diameter = 9.0 cm
- 60 cells, 59 drift tubes, 19 post couplers
- Energy gain = 5.023 MeV
- Stored energy = 4.781 J
- Cavity power = 0.339 MW
- Beam power = 0.130 MW
- $ZT^2 = 28.22$ MW/m
- Unloaded Q (measured) = 39,148
- df/dT tank = +1.296 kHz/deg C
- df/dT drift tube = -8.681 kHz/deg C
- df/dT uniform T change = -7.385 kHz/deg C
- Eff. expansion coeff = 18.348×10^{-6} /deg C

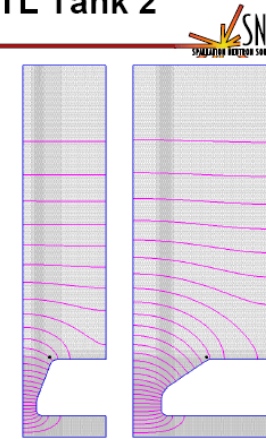


SNS Linac

Los Alamos

Properties of SNS DTL Tank 2

- Length = 6.0634 m, Diameter = 43.4 cm
- Drift-tube diameter = 9.0 cm
- 48 cells, 47 drift tubes, 23 post couplers
- Energy gain = 15.362 MeV
- Stored energy = 16.767 J
- Cavity power = 1.058 MW
- Beam power = 0.397 MW
- $ZT^2 = 45.25$ MW/m
- Unloaded Q (measured) = 42,790
- df/dT tank = +0.452 kHz/deg C
- df/dT drift tube = -7.443 kHz/deg C
- df/dT uniform T change = -6.991 kHz/deg C
- Eff. expansion coeff = 17.370×10^{-6} /deg C

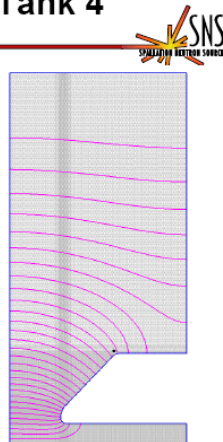


SNS Linac

Los Alamos

Properties of SNS DTL Tank 4

- Length = 6.4105 m, Diameter = 45.38 cm
- Drift-tube diameter = 11.0 cm
- 28 cells, 27 drift tubes, 27 post couplers
- Energy gain = 16.771 MeV
- Stored energy = 22.225 J
- Cavity power = 1.292 MW
- Beam power = 0.593 MW
- $ZT^2 = 41.91$ MW/m
- Unloaded Q (measured) = 48,102
- df/dT tank = -1.624 kHz/deg C
- df/dT drift tube = -4.413 kHz/deg C
- df/dT uniform T change = -6.038 kHz/deg C
- Eff. expansion coeff = 15.000×10^{-6} /deg C

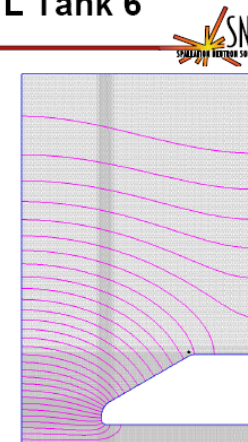


SNS Linac

Los Alamos

Properties of SNS DTL Tank 6

- Length = 6.3454 m, Diameter = 45.38 cm
- Drift-tube diameter = 11.0 cm
- 22 cells, 21 drift tubes, 21 post couplers
- Energy gain = 14.306 MeV
- Stored energy = 21.474 J
- Cavity power = 1.254 MW
- Beam power = 0.506 MW
- $ZT^2 = 39.03$ MW/m
- Unloaded Q (measured) = 47,600
- df/dT tank = -1.863 kHz/deg C
- df/dT drift tube = -4.068 kHz/deg C
- df/dT uniform T change = -5.931 kHz/deg C
- Eff. expansion coeff = 14.737×10^{-6} /deg C



SNS Linac

Los Alamos

5.3. Validation du design RF

Construction d'une maquette en aluminium & mesures HF



5.4. Fabrication d'un tank DTL

Fabrication de 3 sections en inox, cuivrage, et pré-assemblage du tank



5.5. Test de fuite

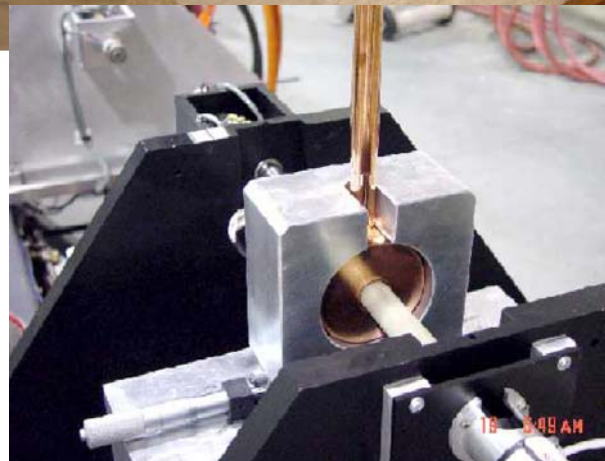
Vide visé
 $\Rightarrow < 2^E-7$ mbar



5.6. Installation du système de refroidissement



5.7. Préparation des « drift-tubes »



**Mise en place des quadrupôles
et mesures magnétiques**

5.8. Installation des « drift-tubes »



5.9. Alignement des « drift-tubes »



Utilisation d'un "laser-tracker"

5.10. Réglage du DTL à basse puissance

Adjustable Aluminum Slug Tuners and Post Couplers

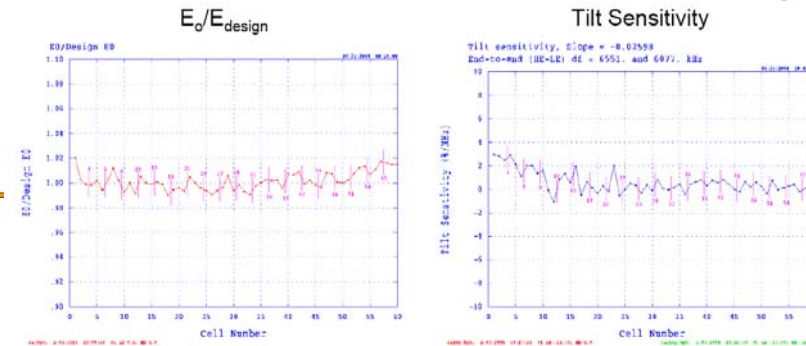


Bend in post couplers allows adjustment of field cell to cell by rotating shaft.



SNS Linac

DTL Tank 1

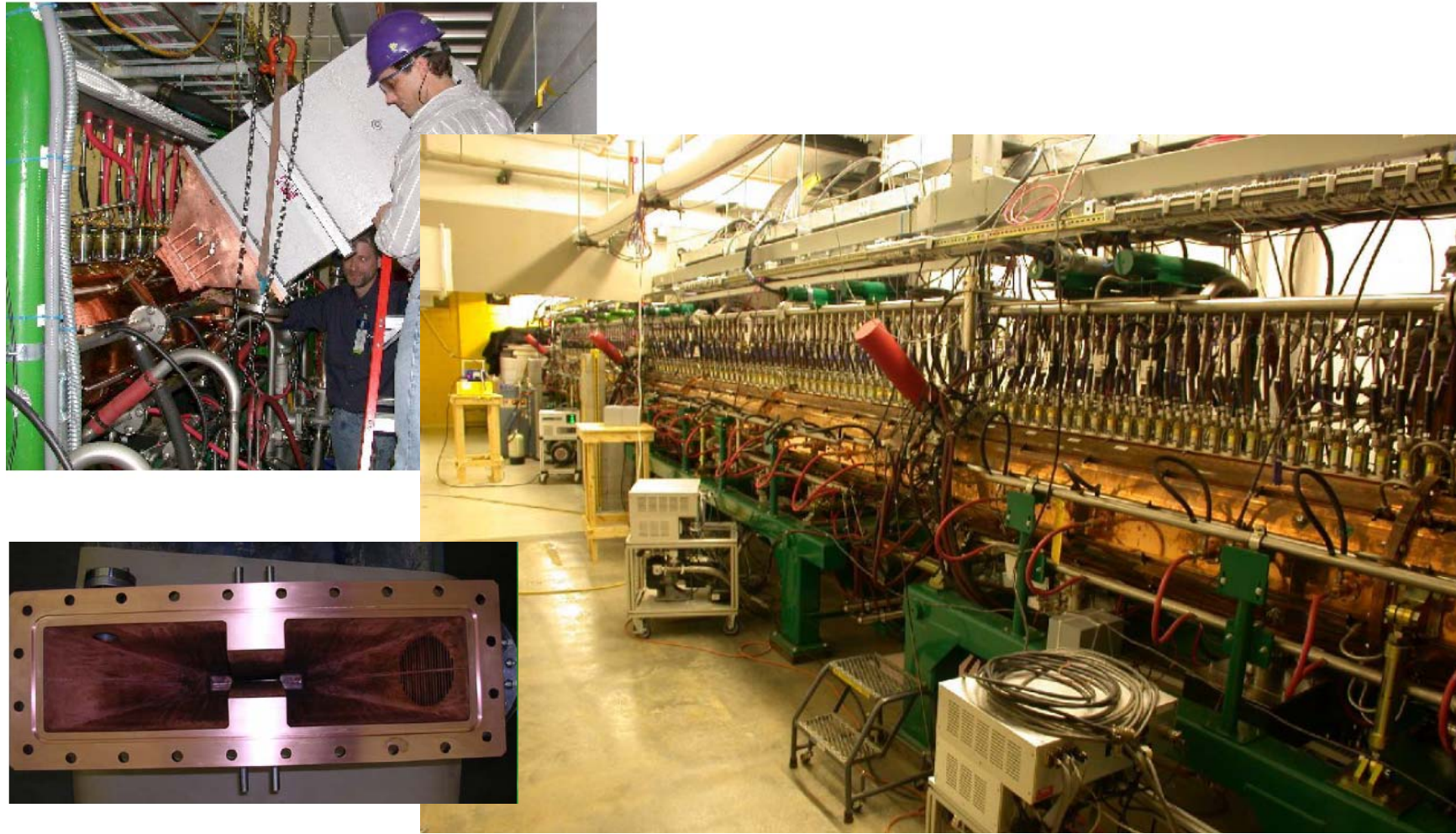


$Q_o=40,200$ $Q_L=12,100$ $f_o=402.5$ MHz at 24.8 C

SNS Linac

Los Alamos

5.11. Mise en place dans le tunnel et connexion à la RF



5.12. « Commissioning » du faisceau

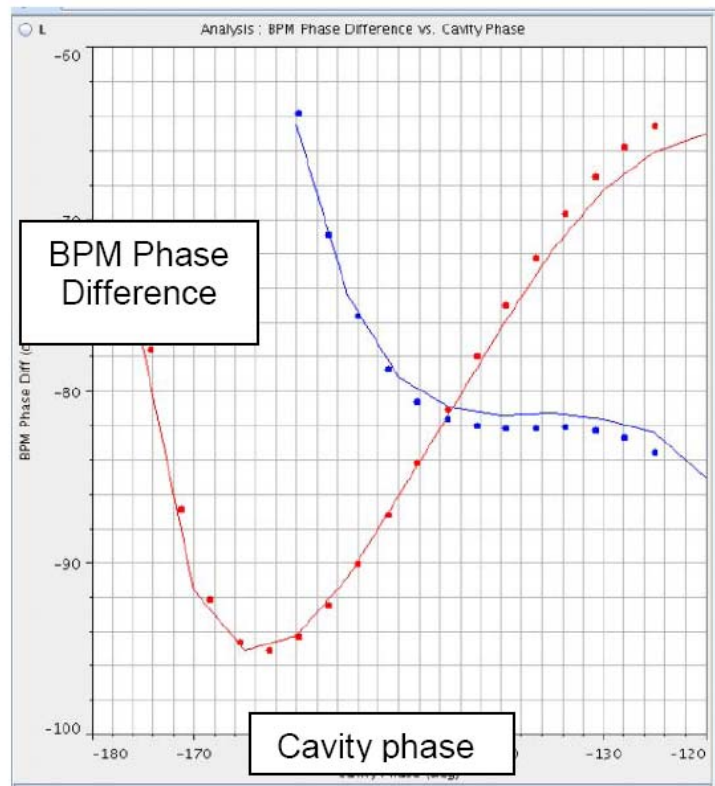
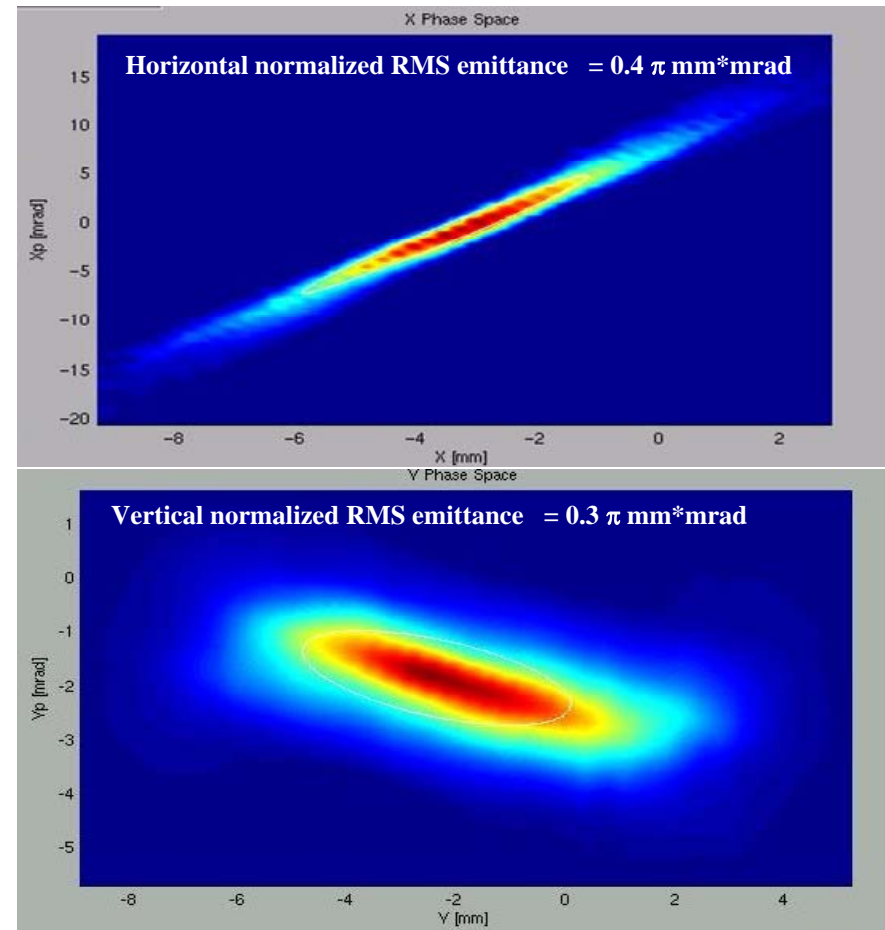


Fig. 1. Example signature phase scan method for setting a DTL linac cavity phase and amplitude. The difference in downstream arrival times (BPM phase difference) vs. cavity phase is shown for model (dots) and measurement (lines) for two cavity amplitudes.



