



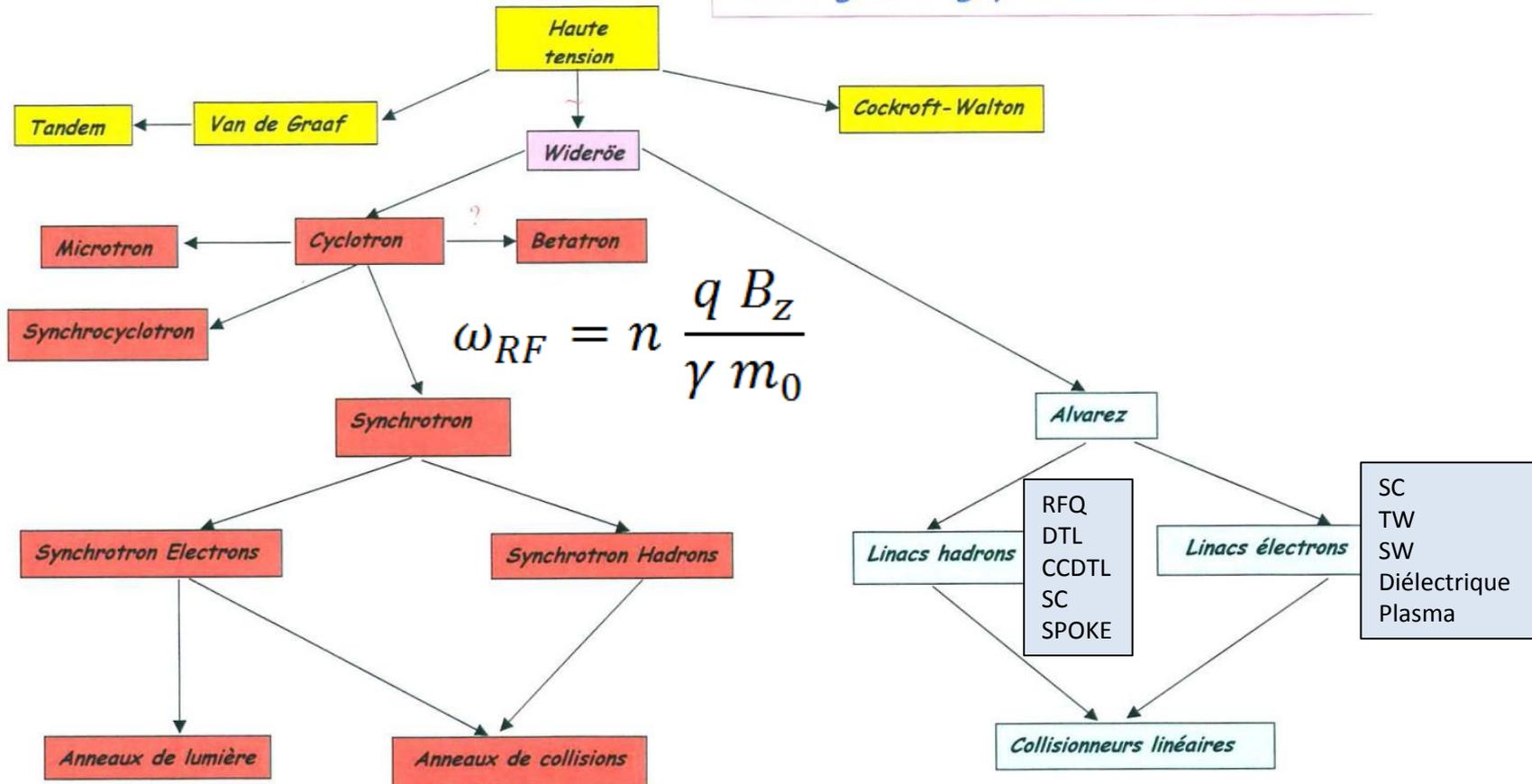
Les accélérateurs de particules

2^{ème} partie

Wilfrid.Farabolini@cern.ch

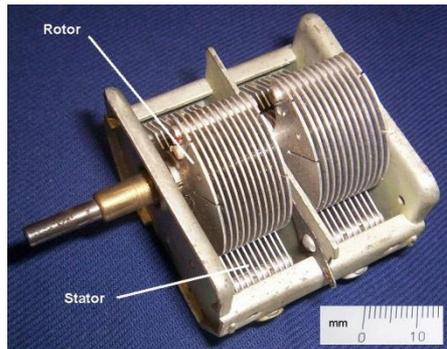
L'arbre généalogique

Arbre généalogique des accélérateurs



Le synchrocyclotron

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



Un petit condensateur variable



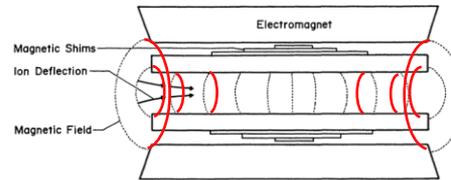
1949 : Dubna 6m 700 MeV p+

Cyclotron a secteur

Augmenter $B_z(r)$ proportionnellement au γ de la particule en r $\omega = \frac{v_\theta}{R} = \frac{q B_z}{\gamma m_0}$

