

Les accélérateurs de particules 2

Les accélérateurs circulaires

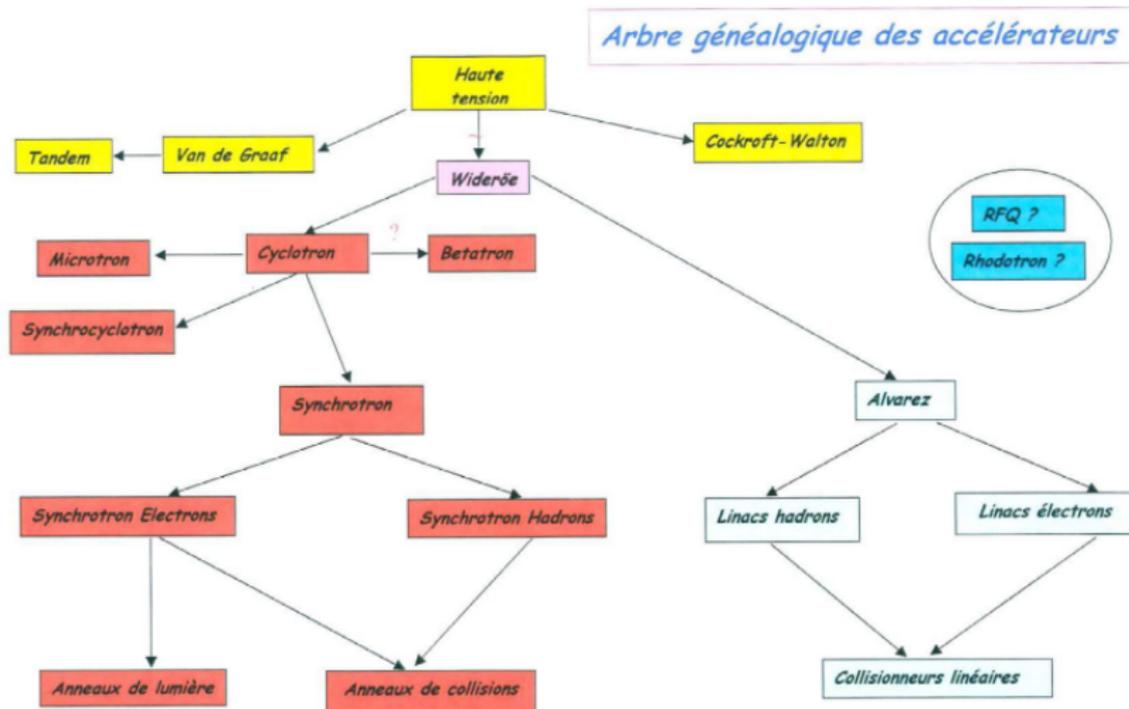
Antoine Chancé

CEA Saclay DRF/IRFU/DACM

13 juillet 2022

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

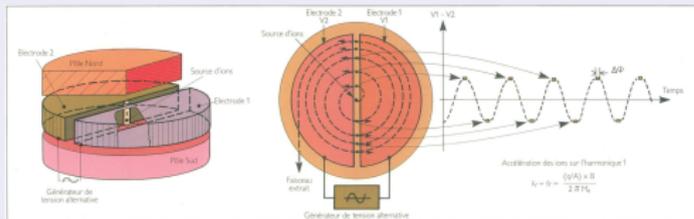
La grande famille des accélérateurs



Eric Baron - GANIL

Le cyclotron

Principe du cyclotron



- Champ B uniforme.

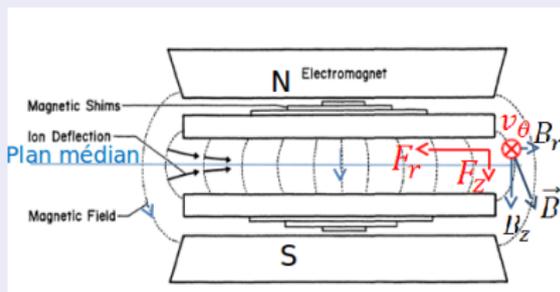
- Rayon de courbure :

$$R = \frac{\sqrt{E_{\text{cin}}(E_{\text{cin}} + 2E_0)}}{B_z q c}$$

- Pulsation : $\omega = \frac{qB_z}{\gamma m}$

⇒ Isochronisme à basse énergie

Stabilité verticale



- Stabilité assurée par les lignes de champ B .

