



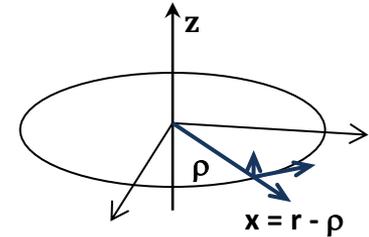
Les accélérateurs de particules

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 ρ 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 $B_z(r) = B_z(\rho) \cdot \left(\frac{\rho}{r}\right)^n$

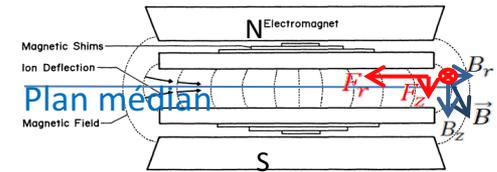
Nous avons alors : $\frac{m v^2}{r} \approx \frac{m v^2}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{x}{\rho}\right)$ et $e v B_z(r) \approx e v B_0 \cdot \left(1 - n \frac{x}{\rho}\right)$

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 bêtaon sont alors :

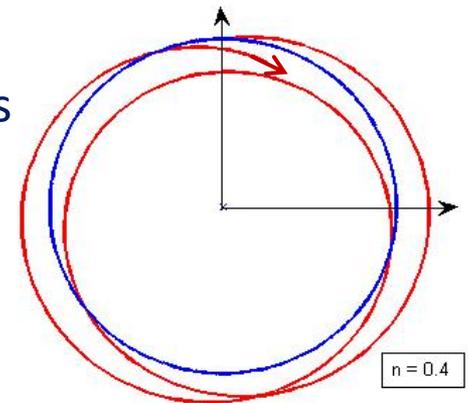
$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 (1 - n) x = 0 \quad \frac{d^2z}{dt^2} + \omega_0^2 n z = 0 \quad \omega_0 = \frac{q B_0}{m}$$

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

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

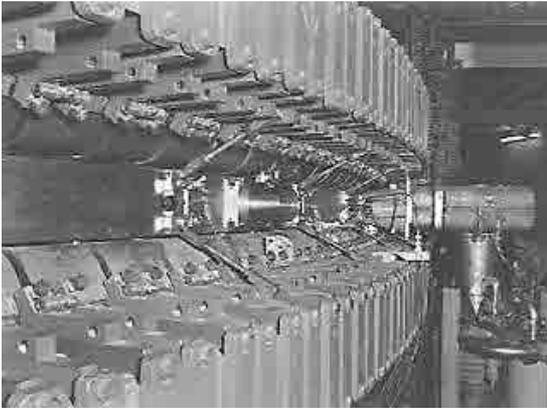
Les écarts par rapport à l'orbite de référence sont alors très importants, la chambre a vide et les entrefers doivent être larges.

| | 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 ²) | 50 x 21 | 60 x 10 | 91 x 22 | 122 x 30 | 150 x 40 |
| Date démarrage | 1953 | 1958 | 1952 | 1954 | 1957 |

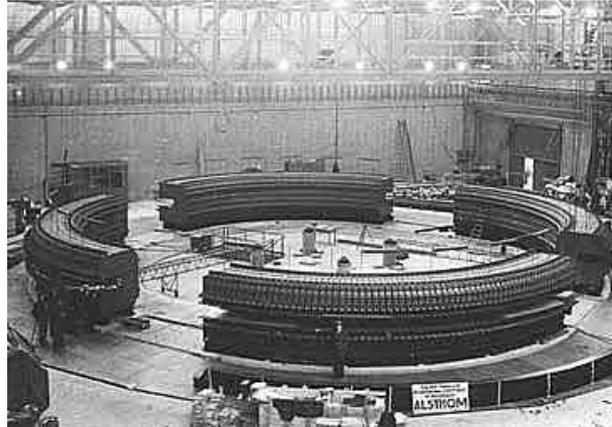


Oscillations bêtaon dans le plan horizontal pour $n=0.4$

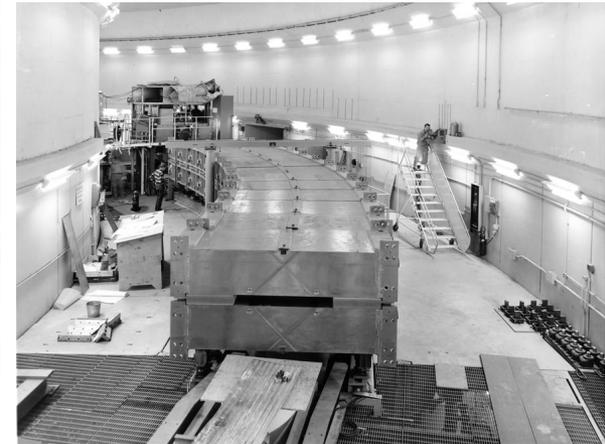
Des réalisations imposantes



1952: Cosmotron a Brookhaven 3 GeV



1958: Saturne 1 a Saclay 3 GeV



1962: ZGS a Argonne 10 GeV p+



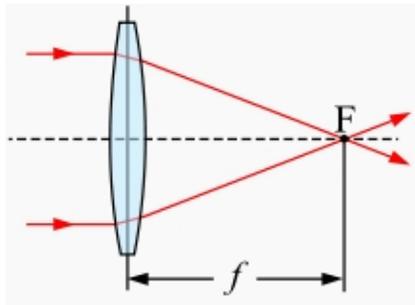
1957: Synchrotron a Dubna - 12.5 GeV



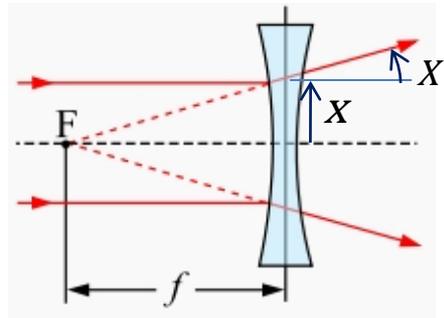
Démantelé en 2002

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.

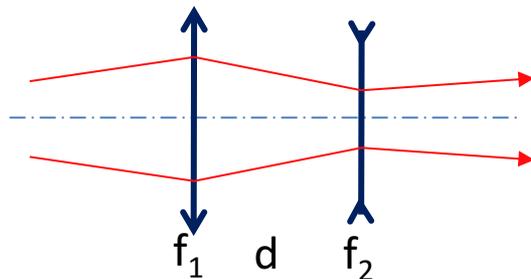


$f > 0$ focalisant



$f < 0$ defocalisant

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



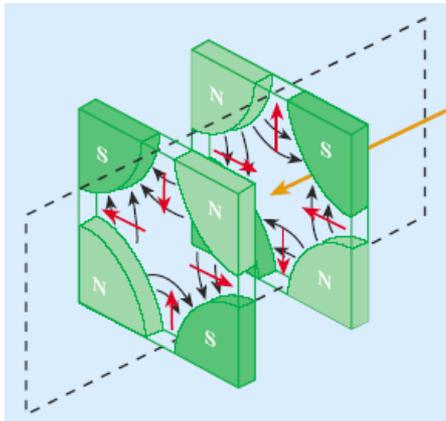
$$\begin{pmatrix} a & b \\ -\frac{1}{F} & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1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

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

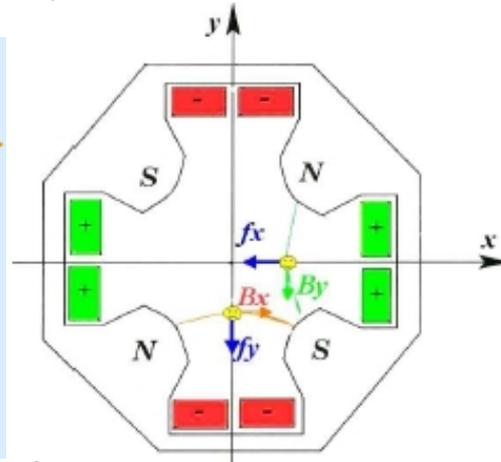
Si $f_1 = -f_2 = f$ alors : $F = \frac{f^2}{d} > 0$ donc focalisant

Les quadropoles

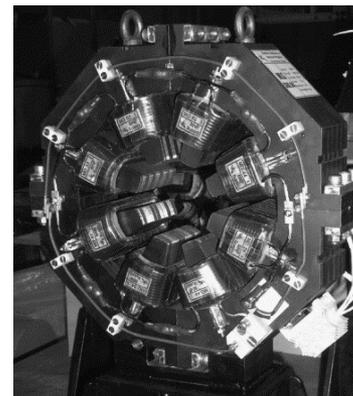
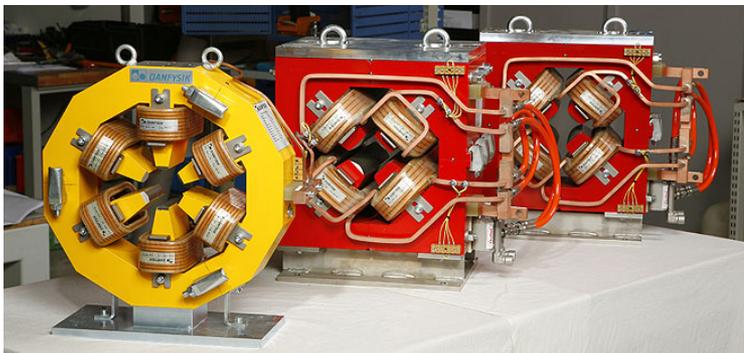
- Les particules qui ne passent pas dans l'axe voient un champ magnétique transverse. Si l'effet est focalisant dans le plan horizontal alors il est défocalisant dans le plan vertical (et vice versa).
- Utilisés en doublet ou en triplet.



Forces dans un Quadropole



Doublet de quadropoles magnétiques

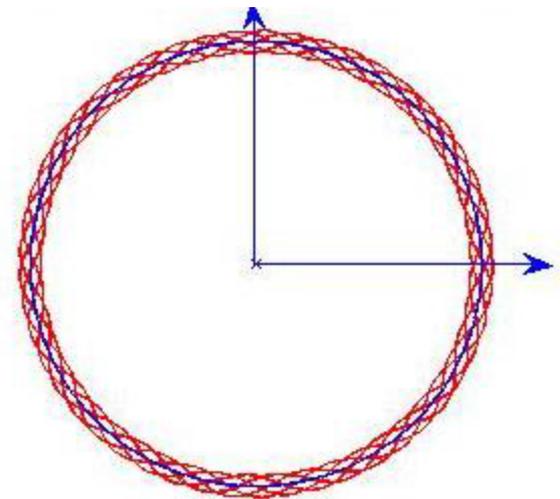
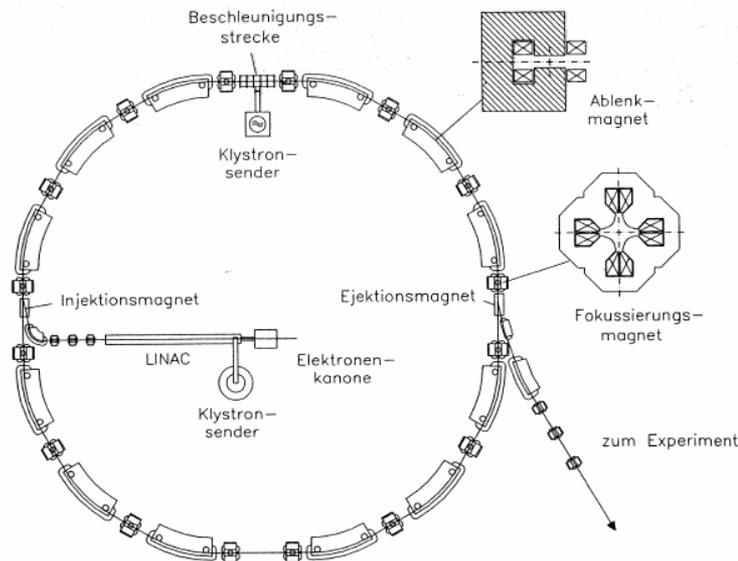


Quadropole électrostatique

Et aussi des sextupoles, des octupoles...
Remarque d'été de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt

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.



