



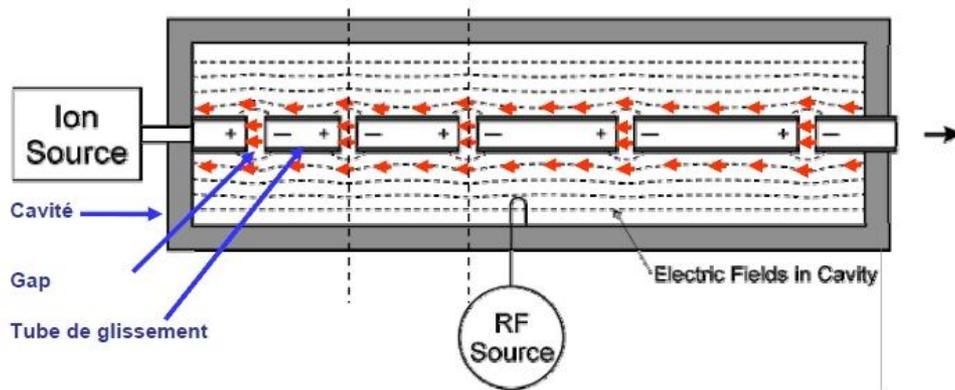
Les accélérateurs de particules

Les Accélérateurs Linéaires

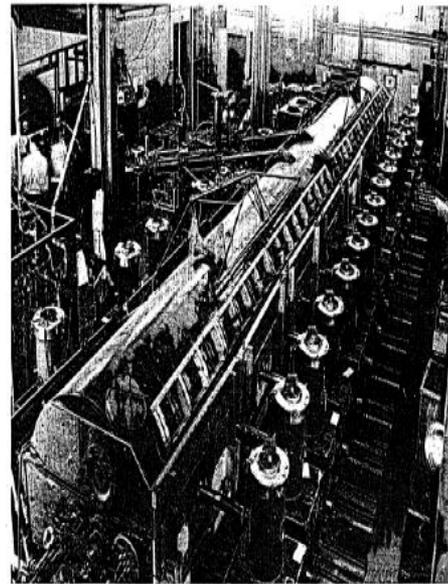
Wilfrid.Farabolini@cern.ch

Les premiers Linac

- 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 $\propto C V$)
- 1947 : Luis Alvarez place les tubes de glissement dans une cavité résonnante en mode TM_{01} 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.
- Des H^+ sont accélérés a 32 MeV avec 2.2 MW de puissance RF



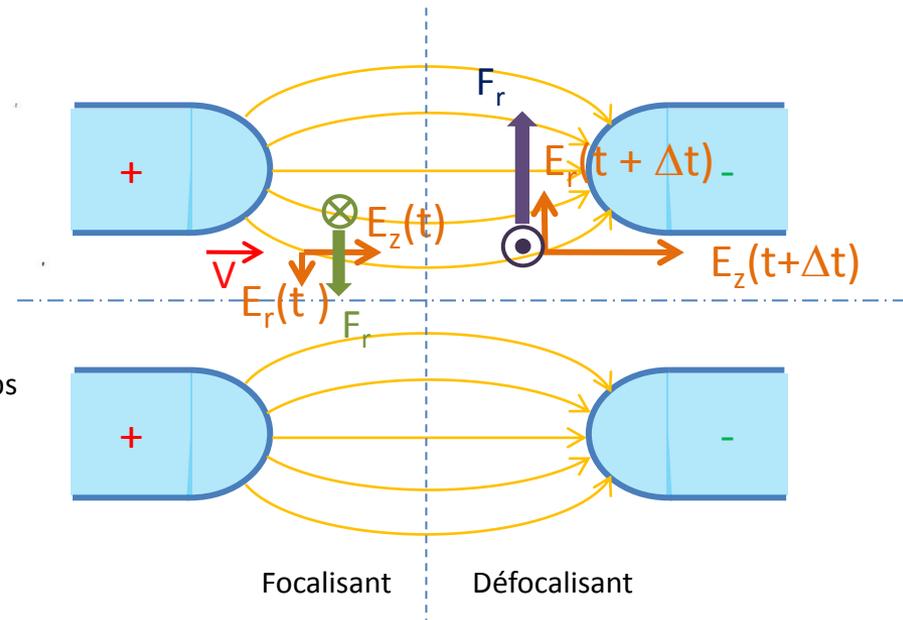
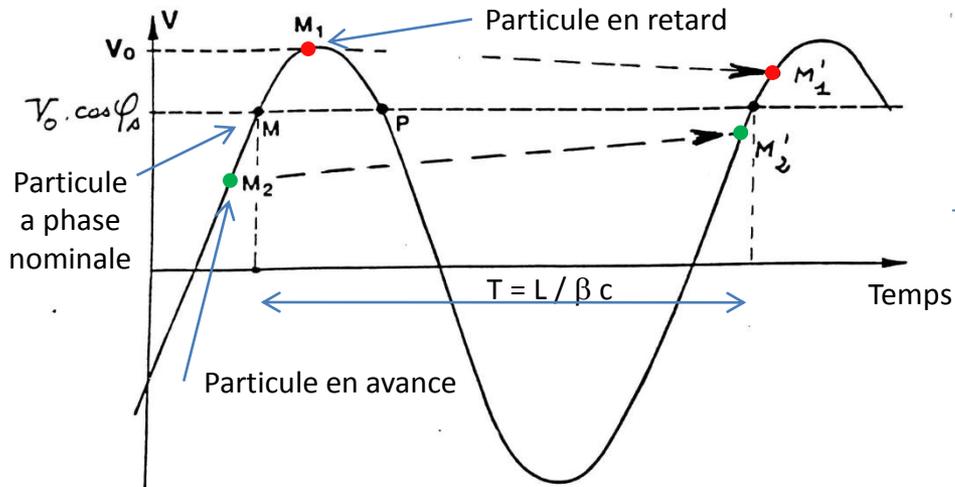
Drift Tube Linac : DTL



Luis Alvarez

Problème de stabilité

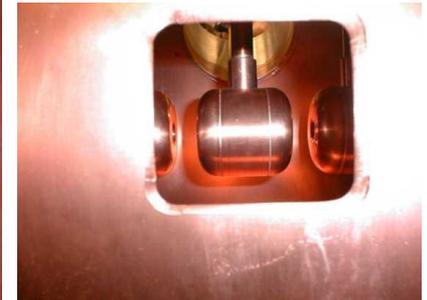
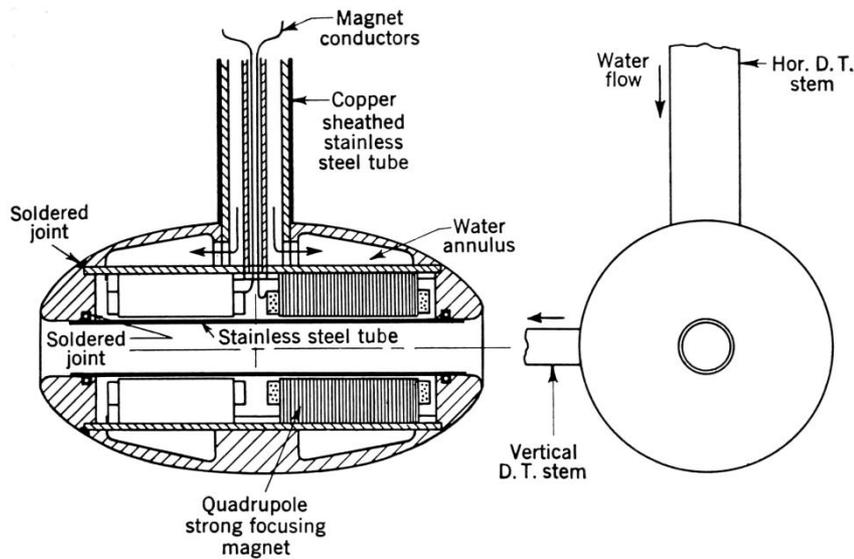
- La stabilité longitudinale exige que les particules soient sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Mais c'est incompatible avec la focalisation transverse.