6. La supraconductivité

6.1. Qu'est-ce qu'un supraconducteur ? (1)

→ Un **supraconducteur** (SC) est un matériau qui a la propriété de transporter un courant électrique sans aucune perte.

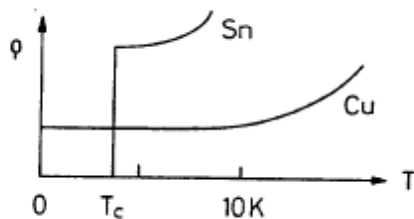
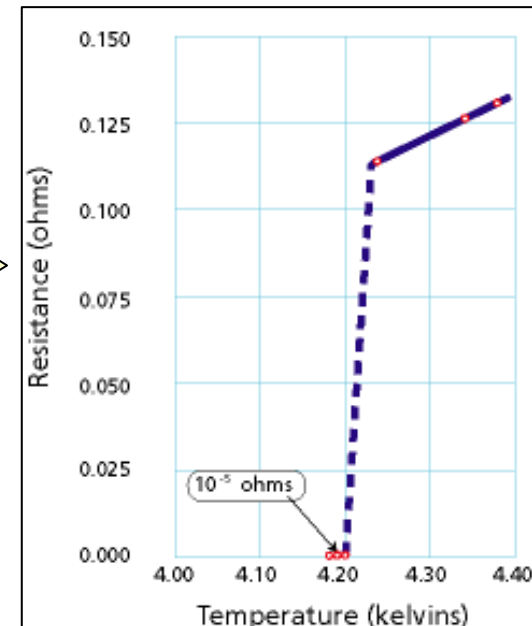
Il a une **résistivité strictement nulle** !!! ($\rho = 0$)

→ Le phénomène de supraconductivité a été observé pour la première fois en 1911 par **Kamerlingh Onnes** en mesurant la résistance d'un échantillon de mercure dans l'hélium liquide

→ La **supraconductivité** est un phénomène observé dans plusieurs métaux (hors bons conducteurs), alliages, céramiques...

Il n'apparaît qu'**en dessous d'une certaine température**, appelée température critique (T_c)

La mesure effectuée par K. Onnes en 1911 sur un échantillon de mercure



Matériau	Ti	Al	Sn	Hg	Pb	Nb	Nb ₃ Sn	YBa ₂ Cu ₃ O ₇
T_c [K]	0,4	1,14	3,72	4,15	7,9	9,2	18	92

Hélium liquide → 4,2 K

Azote liquide → 77 K

6.1. Qu'est-ce qu'un supraconducteur ? (2)

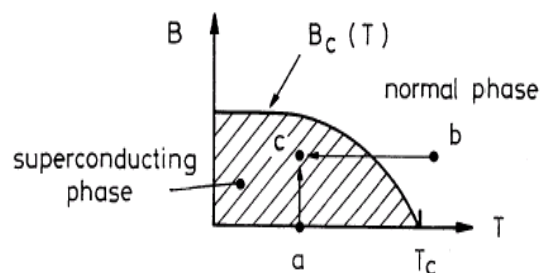
→ Un supraconducteur a également la propriété d'**expulser totalement le champ magnétique**.

C'est l'**effet Meissner** (découvert en 1933), qui est à l'origine de l'expérience de l'aimant flottant.

→ La supraconductivité est **détruite** par un trop fort champ magnétique (ou un trop fort courant),

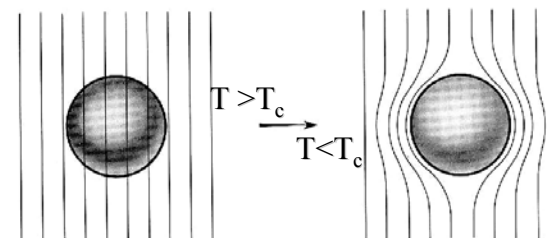
i.e. pour $B > B_c$ (champ magnétique critique).

SC de type I	Ti	Al	Hg	Sn	Pb
B_c [mT] à 0 K	10	10,5	41,2	30,9	80,3



La supraconductivité n'existe que dans un domaine limité à la fois par la température T et le champ magnétique B

L'effet Meissner

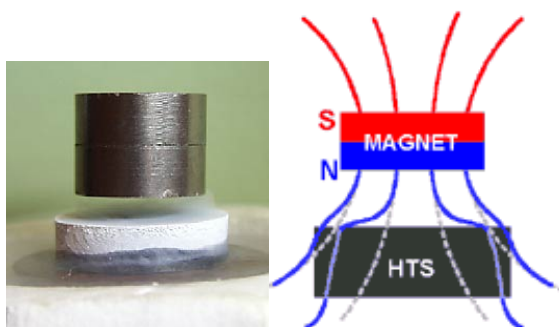


L'expérience de l'aimant flottant : un aimant entre en lévitation au-dessus d'une pastille d'YBaCuO

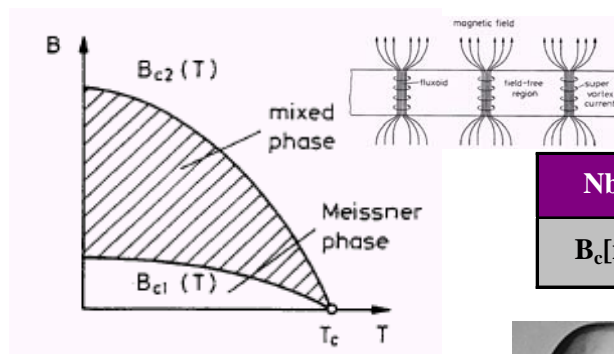


6.1. Qu'est-ce qu'un supraconducteur ? (3)

→ Les **supraconducteurs de type II** passent par un état intermédiaire dit « **état mixte** », où l'effet Meissner n'est que partiel, et où le matériau est pénétré par des lignes de champ appelés « **vortex** »



L'expérience de l'aimant flottant



Nb (type II)	B_{c1}	B_{c2}
B_c [mT] à 0 K	~170	~240



Bardeen, Cooper & Schrieffer

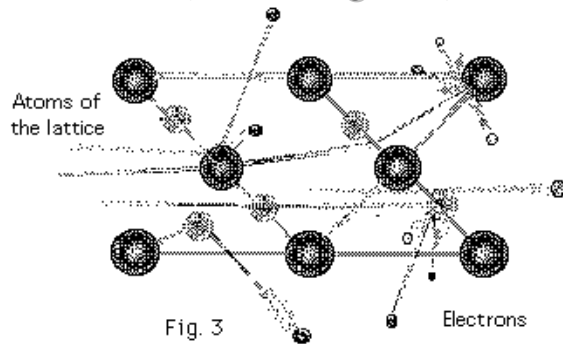
→ *Quelques théories expliquant la supraconductivité:*

- théorie de London (1934) expliquant l'effet Meissner
- théorie thermodynamique de Ginzburg-Landau (1952) - prix Nobel 2003
- théorie quantique BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer, 1957) - prix Nobel 1972

+ découverte des « supra à haut T_c » (A. Müller, G. Bednorz, 1986) - prix Nobel 1987

6.2. Transport d'un courant : origines microscopiques

→ Dans un métal normal, le transport du courant électrique est assuré par un mouvement d'électrons, qui induit une dissipation $P = R \times I^2$, où I est l'intensité du courant, $R = \rho \times L/S$ la résistance du conducteur, L sa longueur, S sa section et ρ sa résistivité.

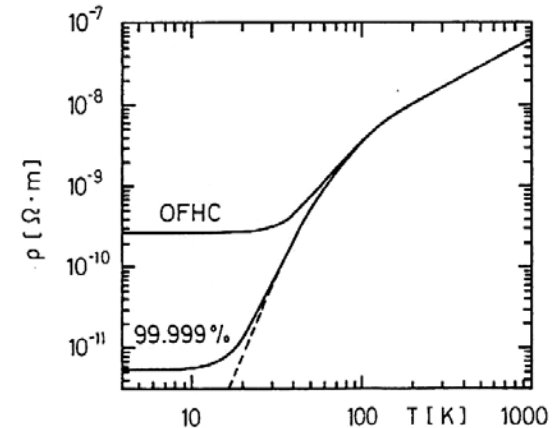


Dans un métal normal, la résistivité est due aux chocs des électrons :

- avec les atomes du réseau cristallin en mouvement (à $T > 0K$)
- avec les impuretés et les défauts (effet prédominant à très basse température)

→ Dans un supra, le transport du courant électrique est assuré sans aucune dissipation par des « électrons supraconducteurs » : dès que $T < T_c$, la résistivité s'annule ($\rho = 0$).

Dans un supraconducteur, les électrons supraconducteurs s'apparient en « paires de Cooper », objets quantiques qui ont la propriété de n'avoir collectivement aucune interaction avec les atomes du métal (théorie quantique BCS)



Résistivité du cuivre en fonction de la température pour un cuivre classique (OFHC) et un cuivre ultra-pur.

La mesure de la résistivité à très basse température permet ainsi de quantifier la pureté d'un métal.

$$RRR = \rho(T=300K) / \rho(T \sim 0K)$$

⇒ Plus le RRR est élevé, plus le métal est pur

6.3. Comportement des métaux en régime RF

→ Quand on applique un **champ électromagnétique RF** près d'un métal, les champs pénètrent le matériau sur une fine couche de surface, **induisant des courants, et donc des dissipations P_{RF}**

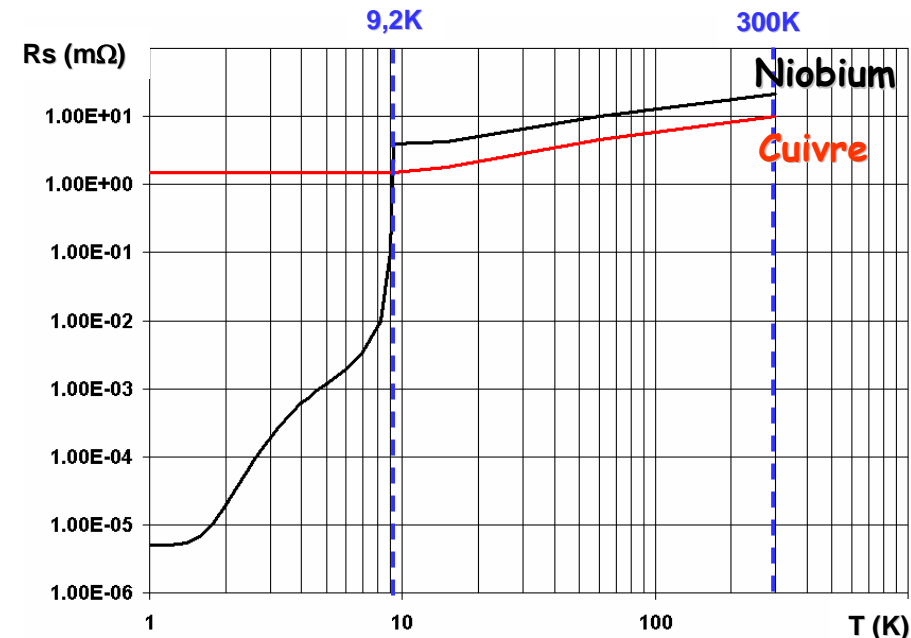
$$P_{RF} = 1/2 R_S H_S^2 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} R_S : \text{résistance de surface du matériau} \\ H_S : \text{champ magnétique à la surface du matériau} \end{array}$$

→ Dans un métal normal, R_S est de l'ordre de quelques m Ω , et $R_S \propto (\rho f)^{1/2}$

→ Dans un supra, contre toute attente, la **résistance de surface n'est pas strictement nulle** :

il y a donc des dissipations RF, mais elles restent faibles (résistances de l'ordre de quelques n Ω à très basse température).