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

Le PS, premier synchrotron à gradient alterné

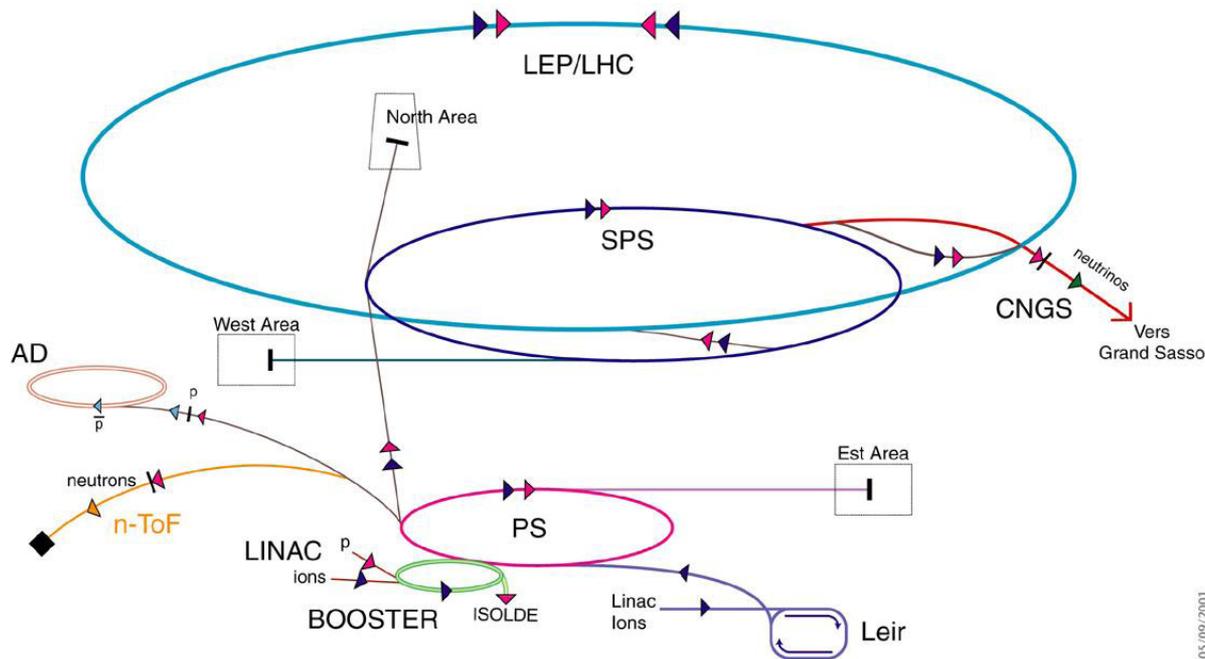
- La fréquence varie de 100 kHz a 5 MHz
- La machine ne passait pas l'énergie de transition (stabilité longitudinale).
- Schnell réalisa un montage de fortune pour faire un saut de phase a l'énergie de transition et immédiatement le PS atteignit son énergie nominale.



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.”

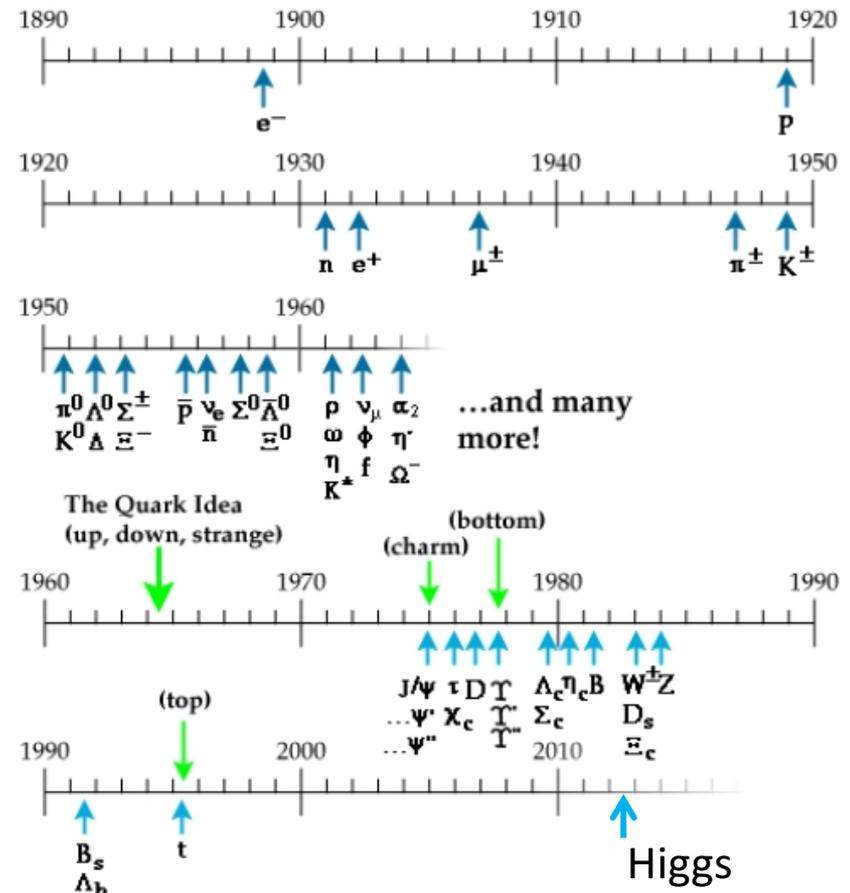
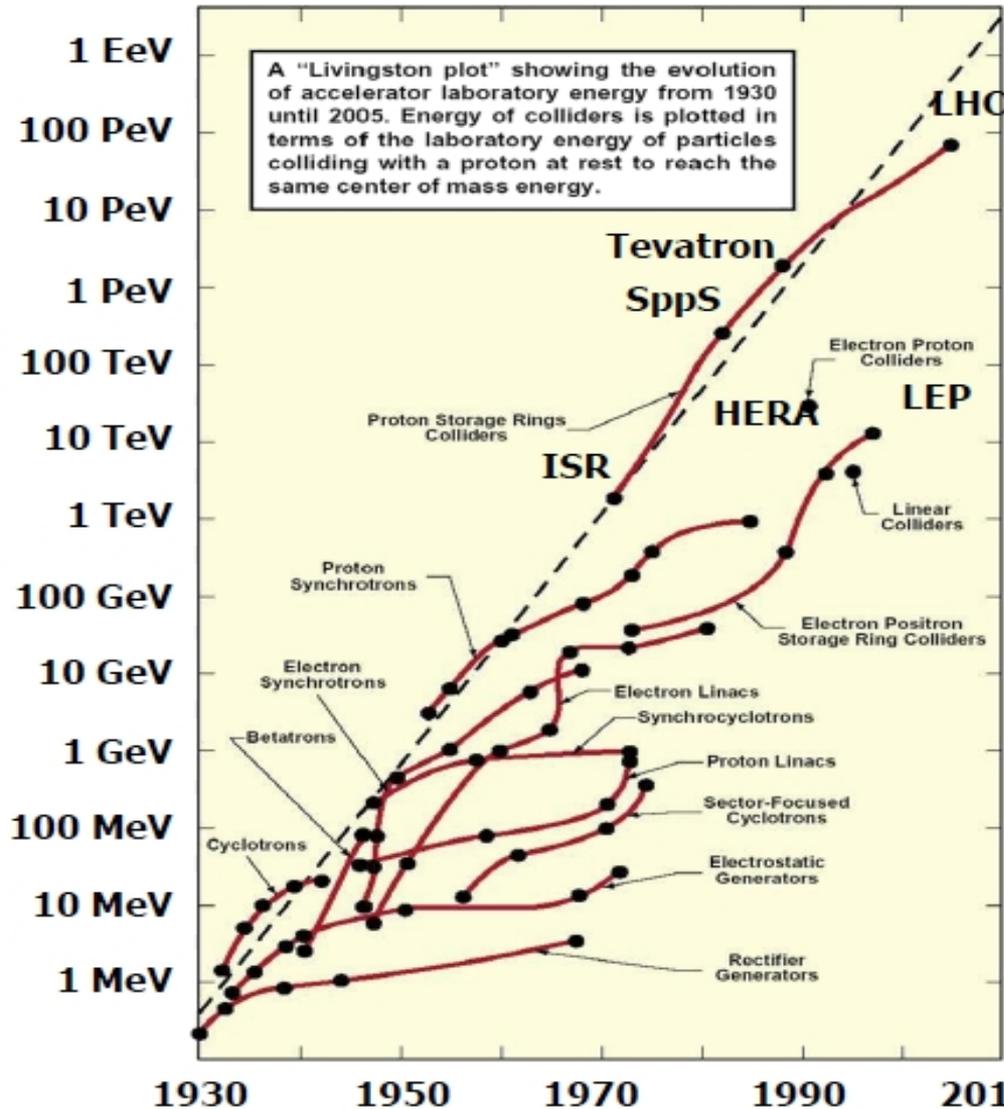
| | | |
|------------|---------------------------|--|
| Fix Target | $E_1 = 7 \text{ TeV}$ | } $E_{cm} = \sqrt{2 \cdot 7000 \cdot 1} = 118 \text{ GeV}$ |
| | $E_2 = m_{\text{Proton}}$ | |
| Collider | $E_1 = 7 \text{ TeV}$ | } $E_{cm} = 2 \cdot 7000 = 14'000 \text{ GeV}$ |
| | $E_2 = 7 \text{ TeV}$ | |