Stabilité longitudinale → 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 quadropole a l'intérieur de chaque tube (toujours actuelle)



Quadrupole dans le drift tube

Drift tube Linac (DTL)

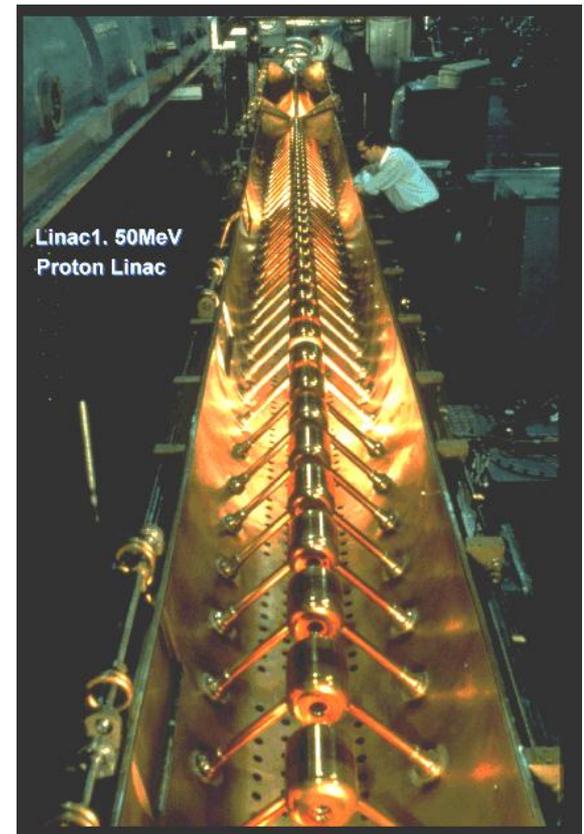
- Facilité d'injection et d'éjection par rapport aux machines circulaires
- Protons de 20 a 200 MeV, ion jusqu'à 10 MeV/a
- Energie fixe pour un type d'ion



Drift tube LINAC – Lawrence Radiation Lab. 1957



LINAC injecteur du LHC



Cavité résonnante : le modèle pill-box

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

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

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

Conditions aux limites sur des parois parfaitement conductrices

B normal a la surface, E tangent a la surface

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Pour } E_z \text{ et en coordonnées cylindriques}$$

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

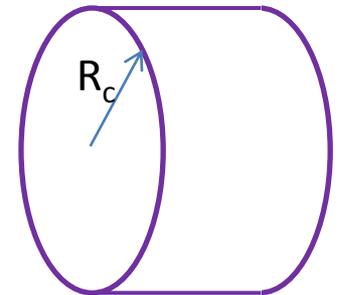
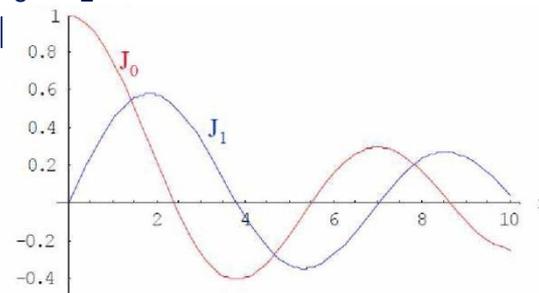
En considérant des solutions avec z comme axe de symétrie

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

J_0, J_1 : Fonctions de Bessel

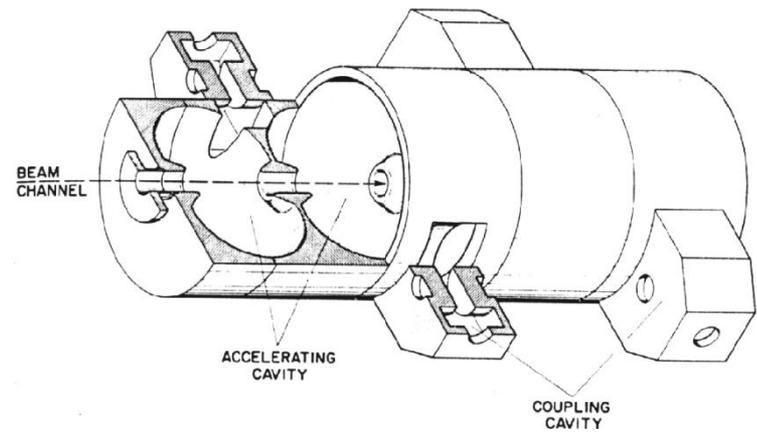
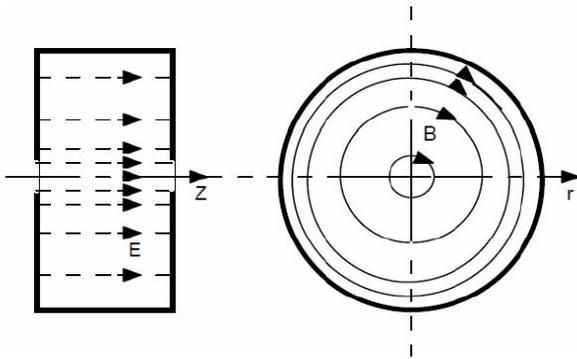
$$B_\theta(r, t) = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t$$

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

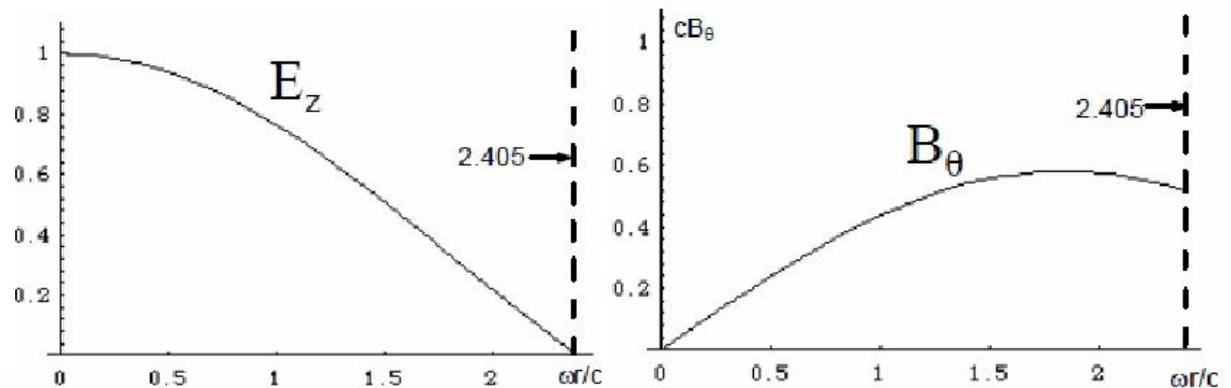
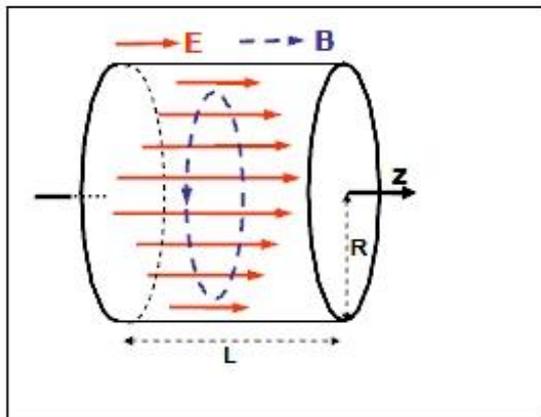