- Mais alors les lignes de champ magnétique sont orientées vers l'intérieur

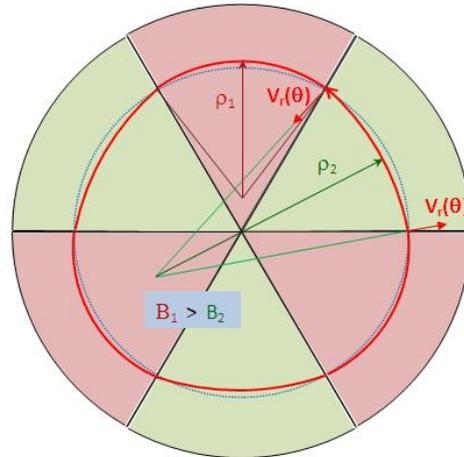
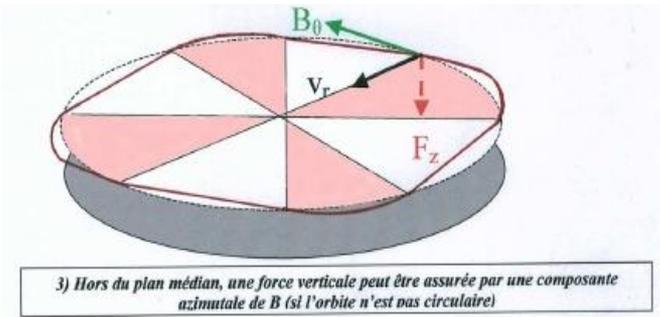
→ Plus de stabilité verticale



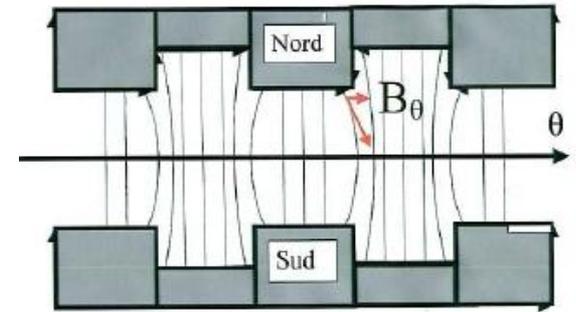
$$\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} = 0$$

- Solution: retrouver une force de rappel selon z en jouant sur B_θ et v_r

→ Utilisation d'une modulation azimuthale de B



Modulation azimuthale de la vitesse radiale

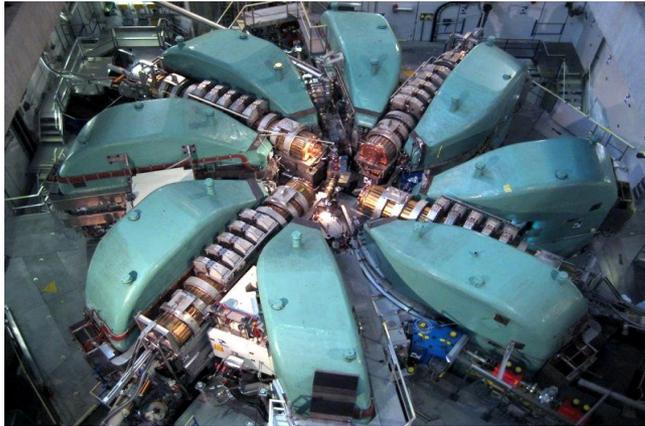
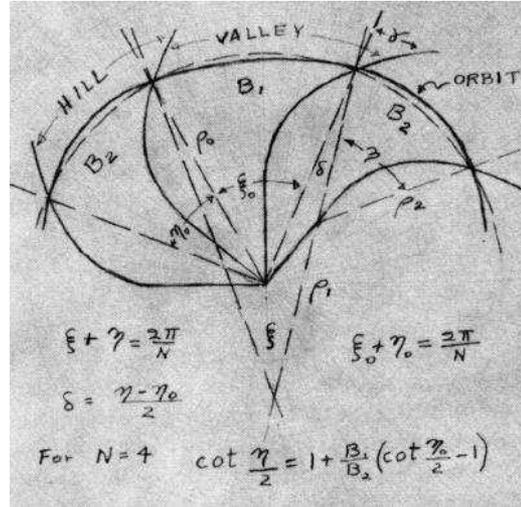
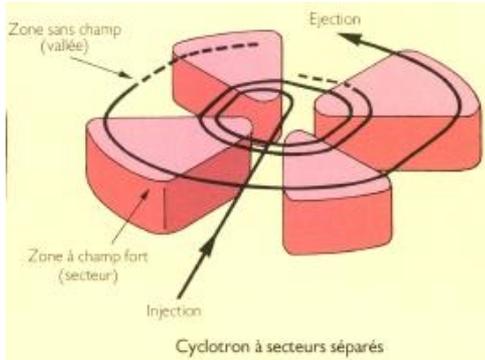


Composante azimuthale de B hors du plan médian

Collines et vallées

Les cyclotrons ne sont plus a pôles plats

1938 : L.H. Thomas (edge focusing), 1954 D. Kerst (secteur spiralés)



Manuscrit de Kerst



Cyclotron a Secteurs Séparés (SSC)
de PSI (Suisse) 590 MeV p+

Cyclotron spiralés commerciaux

Le Bétatron

- Un concept séduisant longuement muri (Slepian 1922, Wideroe 1923) et finalement réalisé par Donald Kerst en 1940.
- Le champ E est généré par la variation du champ B (accélérateur à induction [la 3^{ème} famille]).
- Condition de stabilité de l'orbite du faisceau d'énergie variable dans un champ B variable:

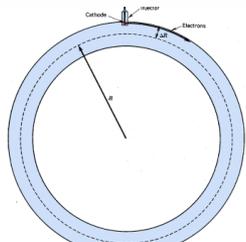
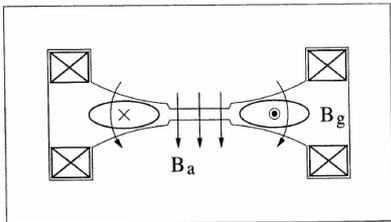
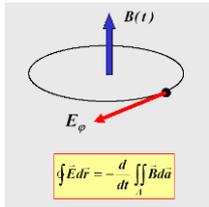


Figure 11.4 Injector geometry for low-current betatrons.

