

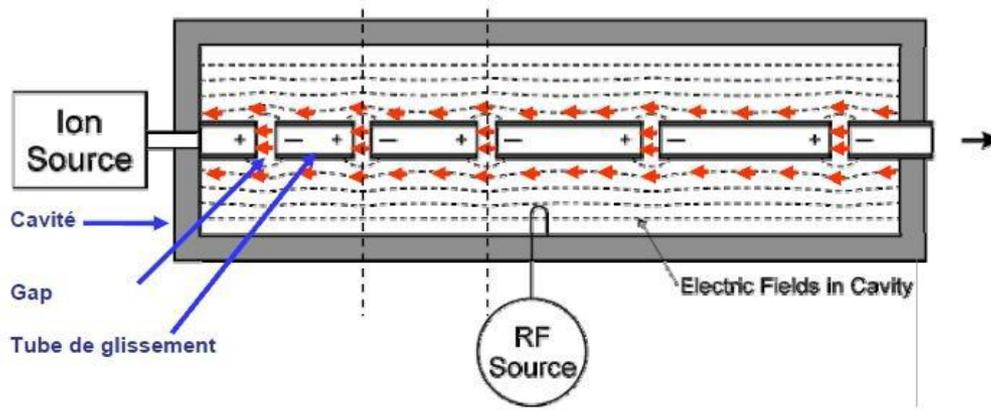
# Les accélérateurs de particules

## 3<sup>eme</sup> partie

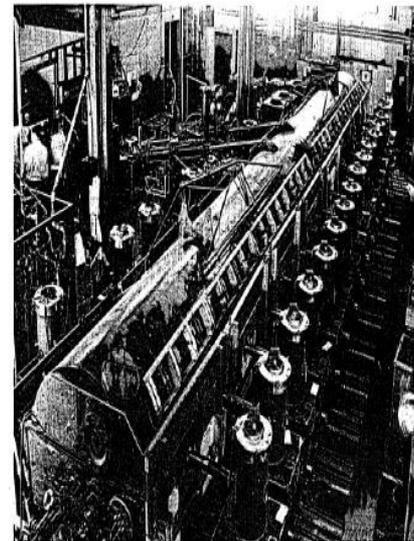
antoine.chance@cea.fr

# Les premiers linacs

- Cockcrof-Walton, Van der Graaf et Tandem : géométriquement parlant.
- Wideroe et Sloan: accélération résonnante, mais limités (Hg+ 1.2 MeV)
  - technologiquement par l'absence de sources HF de fréquence  $> 10$  MHz
  - conceptuellement par la puissance e.m. perdue par rayonnement (en w C V)
- 1947 : Luis Alvarez place les tubes de glissement dans une cavité résonnante en mode TM01 et utilise 26 émetteurs radio a la fréquence 202.56 MHz provenant d'un stock de l'US army . Cette fréquence demeurera un standard dans les Linacs.



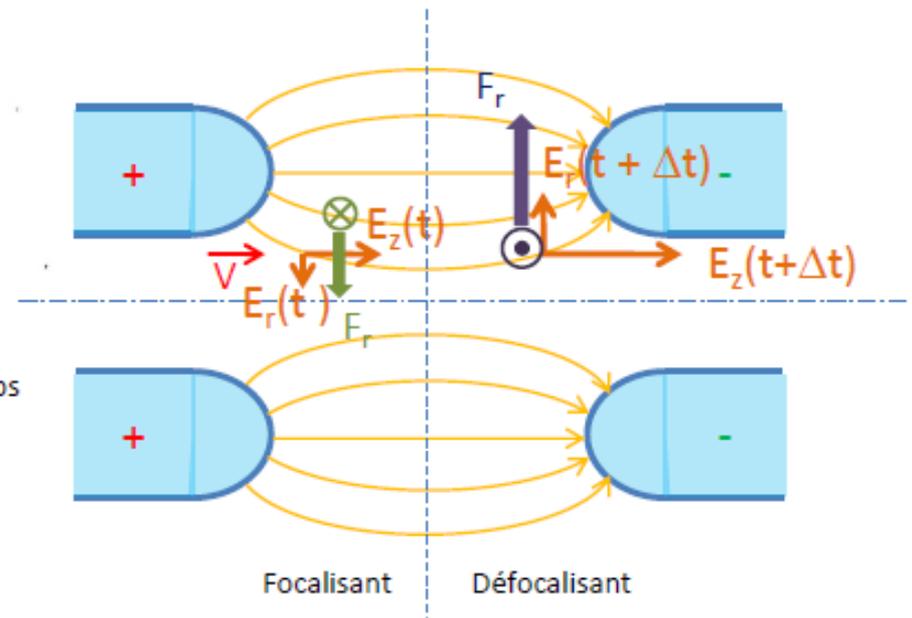
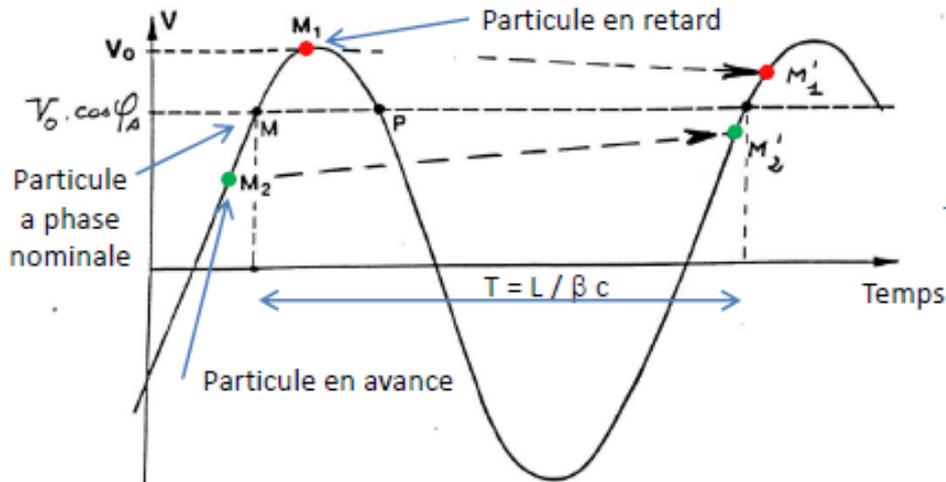
Drift Tube Linac : DTL



Luis Alvarez

# Problème de stabilité

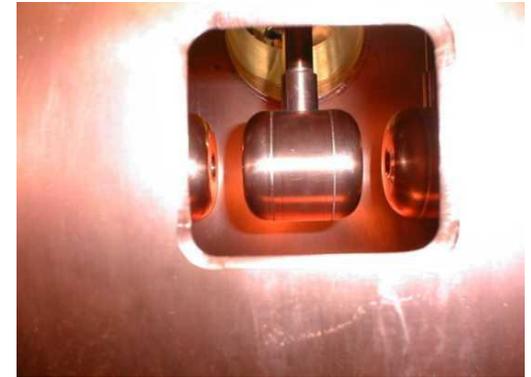
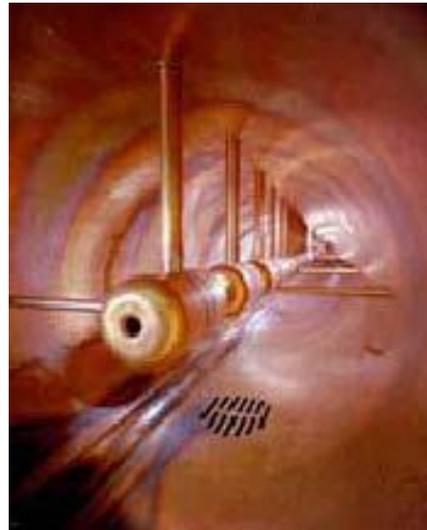
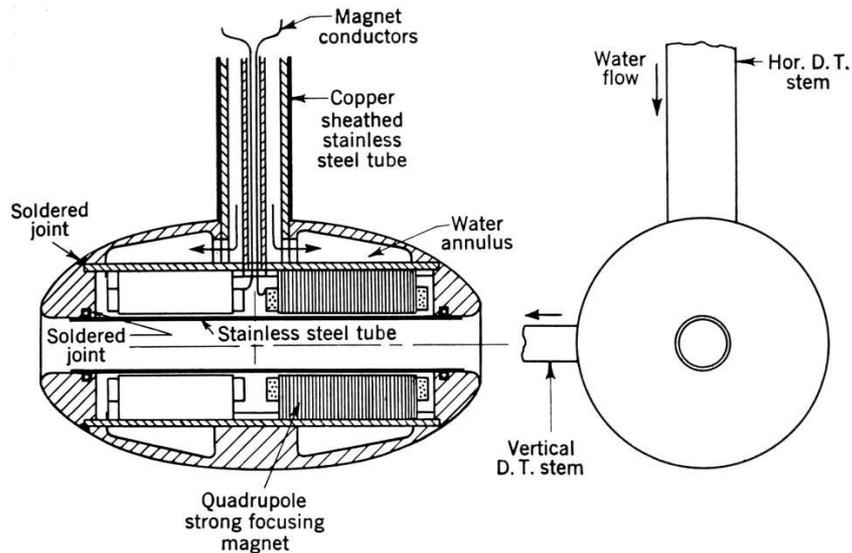
- La stabilité longitudinale exige que les particules soient sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Mais c'est incompatible avec la focalisation transverse.



