

Les accélérateurs de particules 2

Les accélérateurs circulaires

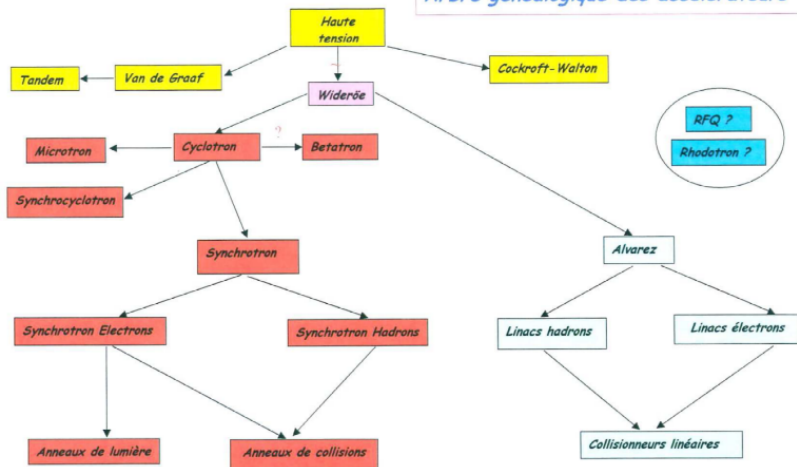
A. Chancé

CEA Saclay DSM/IRFU

23 juillet 2014

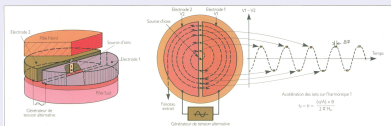
- 1 Cyclotrons et consorts
- 2 Synchrotron
- 3 Les collisionneurs
- 4 Émittance et adaptation
- 5 Futurs grands projets
- 6 Pour nous rejoindre

Arbre généalogique des accélérateurs



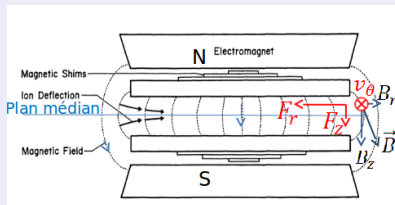
Eric Baron - GANIL

Principe du cyclotron



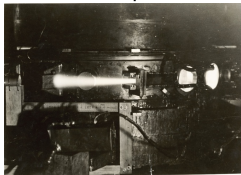
- Champ B uniforme.
 - Rayon de courbure :
$$R = \frac{\sqrt{E_{\text{cin}}(E_{\text{cin}} + 2E_0)}}{B_z q c}$$
 - pulsation :
$$\omega = \frac{qB_z}{\gamma m}$$
- ⇒ Isochronisme à basse énergie

Stabilité verticale

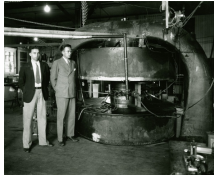


- Stabilité assurée par les lignes de champ B .
- $\nabla \times \mathbf{B} = 0$
- $$\frac{\partial B_r}{\partial z} = \frac{\partial B_z}{\partial r}$$

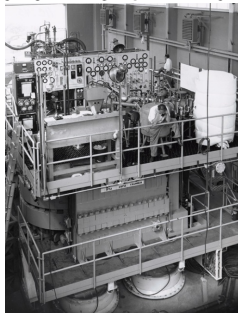
1931 : 28 cm p^+ 1.2 MeV



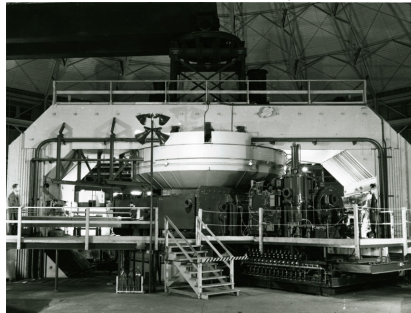
1932-1936 : 69 cm D^+ 4.8 MeV 1937-1938 : 94 cm D^+ 8 MeV