HS 2007

Rencontres d'été de physique 2023 -

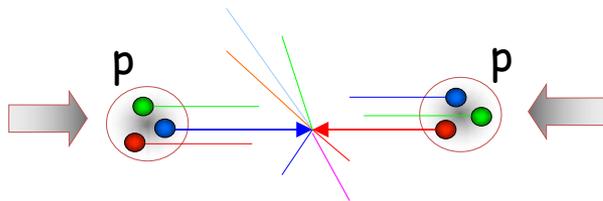
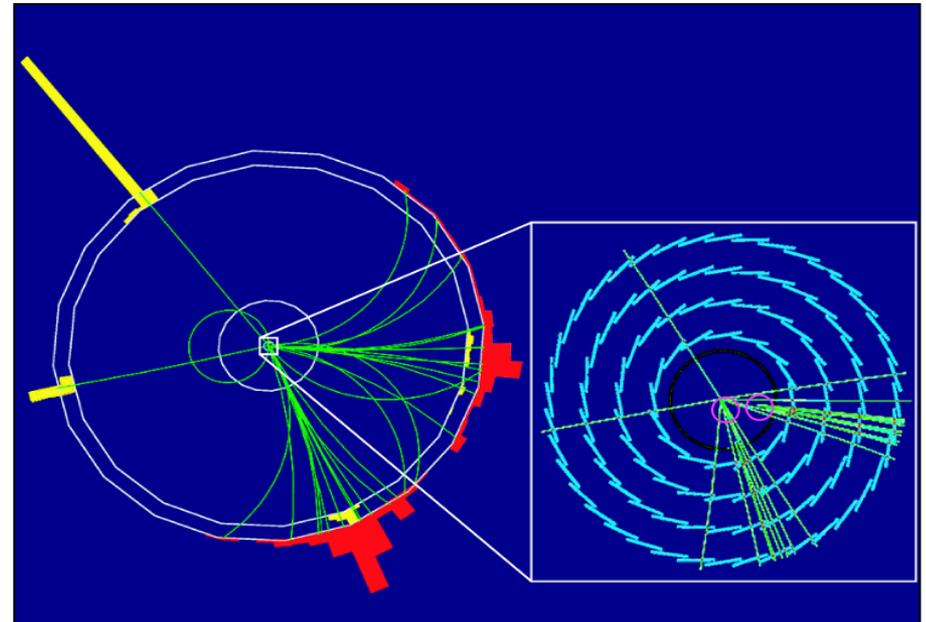
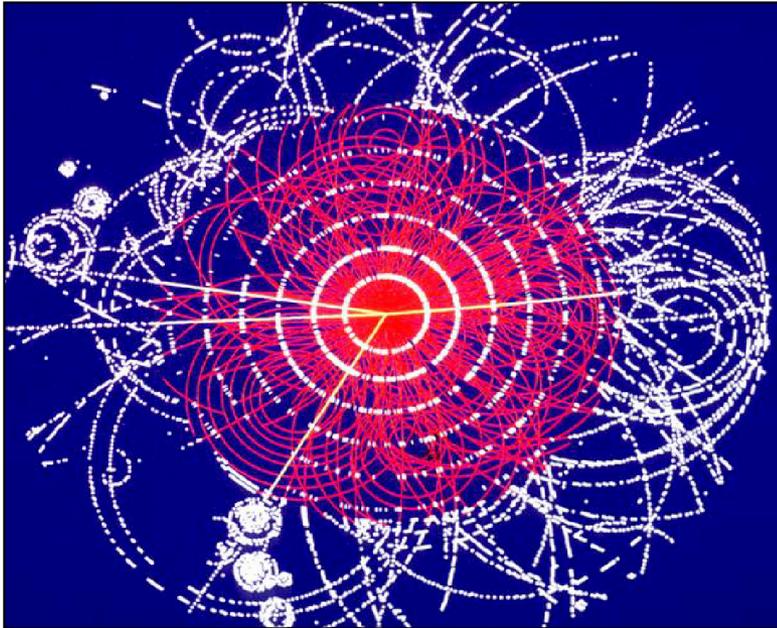
Promotion Henrietta S. Leavitt

Progression de l'énergie dans le c.m.

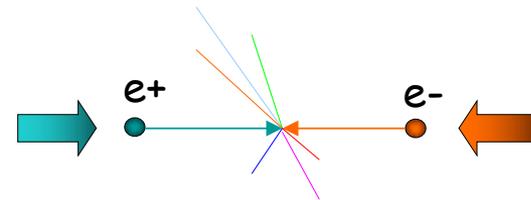


Les découvertes associées

Quel type de particules utiliser ?

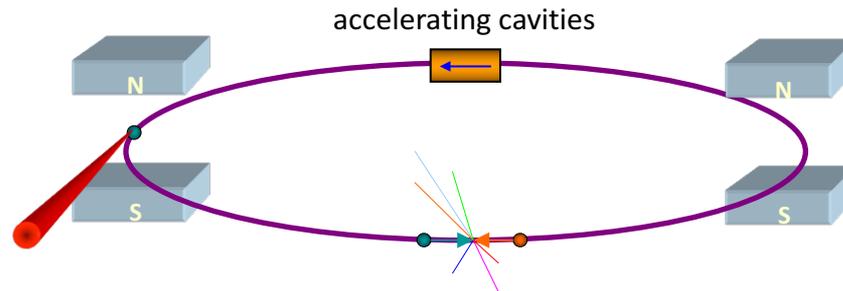


Collisionneur de Hadrons :
découvertes



Collisionneur de Leptons :
mesures de précision

Les collisionneurs circulaires



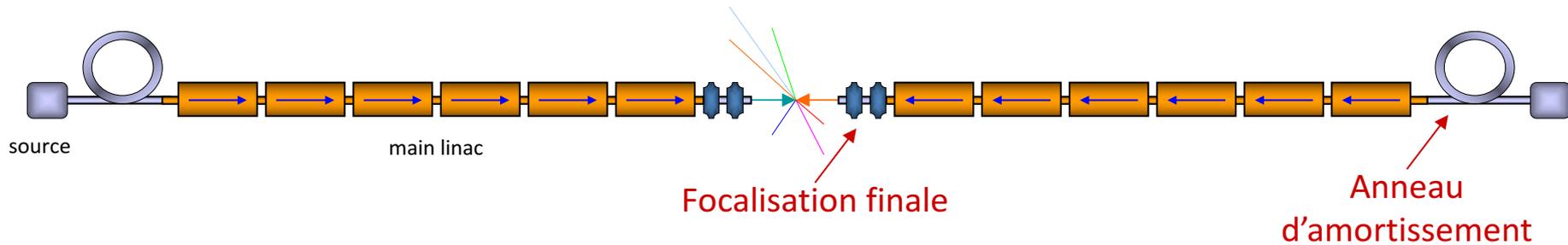
Collisionneurs circulaires

- 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

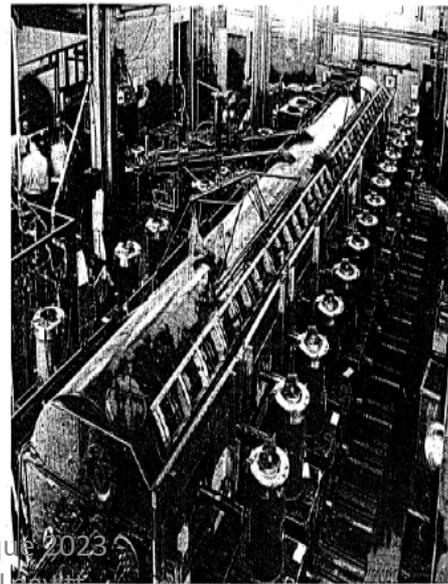
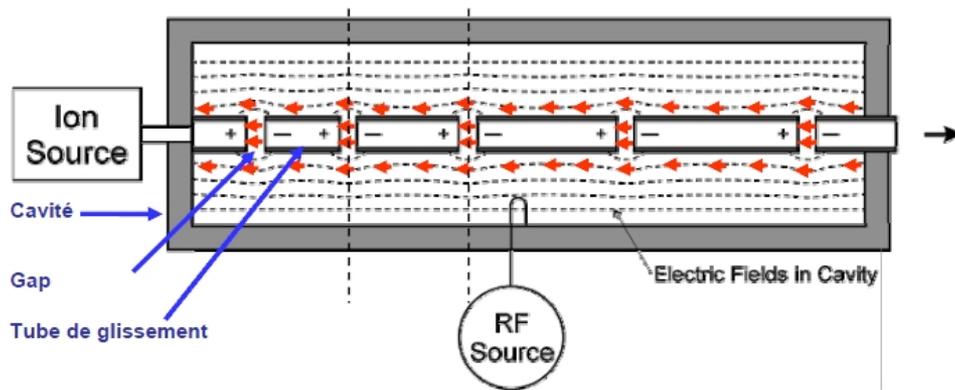


Collisionneurs linéaires

- 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 (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 $\propto CV$)
- 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

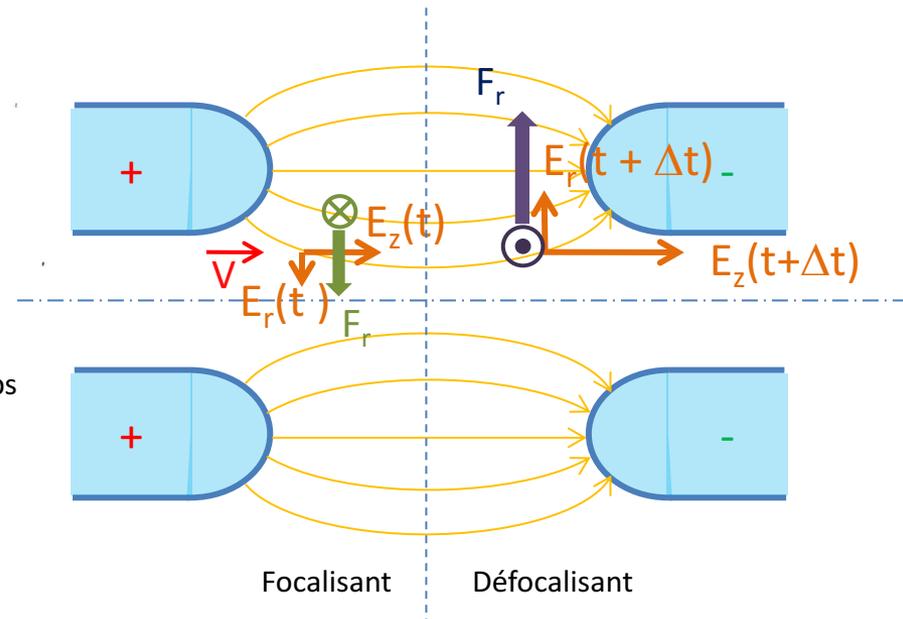
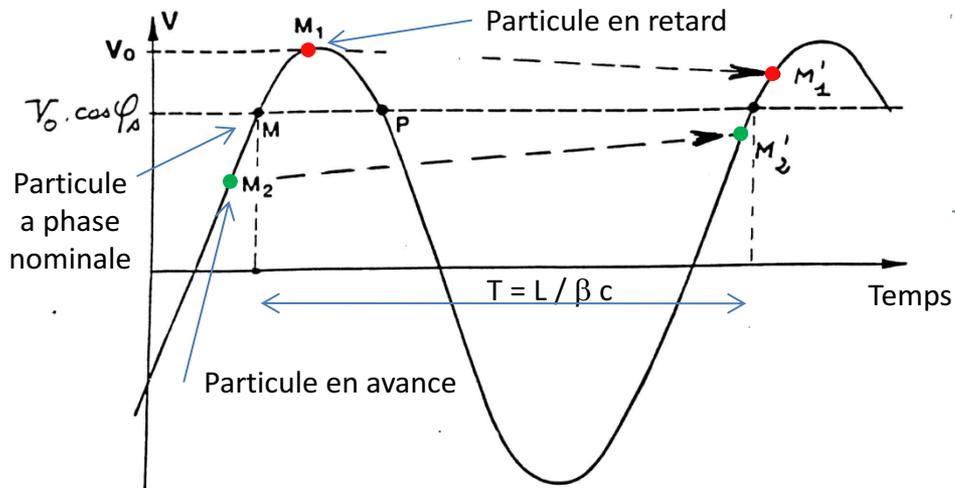