Stabilité longitudinale  $\rightarrow$  Défocalisation transverse

# Solutions

- Première solution tentée : des grilles aux extrémités des tubes pour redresser les lignes de champs → échec car forte interception du faisceau.
- Installer un quadropôle à l'intérieur de chaque tube (toujours actuelle)



Quadrupôle dans le tube de glissement

# Drift tube Linac (DTL)

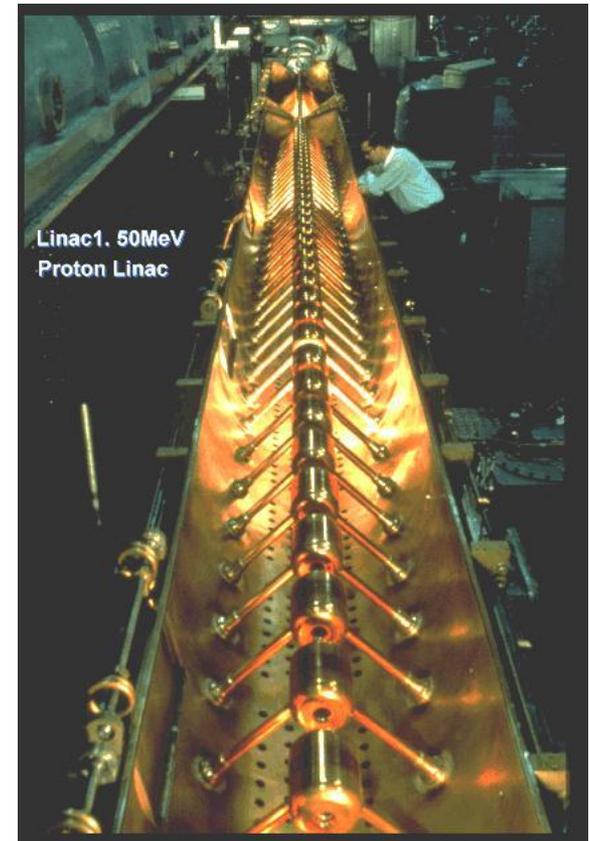
- Facilité d'injection et d'éjection par rapport aux machines circulaires
- Protons de 20 a 200 MeV, ions jusque 10 MeV/a
- Energie fixe pour un type d'ion



Drift tube LINAC – Lawrence Radiation Lab. 1957



LINAC injecteur du LHC



# Cavité résonnante : le modèle pill-box

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

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ et } \mathbf{n} \wedge \mathbf{E} = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$
$$E_z(r, z, t) = R(r) e^{i\omega t}$$

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

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

$$k_r = \frac{2\pi}{\lambda}$$

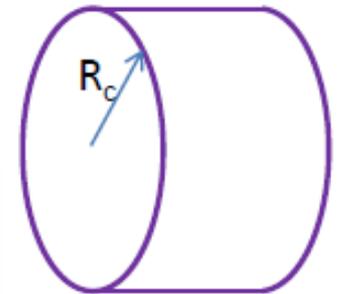
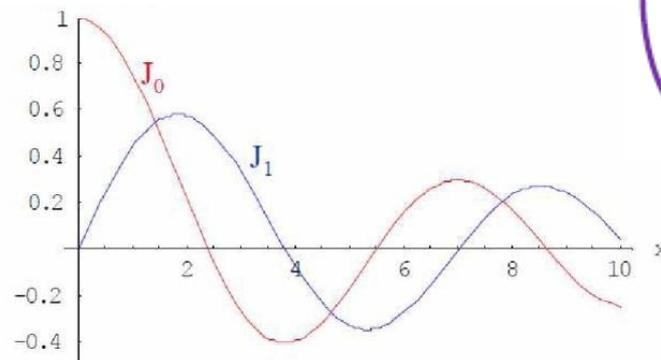
Dans le vide en prenant le rot des Eq. de Maxwell (idem pour B)

Conditions aux limites sur des parois parfaitement conductrices B normal a la surface, E tangent a la surface

Pour  $E_z$  et en coordonnées cylindriques

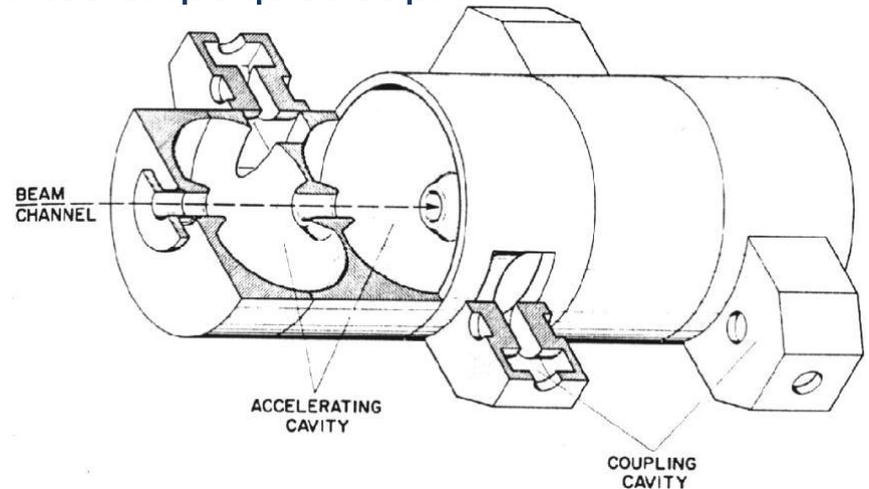
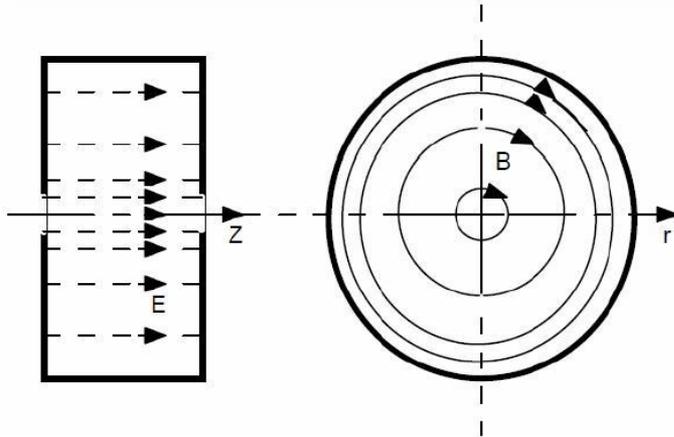
En considérant des solutions avec  $z$  comme axe de symétrie