Création d'un champ E azimutal

$$\overline{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\iint_A (\overline{rot} \vec{E}) \cdot d\vec{a} = \iint_A -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{a}$$

$$2\pi r E_\theta = -\pi r^2 \frac{\partial B_{z \text{ moy}}}{\partial t}$$

$$E_\theta = -\frac{r}{2} \frac{\partial B_{z \text{ moy}}}{\partial t}$$

Equilibre énergie /trajectoire

$$\frac{d}{dt}(mv_\theta) = q|E_\theta| = \frac{qr}{2} \frac{d}{dt} B_{z \text{ moy}}$$

$$\rightarrow mv_\theta = \frac{qr}{2} B_{z \text{ moy}}$$

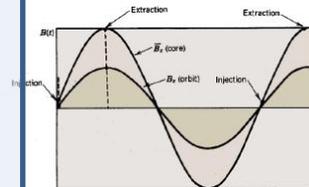
$$m \frac{v_\theta^2}{r} = q v_\theta B_z(r)$$

$$\rightarrow m v_\theta = q r B_z(r)$$

$$B_z(r) = \frac{1}{2} B_{z \text{ moy}}$$



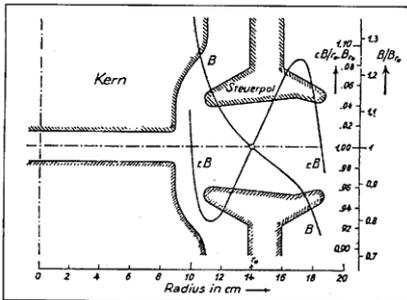
D. Kerst



Cycle du Bétatron

Bétatron : réalisation

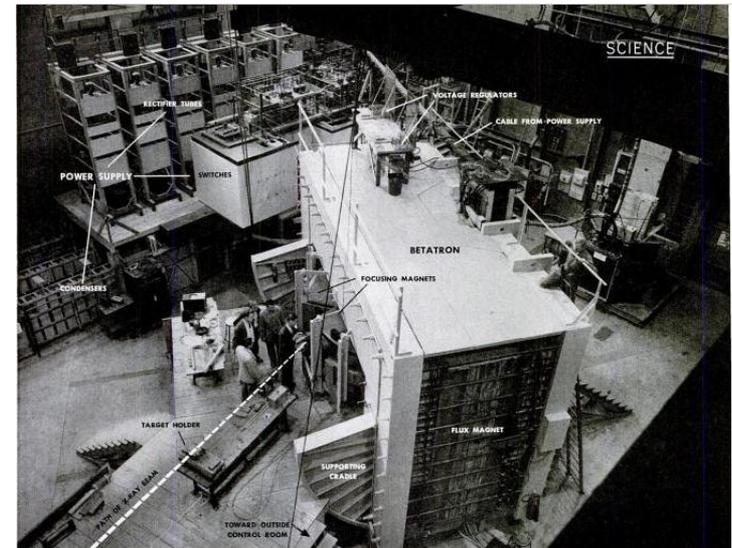
- 1940 : 2.2 MeV , 1942: 20 MeV, 1950 : 300 MeV
- Surtout utilisé pour la production de rayons X (médical et industriel)
- Resté dans l'histoire des accélérateurs par le terme « oscillations bétatron » toujours utilisé dans la dynamique faisceau.
- Kerst fut le premier a tout calculer avant de construire.
- Mais fonctionnement en pulsé



Forme des pièces polaires



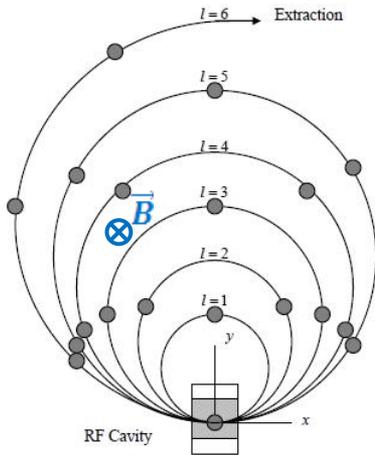
D. Kerst et son premier bétatron de 2.2 MeV



Bétatron de 300 MeV , Univ. d'Illinois

Le Microtron

Idée : rester en phase avec la RF en sautant une période entière a chaque tour (Veksler en 1944)



Position des paquets d'e- dans le Microtron

$$\omega_{RF} = n \omega_{particules}$$

$$\omega_{part.} = \frac{q B}{\gamma m_0}$$

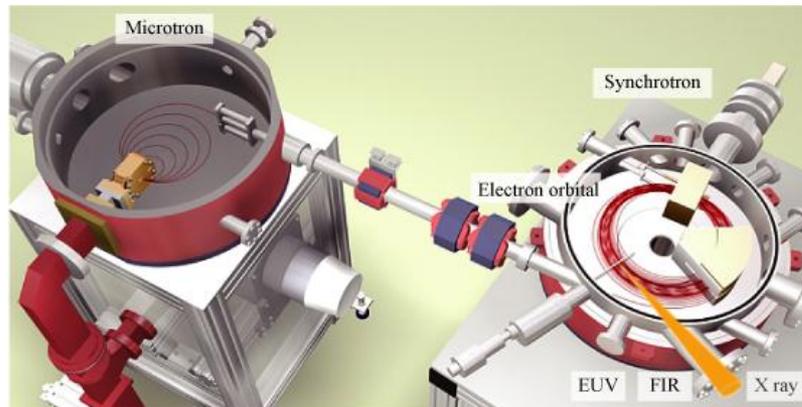
$$\omega_{part.} = \omega_0, \frac{\omega_0}{2}, \frac{\omega_0}{3}, \frac{\omega_0}{4}, \dots$$