- $\nabla \times \mathbf{B} = 0$

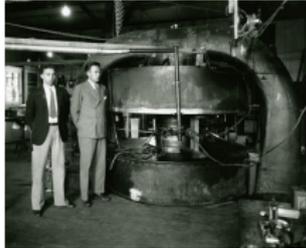
- $\frac{\partial B_r}{\partial z} = \frac{\partial B_z}{\partial r}$

Des cyclotrons de plus en plus gros

1931 : 28 cm p^+ 1.2 MeV



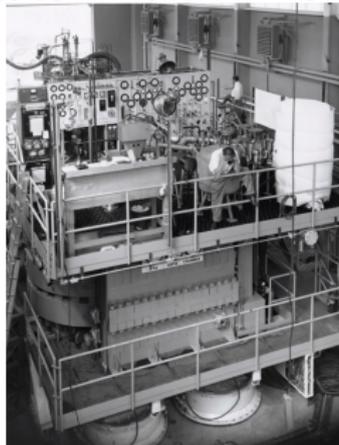
1932-1936 : 69 cm D^+ 4.8 MeV



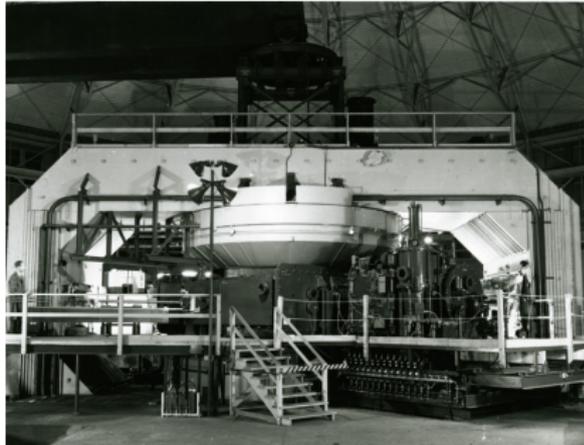
1937-1938 : 94 cm D^+ 8 MeV



1939-1941 : 152 cm D^+ 16 MeV



1942 : 467 cm ions lourds >100 MeV



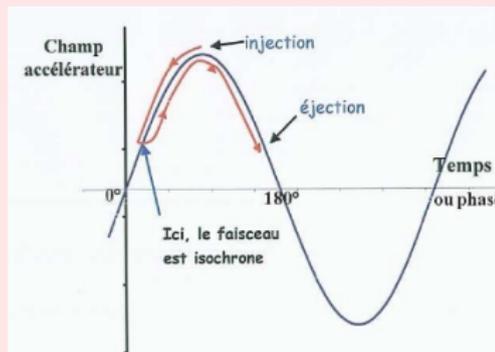
Les limites du cyclotron

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.



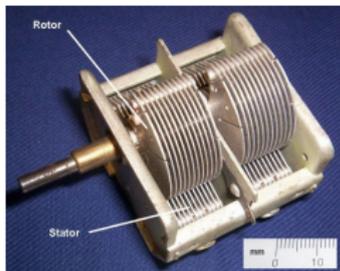
Quelques solutions

- 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 : **bêtatron** (e^-).
- Sauter une période RF entière à chaque tour : **microtron** (e^-).
- Ne plus tourner : **Accélérateur linéaire**.

Le synchrocyclotron

- 1945 : Edwin McMillan (USA) et Vladimir Veksler (URSS).
- La fréquence varie cycliquement grâce a un très gros condensateur rotatif (période qq Hz à 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^+



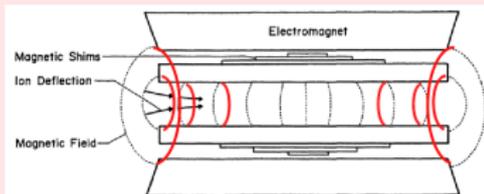
Cyclotron à secteurs

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

Perte de la stabilité verticale

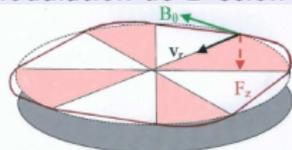
Lignes de champ orientées vers l'intérieur.

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



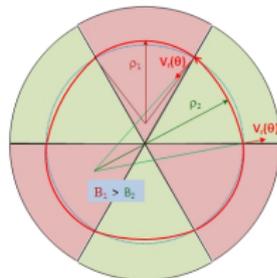
Solution : force de rappel $qv_r \times B_\theta$

Modulation de B selon θ

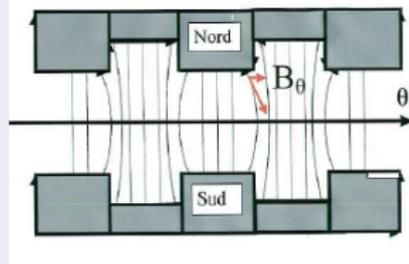


3) Hors du plan médian, une force verticale peut être assurée par une composante azimutale de B si l'orbite n'est pas circulaire