$J_0$ ,  $J_1$ : Fonctions de Bessel

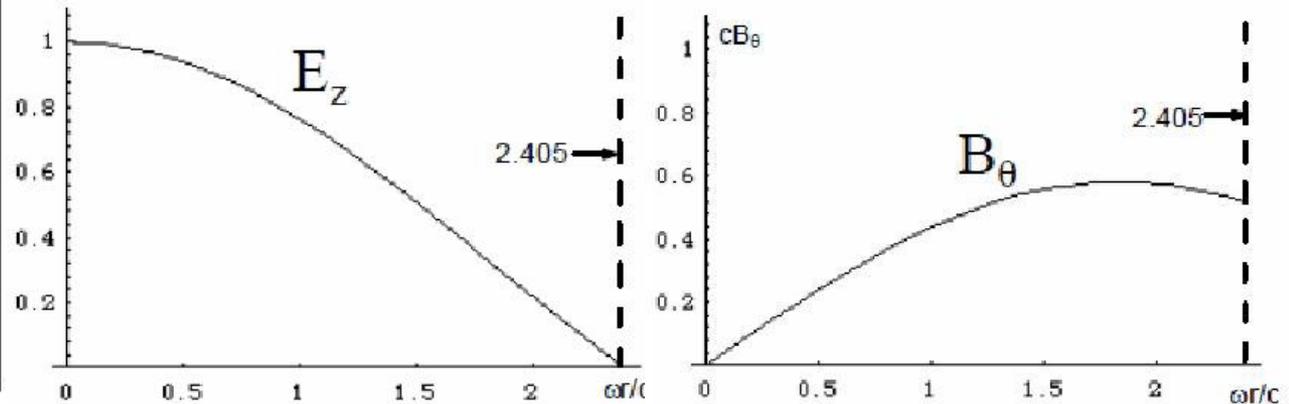
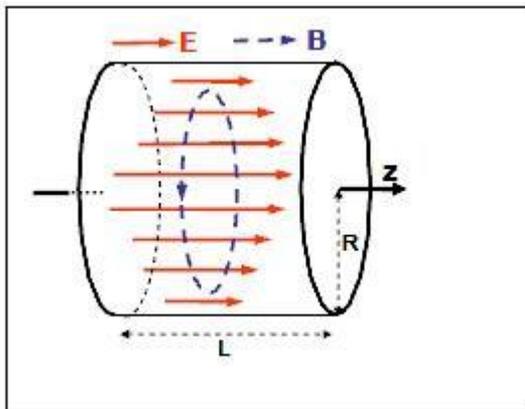


# Mode $TM_{010}$

- Principal mode utilisé: DTL, CCDTL, cavités elliptiques supra

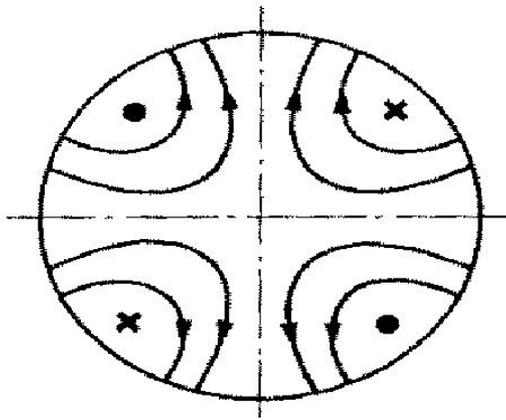


DTL a cavités couplées

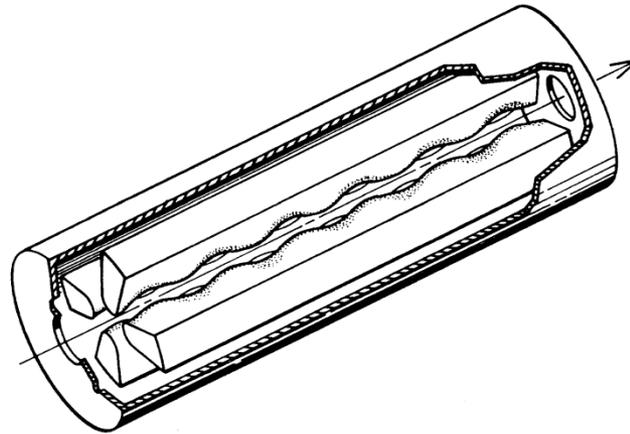


# Mode $TE_{010}$ : le RFQ

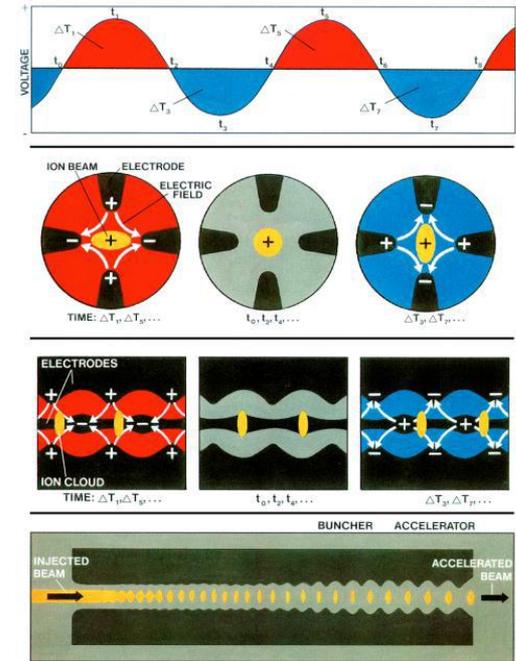
- Radio-Frequency Quadrupole : concept inventé en 1970 par Kapchiski and Teplyakov.
- Permet à la fois la focalisation, la mise en paquets avec un fort taux de capture et l'accélération jusqu'à quelques MeV.
- A remplacé les Cockcroft-Walton comme injecteur.



Mode  $TE_{010}$



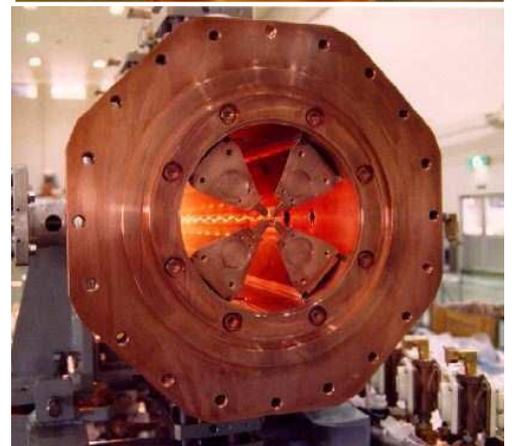
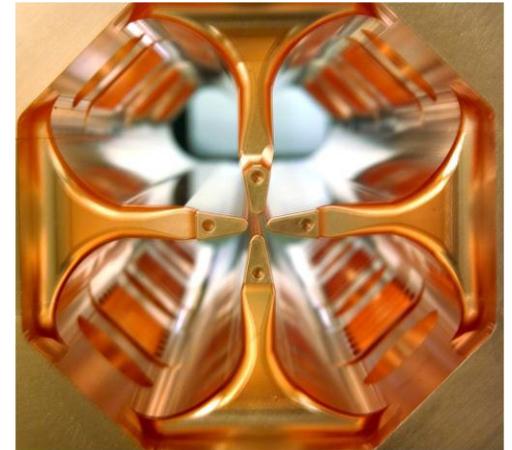
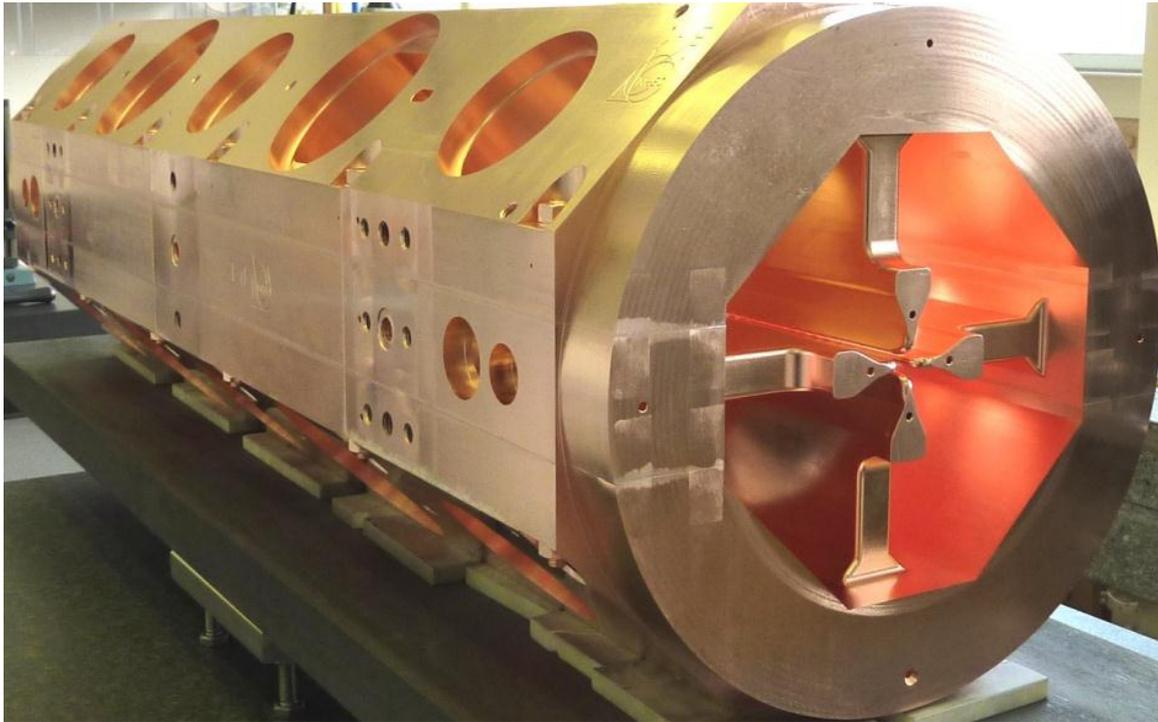
RFQ avec ses « vanes »