$$\gamma_n = 1 + \frac{n \Delta E + E_{inject}}{E_0} = n \gamma_0$$

$$\Delta E = E_0 + E_{inject} \geq 511 \text{ keV pour } e^-$$



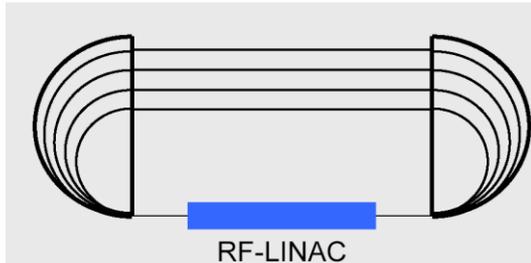
Microtron de 10 MeV 40 kW



Utilisation comme injecteur pour un synchrotron

Racetrack Microtron

- Utilisation d'un Linac comme cavité accélératrice



Principe du Racetrack Microtron



Parameter	Value
Maximum energy	100 MeV
Number of turns	19
Energy gain/turn	5.3 MeV
Pulse current	10 mA
RF frequency	2.9986 GHz
Pulse width	1 microsecond
Max repetition frequency	10 Hz
Energy Spread	0.1 MeV
Emittance	0.1 mm mrad
Dipole field	1.13 T

Injecteur Racetrack d'ASTRID – Univ. D'Aarhus Danemark



MAMI C 1.5 GeV - Univ. De Mainz

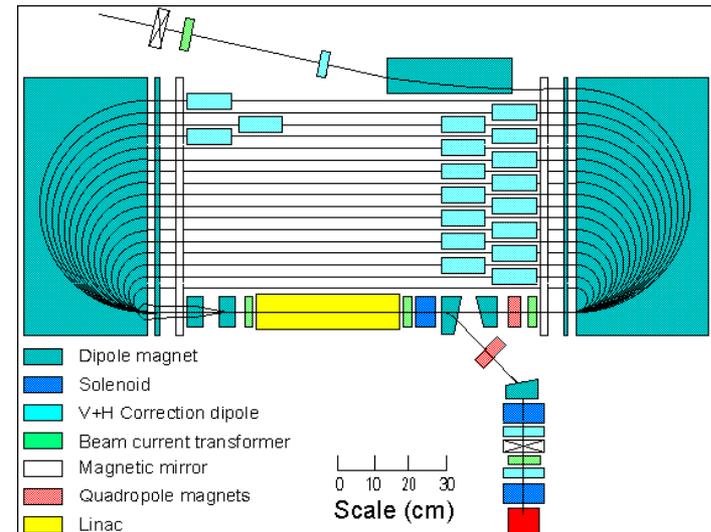


Schéma de l'injecteur d'Astrid

Le synchrotron

- Intérêt: limiter les dimensions des pôles magnétiques (la masse du dipôle).
- Utiliser une chambre torique en imposant une trajectoire de rayon constant.
- Idée proposée par Markus Oliphant en 1943 et réalisée en 1953 pour les protons a l'université de Birmingham (1.0 GeV)

*"Particles should be constrained to **move in a circle of constant radius** thus enabling the use of an **annular ring of magnetic field** ... which would be varied in such a way that the **radius of curvature remains constant as the particles gain energy** through successive accelerations by an alternating electric field applied between coaxial hollow electrodes."*

- Il faut donc adapter a tout moment le champ magnétique et la fréquence RF a l'énergie des particules.

$$B(t) = \frac{\gamma(t) m_0 v(t)}{R} \quad \omega_{RF} = n \frac{v(t)}{R} \quad n : \text{nombre harmonique}$$

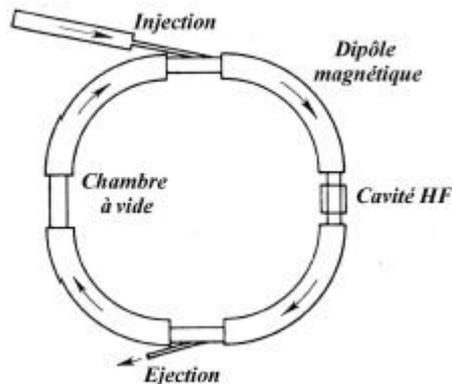
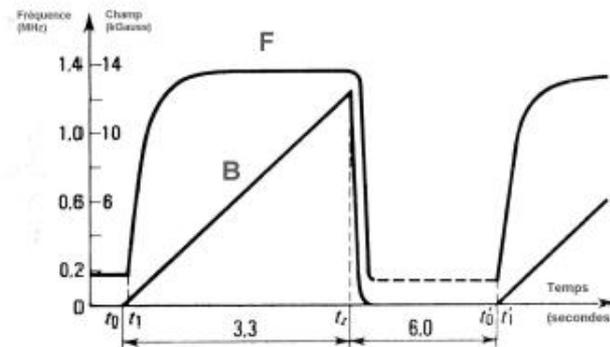


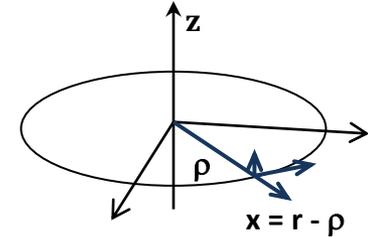
Schéma d'un synchrotron



Cyclage de la fréquence RF et du champ magnétique

La focalisation faible

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



Soit l'orbite d'équilibre : $\rho = \frac{m v}{q B_0}$

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 : $n = -\frac{\frac{\partial B_z}{B_0}}{\frac{\partial r}{\rho}} = -\frac{\rho}{B_0} \left(\frac{\partial B_z}{\partial r}\right)_{r=\rho}$ soit $B_z(r) = B_z(\rho) \cdot \left(\frac{\rho}{r}\right)^n$

