



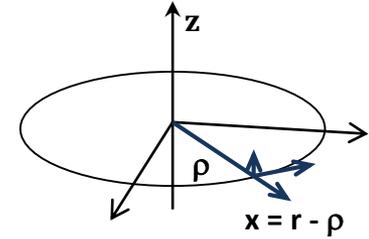
# Les accélérateurs de particules

## Partie 2: le passage à l'ère moderne

Wilfrid.Farabolini@cern.ch

# La focalisation faible

- Stabilité dans le plan médian horizontal ( $z=0$ )



Soit l'orbite d'équilibre :  $\rho = \frac{m v}{e B}$

Et une petite déviation  $x$  du rayon  $\rho$  de la trajectoire telle que :  $r = \rho + x = \rho \left(1 + \frac{x}{\rho}\right)$

Il y aura stabilité (force de rappel) si  $e v B_z(r) \begin{cases} > \frac{m v^2}{r} & \text{pour } r > \rho \\ < \frac{m v^2}{r} & \text{pour } r < \rho \end{cases} \quad (1)$

Définissons l'indice de champ  $n$  tel que :  $n = -\frac{\frac{\partial B_z}{\partial r}}{\frac{B_0}{\rho}} = -\frac{\rho}{B_0} \left(\frac{\partial B_z}{\partial r}\right)_{r=\rho}$  soit  $B_z(r) = B_z(\rho) \cdot \left(\frac{\rho}{r}\right)^n$

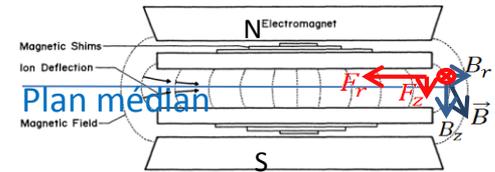
Nous avons alors :  $\frac{m v^2}{r} \approx \frac{m v^2}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{x}{\rho}\right)$  et  $e v B_z(r) \approx e v B_0 \cdot \left(1 - n \frac{x}{\rho}\right)$

L'inégalité (1) est vérifiée si  $n < 1$ , pour la stabilité horizontal le champ  $B_z$  peut être décroissant quand  $r$  croit mais pas trop rapidement.

# Inconvénient de la focalisation faible

- La stabilité verticale nécessite pour sa part  $n > 0$ , donc au final  $0 < n < 1$

$$\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} = 0$$



- Les équations du mouvement bétatron sont alors :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 (1 - n) x = 0 \quad \frac{d^2 z}{dt^2} + \omega_0^2 n z = 0 \quad \omega_0 = \frac{q B_0}{m}$$

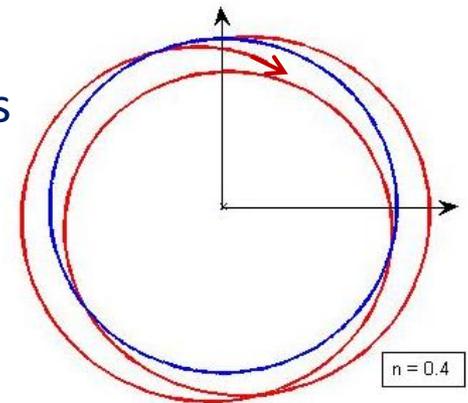
dont les solutions ont des **périodes plus grandes que la période de rotation.**

$$f_x = \sqrt{1 - n} f_0 \quad f_z = \sqrt{n} f_0$$

Les écarts par rapport à l'orbite de référence sont alors très importants, la chambre a vide et les entrefers doivent être larges.

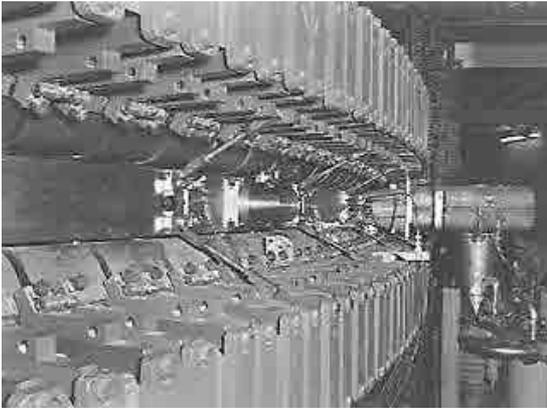
	Birmingham	Saclay Saturne I	Brookhaven Cosmotron	Berkeley Bevatron	Dubna Synchrophasotron
Energie (GeV)	1	2,94	3	6,4	10
Rayon Moyen (m)	4,5	11	10,7	18,2	30,5
Section chambre (cm <sup>2</sup> )	50 x 21	60 x 10	91 x 22	122 x 30	150 x 40
Date démarrage	1953	1958	1952	1954	1957

Les premiers cyclotrons (Eric Baron GANIL)

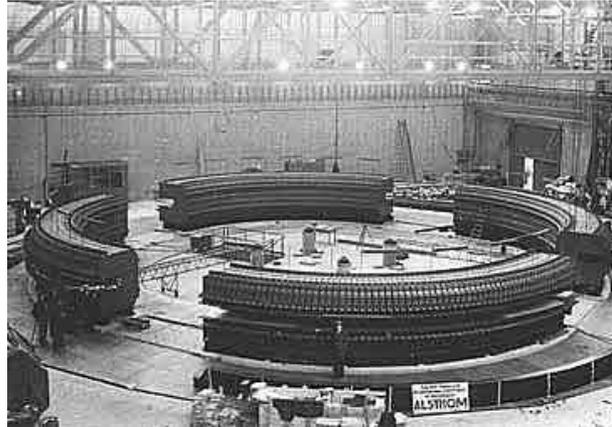


Oscillations bétatron dans le plan horizontal pour  $n=0.4$

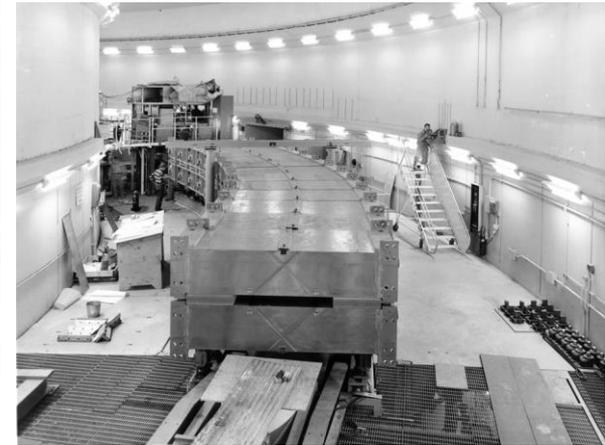
# Des réalisations imposantes



1952: Cosmotron a  
Brookhaven 3 GeV



1958: Saturne 1 a Saclay 3 GeV



1962: ZGS a Argonne 10 GeV p+



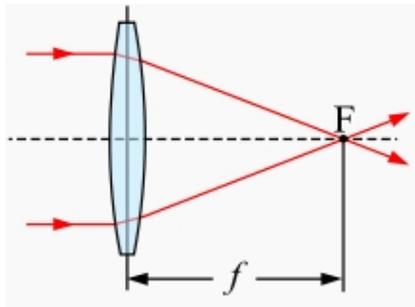
1957: Synchrotron a Dubna - 12.5 GeV



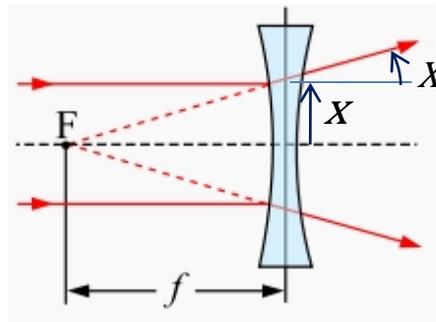
Démantelé en 2002

# La focalisation forte

- 1952 : Ernest Courant, Hartland Snyder et Stanley Livingston proposent la focalisation forte ou a gradient alterné (Christophilos en avait déjà eu l'idée mais ne l'avait pas publiée)
- Une alternance d'éléments focalisants / défocalisants a une résultante globale focalisante.

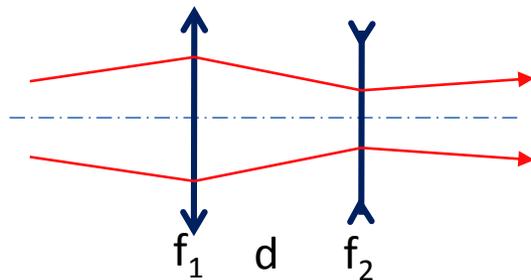


$f > 0$  focalisant



$f < 0$  defocalisant

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{out} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{in}$$



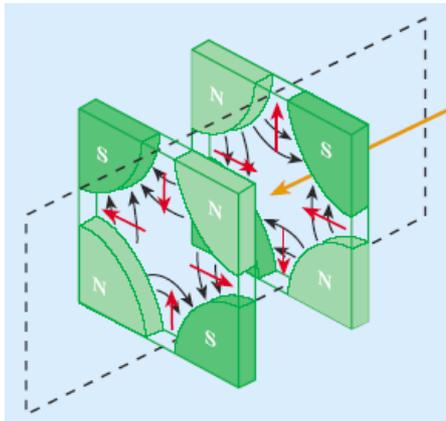
$$\begin{pmatrix} a & b \\ -\frac{1}{F} & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

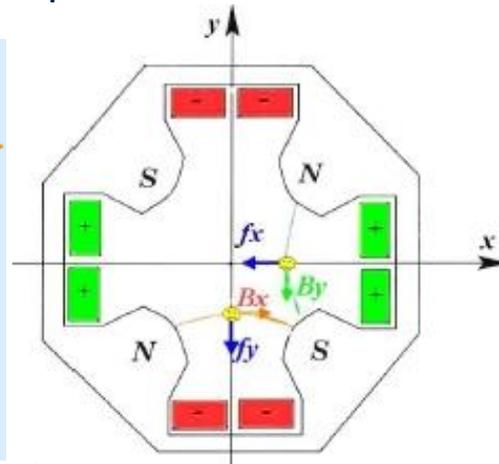
Si  $f_1 = -f_2 = f$  alors :  $F = \frac{f^2}{d} > 0$  donc focalisant

# Les quadropoles

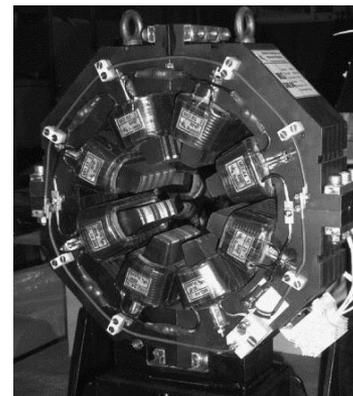
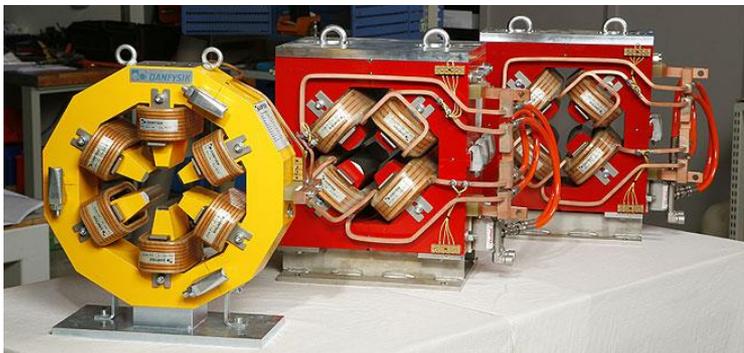
- Les particules qui ne passent pas dans l'axe voient un champ magnétique transverse. Si l'effet est focalisant dans le plan horizontal alors il est défocalisant dans le plan vertical (et vice versa).
- Utilisés en doublet ou en triplet.



