

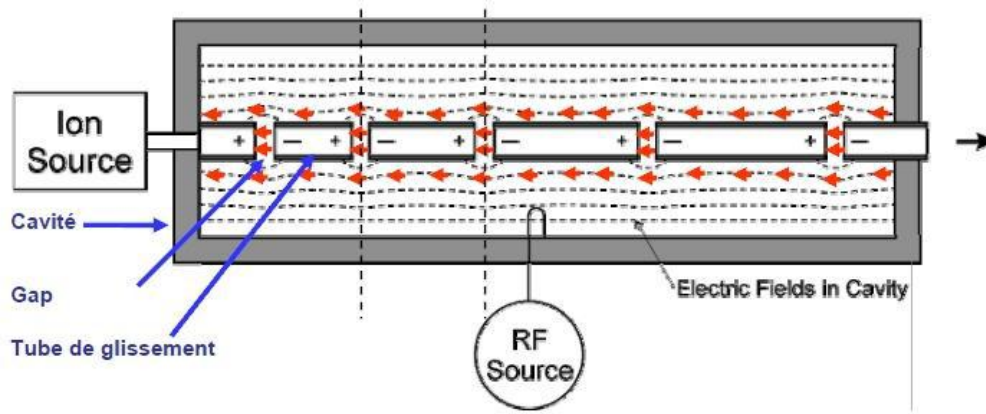
Les accélérateurs de particules

3^{eme} partie

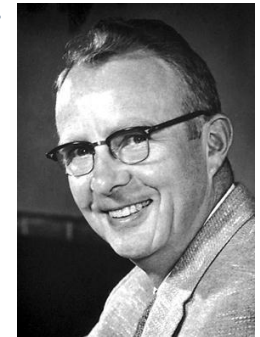
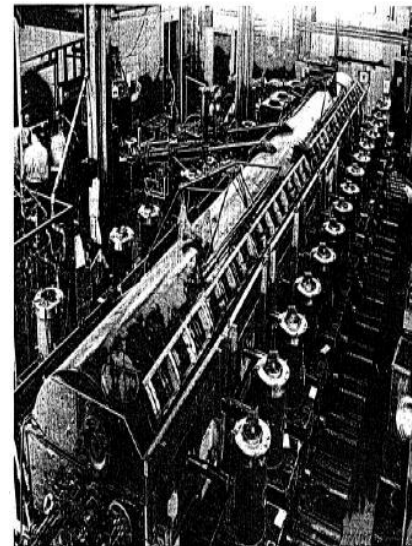
antoine.chance@cea.fr

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.



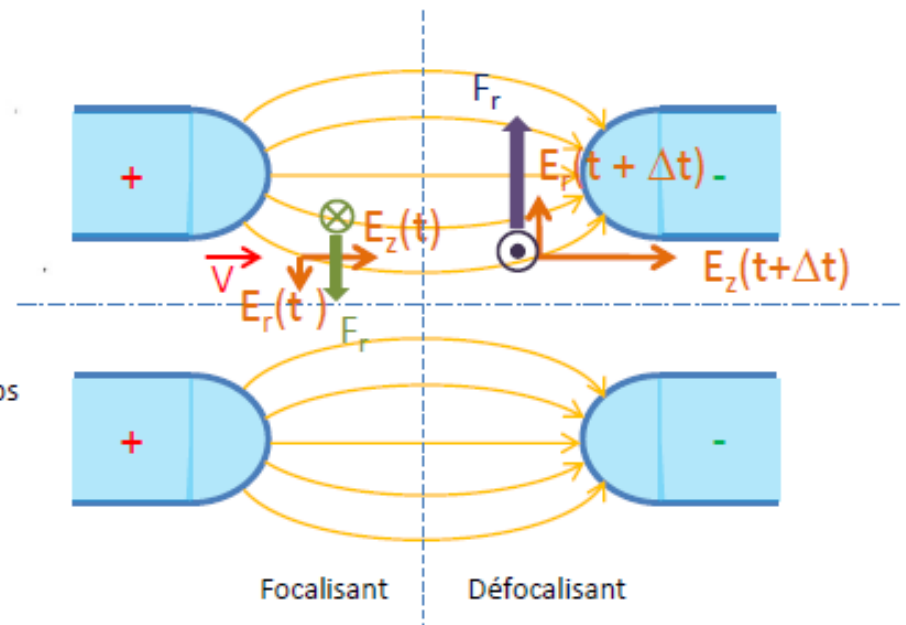
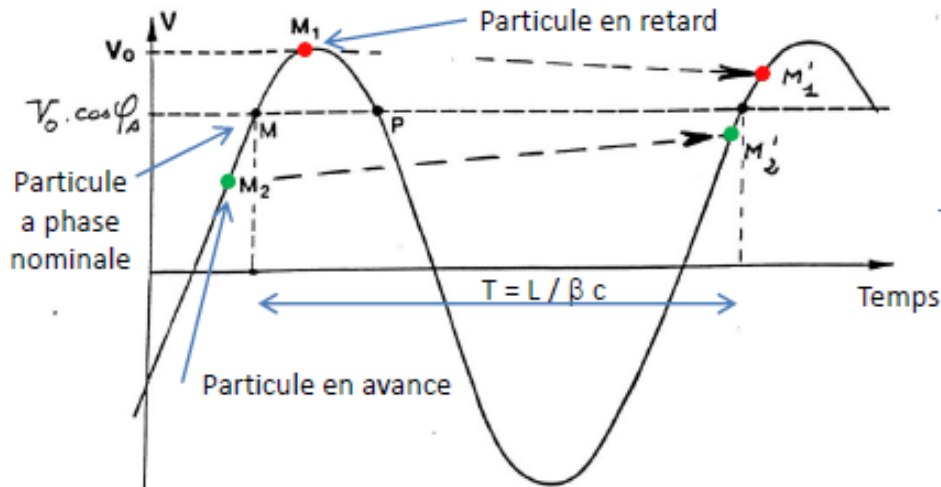
Drift Tube Linac : DTL