Modulation de v_r selon θ



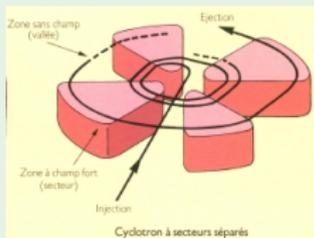
B_θ hors du plan médian



Collines et vallées

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

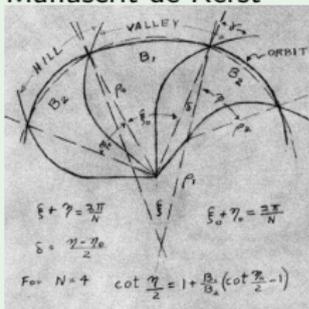
Cyclotrons à secteurs



Cyclotron à secteurs séparés de
PSI 590 MeV p^+



Manuscrit de Kerst



Cyclotrons spiralés commerciaux

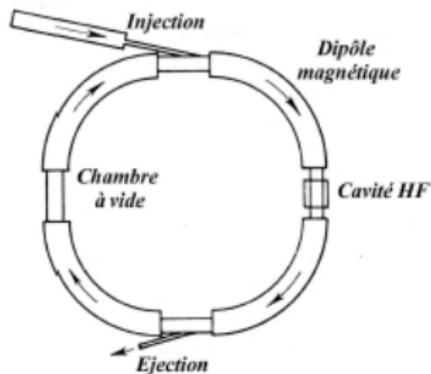


Le synchrotron

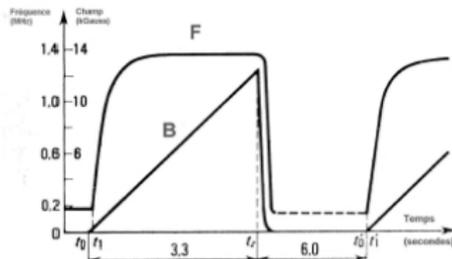
- Intérêt : limiter les dimensions des pôles magnétiques.
- Chambre torique avec une trajectoire de rayon constant.
- Idée proposée par M. Oliphant en 1943 et réalisée en 1953 pour les protons à l'université de Birmingham (1.0 GeV)
- Il faut donc adapter a tout moment le champ magnétique et la fréquence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

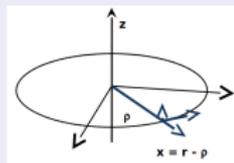


Cyclage de la fréquence et du champ magnétique



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 : $r = \rho + x = \rho \left(1 + \frac{x}{\rho}\right)$



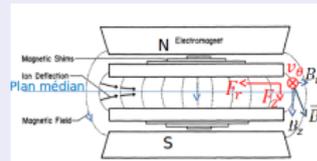
- Il y aura stabilité si $evB_z(r) \begin{cases} > \frac{mv^2}{r} & \text{pour } r > \rho \\ < \frac{mv^2}{r} & \text{pour } r < \rho \end{cases}$

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

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

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

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



Limites de la focalisation faible

- Les équations du mouvement sont alors :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2(1 - n)x = 0 \quad \frac{d^2z}{dt^2} + \omega_0^2nz = 0 \quad \omega_0 = \frac{qB_0}{m}$$

- Les solutions ont des périodes plus grandes que la période de rotation :

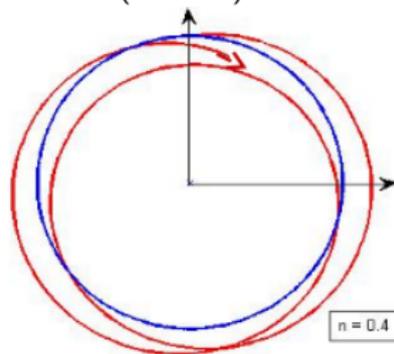
$$f_x = \sqrt{1 - n}f_0 \quad f_z = \sqrt{n}f_0$$

- 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 ($n = 0.4$)

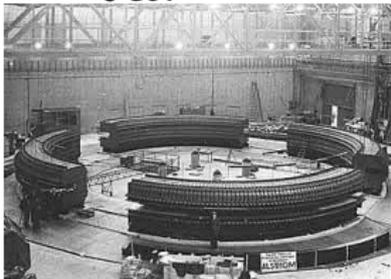


Les synchrotrons en images

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

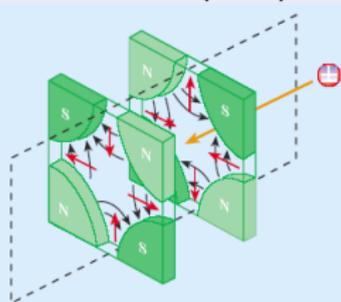


La lentille magnétique : le quadripôle

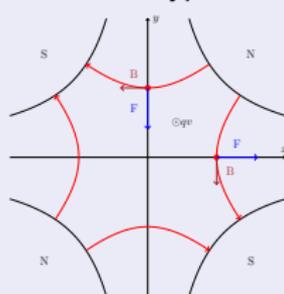
Principe du quadripôle

- 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



$V = g \times x \times y$ 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 :

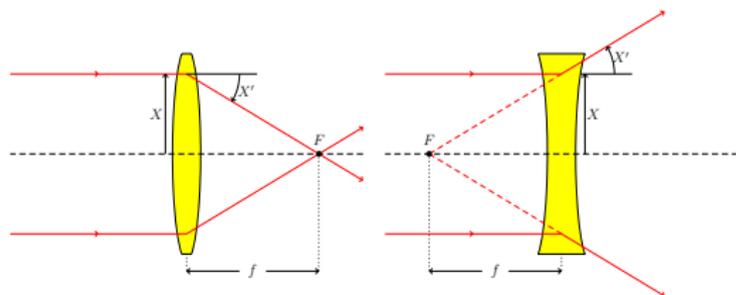


Quadripôle électrique :



La focalisation forte

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

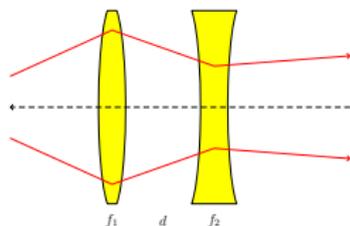


$f > 0$ focalisant

$f < 0$ 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.