Mode TM_{010}

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

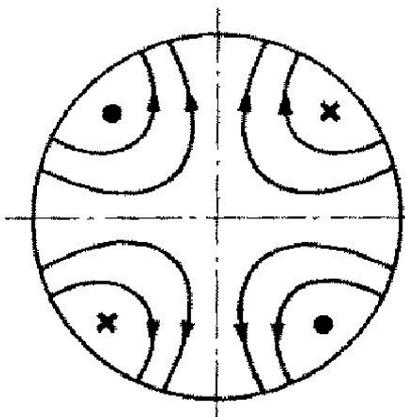


DTL a cavités couplées

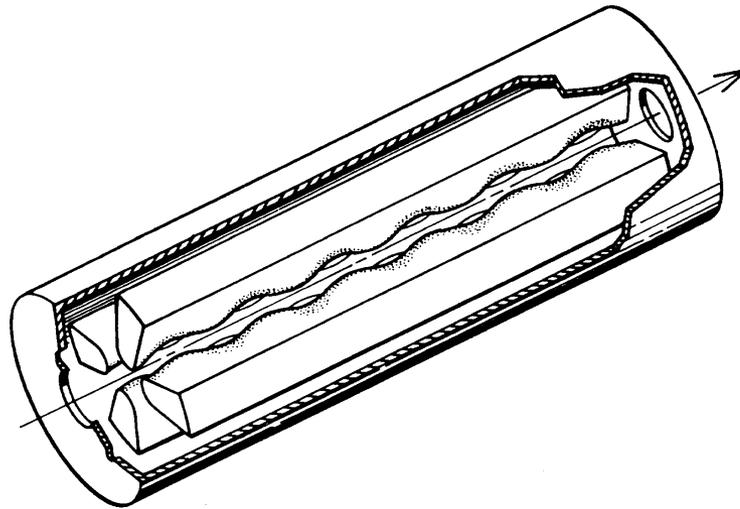


Mode TE_{010} : le RFQ

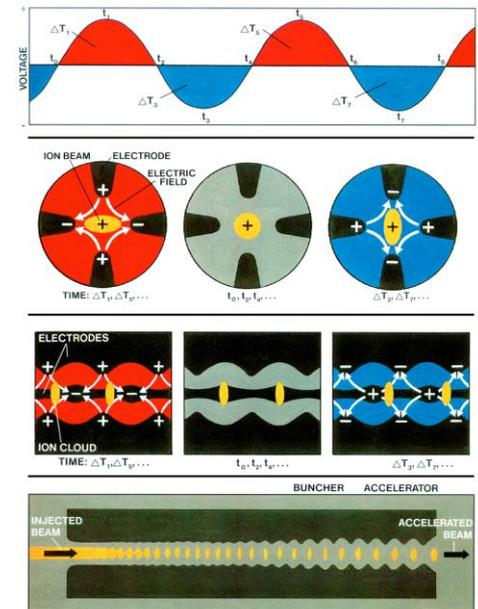
- Radio-Frequency Quadrupole : concept inventé en 1970 par Kapchiski and Teplyakov.
- Permet à la fois la **focalisation**, la **mise en paquets** avec un fort taux de capture et **l'accélération** jusqu'à quelques MeV.
- A remplacé les Cockcroft-Walton comme injecteur.



Mode TE_{010}



RFQ avec ses
« vanes »

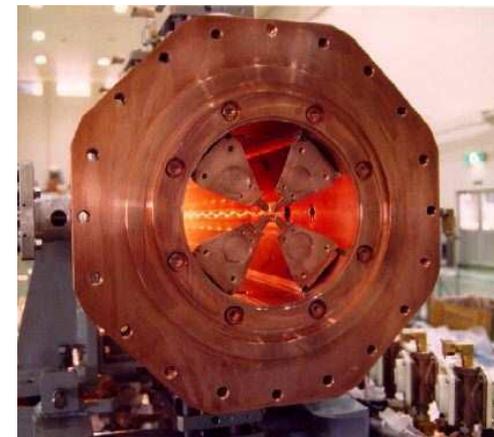
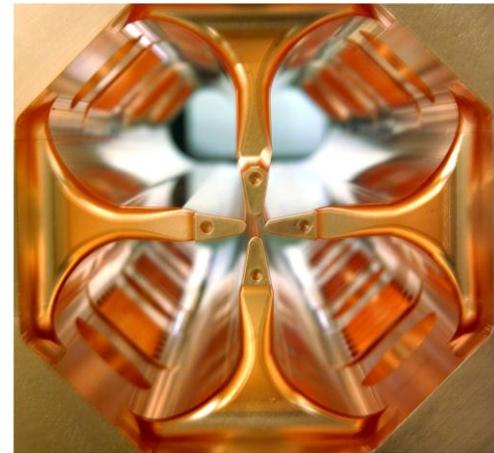
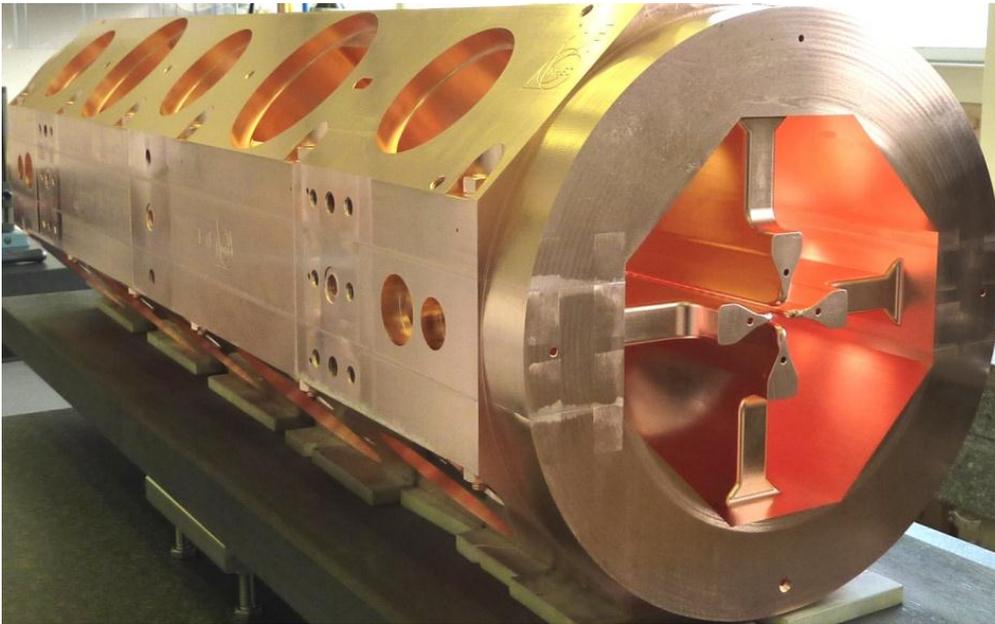