1939-1941 : 152 cm D^+ 16 MeV



1942 : 467 cm ions lourds >100 MeV

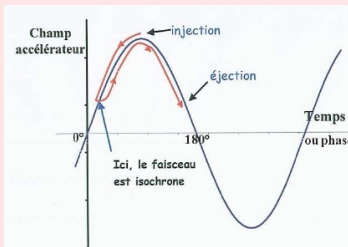


Le problème du synchronisme

- La fréquence diminue avec γ .

$$\omega = \frac{v_{\theta}}{r} = \frac{qB_z}{\gamma m_0}$$

- Les particules se déphasent de plus en plus avec la RF
- Limite p^+ de l'ordre de 20 MeV

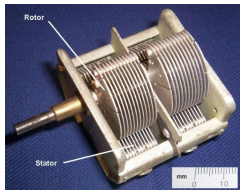


Quelques solutions

- Adapter la fréquence à l'énergie : **synchrocyclotron** (ions).
- Augmenter B avec le rayon : **cyclotron isochrone à secteurs** (ions).
- Adapter B et f simultanément : **synchrotron** (ions + e^-).
- Créer un champ accélérateur E circulaire : **bêatron** (e^-).
- Sauter une période RF entière à chaque tour : **microtron** (e^-).
- Ne plus tourner : **Accélérateur linéaire**.

- 1945 : Edwin McMillan (USA) et Vladimir Veksler (URSS).
- La fréquence varie cycliquement grâce a un très gros condensateur rotatif (période qq Hz a 100 Hz).
 - Très grand nombre de tours \Rightarrow moins de tension RF.
 - La limite énergétique vient de la taille du dipôle (Leningrad : diam. 7 m 7000 t 1 GeV p^+)
 - Mais le faisceau est pulsé : intensité réduite.
- Encore quelques machines en service dont le CPO (Centre de Photothérapie d'Orsay) jusqu'en 2008

Condensateur variable :



1949 : Dubna 6 m 700 MeV p^+



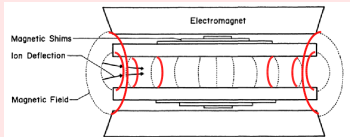
Cyclotron à secteurs

- Augmenter B_z avec γ selon r : $\omega = \frac{v_\theta}{r} = \frac{qB_z}{\gamma m_0}$

Perte de la stabilité verticale

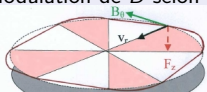
Lignes de champ orientées vers l'intérieur.

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



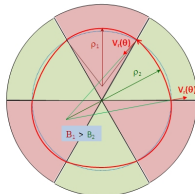
Solution : force de rappel $q\mathbf{v}_r \times \mathbf{B}_\theta$

Modulation de B selon θ

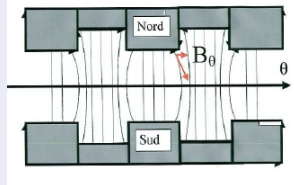


3) Hors du plan médian, une force verticale peut être assurée par une composante axiale de B (si l'orbite n'est pas circulaire)

Modulation de v_r selon θ

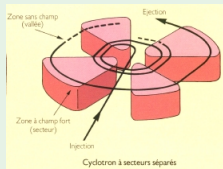


B_θ hors du plan médian

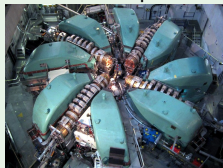


- Les cyclotrons ne sont plus à pôles plats.
- 1938 : L. H. Thomas focalisation par les coins
- 1954 : Kerst (secteurs spiralés)