Luis Alvarez

Problème de stabilité

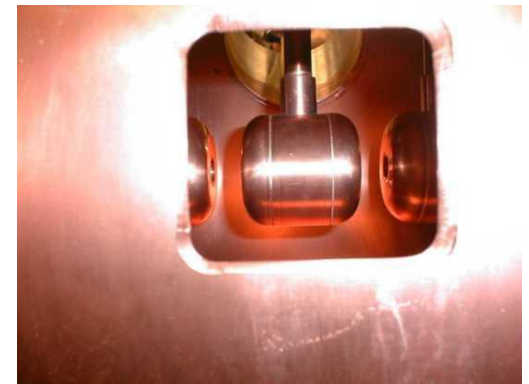
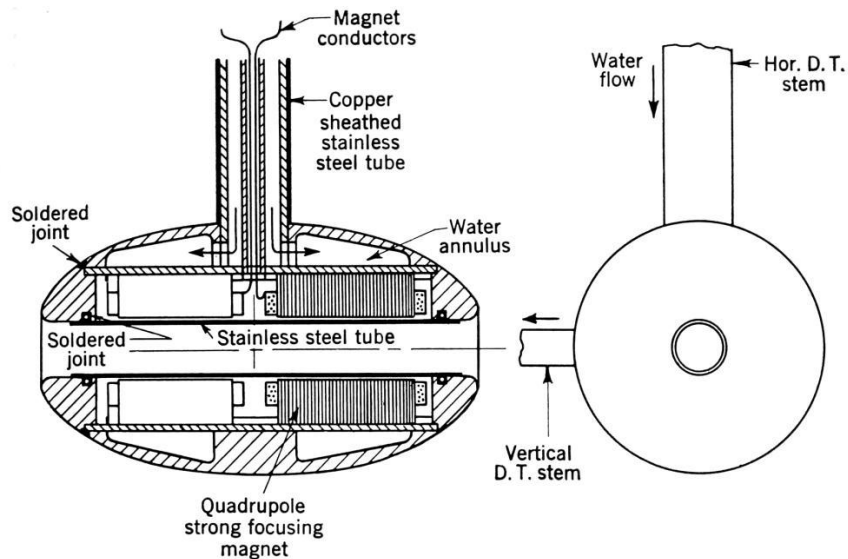
- La stabilité longitudinale exige que les particules soient sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Mais c'est incompatible avec la focalisation transverse.



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)

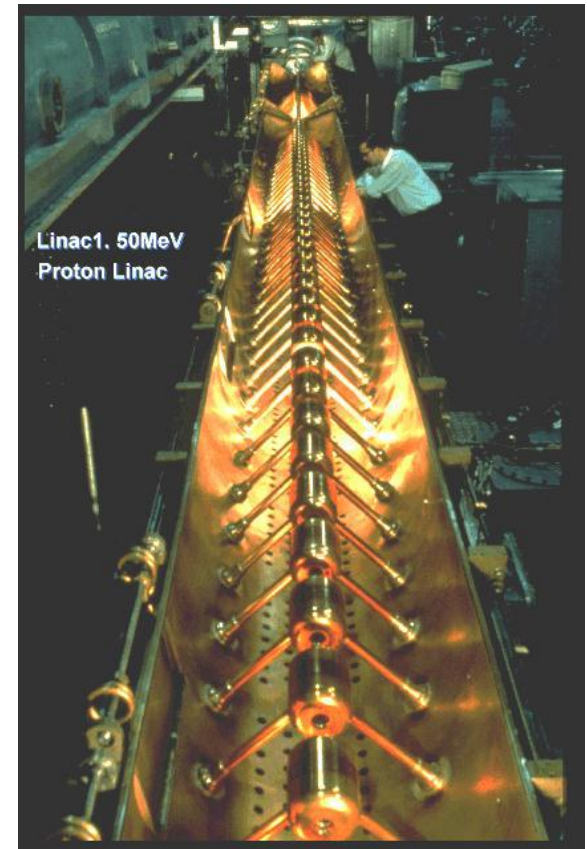
- Facilité d'injection et d'éjection par rapport aux machines circulaires
- Protons de 20 a 200 MeV, ions jusque 10 MeV/a
- Energie fixe pour un type d'ion



Drift tube LINAC – Lawrence Radiation Lab. 1957



LINAC injecteur du LHC



Cavité résonnante : le modèle pill-box

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

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

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

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

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

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

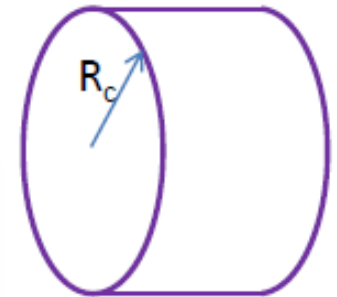
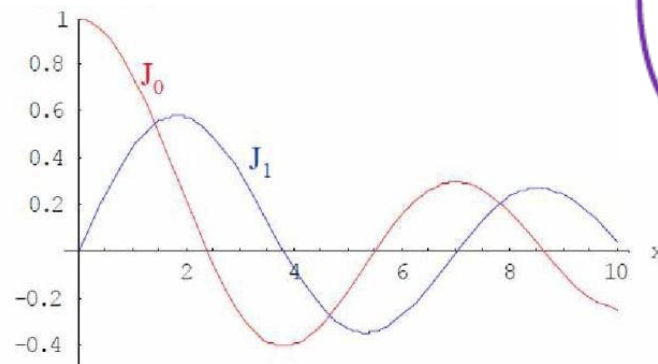
Dans le vide en prenant le rot des Eq. de Maxwell (idem pour B)

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

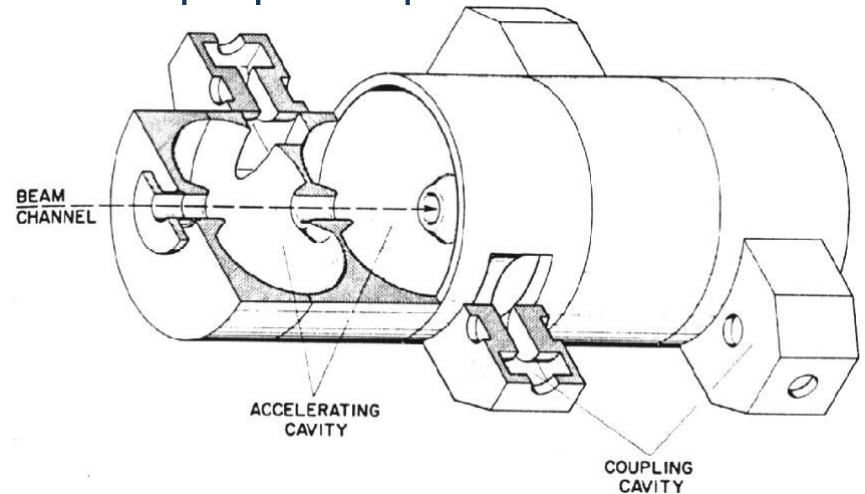
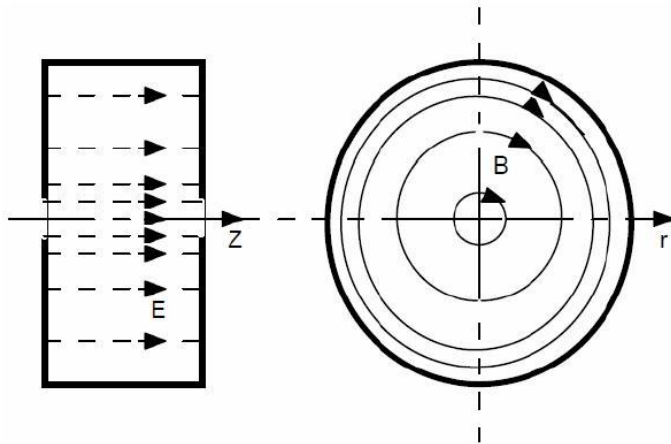
En considérant des solutions avec z comme axe de symétrie