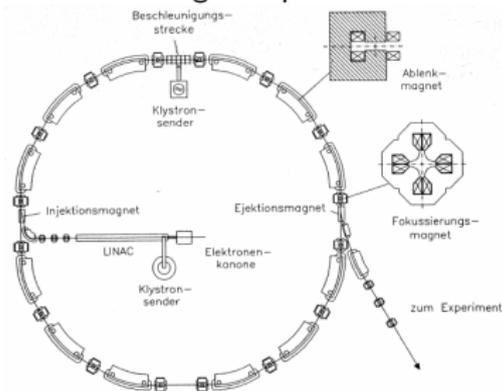
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ \frac{d-f_1-f_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix}$$

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

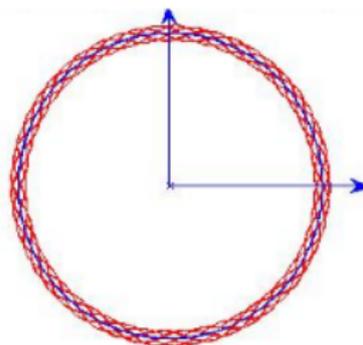
Le synchrotron à focalisation forte

- 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 bétatron dans le plan horizontal



Pourquoi faire des collisions ?

R. Widerøe :

"... 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

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

Cible fixe

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

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

$$E_2 = m_p c^2$$

$$\left. \begin{array}{l} E_1 = 7 \text{ TeV} \\ E_2 = m_p c^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} E_{\text{cm}} = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 0.001} \\ E_{\text{cm}} = 0.118 \text{ TeV} \end{array}$$

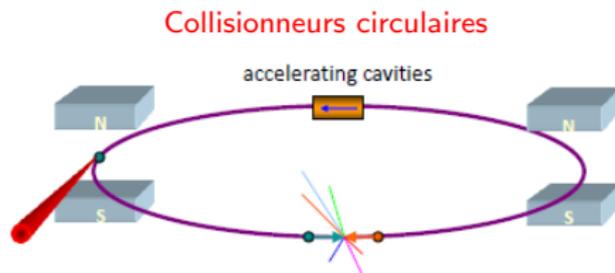
Collisionneur

$$E_{\text{cm}} = 2E_1$$

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

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

$$\left. \begin{array}{l} E_1 = 7 \text{ TeV} \\ E_2 = 7 \text{ TeV} \end{array} \right\} \begin{array}{l} E_{\text{cm}} = 2 \cdot 7 \\ E_{\text{cm}} = 14 \text{ TeV} \end{array}$$



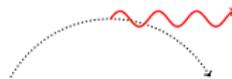
- ☺ **Énergie acquise par passages successifs** dans quelques cavités
- ☺ **Collisions a chaque tour** (plusieurs points d'interaction possibles).
 - ⇒ **Forte luminosité** intrinsèque (nombre de collisions par unité de temps et de surface).
- ☺ RF et **particules réutilisées**.
 - ⇒ Énergétiquement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

Le rayonnement synchrotron

- 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)

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

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



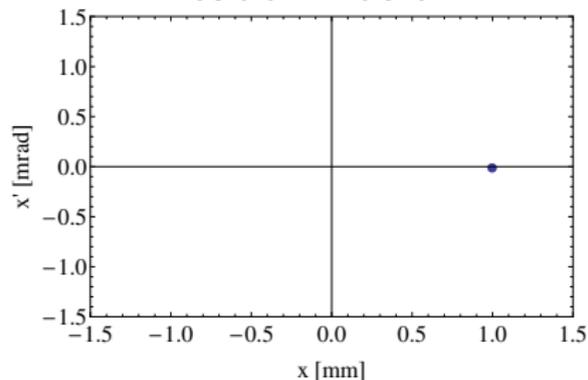
- ☺ **Source de lumière** (SOLEIL, X-FEL)
- ☺ **Réduit** très fortement **l'émittance** des faisceaux des électrons.
- ☺ **Limite le courant maximal** que l'on peut stocker dans un synchrotron.

Cas d'électrons de 7 TeV dans le LHC

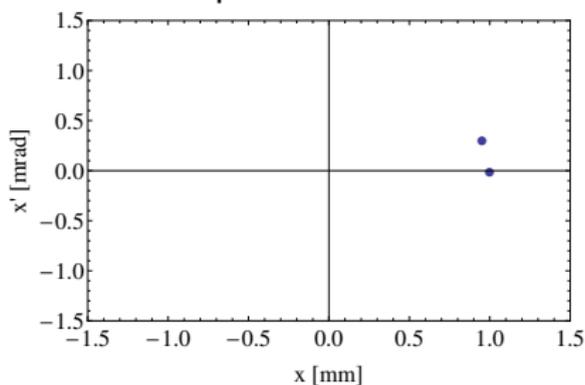
$$\left. \begin{array}{l} E = 7 \text{ TeV} \\ R \approx 5 \text{ km} \end{array} \right\} P_{\text{rayon/tour}} \approx 42\,000 \text{ TeV!!!}$$