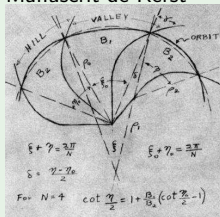
Cyclotrons à secteurs



Cyclotron à secteurs séparés de PSI 590 MeV p^+



Manuscrit de Kerst



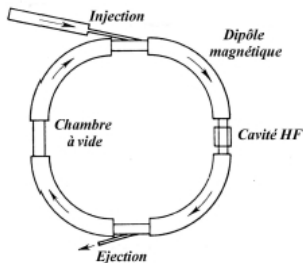
Cyclotrons spiralés commerciaux



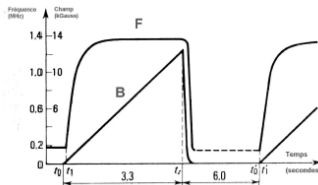
- Intérêt : limiter les dimensions des pôles magnétiques.
- Chambre torique avec une trajectoire de rayon constant.
- Idée proposée par M. Oliphant en 1943 et réalisée en 1953 pour les protons à l'université de Birmingham (1.0 GeV)
- Il faut donc adapter a tout moment le champ magnétique et la fréquence RF a l'énergie des particules.

$$B(t) = \frac{\gamma(t)m_0v(t)}{R}, \quad \omega_{RF} = n\frac{v(t)}{R}, \quad n \text{ nombre harmonique}$$

Schéma d'un synchrotron

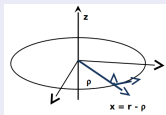


Cyclage de la fréquence et du champ magnétique



Stabilité dans les plans horizontal et vertical

- Soit l'orbite d'équilibre : $\rho = \frac{mv}{qB_0}$
- Soit une petite déviation x du rayon ρ de la trajectoire telle que : $r = \rho + x = \rho \left(1 + \frac{x}{\rho}\right)$



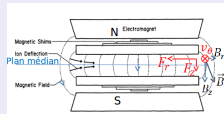
- Il y aura stabilité si $evB_z(r) \begin{cases} > \frac{mv^2}{r} & \text{pour } r > \rho \\ < \frac{mv^2}{r} & \text{pour } r < \rho \end{cases}$

- Soit $n = -\frac{\rho}{B_0} \frac{\partial B_z}{\partial r}$ l'indice de champ ($B_z(r) = B_z(\rho) \left(\frac{\rho}{r}\right)^n$).

$$\Rightarrow \frac{mv^2}{r} \approx \frac{mv^2}{\rho} \left(1 - \frac{x}{\rho}\right) \text{ et } evB_z(r) \approx evB_0 \left(1 - n\frac{x}{\rho}\right)$$

- Il y a stabilité horizontale seulement si $n < 1$.

- Stabilité verticale si lignes de champ tournées vers l'extérieur $\Rightarrow 0 < n < 1$

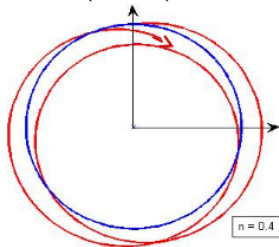


- Les équations du mouvement sont alors : $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2(1-n)x = 0$
 $\frac{d^2z}{dt^2} + \omega_0^2nz = 0$ $\omega_0 = \frac{qB_0}{m}$
- Les solutions ont des périodes plus grandes que la période de rotation :
 $f_x = \sqrt{1-n}f_0$ $f_z = \sqrt{n}f_0$
- Les écarts par rapport à l'orbite de référence sont alors très importants, la chambre à vide et les entrefers doivent être larges.

Les premiers synchrotrons

	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

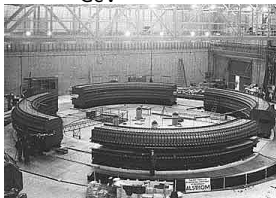
Oscillations dans le plan horizontal ($n = 0.4$)



1952 : Cosmotron à
Brookhaven 3 GeV



1958 : Saturne 1 à Saclay 3
GeV



1962 : ZGS à Argonne 10
GeV p+



1957 Synchrophasotron à Dubna 12.5 GeV



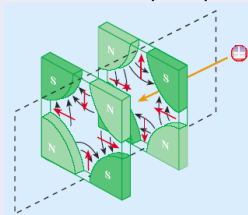
2002 : Après son démantèlement



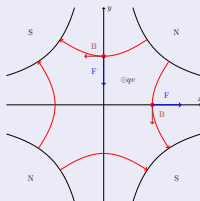
Principe du quadripôle

- Les particules voient un **champ magnétique transverse**. Si l'effet est **focalisant** dans un plan alors il est **défocalisant** dans l'autre plan.