J_0, J_1 : Fonctions de Bessel

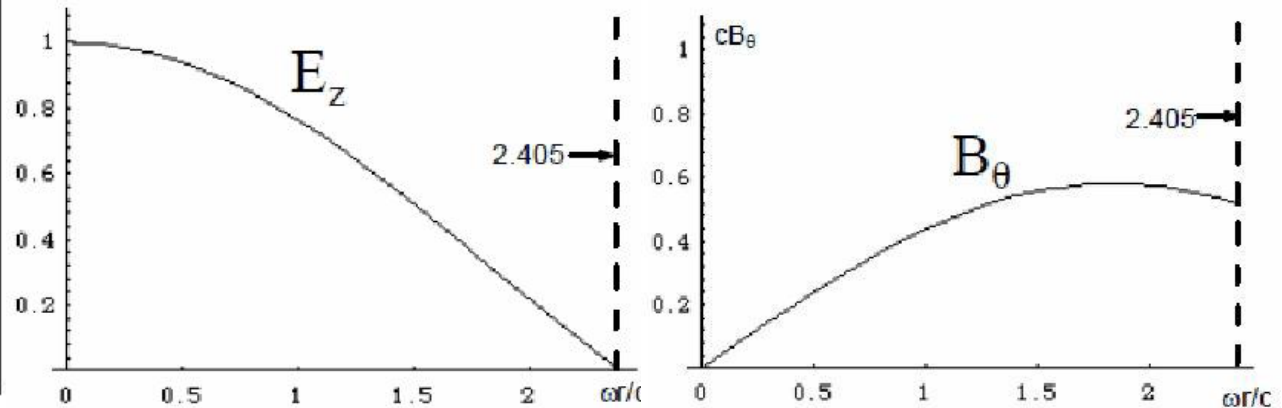
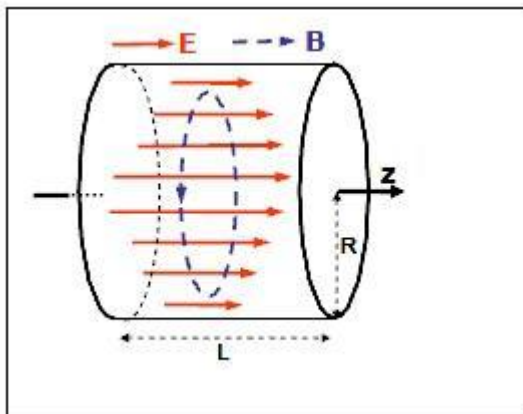


Mode TM_{010}

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

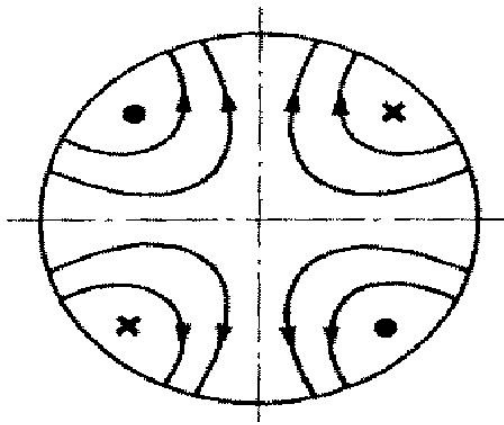


DTL a cavités couplées

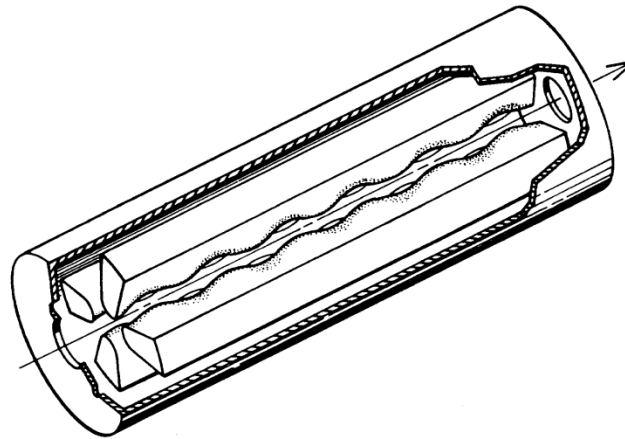


Mode TE_{010} : le RFQ

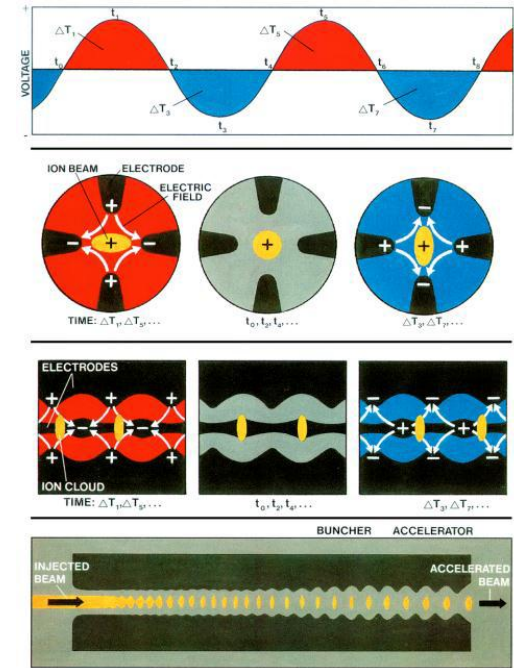
- Radio-Frequency Quadrupole : concept inventé en 1970 par Kapchiski and Teplyakov.
- Permet à la fois la **focalisation**, la **mise en paquets** avec un fort taux de capture et l'**accélération** jusqu'à quelques MeV.
- A remplacé les Cockcroft-Walton comme injecteur.