Dynamique du faisceau

Code TOUTATIS de Romuald
Duperrier CEA-IRFU

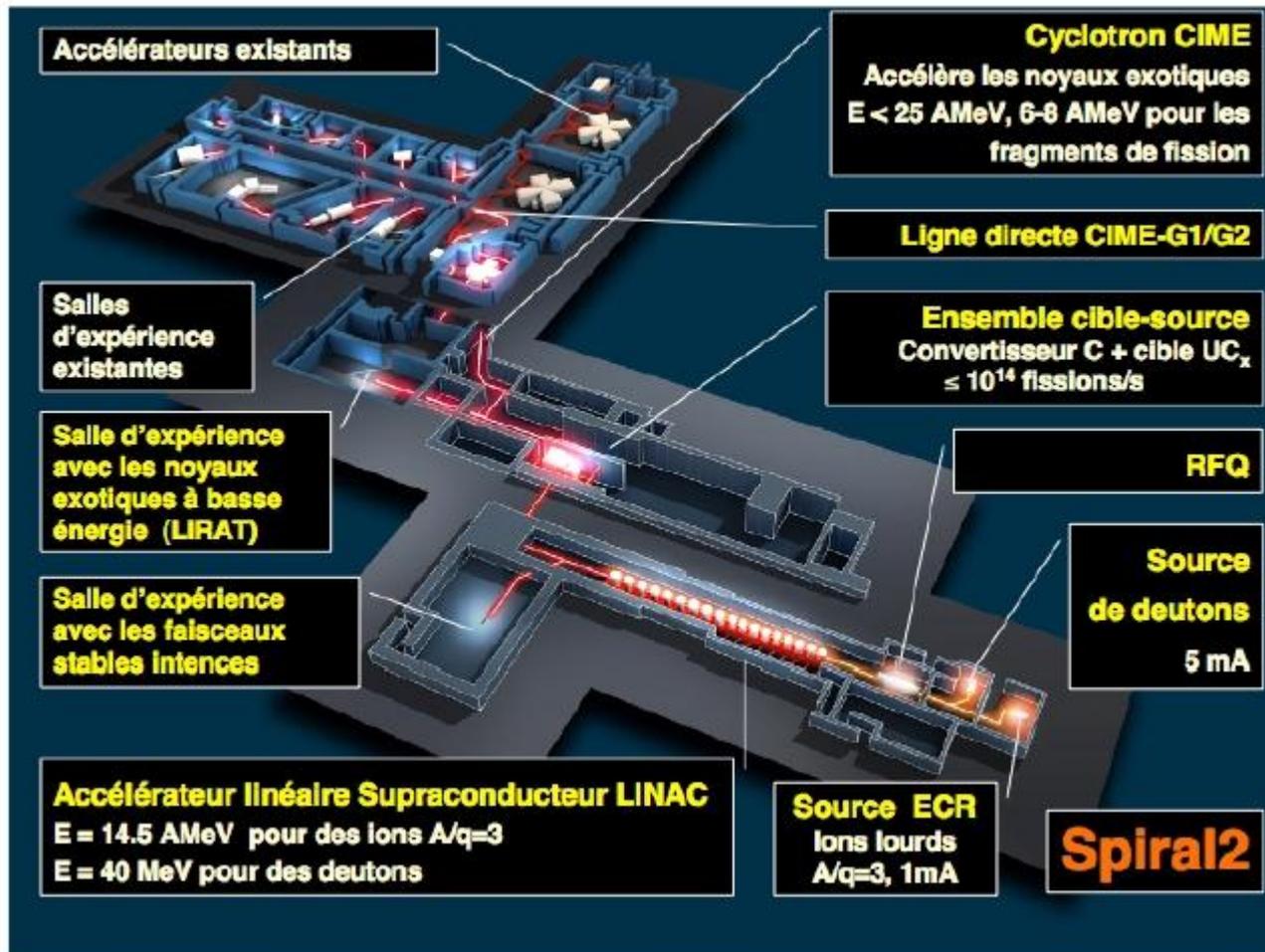
RFQ: une fabrication très délicate

- Tolérances d'usinages très strictes ($qq \mu\text{m}$).
- Echauffement délicat à maîtriser si fonctionnement en continu.



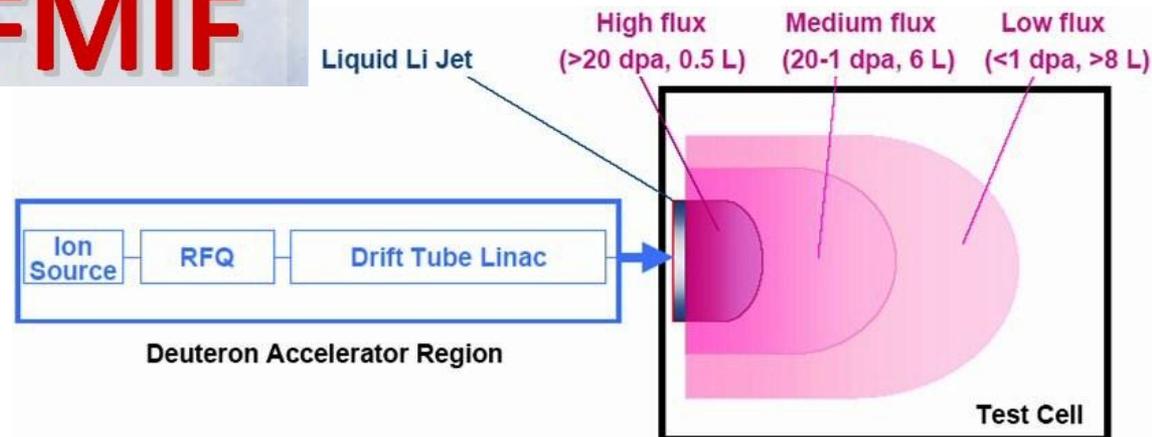
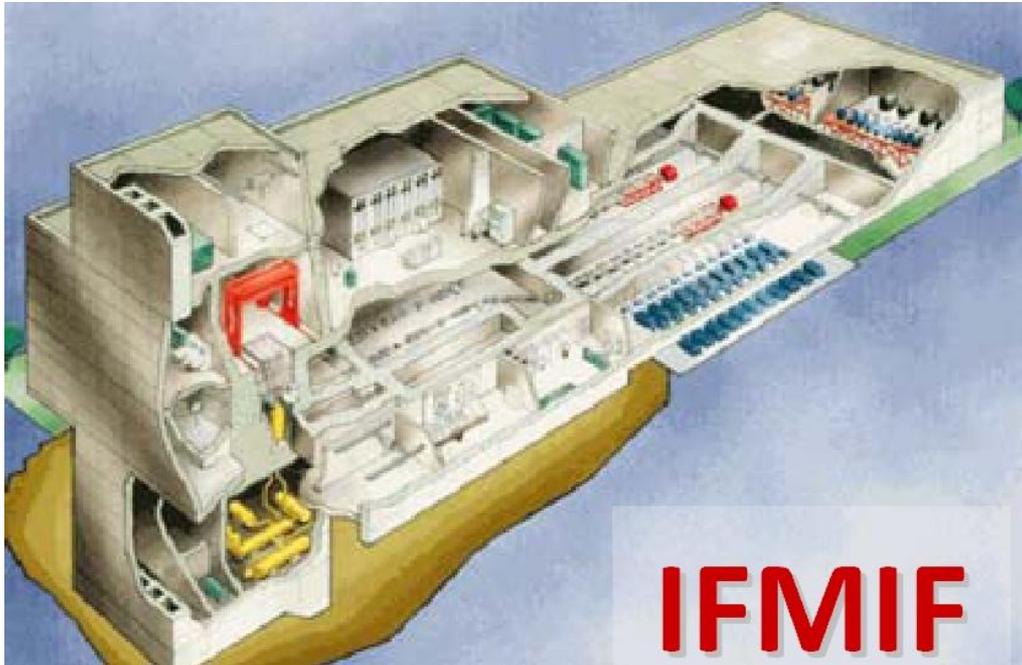
Grands projets utilisant des Linacs pour ions