Luis Alvarez

Drift Tube Linac : DTL

Problème de stabilité

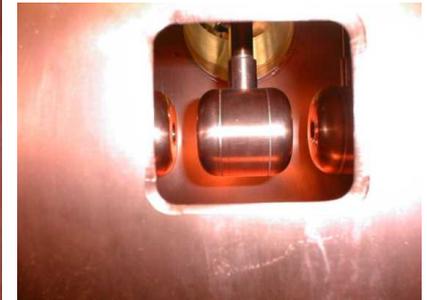
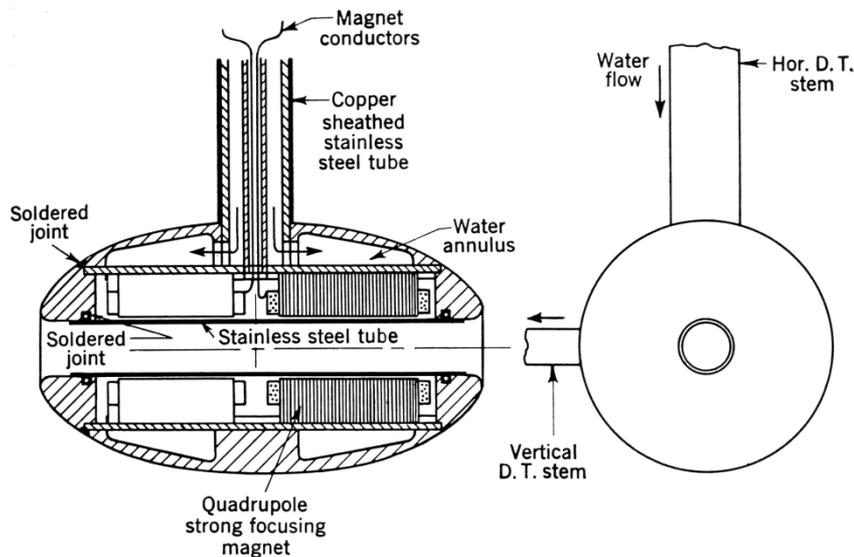
- La stabilité longitudinale exige que les particules soient sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Mais c'est incompatible avec la focalisation transverse.



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

Rencontres d'été de physique 2023 -

Promotion Henrietta S. Leavitt

Drift tube Linac (DTL)

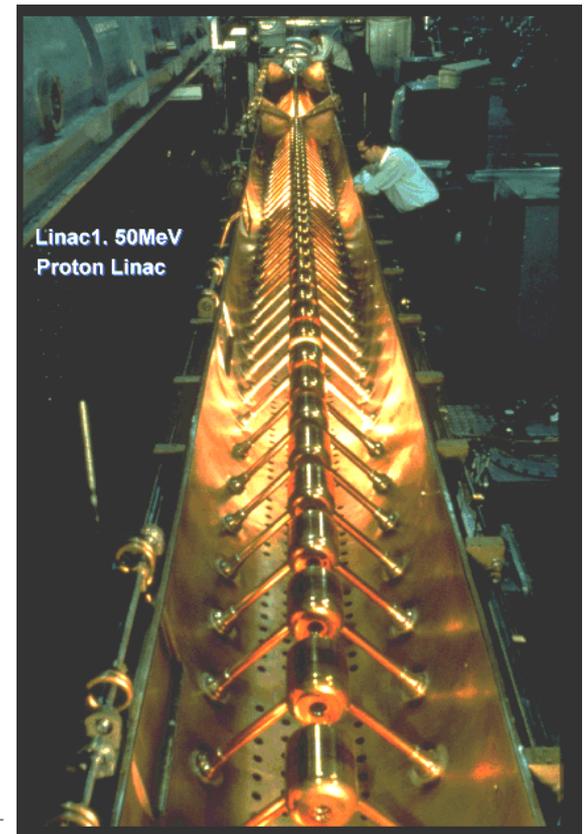
- Facilité d'injection et d'éjection par rapport aux machines circulaires
- Protons de 20 a 200 MeV, ion jusqu'à 10 MeV/a
- Energie fixe pour un type d'ion



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

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

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

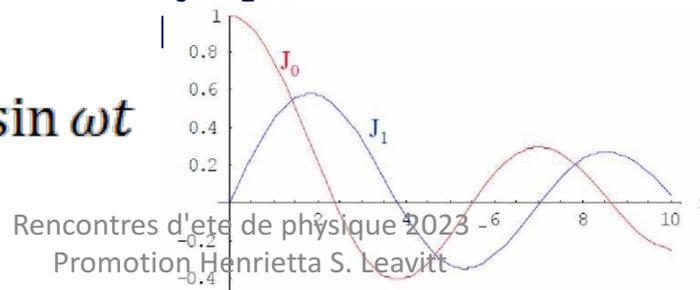
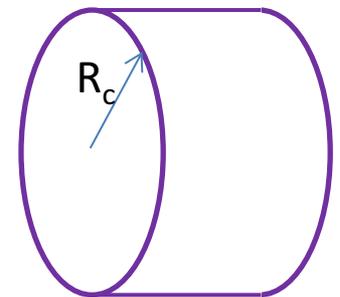
En considérant des solutions avec z comme axe de symétrie

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

J_0, J_1 : Fonctions de Bessel

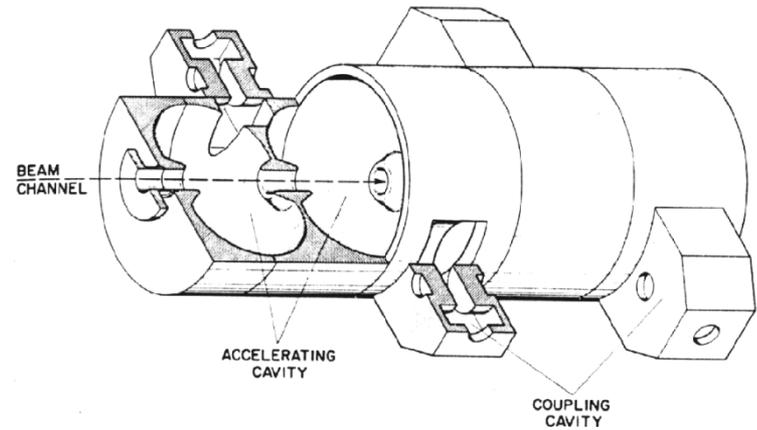
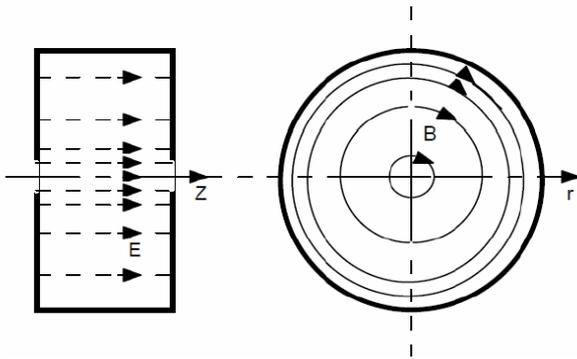
$$B_\theta(r, t) = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t$$

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

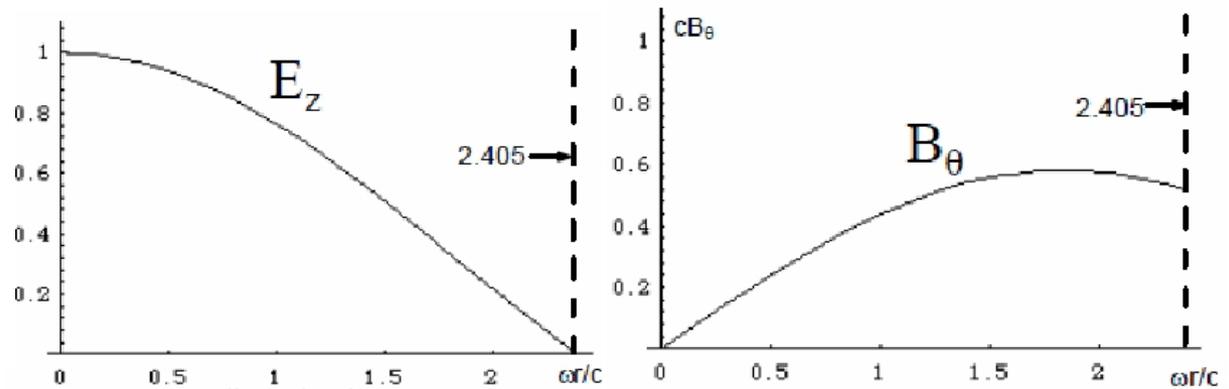
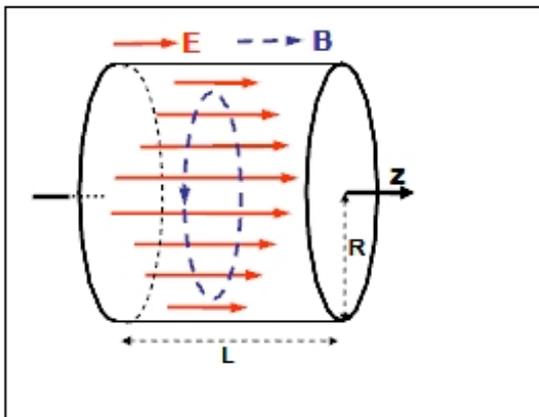


