

Les accélérateurs de particules

Une courte introduction

Antoine CHANCÉ

XIII^{ème} rencontre d'été de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

XIII^e édition des Rencontres d'été de physique
de l'INFINIMENT GRAND à l'infiniment petit

29 juin-3 juillet 2026

- Orsay
- Palaiseau
- Paris
- Saclay

Promotion Claudine HERMANN

de l'INFINIMENT
GRAND
à l'INFINIMENT
petit

Rencontres

Niveau L3
ou équivalent

Plan

- 1. Applications des accélérateurs de particules**
- 2. Quelques notions sur les faisceaux**
- 3. Comment produire un faisceau**
- 4. Comment accélérer un faisceau**
- 5. Comment guider un faisceau**
- 6. La famille des accélérateurs**
 - Les accélérateurs électrostatiques
 - Les accélérateurs linéaires
 - Cyclotrons
 - Les synchrotrons
- 7. Grands projets accélérateurs**
- 8. Pour nous rejoindre**



1. Applications des accélérateurs de particules

Un outil très puissant pour la société

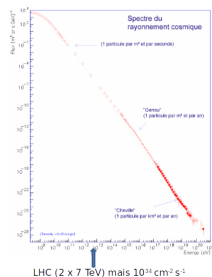
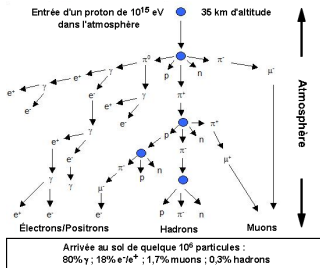
Les accélérateurs : une réponse à de grands besoins

1927 E. Rutherford to 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. ...

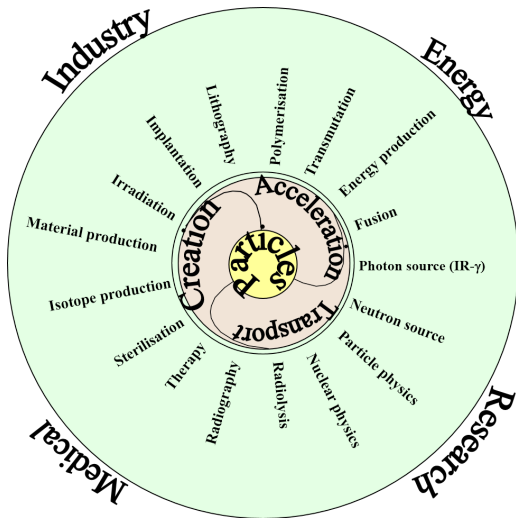
Jusque là, les physiciens disposaient :

- de particules α (<10 MeV),
- de particules β par la radioactivité.
 - Basse énergie.
- d'astroparticules.
 - Faible flux + cascade.



Besoin d'un **flux intense** de particules **énergétiques**.

Les applications des accélérateurs



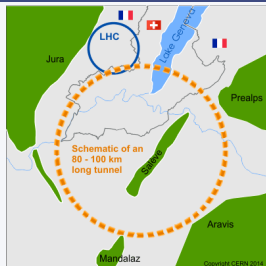
La physique des particules

- Étude du modèle de physique des particules (standard, Higgs ...).
- Recherche de nouvelle physique.

⇒ Besoins :

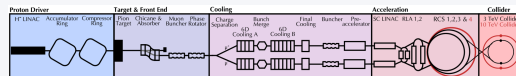
- Très haute énergie (ex : FCC-hh : jusque 50 TeV par faisceau)
- Très haute luminosité (ex : FCC-ee jusque $10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La luminosité multipliée par la section efficace donne le nombre d'événements par seconde.

Future Circular Collider



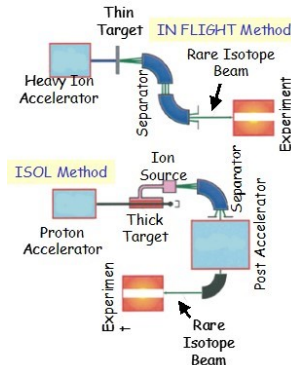
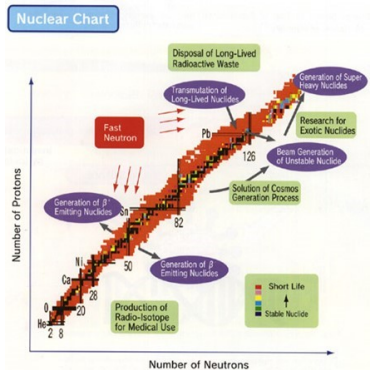
Collisionneurs à muons

Besoin de plusieurs années de R&D en particulier pour collecter, refroidir et accélérer les muons.



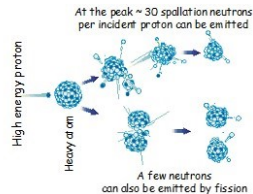
Physique nucléaire

- Validation/exploration des modèles de physique nucléaire (interactions résonantes).
- ⇒ Neutrons de quelques MeV, produits avec des protons.
- Étude de noyaux exotiques.
 - Utilisation d'électrons, protons, deutons, ions lourds.

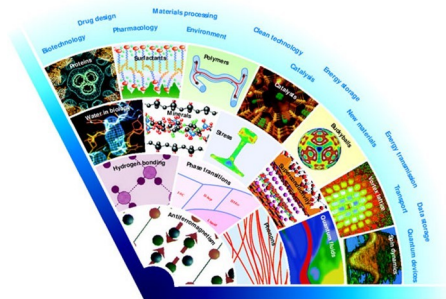


Physique de la matière

- Haut flux de neutrons.
- Protons (≈ 1 GeV) sur des atomes lourds : spallation.
- ISIS, LANSCE, SINQ, SNS, ESS.