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

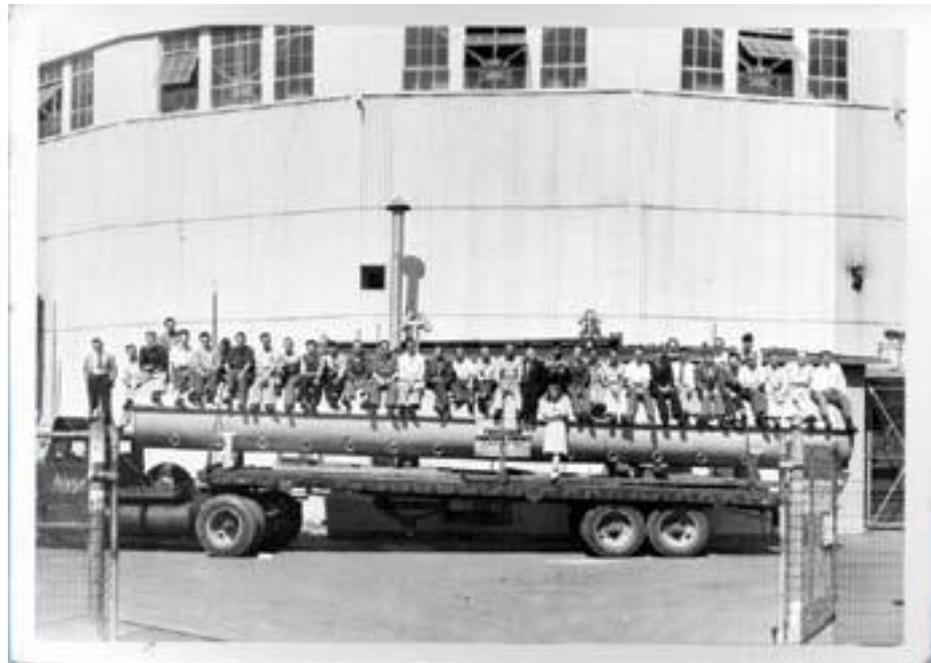


Les Linacs pour électrons

- 1948 : Ginzton, Hansen, Kennedy construisent le 1^{er} 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.



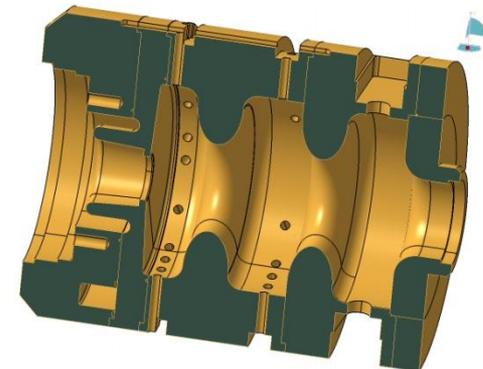
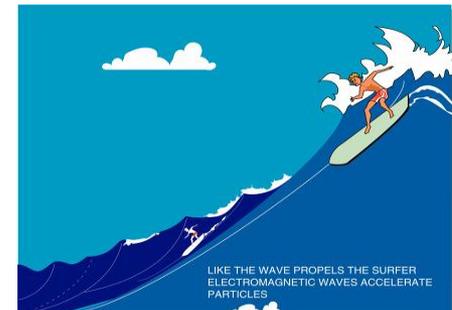
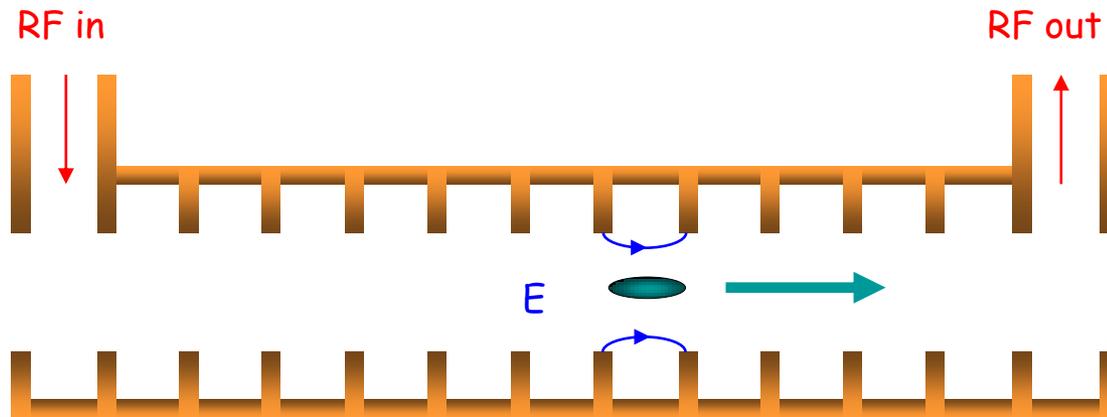
William Hansen et ses collègues avec une structure 3 GHz