Forces dans un Quadropole



Doublet de quadropoles magnétiques

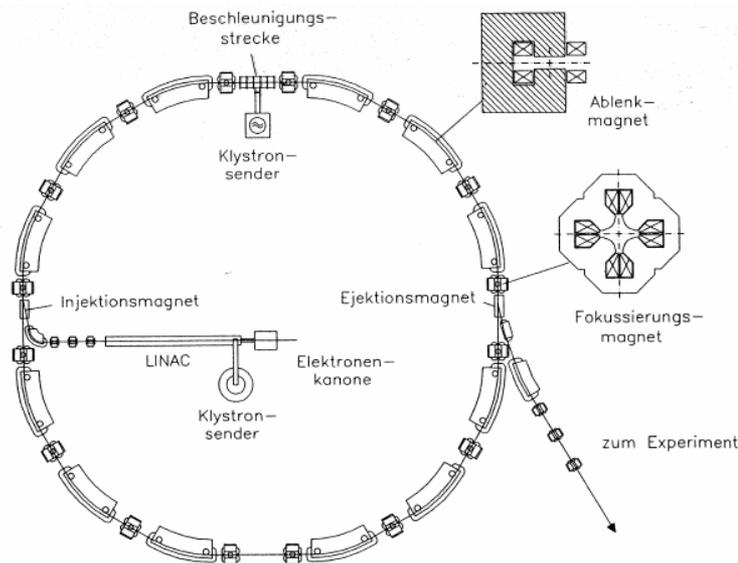


Quadropole électrostatique

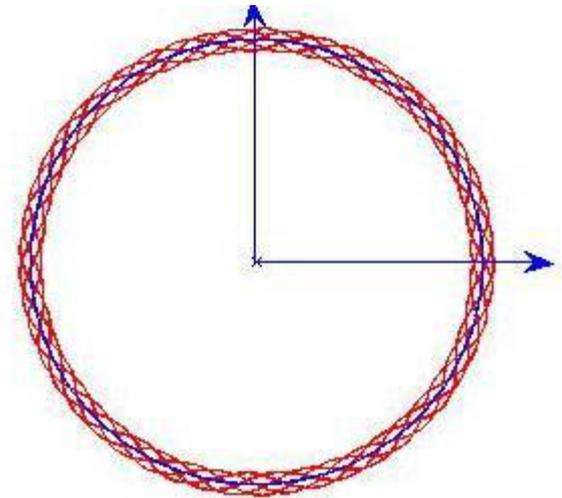
Et aussi des sextupoles, des octupoles...

# Le synchrotron a focalisation forte

- Le gradient constant est remplacé par des éléments magnétiques dédiés a chaque fonction: dipôles, quadrupoles mais aussi sextupoles (corrections de chromaticité) et autres ordres supérieurs (corrections des défauts des équipements précédents).
- L'anneau est constitué de mailles.



Un synchrotron générique



Oscillations bétatron dans le plan horizontal pour  $n \gg 1$

# Le PS, premier synchrotron à gradient alterné

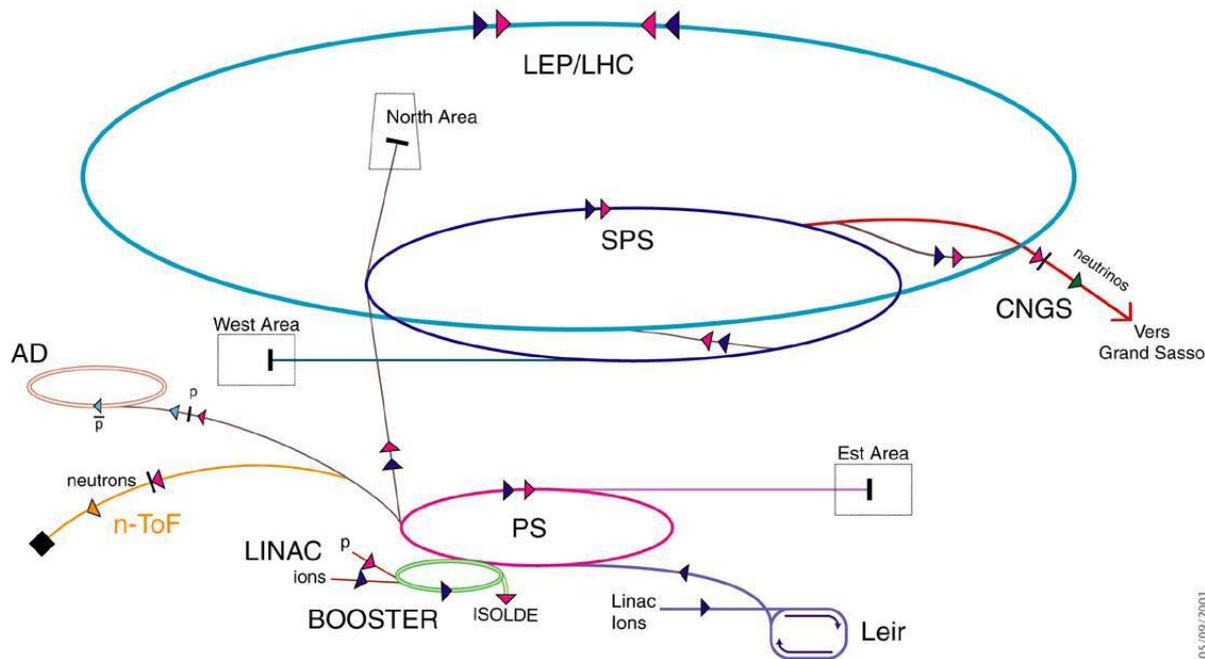
- La fréquence varie de 100 kHz a 5 MHz
- La machine ne passait pas l'énergie de transition (stabilité longitudinale).
- Schnell réalisa un montage de fortune pour faire un saut de phase a l'énergie de transition et immédiatement le PS atteignit son énergie nominale.



*24.11.1959, during the first hours of the start-up of the PS: J. Adams, H. Geibel, H. Blewett, C. Schmelzer, L. Smith, W. Schnell, P. Germain*



# Le complexe du CERN



- ▶ p (proton)
- ▶ ion
- ▶ neutrons
- ▶  $\bar{p}$  (antiproton)
- ▶  $\leftrightarrow$  proton/antiproton conversion
- ▶ neutrinos

- AD Antiproton Decelerator
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron

- LHC Large Hadron Collider
- n-ToF Neutrons Time of Flight
- CNGS Cern Neutrinos Grand Sasso



LHC: 1232 dipôles  
8.3 T – 11850 A  
35 tonnes – 11 GJ stocke

CERN AC\_HF205\_V05/09/2001



Interconnexion des accélérateurs du CERN

# Collisionneurs

**R. Wideroe** again.. “...I had thus come upon *a simple method for improving the exploitation of particle energies available .. for nuclear reactions*. As with cars (collisions), when a target particle (at rest) is bombarded, a considerable portion of the kinetic energy (of the incident particle) is used to hurl it (or the reaction products) away.

Only a relatively small portion of the accelerated particle’s energy is used to actually to split or destroy the colliding particles. However, *when the collision is frontal, most of the available kinetic energy can be exploited.*

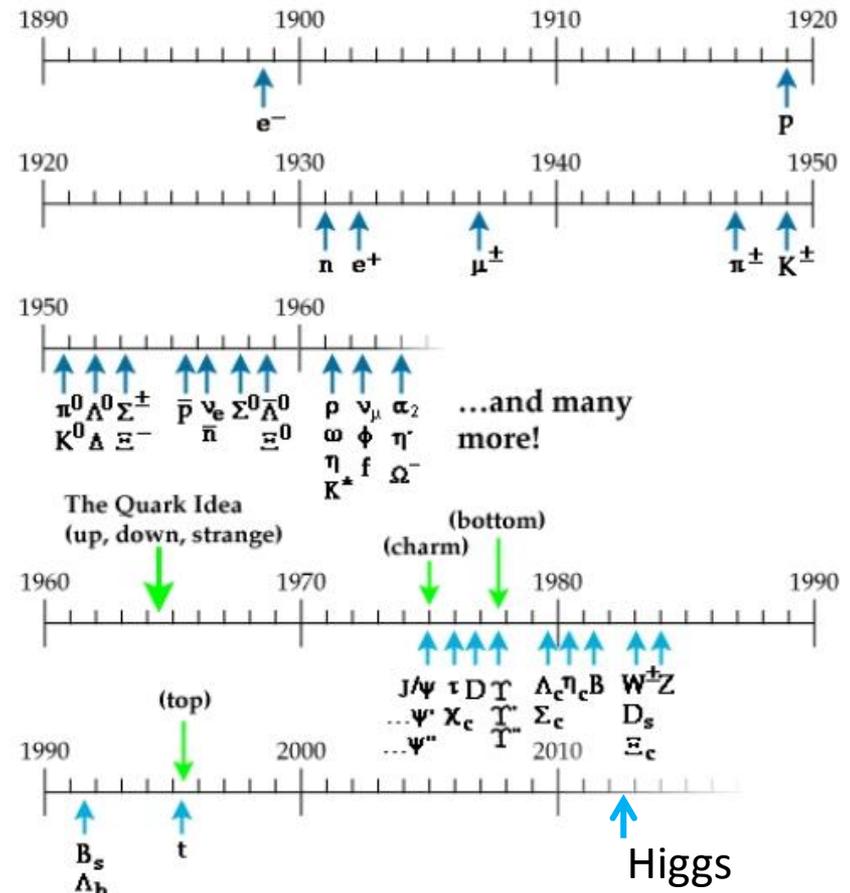
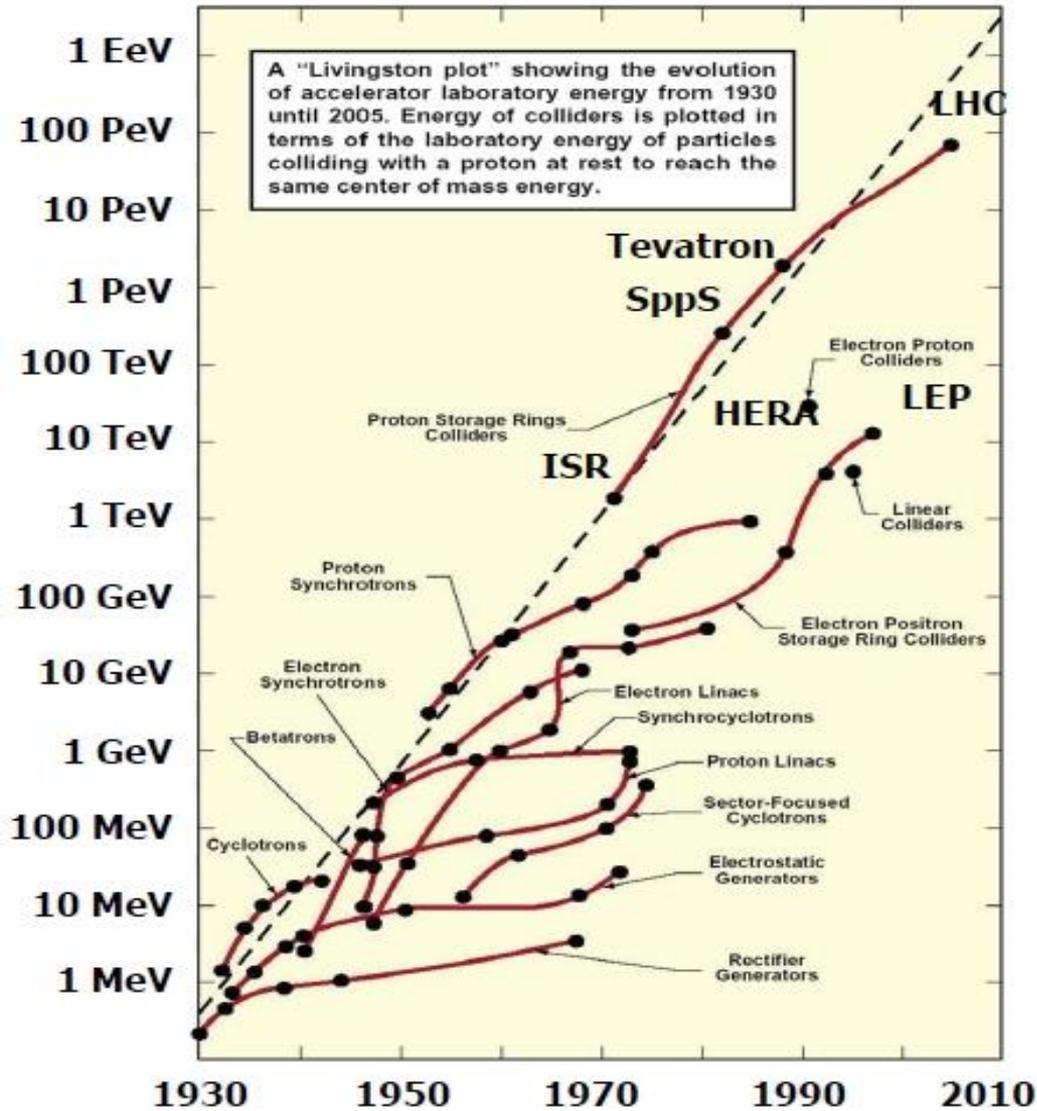
For nuclear particles, relativistic mechanics must be applied, and .. the effect .. be even greater “.