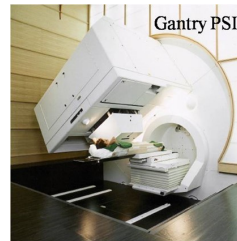
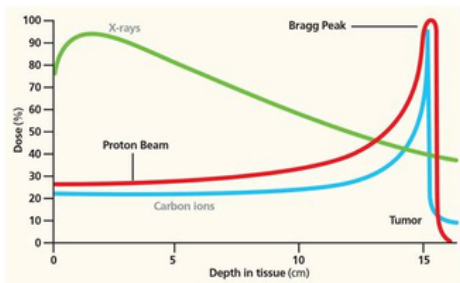


- Haut flux de photons (rayons X).
- Électrons (2 GeV à 6 GeV) : rayonnement synchrotron.
- ESRF, ALS, ELETTRA, SOLEIL



Thérapie

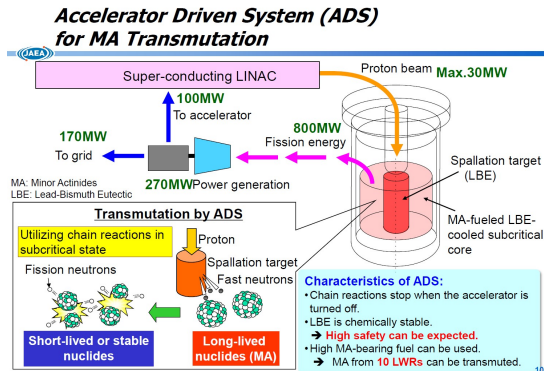
- Destruction de tumeurs avec un "bombardement" d'un haut flux de particules.
- Gamma, électrons, protons, ions, neutrons.
- Des milliers de patients par an.



Centre de Protonthérapie, Orsay



Transmutation de déchets nucléaires à longue durée de vie

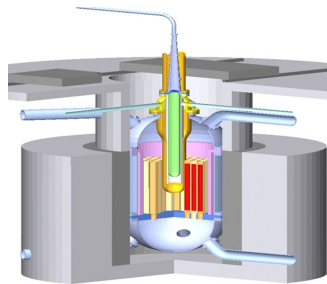
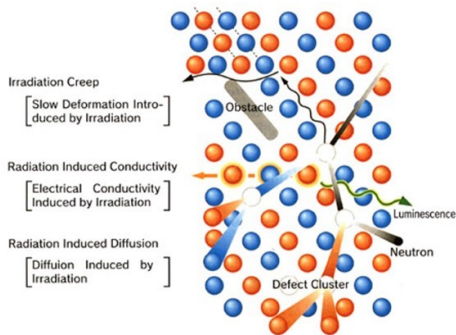


Acceptation publique de l'énergie nucléaire demande des solutions pour les déchets nucléaires

- **MA** : Actinides Mineurs sont des éléments radioactifs à durée de vie très longue $>10^6$ ans.
- **Cœur sous-critique** : Assemblage de combustible MA dans lequel la **transmutation** se produit par des réactions de fission provoquées par des neutrons de spallation provenant de la cible. La réaction s'arrête immédiatement lorsque l'accélérateur est désactivé.

Irradiation

- L'irradiation des matériaux entraîne d'importantes perturbations dans l'organisation atomique (défauts, amas, ...).
- Pendant et après irradiation, les propriétés mécaniques, électriques et optiques changent.
- Cette recherche est primordiales pour promouvoir de **nouveaux matériaux** pour des centrales de fusion, et autres systèmes nucléaires.



SPALLAX (CEA - DRN)
Technical Irradiation Tool
Based on spallation neutrons

Production de Radio-isotope

■ Principe :

- Des radio-isotopes sont produits par irradiation et injectés dans le "système".
- L'étude du rayonnement informe sur leur position dans le "système".
- Le rayonnement peut aussi interagir avec le système.

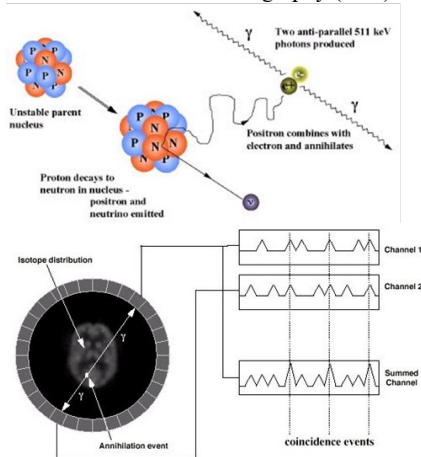
■ Applications possibles :

- Diagnostics de l'écoulement des fluides.
- Diagnostics médicaux.
- Réactions chimiques et biologiques.
- Thérapie.

■ Besoin :

- Protons/deutons 8 MeV/u
- Ions lourds 80 MeV/u

Positron Emission Tomography (PET)



Stérilisation

- Domaine d'utilisation :
 - Destruction des bactéries.
 - Matériel médical.
 - Nourriture (épices, pommes de terre).
 - Fleurs.
- Rayons X, électrons, Cobalt60
- Avantages :
 - Rapide.
 - Les objets peuvent être traités emballés à la sortie de l'usine.



Accélérateur d'électrons (10 MeV)
d'IBA



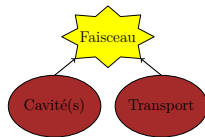
2. Quelques notions sur les faisceaux

Une très courte introduction à la dynamique du faisceau

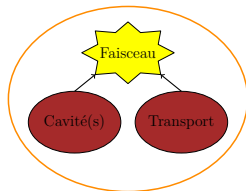
Les principales composantes d'un accélérateur



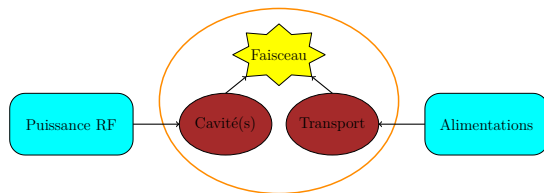
Les principales composantes d'un accélérateur



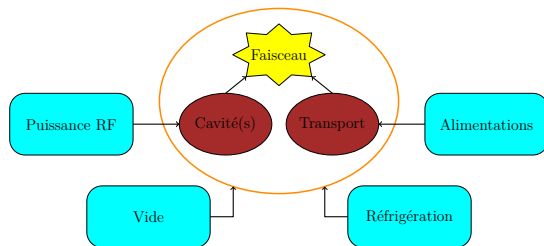
Les principales composantes d'un accélérateur