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

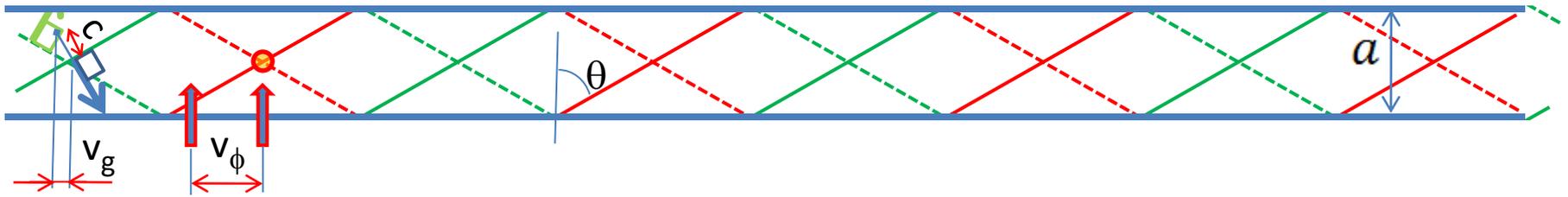
Structures chargées par des iris

- 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



$$v_g = c \cos \theta$$

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

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

$$\lambda = 2 a \sin \theta \Rightarrow \lambda_c = 2 a$$

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

Produire de la puissance RF

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

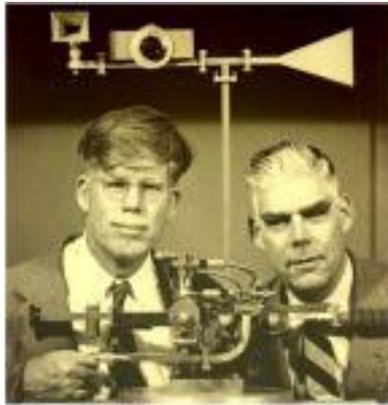


Fig. 5 - Russell and Sigurd Varian
Les frères Variart



Fig. 7 - The Varian Two-Cavity Klystron
et leur 1^{er} klystron en 1937

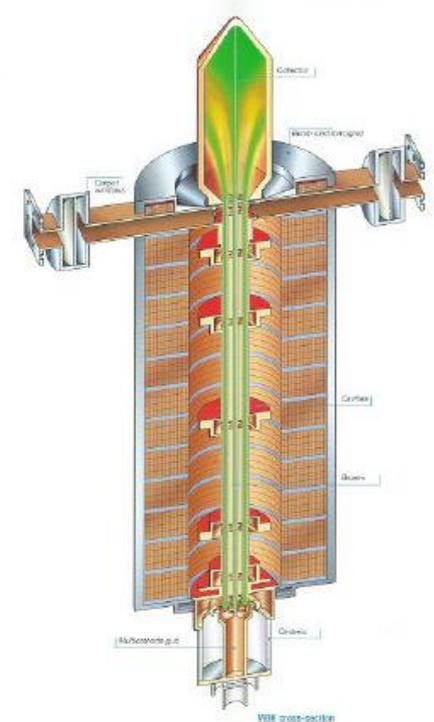


Fig. 9 - The First Megawatt Klystron

1948 : klystron 20 MW 1 μ s



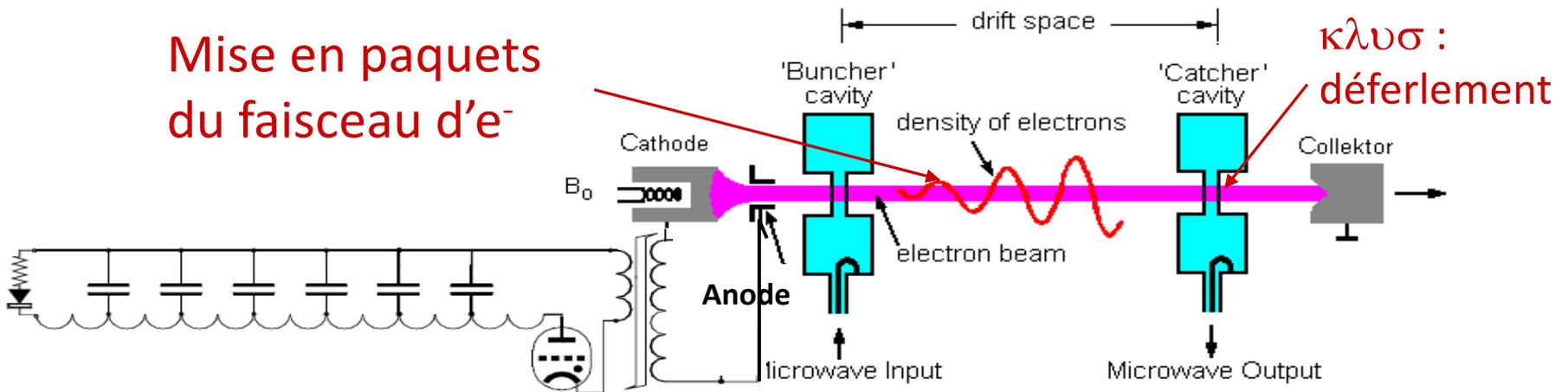
TH 2132 - 45 MW peak in S band, in short pulse mode operation at 2.9985 GHz



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)

Mise en paquets
du faisceau d'e⁻



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 μs

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%

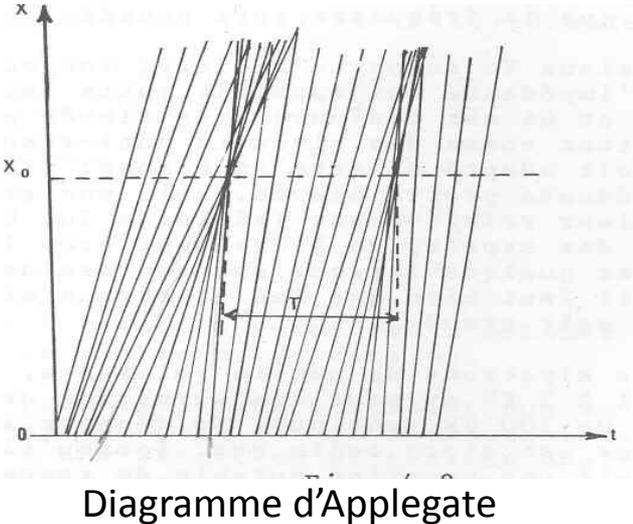


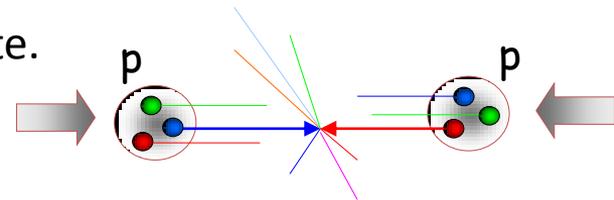
Diagramme d'Applegate

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

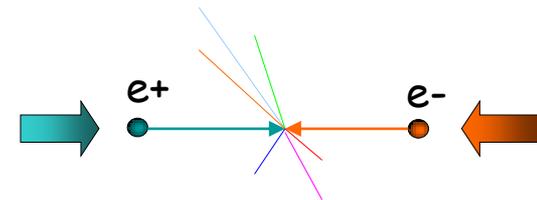
Collisionneurs de Hadrons : machines de découverte.

- 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



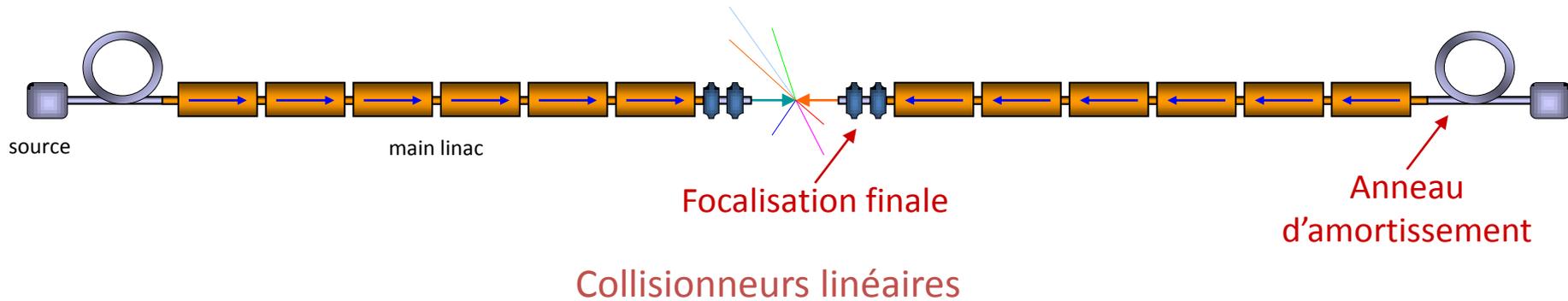
Après le LHC :

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

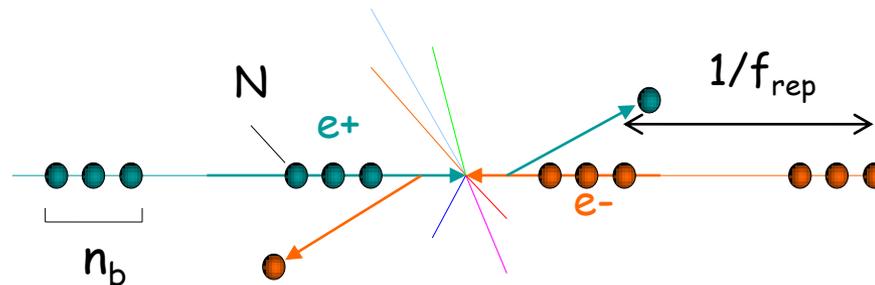
Energie atteinte

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

Luminosité

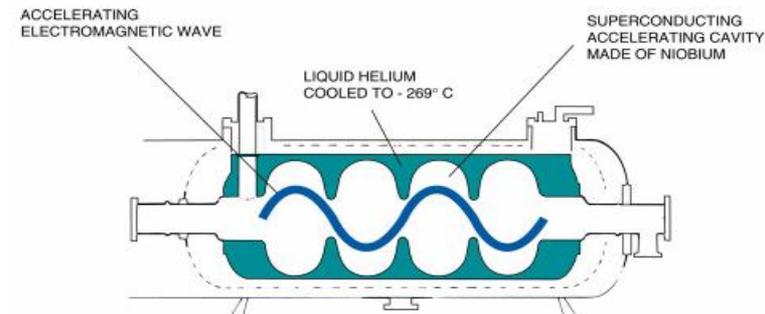
$$L = \frac{n_b N^2 f_{rep}}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

$\sigma_{x,y}$: tailles transverses du faisceau



Les cavités supraconductrices (avantages)

