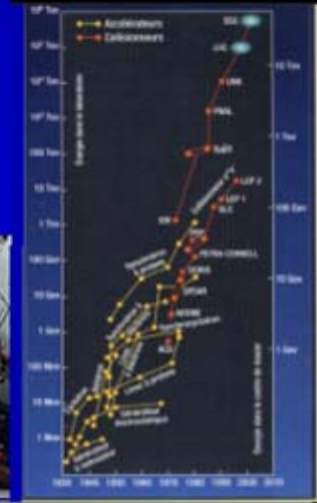
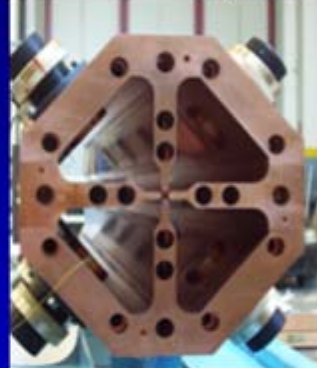
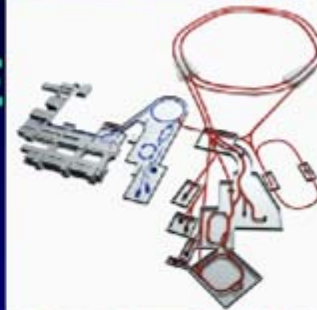




**ECOLE INTERNATIONALE
JOLIOT CURIE
Seignosse - 22-27/09/08**

ACCELERATEURS



P. Ausset Joliot-Curie 2008

Sommaire

RAPPELS SUR LE FONCTIONNEMENT DES ACCELERATEURS

ACCELERATEURS A TENSION CONTINUE

Introduction

Accélérateurs de particules électrostatiques

Accélérateurs à radiofréquences

ACCELERATEURS A CAVITES ELECTROMAGNETIQUES

Accélérateurs linéaires à protons et ions lourds

Accélérateurs à ondes progressives

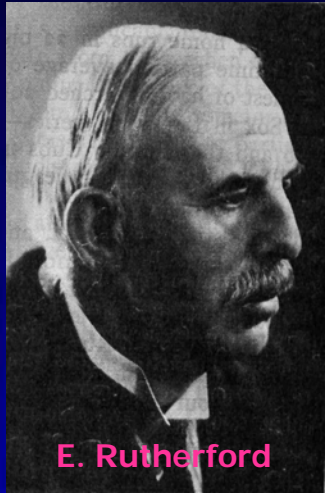
Les cyclotrons

Les synchrotrons: protons, électrons

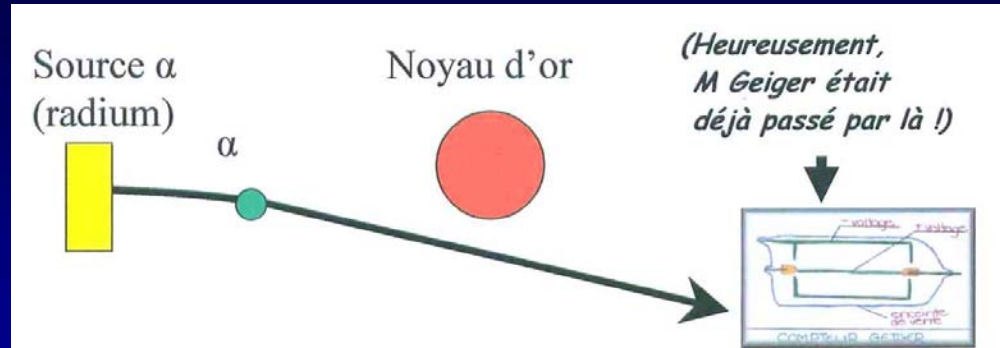
Utilisation des cavités EM supraconductrices

Perspectives

Accélérateurs: les prémices!

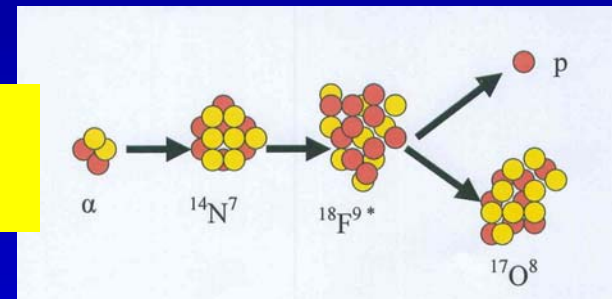


Mise en évidence l'existence d'un noyau dans l'atome



Réussit la première transmutation artificielle (1911) à l'aide d'un projectile rapide : l' α , issu d'une source radioactive.

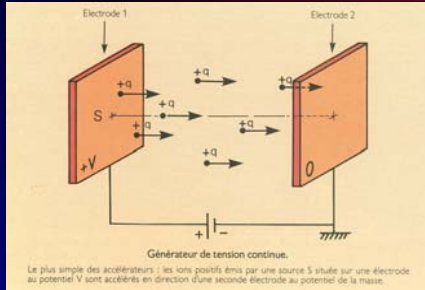
...et il veut des projectiles encore plus énergiques ! (1927)



1 927 E. Rutherford says, addressing the Royal Society :“... *if it were possible in the laboratory to have a supply of electrons and atoms of matter in general, of which the individual energy of motion is greater even than that of the alfa particle, this would open up an extraordinary new field of investigation....*”

Introduction

$$\vec{E} = -\text{grad}V$$



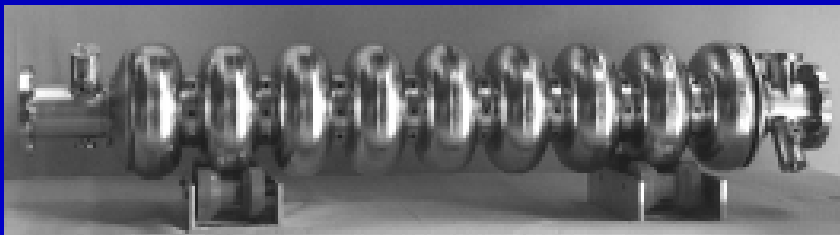
Accroissement
énergie

Contrôle
trajectoire

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$



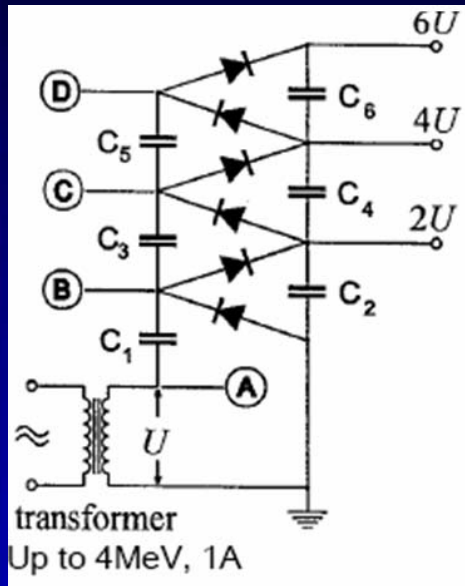
$$\vec{E} = -\text{grad}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$



Focalisation

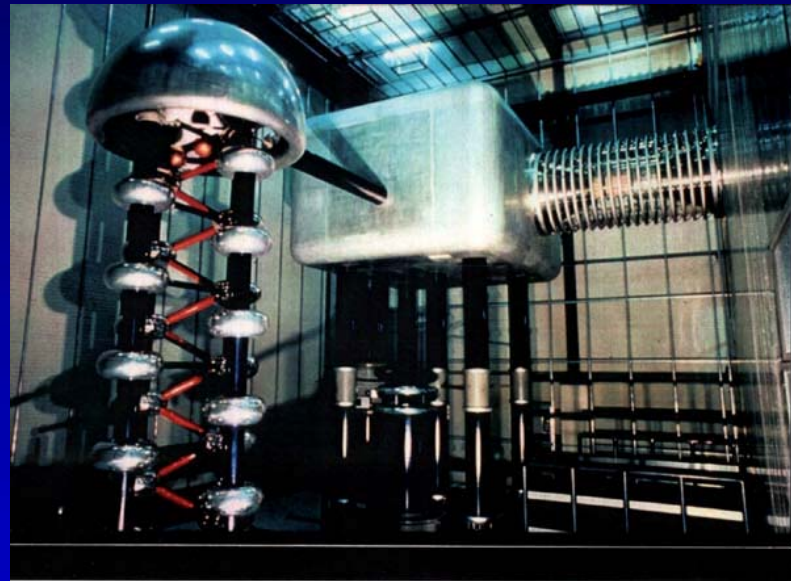


Accélérateurs électrostatiques: Cockroft-Walton



1932: 800kV

Premières fissions réussies et identifiées:
protons de 400 keV sur ${}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He}$



PSI (870 kV): injection cyclotron (72 MeV)

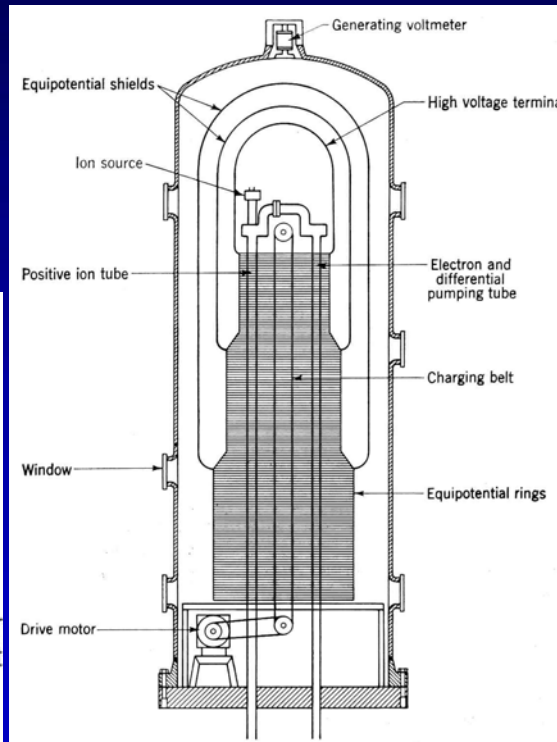
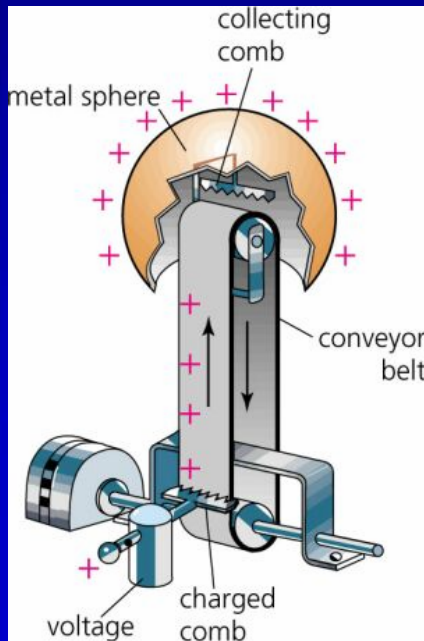
Limites du Cocroft Walton: ~ 1 MeV
-Tension inverse supportée
-Dispersion d'énergie