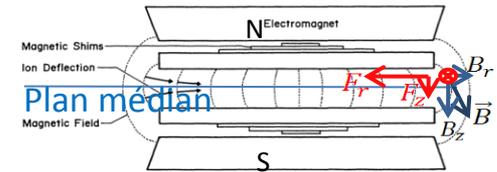
Nous avons alors : $\frac{m v^2}{r} \approx \frac{m v^2}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{x}{\rho}\right)$ et $e v B_z(r) \approx e v B_0 \cdot \left(1 - n \frac{x}{\rho}\right)$

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

Inconvénient de la focalisation faible

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

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



- Les équations du mouvement bétatron horizontal et vertical sont alors :

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

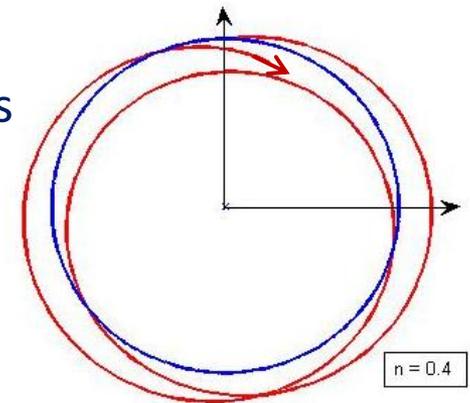
dont les solutions ont des périodes plus grandes que la période de rotation.

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

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

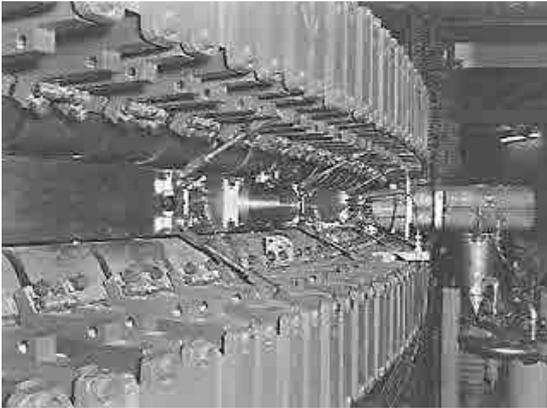
	Birmingham	Saclay Saturne I	Brookhaven Cosmotron	Berkeley Bevatron	Dubna Synchrophasotron
Energie (GeV)	1	2,94	3	6,4	10
Rayon Moyen (m)	4,5	11	10,7	18,2	30,5
Section chambre (cm ²)	50 x 21	60 x 10	91 x 22	122 x 30	150 x 40
Date démarrage	1953	1958	1952	1954	1957

Les premiers cyclotrons (Eric Baron GANIL)