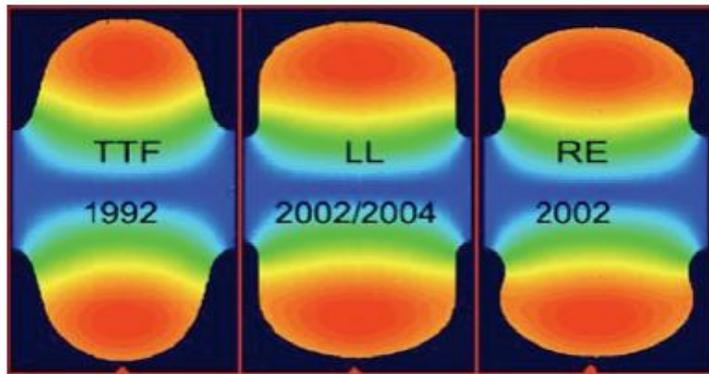
- Très faibles pertes dues à la résistance de surface (très grand facteur de qualité $qq\ 10^9$),
→ Fonctionnement en onde stationnaire avec besoin réduit en puissance crête.
- Bon rendement.
- Fréquence de fonctionnement “classique” (1.3 GHz).
- Taille des iris importante.
→ tolérances mécaniques aisées.
→ 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

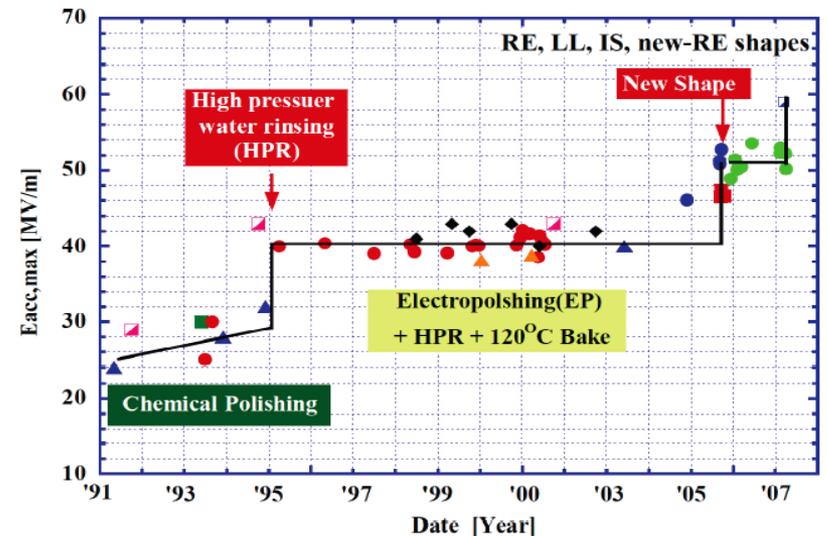
Le champ E_{acc} est limité par le champ B_{crit} (quench).

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

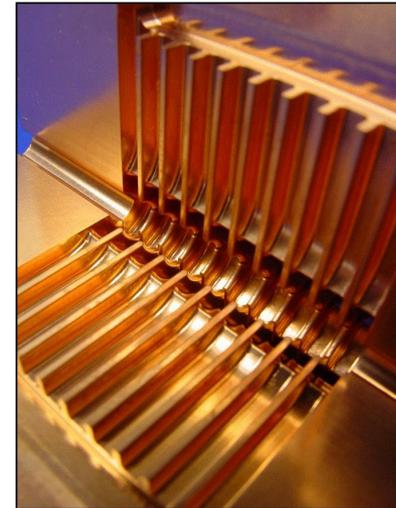
Structures accélératrices normales (résistives)

- 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 $t_{fill} = \int 1/v_G dz$)

- Pertes ohmiques importantes
(Q plus faible que pour les supra)

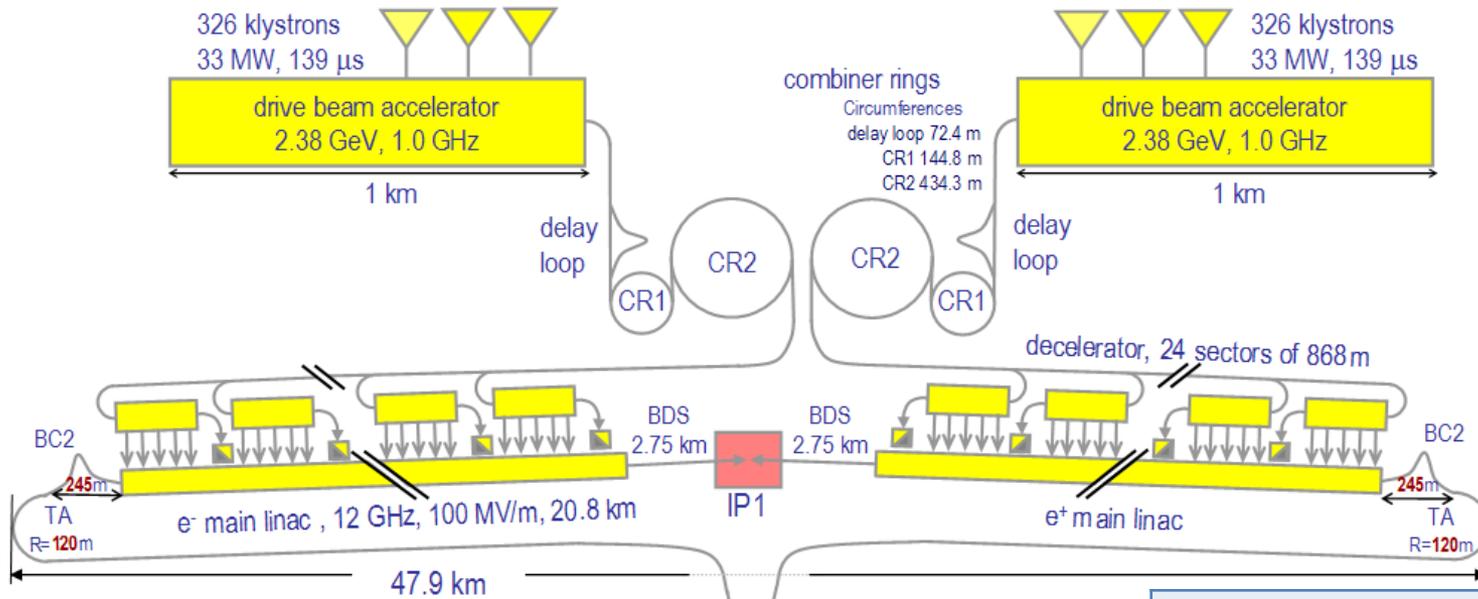


→ Très forte puissance RF requise (~ 200 MW crête par mètre de structure)

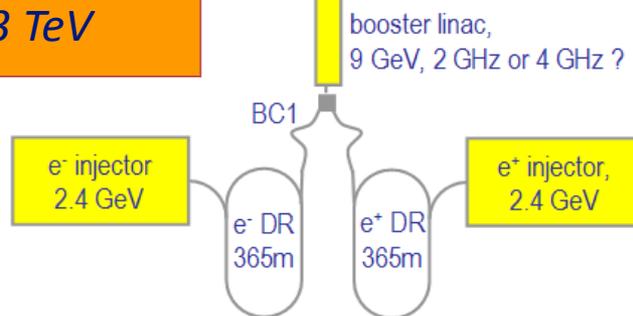
→ Dimensions réduites (usinage plus difficiles) et fort champ de sillage
→ nécessité d'amortir les HOM (high order modes)

Le CLIC (Compact Linear Collider)

Fournir la puissance RF au moyen d'un 2^{ème} faisceau d'électrons.