Accélérateurs électrostatiques : Van de Graaff



Van de Graaff

1930: Accélération 1,5 MeV

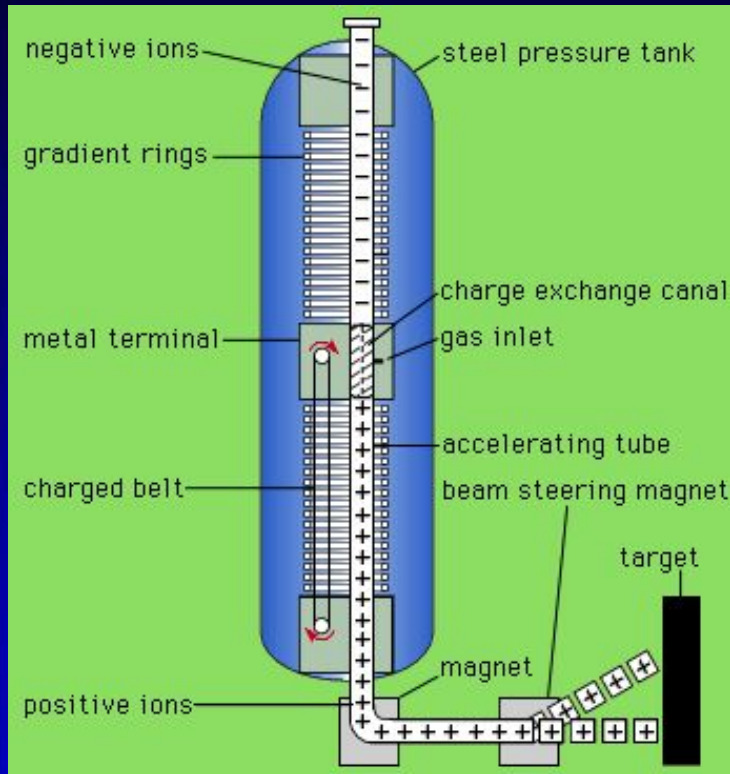


- Un peigne polarisé dépose des charges sur une courroie tournant à 10 – 20 m/s
- Un autre peigne recueille les charges sur un terminal isolé se porté à qq 10 MV
- La source d'ions est polarisée à la HT
- Isolement du système: Air, azote, SF6 ou mélange



Limite Accélérateurs électrostatiques: ~ 20 MeV
Claquage électrique au dessus!

Accélérateurs électrostatiques 2 étages: Tandem VdG



1951: Alvarez => Tandem:

- Création d'ions négatifs par addition d'électrons par capture atomique
- Accélération type Van de Graaff par la H.T. du terminal
- Stripping dans le terminal à la H.T.
- Nouvelle accélération par la H.T. de l'ion redevenu n fois positif

Limite Tandem: ~ 25 MeV

- Source d'ions à 0 V

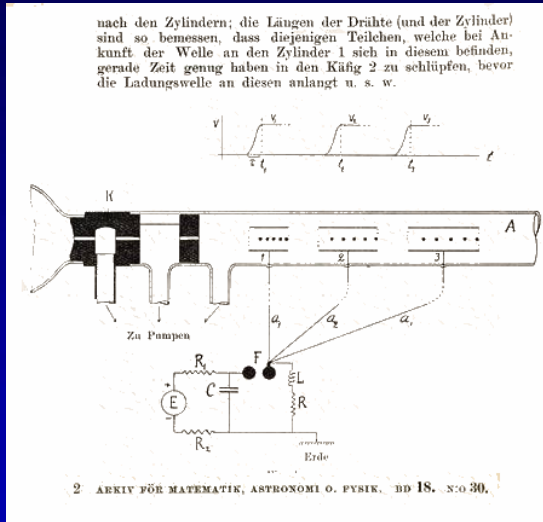
- Courant continu \sim qq μ A



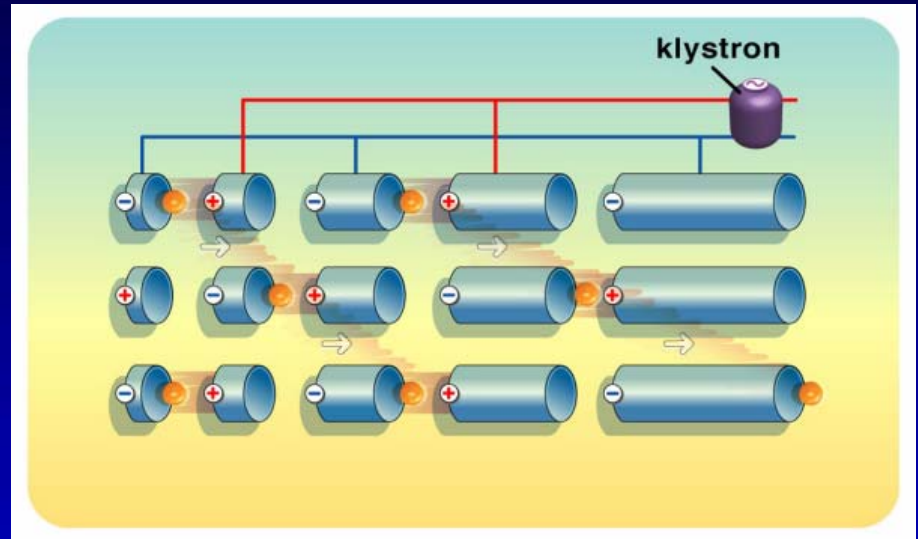
Les accélérateurs linéaires RF à ions dits DTL

1924: Publication de G. Ising
 1928: Wideröe => tension RF

Structure Wideroe



Wideroe



$V=V_0\sin(2\pi t/\tau)$ est appliquée sur les tubes.

L'accélération dans les intervalles est synchrone si la période τ est constante \rightarrow la longueur de chaque tube de glissement doit être $L_n=v\tau/2 \rightarrow$ augmente avec la vitesse v . (structure à mode π)

1931 à Berkeley : Sloan et Lawrence réalisent une structure à 36 tubes 7 Mhz, 42 kV \rightarrow accélération d'ions Hg à 1,25MeV

1934: 36 tubes et 2,8 MeV

Les accélérateurs linéaires RF à ions dits DTL



Structure Wideroe

Injecteur d'ions lourds Unilac
(GSI)
27 MHz (1971)



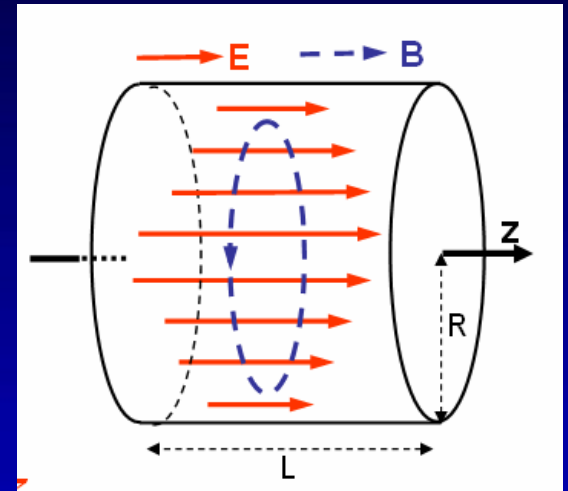
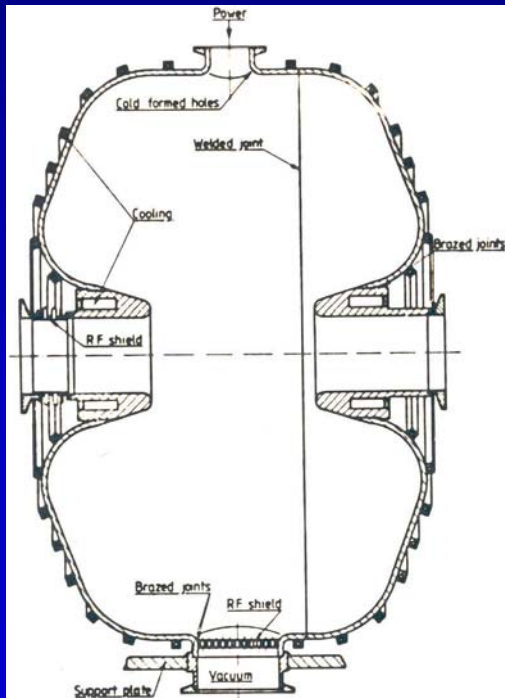
Injecteur d'ions lourds Alice (Orsay)
24.4 MHz, 56 électrodes (1970)

Les accélérateurs linéaires RF à cavités

La cavité la plus simple est cylindrique dite « pill-box » en mode transverse magnétique: le champ E est parallèle à l'axe

Ex1 : $f = 700 \text{ MHz} \rightarrow R = 16.4 \text{ cm}$ et $\lambda = 43,7 \text{ cm}$

Ex2: $Q = 1,5 \cdot 10^4$ pour $R = 11,5 \text{ cm}$; $L = 4 \text{ cm}$, $f = 1 \text{ GHz}$

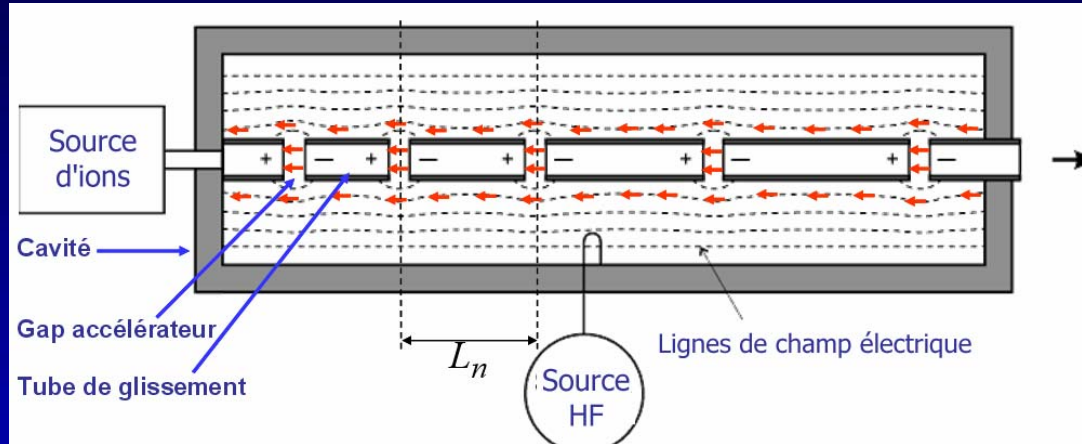


La cavité réelle doit être :

- couplée de façon optimale à la source
- avoir un champ maximal sur l'axe
- dessinée pour éviter les pertes électriques et le multipactor en "arrondissant" les bords.