Mode TE_{010}



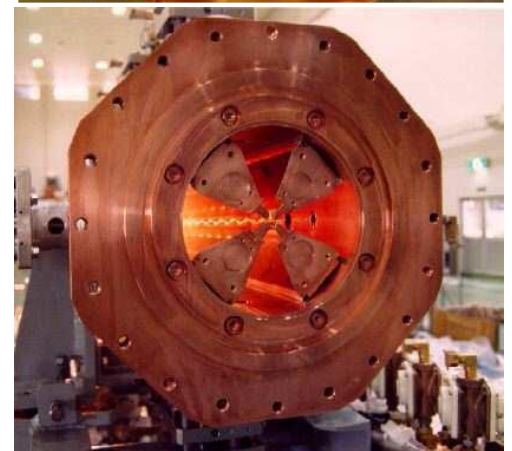
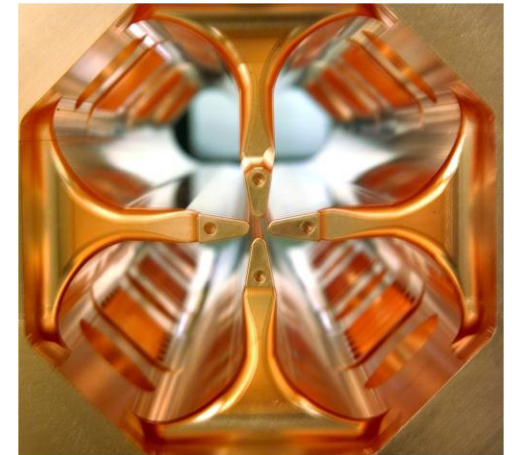
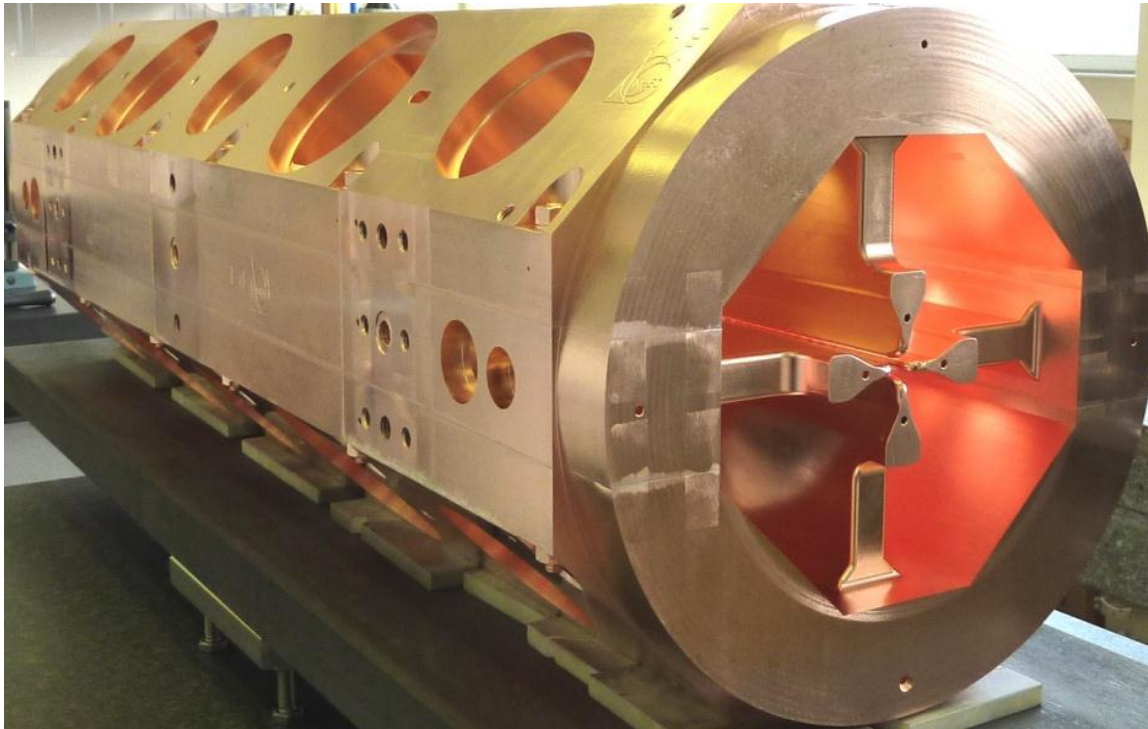
RFQ avec ses « vanes »