Mode TM_{010}

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

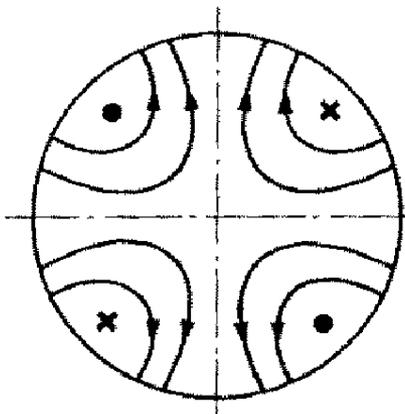


DTL a cavités couplées

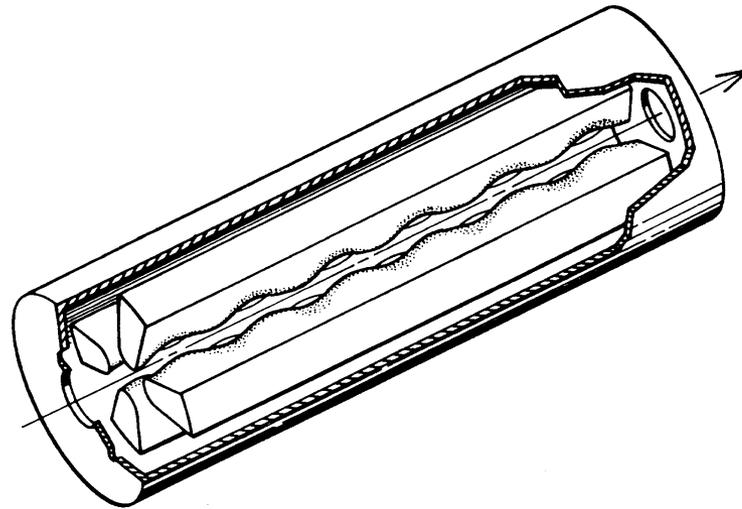


Mode TE_{010} : le RFQ

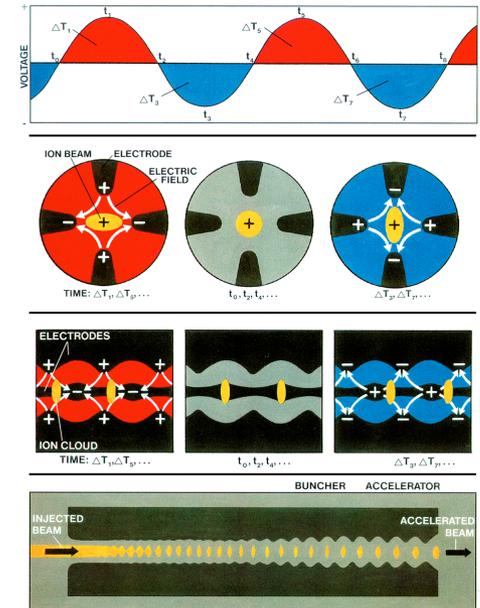
- Radio-Frequency Quadrupole : concept inventé en 1970 par Kapchiski and Teplyakov.
- Permet à la fois la **focalisation**, la **mise en paquets** avec un fort taux de capture et **l'accélération** jusqu'à quelques MeV.
- A remplacé les Cockcroft-Walton comme injecteur.



Mode TE_{010}



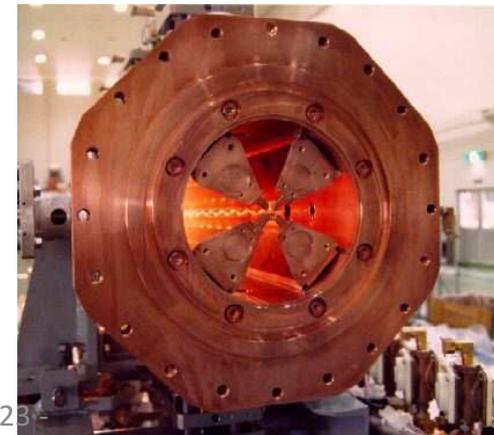
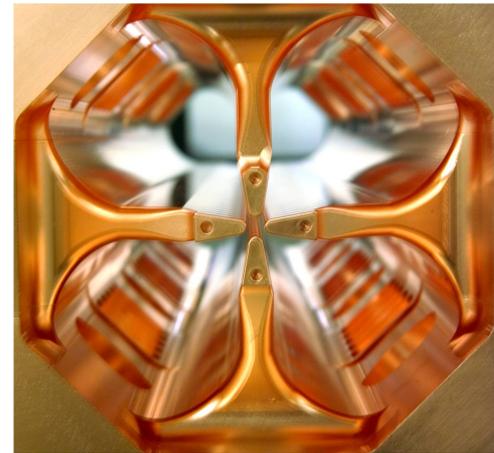
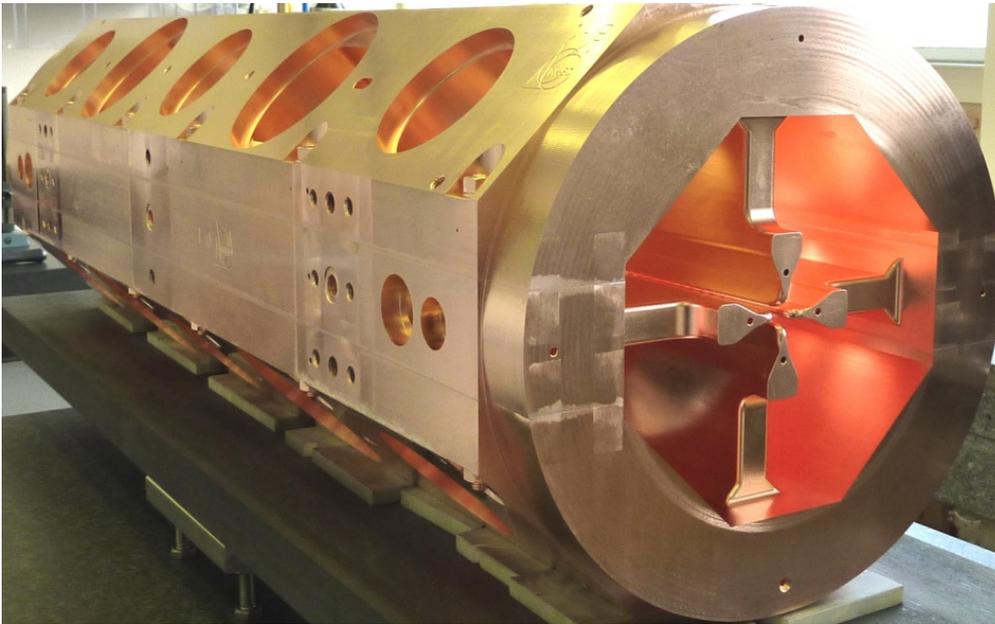
RFQ avec ses
« vanes »