Forces dans un quadripôle



Pôles de forme hyperbolique



$$V = gxy \text{ potentiel}$$

g gradient

$$\mathbf{B} = -\nabla V$$

$$B_x = -gy$$

$$B_y = -gx$$

$$F_x = +qvgx$$

$$F_y = -qvcgy$$

Exemples de quadripôles

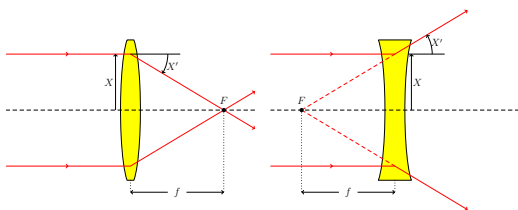
Doublet
de quadripôles
magnétiques :



Quadripôle
électrique :



- 1952 : E. Courant, H. Snyder et S. Livingston proposent la focalisation forte ou à gradient alterné.

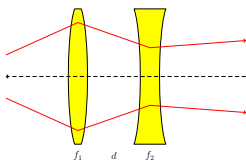


$f > 0$ focalisant

$f < 0$ défocalisant

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ X' \end{pmatrix}_0$$

- Une alternance d'éléments focalisants/défocalisants a une résultante globale focalisante.

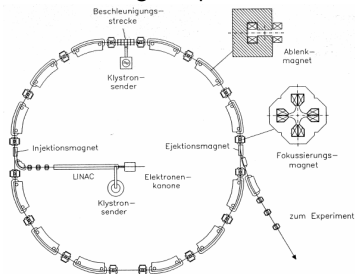


$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ \frac{d-f_1-f_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix}$$

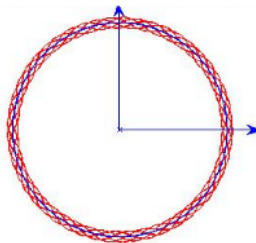
$f_1 = -f_2 = f$ et $d < |f| \Rightarrow \frac{d-f_1-f_2}{f_1 f_2} = -\frac{d}{f^2}$
 donc **focalisant**

- Le gradient constant est remplacé par des éléments magnétiques dédiés à chaque fonction :
 - **dipôles** pour courber la trajectoire,
 - **quadripôles** pour focaliser,
 - **sextupôles** et autres **multipôles** pour corriger les aberrations
- L'anneau est composé de mailles.

Un synchrotron générique



Oscillations bêta dans le plan horizontal



R. Wideroe :

“... 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 ... be even greater.”

“... It it were possible to *store the particles in the 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.”