“... If it were possible to *store the particles in rings for longer periods*, and if these ‘stored’ particles were *made to run in opposite directions*, the result would be one opportunity for collision at each revolution.

Because the accelerated particles would move very quickly they would make many thousand revolutions per second and one could expect to obtain a collision rate that would be sufficient for many interesting experiments.”

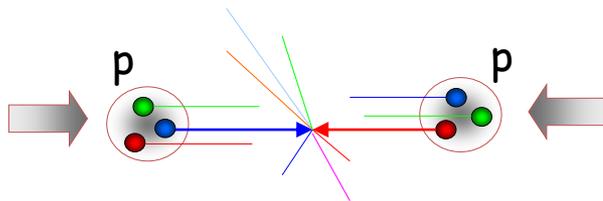
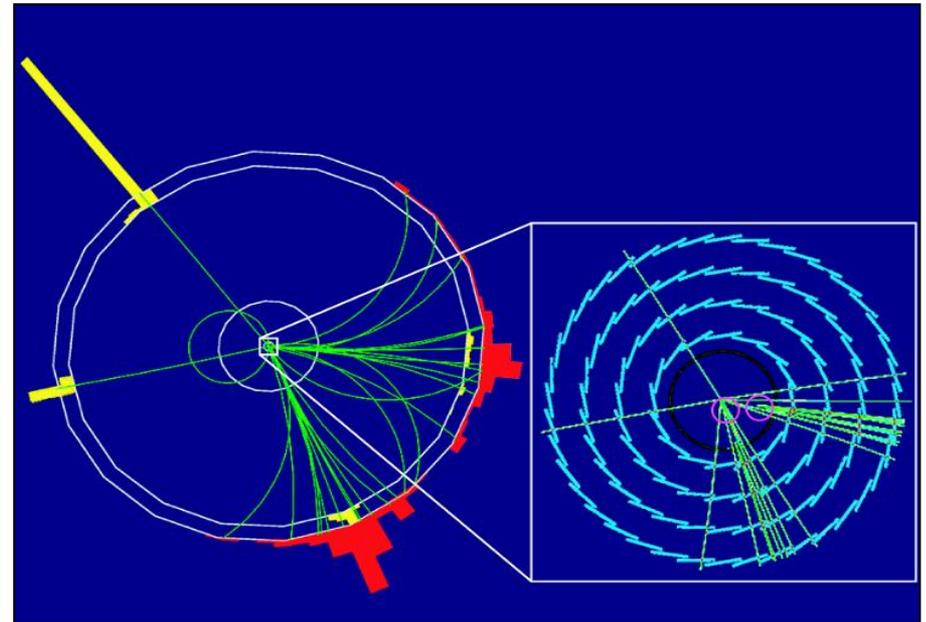
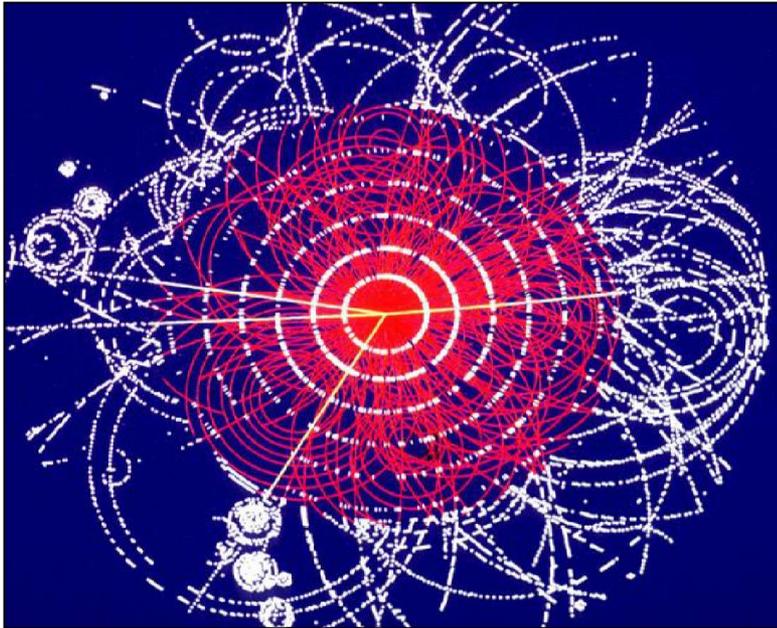
Fix Target	$\left. \begin{array}{l} E_1 = 7 \text{ TeV} \\ E_2 = m_{\text{Proton}} \end{array} \right\}$	$E_{cm} = \sqrt{2 \cdot 7000 \cdot 1} = 118 \text{ GeV}$
Collider	$\left. \begin{array}{l} E_1 = 7 \text{ TeV} \\ E_2 = 7 \text{ TeV} \end{array} \right\}$	$E_{cm} = 2 \cdot 7000 = 14'000 \text{ GeV}$

# Progression de l'énergie dans le c.m.

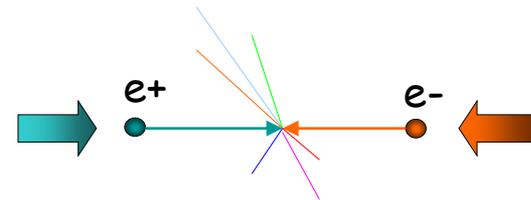


Les découvertes associées

# Quel type de particules utiliser ?

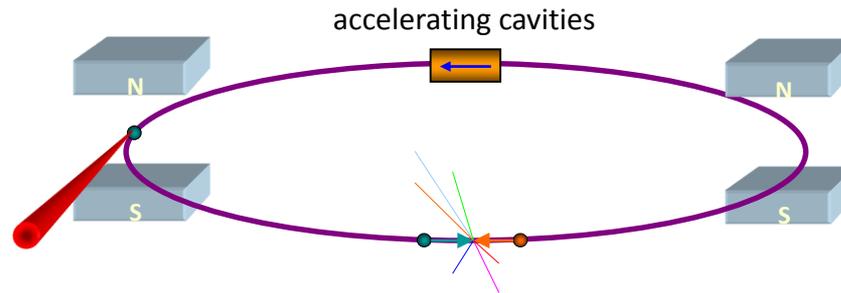


Collisionneur de Hadrons :  
découvertes



Collisionneur de Leptons :  
mesures de précision

# Les collisionneur circulaires



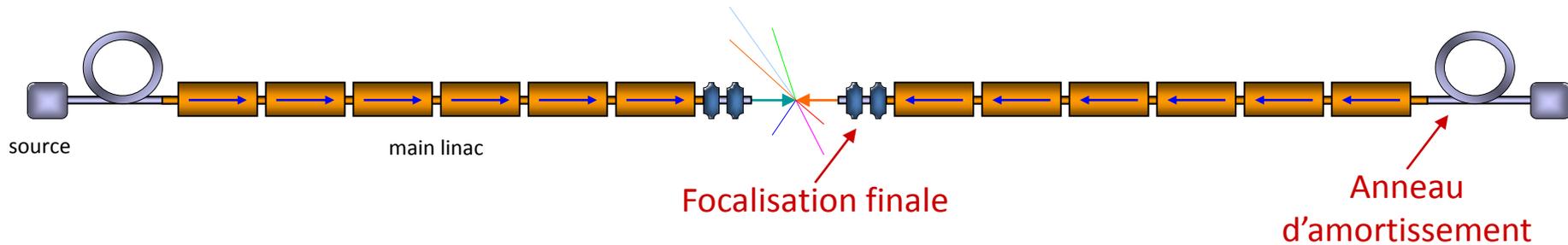
## Collisionneurs circulaires

- Energie acquise par passages successifs dans quelques cavités
- Collisions a chaque tour (plusieurs points d'interaction possibles)  
→ forte luminosité intrinsèque
- RF et particules réutilisées → énergétiquement efficace

### MAIS:

- Pertes par rayonnement synchrotrons importantes  $P \propto \gamma^4/R^2$ 
  - ( $\Delta E/E = 3\%$  par tour dans le LEP)
- Aimants de courbure → forts champs (LHC : dipôles supra)

# Les accélérateurs linéaires

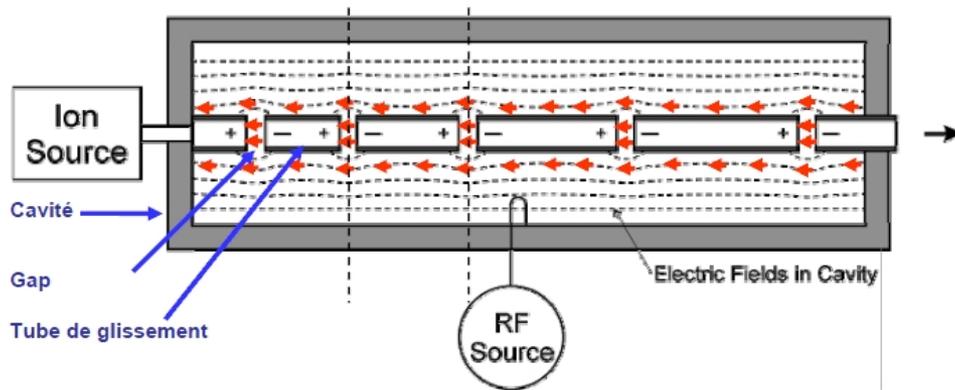


## Collisionneurs linéaires

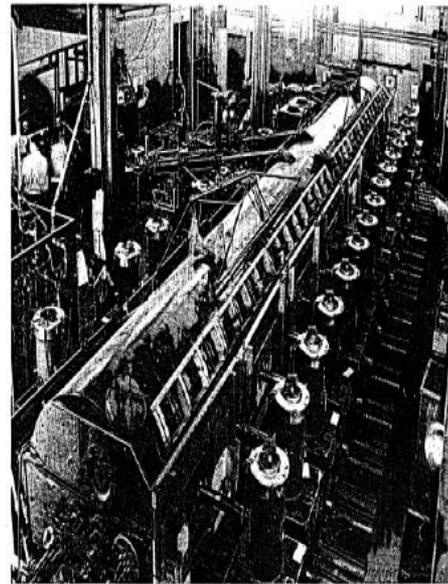
- Energie acquise en un seul passage.
  - nécessite un fort gradient d'accélération afin de limiter la taille de la machine.
- Collision unique.
  - nécessite un faisceau très dense pour obtenir une bonne luminosité.
  - taille donc émittance du faisceau très petite, fréquence de répétition élevée, alignement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