Dynamique du faisceau  
Code TOUTATIS de R. Duperrier  
CEA-IRFU

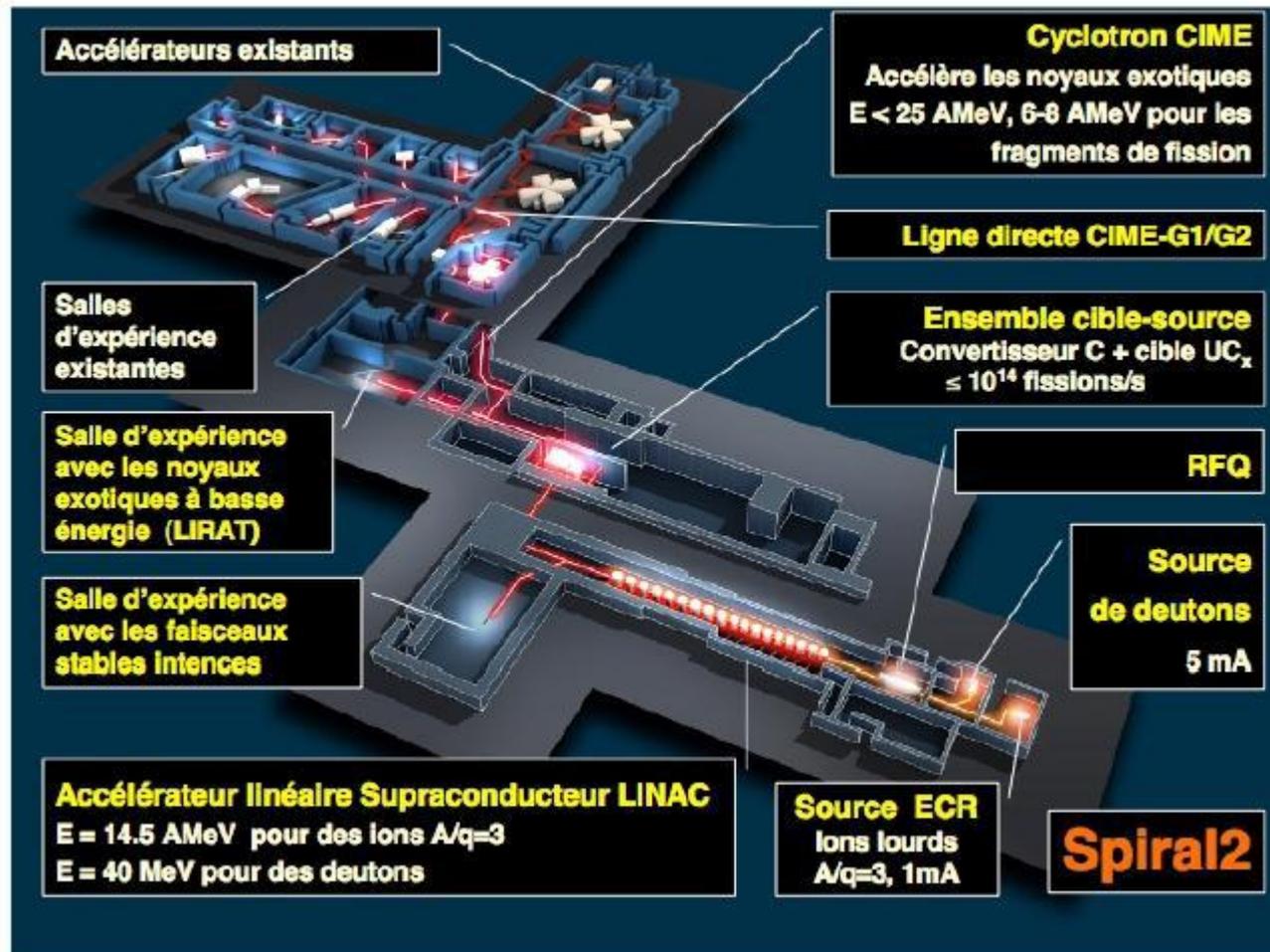
# RFQ: une fabrication très délicate

- Tolérances d'usinages très strictes (qq mm).
- Echauffement délicat à maîtriser si fonctionnement en continu.



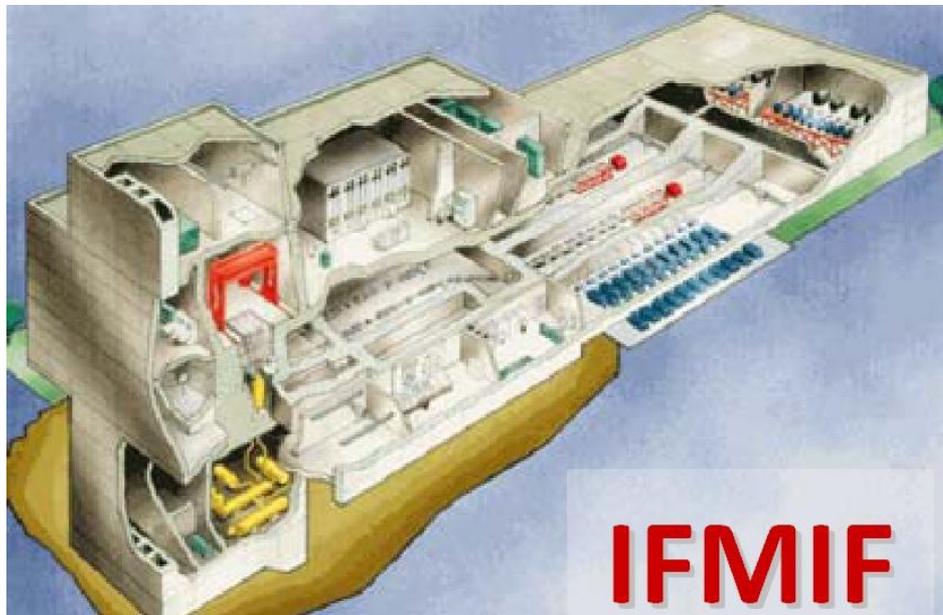
# Grands projets utilisant des Linacs pour ions

- SPIRAL 2 au GANIL: production de noyaux exotiques

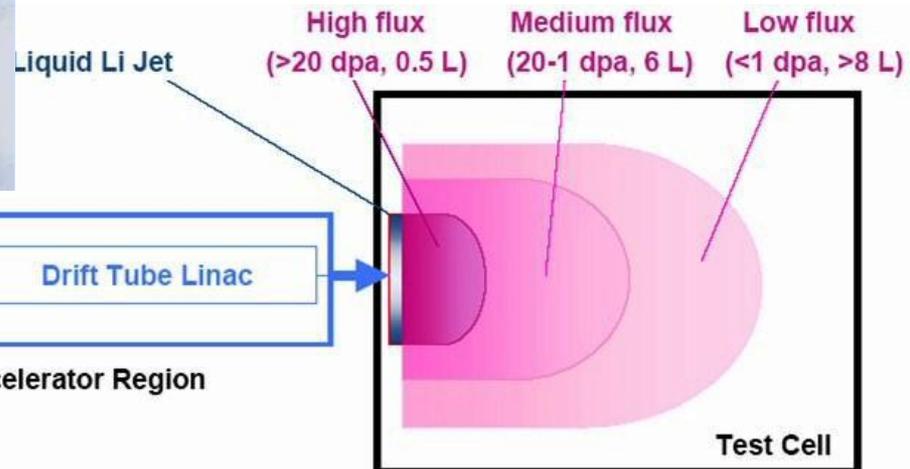


# IFMIF / EVEDA

- IFMIF au Japon : test des matériaux pour la Fusion soumis a des neutrons de 14 MeV