Cible fixe contre Collisionneur. Application au LHC

$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)^2 c^2}$$

Cible fixe

$$E_{cm} = c\sqrt{2mE_1}$$

$$E_1 = 7 \text{ TeV}$$

$$E_2 = m_p c^2$$

$$E_{cm} = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 0.001}$$

$$E_{cm} = 0.118 \text{ TeV}$$

Collisionneur

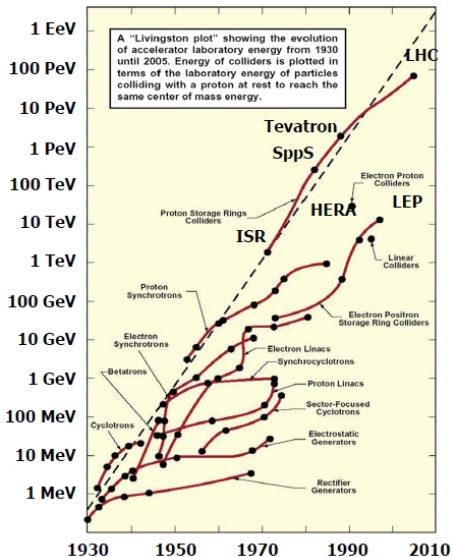
$$E_{cm} = 2E_1$$

$$E_1 = 7 \text{ TeV}$$

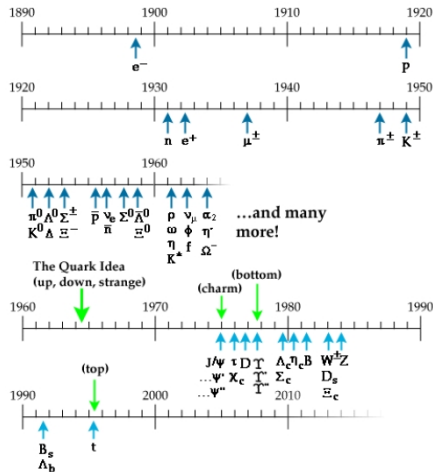
$$E_2 = 7 \text{ TeV}$$

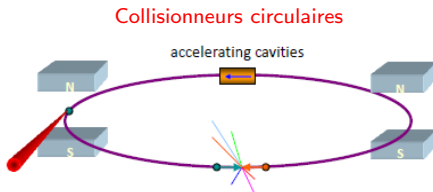
$$E_{cm} = 2 \cdot 7$$

$$E_{cm} = 14 \text{ TeV}$$



Les découvertes associées



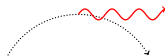


- ☺ Énergie acquise par passages successifs dans quelques cavités
- ☺ Collisions a chaque tour (plusieurs points d'interaction possibles)
 - ⇒ forte luminosité intrinsèque (nombre de collisions par unité de temps et de surface)
- ☺ RF et particules réutilisées
 - ⇒ énergétiquement efficace
- ☹ Pertes par rayonnement synchrotrons importantes $P \propto \gamma^4 / R^2$
- ☹ Aimants de courbure
 - ⇒ forts champs (LHC : dipôles supra)

- Dès que des charges libres ne suivent pas un mouvement rectiligne uniforme, elles perdent de l'énergie cinétique au profit d'un rayonnement électromagnétique (équations de Maxwell)

$$P_{\text{rayon/tour}} \propto \frac{\gamma^4}{R}$$

$$P_{\text{rayon/tour}}^{\text{électrons}} [\text{keV}] \approx 88.5 \frac{E[\text{GeV}]^4}{R[\text{m}]}$$

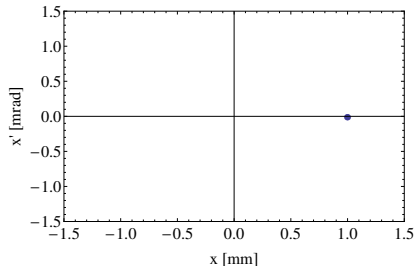


- ☺ Source de lumière (SOLEIL, X-FEL)
- ☺ Réduit très fortement l'émittance des faisceaux des électrons.
- ☹ Limite l'énergie maximale que l'on peut stocker dans un synchrotron.

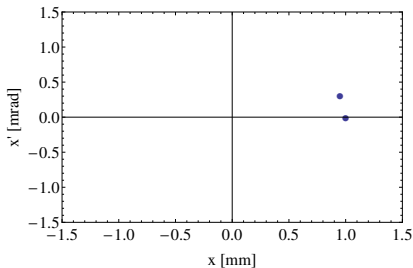
Cas d'électrons de 7 TeV dans le LHC

$$\left. \begin{array}{l} E = 7 \text{ TeV} \\ R \approx 5 \text{ km} \end{array} \right\} P_{\text{rayon/tour}} \approx 42000 \text{ TeV!!!}$$