Dynamique du faisceau

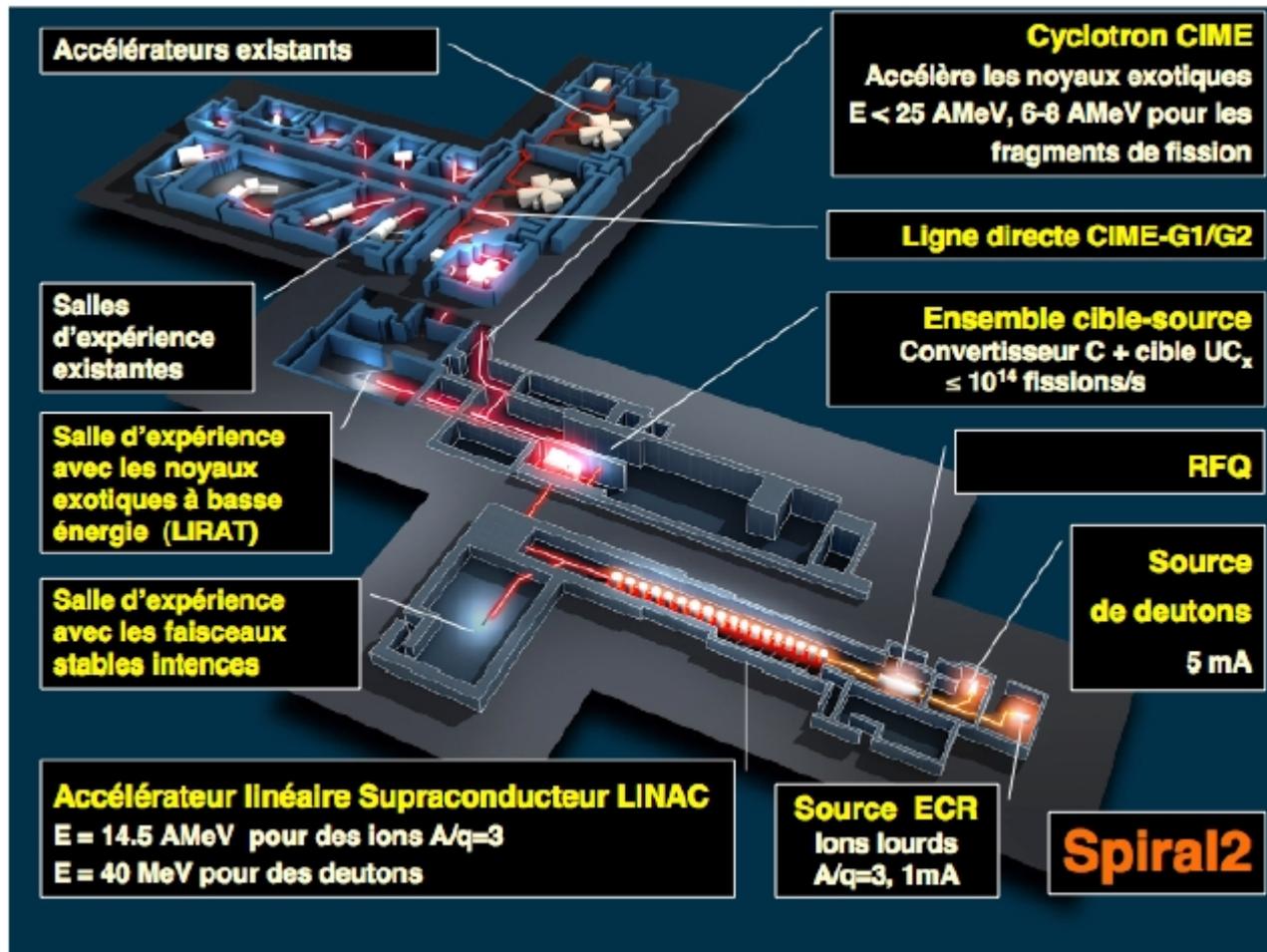
RFQ: une fabrication très délicate

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



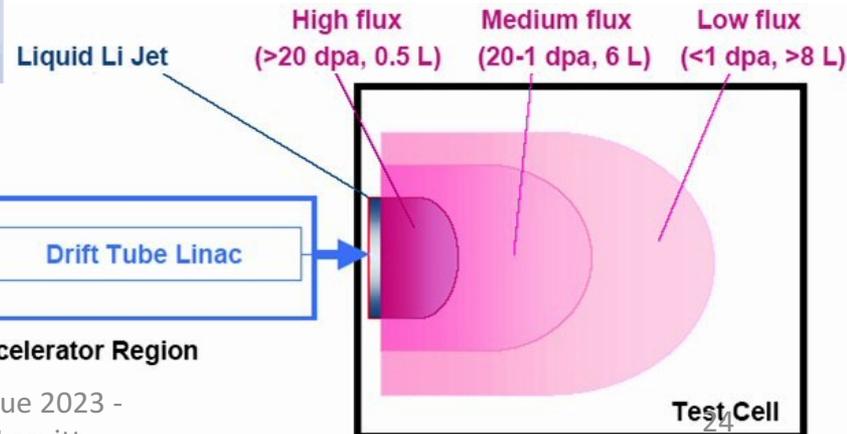
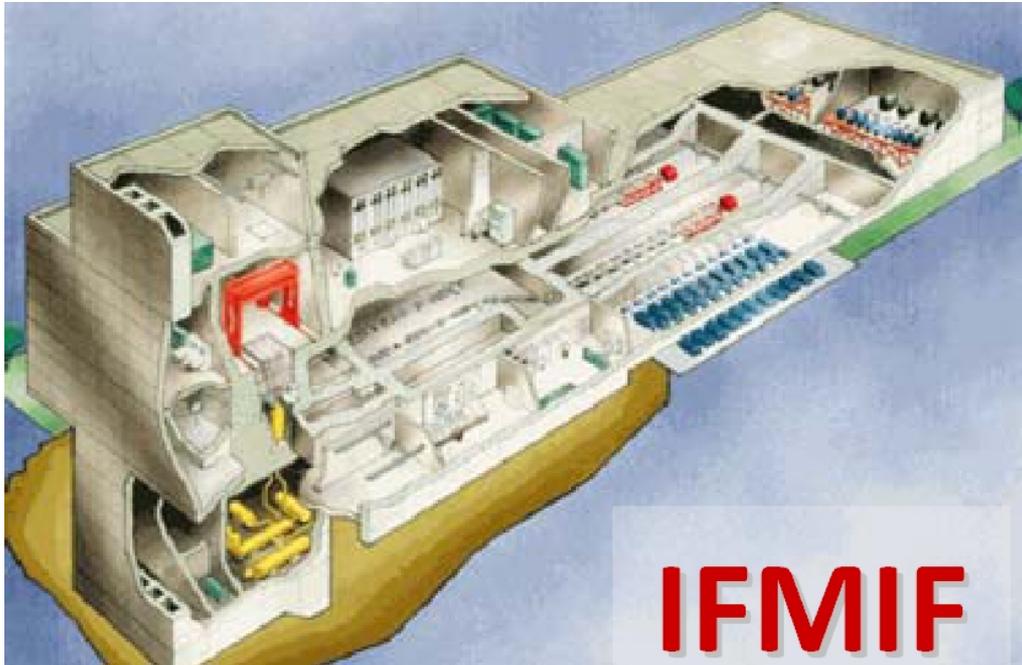
Grands projets utilisant des Linacs pour ions

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

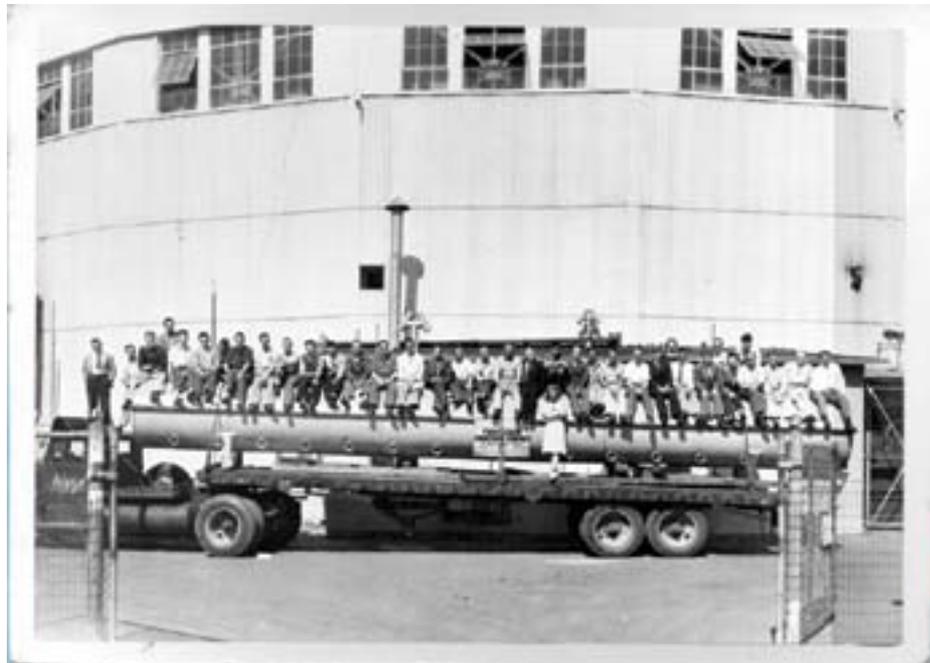


Les Linacs pour électrons

- 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

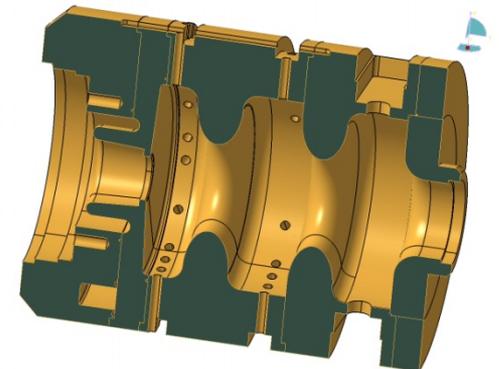
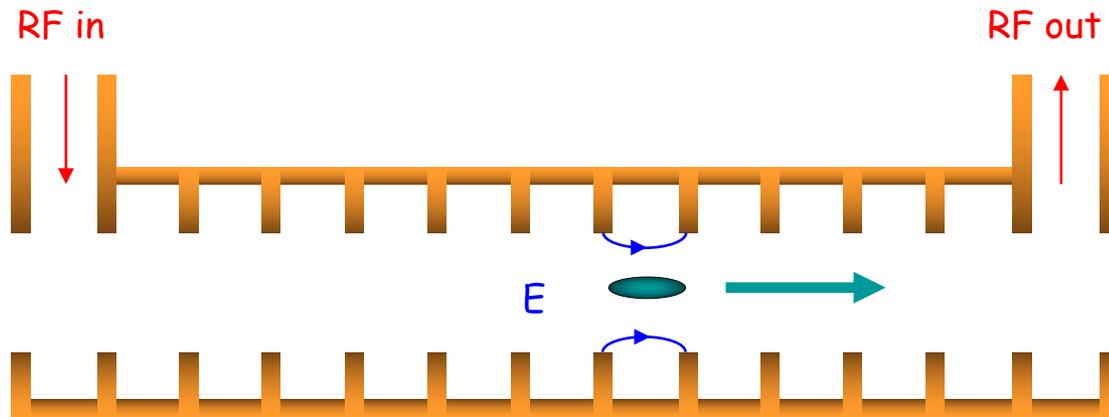


Pour comparaison, le linac Alvarez 202 MHz en 1947 avec l'équipe de Berkeley

Rencontres d'été de physique 2023
Promotion Henrietta S. Leavitt

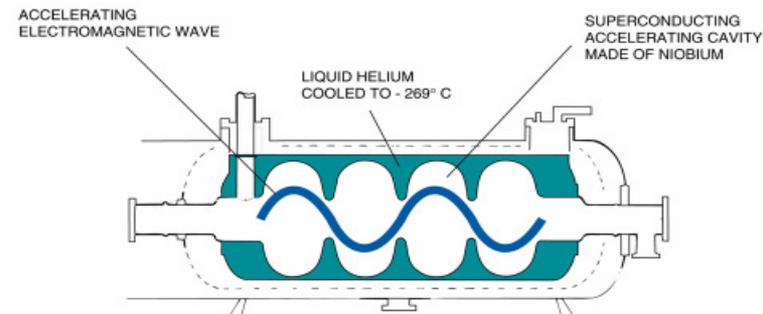
Structures chargées par des iris

- 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.



Les cavités supraconductrices (avantages)

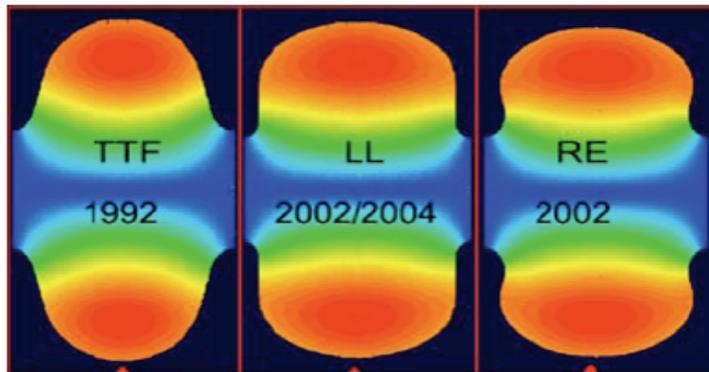
- Très faibles pertes dues à la résistance de surface (très grand facteur de qualité $qq\ 10^9$),
→ Fonctionnement en onde stationnaire avec besoin réduit en puissance crête.
- Bon rendement.
- Fréquence de fonctionnement “classique” (1.3 GHz).
- Taille des iris importante.
→ tolérances mécaniques aisées.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

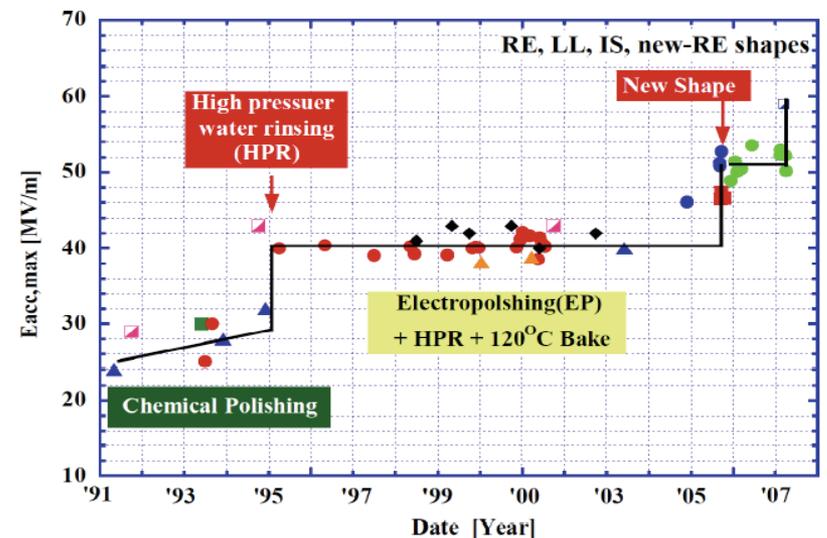
Le champ E_{acc} est limité par le champ B_{crit} (quench).