**IFMIF**

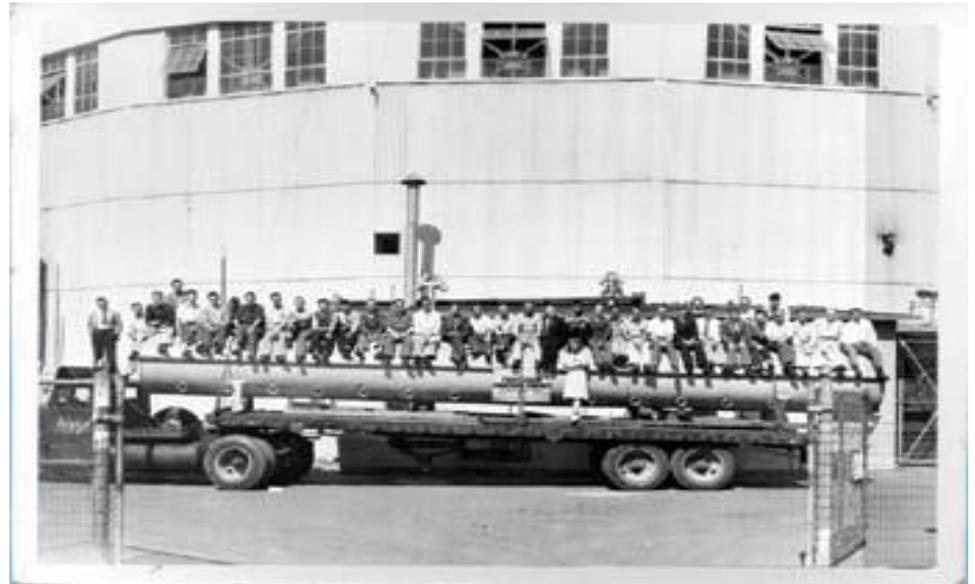


# Les Linacs pour électrons

- 1948 : Ginzton, Hansen, Kennedy construisent le 1er Linac pour électrons à l'université de Stanford .
- Structure à onde progressive de 3.6 m de longueur pour 6 MeV.
- La fréquence 3 GHz, la plus élevée pour laquelle il existait des magnétrons de puissance 1 MW, permet une réduction significative de la taille.



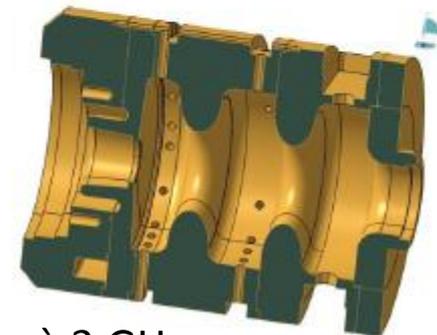
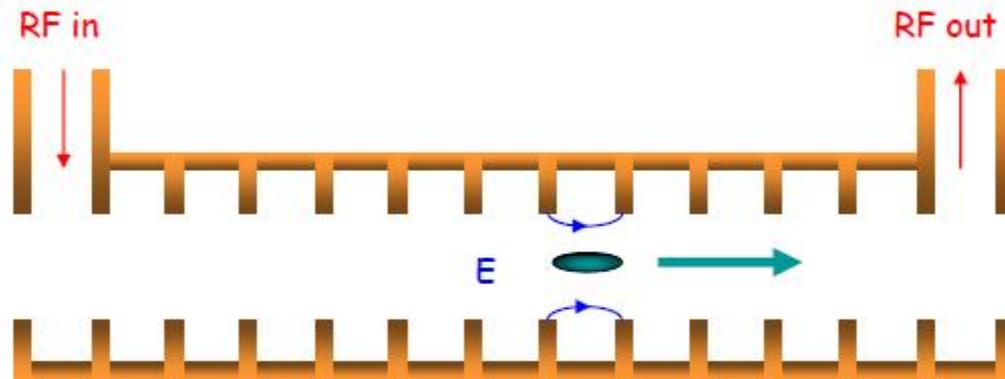
William Hansen et ses collègues avec une structure 3 GHz



Pour comparaison, le linac Alvarez 202 MHz en 1947 avec l'équipe de Berkeley

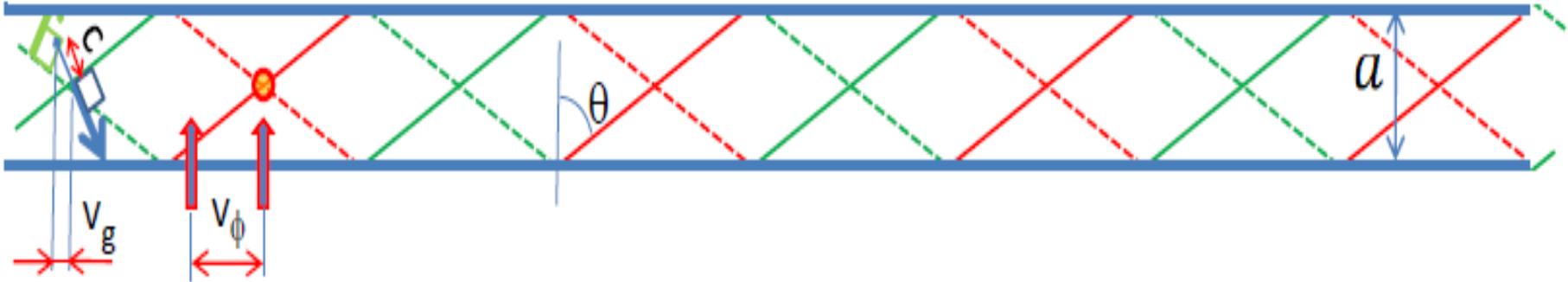
# Structures chargées par des iris

- Dans les guides d'onde la vitesse de phase des ondes e.m. est supérieure à  $c$ , donc a fortiori à la vitesse des particules.
  - 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.



Photoinjecteur à 3 GHz

# Vitesse de phase dans un guide d'onde



$$v_g = c \sin \theta \quad \lambda = 2a \cos \theta \Rightarrow \lambda_c = 2a$$

$$v_\phi = \frac{c}{\sin \theta}$$

$$v_g v_\phi = c^2$$

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

# Produire de la puissance RF

- Le développement du Radar durant la seconde guerre à permis de disposer de tube électronique hyperfréquence.