Mouvement d'une particule

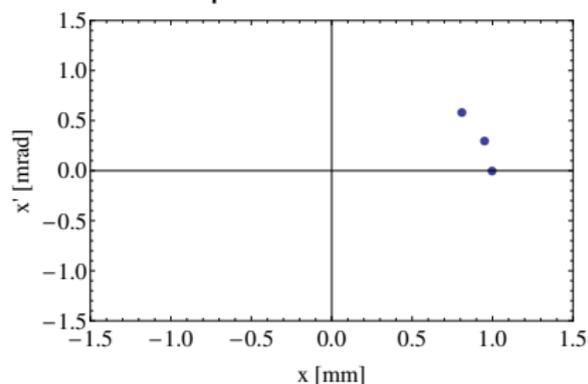
Position initiale



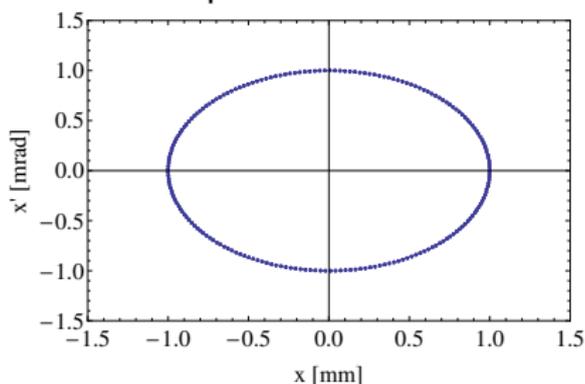
Après 1 tour



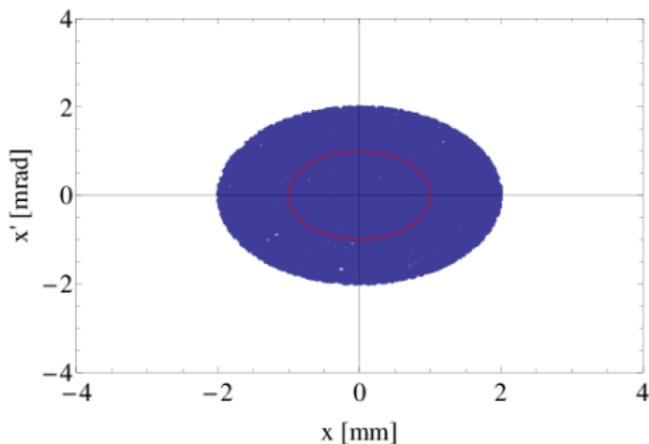
Après 2 tours



Après n tours

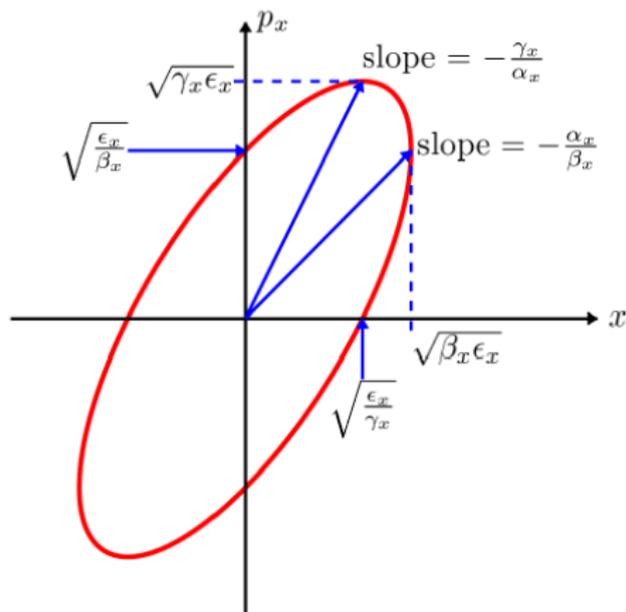


Émittance du faisceau



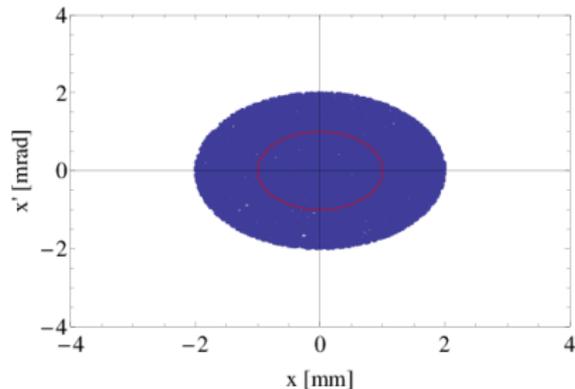
L'émittance est proportionnelle à l'aire de l'ellipse du faisceau dans l'espace des phases.