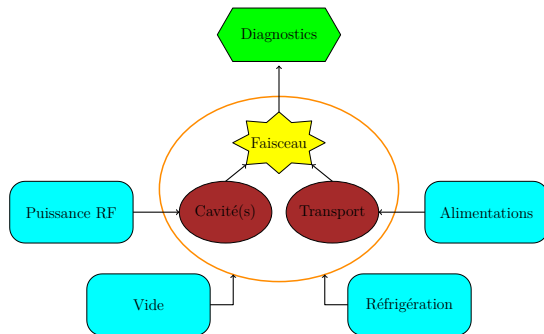
Les principales composantes d'un accélérateur



Les principales composantes d'un accélérateur

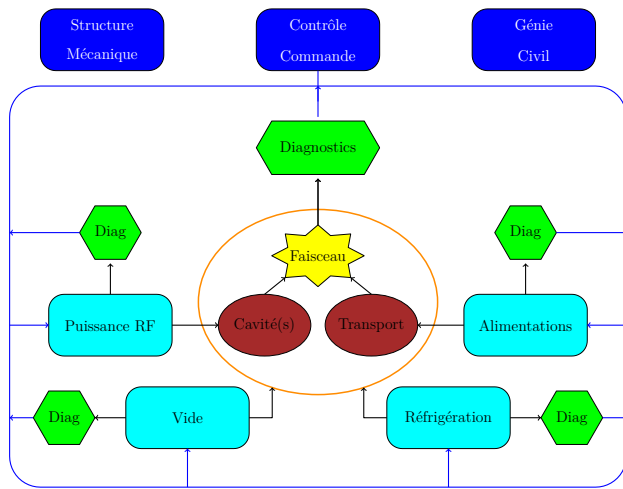


Les principales composantes d'un accélérateur

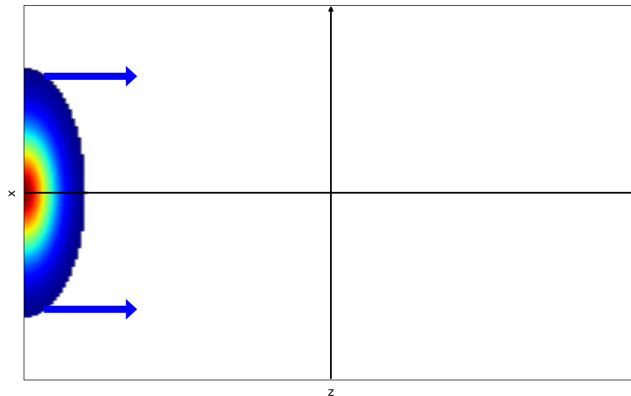




Les principales composantes d'un accélérateur

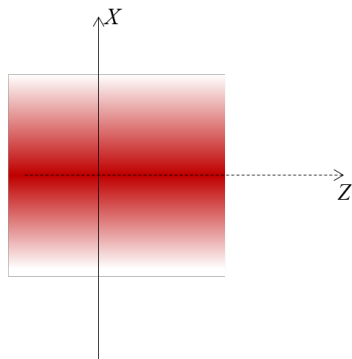
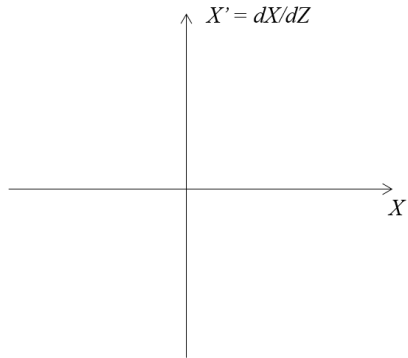


Un faisceau dans une section sans champ extérieur

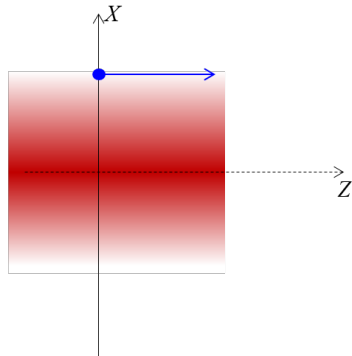
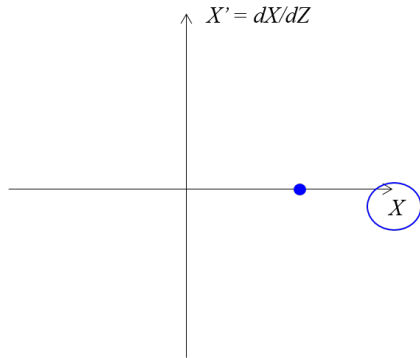


Q : Pensez-vous que c'est le comportement attendu ?

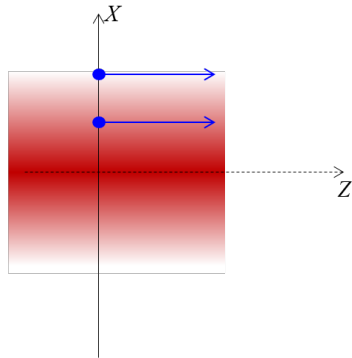
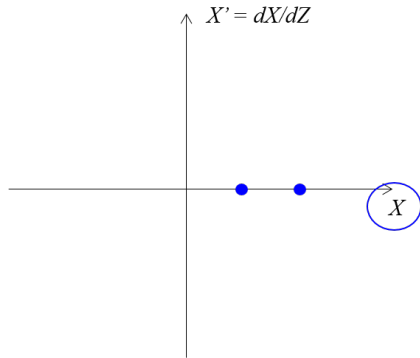
L'espace de phase (x, x')



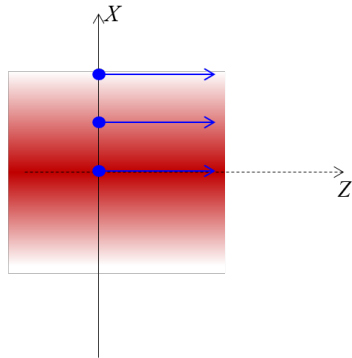
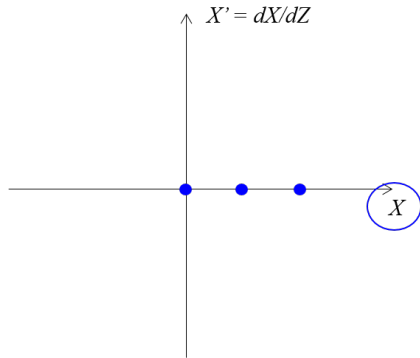
L'espace de phase (x, x')