Les accélérateurs linéaires RF à ions dits DTL

Structure Alvarez



- Longue cavité cylindrique fonctionnant en mode TM_{010}
- Tubes de glissement (drift tube) entourant l'axe lorsque E est décélérateur

$$L_n = v_n \left(\frac{2 \cdot \pi}{\omega} \right) = \beta_n \cdot \lambda \quad \text{avec} \quad \beta_n = \frac{v_n}{c} \quad \text{Mode } 2\pi \text{ ou } \beta\lambda$$

V_n : vitesse à l'entrée du tube n; ω fréquence HF, λ longueur d'onde HF
Fréquence typique de fonctionnement : 200 MHz

Accélérateurs linéaires radiofréquence à ions : structure Alvarez

Les accélérateurs linéaires RF à ions dits DTL

Structure Alvarez



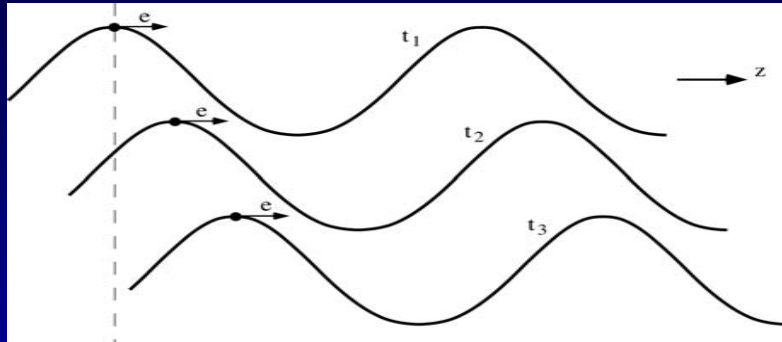
Saturne DTL (Saclay) :
protons \rightarrow 20 MeV, 200 MHz

- Protons d'énergie 50 MeV avec 3 cavités à 10, 30 puis 50 MeV; I faisceau = 150mA
- $F = 203$ MHz, Puissance (structure+ faisceau) = 2,9 + 7,4 MW
- DTL CERN, $L = 30$ m, 128 tubes



Les accélérateurs linéaires électrons

Structure à ondes progressives



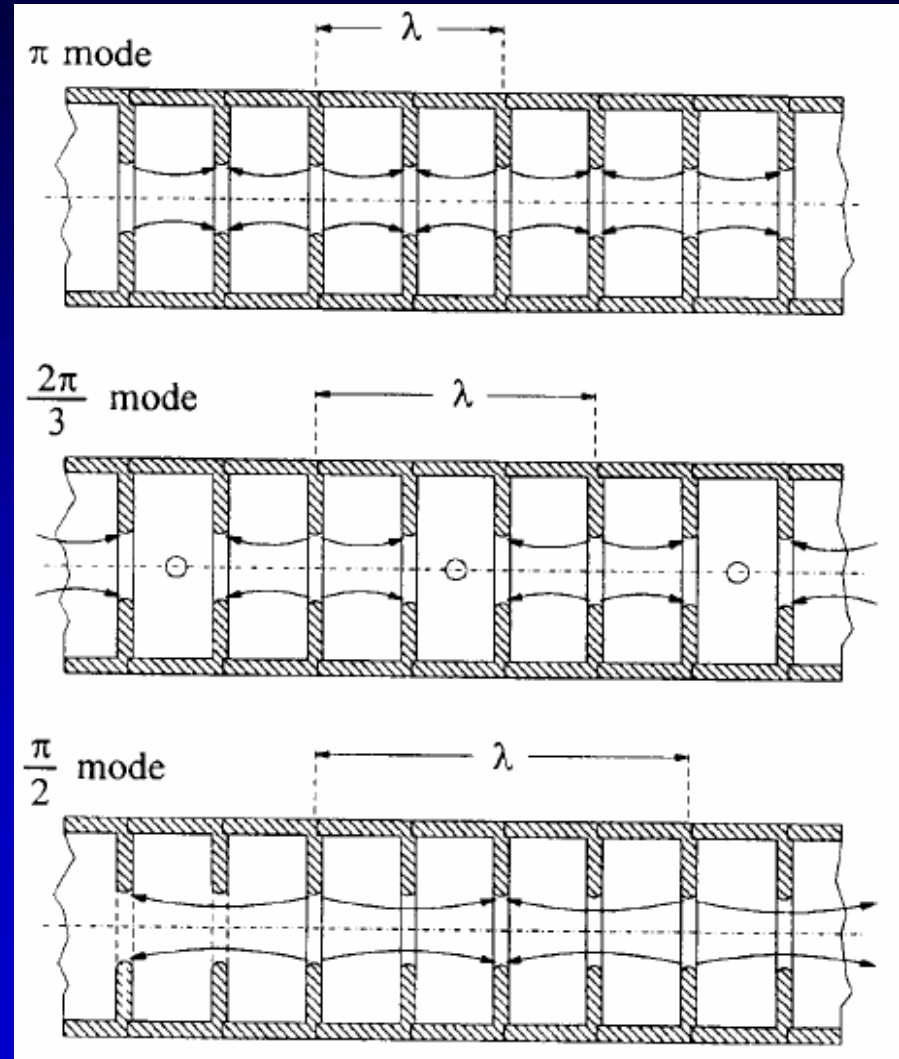
$$E_z = E_0 \cos \left(\omega_{RF} t - \omega_{RF} \frac{v}{v_\phi} t - \phi_0 \right)$$

v_ϕ = vitesse de phase

v = vitesse de la particule

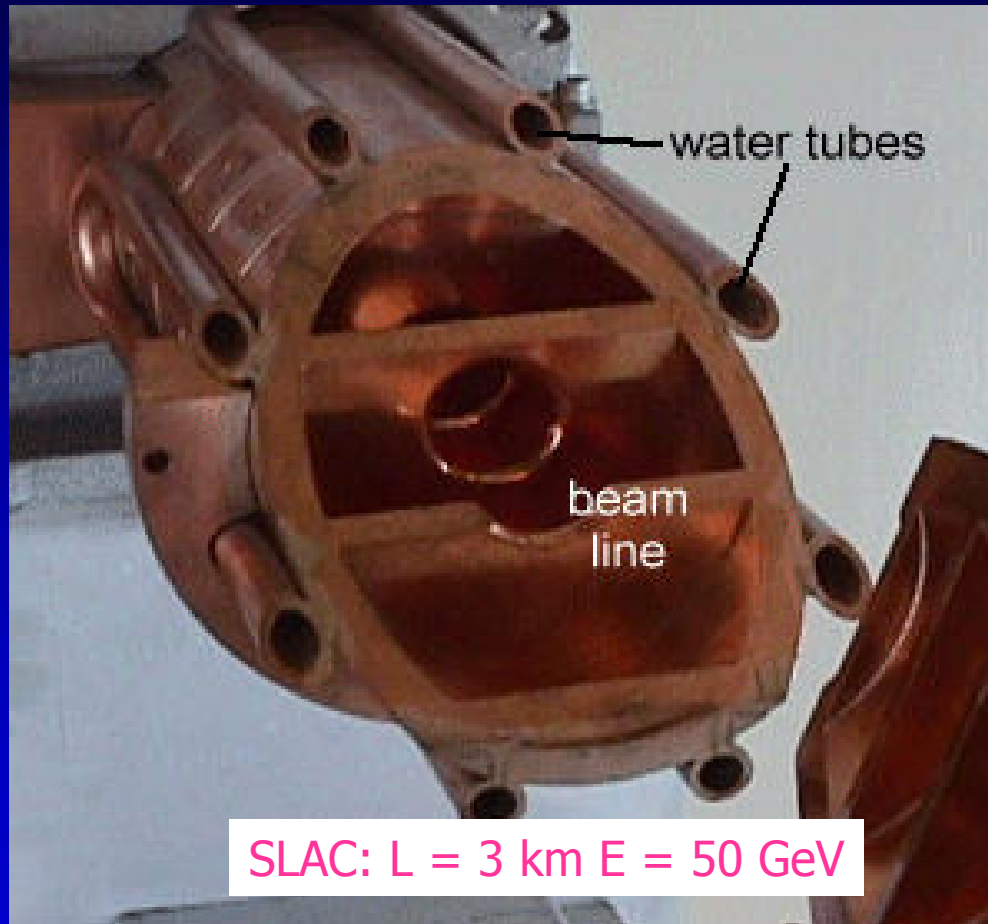
Conditions de synchronisme:

$$v = v_\phi \text{ et } E_z = E_0 \cos \phi_0$$



Les accélérateurs linéaires à électrons

Structure à ondes progressives



SLAC: $L = 3 \text{ km}$ $E = 50 \text{ GeV}$

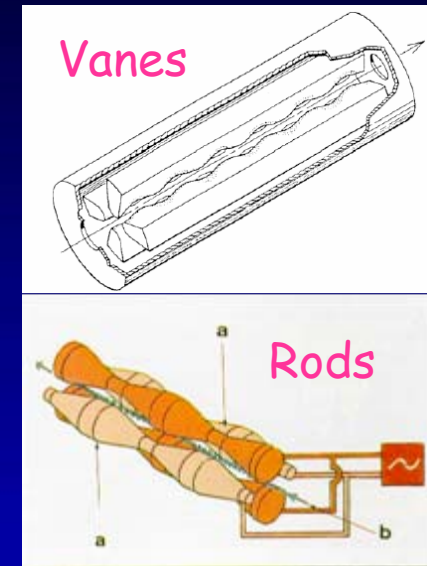
Les accélérateurs linéaires à ions

Structure RFQ

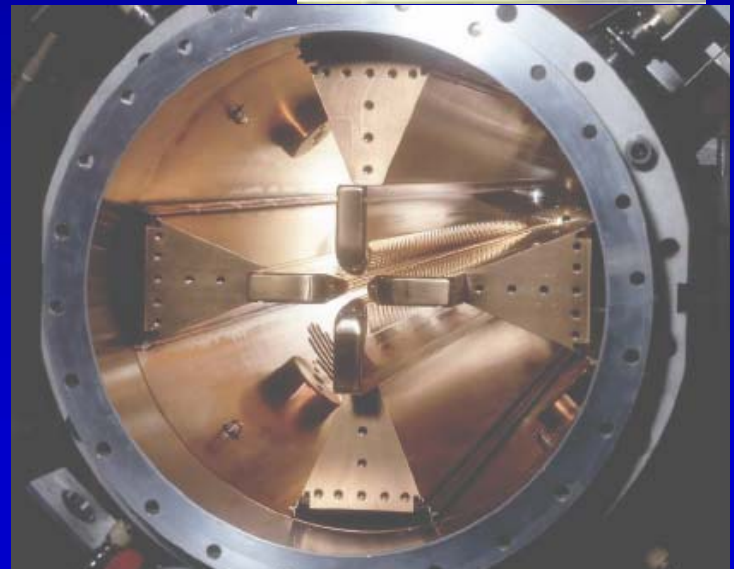
1970 : invention du concept de RFQ par Kapchinskii & Teplyakov

1974: Test d'un RFQ expérimental à Protvino (URSS):
100 keV- 620 keV à 148 MHz, efficacité de 50%

-Structure résonante donnant un champ quadripolaire longitudinal accélérateur et focalisant
Accélération de protons et ions lourds de faible vitesse ($\beta < 0.1$)



CERN: RFQ2 à lames
90 à 750 keV – $f = 202, 56\text{MHz}$
 $L = \sim 1,75\text{m}$; $D \sim 0,35\text{ m}$



Les accélérateurs circulaires à ions

Structure Cyclotron classique



E. O.
Lawrence

1930: 1^{er} cyclotron par E.O. Lawrence :
11 cm de diamètre, protons de 80 keV

1931: Cyclotron de 22,5 cm, protons
de 0,5 MeV avec un courant de 0,01
 μA

1932: Lawrence et Livingstone:
cyclotron à protons de 69 cm, 1.2
MeV.

1939: 1.5 m, 20 MeV sont atteints en
proton (\sim limite due à la relativité)

S.Livingston

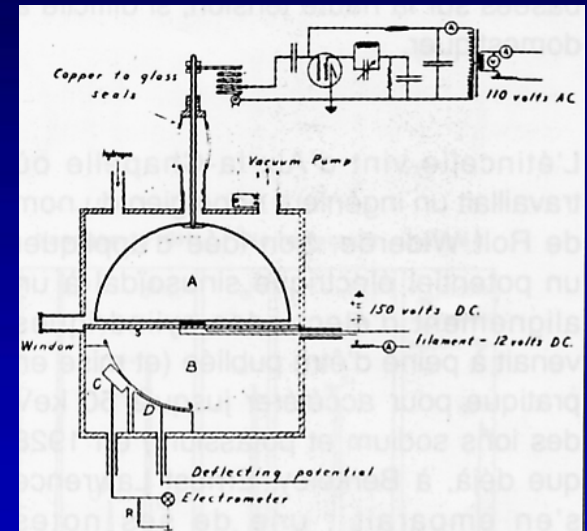
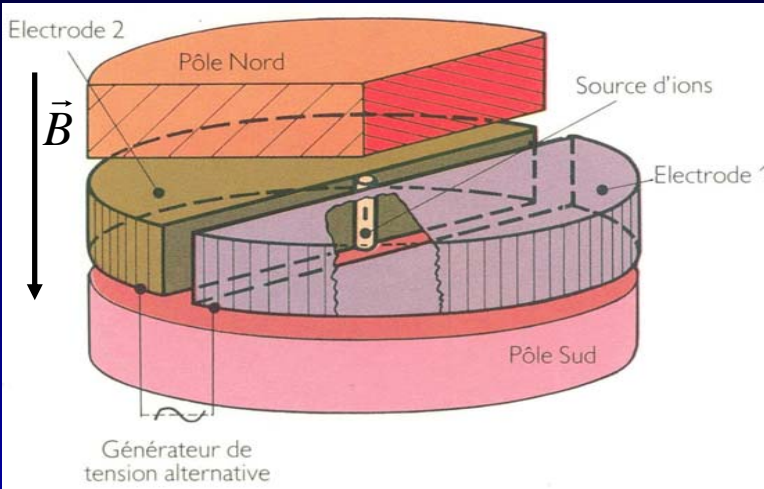


Figure 4
Schéma du premier cyclotron
Le diamètre du dee est de 5 pouces

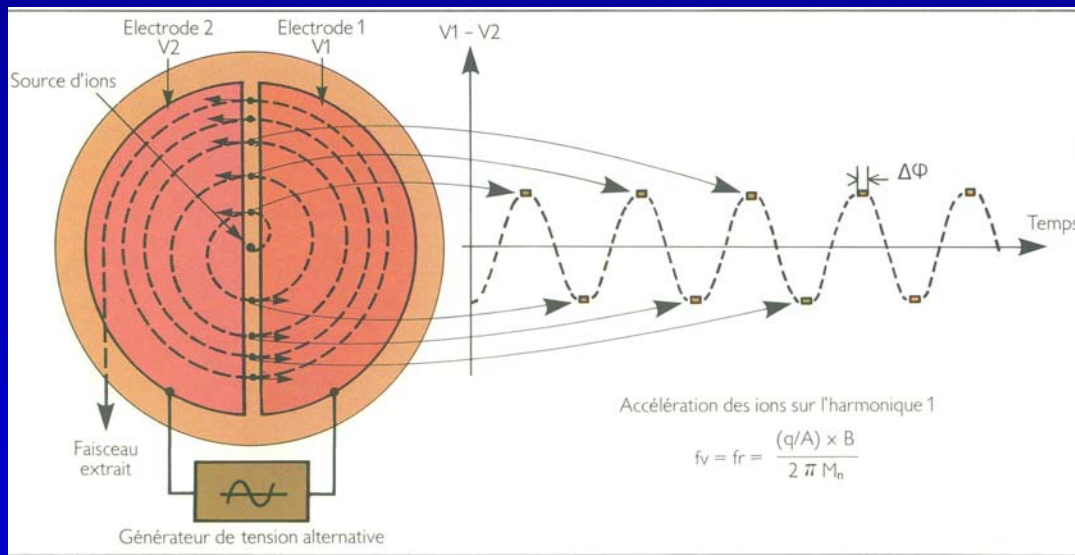
Les accélérateurs circulaires à ions



- Fréquence de rotation constante:

$$f = \frac{|q| \cdot B}{2\pi \cdot \gamma \cdot m_0}$$

Ions non relativistes: champ B constant



$$f_v = f_r = \frac{(q/A) \times B}{2\pi M_n}$$

Limite du cyclotron classique:

Pour les ions relativistes, l'isochronisme est perdu, B devrait croître avec r
Stabilité verticale du faisceau exige que B décroisse avec r

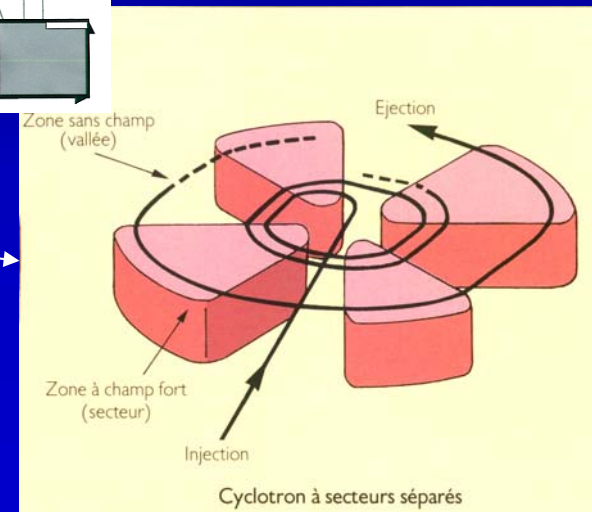
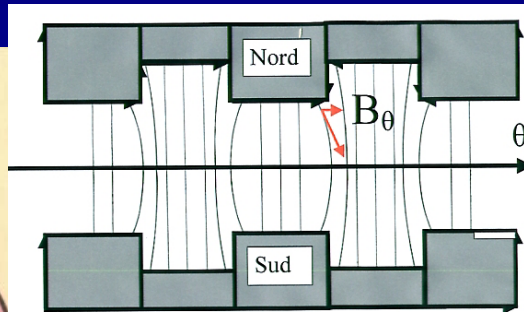
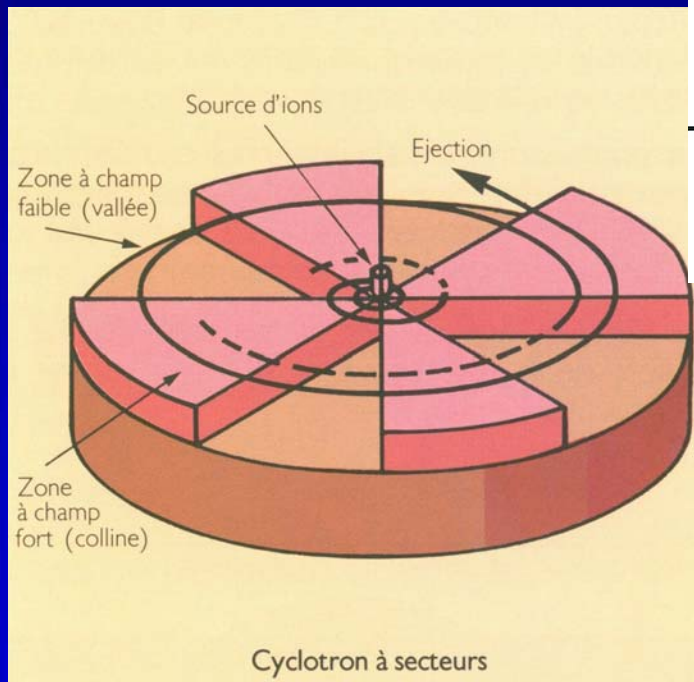
Les accélérateurs circulaires à ions