Paramètres du faisceau

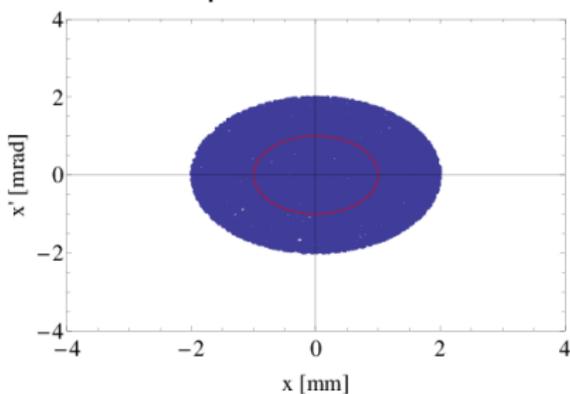


Faisceau adapté

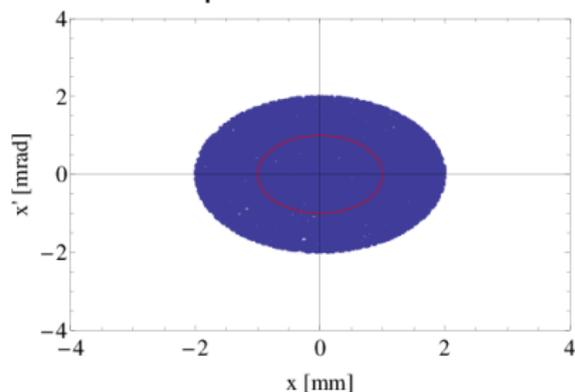
Position initiale



Après 1 tour



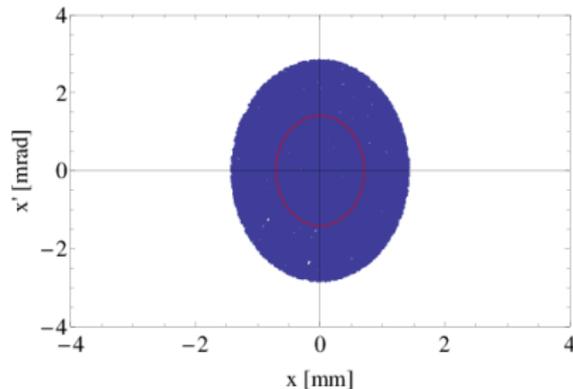
Après 2 tours



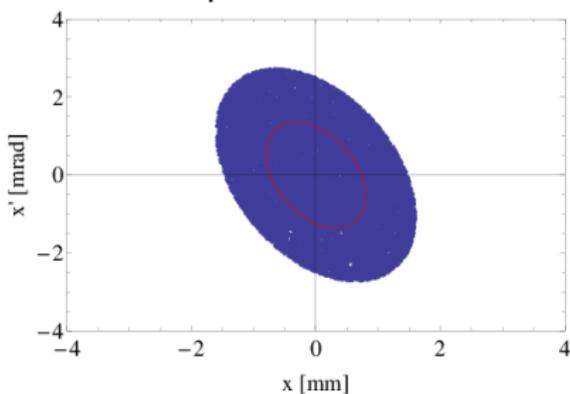
Le faisceau reste globalement inchangé tour après tour.

Faisceau désadapté

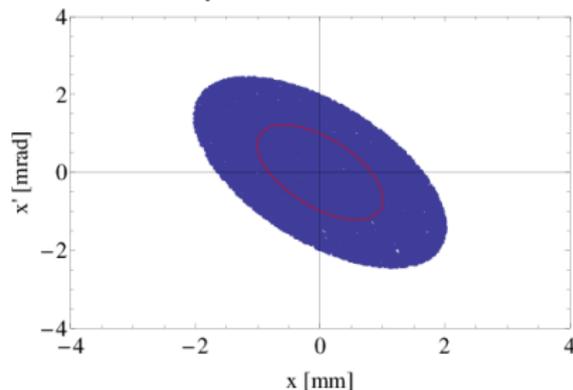
Position initiale



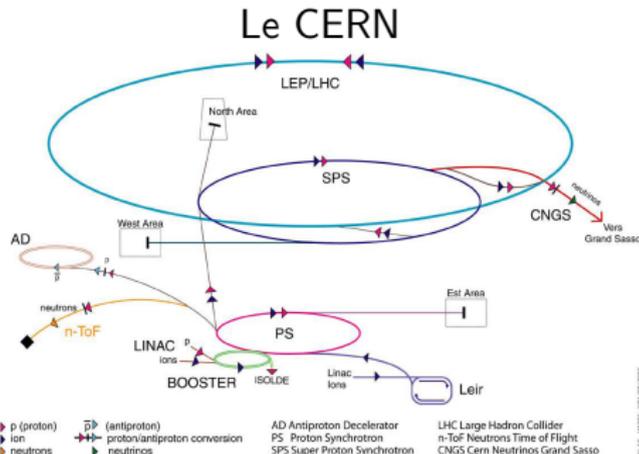
Après 1 tour



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.**



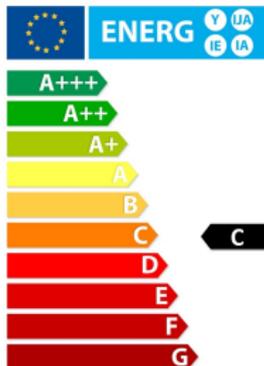
- Le LHC : plus puissante machine actuelle.
- On peut faire de la Physique jusque 2030-2040.
- Quid après 2040 ?
- Collisionneur à leptons (CLIC, ILC, ...)
- Collisionneur à hadrons : **20 ans** de design avant !
- C'est **maintenant** pour préparer les machines du **futur**.