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

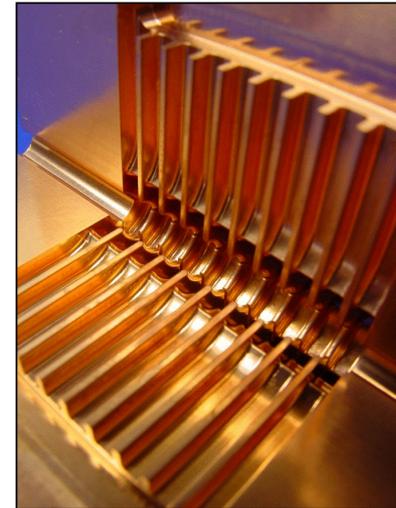
Structures accélératrices normales (résistives)

- 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: $< 1\mu s$

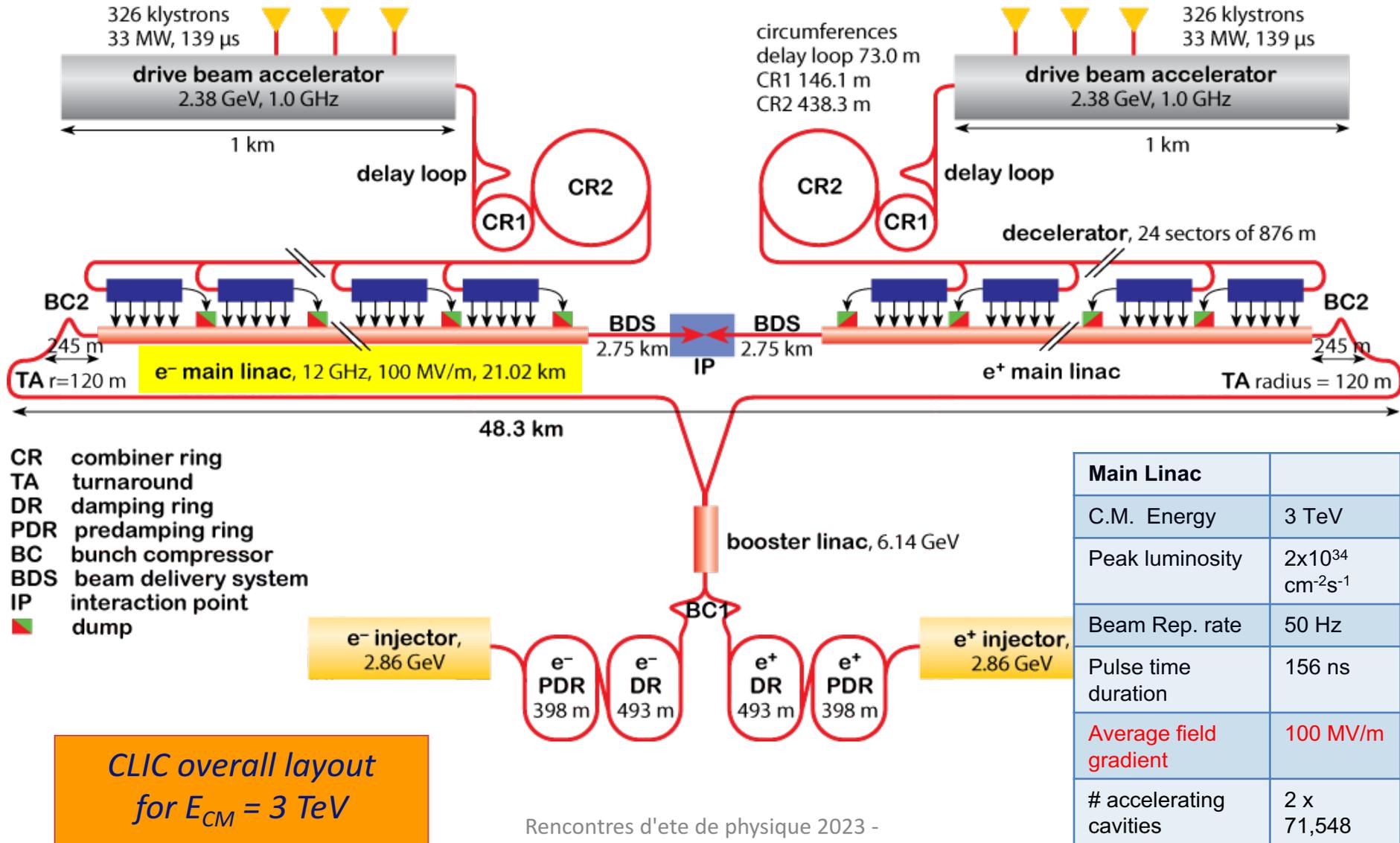
→ fonctionnement en onde progressive
(temps de remplissage $t_{fill} = \int 1/v_G dz$)

- 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)

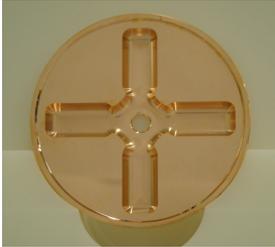
Schéma général du CLIC



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

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

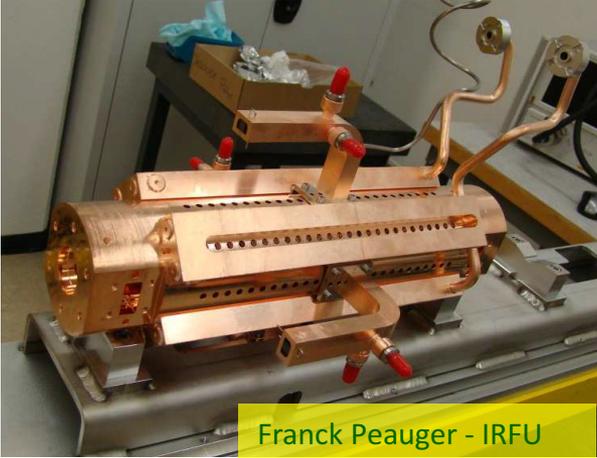
Les structures 12 GHz en cours de test



Les disques
(Mecachrome)



Diffusion bonding
(Thales)



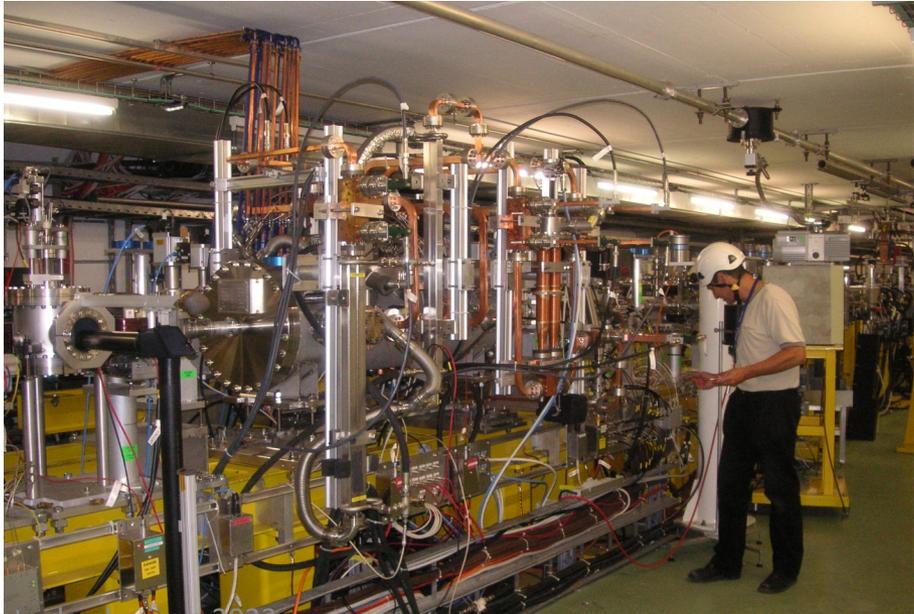
Franck Peauger - IRFU

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



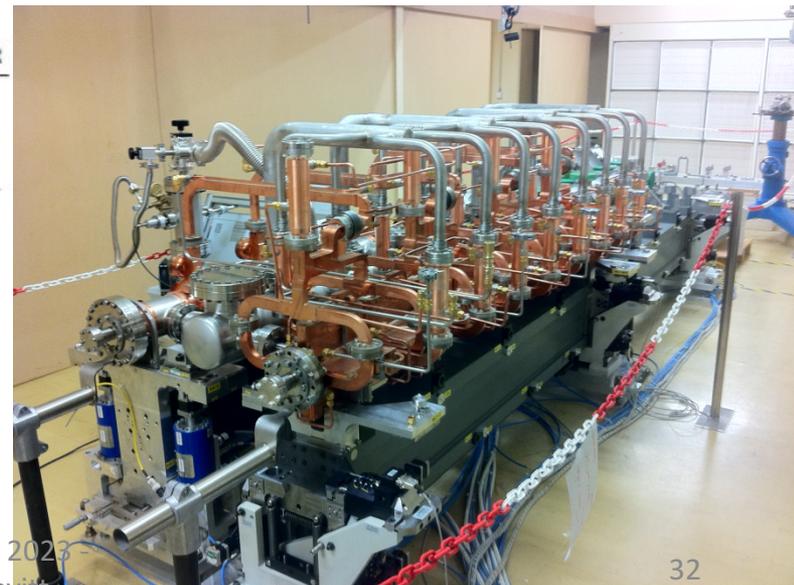
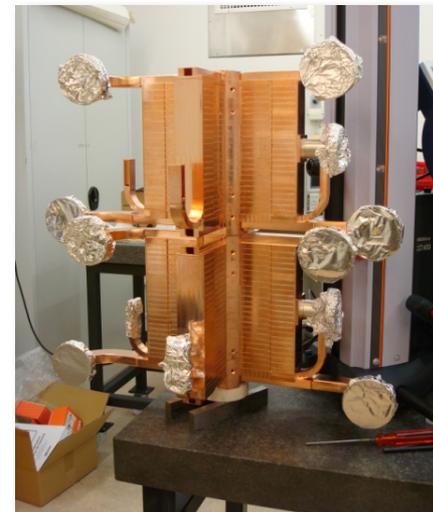
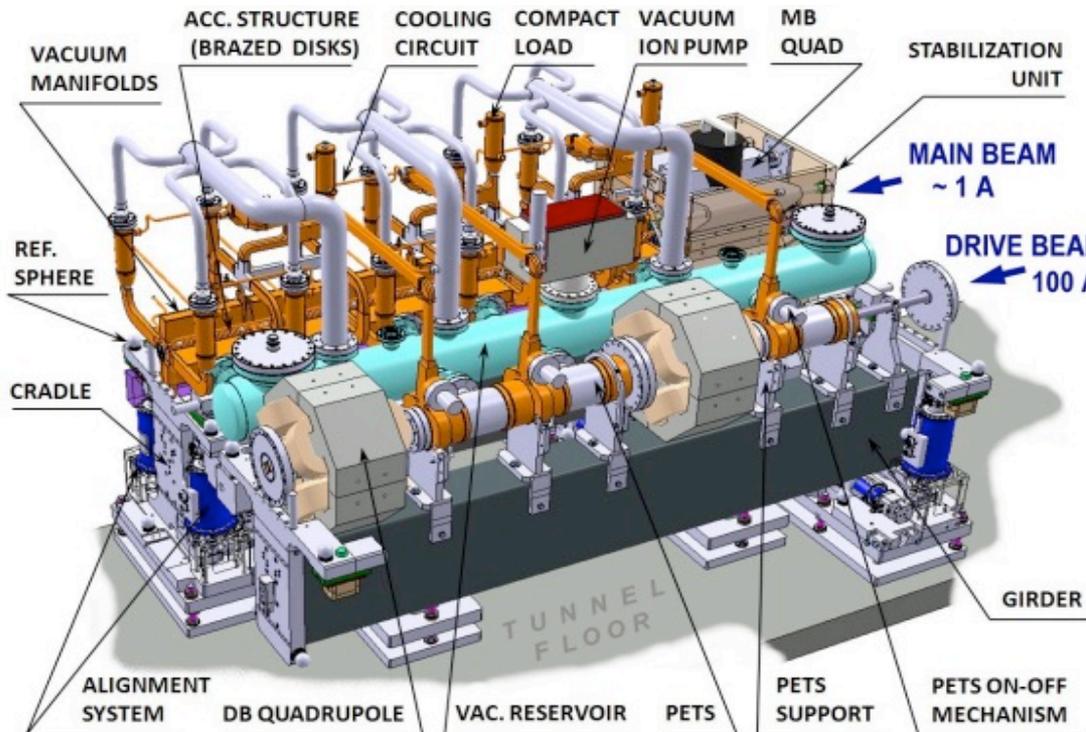
Germana Riddone