Structure Cyclotron isochrone

1938: Thomas propose le cyclotron isochrone (Azimuthally Varying Field)

La fréquence reste constante - B varie et a une composante radiale et azimutale

- r : correction de l'effet relativiste, θ : secteurs à champ faible et à champ fort: «vallées» et «collines» → stabilité transversale de la trajectoire



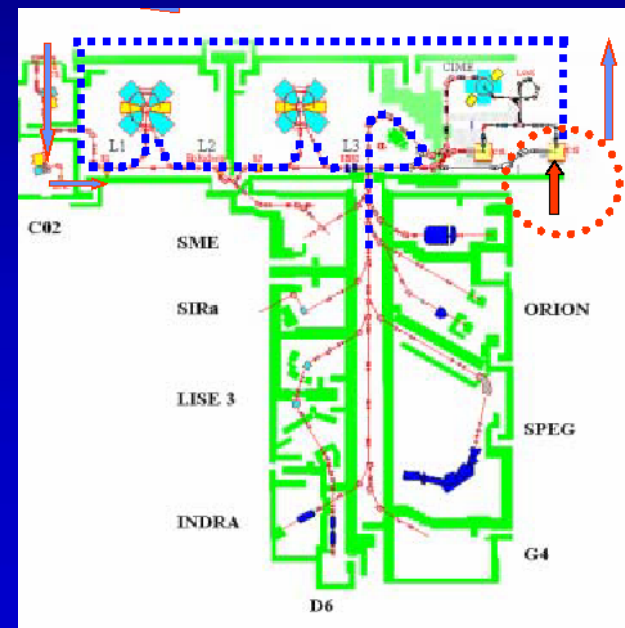
Les accélérateurs circulaires à ions

Structure Cyclotron isochrone



Cyclotron du PSI
590MeV-2mA à 8
secteurs séparés & 4
cavités accélératrices
Prévu pour ESS avec
Mégapie

Ensemble CSS GANIL
Faisceaux stables <100
MeV/u
Faisceaux radioactifs
postaccélérés:
SPIRAL Ganil=Driver,
CIME=postacc.
Projet futur "SPIRAL-2"



Les synchrotrons

1945: Veksler et Mc Millan inventent le synchrotron

1946: Goward et Barnes construisent le premier synchrotron

1949: Mc Millan construit un synchrotron à électrons

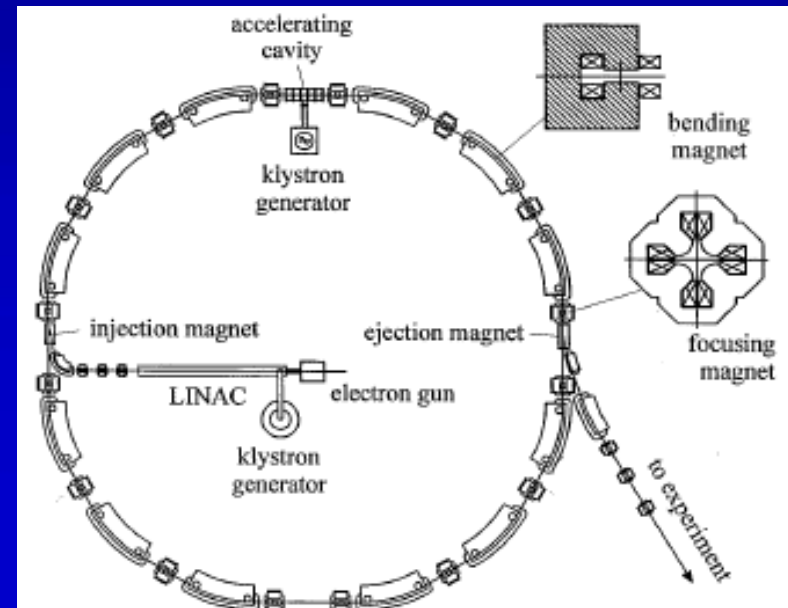
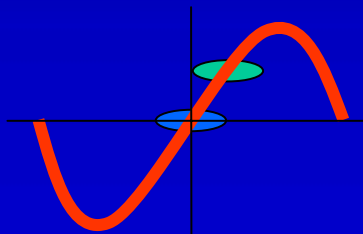
La trajectoire est à rayon constant , Le champ B est variable :

$$\omega_{RF} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v_{particule}}{L} \cdot n \quad \rightarrow \omega_{RF} \text{ varie avec } v_{particule}$$

n : "nombre harmonique" $\rightarrow v_{particule} = cte \text{ alors } \omega = cte$

Gain d'énergie par tour constant:

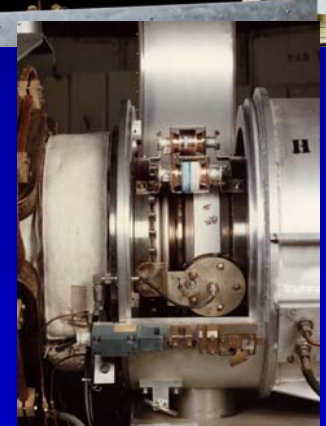
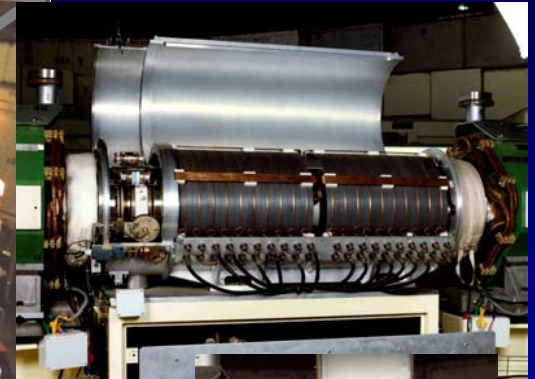
$$\Delta E = qV_0 \sin \Phi_s$$



Les synchrotrons à hadrons



R.F.: 2 Cav. ferrite $\lambda / 4$
160 KHz-2,5 MHz



Synchrotron_MIMAS:
circonférence de $\sim 30\text{m}$
Proton: (750 keV ; 375 keV) – 47 MeV
Ions lourds: 187 keV – 12 MeV

Champ magnétique:
Dipôle: Induction 0,08 T- 0,97 T
Q-pôle: 0.041 T/m 1, 847 T/m

Les collisionneurs

1943

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.*

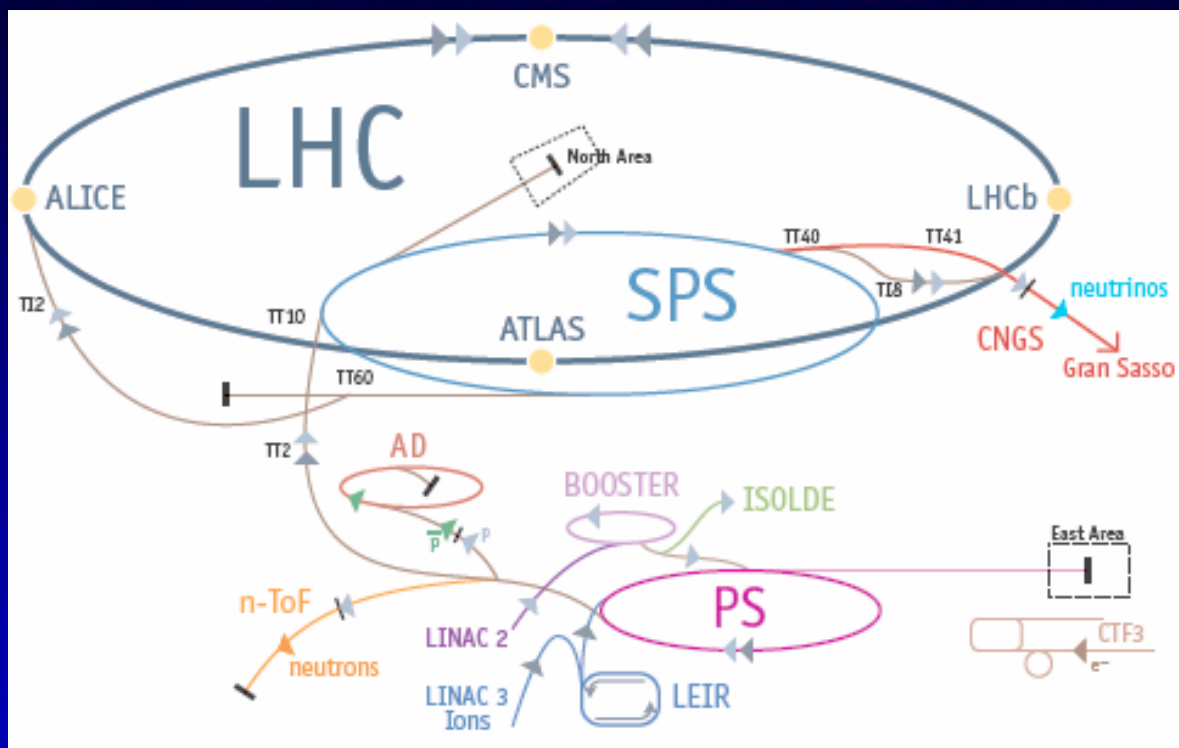
For nuclear particles, relativistic mechanics must be applied, and .. the effect .. be even greater "

In addition :

"... 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."