# Les premiers Linac

- Cockcrof-Walton, Van der Graaf et Tandem : géométriquement parlant.
- Wideroe et Sloan: accélération résonnante, mais limités ( $\text{Hg}^+$  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  $\text{TM}_{01}$  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  $\text{H}^+$  sont accélérés a 32 MeV avec 2.2 MW de puissance RF



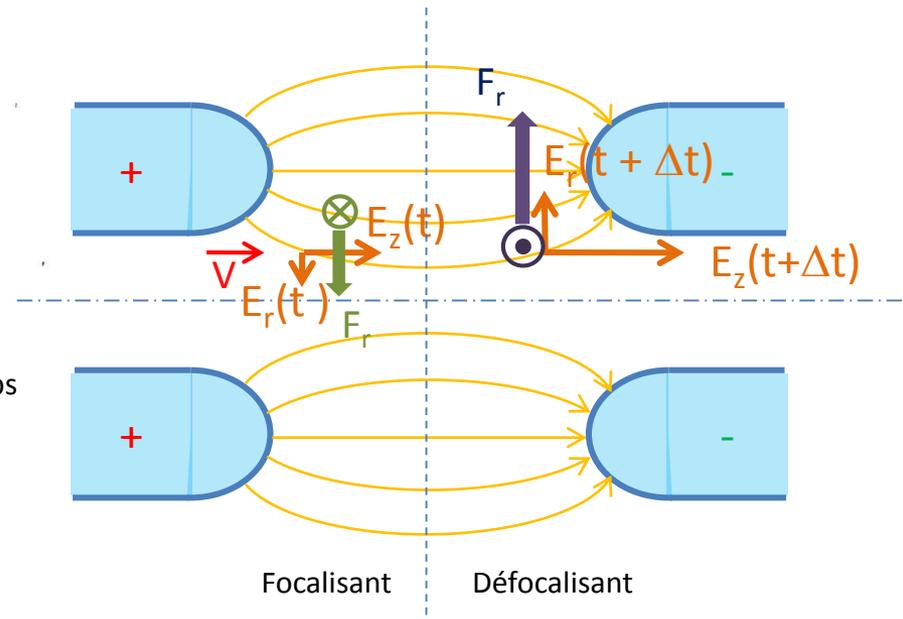
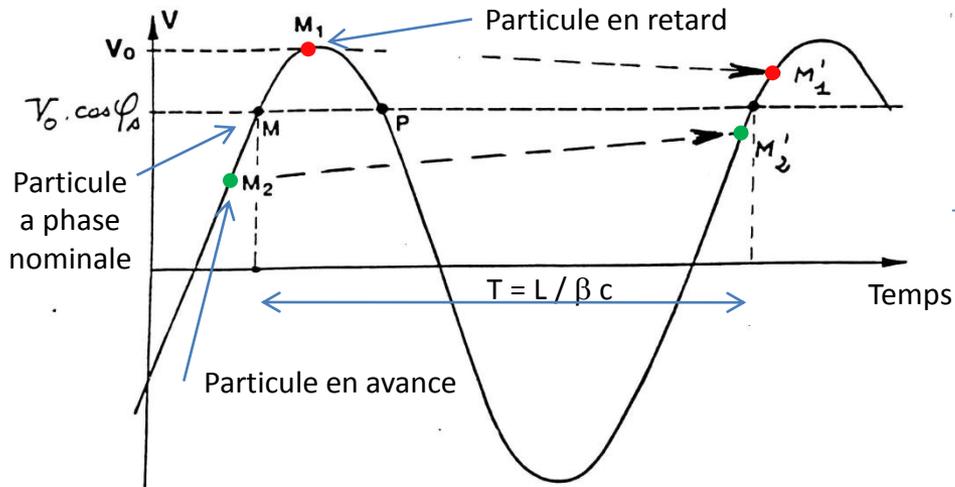
Drift Tube Linac : DTL



Luis Alvarez

# Problème de stabilité

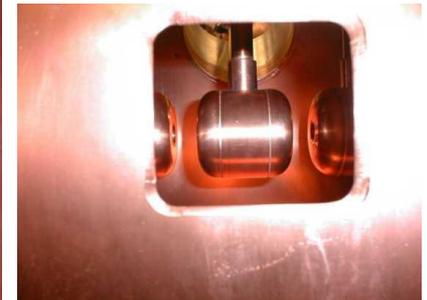
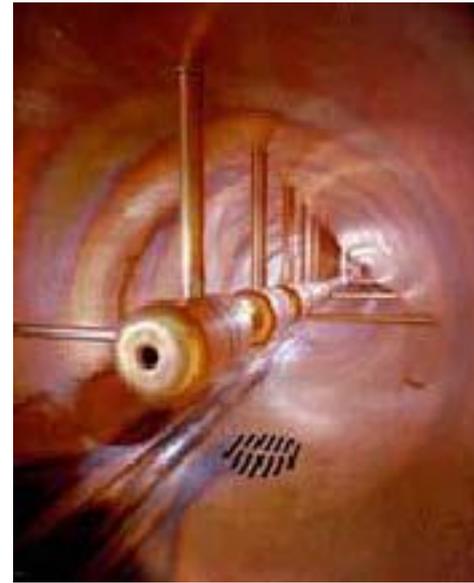
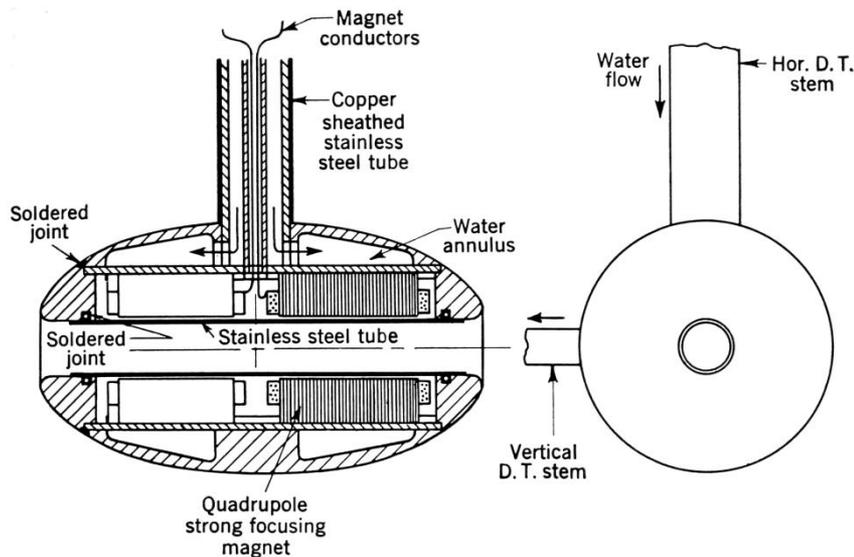
- La stabilité longitudinale exige que les particules soient sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Mais c'est incompatible avec la focalisation transverse.



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 quadrupole a l'intérieur de chaque tube (toujours actuelle)



Quadrupole dans le drift tube

# Drift tube Linac (DTL)

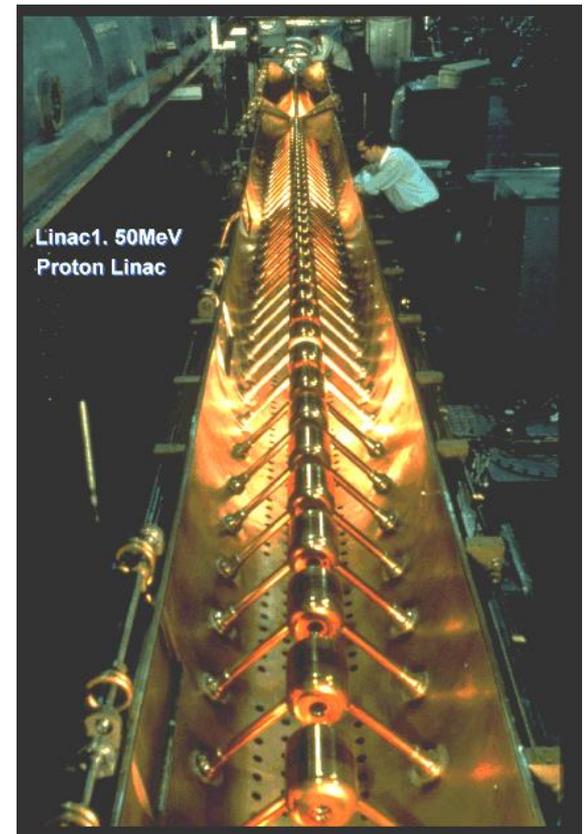
- Facilité d'injection et d'éjection par rapport aux machines circulaires
- Protons de 20 a 200 MeV, ion jusqu'à 10 MeV/a
- Energie fixe pour un type d'ion



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

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

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

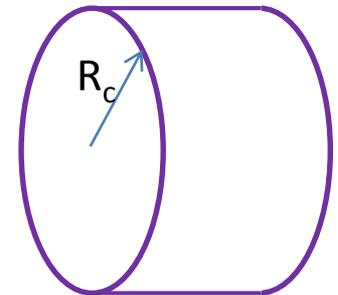
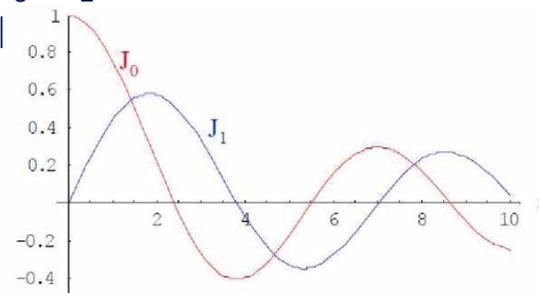
En considérant des solutions avec z comme axe de symétrie

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

$J_0, J_1$ : Fonctions de Bessel

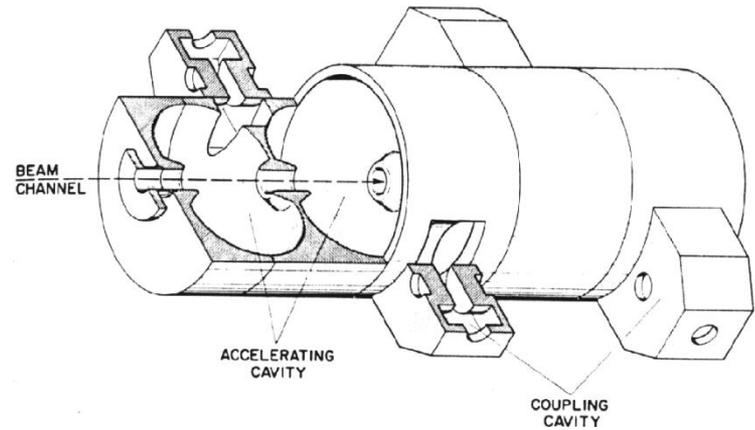
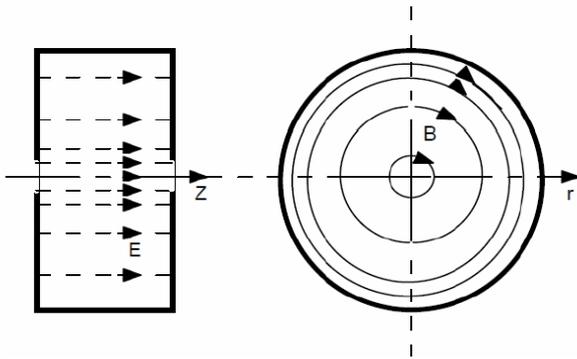
$$B_\theta(r, t) = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t$$