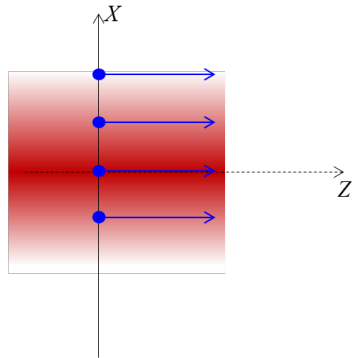
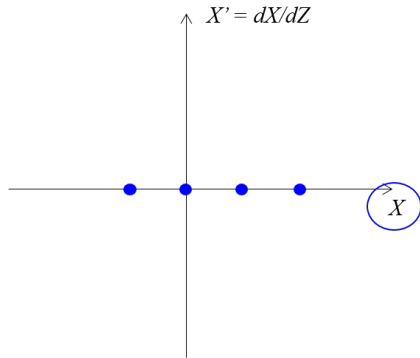
L'espace de phase (x, x')



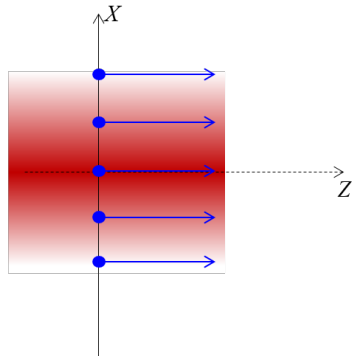
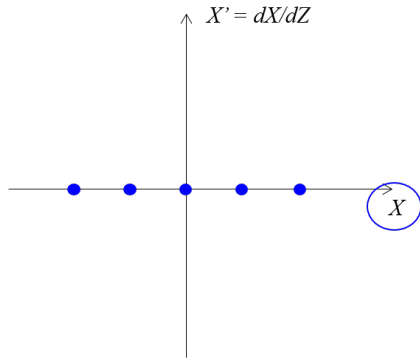
L'espace de phase (x, x')



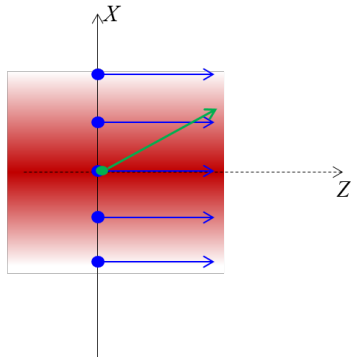
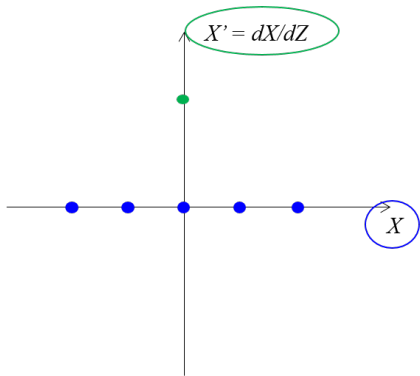
L'espace de phase (x, x')



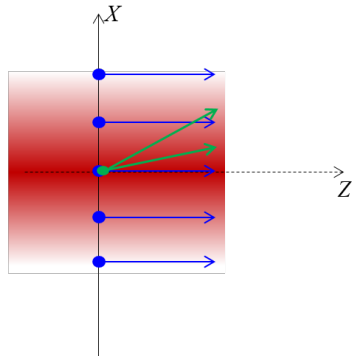
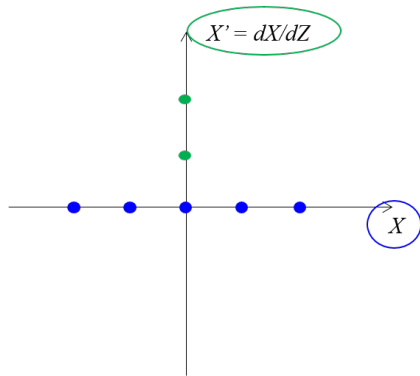
L'espace de phase (x, x')



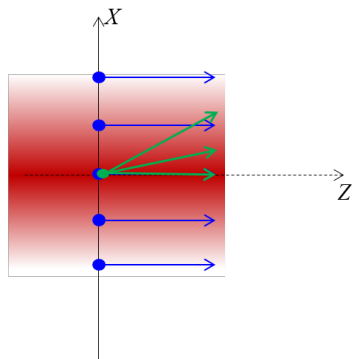
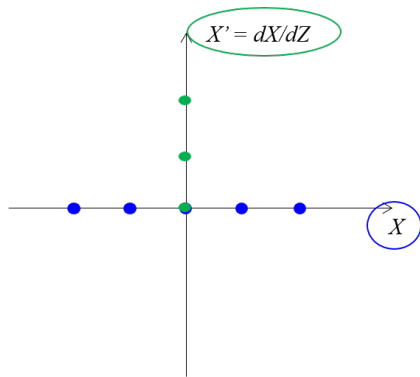
L'espace de phase (x, x')



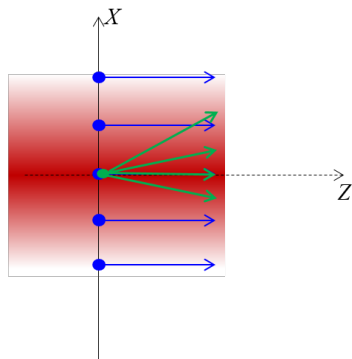
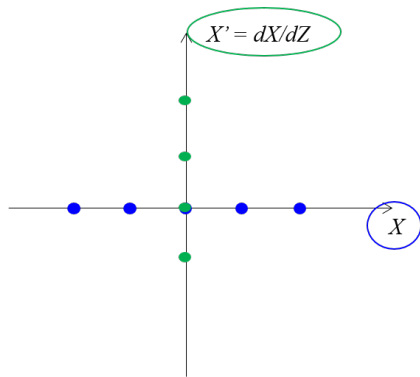
L'espace de phase (x, x')