Les synchrotrons à hadrons



LHC:
protons 7 TeV
Pb 54+: 2,76 TeV / A

SPS: 450 GeV

P.S. : 24 GeV

BOOSTER: 1,4 GeV

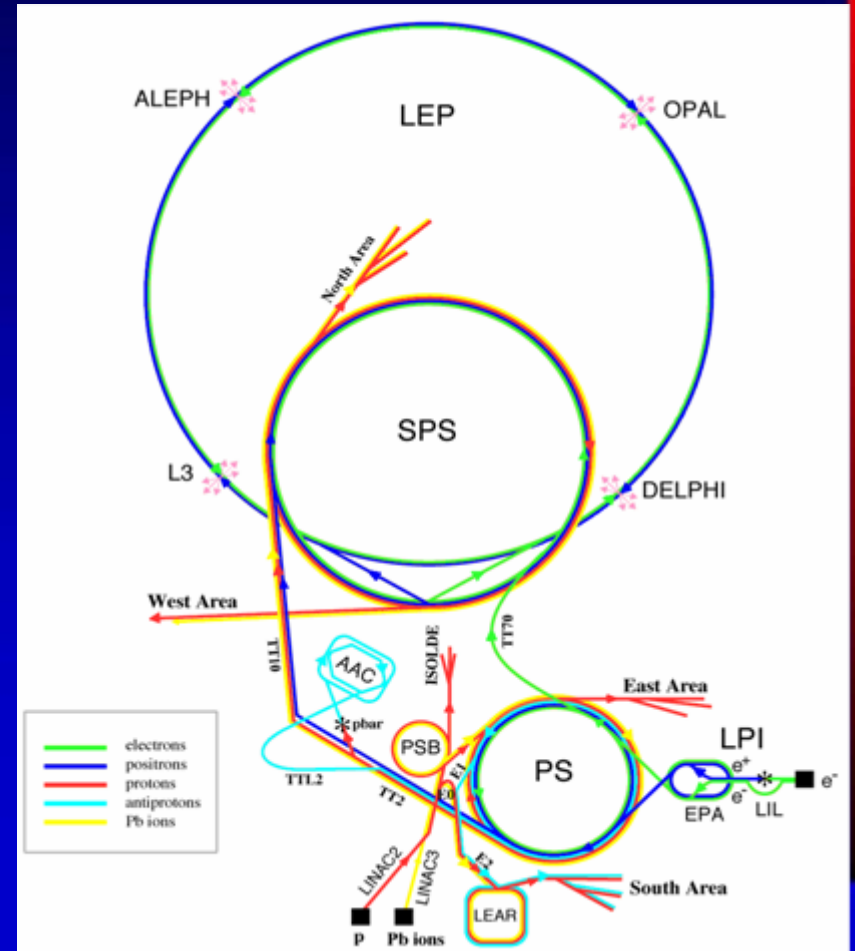
- 1232 dipôles principaux cryogéniques: 1,9°K; 8,33 T max; 11700 A. - 392 Qpôles
- Energie stockée dans les aimants: 11 GJ
- 8 cavités supra (4,5°K) RF par faisceau. Champ 5 MV/m . 400 MHz
- Durée de remplissage: 4'20" par anneau. Durée accélération: 20'. Durée vie: 10 h
- Faisceau: 2808 bunches x $1,1 \cdot 10^{11}$ p/bunch - 25 ns entre bunch - Energie: 350 MJ
- Luminosité: 10^{34} cm⁻².s⁻¹. - $600 \cdot 10^6$ collisions par seconde

Les synchrotrons à électrons

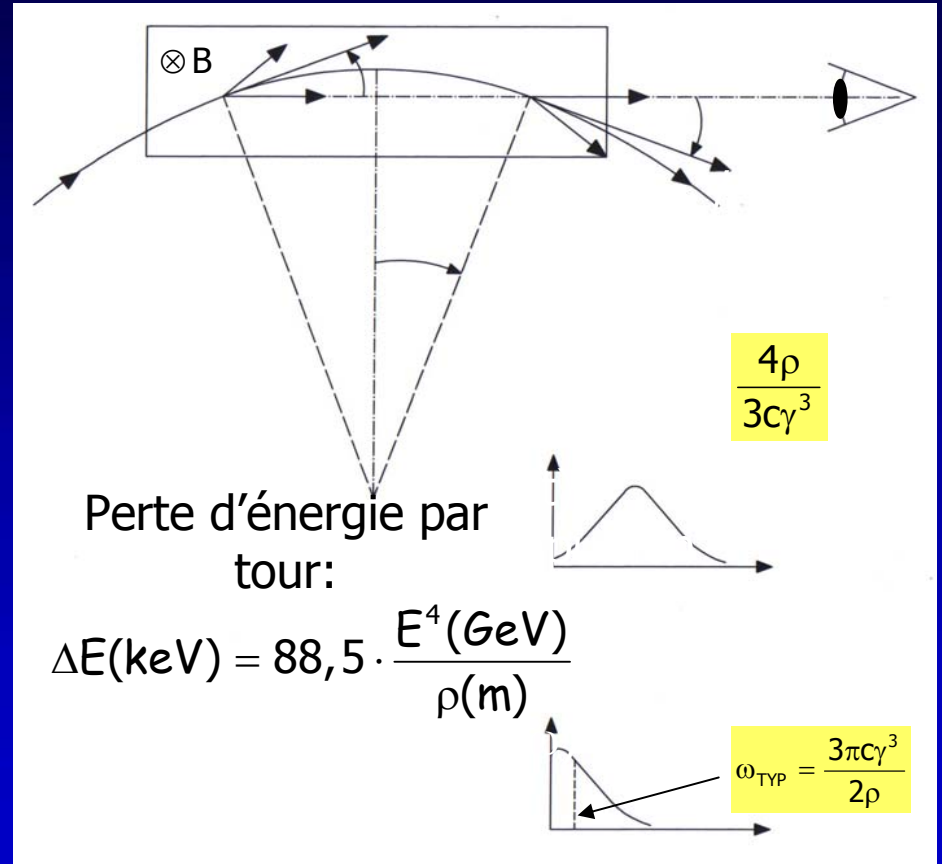
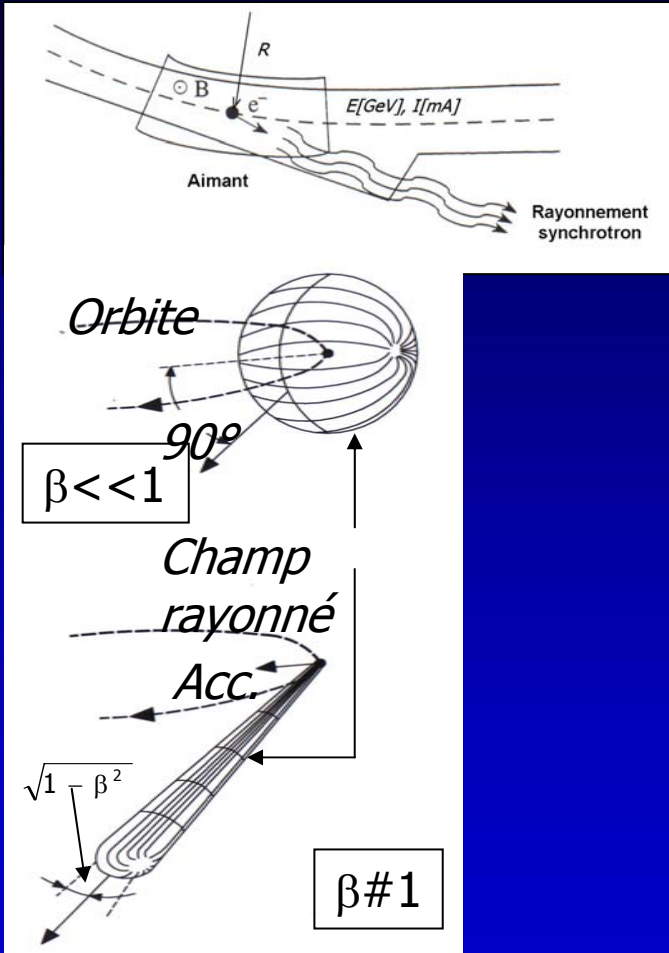
- L.E.P.2 pas une source R.S. mais un collisionneur électron – positron 2×100 GeV
- $R = 3100$ m et $B = 0,107$ T à 100GeV
- Sept 1999: 208 Gev avec 272 cavités supra:
- Perte énergie / tour: 2.85 GeV (L.E.P. 100)



LEP Tunnel, 27 Km circumference



Rayonnement synchrotron



$$\theta \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{511}{E [\text{keV}]} \quad \text{vitesse proche de } c$$