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

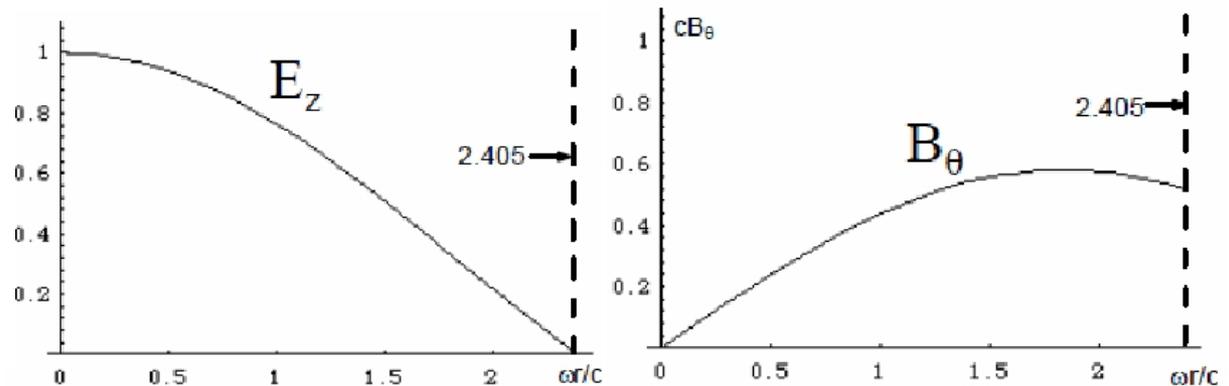
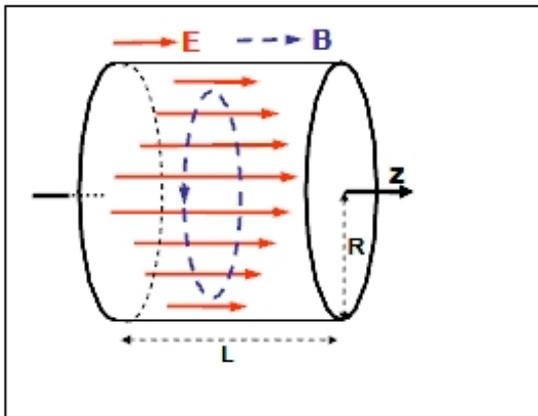


# Mode $TM_{010}$

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

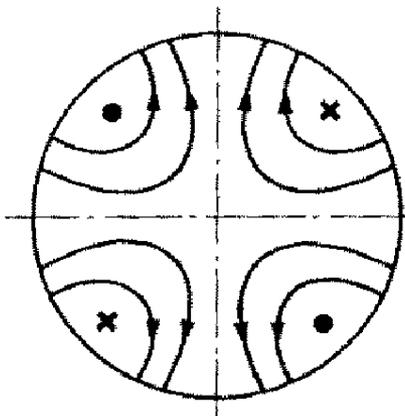


DTL a cavités couplées

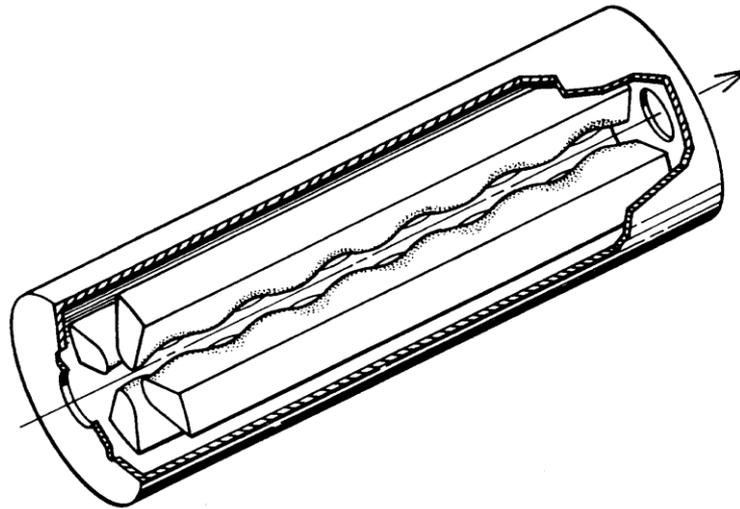


# Mode $TE_{010}$ : le RFQ

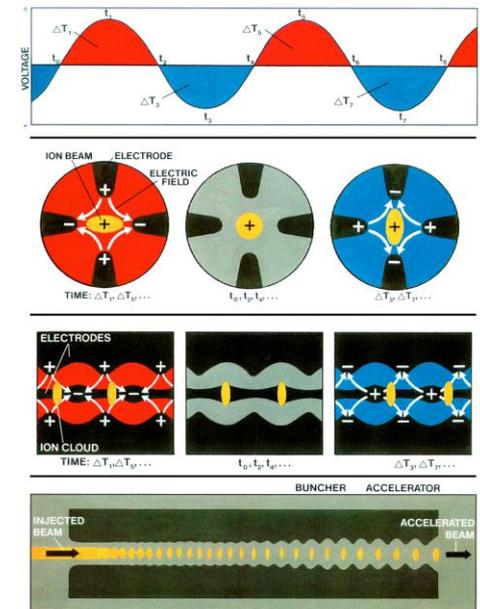
- Radio-Frequency Quadrupole : concept inventé en 1970 par Kapchiski and Teplyakov.
- Permet à la fois la **focalisation**, la **mise en paquets** avec un fort taux de capture et **l'accélération** jusqu'à quelques MeV.
- A remplacé les Cockcroft-Walton comme injecteur.



Mode  $TE_{010}$



RFQ avec ses  
« vanes »

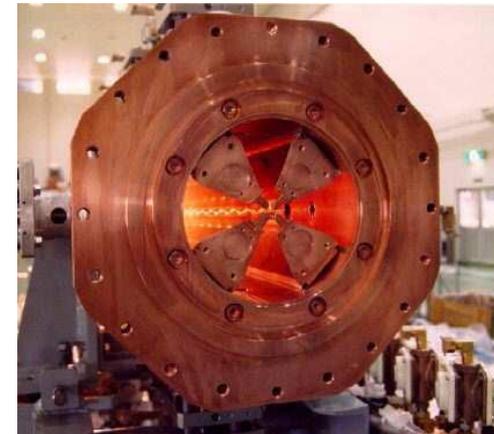
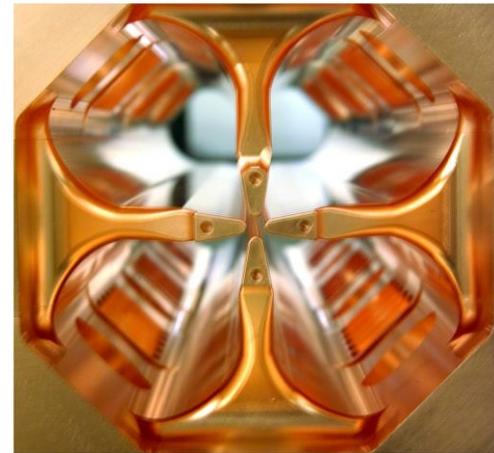
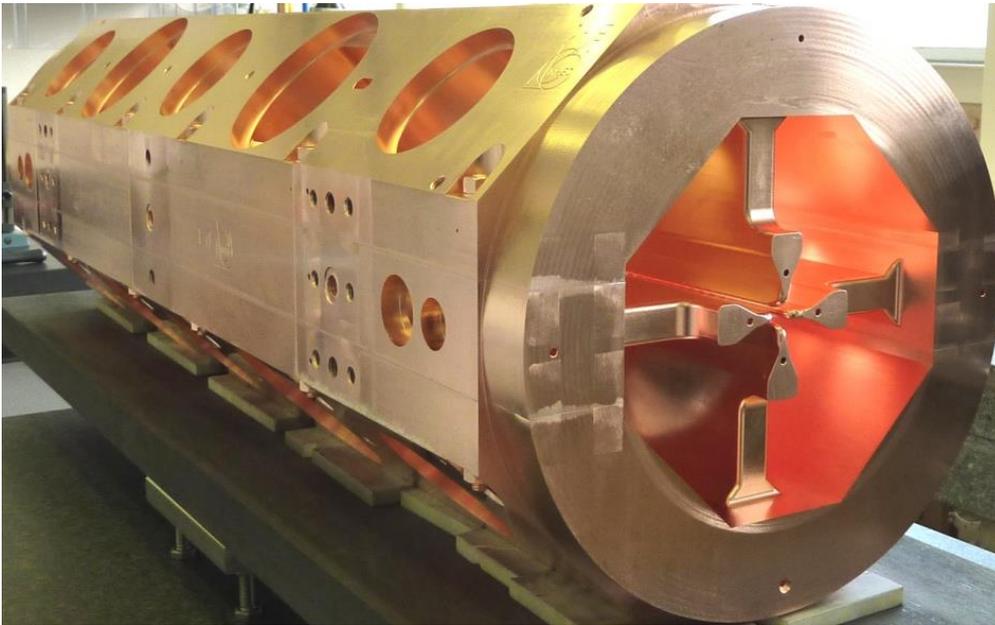