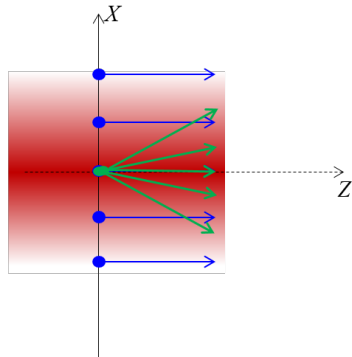
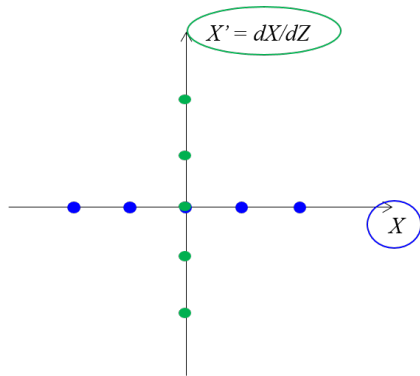
L'espace de phase (x, x')



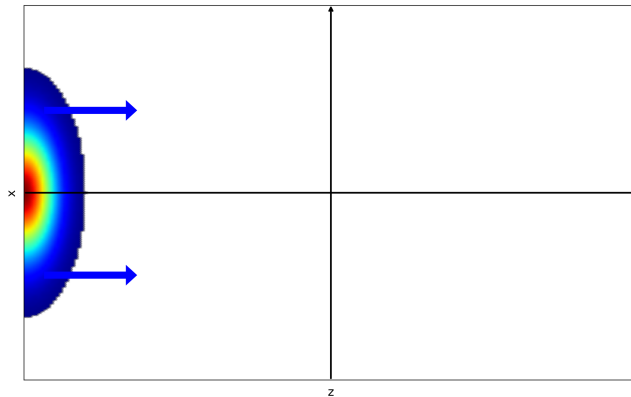
L'espace de phase (x, x')



L'espace de phase (x, x')

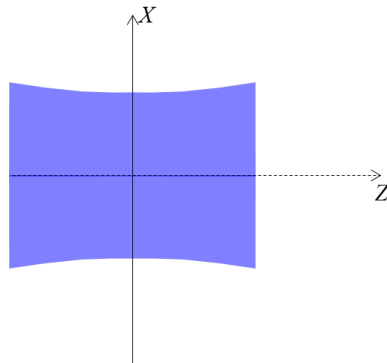
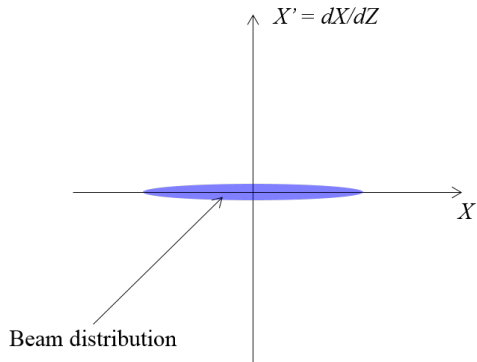


Un faisceau dans une section sans champ extérieur (2)

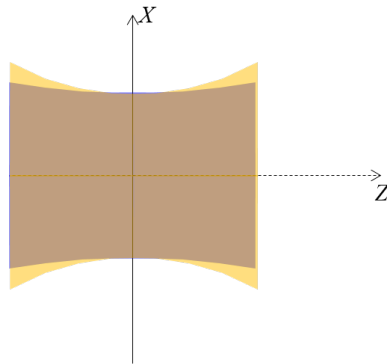
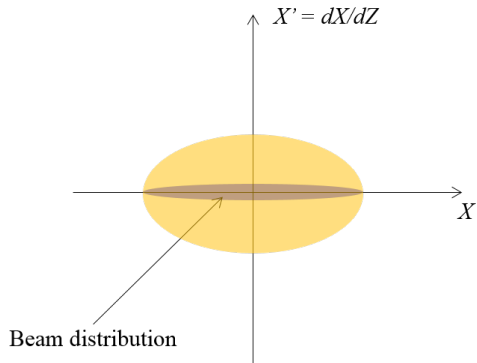


La taille du faisceau varie avec la position.

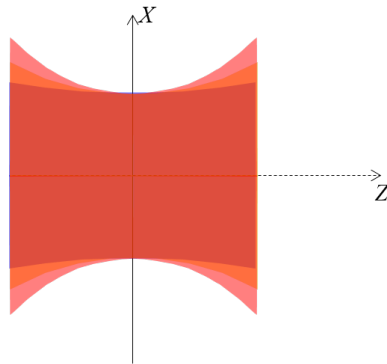
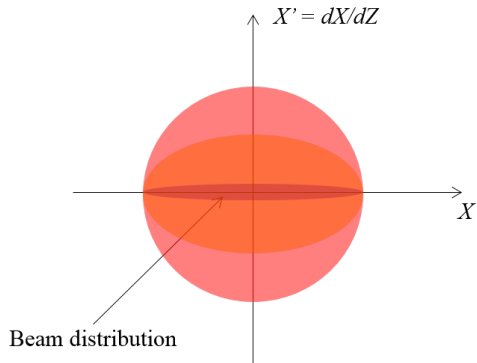
Une divergence naturelle