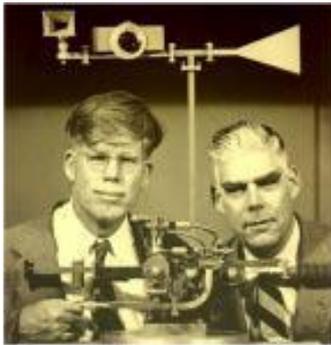


Fig. 5 - Russell and Sigurd Varian

Les frères Variant et leur 1er klystron en 1937

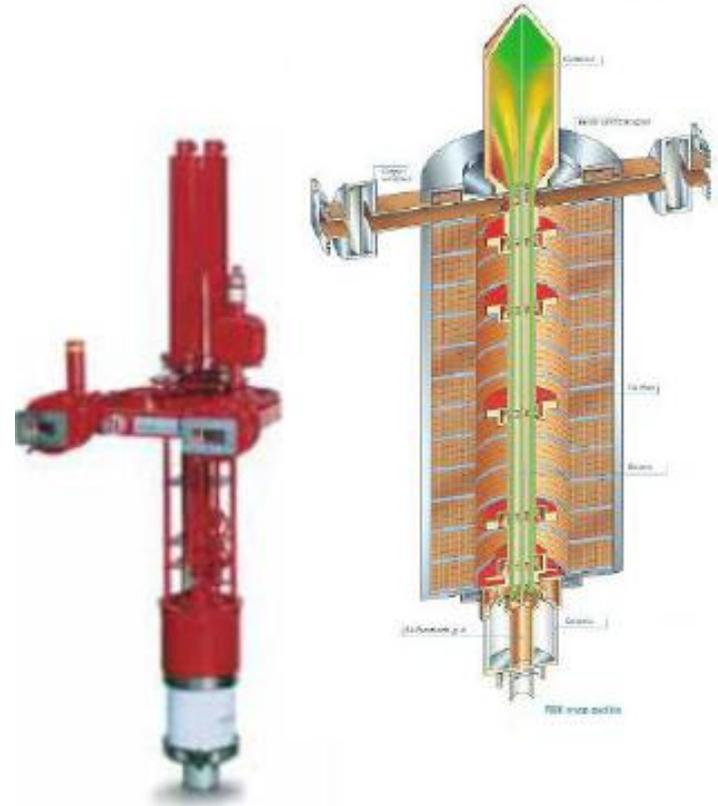


Fig. 7 - The Varian Two-Cavity Klystron



Fig. 9 - The First Megawatt Klystron

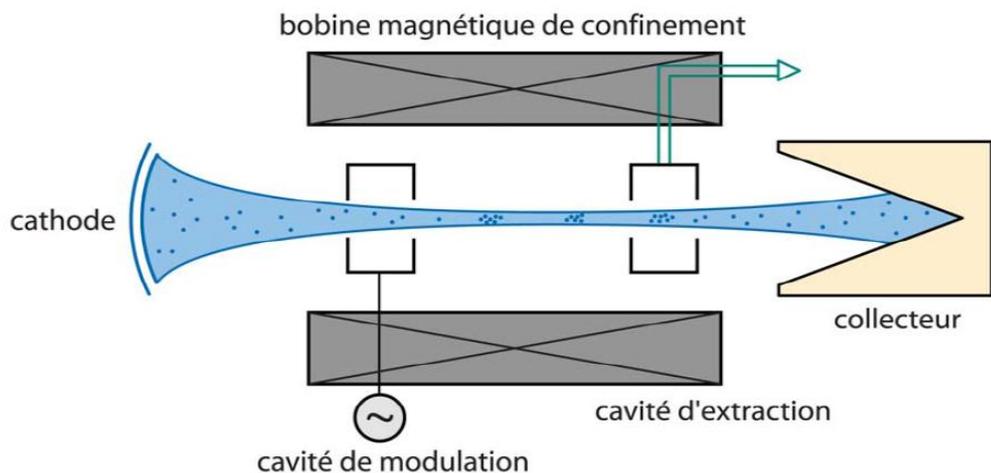
1948 : klystron 20 MW 1  $\mu$ s



TH 2132 - 45 MW peak in S band, in short pulse mode operation at 2.9985 GHz

# Fonctionnement du klystron

- Pour fournir la puissance RF à un accélérateur on utilise d'autres accélérateurs d'électrons !
- Principe: modulation de vitesse du faisceau (non relativiste)



**Modulateur**  
Stockage de l'énergie dans des condensateurs chargés entre les pulses entre 20 et 50 kV  
Fermeture du circuit (thyatron)  
transformateur de tension  
Durée de l'impulsion qq  $\mu$ s

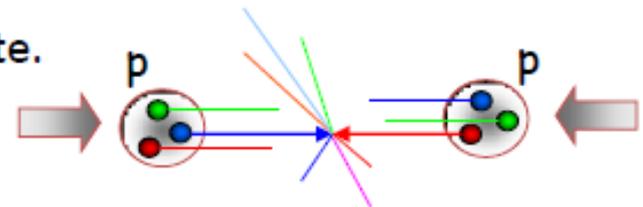
**Klystron**  
 $U$  150 -500 kV  
 $I$  100 -500 A  
 $f$  0.2 -20 GHz  
 $P_{ave} < 1.5$  MW  
 $P_{peak} < 150$  MW  
rendement 40-70%

# Grands projets utilisant des Linacs pour électrons

- XFEL : Laser a électrons libres (en construction)
- ILC et CLIC : projets de collisionneurs  $e^-/e^+$  de 500 GeV et 3 TeV

**Collisionneurs de Hadrons** : machines de découverte.

- Très nombreuses interactions possibles
- Energie répartie entre les quarks



**Collisionneurs de leptons** : machines pour des mesures précises

- Energie bien définie dans le c.m.
- Faisceaux polarisés



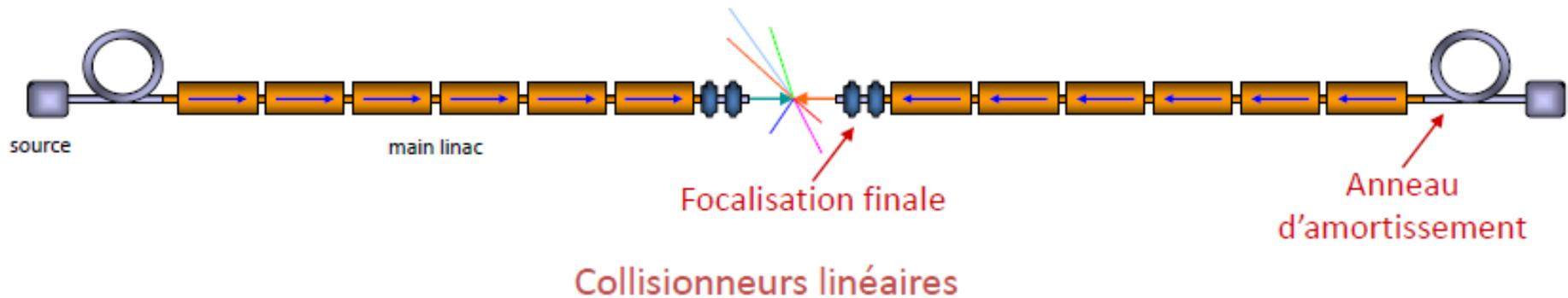
**Après le LHC :**

Consensus pour un Collisionneur Linéaire  
d' $e^+ e^-$  avec  $E_{cm} > 500$  GeV  
(*European strategy for particle physics by  
CERN Council*)

**Solution « exotique » :**

Collisionneur circulaire  
à muons

# Contraintes importantes

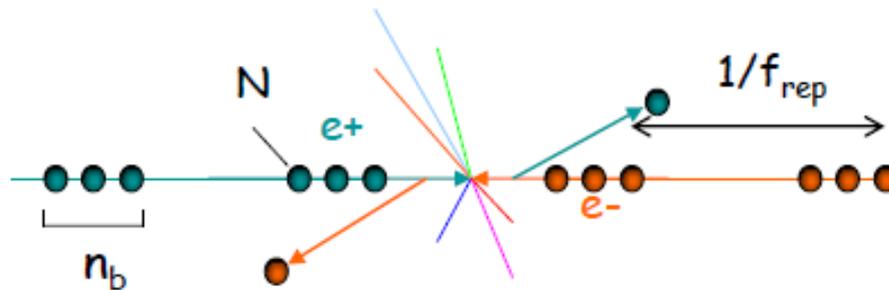


- Energie acquise en un seul passage.
  - nécessite un fort gradient d'accélération afin de limiter la taille de la machine.
- Collision unique.
  - nécessite un faisceau très dense pour obtenir une bonne **luminosité**.
  - taille donc émittance du faisceau très petite, fréquence de répétition élevée, alignement et stabilité de la machine critiques
  - nécessite d'optimiser l'efficacité énergétique (de la prise au faisceau)

# Gradient d'accélération et luminosité

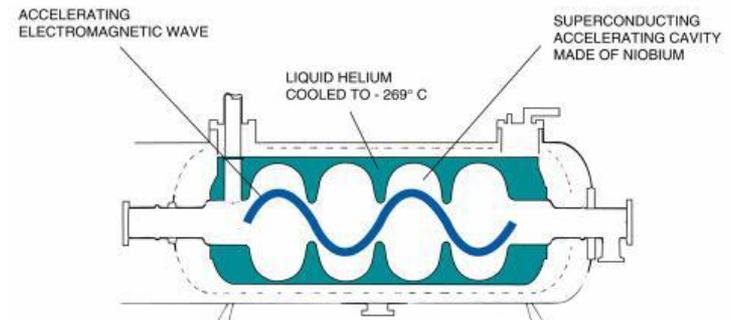
Energie atteinte  $E_{cm} = 2 F_{fill} L_{linac} G_{RF}$