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

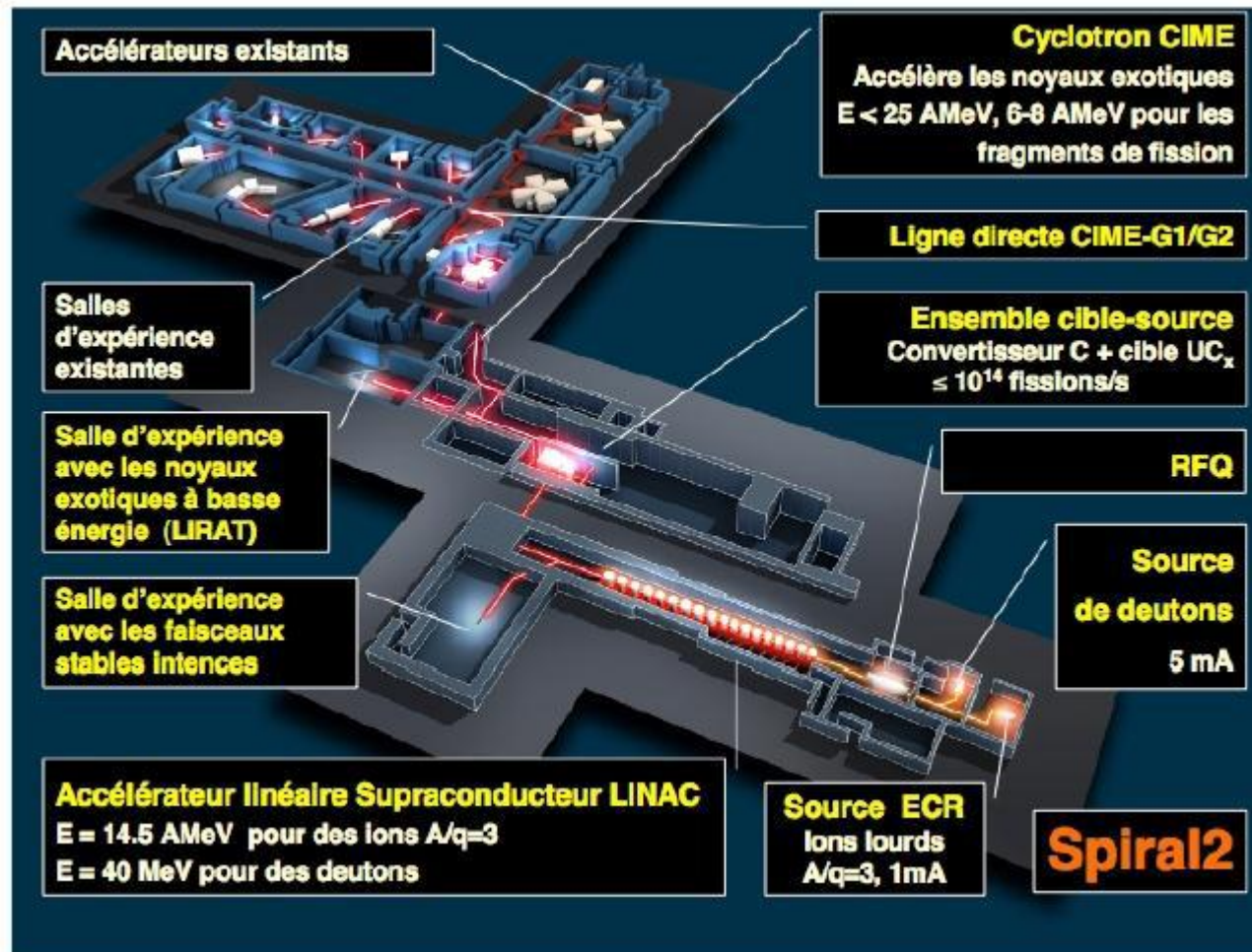
RFQ: une fabrication très délicate

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



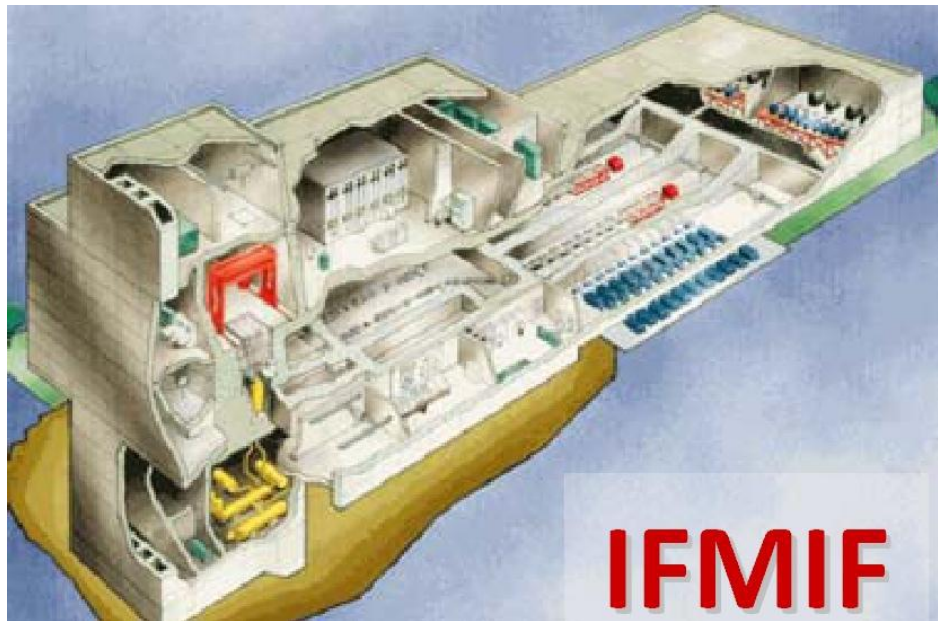
Grands projets utilisant des Linacs pour ions

- 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



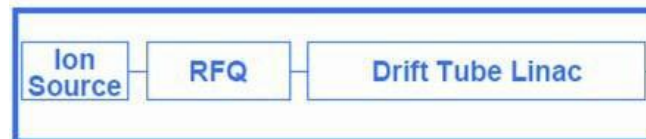
IFMIF

Liquid Li Jet

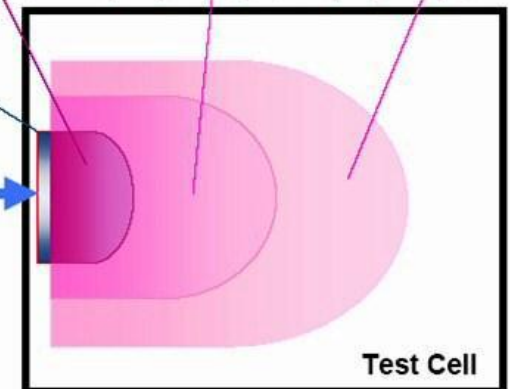
High flux
(>20 dpa, 0.5 L)

Medium flux
(20-1 dpa, 6 L)

Low flux
(<1 dpa, >8 L)



Deuteron Accelerator Region



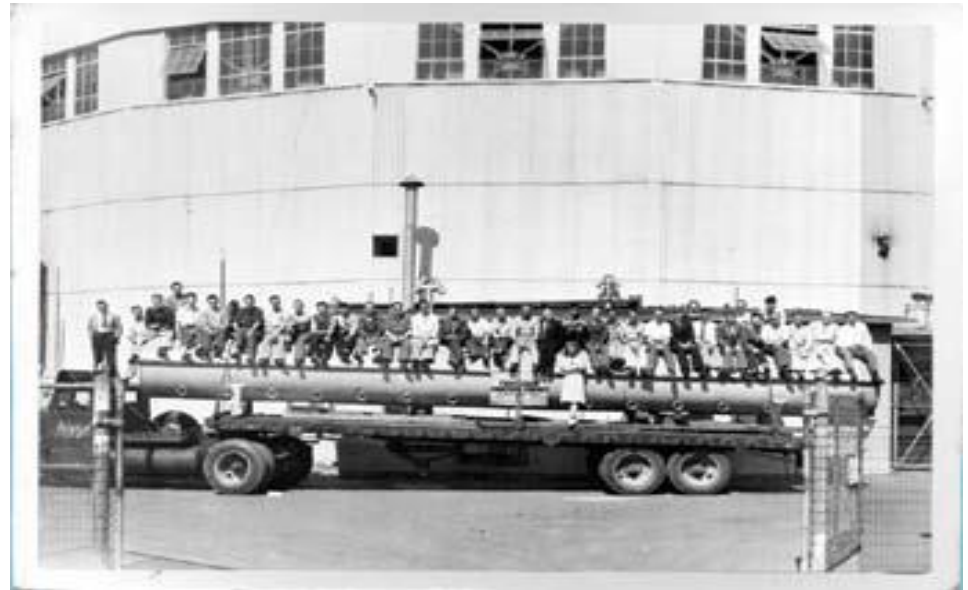
Test Cell

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.



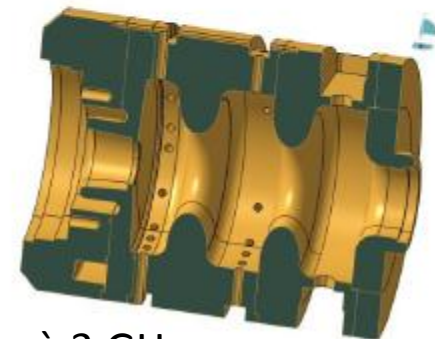
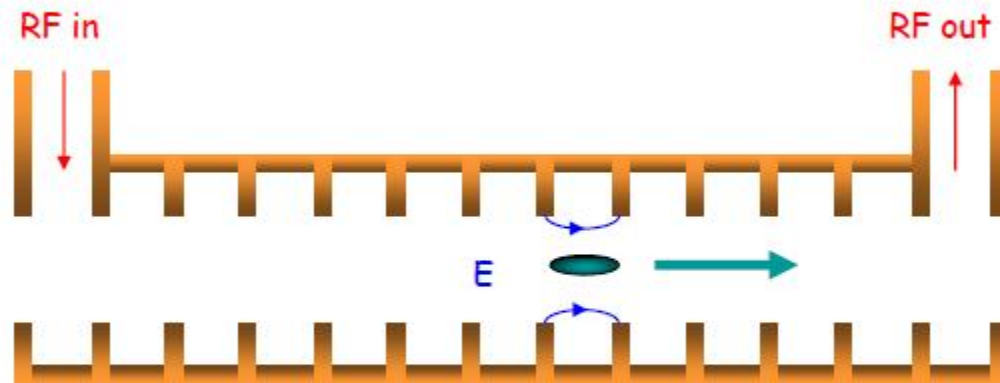
William Hansen et ses collègues avec une structure 3 GHz



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

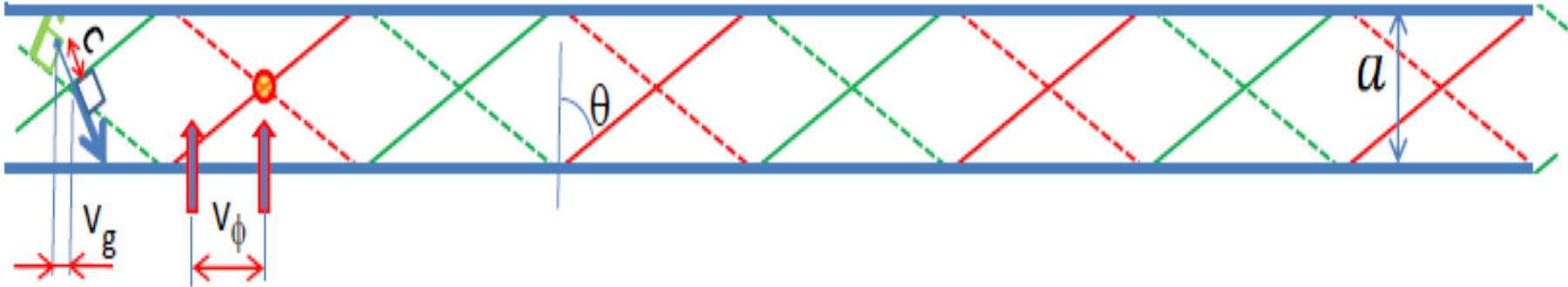
Structures chargées par des iris

- 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.