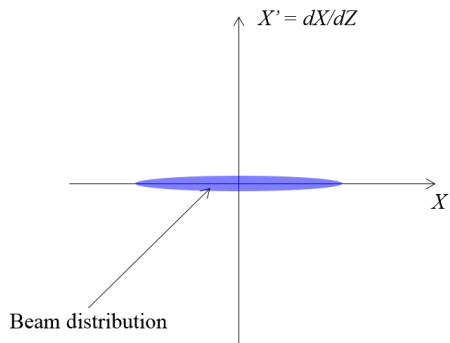
Une divergence naturelle



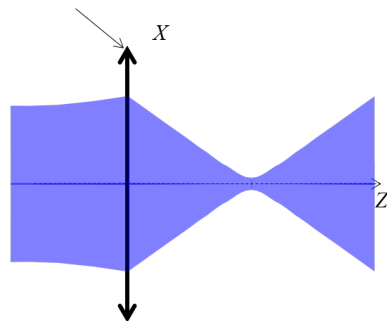
Une divergence naturelle



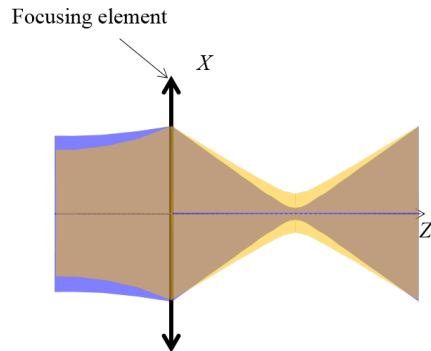
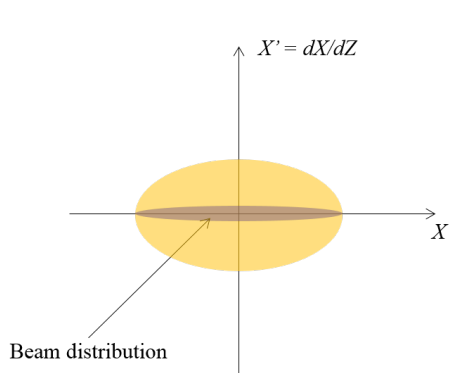
Limite de focalisation



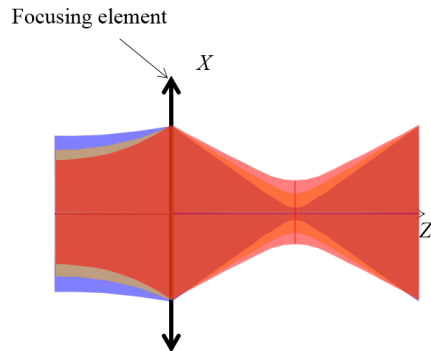
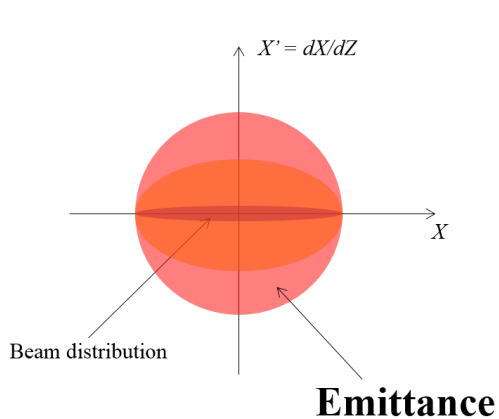
Focusing element



Limite de focalisation

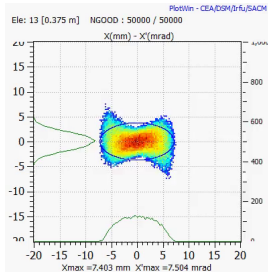
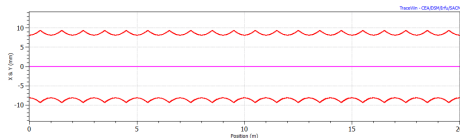


Limite de focalisation

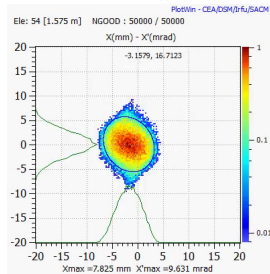
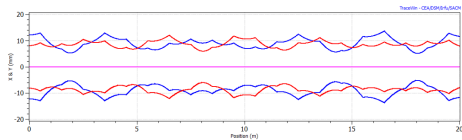


Adaptation ?

- Enveloppe du faisceau aussi régulière que possible (différence entre la plus petite et plus grande taille).



Désadaptation ?





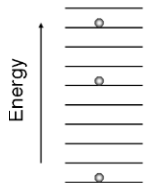
3. Comment produire un faisceau

Sources d'électrons et sources d'ions

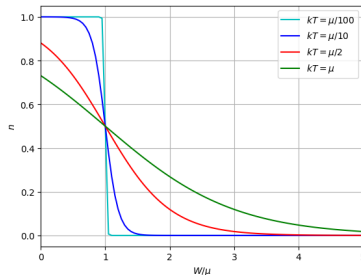
Sources d'électrons

Les électrons sont attachés à la matière :

- Aux atomes, avec une énergie de liaison quantifiée E_i ,
- A une "structure" comme des électrons libres en suivant une distribution de Fermi-Dirac.



$$n(E) \approx \frac{1}{\exp\left(\frac{E-\mu}{kT}\right) + 1}$$



- Les énergies de liaison des couches intérieures (E_0) ou potentiel chimique (μ) sont de quelques eV.
- W : fonction de travail $\approx$ quelques eV.
- Pour extraire les électrons de la matière, il faut apporter de l'énergie !

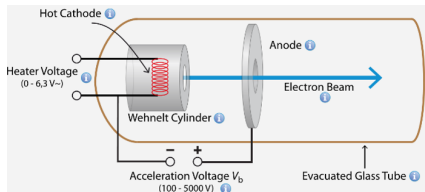
Canon thermo-ionique

$$W = 1 \text{ eV} \iff T = 11\,600 \text{ K} \quad (kT \approx W)$$

$$J = A_G T^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

Loi de Richardson

- Une cathode est chauffée permettant à des électrons de dépasser l'énergie potentielle chimique et de s'échapper du matériau.
- Un champ électrique accélère les particules vers une anode (plus haut potentiel).



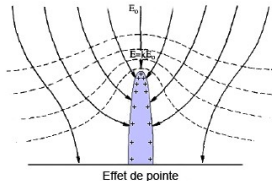
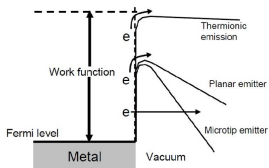
Canon à émission de champ

$$W = 1 \text{ eV} \iff E = 6831 \text{ MV/m}$$

$$J = K_1 \frac{E^2}{W} \exp \left(-K_2 \frac{W^{3/2}}{E} \right)$$

Loi de Fowler-Nordheim

- Le champ électrique réduit la barrière de potentiel pour extraire les électrons.
- Sur une surface, le champ électrique peut être localement renforcé par des pointes (effet de pointe).