L'existence de ces dissipations peut s'expliquer par le modèle à 2 fluides. En réalité, tous les électrons ne sont pas appariés en paires de Cooper: quelques électrons normaux subsistent, qui induisent des dissipations en régime RF (ils sont par contre « court-circuités » par le courant des électrons supra en régime continu)



Résistance de surface du niobium et du cuivre en fonction de la température (à $f=1,5$ GHz)

6.4. Application à la cavité supraconductrice

Choix du matériau → le niobium = compromis entre :

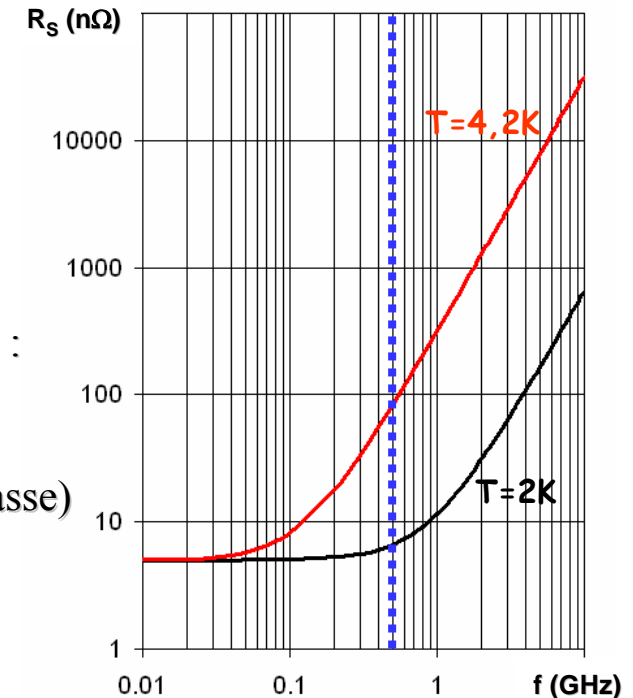
- Température et champ magnétique critiques assez élevés
- Résistance de surface faible (pour minimiser les pertes RF)
- Bon comportement mécanique (métal « usinable ») et thermique

Choix de la température de fonctionnement → compromis entre :

- une faible résistance de surface (i.e. T pas trop élevée)
- un système de refroidissement pas trop coûteux (i.e. T pas trop basse)

En général : $\left\{ \begin{array}{l} \text{si } f < 500 \text{ MHz} \rightarrow T \sim 4,2 \text{ K (He liquide)} \\ \text{si } f > 500 \text{ MHz} \rightarrow T \sim 2 \text{ K (He superfluide)} \end{array} \right.$

Résistance de surface du niobium en fonction de la fréquence



Caractéristiques du niobium :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_c = 9,2 \text{ K} \\ B_{c_{RF}} \sim 220 \text{ mT @ 2K, } \sim 190 \text{ mT @ 4.2 K} \\ R_s(\Omega) \approx 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T} \left(\frac{f(\text{GHz})}{1,5} \right)^2 e^{-17,67/T} + R_{res} \end{array} \right.$$

7. Les cavités supraconductrices: intérêts et limitations

7.1. Pourquoi utiliser des « cavités froides » ?

AVANTAGE INTRINSEQUE des cavités supraconductrices :

Dissipations quasi-négligeables sur les parois de la cavité (quelques Watts)

⇒ ~100% puissance RF injectée est fournie au faisceau : **EXCELLENT RENDEMENT RF !!!**

- ➡ **Gain en coût de fonctionnement** par rapport à une solution RF CW utilisant des cavités chaudes qui dissipent beaucoup de puissance ($\sim 10^5$ fois plus)
- ➡ **Possibilité d'accélérer des faisceaux continus ou à fort cycle utile (>1%) tout en assurant des champs accélérateurs très élevés**, ce qui n'est pas envisageable avec des cavités chaudes ⇒ accélérateurs plus courts
- ➡ Possibilité de relâcher les contraintes sur le design RF de la cavité, et du coup, de pouvoir choisir **des ouvertures plus larges pour les tubes faisceau** ⇒ moins de risque d'activation des structures = gain en sécurité
- ➡ Fort potentiel en terme de **fiabilité et de flexibilité**
- ➡ Les structures doivent être refroidies à l'hélium liquide ⇒ nécessité d'un **système de refroidissement cryogénique** au rendement très faible (qqes 10^{-3})
- ➡ **Conditions de préparation très complexes** (ultra-propreté...), et peu/pas de pertes de faisceau autorisées

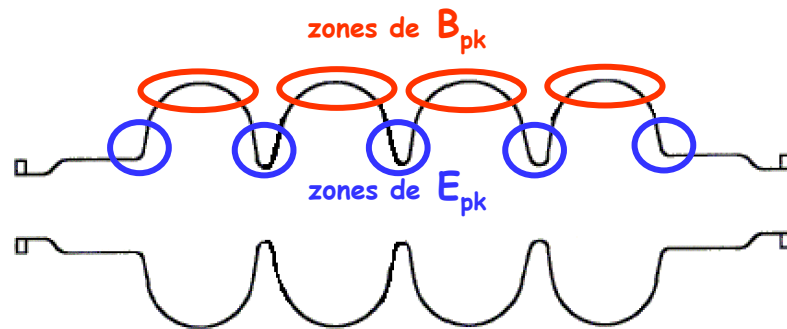


7.2. Performances d'une cavité idéale (1)

→ Quel champ accélérateur peut-on espérer atteindre ?

Quand on crée un champ accélérateur E_{acc} dans la cavité, on crée également des champs sur la surface interne de la cavité, qui prennent des valeurs maximales notées B_{pk} et E_{pk}

Pour que le niobium reste dans l'état supraconducteur, il faut que $B_{pk} < B_{cRF}$, sinon la cavité perd son caractère supraconducteur, et c'est le « quench »



Emplacement des zones où les champs de surface sont maximaux dans une cavité elliptique

Le rapport B_{pk}/E_{acc} (ainsi que le rapport E_{pk}/E_{acc}) dépend principalement de la forme de la cavité

Pour les cavités elliptiques $\beta = 1$ bien conçues, il vaut

$$B_{pk}/E_{acc} \approx 4 \text{ mT} / (\text{MV/m})$$

$$\Rightarrow \text{à } T = 2 \text{ K}, E_{accMAX} = 220 \text{ mT} / 4 = \underline{\underline{55 \text{ MV/m}}}$$

Ce champ maximal théorique diminue avec le β de la cavité :

- pour les cavités $\beta = 0.65$, $B_{pk}/E_{acc} \approx 5 \text{ mT}/(\text{MV/m})$ i.e.

$$E_{accMAX} = \underline{\underline{44 \text{ MV/m} @ 2K}}$$

- pour les cavités $\beta = 0.5$, $B_{pk}/E_{acc} \approx 6 \text{ mT}/(\text{MV/m})$ i.e.

$$E_{accMAX} = \underline{\underline{37 \text{ MV/m} @ 2K}}$$

7.2. Performances d'une cavité idéale (2)

→ Quelles pertes RF peut-on obtenir au minimum dans la cavité ?

Les pertes RF dans la cavité s'expriment comme :

$$P_{RF} = \frac{1}{2} \iint R_S \cdot H_S^2 \cdot dS = \frac{(E_{acc} L_{acc})^2}{(r/Q) Q_0}$$

où le « r/Q » est un paramètre géométrique de la cavité, proportionnel à son nombre de cellules

Ces pertes sont :

- proportionnelles au carré du champ accélérateur E_{acc} utilisé
- proportionnelles au nombre de cellules de la cavité
- inversement proportionnelles au facteur de qualité de la cavité Q_0 , i.e. proportionnelles à la résistance de surface R_S du niobium utilisé ($Q_0 = G / R_S$ avec G : facteur géométrique)

Pour une cavité et un champ accélérateur donnés, c'est principalement **le facteur de qualité Q_0 que l'on cherche à maximiser**

Le cas idéal : à $f=700$ MHz et $T=2$ K, un niobium idéal ($R_{res}=0$) a une résistance de surface $R_S \approx 3,2$ n Ω

Pour une cavité elliptique $\beta = 0,65$ ($G \approx 200$ Ω) $\Rightarrow Q_{0idéal} \approx \underline{6 \times 10^{10}}$

\Rightarrow pour une cavité 5 cellules ($r/Q \approx 150$ Ω , $L_{acc}=5 \times 14$ cm), cela donne $\underline{P_{RF} \approx 2,7$ W} à $E_{acc}=10$ MV/m

7.3. Phénomènes limitatifs (1)

1. **La transition de l'état supra à l'état normal intervient toujours avant d'arriver à $B_{c,RF}$, i.e. à E_{accMAX} : c'est le « quench thermique ».** Il est provoqué par la présence d'un **défaut non-supra à la surface du niobium**, qui induit par effet Joule une élévation locale de température pouvant dépasser T_c , et provoquer un quench de la cavité.

Il faut donc : - minimiser le nombre et la taille des défauts
- améliorer la stabilité thermique de la cavité

Solutions pour repousser le champ du quench

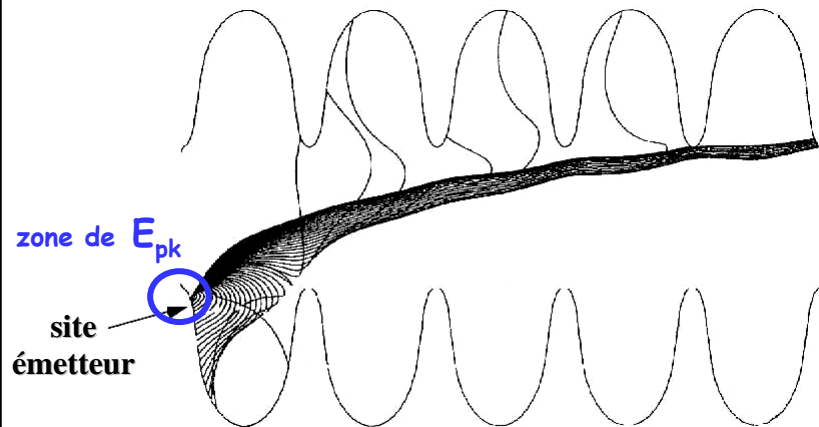
- Choix d'un niobium de grande pureté (haut RRR)
- Parfaire l'état de surface (polissage chimique)
- + *bien choisir la fréquence + éventuel recuit de purification à 1200°C + technologie Nb/Cu*

2. La résistance de surface réelle est toujours un peu plus grande que la résistance de surface idéale : $R_S = R_{S \text{ idéale}} + R_{S \text{ résiduelle}}$. Cette résistance résiduelle peut être minimisée entre 1 nΩ et 10 nΩ.

Origine du phénomène	Phénomènes pouvant induire une résistance résiduelle	Solutions pour limiter R_{res} i.e. les pertes RF
Présence d'hydrogène dans le niobium	« Effet 100K » : précipitation d'hydrures lors de la mise en froid	Recuit de la cavité à 800°C pour dégazer l'hydrogène
Présence de champ magnétique extérieur (champ terrestre...)	Ce champ résiduel est piégé lors de la mise en froid	Blindage magnétique du cryostat
Aspect structurel du matériau	Présence de défauts locaux (fissures, porosités, impuretés) ou d'imperfections structurales	Minimiser le nombre et la taille des défauts : utiliser un niobium de grande pureté (haut RRR) + supprimer la couche de surface abîmée (chimie)
Absence de propreté de surface	Présence de poussières dans la cavité...	Préparation de la cavité en salle blanche

7.3. Phénomènes limitatifs (2)

3. Emission électronique « de champ » : dans les zones de fort champ électrique (E_{pk}), la surface interne de la cavité peut émettre des électrons, qui sont alors accélérés (en consommant de la puissance RF) pour finalement percuter les parois (en augmentant le risque de quench thermique).



Les sites émetteurs sont en général des défauts de surface ponctuels (poussières métalliques).

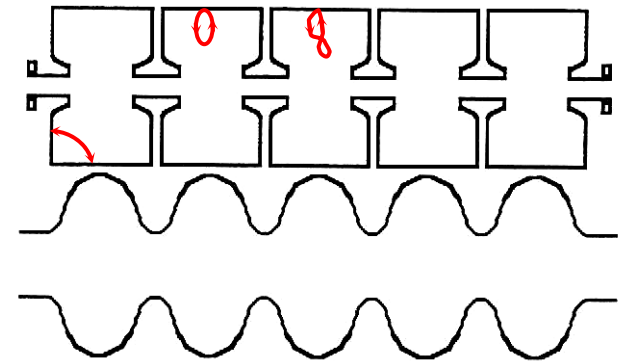
Solutions pour limiter l'émission de champ

- Parfaire l'état de surface (polissage chimique)
 - Rinçage haute pression à l'eau ultra-pure
 - Montage de la cavité en salle blanche
- ⇒ Avec une bonne préparation, l'émission électronique de champ n'apparaît qu'à partir de $E_{pk}=30$ à 50 MV/m
(i.e. E_{acc} entre 15 à 25 MV/m dans une cavité $\beta=1$ où $E_{pk}/E_{acc}\sim 2$)

4. Emission électronique « résonante » (multipacting) : dans certaines conditions de résonance, des électrons de faible énergie (qqes 100 eV) peuvent absorber la totalité de la puissance RF disponible, d'où impossibilité d'augmenter le champ accélérateur dans la cavité.

Solutions pour limiter le risque de multipacting

- Parfaire l'état de surface
- Optimisation de la géométrie de la cavité (formes sphériques)



7.4. Une technologie de mieux en mieux maîtrisée

La technologie des cavités supraconductrices est entrée dans sa période de maturité : en respectant quelques précautions (design, fabrication, préparation), il est possible d'atteindre d'excellentes performances, et de se rapprocher de plus en plus des performances théoriques.

Cependant, dans l'accélérateur, on prend en général des marges de sécurité importantes (notamment sur E_{acc} & Q_0) pour assurer un fonctionnement fiable des cavités accélératrices.