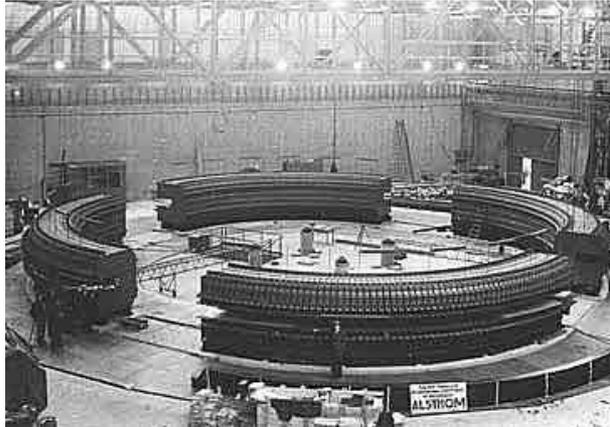


Oscillations bétatron dans le plan horizontal pour $n=0.4$

Des réalisations imposantes



1952: Cosmotron a
Brookhaven 3 GeV



1958: Saturne 1 a Saclay 3 GeV



1962: ZGS a Argonne 10 GeV p+



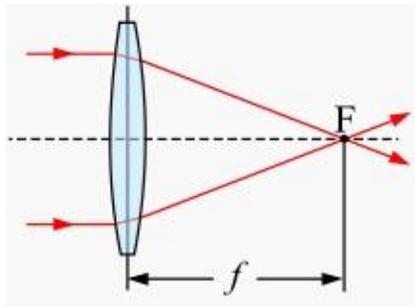
1957: Synchrotron a Dubna - 12.5 GeV



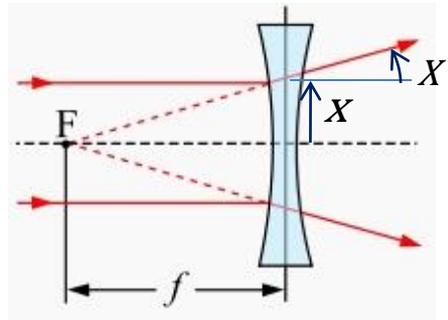
Démantelé en 2002

La focalisation forte

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

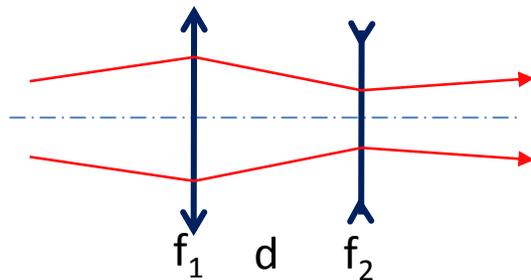


$f > 0$ focalisant



$f < 0$ defocalisant

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



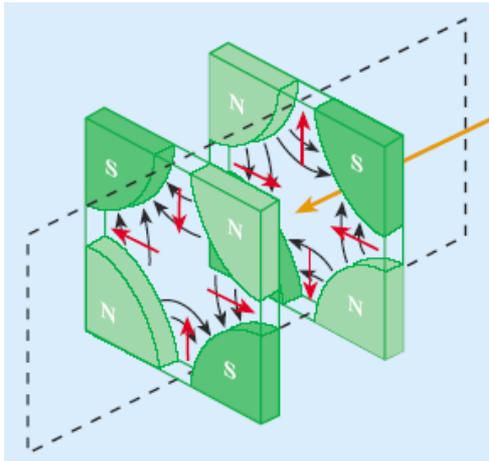
$$\begin{pmatrix} a & b \\ -\frac{1}{F} & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1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

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

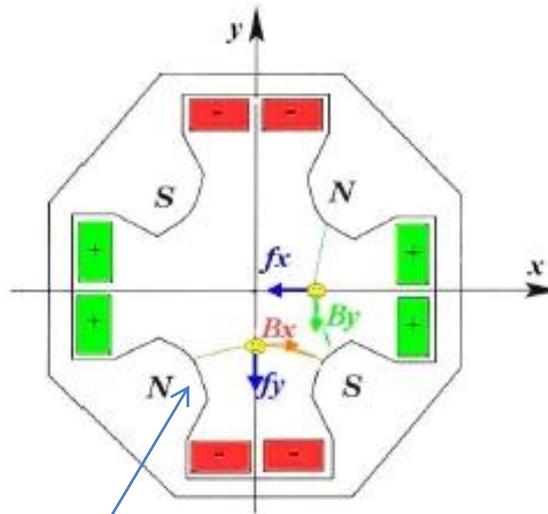
Si $f_1 = -f_2 = f$ alors : $F = \frac{f^2}{d} > 0$ donc focalisant

Les quadrapoles

- La « **lentille** » de la dynamique faisceau.
- Les particules qui ne voyagent pas sur 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 quadrapole



Pôles de forme hyperbolique: $x \cdot y = cste$

$$B_x = -g y, B_y = -g x \quad g = \frac{2 \mu_0 n I}{R^2} : \text{gradient du quad}$$