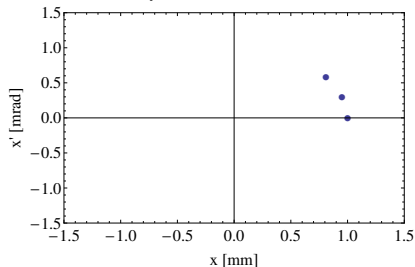
Position initiale



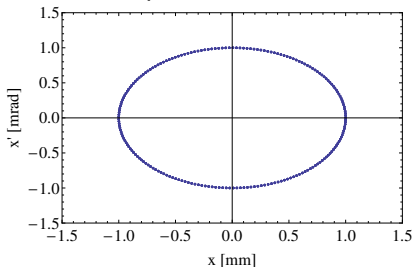
Après 1 tour

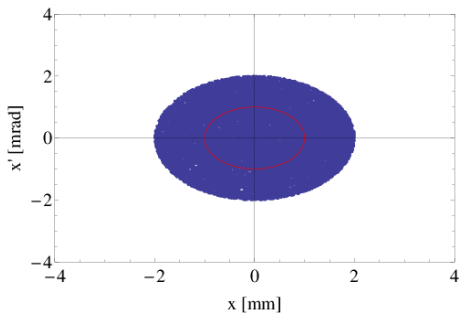


Après 2 tours



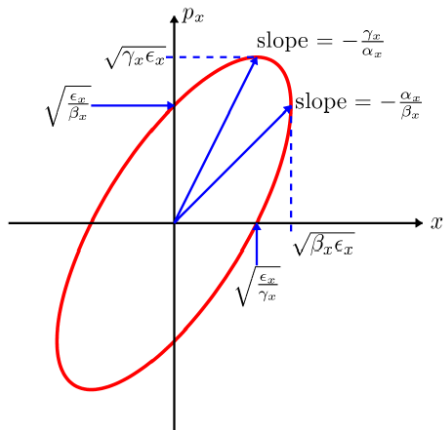
Après n tours



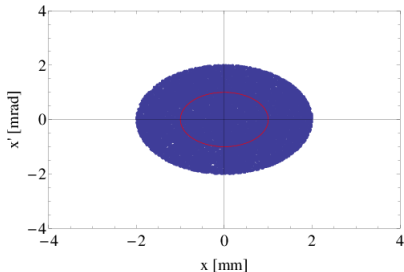


L'émittance est l'“aire” de l'ellipse du faisceau dans l'espace des phases.

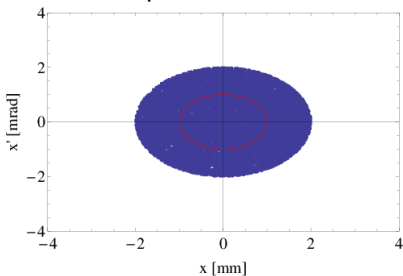
Paramètres du faisceau



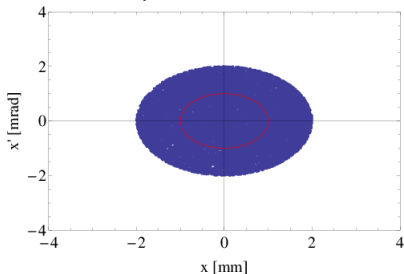
Position initiale



Après 1 tour

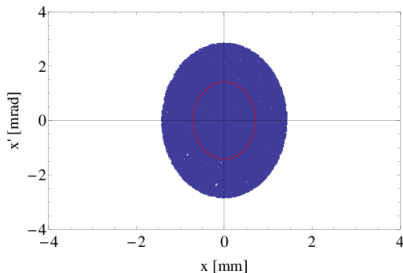


Après 2 tours

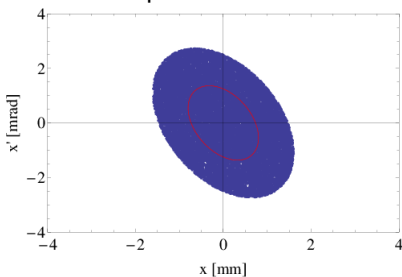


Le faisceau reste globalement inchangé tour après tour.