Comparaison entre solution chaude et solution froide pour les projets de linac à protons CW de forte puissance



*Cavité 700 MHz $\beta=0,65$
5 cellules (protons 10mA)*

	Cavité niobium (2K)	Cavité Cuivre (300K)
Résistance de surface R_s envisagée	20 n Ω	7 m Ω
Facteur de qualité Q_0 envisagé	10^{10}	$3 \cdot 10^4$
Champ accélérateur de fonctionnement E_{acc}	10 MV/m	2 MV/m
Puissance fournie au faisceau par cavité $P_{faisceau}$	60 kW	12 kW
Puissance dissipée par cavité P_{cav}	16 W @ 2K	218 kW @ 300K
Puissance RF par cavité $P_{RF} = P_{faisceau} + P_{cav}$	60 kW	230 kW
Puissance AC par cavité P_{AC} (à la prise)	125 kW	400 kW
Efficacité de l'accélérateur $P_{faisceau} / P_{AC}$	48 %	3 %
Nombre de cavités pour gagner 100 MeV	17 (soit environ 30m)	85 (soit environ 80m)

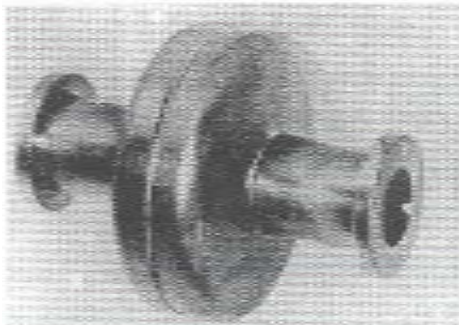
8. Panorama non exhaustif des cavités froides

8.1. 1960-1980 : les tâtonnements en laboratoire (1)

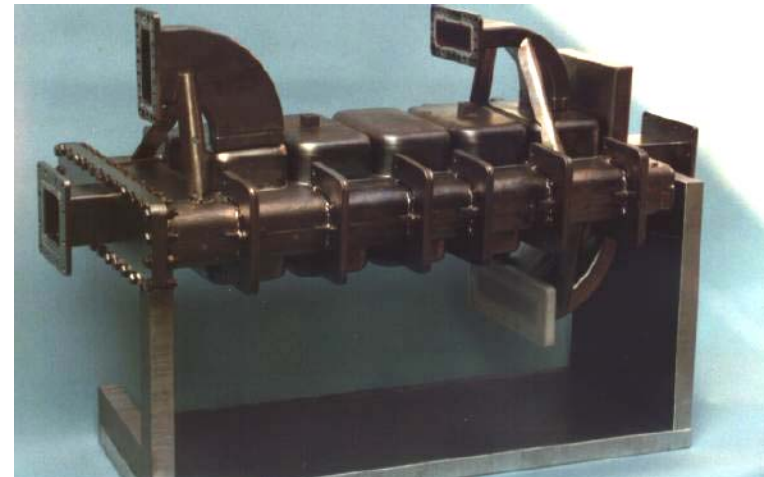
1965 : 1^{ère} accélération d'électrons dans une cavité supraconductrice (plaquée plomb) à l'HEPL de Stanford

1972 : Construction et test des cavités supraconductrices destinées à être installées dans le 1^{er} accélérateur supraconducteur de Stanford, mais les résultats sont jugés « très décevants » (Suelze, PAC73) : champs accélérateurs autour de 2 MV/m (← *multipacting* !)

1975 : 1^{er} test d'une cavité supraconductrice « muffin-tin » en niobium dans un synchrotron à Cornell



Cavité 1,3 GHz – 11,5cm (Stanford)

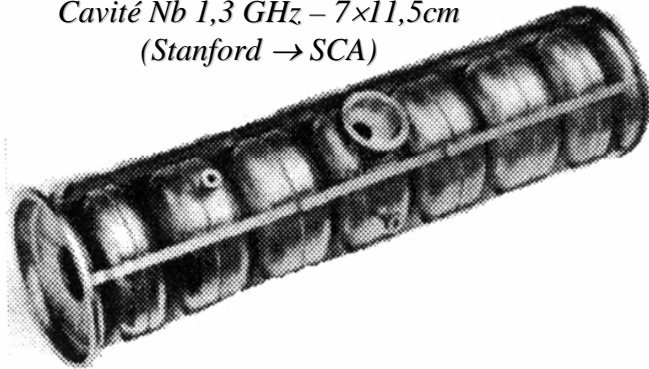


Cavité Nb « muffin-tin » 1,5 GHz – 0,5 m (Cornell)

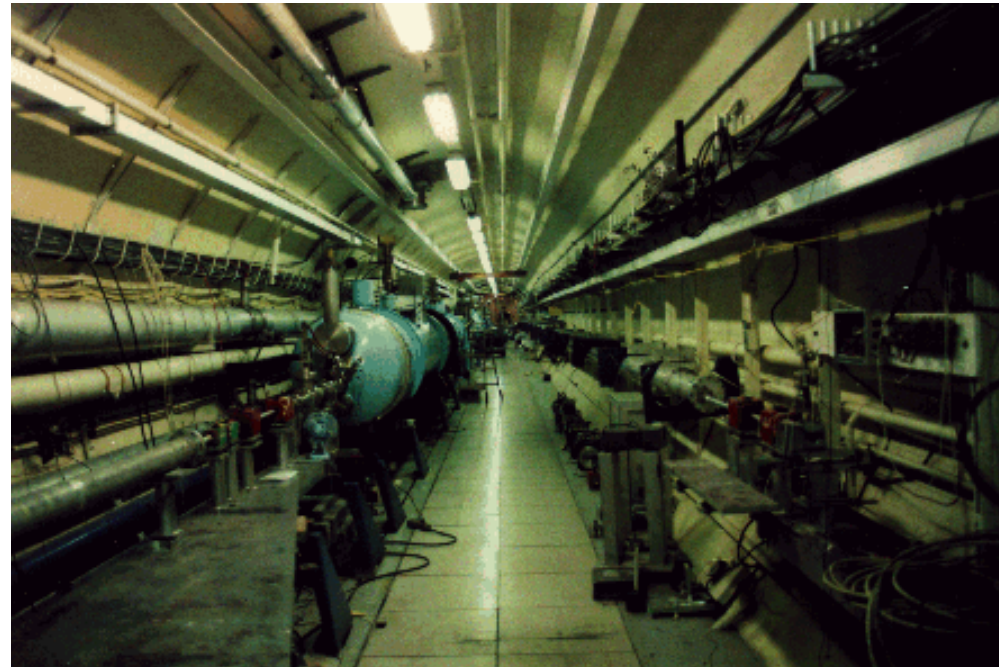
8.1. 1960-1980 : les tâtonnements en laboratoire (2)

1977 : Achèvement du 1^{er} accélérateur linéaire supraconducteur d'électrons (SCA) à l'HEPL de Stanford, suivi du microtron de l'Université de l'Illinois (MUSL-2)

*Cavité Nb 1,3 GHz – 7×11,5cm
(Stanford → SCA)*



*Le 1^{er} linac supraconducteur (SCA,
Stanford) – 1,3 GHz – 50 MV, 27m*



1980 : 1^{er} « Workshop on RF Superconductivity » à Karlsruhe (KfK),
et apparition des 1^{ères} cavités à profil « elliptique »

8.2. 1980-1992 : les 1^{ères} grandes machines supra (1)

~ 1980 : apparition des 1^{ères} cavités à profil « elliptique »

1982 – 1986 : tests de cavités supra dans divers anneaux :
CESR (Cornell), PETRA (DESY), TAR (KEK)

1986 – 1992 : mise en service de plusieurs accélérateurs
utilisant des cavités supra autour de 5 MV/m

anneaux: *TRISTAN (KEK)*: 32 cavités 5 cell. (508 MHz)

LEP & SPS (CERN): 12 cavités 4 cell. (352 MHz)

HERA (DESY): 16 cavités 4 cell. (500 MHz)

linéaires: *S-DALINAC (Darmstadt)* : 10 cavités 20 cell. (3 GHz)

MACSE (Saclay): 5 cavités 5 cell. (1.5 GHz)

CEBAF (Jefferson Lab): 106 cavités 5 cell. (1497 MHz) en 1992

Cavité Nb 5 cellules – 1,5 GHz – 0,5m (Cornell → CEBAF)



Cavité Nb/Cu 4 cellules – 352 MHz – 1,7 m (CERN → LEP)

8.2. 1980-1992 : les 1^{ères} grandes machines supra (1)

1990 : Début de la collaboration internationale sur TESLA

Objectif : 15 MV/m puis 25 MV/m, gros effort de R&D sur la préparation des cavités



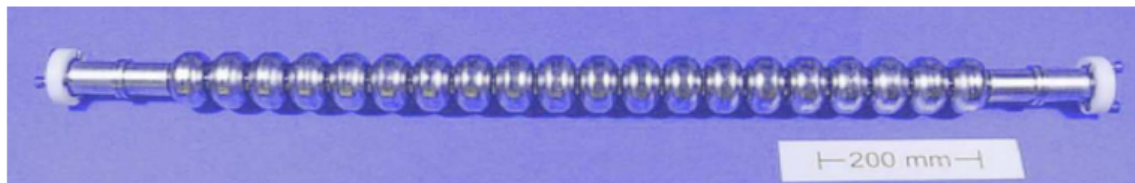
352 MHz
LEP

*Cavité Nb 4 cellules – 350 MHz – 1.7 m
(LEP type, CERN)*



1300 MHz
TESLA

*Cavité Nb 9 cellules – 1,3 GHz – 1 m
(TESLA collab. → TTF)*



3000 MHz
S-DALINAC

*Cavité Nb 20 cellules – 3 GHz – 1 m
(S-DALINAC)*

8.3. Vers les hauts gradients et la maturité (1)

1994 : le linac de Jefferson Lab (CEBAF/TJNAF) est la plus grande installation supra du monde : 338 cavités Nb installées (1,5 GHz – 2K)

1995 - 1999 : « upgrade » du LEP (LEP2) : 288 cavités Nb/Cu installées (352 MHz – 4,2K)

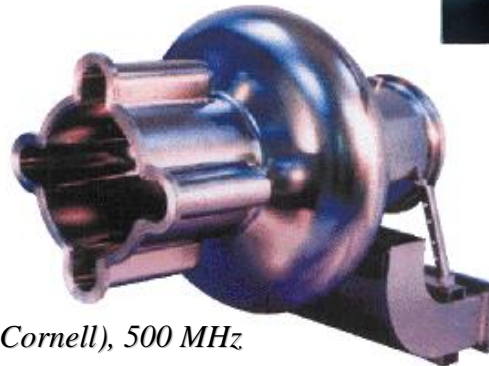
1995 : des champs accélérateurs de plus de 40 MV/m sont atteints pour la 1^{ère} fois en cryostat de test

1997 : 1^{er} faisceau au linac TTF (Tesla Test Facility, DESY)

1997 - 2001 : « upgrade » des anneaux CESR & KEK-B



Les cryomodules alignés dans le tunnel de CEBAF



Cavité Nb CESR-III (Cornell), 500 MHz

8.3. Vers les hauts gradients et la maturité (2)

Depuis 2000 : plusieurs machines utilisant des cavités supra sont en phase de construction / commissioning

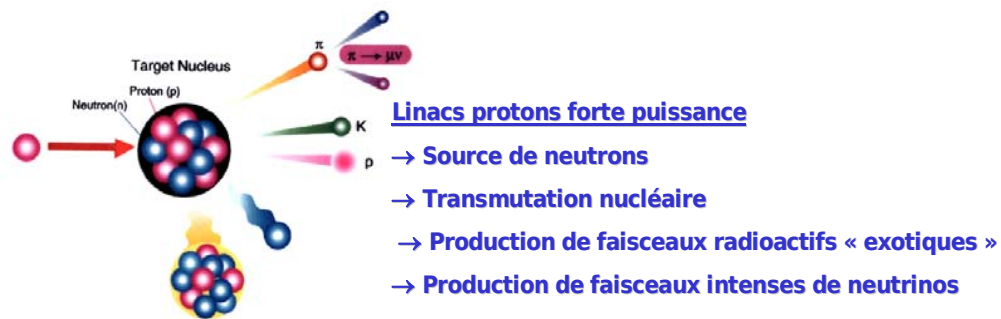
Anneaux : SOLEIL (source de lumière)

LHC (collisionneur p-p)

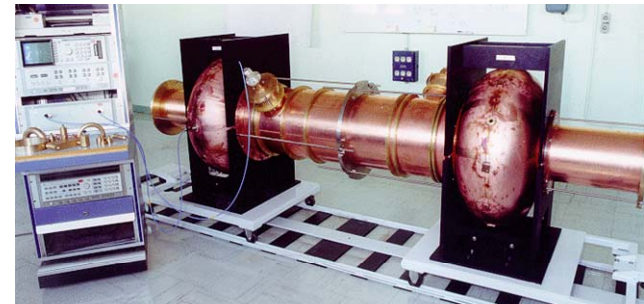
Linéaires : X-FEL (source de lumière, 3.4 km)

SNS (source de neutrons)

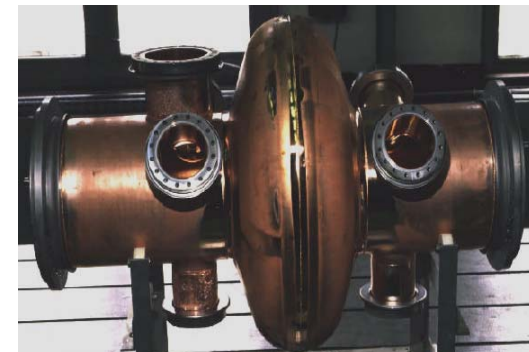
J-Parc (protons hte intensité)



+ innombrables projets : ILC (2*15km, 10 000 cavités), SPL, Eurisol, XT-ADS, etc. etc.