## Dynamique du faisceau

Code TOUTATIS de Romuald  
Duperrier CEA-IRFU

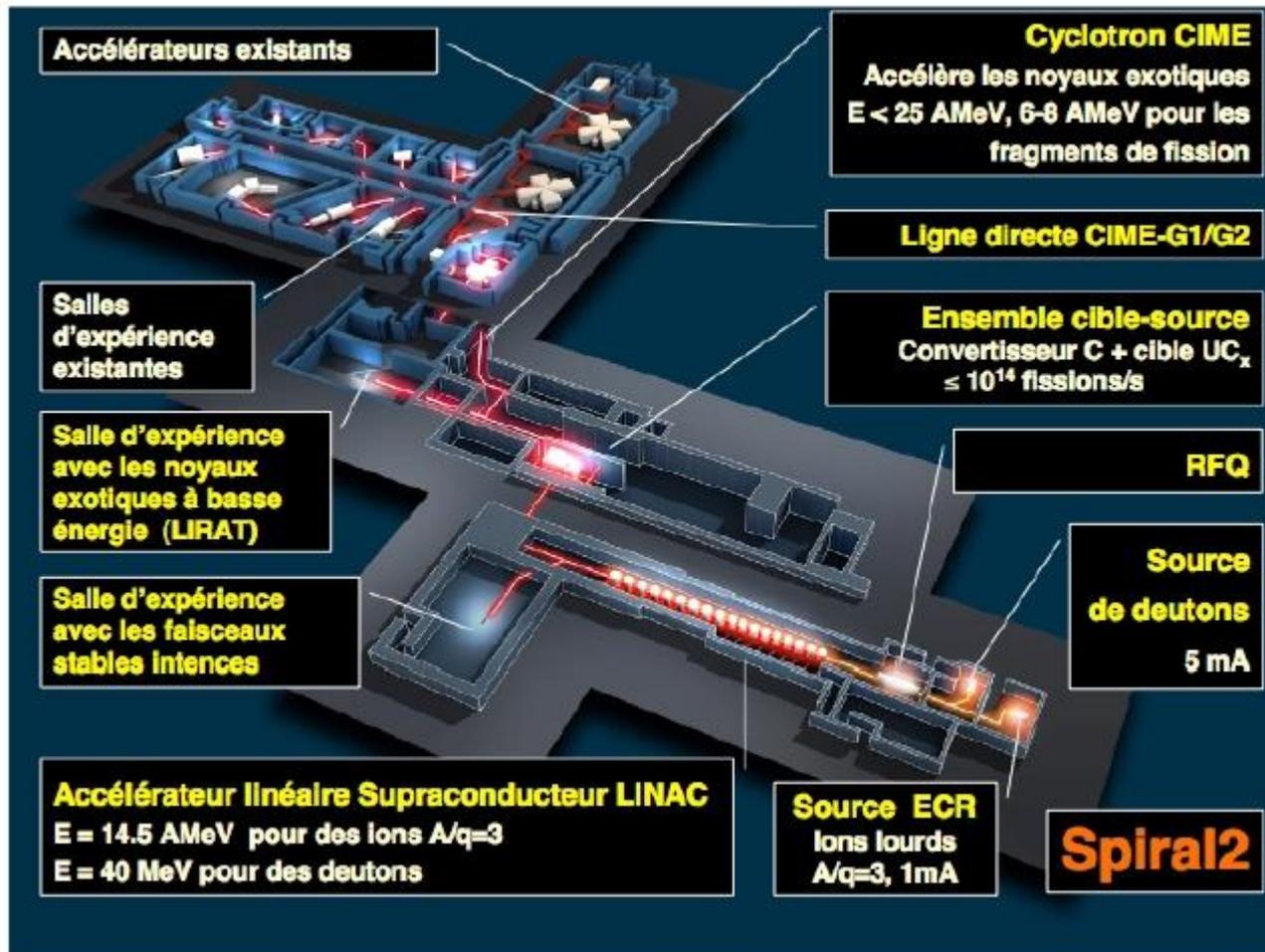
# RFQ: une fabrication très délicate

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



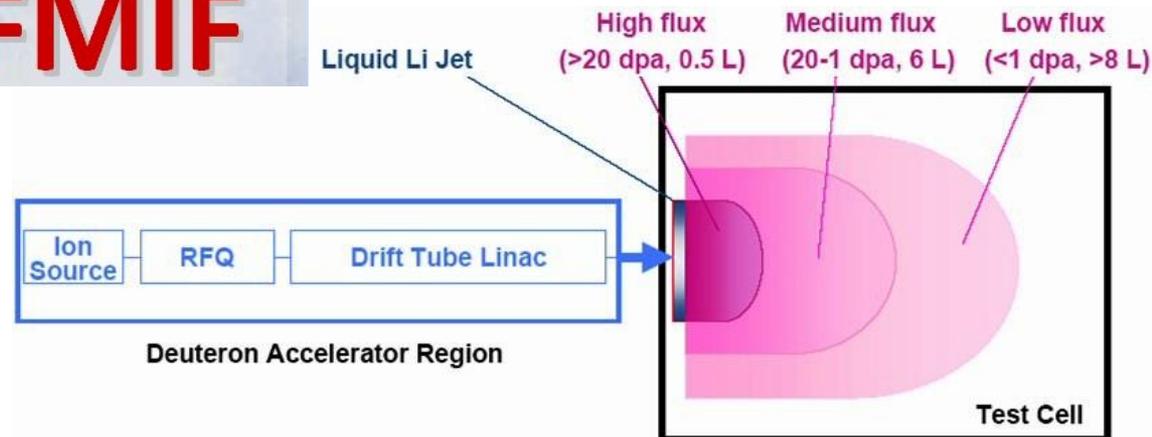
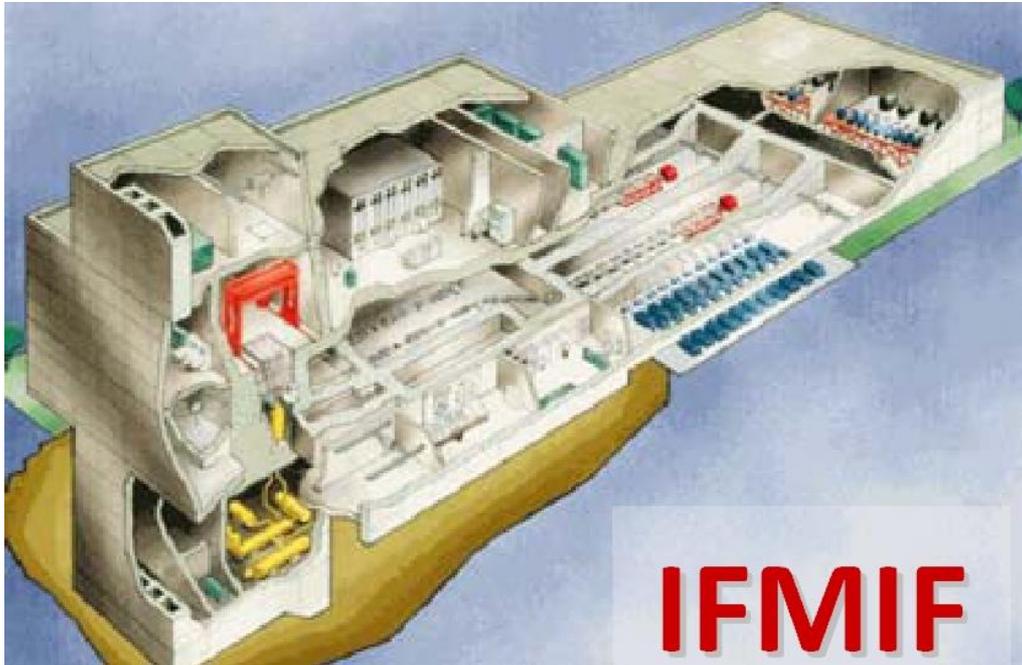
# Grands projets utilisant des Linacs pour ions

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

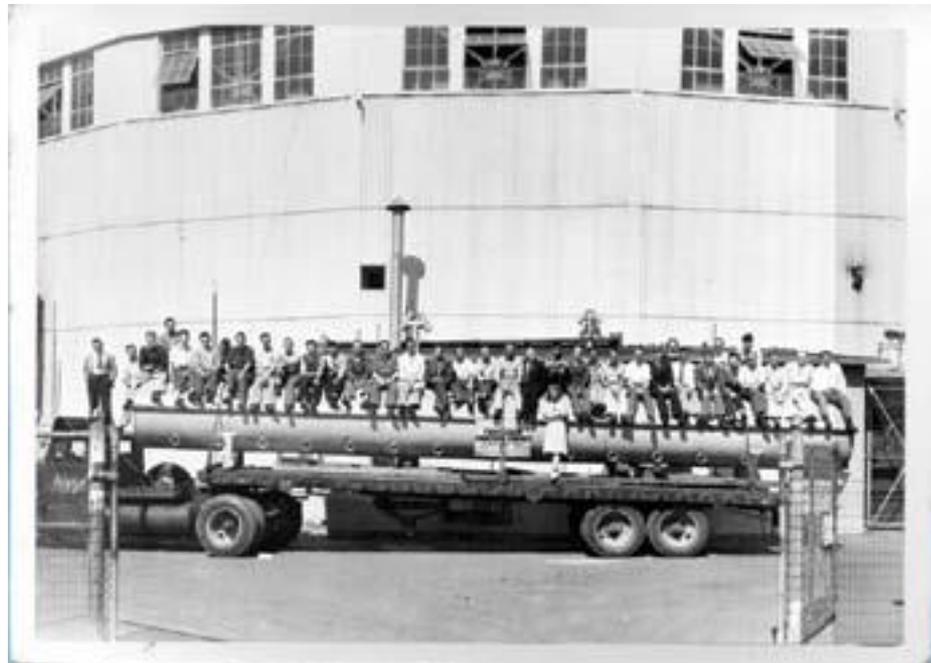


# Les Linacs pour électrons

- 1948 : Ginzton, Hansen, Kennedy construisent le 1<sup>er</sup> 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.



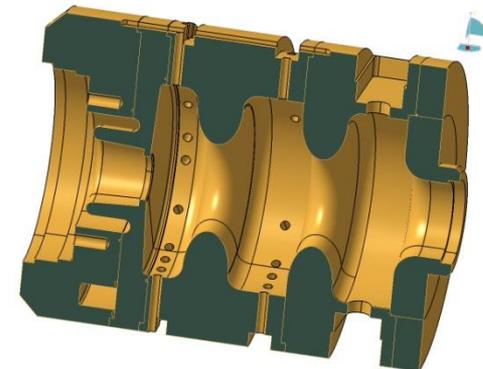
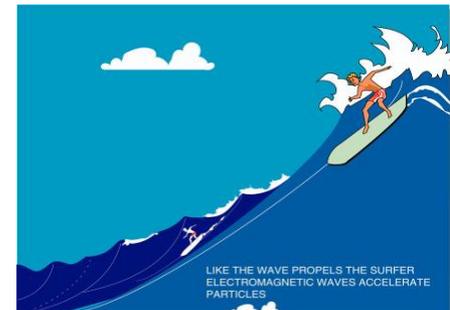
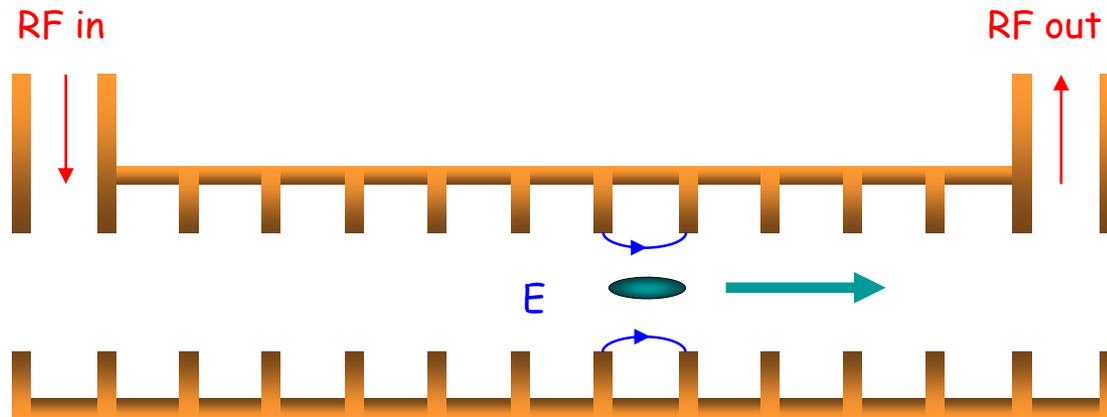
William Hansen et ses collègues avec une structure 3 GHz



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

# Structures chargées par des iris

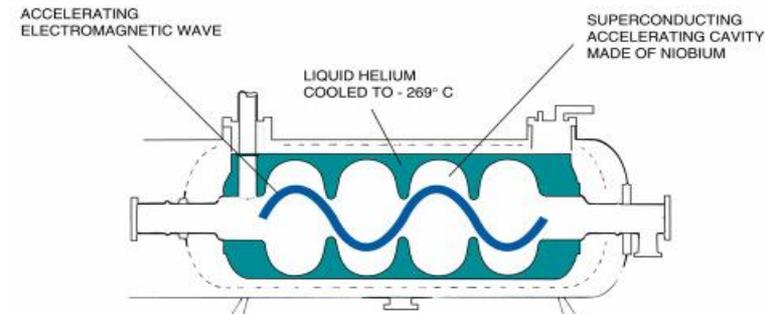
- Dans les guides d'onde la vitesse de phase des ondes e.m. est supérieure à  $c$ , donc a fortiori à la vitesse des particules.  
→ on couple l'onde à des structures résonantes.  
→ vitesse des particules égale vitesse de phase
- Les électrons voient donc tout le long de la structure une phase accélératrice.