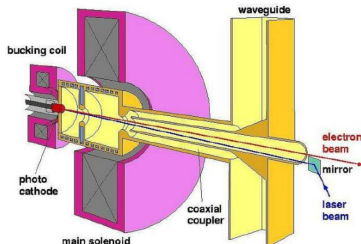


Canon à électrons avec laser (photoinjecteur)

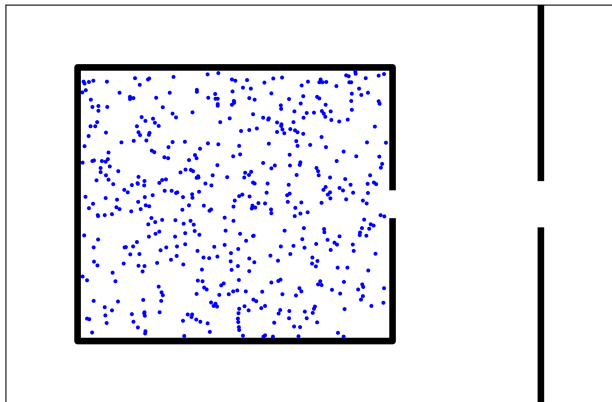
$$W = 1 \text{ eV} \iff \lambda = 1.24 \mu\text{m} \ (\lambda \approx W)$$

- Un laser illumine une cathode.
- Les photons apportent aux électrons assez d'énergie pour s'extraire de la cathode.
- Un champ électrique accélère les particule vers une anode (plus haut potentiel que la cathode).

[Serafini, Joint Accelerator School, 2002]



Principe de sources d'ions



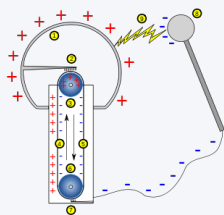


4. Comment accélérer un faisceau

Utilisation d'un champ électrique

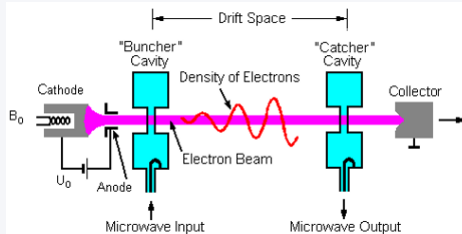
Produire un champ électrique

Champ électrostatique



Énergie maximale limitée à quelques MV.

Champ électrique oscillant : le klystron



Peut être ajouté autant que possible.

L'accélération résonante radio-fréquence

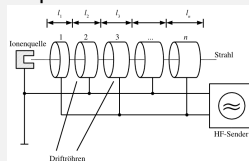
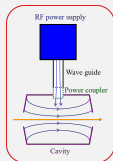
Motivation

Ajouter un grand nombre d'accéléérations successives avec des cavités résonnantes au lieu d'augmenter la différence de tension.

- Proposé par Gustaf Ising en 1924.
- Réalisé par Widerøe en 1928.
- Presque tous les accélérateurs d'aujourd'hui.

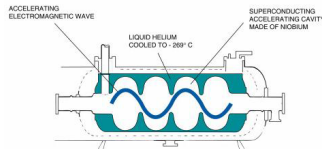
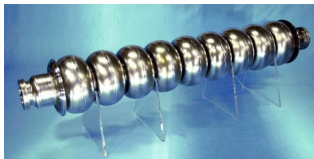
La cavité résonante radio-fréquence (RF)

Confiner une onde RF stable dans une cavité et y faire passer le faisceau.



Les cavités supraconductrices

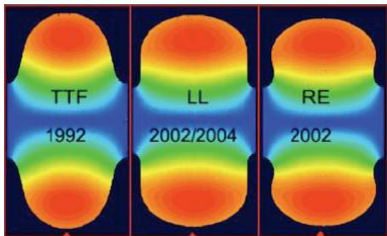
- 😊 Très faibles pertes grâce à la résistance de surface (très haut facteur de qualité $Q_0 > 10^9$).
 - Onde stationnaire avec un besoin réduit en puissance crête.
- 😊 Bonne efficacité.
- 😊 Fréquence d'opération standard (1.3 GHz).
- 😊 Large taille d'iris.
 - Tolérance d'usinage relâchée.
 - Faible champ de sillage.
- 😊 Impulsions longues possibles.
 - Correction dynamique possible pendant l'impulsion.



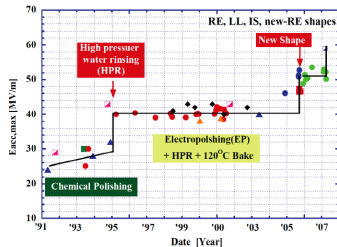
Les cavités supraconductrices (2)

- ☹ Le champ E_{acc} est limité par le champ magnétique surfacique B_{crit} . Sinon la cavité quitte l'état supra-conducteur.
 - ⇒ Optimisation de la forme.
 - ⇒ État de surface aussi lisse que possible.
 - ⇒ Couches minces/nouveaux matériaux.
- Maximum : ≈ 60 MV/m pour une simple cavité.
- Maximum : ≈ 35 MV/m pour une structure multi-cavités.

Optimisation de la forme

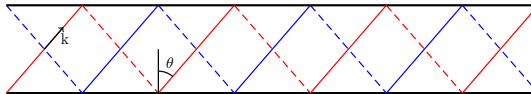


État de surface



Cavités à onde progressive

- Pour des faisceaux ultra-relativistes ($\beta \approx 1$).
- Dans des guides d'onde, la vitesse de phase v_ϕ est plus grande que c , et donc que la vitesse du faisceau.

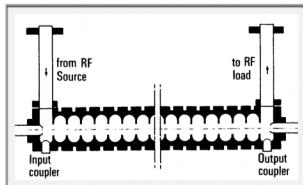


$$v_g = c \sin \theta < c$$

$$v_\phi = \frac{\omega}{k_{\parallel}} = \frac{c}{\sin \theta} > c$$

- ⇒ On couple l'onde avec des structures résonnantes.
- ⇒ $v_{\text{beam}} = v_\phi$.

- Les particules voient une phase accélératrice en traversant toute la structure.