$$\vec{B} = -\nabla V \text{ avec } V = g x y : \text{potentiel}$$



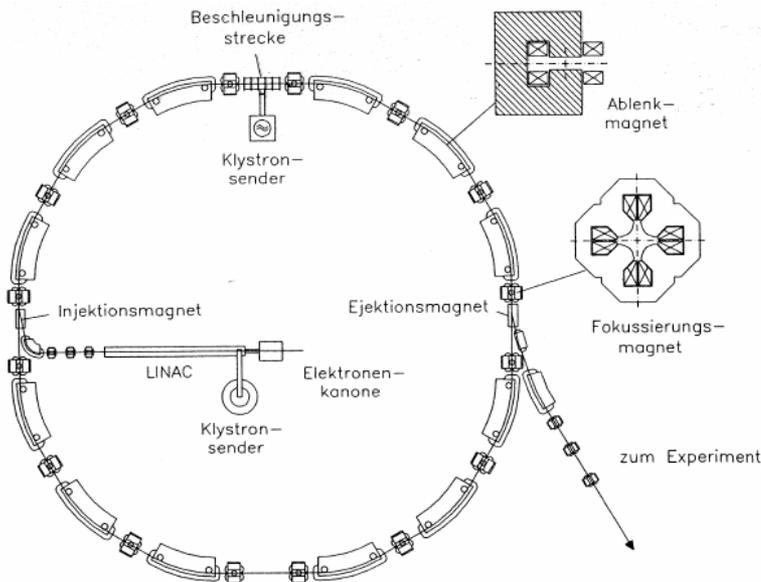
Doublet de quadrapoles magnétiques



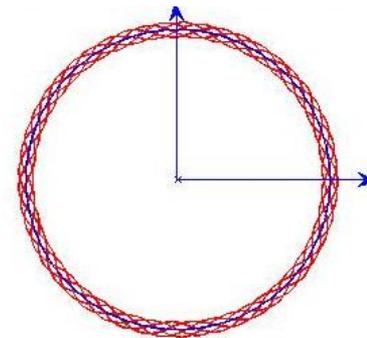
quadrapole électrostatique

Le synchrotron a focalisation forte

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



Un synchrotron générique



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

Le PS premier synchrotron a gradient alterné

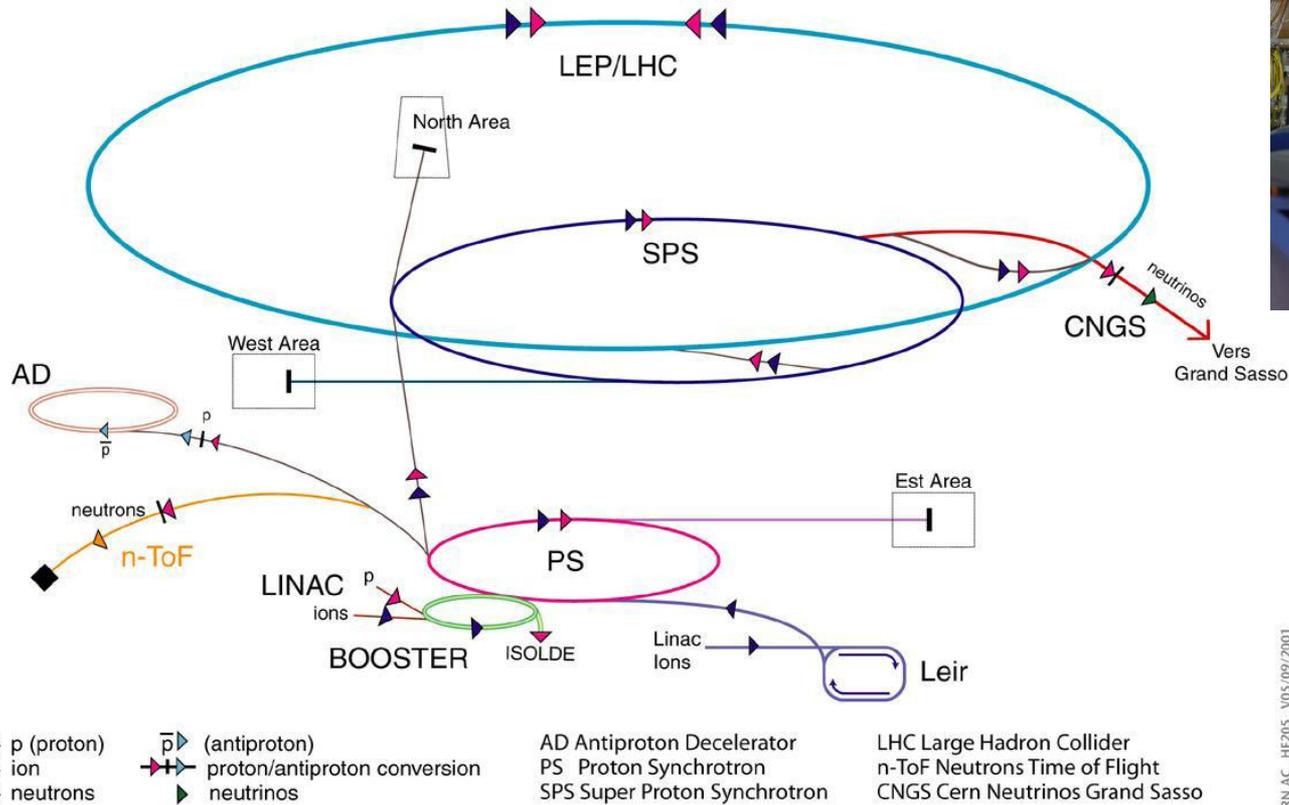
- La fréquence varie de 100 kHz a 5 MHz
- Pendant des mois la machine ne passait pas l' énergie de transition (stabilité longitudinale).
- Schnell réalisa un montage de fortune pour faire un saut de phase a l'énergie de transition et immédiatement le PS atteint son énergie nominale.



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 CERN



L'anneau du LHC – 27 km

Interconnexion des accélérateurs du CERN

Les 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."