Photoinjecteur à 3 GHz

# Les cavités supraconductrices (avantages)

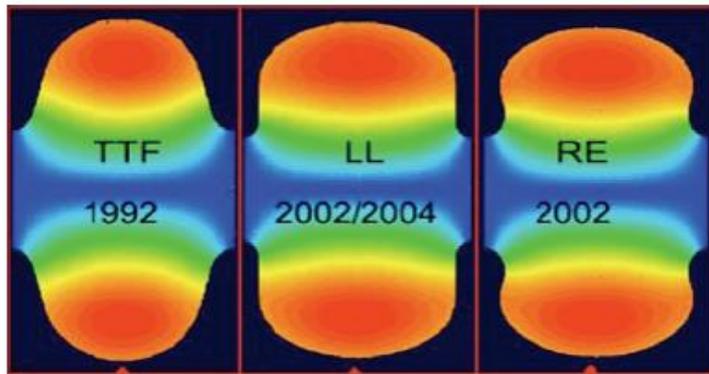
- Très faibles pertes dues à la résistance de surface (très grand facteur de qualité  $qq\ 10^9$ ),  
→ Fonctionnement en onde stationnaire avec besoin réduit en puissance crête.
- Bon rendement.
- Fréquence de fonctionnement “classique” (1.3 GHz).
- Taille des iris importante.  
→ tolérances mécaniques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

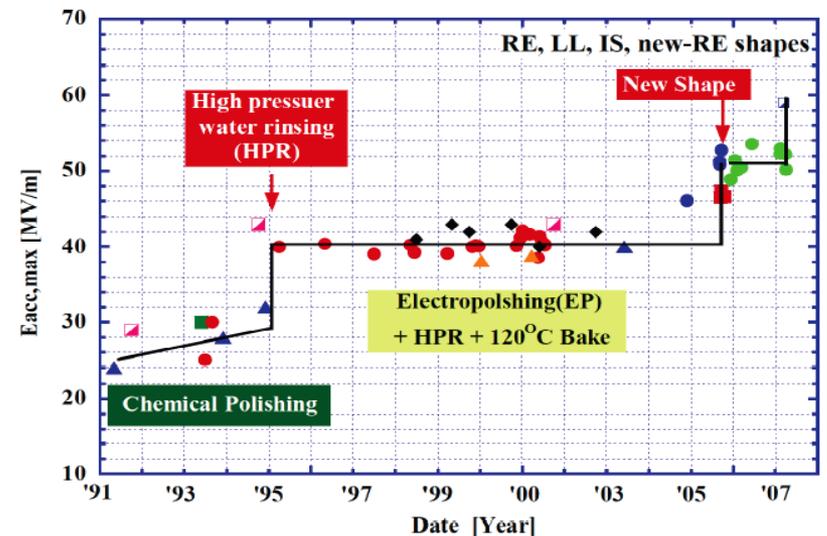
Le champ  $E_{acc}$  est limité par le champ  $B_{crit}$  (quench).

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

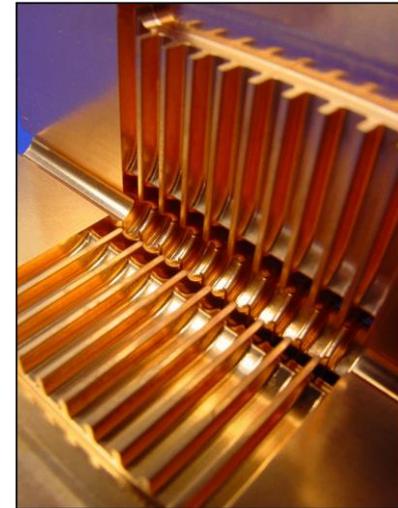
# Structures accélératrices normales (résistives)

- 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:  $< 1\mu s$

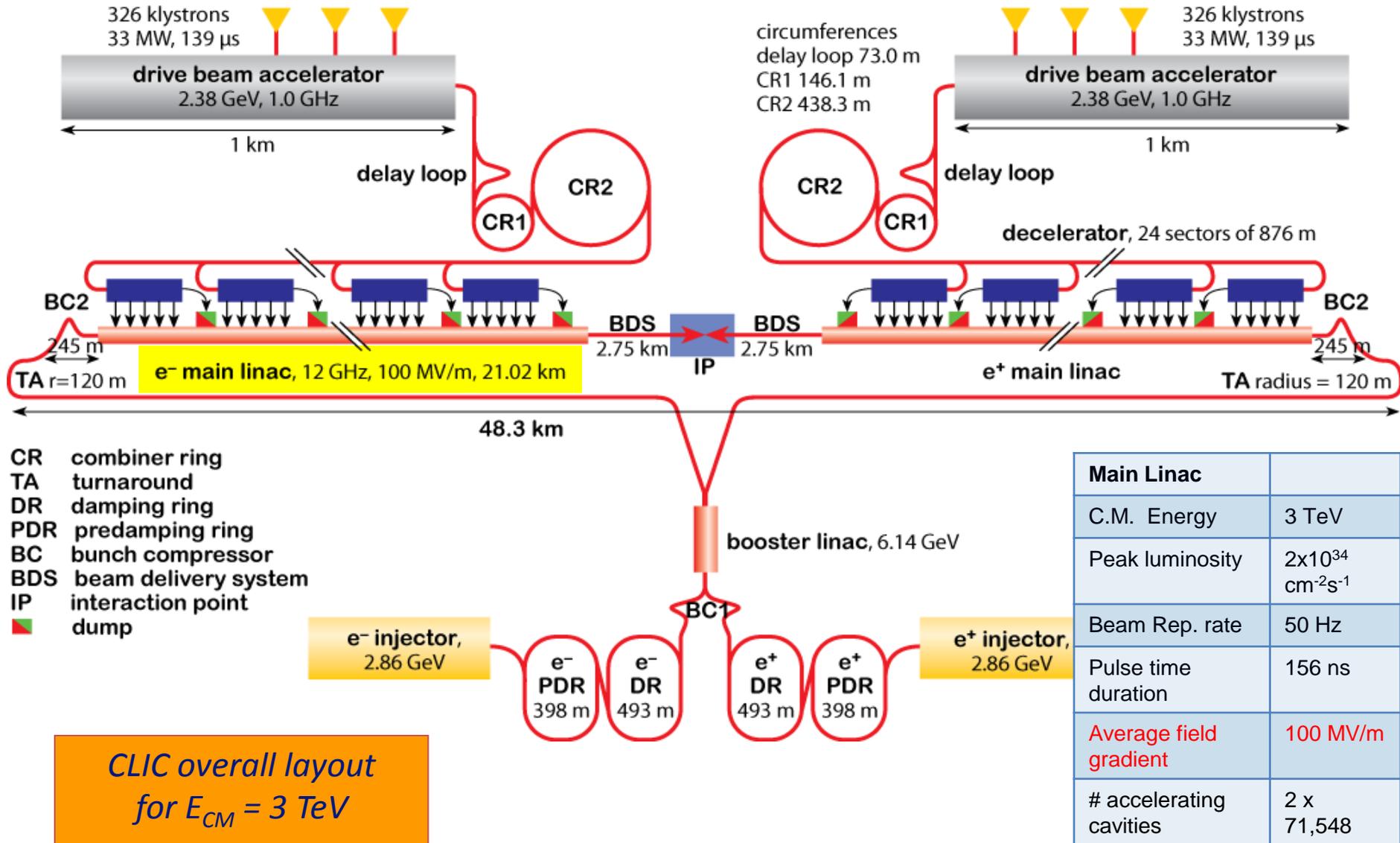
→ fonctionnement en onde progressive  
(temps de remplissage  $t_{fill} = \int 1/v_G dz$ )

- 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)

# Schéma général du CLIC



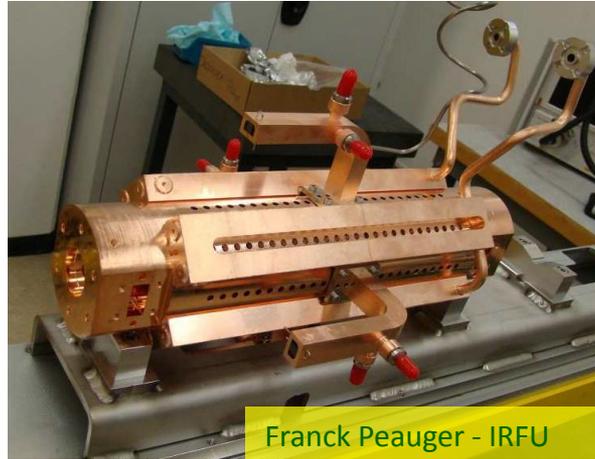
# Les structures 12 GHz en cours de test



Les disques  
(Mecachrome)



Diffusion bonding  
(Thales)



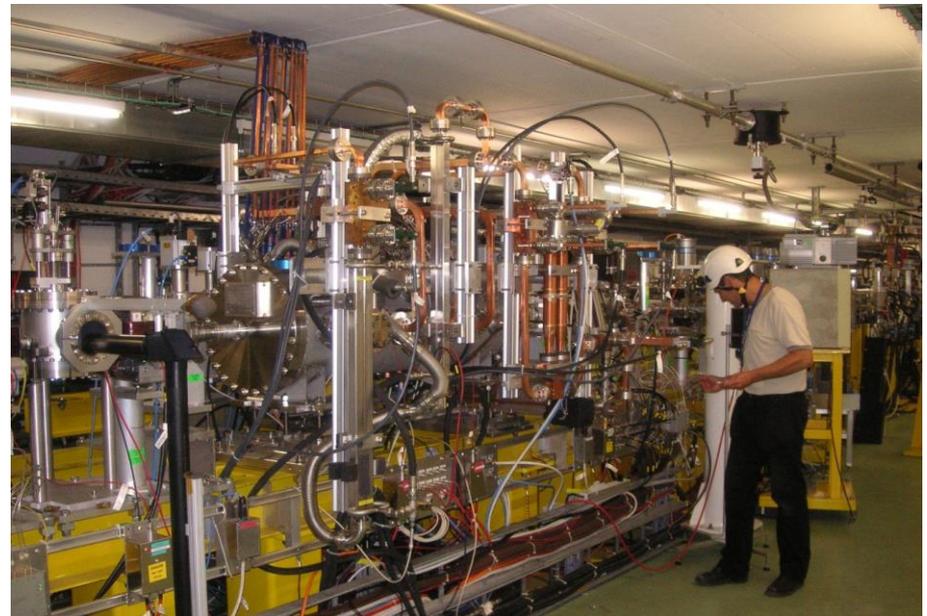
Franck Peauger - IRFU

Montage des  
canaux d'eau et  
des WFM  
(Bodycot)