Cavité Nb/Cu 350 MHz (Saclay → SOLEIL)



Cavité Nb/Cu LHC, 400 MHz

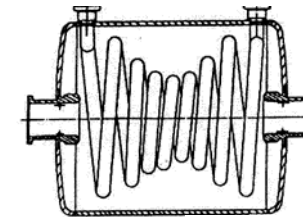


Cavité Nb à protons 805 MHz (Jef. Lab → SNS)

8.4. Pour les particules moins rapides $\beta < 0.5$ (1)

1969 - 1973 : 1^{ers} résonateurs « à hélice » (Karlsruhe KFK, Argonne Nat. Lab.), précurseurs du résonateur à « hélice effilée » (1981, KFK)

Résonateurs utilisés à Saclay (1988, Nb)

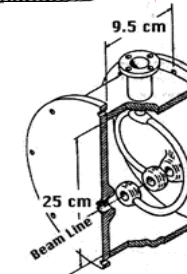


Résonateur à « hélice effilée »
81 MHz - $\beta=0,09$
(KFK → Saclay)

1974 - 1975: 1^{ers} prototypes de résonateurs « split-ring » (California Inst. Techn., Argonne Nat. Lab.)

Résonateurs utilisés par exemple à Argonne pour ATLAS (1978, Nb), et à Stony Brook pour SUNY (1983, Pb/Cu)

Cavité « split-ring »
150 MHz - $\beta=0,105$
(Stony Brook)



1983 : Conception du résonateur « 1/4 d'onde » à Stony Brook

Résonateurs utilisés par exemple à U. Washington (1988, Pb/Cu), à Legnaro (1994, Pb/Cu, Nb/Cu, Nb), à JAERI (1994, Pb/Cu) ou à TRIUMF (2005, Nb)



Cavité 1/4 d'onde Nb/Cu,
160 MHz - $\beta=0,11$
(Legnaro → ALPI)

*Montage du cryomodule 1/4 d'onde
ISAC-II, 106 MHz - $\beta=0,07$ (Triumf)*



8.4. Pour les particules moins rapides $\beta < 0.5$ (2)

1992 : 1^{er} prototypes de cavités « demi-onde » et « spoke » (Argonne)

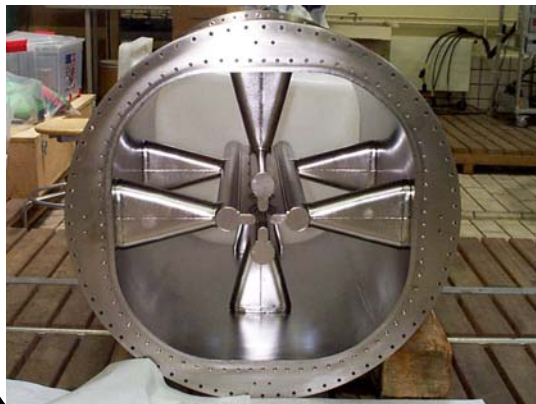


*Cavité spoke Nb, 345 MHz - $\beta=0,4$
(Argonne \rightarrow projet RIA)*

*Résonateur demi-onde (Argonne)
355 MHz - $\beta = 0,12$*



Depuis 2000 : 1^{er} prototypes de RFQ (Legnaro), et de structures CH-DTL (Frankfurt) supra
+ de nombreux linacs supra à ions lourds en phase d'étude ou de construction (ex: SPIRAL-2 !)...



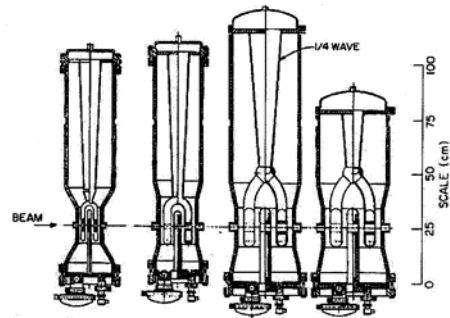
*19-gap CH-DTL (Frankfurt)
350 MHz - $\beta \sim 0,1$*

*RFQ supra (Legnaro)
80 MHz - $\beta \sim 0,01$*



8.5. Panorama général en fonction du β

$\beta = 0,01$



Structures inter-digitales (ATLAS, Argonne)
48 et 72 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,037$



RFQs supra (Legnaro)
80 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,035$



Résonateurs split-ring (ATLAS, Argonne)
97 et 145 MHz - $\beta = 0,06$ à $0,16$

$\beta = 0,1$



Résonateurs quart d'onde (ALPI, Legnaro)
80 à 352 MHz - $\beta = 0,047$ à $0,25$



Résonateur demi-onde (Argonne)
355 MHz - $\beta = 0,12$

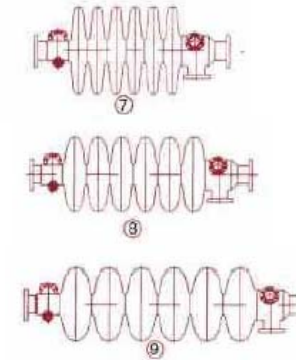
Cavité ré-entrante (Legnaro)
352 MHz - $\beta \geq 0,1$



Cavités spoke (CNRS Orsay)
352 MHz - $\beta = 0,15$ et $0,35$

$\beta = 1$

Cavités elliptiques
350 MHz à 3 GHz - $\beta = 0,47$ à 1



Cavité TTF
1,3 GHz - $\beta = 1$



Cavité APT (Los Alamos)
700 MHz - $\beta = 0,64$

Rappel : $\beta = v/c$ ($c \approx 2,998 \cdot 10^8$ m/s)

9. Concevoir et construire un linac supra

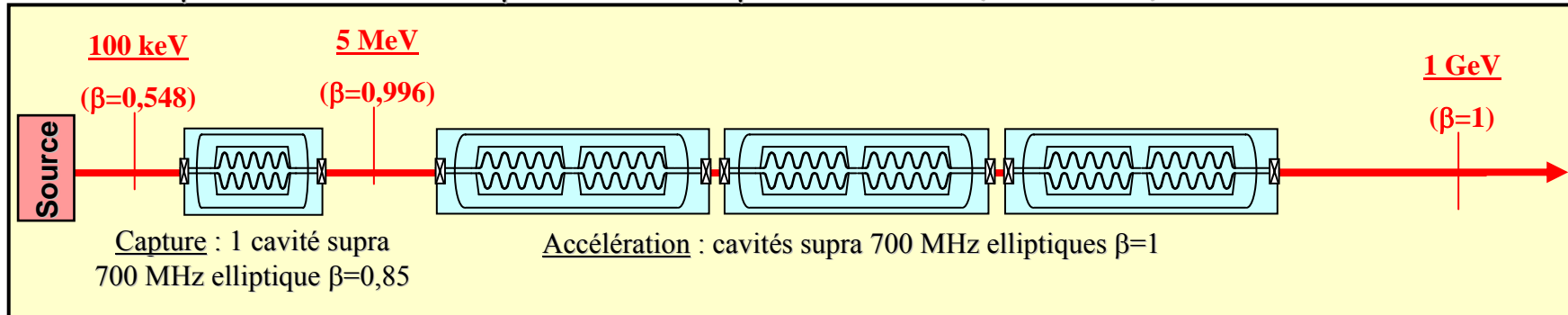
9.1. Conception d'un linac supra (1)

Lors de la conception d'un linac (accélérateur linéaire), la 1^{ère} chose à faire est de choisir des structures accélératrices adaptées à la vitesse des particules (type de cavité, fréquence, bêta, nombre de cellules)

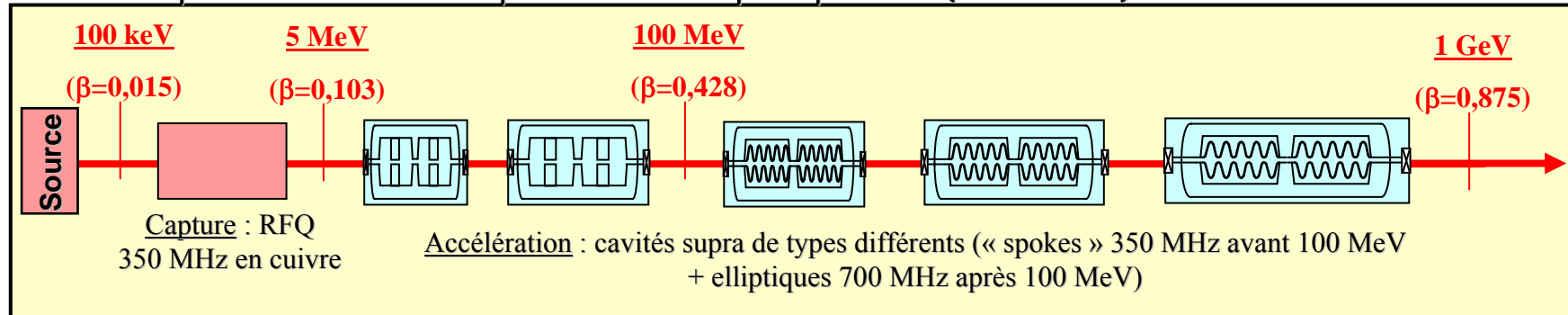
$$\beta^2 = 1 - \left(\frac{m_0 c^2}{E c + m_0 c^2} \right)^2$$

Electron : $m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$
Proton : $m_0 c^2 = 938,27 \text{ MeV}$

Structure possible d'un linac supraconducteur pour électrons ($E_c = 1 \text{ GeV}$)



Structure possible d'un linac supraconducteur pour protons ($E_c = 1 \text{ GeV}$)

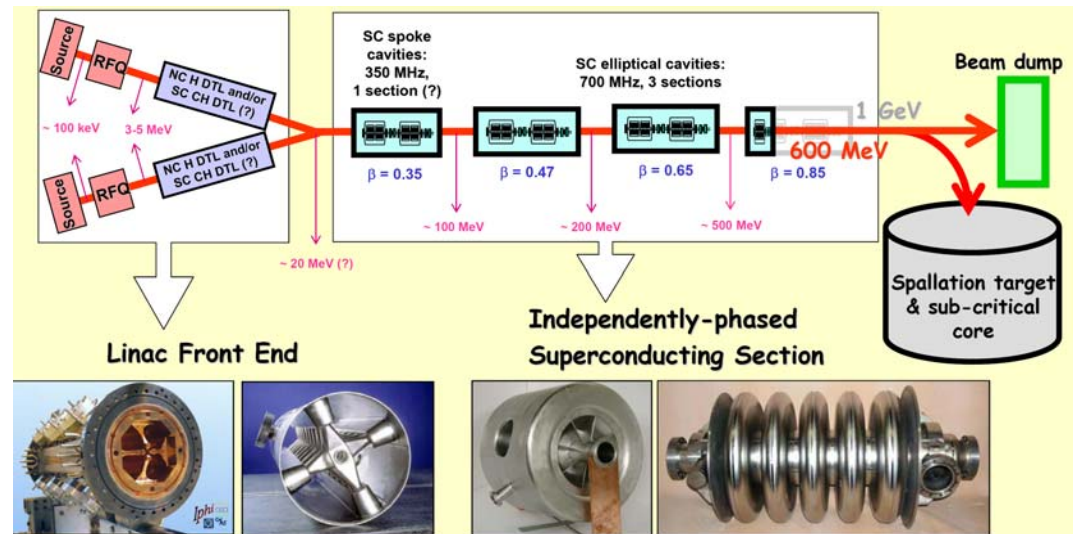
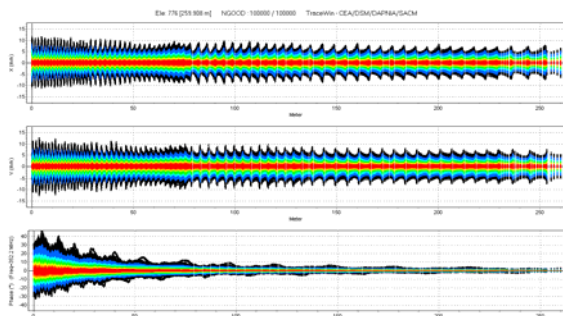


9.1. Conception d'un linac supra (2)

1. Remplir les spécifications requises en assurant notamment une dynamique du faisceau acceptable
2. Minimiser le coût d'investissement du linac, i.e. sa longueur totale, et le nombre de structures utilisées
3. Minimiser le coût de fonctionnement du linac, i.e. minimiser les pertes RF
4. Assurer une marge de sécurité confortable sur le point de fonctionnement : (fiabilité & sécurité)
5. S'assurer de la faisabilité des structures choisies
6. Rendre le linac aussi flexible que possible dans son utilisation et sa maintenance (accessibilité)

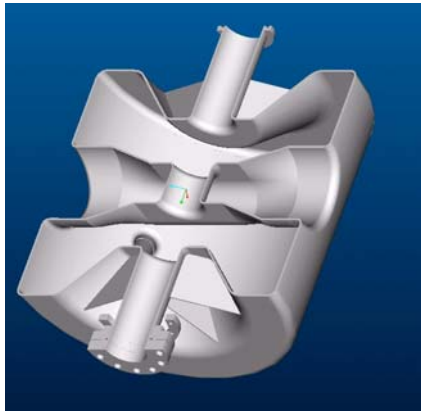
➡ **Large compromis à trouver !**

Conception du linac XT-ADS pour la transmutation des déchets nucléaires, axé sur la fiabilité