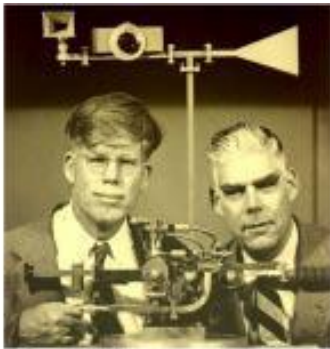


Fig. 5 - Russell and Sigurd Varian

Les frères Variant et leur 1er klystron en 1937

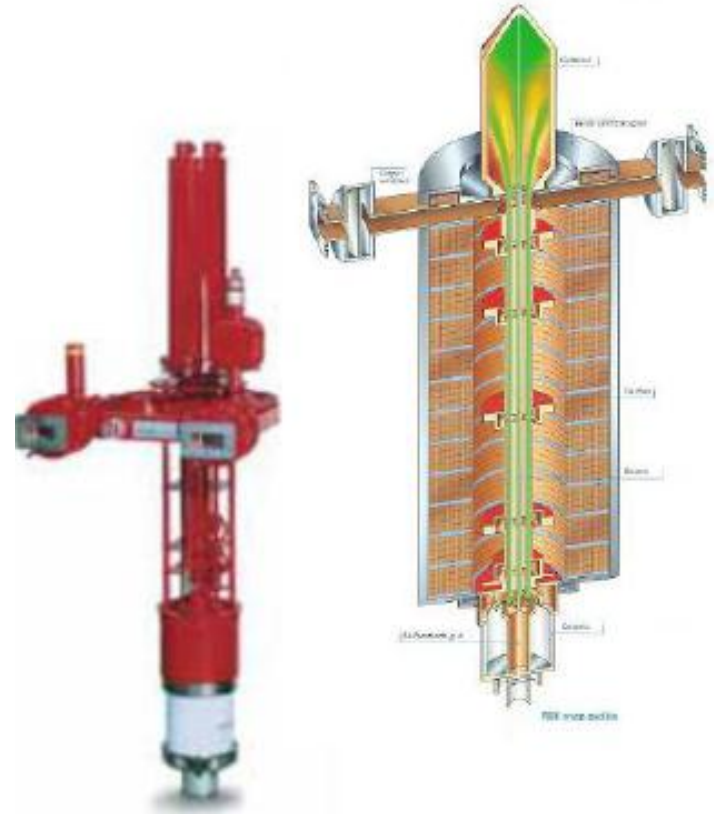


Fig. 7 - The Varian Two-Cavity Klystron



Fig. 9 - The First Megawatt Klystron

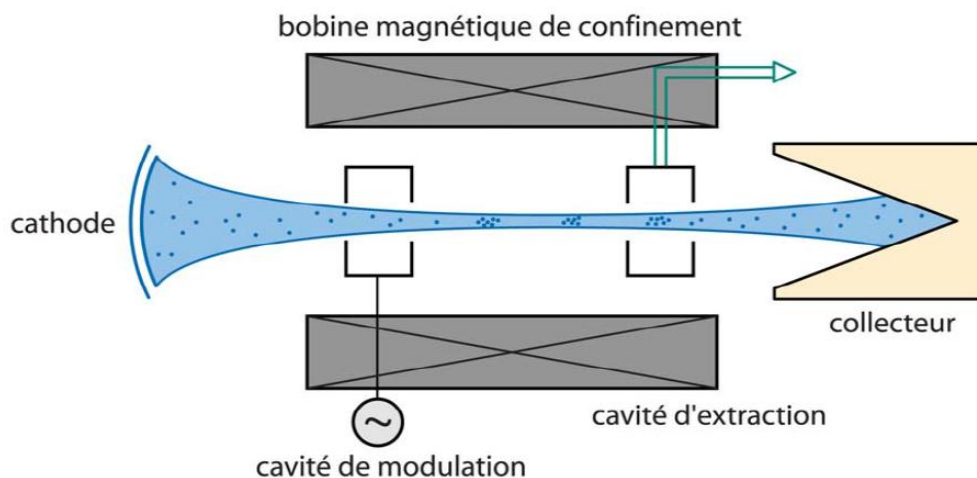
1948 : klystron 20 MW 1 μ s



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 μ s

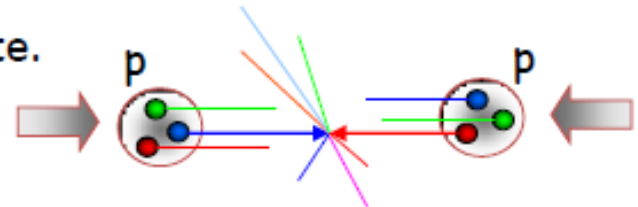
Klystron
 U 150 -500 kV
 I 100 -500 A
 f 0.2 -20 GHz
 $P_{ave} < 1.5$ MW
 $P_{peak} < 150$ MW
rendement 40-70%

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

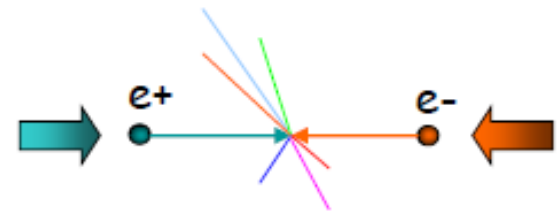
Collisionneurs de Hadrons : machines de découverte.

- 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



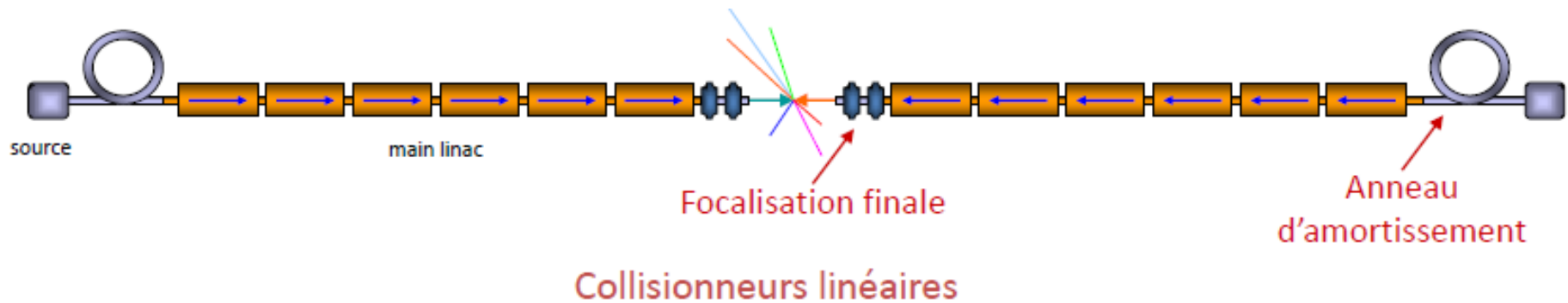
Après le LHC :