Efficacité énergétique

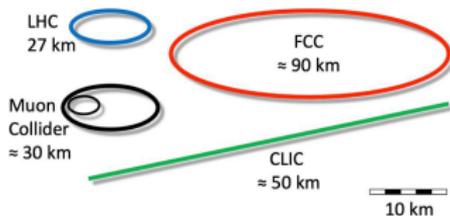
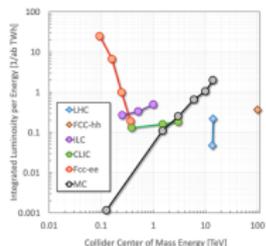
En 1940



En 2022



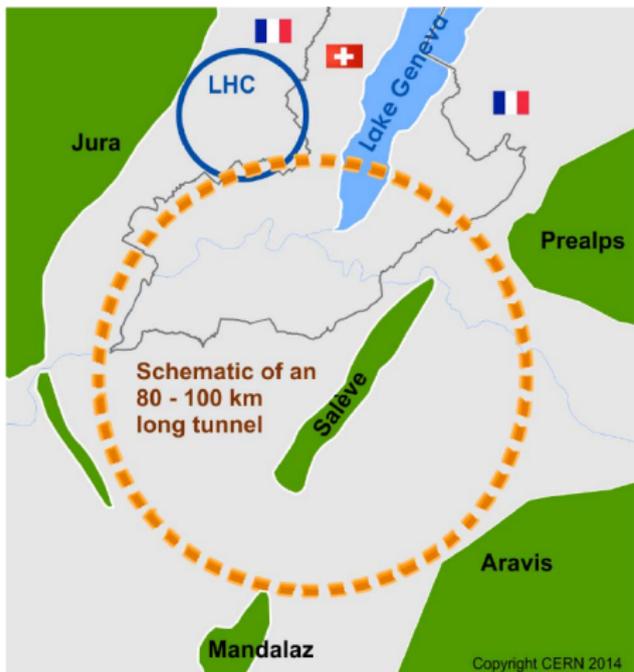
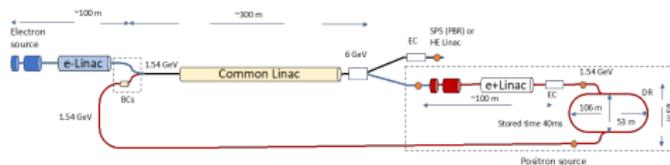
Demain ?



Limitations

- Puissance faisceau.
- Taille.
- Coût.

FCC-ee (Future Circular Collider pour électrons)



Une machine qui rayonne

- 100 km (facteur 3/LHC).
- $P_{\text{rayonnée}} = 50 \text{ MW/faisceau} !$
- La puissance rayonnée limite la puissance faisceau et donc le courant dépend de l'énergie à la collision.
- 1280 mA à 45.6 GeV
- 5.0 mA à 182.5 GeV

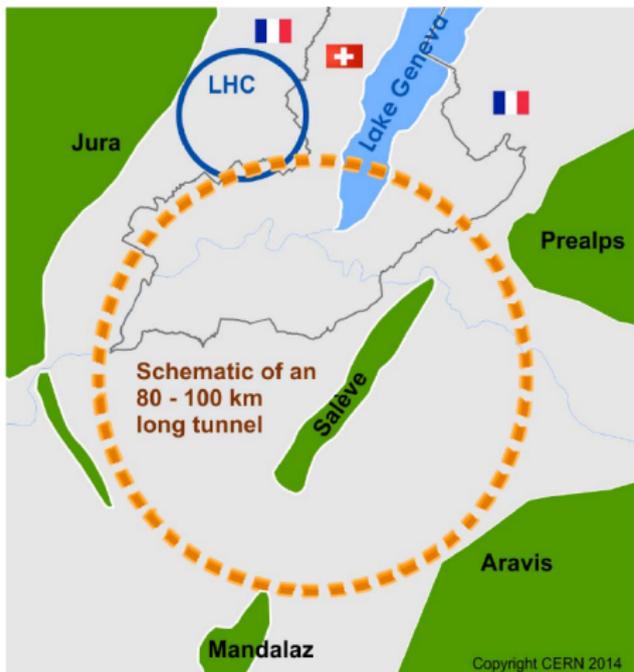
FCC-hh (Future Circular Collider pour hadrons)