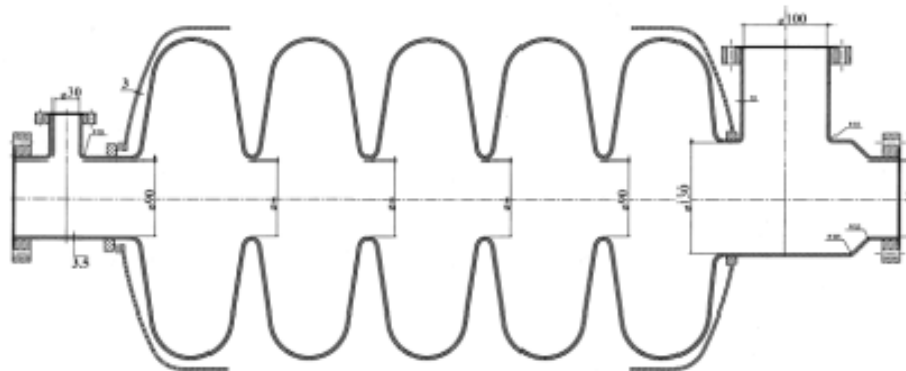


9.2. Design d'une cavité supra

1. Fixer les paramètres basiques de la cavité : fréquence, β , nombre de cellules, température de fonctionnement (*ils découlent du design du linac*)
2. Choisir des marges de sécurité sur le point de fonctionnement de la cavité : limitation des champs de surface (ex: $E_{pk} < 30 \text{ MV/m}$ et $B_{pk} < 60 \text{ mT}$) pour « fiabiliser » la cavité, conserver de larges tubes faisceau pour éviter l'activation des structures par le faisceau...
3. Optimiser la géométrie : minimiser les rapports E_{pk}/E_{acc} et B_{pk}/E_{acc} pour maximiser l'accélération, maximiser les facteurs géométriques G et r/Q pour minimiser les pertes RF...
4. Assurer une bonne stabilité mécanique de la structure



Cavité spoke 352,2 MHz $\beta=0,35$
optimisée (IPN Orsay)



Cavité elliptique 704,4 MHz 5 cellules $\beta=0,65$ optimisée (CEA Saclay)

Exemples de logiciels utilisés:
Superfish, Mafia
(calculs HF),
Castem, Ansys,
Acord (calculs mécaniques)

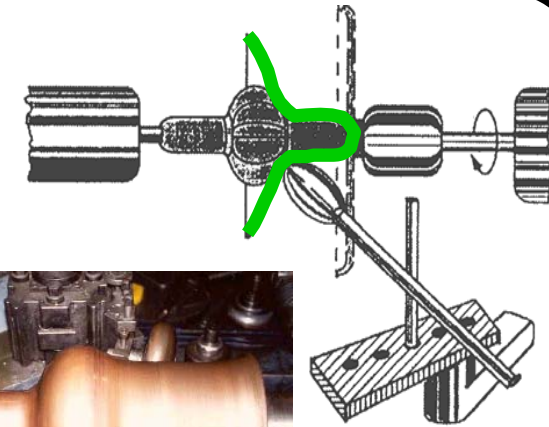
9.3. Fabrication d'une cavité supra (1)

1. Achat de plaques de niobium (épaisseur 2 à 5 mm) ayant :

1. Une grande pureté (RRR 200 à 300)
2. Un minimum de rayures et d'inclusions
3. De bonnes propriétés mécaniques

2. Formage des demi-cellules : les 2 méthodes les plus utilisées sont l'**emboutissage** et le **repoussage**

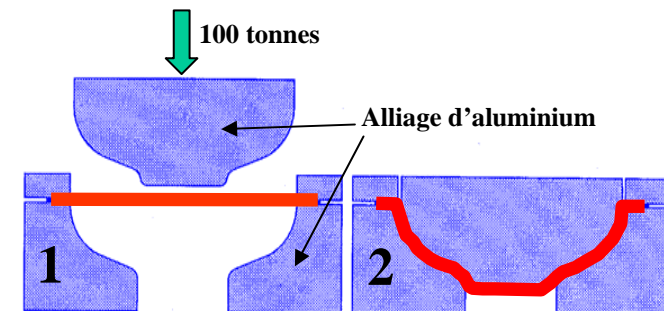
3. Dégraissage et polissage mécanique et chimique des demi-cellules obtenues, contrôle dimensionnel



La technique du repoussage



Demi-cellules $\beta=0,47$
après formage et polissage
(Zanon, Italie)



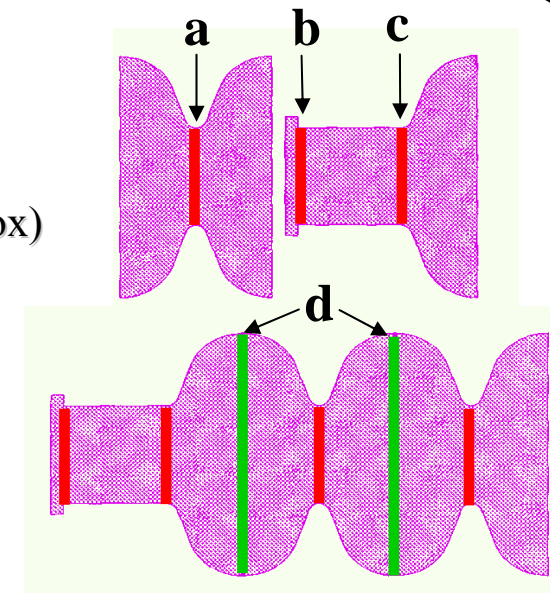
La technique de l'emboutissage

9.3. Fabrication d'une cavité supra (2)

4. Soudure par faisceau d'électrons sous vide :
 - a) des demi-cellules internes par les iris
 - b) des brides d'extrémité aux tubes faisceau (ou brasées si en inox)
 - c) des demi-cellules d'extrémité avec les tubes faisceau
 - d) de tous les équateurs
5. Polissage final, contrôle dimensionnel et test d'étanchéité



Cavités TTF en cours de soudure chez CERCA (Romans sur Isère, France)



La procédure de soudure par faisceau d'électrons

Autres méthodes de fabrication :

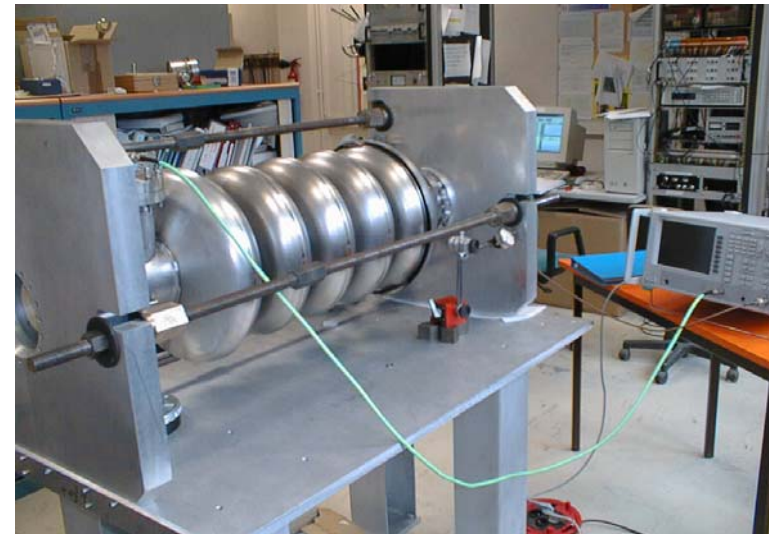
- *Hydro-formage du niobium*
- *Technologie des couches minces (dépôt d'un film de niobium sur cuivre par pulvérisation)*

9.4. Préparation d'une cavité supra (1)

1. Contrôles dimensionnels (3D) et mesures HF et mécaniques à 300 K
2. Dégraissage aux ultra-sons
3. Polissage chimique (100 à 150 μm) pour enlever la couche de surface abîmée et potentiellement contaminée par des impuretés : la cavité est plongée dans un bain chimique composé généralement d'acide fluorhydrique, d'acide nitrique & d'acide phosphorique (bain FNP) (*techniques alternatives : chimie « intégrée », électro-polissage*)
4. Rinçage à l'eau ultra-pure
5. Recuit à 800°C sous vide pour dégazer l'hydrogène (vaccination contre l'effet 100K) + éventuellement recuit à 1400°C pour augmenter la pureté du niobium
6. Accord en fréquence et « plat de champ » en utilisant un banc d'accord à chaud



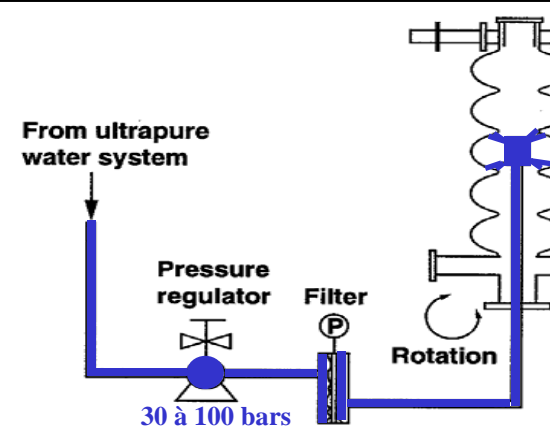
*Chimie au « trempé »
sur une cavité spoke
352 MHz au CEA
Saclay*



*Cavité 5-cellules 700MHz sur son banc
d'accord à chaud à l'IPN Orsay*

9.4. Préparation d'une cavité supra (2)

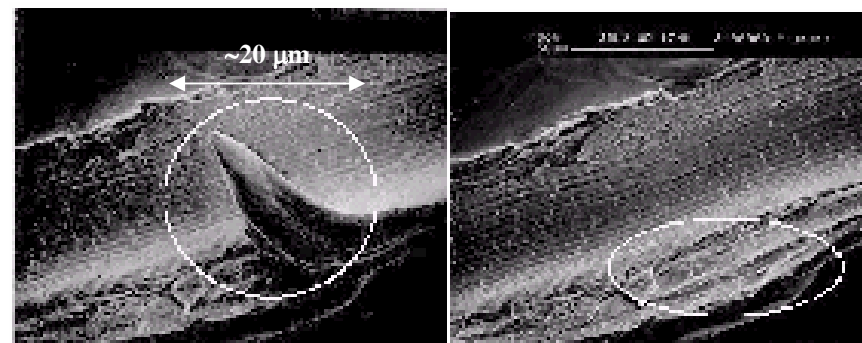
7. Nouveau polissage chimique de surface (5 à 20 μm) pour éliminer les impuretés restantes
8. Rinçage à haute pression (HPR) à l'eau ultra-pure (en salle blanche classe 10 à 100) pour enlever les poussières et défauts pouvant induire une émission électronique, suivi d'un séchage sous flux laminaire
9. Montage des antennes et des brides de fermeture en salle blanche, et test d'étanchéité



Système de rinçage à haute pression



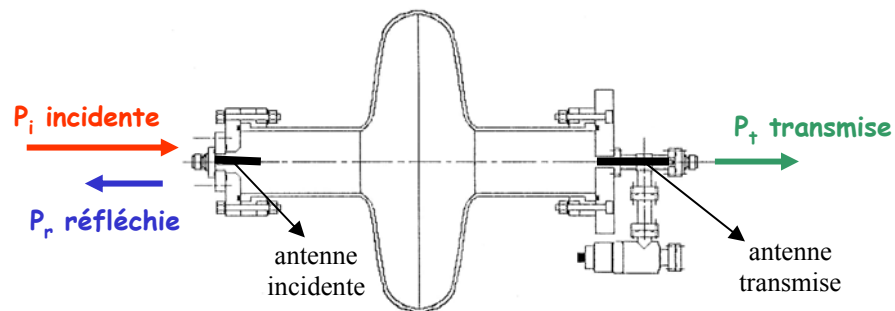
Assemblage final d'une cavité 700 MHz en salle blanche à Saclay



Particule émettrice d'électrons avant et après le HPR

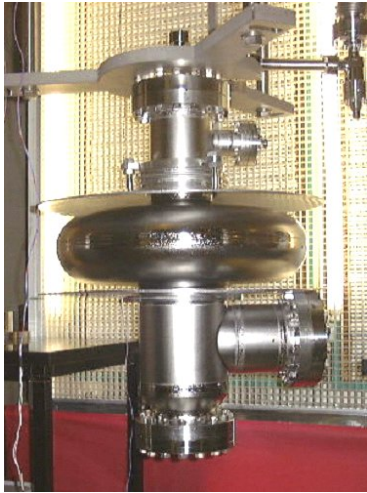
9.5. Test d'une cavité supra (1)

1. Montage de la cavité sur son « insert », et pompage (vide visé : $\sim 10^{-7}$ mbar à température ambiante)
2. Encuvage de la cavité dans le cryostat et mise en froid à l'hélium liquide (4,2 K)
3. Test HF de la cavité à très basse température (jusqu'à 1,5 K en pompant sur le bain d'hélium) : en injectant de la puissance RF dans la cavité, et en mesurant les puissances réfléchies et transmises, il est possible de déterminer le **facteur de qualité Q_0** de la cavité, ainsi que le **champ accélérateur E_{acc}** dans la cavité. En faisant varier la puissance injectée, on obtient alors la courbe $Q_0 = f(E_{acc})$ qui caractérise les performances de la cavité.