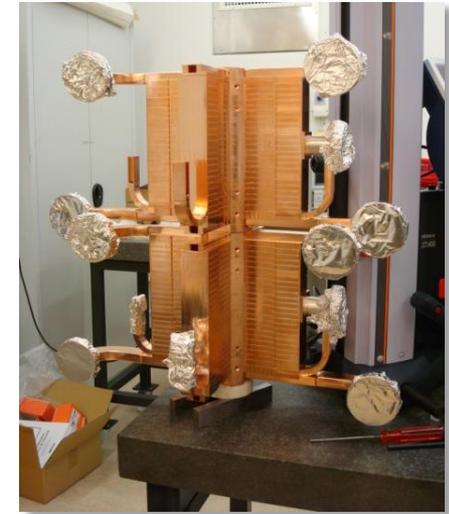
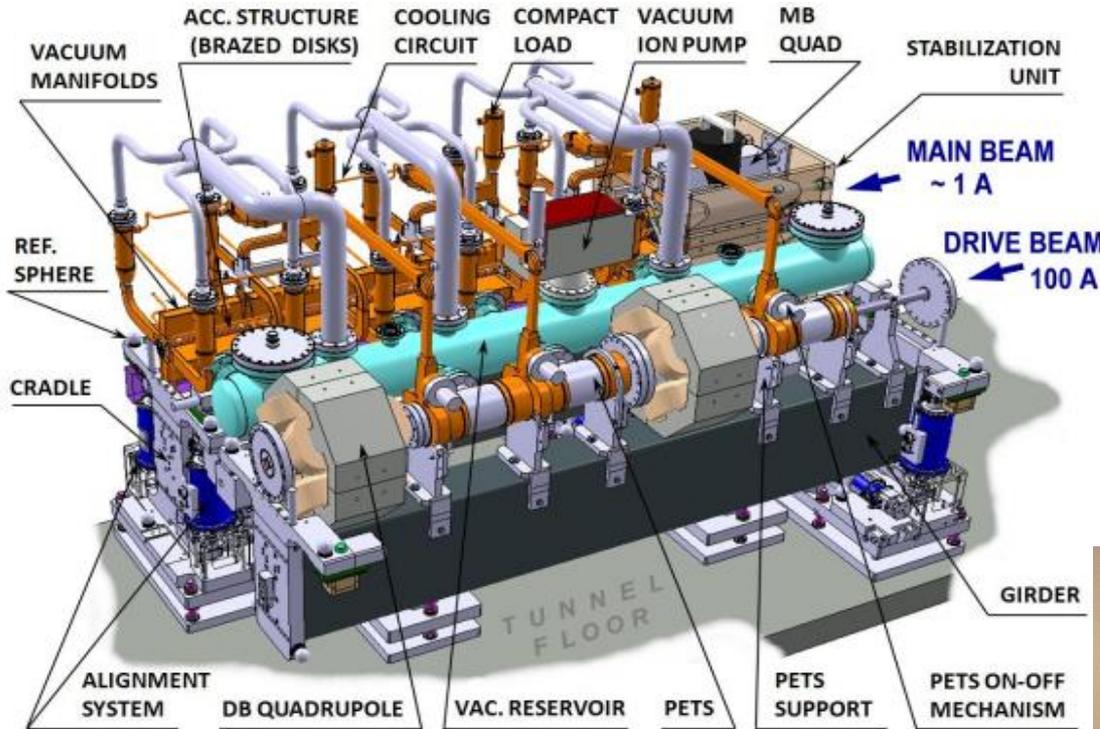
Germana Riddone

Dans le tank a vide  
(CERN)



Le TBTS

# Les modules CLIC

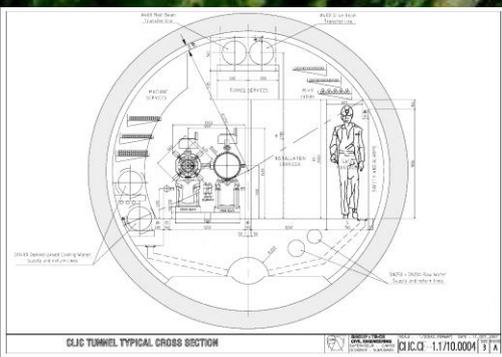


- Encore en test et développement au Labo
- Installation and test prévus dans le CLEX en 2013
- Trois modules dans le CLEX en 2014-2016

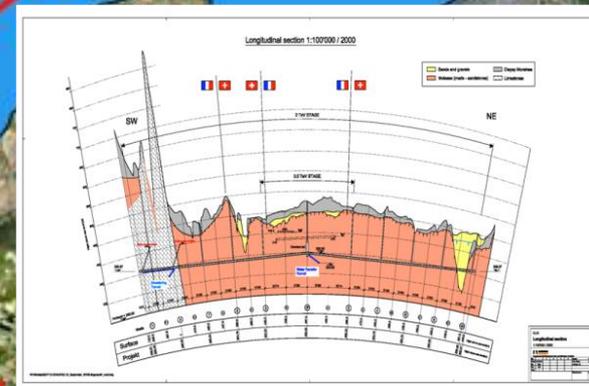
# CLIC au CERN

### Legend

- CERN existing LHC
- Potential underground siting :
- CLIC 500 GeV
- CLIC 1.5 TeV
- CLIC 3 TeV



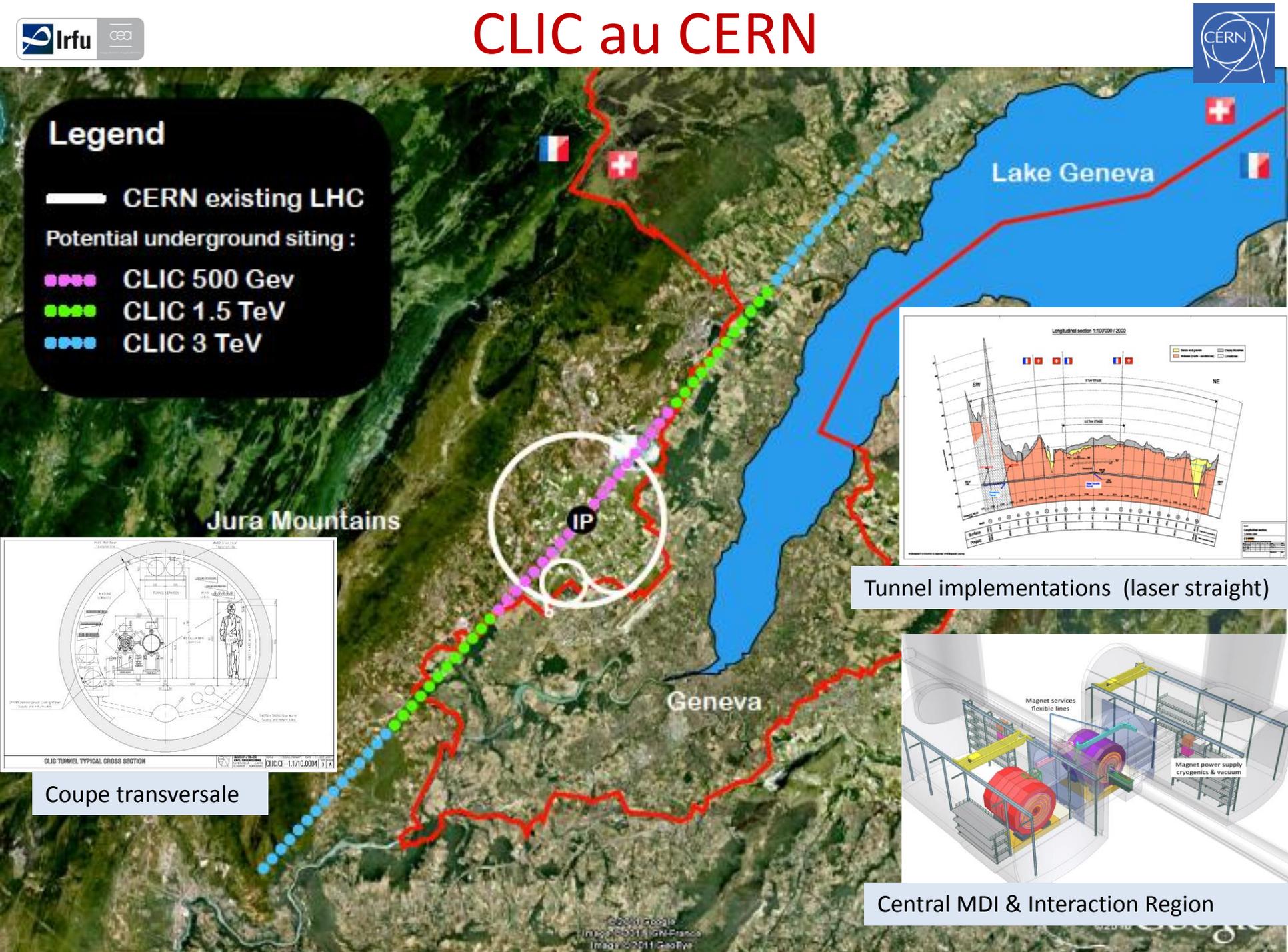
Coupe transversale



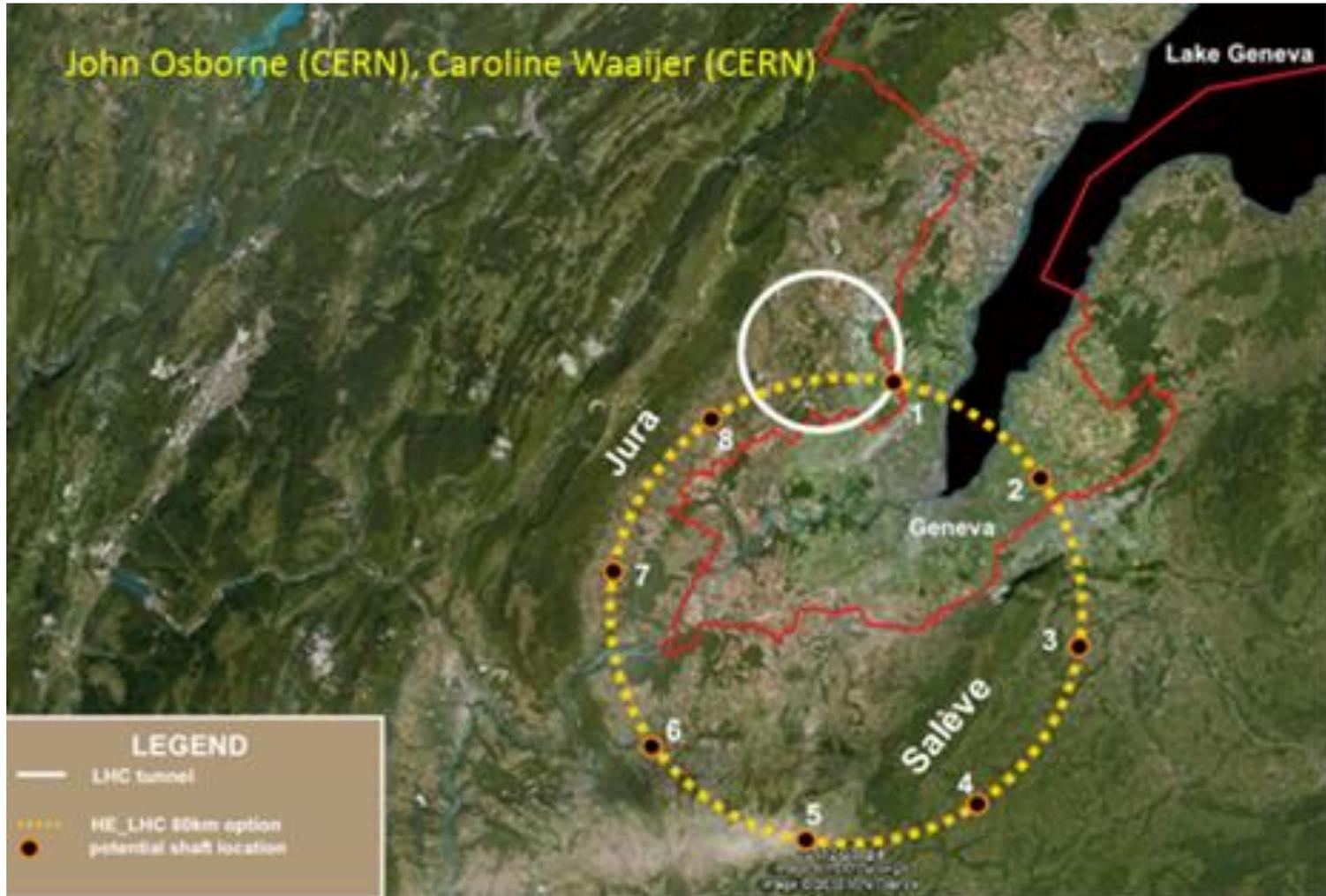
Tunnel implementations (laser straight)



Central MDI & Interaction Region



# Autre projet gigantesque: le FCC



100 TeV protons Dipôles 13.5 T

# Pour rejoindre le monde des accélérateurs

## Ecoles:

JUAS Archamps

IPAM Paris

CAS Cern Accelerator School

CERN summer student



**4 Juillet 2012 : Annonce de la découverte du boson de Higgs**

## 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)

# 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
- ...