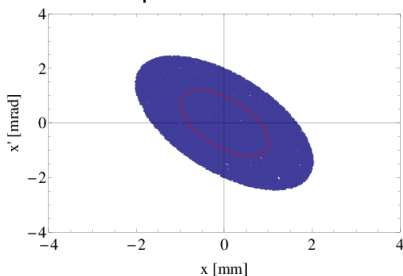
Position initiale



Après 1 tour



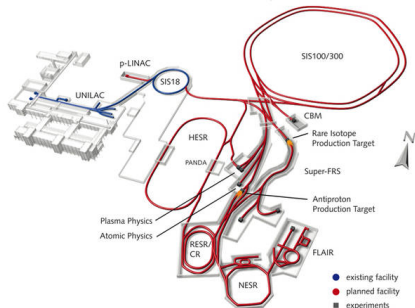
Après 2 tours



- Le faisceau change tour après tour.
- Le faisceau paraît "plus gros" qu'il n'est réellement.
- **Importance d'injecter le faisceau adapté.**

- En construction.
- Premières mesures pour 2018-2019.

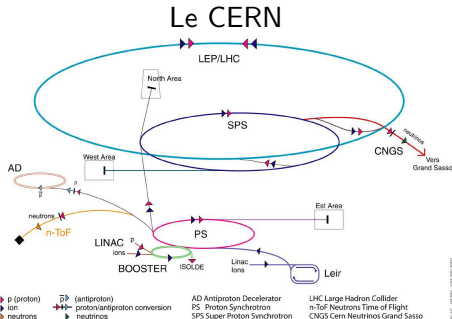
Complexe de FAIR à GSI :



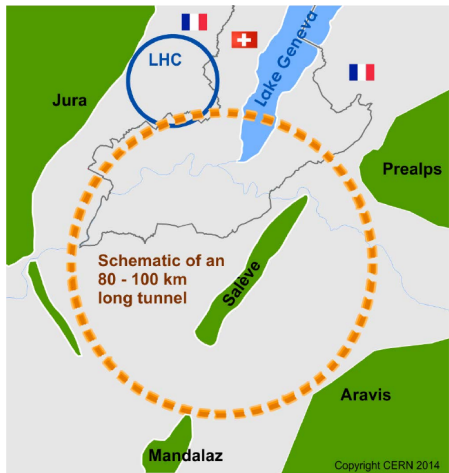
- Plus grandes intensités pour des faisceaux d'ions.

Un grand champ de recherches

- Physique nucléaire (structure du noyau, plasma de quarks, ...).
- Physique avec des antiprotons.
- Physique du plasma (plasma de très haute température et densité).
- Physique atomique.



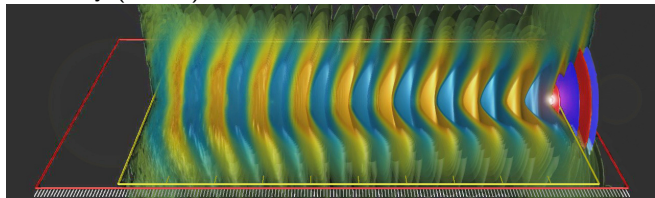
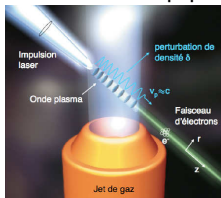
- Le LHC : plus puissante machine actuelle.
- On peut faire de la Physique jusque 2030-2040.
- Quid après 2040 ?
- Collisionneur à leptons (CLIC, ILC, ...)
- Collisionneur à hadrons : **20 ans** de design avant !
- C'est **maintenant** pour préparer les machines du **futur**.