Luminosité  $L = \frac{n_b N^2 f_{rep}}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*}$   $\sigma_{x,y}$  : tailles transverses du faisceau



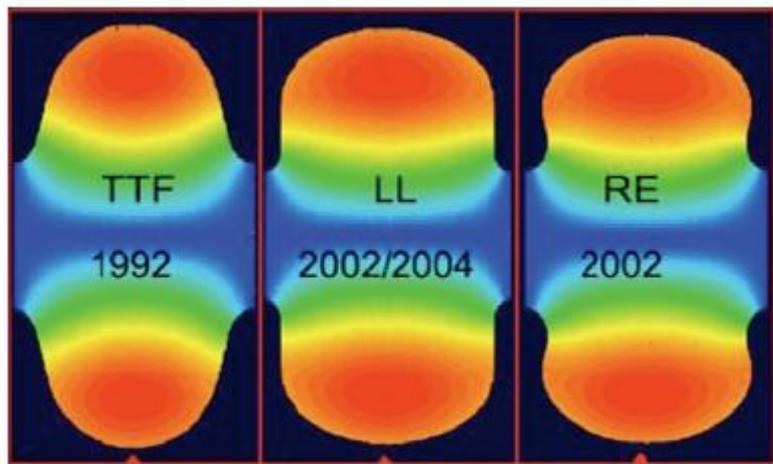
# Les cavités supraconductrices (avantages)

- Très faibles pertes dues à la résistance de surface (très grand facteur de qualité  $qq 10^9$ ),
  - Fonctionnement en onde stationnaire avec 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.
  - contrôle possible par boucle de contre-réaction pendant le train de pulse.



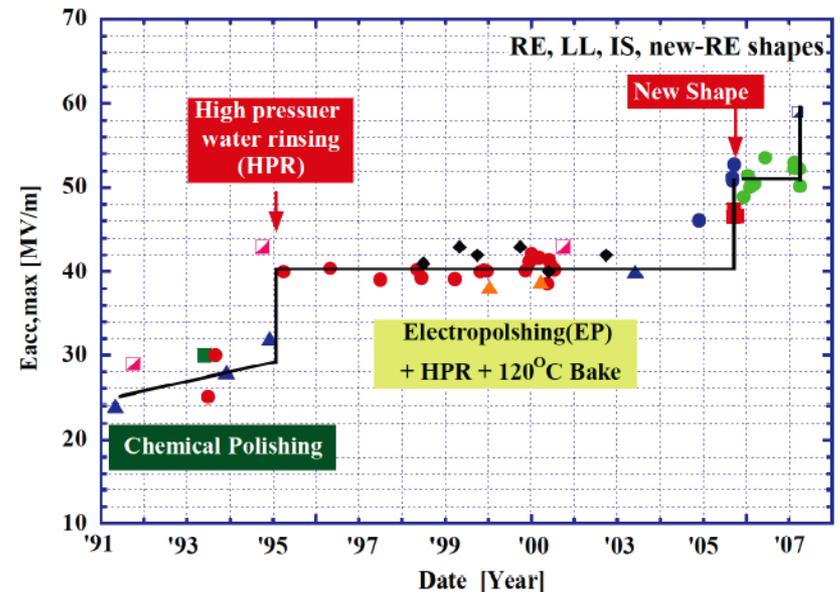
# Les cavités supraconductrices : l'inconvénient

- Le champ  $E_{acc}$  est limité par le champ  $B_{crit}$  (quench).
- record :  $\sim 59$  MV/m pour une cavité seule,  
 $\sim 32$  MV/m pour structure multi-cavités.



TTF = TESLA, LL: low-loss, RE: re-entrant

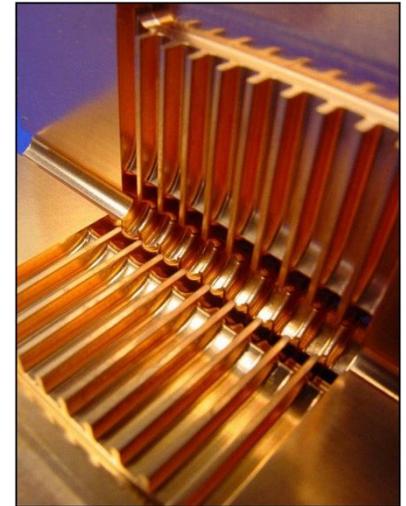
Optimisation de la forme



Amélioration de l'état de surface

# Structures accélératrices normales (résistives)

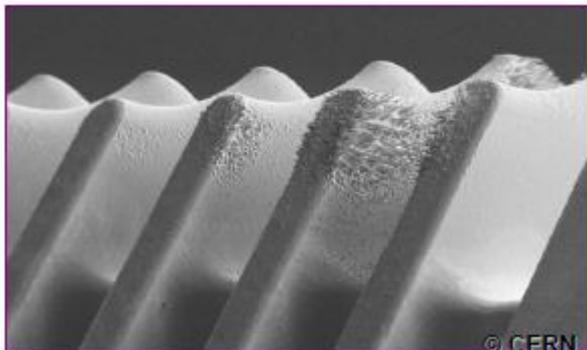
- Le champ accélérateur  $E_{acc}$  est limité par les claquages  $> 100$  MV/m.
- MAIS il faut utiliser des fréquences élevées  $> 10$  GHz et des impulsions très courtes:  $< 1\mu s$ 
  - fonctionnement en onde progressive
  - (temps de remplissage  $t_{fill} = \int \frac{1}{v_g} dz$ )
- Pertes ohmiques importantes (Q plus faible que pour les supra)



- Très forte puissance RF requise ( $\sim 200$  MW crête par mètre de structure)
- Dimensions réduites (usinage plus difficiles) et fort champ de sillage
- nécessité d'amortir les HOM (high order modes)