8.3 T → 12 T →



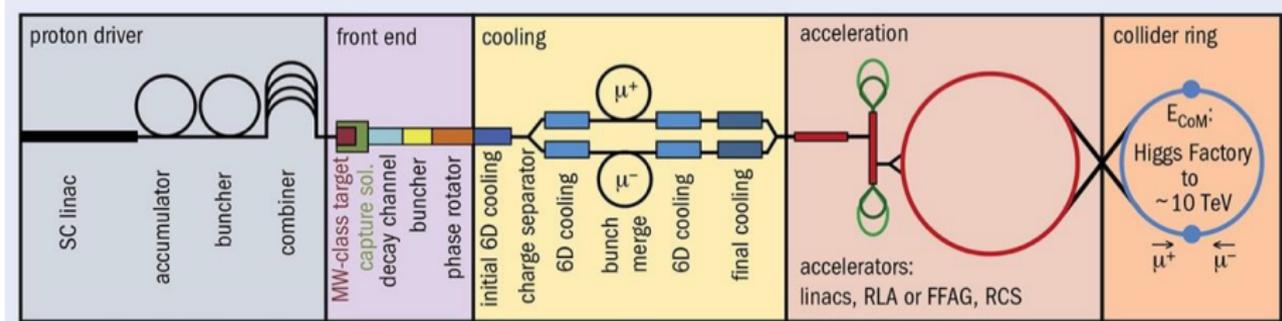
12 T → 14.5 T →



Un grand nombre de défis

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

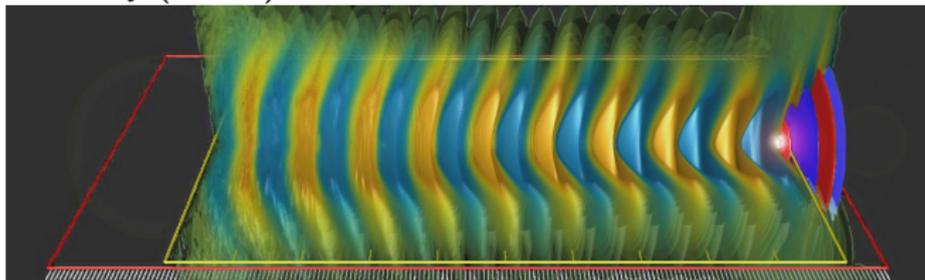
Collisionneurs à muons



- ☺ **Leptons.** Toute l'énergie de collision est pour la physique (contrairement à une particule composite comme le proton).
- ☺ Particule **200 fois plus lourde que l'électron.** Rayonnement synchrotron réduit par 1.6×10^9 à même énergie.
- ☹ **Particule instable.** Demi-vie : $2.2 \mu\text{s}$. Il faut accélérer très vite !
- ☹ Il faut les **produire** et les **refroidir** très vite pour des collisions efficaces !

Pour des gradients ultimes : l'accélération plasma

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)

Pour rejoindre le monde fascinant des accélérateurs

- Master PLATO : <http://www.master-gi-plato.fr/gi-plato/>
- Ecoles :
 - JUAS : <https://www.esi-archamps.eu/juas-presentation/>
 - CERN Particle Accelerator Schools : <http://cas.web.cern.ch>
 - US Particle Accelerator Schools : <https://uspas.fnal.gov>
- SFP : <http://accélérateurs.sfpnet.fr/>



- Film : **Le voyage fantastique des particules dans un accélérateur**
- Version 2D & 3D, en français ou anglais
- <https://www.youtube.com/watch?v=LiFpIqQcIyw>

Le master PLATO

Etablissements partenaires et responsables

université
PARIS-SACLAY

Olivier.guilbaud@universite-paris-saclay.fr



alessandro.flacco@ensta-paris.fr



INSTITUT
POLYTECHNIQUE
DE PARIS



serena.bastiani@polytechnique.fr

instn
guy.bonnaud@cea.fr



CentraleSupélec
Mohammed.sehir@centralesupelec.fr

école
normale
supérieure
paris-saclay

thomas.rodet@ens-paris-saclay.fr



Francois.goudail@institutoptique.fr

Master 2 Grands instruments Plasmas Lasers Accélérateurs Tokamaks



Grands infrastructures partenaires d'accueil et de formation



Fédération
Sciences

Fusion Plasmas Chauds

Sciences de l'Énergie

S3 - Semestre 3

Matières	ECTS	Cours	TD	TP
Électromagnétisme et relativité	2	12h	12h	-
Plasmas et applications aux tokamaks	4	30h	20h	-
Localisations	6	20h	12h	-
Leçons de vulgarisation	4	30h	10h	-
Projets et organisations des grandes installations	3	18h	12h	-
Équipements expérimentaux	3	20h	-	20h
Physique et technologies transversales	4	20h	18h	-
Définition, mesure, signal	3	18h	9h	-
Manipulations auprès des grandes installations	3	-	-	42h

S4 - Semestre 4

Matières	ECTS	Cours	TD	TP
Manipulations auprès des grandes installations	3	-	-	42h
Formation approfondie auprès de grands instruments nationaux ou internationaux	6	-	-	-
Stage	21	-	-	-

Univ. de Lorraine



Bordeaux

Univ. de Bordeaux

Le Laser Mégajoule

Marseille

Aix-Marseille Univ.

Ecole Centrale Marseille

LASERIX

Apollon

West

er Mégajoule

iter



SCALP
JANUS

SOLEIL
SYNCHROTRON

institut Curie

Recherche pour le meilleur de l'énergie

Informations et inscription

www.master-gi-plato.fr/

- École IN2P3 “De la Physique au Détecteur” – Eric Baron – GANIL
- Panorama des Accélérateurs de Particules – Patrick Musset – 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
- Avec un grand merci pour Wilfrid Faraboni pour m’avoir fourni la base pour ces transparents.