Un grand nombre de défis

- 100 km (facteur 3/LHC).
- $E_{c.m.}=100$ TeV! (facteur 7/LHC).
- $B_{dip\grave{o}le}=16$ T! (facteur 2/LHC).
- Énergie stockée : 8.2 GJ/faisceau (1/2 A380 en plein vol)! (facteur 20/LHC).
- Rayonnement synchrotron : 26 W/m.
- Sécurité de l'installation.

Simulation Warp par J.-L. Vay (LBNL)



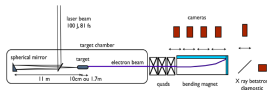
Principe de l'accélération plasma

- Le plasma est perturbé par une forte impulsion (laser ou faisceau).
- Création d'une force pondéromotrice dans le plasma.
- Oscillation de la densité du plasma.
- Création de champs accélérateurs longitudinaux très élevés (plusieurs dizaines de GV/m)

- Grand équipement basé sur un système laser de 5 à 10 PW.
- Prévu pour fin 2015.
- Complété par des lasers de moindre puissance.
- Construit dans l'ancien tunnel de l'Accélérateur Linéaire de Saclay (CEA Orme des Merisiers).

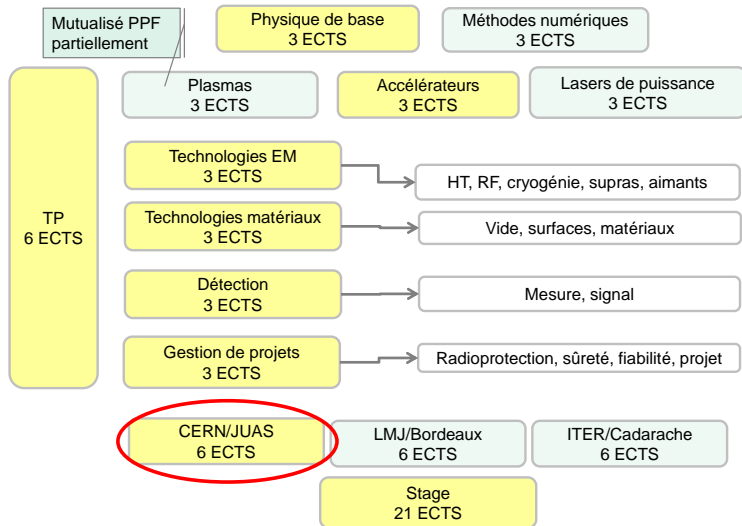
Applications possibles

- Accélération Laser-Plasma.
- Source d'ions de haute énergie.
- Sources intenses de rayons X ultra-brèves.
- Physique des plasma extrêmes.



- Master2 :
 - Un nouveau master en 2015 : Le master “Grands Instruments” à l’Université Paris-Saclay.
- Ecoles :
 - JUAS Archamps IPAM Paris.
 - CAS Cern Accelerator School
- Web based lectures :
 - US Particle Accelerator Schools :
<http://www.lns.cornell.edu/~dugan/USPAS/>
 - CERN Particle Accelerator Schools :
<http://cas.web.cern.ch/cas/Nicolas Pichoff>
 - SFP : http://nicolas.pichoff.perso.sfr.fr/index_fichiers/slide0001.htm

GI : 39 ECTS de cours/TD/TP



GB

- École IN2P3 “De la Physique au Détecteur” – Eric Baron – GANIL
- Panorama des Accélérateurs de Particules – Patrick Musset – PIN
- Accelerator Physics – Hans Peter Beck
- RF Acceleration in Linacs – Sebastien Bousson – IPN Orsay - NPAC
- Dynamics and acceleration in Linear structures – Joel Le Duff
- RF for Accelerators – Maurizio Vretenar – CERN BE/RF
- Microtrons and Recirculation – Andreas Jankowiak – Inst. für Kernphysik
- Avec un grand merci pour Wifrid Faraboni pour m’avoir permis d’utiliser ses transparents.