Limite du synchrotron



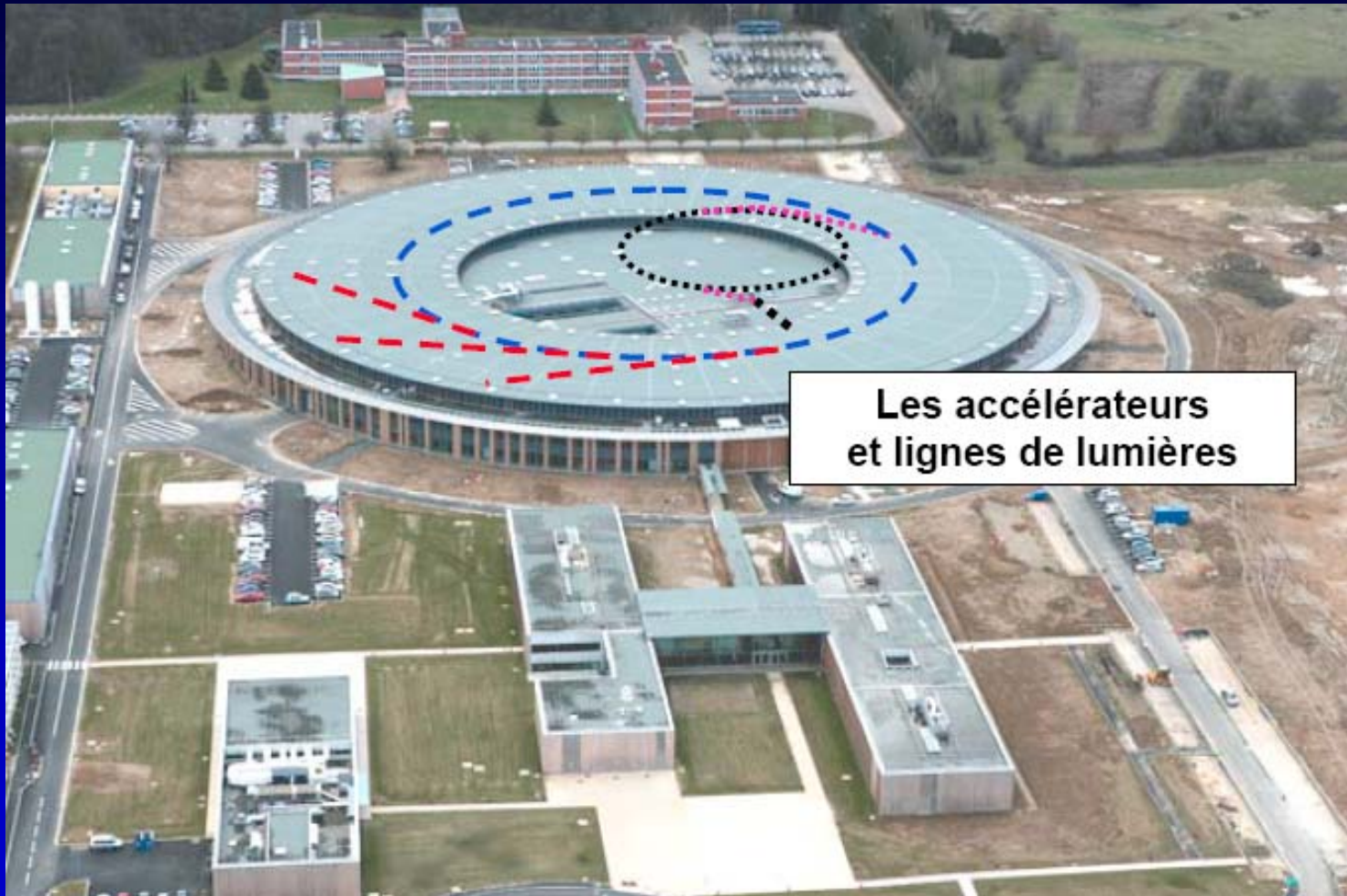
Limite accélération de proton dans LHC:
Rayonnement synchrotron: $\Delta E \approx 6,65 \text{ keV} / \text{tour}$

Augmenter Rayon (?)

$$\rho = \left| \frac{p(t)}{q \cdot B(r, t)} \right|$$

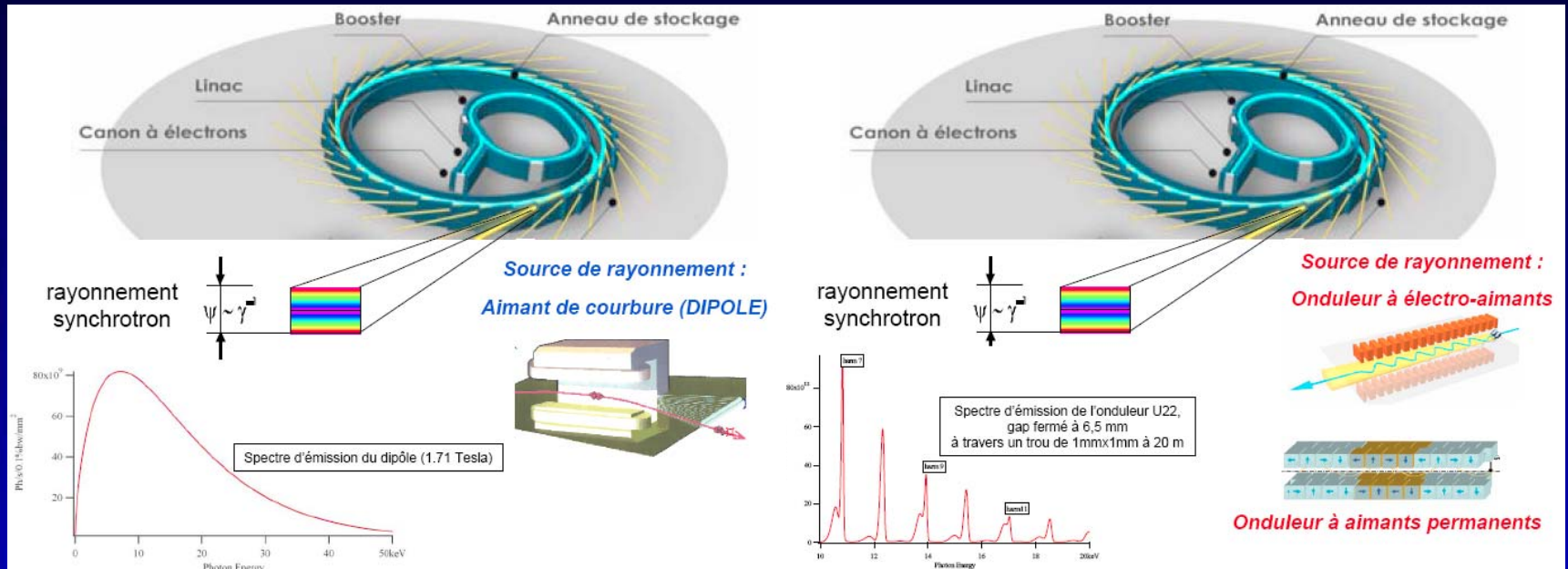
Limite accélération e- dans LEP: puissance rayonnée / tour : $\sim 20 \text{ MW}$
→Solution : accélérer des e- en ligne droite!

Les accélérateurs à R. synchrotron



Les accélérateurs
et lignes de lumière

Le synchrotron SOLEIL



Anneau de stockage:
 Circonférence: 354,1m
 Energie: 2,75 GeV
 F révolution : 0,846 MHz
 I faisceau= 500 mA

Anneau booster:
 Circonférence: 157m
 Linac:
 500 mA dans 416 bunches
 100 mA dans 8 bunches

Lignes de lumière:
 43 lignes possibles:
 11 en opération: oct 2007
 21 lignes sur onduleur

La cavité supraconductrice

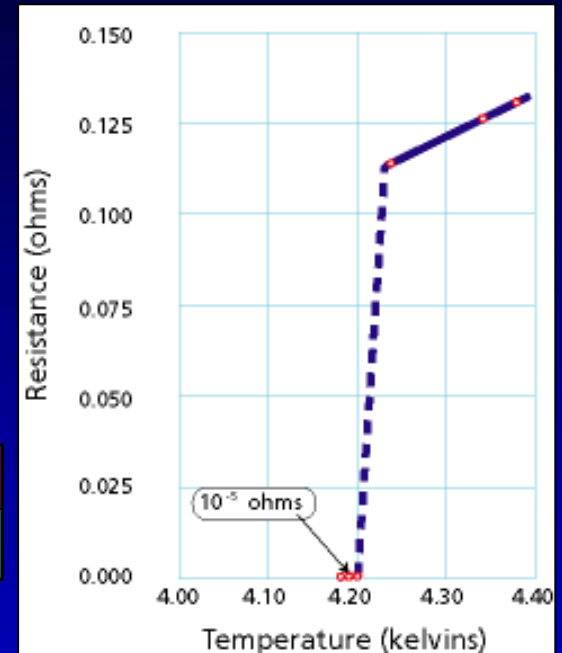
Le phénomène de supraconductivité a été observé pour la première fois en 1911 par Kamerlingh Onnes en mesurant la résistance d'un échantillon de mercure dans l'hélium liquide.

La supraconductivité n'apparaît qu'en dessous d'une certaine température, appelée température critique

Matériau	Ti	Al	Sn	Hg	Pb	Nb	Nb ₃ Sn	YBa ₂ Cu ₃ O ₇
T _c [K]	0,4	1,14	3,72	4,15	7,9	9,2	18	92

Hélium liquide
→ 4,2 K

Azote liquide
→ 77 K



Avantage inhérent aux cavités froides :

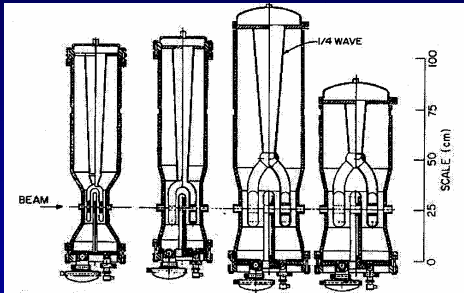
Dissipations quasi-négligeables sur les parois de la cavité (grâce à la supraconductivité) → ~100% puissance HF injectée est fournie au faisceau : EXCELLENT RENDEMENT HF !!!

La cavité supraconductrice

$\beta = 0,01$

$\beta = 0,1$

$\beta = 1$



Structures inter-digitales (ATLAS, Argonne)
48 et 72 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,037$

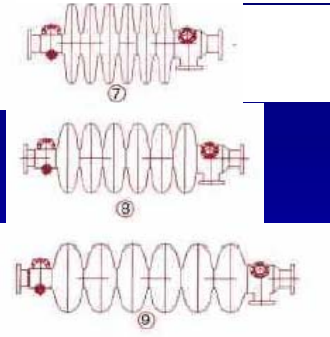


Résonateurs quart d'onde (ALPI, Legnaro)
80 à 352 MHz - $\beta = 0,047$ à $0,25$

Cavité ré-entrante (Legnaro)
352 MHz - $\beta \geq 0,1$



Cavités elliptiques
350 MHz à 3 GHz - $\beta = 0,47$ à 1



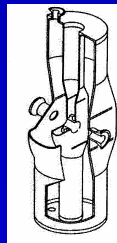
Cavité TTF
1,3 GHz - $\beta = 1$



RFQs supra (Legnaro)
80 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,035$