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

Legend

— CERN existing LHC

Potential underground siting :

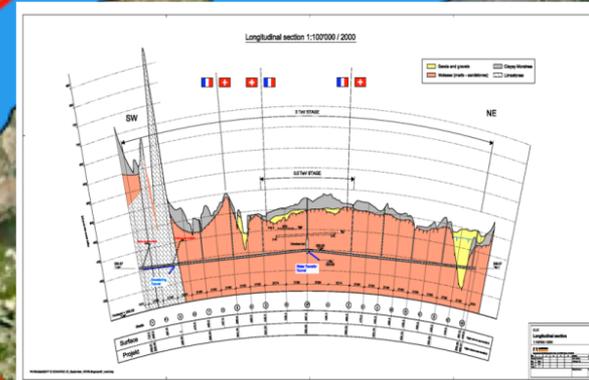
- CLIC 500 GeV
- CLIC 1.5 TeV
- CLIC 3 TeV

Jura Mountains

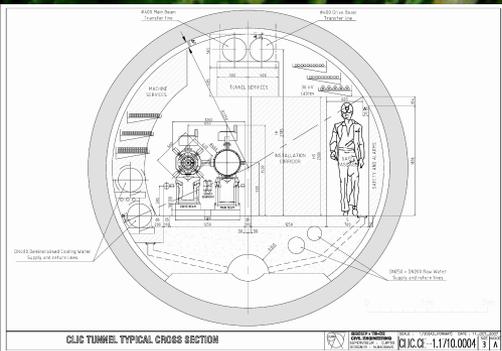
IP

Geneva

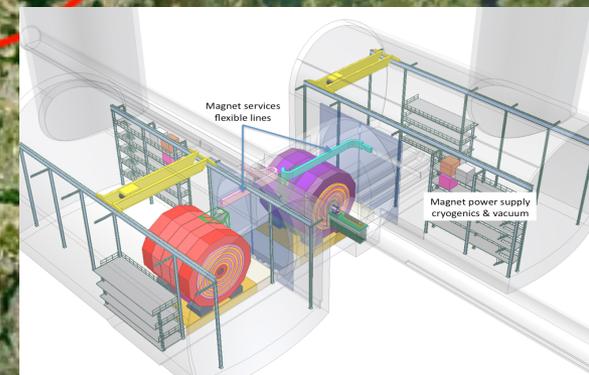
Lake Geneva



Tunnel implementations (laser straight)

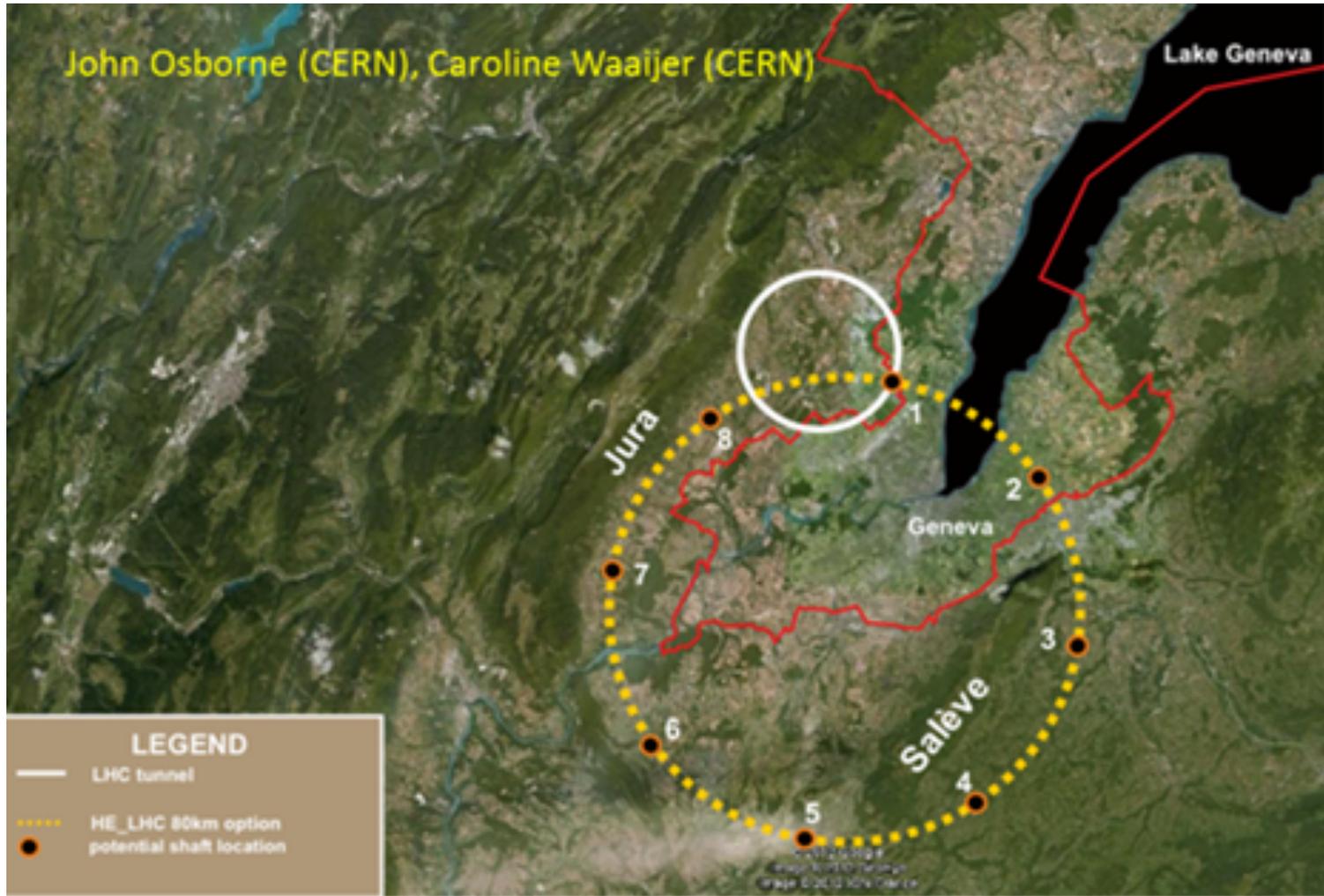


Coupe transversale

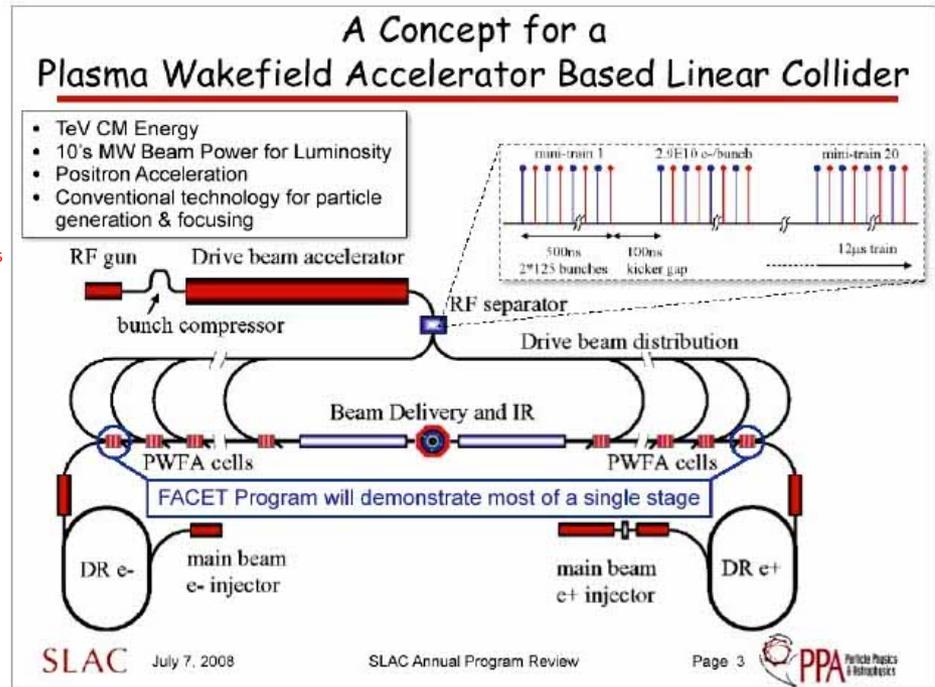
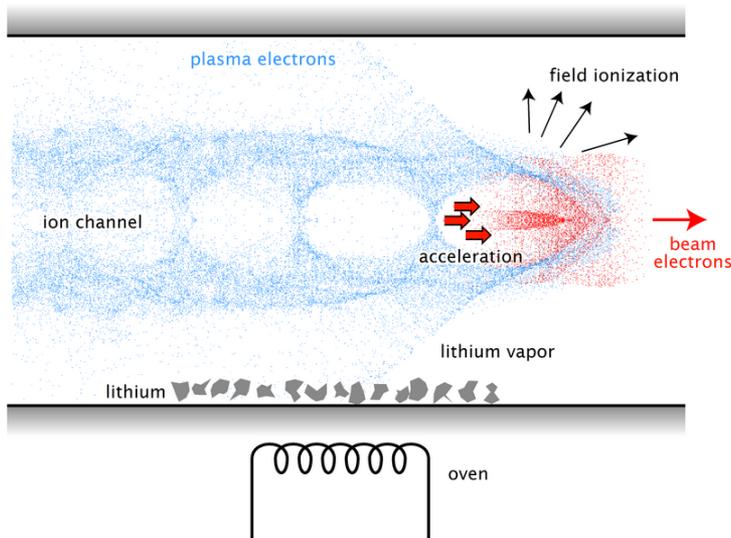


Central MDI & Interaction Region

Autre projet gigantesque: le FCC



L' acceleration plasma



e⁻ beam driven

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

MERCI ET A BIENTOT

Rencontres d'été de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt

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. fur Kernphysik
- ...