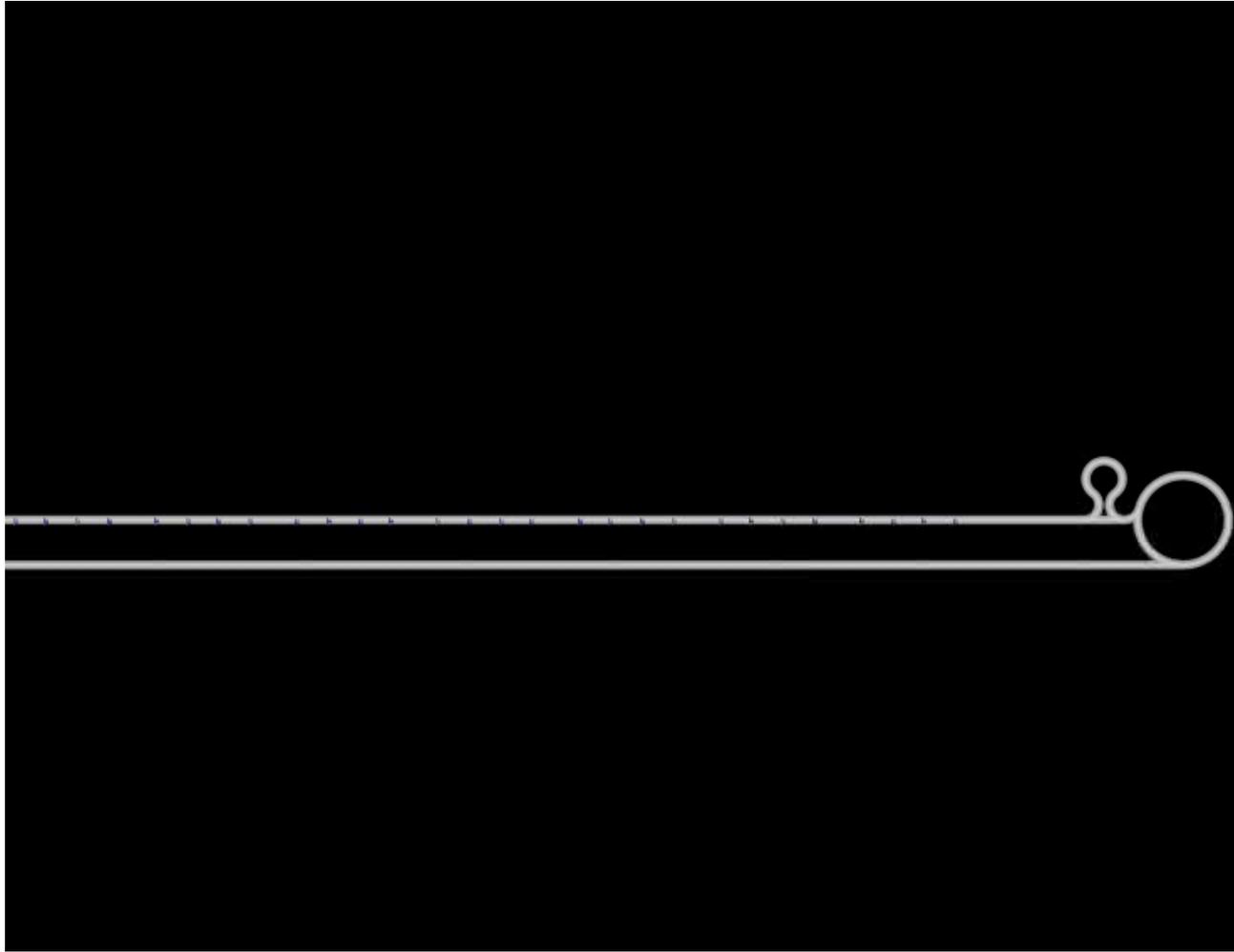


CLIC overall layout for $E_{CM} = 3$ TeV



Main Linac	
C.M. Energy	3 TeV
Peak luminosity	$2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Beam Rep. rate	50 Hz
Pulse time duration	156 ns
Average field gradient	100 MV/m
# accelerating cavities	2 x 71,548

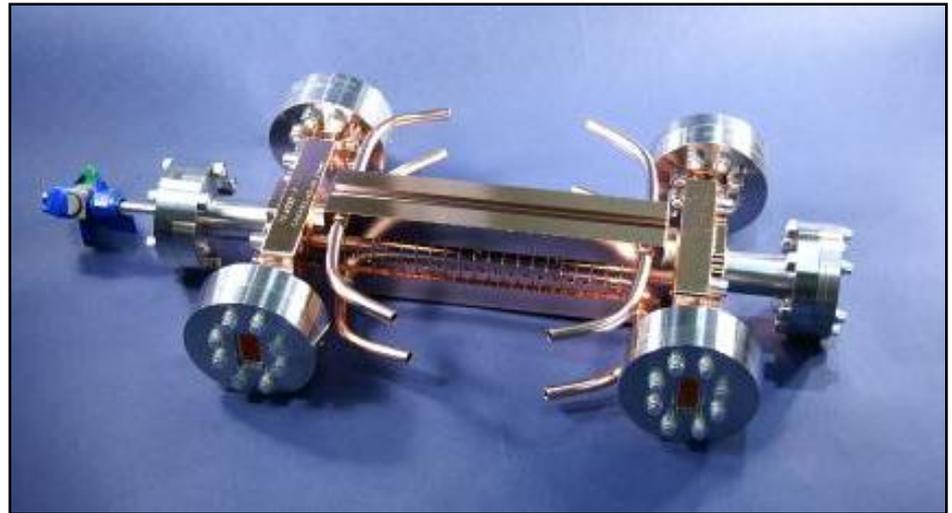
Re-combiner des paquets d'e⁻



Crédit Alexandra Andersson CERN

Le record actuel

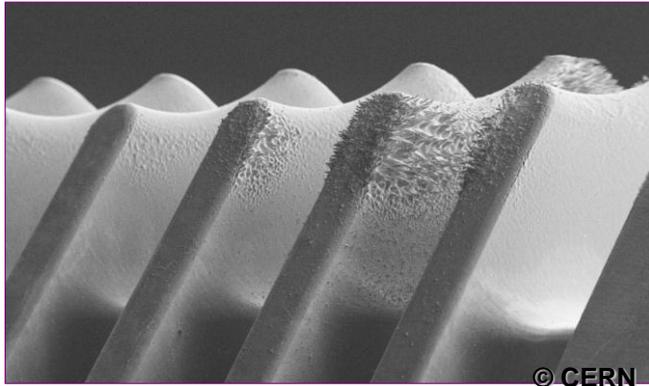
- type CLIC
- Conçue au CERN
- Construite par KEK
- Testée au SLAC



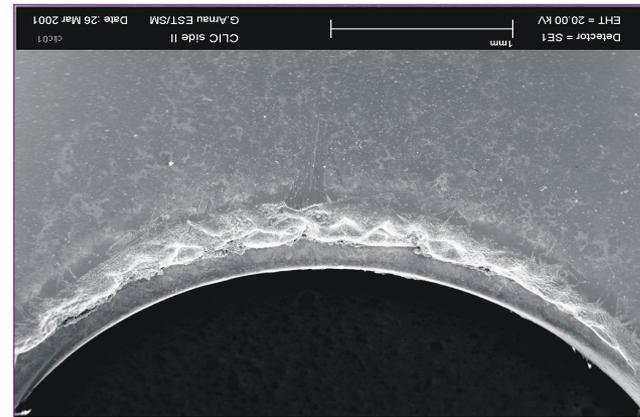
- $E_{acc} = 106 \text{ MV/m}$
- 11.424 GHz
- 230 ns pulse length
- taux de claquage $10^{-6} / \text{m}$

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 < E_a >=100MV/m	55.5	MW

Encore beaucoup d'études



Endommagement des surfaces



1 mm



CTF3 : CLIC test facility au CERN

Pour rejoindre le monde des accélérateurs

Ecoles:

JUAS Archamps

IPAM Paris

CAS Cern Accelerator School



2009 :Premier faisceau au LHC

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

MERCI ET A BIENTOT

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
- ...