Cavité 700 MHz sur son insert avant encuvage à Saclay

9.5. Test d'une cavité supra (2)



Cavité $\beta=0,65$ mono-cellule « A105 »

Performances théoriques idéales

$f = 700 \text{ MHz} \Rightarrow R_{\text{Sidéal}} = 0,8 \text{ n}\Omega \text{ à } 1,7\text{K}$

$G=200 \Omega \Rightarrow Q_{\text{Oidéal}} = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ à } 1,7\text{K}$

$B_{\text{pk}}/E_{\text{acc}}=5,13 \Rightarrow E_{\text{accMAX}} = 43 \text{ MV/m à } 1,7\text{K}$

Performances réelles

$Q_0 = 4 \cdot 10^{10} \Rightarrow R_{\text{Sréele}} = 5 \text{ n}\Omega \text{ à } 1,7\text{K}$

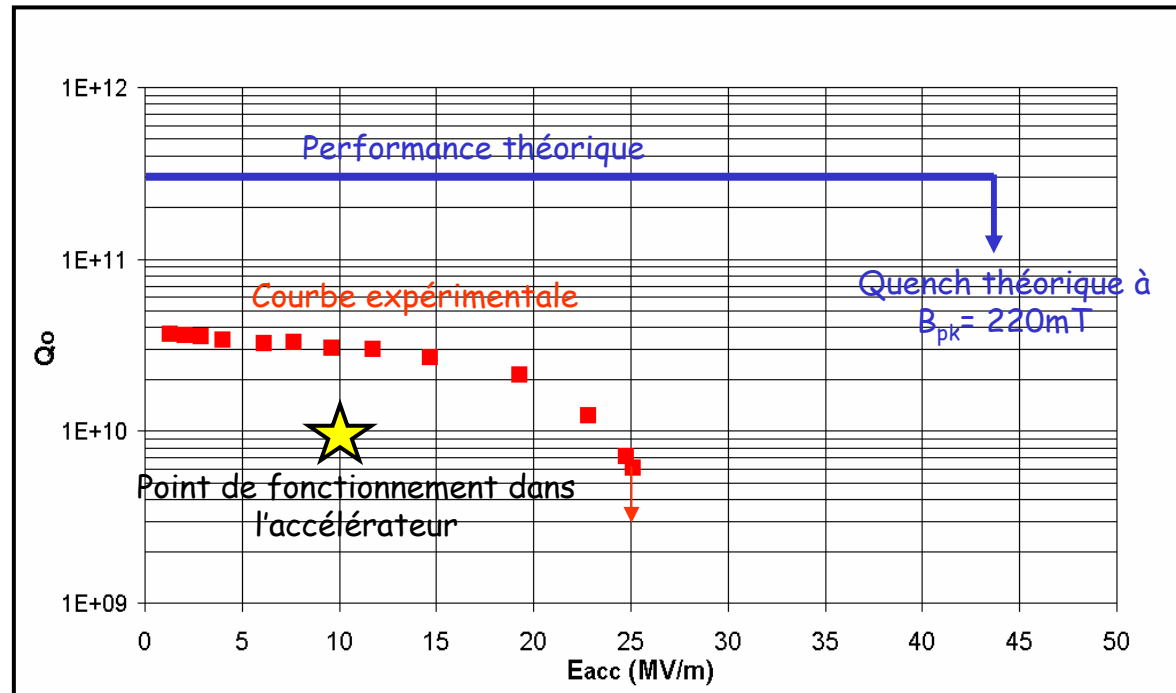
$\Rightarrow R_{\text{résiduelle}} = 4,2 \text{ n}\Omega$

Quench thermique à

$E_{\text{acc}} = 25,1 \text{ MV/m i.e. à } B_{\text{pk}} \approx 130 \text{ mT}$

Exemple : test de la cavité A105 à 1,7 K à Saclay

\Rightarrow courbe $Q_0 = f(E_{\text{acc}})$



9.6. Principaux équipements auxiliaires

- Le tank hélium, destiné à recevoir l'hélium qui baigne les parois extérieures de la cavité
- Le système d'accord à froid, qui doit pouvoir ajuster très précisément (à qqes Hz près) la fréquence de la cavité installée dans l'accélérateur
- Le coupleur de puissance, qui transmet la puissance RF depuis le guide d'onde (à température ambiante) jusque dans la cavité (à basse température), et qui est un composant critique pour des fortes puissances



Le coupleur de puissance des cavités à protons SNS (Jefferson Lab.)

Ame centrale

Fenêtre

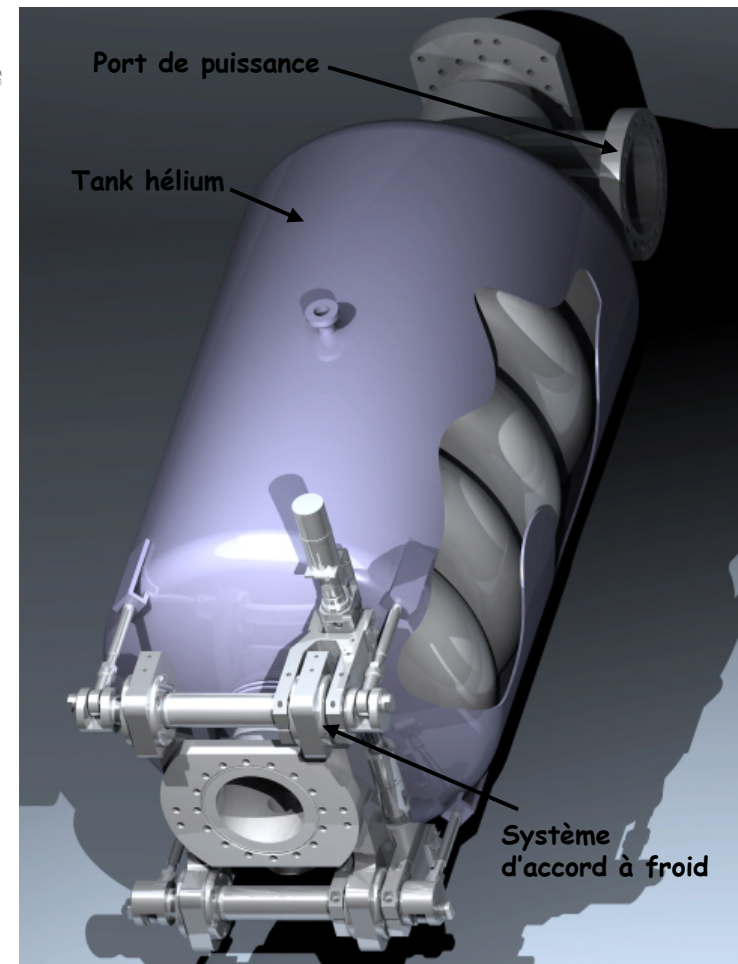
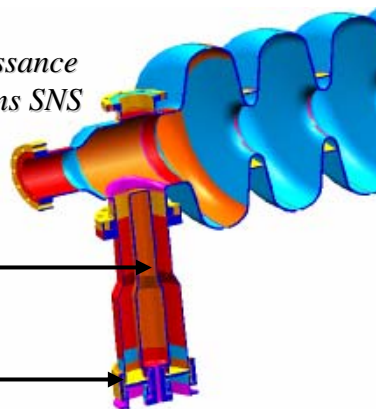


Schéma de la cavité à protons Eurotrans avec ses équipements auxiliaires (IPN Orsay)

9.7. L'installation sur accélérateur (1)

- Assemblage du « cryomodule »
- Mise en place dans l'accélérateur et alignement
- Connexion aux systèmes de contrôle et d'alimentation (HF, système cryogénique, vide)

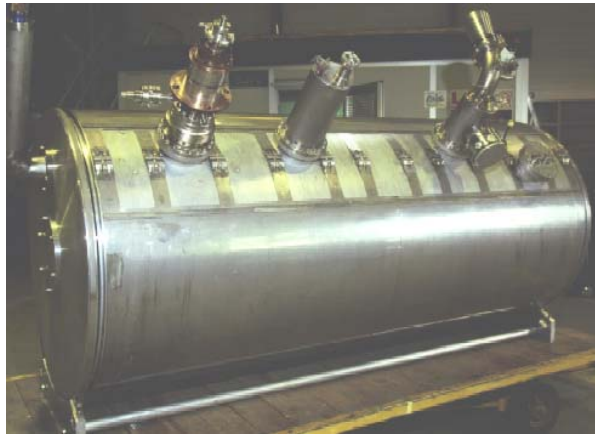


Exemple d'assemblage de cryomodule (SNS)

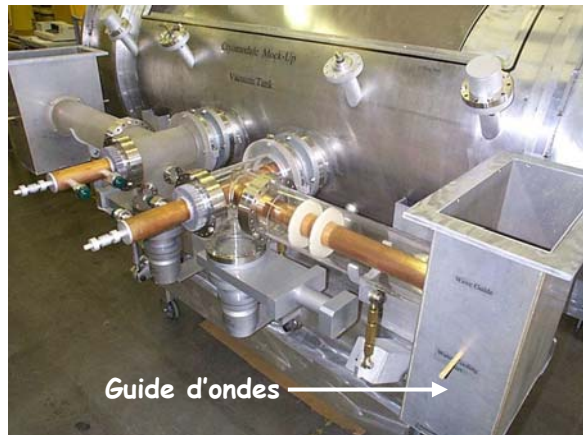
Assemblage d'un train de cavités TTF en salle blanche (DESY)



9.7. L'installation sur accélérateur (2)



Cryomodule LEP-2 assemblé (CERN)



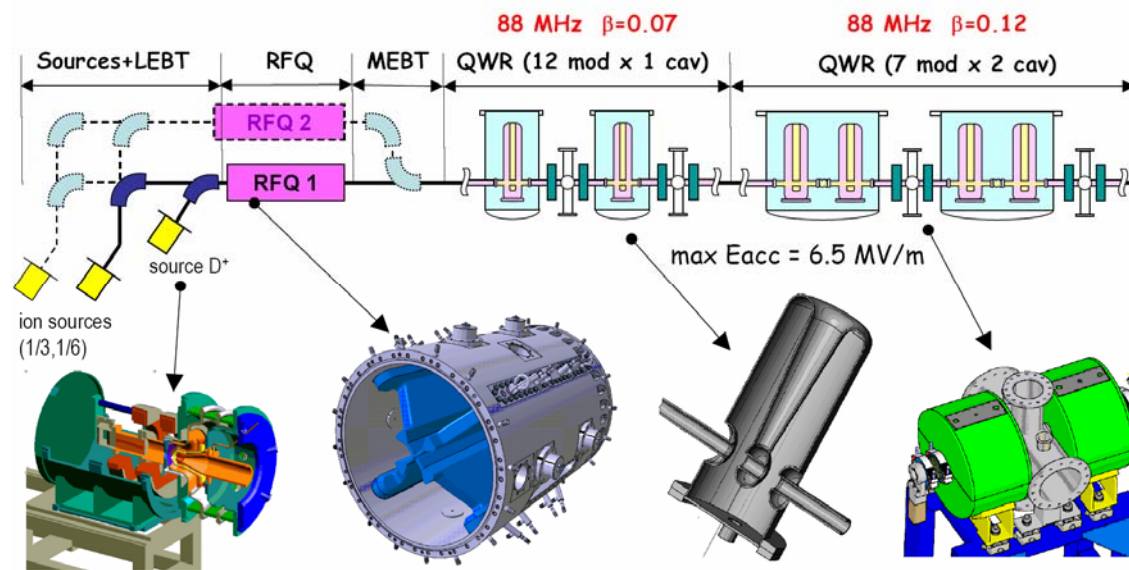
Guide d'ondes →

Connexion du cryomodule aux guides d'onde HF (maquette APT, Los Alamos)



Alignement du cryomodule sur la ligne de faisceau (TTF, DESY)

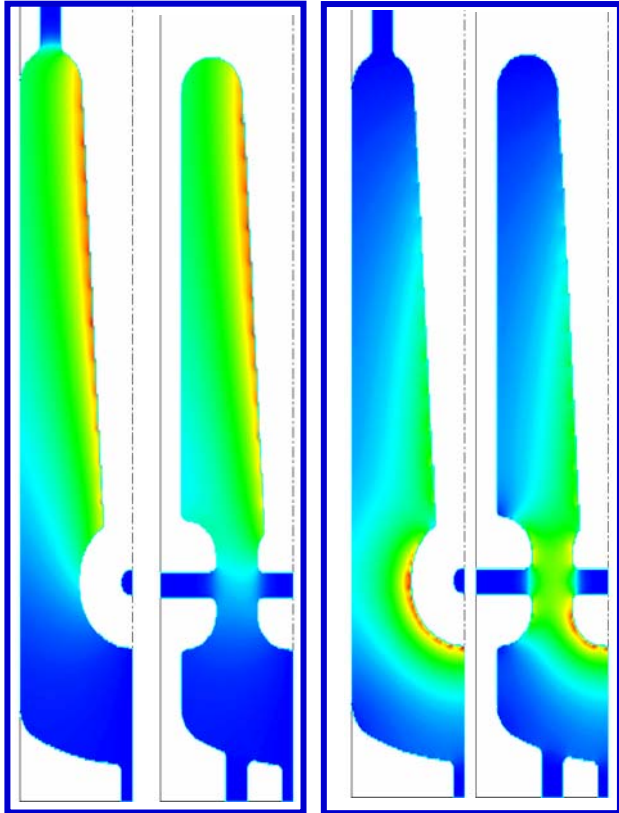
10. Un exemple d'actualité : le « cryomodule B » SPIRAL-2