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

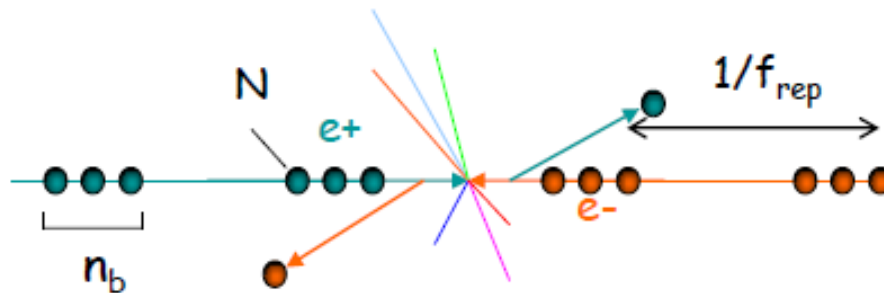


- Energie acquise en un seul passage.
 - nécessite un fort gradient d'accélération afin de limiter la taille de la machine.
- Collision unique.
 - nécessite un faisceau très dense pour obtenir une bonne **luminosité**.
 - taille donc émittance du faisceau très petite, fréquence de répétition élevée,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

Gradient d'accélération et luminosité

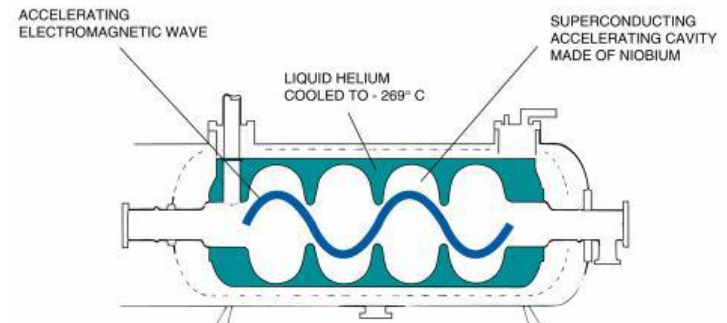
Energie atteinte $E_{cm} = 2 F_{fill} L_{linac} G_{RF}$

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



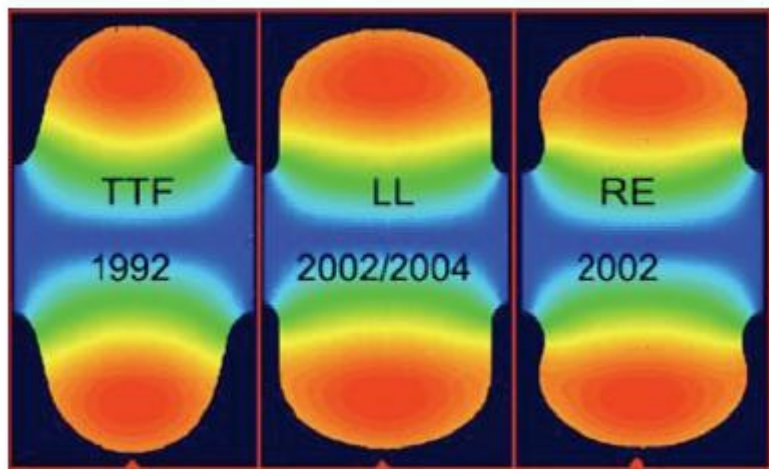
Les cavités supraconductrices (avantages)

- 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.



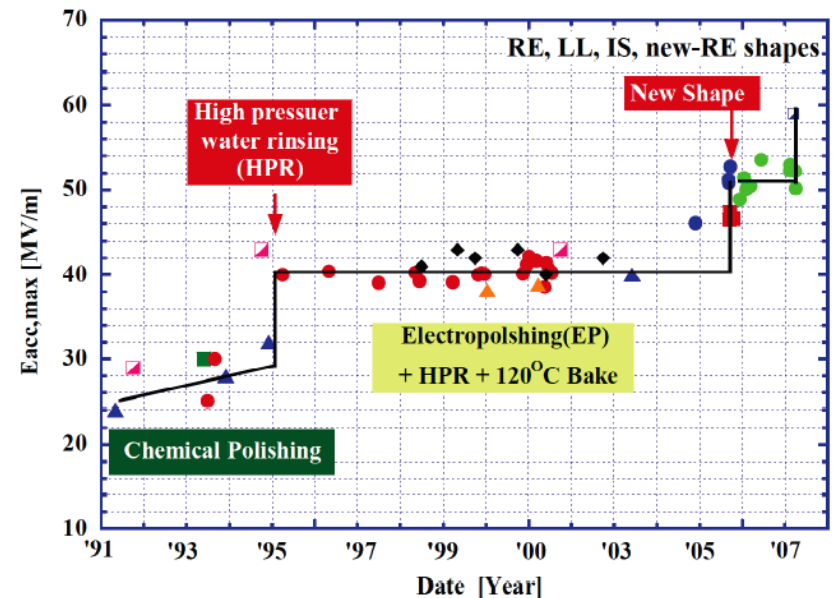
Les cavités supraconductrices : l'inconvénient

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



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

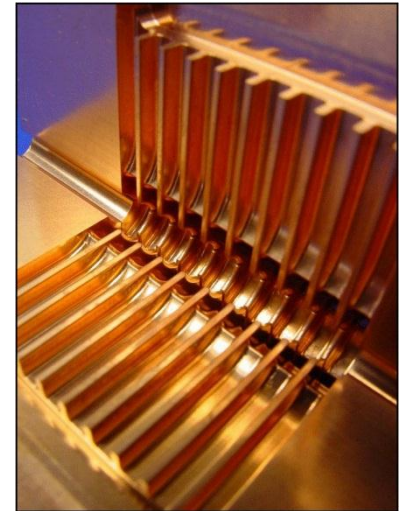
Optimisation de la forme



Amélioration de l'état de surface

Structures accélératrices normales (résistives)

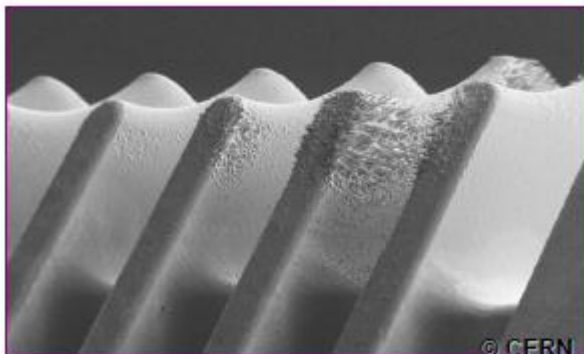
- Le champ accélérateur E_{acc} est limité par les claquages > 100 MV/m.
- MAIS il faut utiliser des fréquences élevées > 10 GHz et des impulsions très courtes: $< 1\mu s$
 - fonctionnement en onde progressive
 - (temps de remplissage $t_{fill} = \int \frac{1}{v_g} dz$)
- Pertes ohmiques importantes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