Résonateurs split-ring (ATLAS, Argonne)
97 et 145 MHz - $\beta = 0,06$ à $0,16$



Cavités spoke (CNRS Orsay)
352 MHz - $\beta = 0,15$ et $0,35$

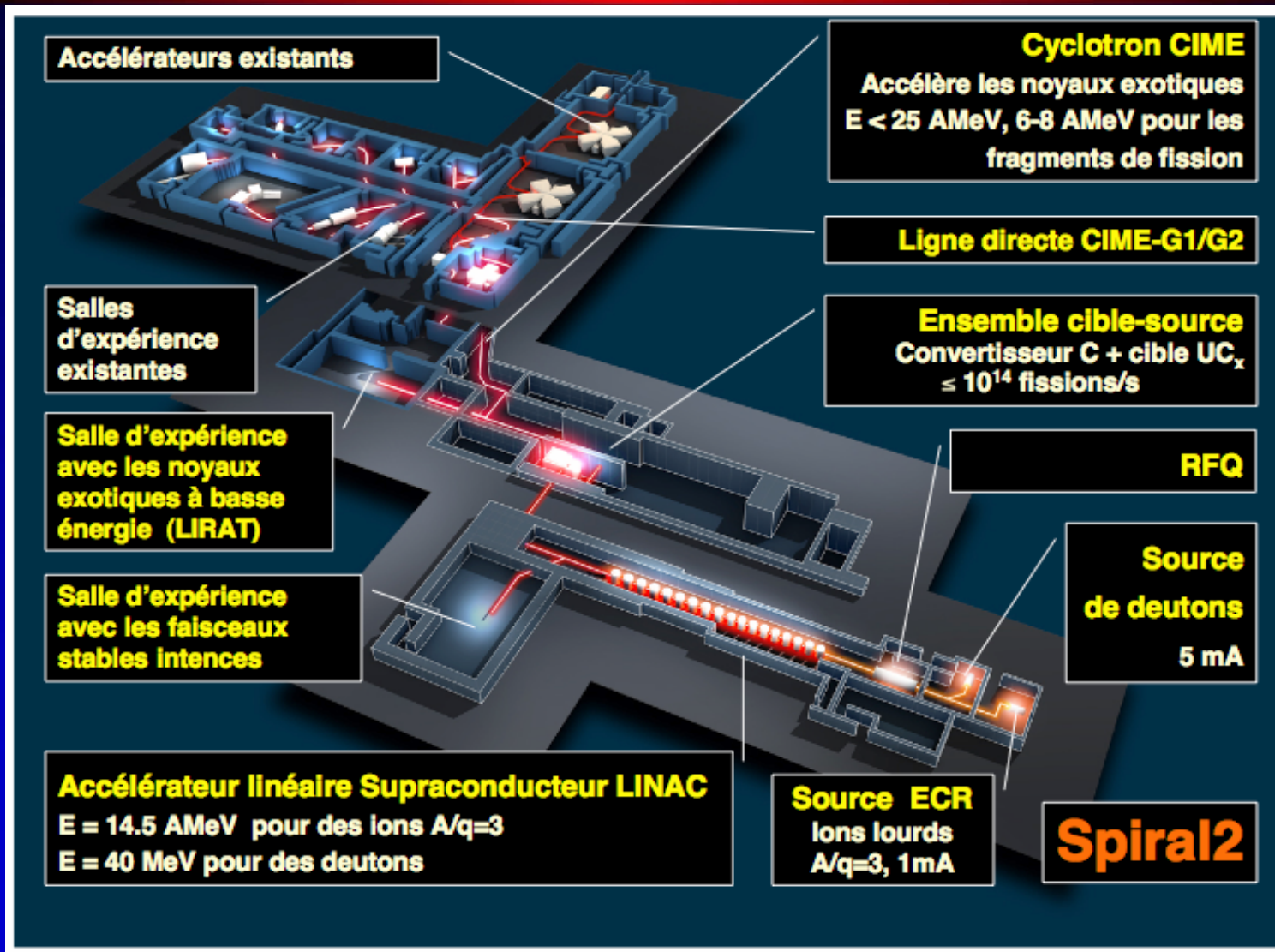


Résonateur demi-onde (Argonne)
355 MHz - $\beta = 0,12$



Cavité APT (Los Alamos)
700 MHz - $\beta = 0,64$

Les accélérateurs à CSC

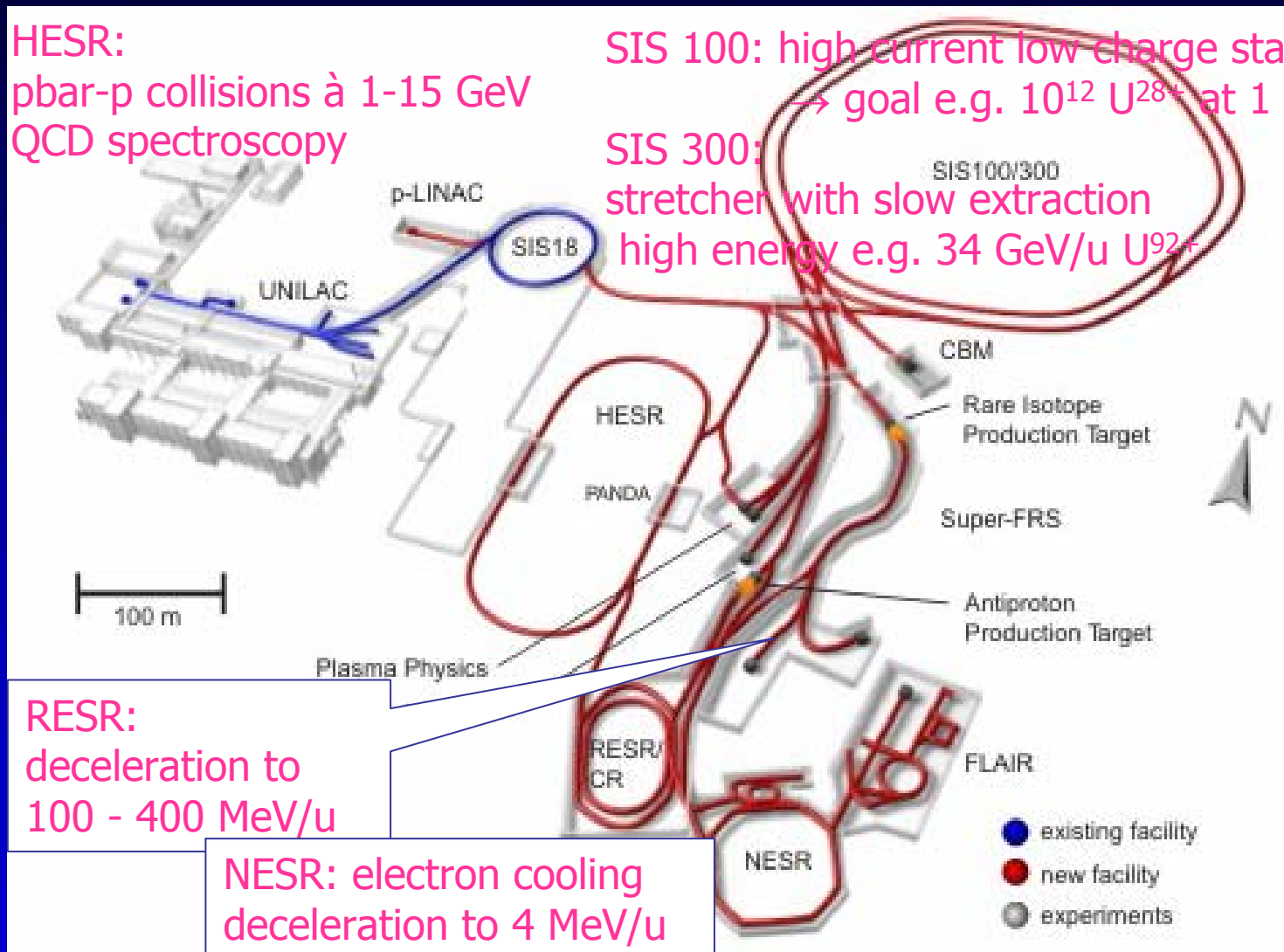


Les accélérateurs: Perspectives

HESR:
pbar-p collisions à 1-15 GeV
QCD spectroscopy

SIS 100: high current low charge states
→ goal e.g. 10^{12} U^{28+} at 1 GeV/u

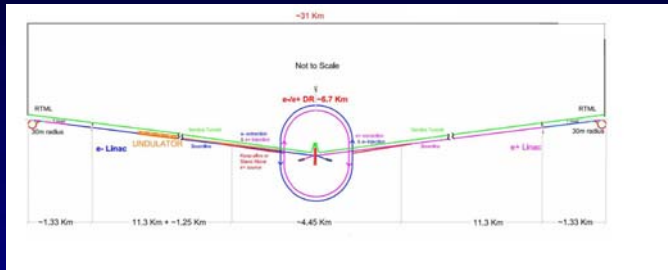
SIS 300:
stretcher with slow extraction
high energy e.g. 34 GeV/u U^{92+}



RESR:
deceleration to
100 - 400 MeV/u

NESR: electron cooling
deceleration to 4 MeV/u

Les accélérateurs: Perspectives

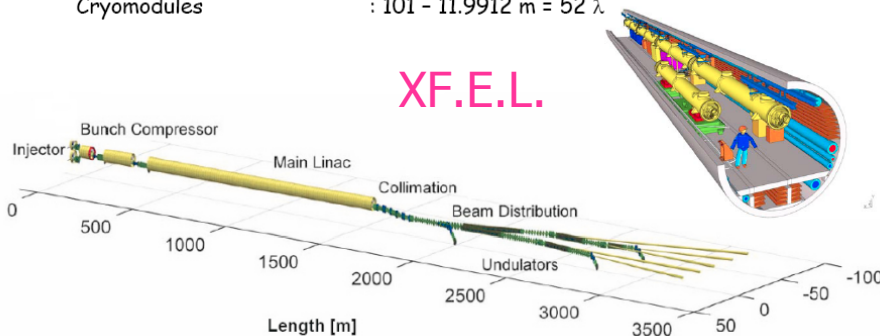


2 Linéaires de 2x250 GeV
2 anneaux d'amortissement

Coût construction (€ 2005) : 850 M€
Energie : 17,5 GeV
Longueur : 3.4 km (Linac : 1.7 km)

Cavités : 808 - Nb RRR 300 - $E_{acc} = 23.6 \text{ MV/m} - Q_0 > 10^{10}$
Cryomodules : 101 - 11.9912 m = 52 λ .

XF.E.L.



Laser in plasma displaces electrons
Wake velocity = Group velocity of light