# Le record actuel

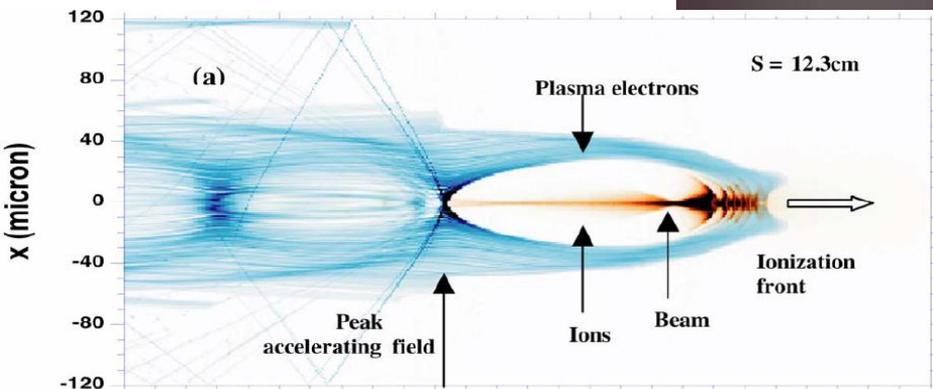
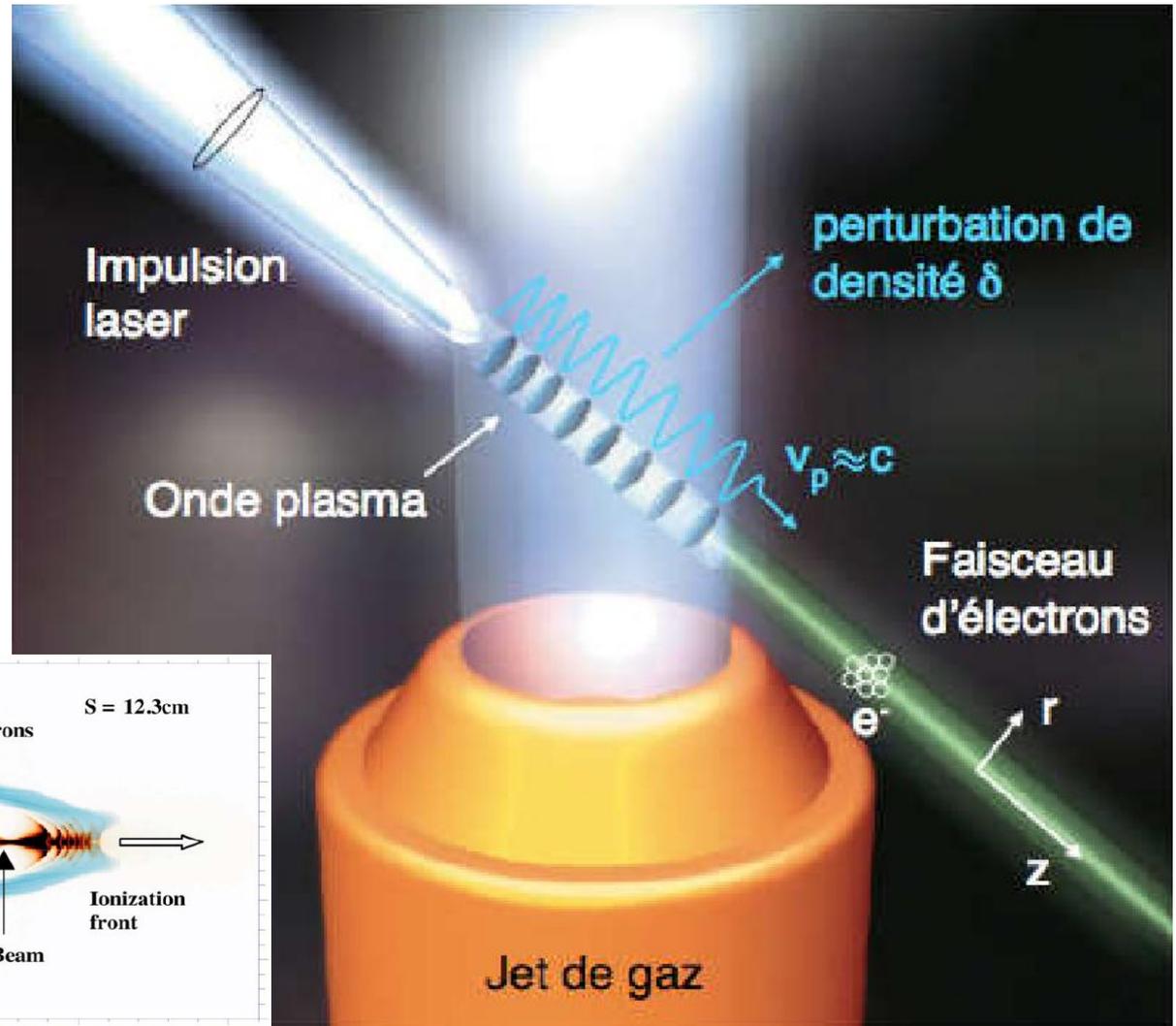
- type CLIC
- Conçue au CERN
- Construite par KEK
- Testée au SLAC
- $E_{acc} = 106 \text{ MV/m}$
- 11.424 GHz
- 230 ns pulse length
- taux de claquage  $10^{-6} / \text{m}$



Endommagement des surfaces

Frequency	11.424	GHz
Cells	18+input+output	
Filling Time	36	ns
Length	29	cm
Iris Dia. $a/\lambda$	15.5~10.1	%
Group Velocity: $v_g/c$	2.61-1.02	%
$S_{11}/S_{21}$	0.035/0.8	
Phase Advance Per Cell	$2\pi/3$	
Power Needed $\langle E_a \rangle = 100 \text{ MV/m}$	55.5	MW

# L'accélération plasma



# Un fort potentiel de recherches

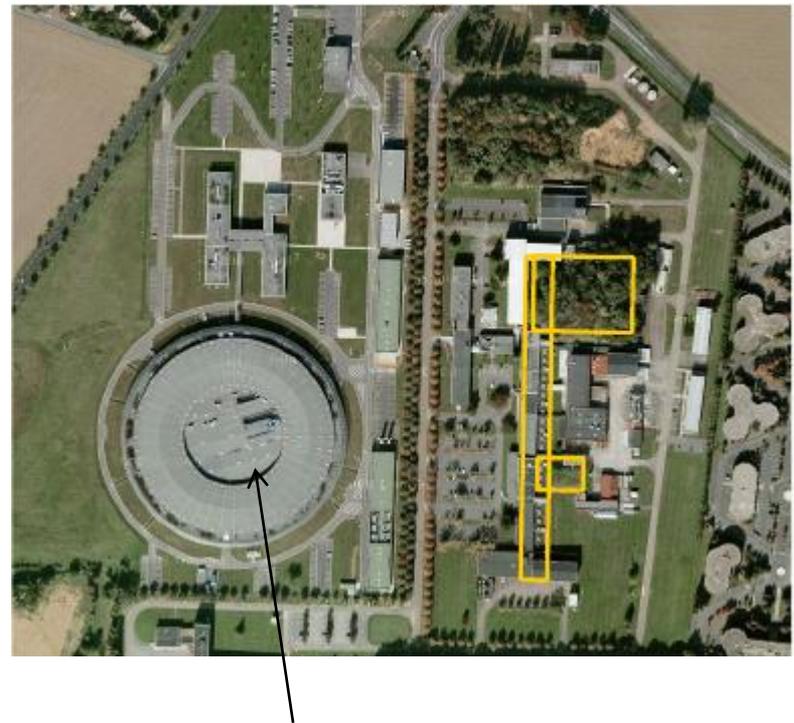
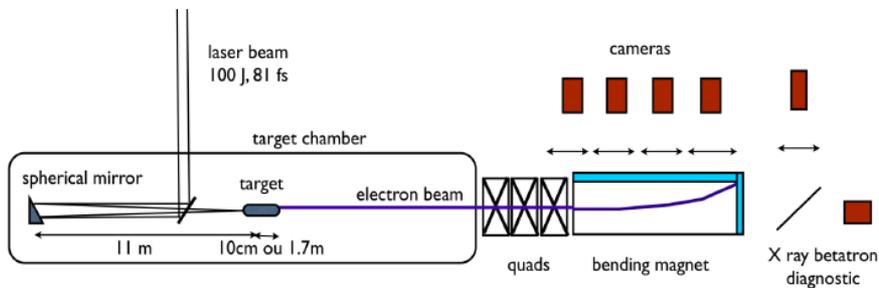
- Idée soumise par Tajima en 1979.
- Possibilité de gradients accélérateurs de **100 GeV/m!**
- Passage d'un faisceau de 40 GeV à 80 GeV en 1 m!  
*Nature* **445**, 741-744 (15 February 2007)
- MAIS forte recherche pour obtenir:
  - Un bon taux de répétition
  - Un faisceau de bonne qualité
  - Une bonne reproduction des propriétés
  - Une forte intensité
  - Un bon rendement à la prise
- BREF beaucoup de développements à la clé.



# Exemple de centre dédié CILEX

- CILEX : Centre Interdisciplinaire de Lumière EXtrême.
- EquipeX doté de 20 M€.
- Laser APOLLON
  - 10 PW, pulses de 15 fs, 100 J
- 5000 m<sup>2</sup> de régions expérimentales radio-protégées.

En exploitation dès 2013.



Synchrotron SOLEIL

# Pour rejoindre le monde des accélérateurs

- **Master 2**
  - APIM, Paris Sud
- **Ecoles:**
  - JUAS Archamps IPAM Paris
  - CAS Cern Accelerator School
- **Web based lectures:**
  - US Particle Accelerator Schools : <http://www.lns.cornell.edu/~dugan/USPAS/>
  - CERN Particle Accelerator Schools: <http://cas.web.cern.ch/cas/> Nicolas Pichoff
  - SFP : [http://nicolas.pichoff.perso.sfr.fr/index\\_fichiers/slide0001.htm](http://nicolas.pichoff.perso.sfr.fr/index_fichiers/slide0001.htm)

**UN GRAND MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION**

# Bibliographie utilisée

- Ecole IN2P3 « De la Physique au Détecteur » - Eric Baron – GANIL
- Panorama des Accélérateurs de Particules – Patrick Ausset - IPN
- Accelerator Physics – Hans Peter Beck
- RF Acceleration in Linacs – Sebastien Bousson – IPN Orsay - NPAC
- Dynamics and acceleration in Linear structures – Joel Le Duff
- RF for Accelerators – Maurizio Vretenar - CERN BE/RF
- Microtrons and Recirculation – Andreas Jankowiak – Inst. für Kernphysik
- Avec un grand merci pour Wifrid Faraboni pour m'avoir permis d'utiliser ses transparents.