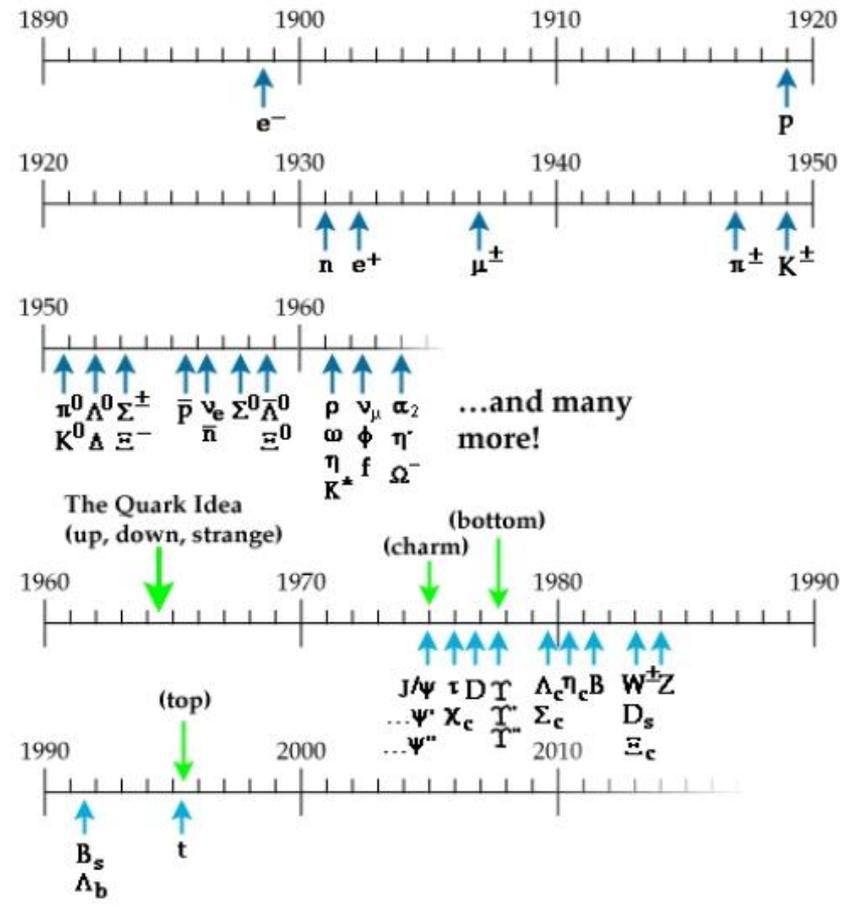
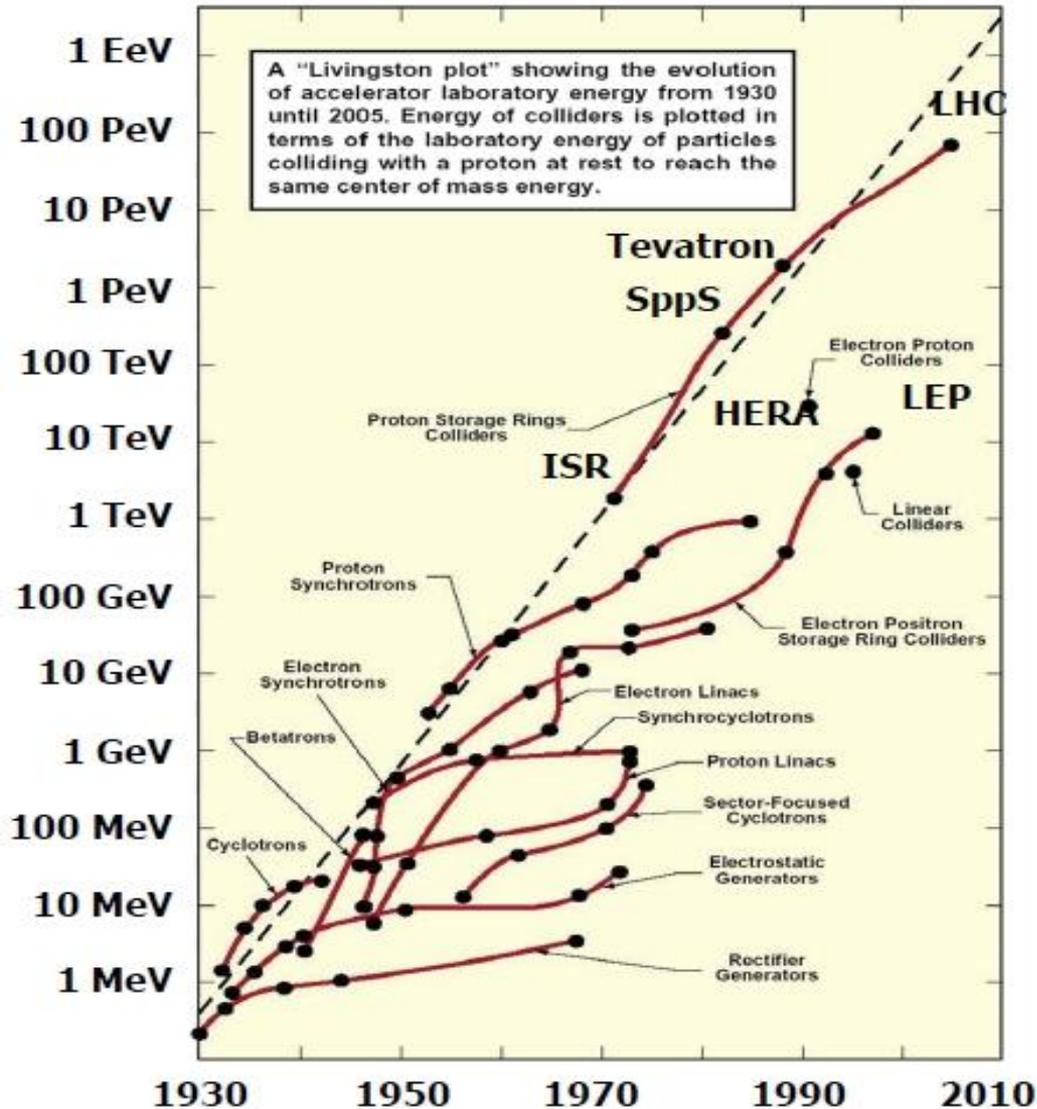
$$E_{cm}^f = \sqrt{2 m E}$$

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

HS 2007

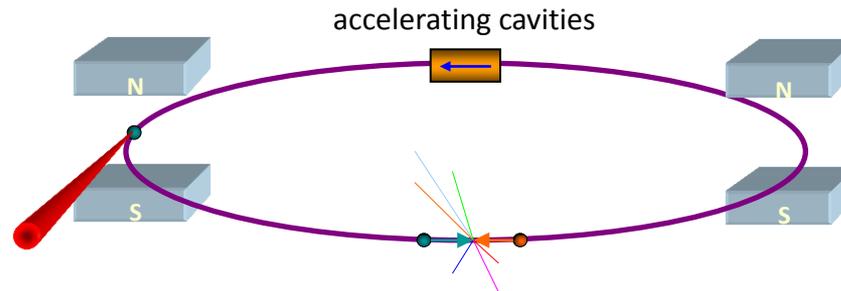
Mais, avantage, fort taux de collision

Progression de l'énergie dans le c.m.



Les découvertes associées

Les collisionneur circulaires



Collisionneurs circulaires

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

MAIS:

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

Le rayonnement synchrotron

- Dés que des charges ne suivent pas un mouvement rectiligne uniforme, ils perdent de l' énergie cinétique au profit d'un rayonnement électromagnétique (équations de Maxwell)
 - Seul exception : les e- autour du noyau pour des niveaux quantifiés (mécanique quantique)
- N'a pas que des désavantages
 - Machines à rayonnement synchrotron (SOLEIL), Laser a électrons libres (XFEL)
 - Permet de réduire très fortement l' émittance des faisceaux des électrons
- Sans le rayonnement synchrotron, les synchrotrons seraient indétrônables même pour accélérer des électrons a très haute énergie
 - Maintenant il faut passer au LINAC, a l' accélération plasma...

$$P_{\text{rayn.par tour}} = k \frac{\gamma^4}{R}$$

Donc important surtout pour des e-

$$P_{\text{rayn.par tour}}^{\text{electron}} [keV] = 88.5 \frac{E^4 [GeV]}{R [m]}$$