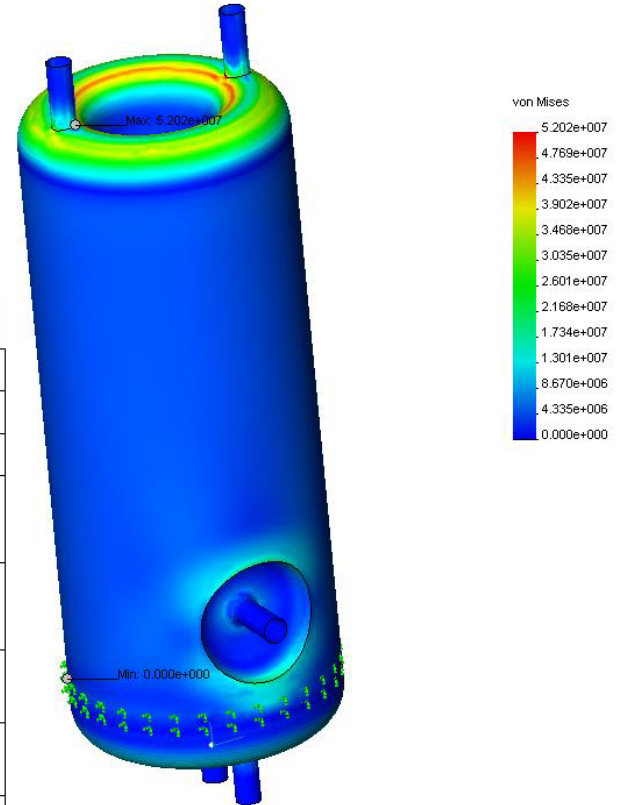
10.1. Conception de la cavité : 88 MHz, $\beta=0.12$

Calculs RF

B field distribution E field distribution



Calculs mécaniques

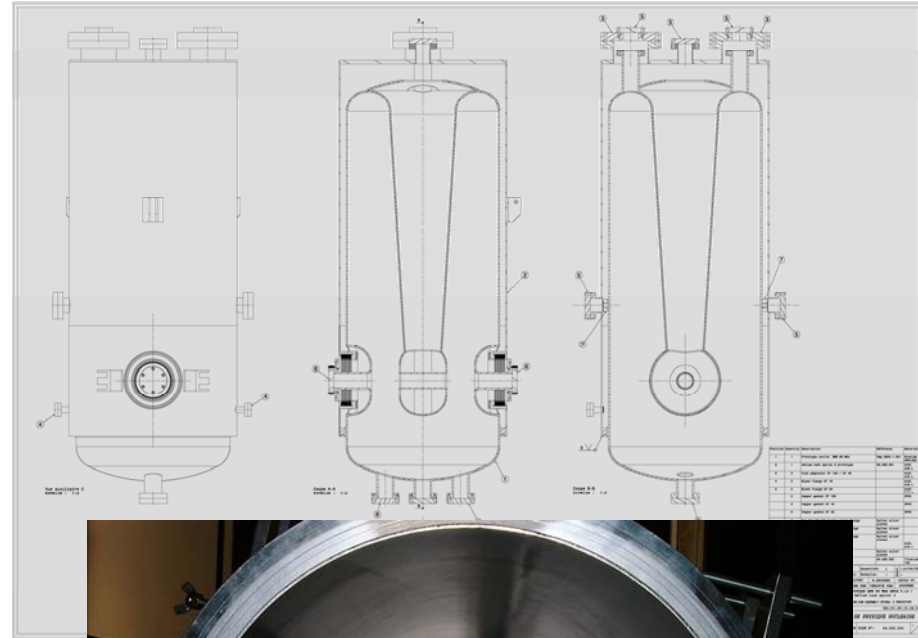


MAFIA calculations

Q_0^a (@ 4.2K)	3.0 E+09
r/Q [Ω]	518
G [Ω]	38
E_p/E_{acc}	3.53 ^b 5.56 ^c
B_p/E_{acc} [mT/MV/m]	6.47 ^b 10.18 ^c
Voltage gain @ $E_p=36$ MV/m [MV]	2.65
Dissipated power @ $E_p=36$ MV/m [W]	4.5
^a assuming a 10 nOhm residual resistance	
^b L_{acc} =iris-to-iris length=0.26 m	
^c L_{acc} =beta.lambda=0.41 m	

10.2. Fabrication du premier prototype

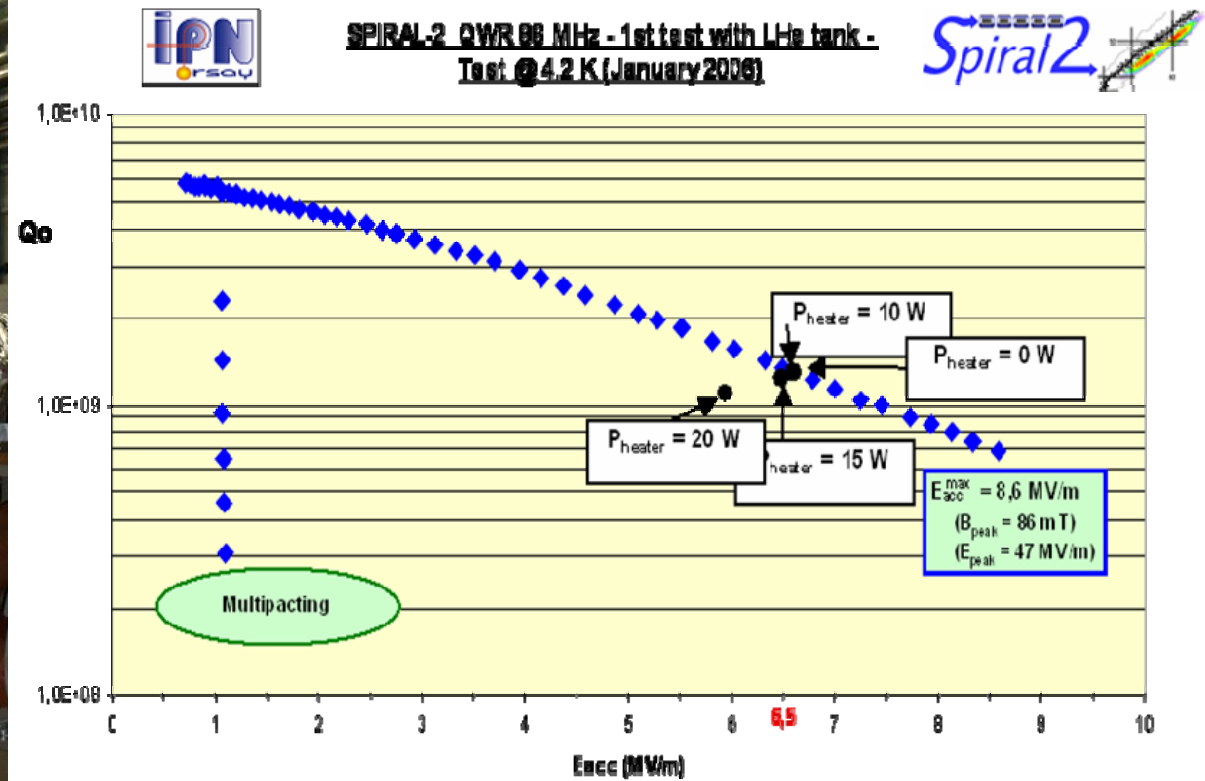
Cavité nue après soudures FE



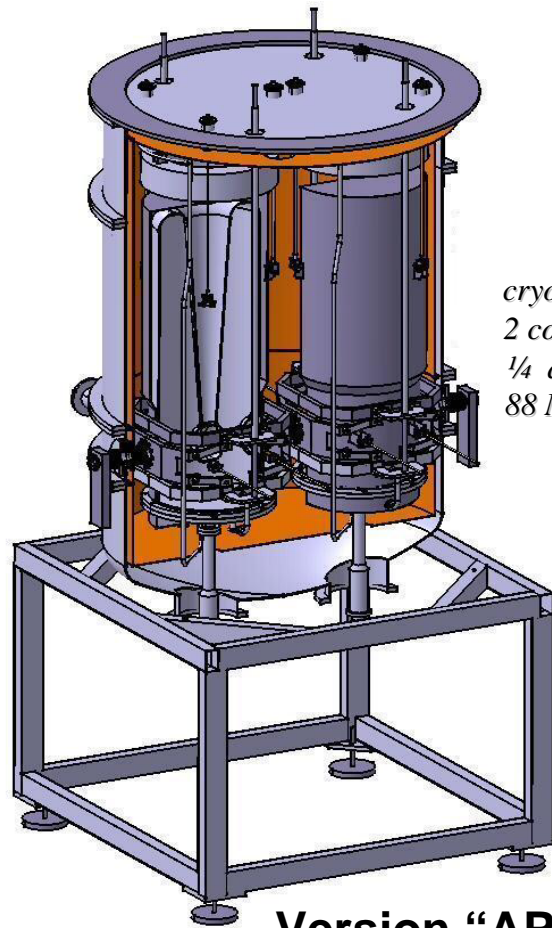
10.3. Premier tests à 4K



Cavité et son tank He

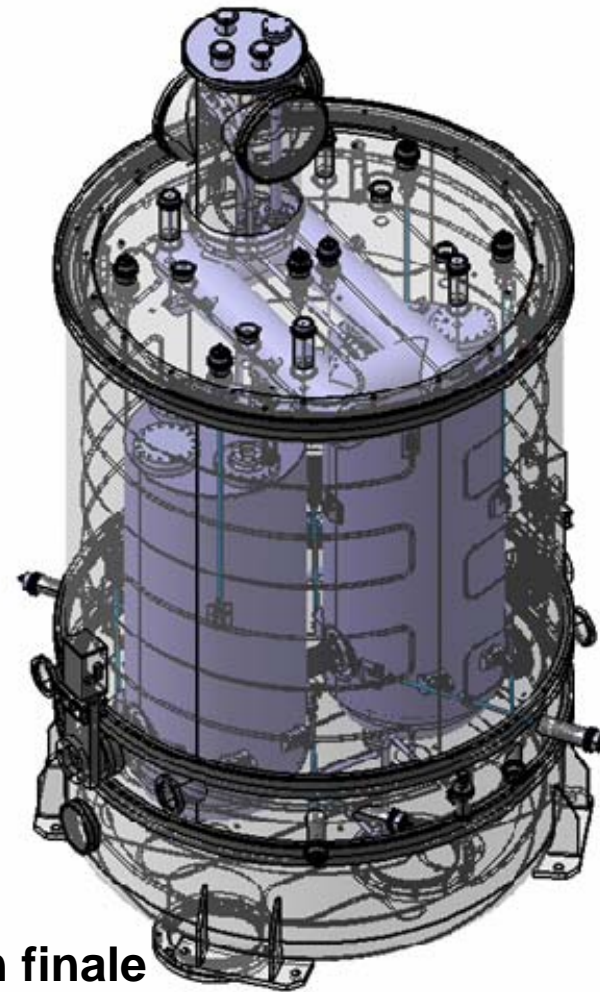


10.4. Conception du cryomodule



Version "APD"

*Design du
cryomodule SPIRAL-
2 contenant 2 cavités
1/4 d'onde $\beta=0,12$ à
88 MHz (IPN Orsay)*



Version finale

10.5. Préparation de la cavité



10.6. Montage en salle blanche



Coupleur de puissance



Sortie de salle blanche

10.7. Montage final (1)



Super-isolation

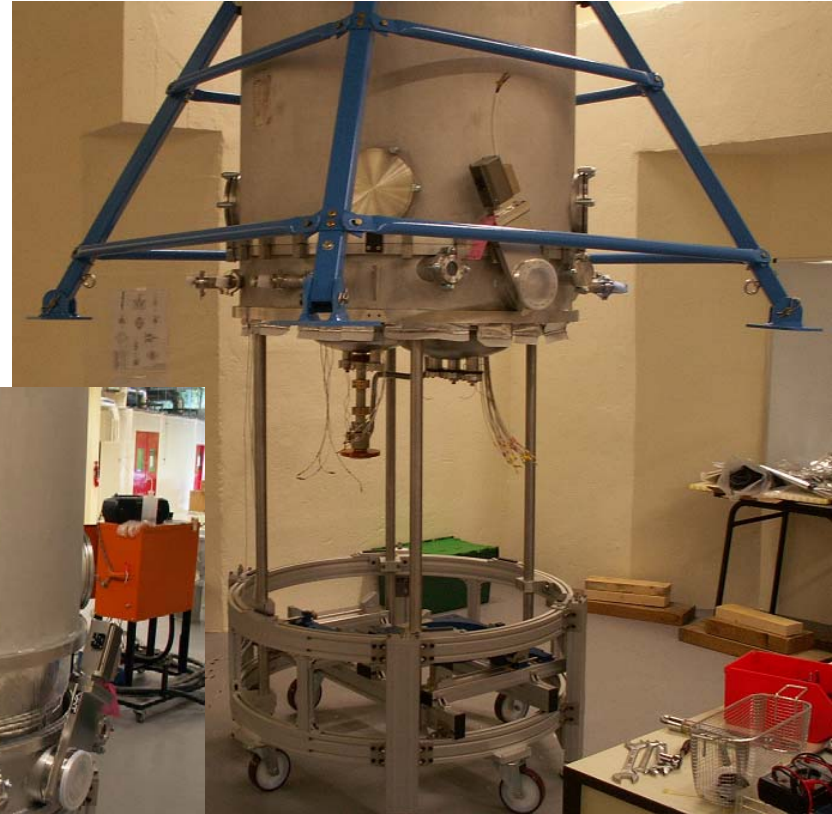


Réservoir tampon He

10.7. Montage final (2)



Ecran thermique 70K



10.7. Montage final (3)



Vide isolation:
 $< 10^{-6}$ mbar

Vide cavité:
 $< 10^{-9}$ mbar