- Très forte puissance RF requise (~ 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

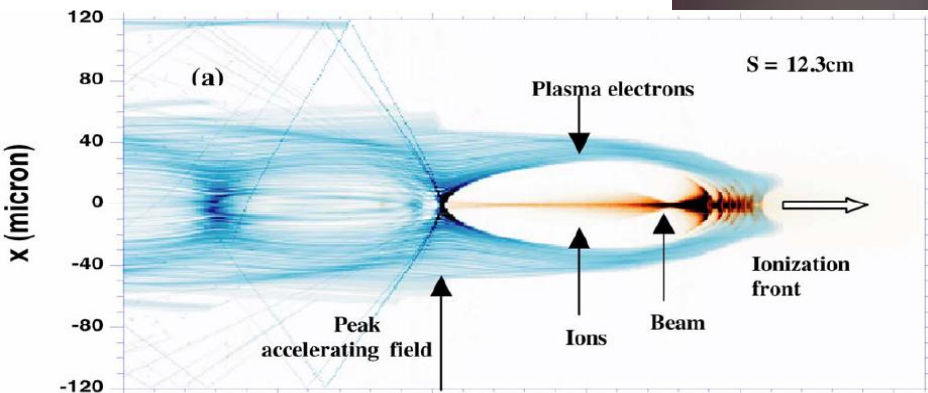
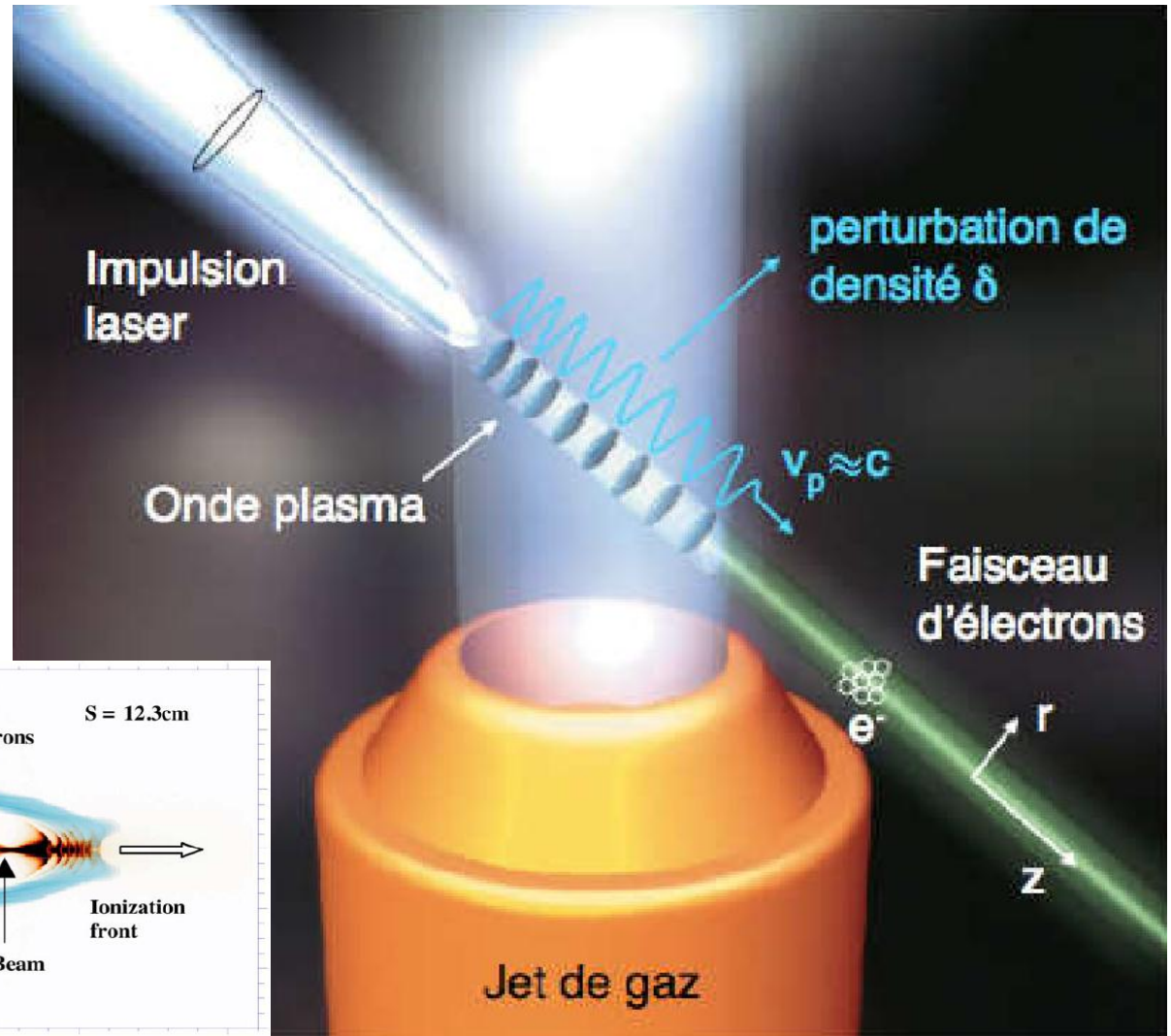
- type CLIC
- Conçue au CERN
- Construite par KEK
- Testée au SLAC
- $E_{acc} = 106 \text{ MV/m}$
- 11.424 GHz
- 230 ns pulse length
- taux de claquage $10^{-6} / \text{m}$



Endommagement des surfaces

Frequency	11.424	GHz
Cells	18+input+output	
Filling Time	36	ns
Length	29	cm
Iris Dia. a/λ	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

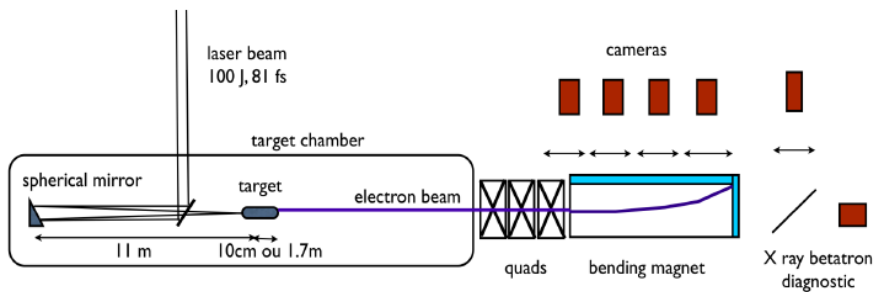
- Idée soumise par Tajima en 1979.
- Possibilité de gradients accélérateurs de **100 GeV/m!**
- Passage d'un faisceau de 40 GeV à 80 GeV en 1 m!
Nature **445**, 741-744 (15 February 2007)
- MAIS forte recherche pour obtenir:
 - Un bon taux de répétition
 - Un faisceau de bonne qualité
 - Une bonne reproduction 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 m² 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

**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.