1947 : structure 3 GHz

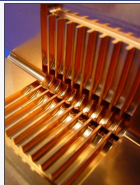


Vers de grands gradients avec des structures résistives

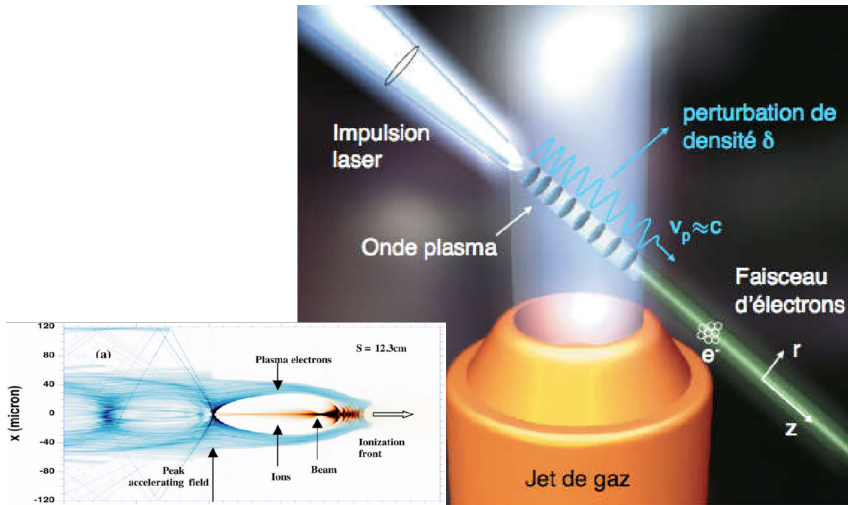
- ☹ E_{acc} limité par les décharges $>100 \text{ MV/m}$.
- ☹ Nécessaire d'utiliser de hautes fréquences $>10 \text{ GHz}$ et de très courtes impulsions $<1 \mu\text{s}$ pour obtenir de hauts gradients. $\Rightarrow$ Cavités à onde progressive ($t_{\text{filling}} = \int \frac{dz}{v_g}$).
- ☹ Large pertes par effet Joule à cause de la résistance de surface.
 - $\Rightarrow$ Très large puissance RF.
 - $\Rightarrow$ Tailles transverses réduites.
 - $\Rightarrow$ Usinage plus difficile et forts champs de sillage.
 - $\Rightarrow$ Nécessaire d'amortir les modes à haute fréquence.

Structure CLIC

- $E_{\text{acc}} \approx 100 \text{ MV/m}$
- $f = 11.424 \text{ GHz}$
- Longueur : 29 cm
- Impulsion de 230 ns
- $P_{\text{crête}} = 55.5 \text{ MW}$



L'accélération plasma : $>1 \text{ GV/m}$



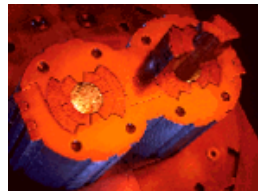
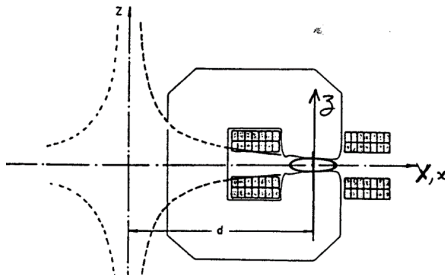


5. Comment guider un faisceau

Utilisation d'un champ magnétique (et champ électrique à très basse énergie)

Le dipôle magnétique

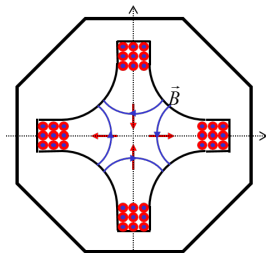
Les dipôles sont des aimants utilisés pour guider/dévier le faisceau



■ Limitations :

- Technologie ferromagnétique : 1 T à 2 T (saturation, refroidissement des bobines en cuivre).
- Technologie supra-conductrice : < 20 T (limitation par la transition d'état).

Le quadripôle magnétique



Les quadripôles sont utilisés pour focaliser le faisceau.

Quadrupole I (Ψ) = $I_0 \cos 2\Psi$

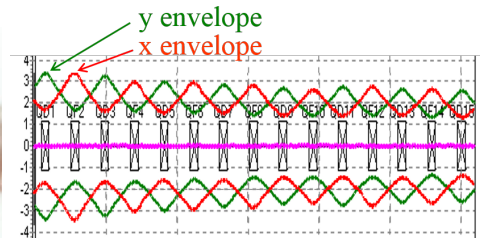
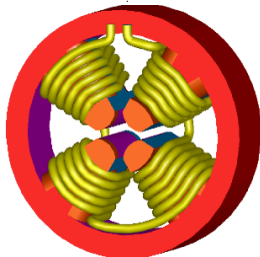


Champ magnétiques

$$\begin{cases} B_x = G \cdot y \\ B_y = G \cdot x \end{cases}$$

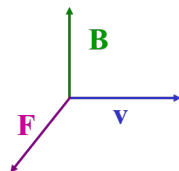
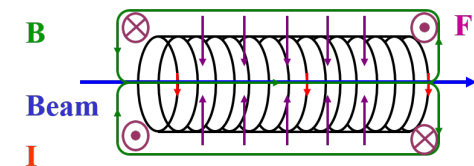
Force magnétique

$$\begin{cases} F_x = -q \cdot v \cdot G \cdot x \\ F_y = q \cdot v \cdot G \cdot y \end{cases}$$



Le solénoïde

Les solénoïdes peuvent être utilisés pour focaliser le faisceau à basse énergie.

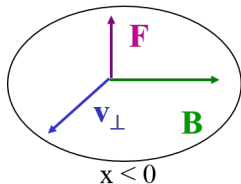


Entrée : $B = B_{\perp}$

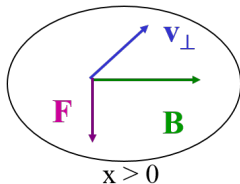
$$F \propto v \cdot B_{\perp}$$

Rotation transverse du faisceau

$$v_{\perp} \propto v \cdot B \cdot r$$



$x < 0$



$x > 0$

Milieu : $B = B_{\parallel}$

$$F \propto v_{\perp} \cdot B_{\parallel} \propto v \cdot B^2 \cdot r$$

⇒ Focalisation linéaire



6. La famille des accélérateurs

Les types de machine

Les types de machines

Machines linéaires : Le faisceau traverse seulement une fois chaque cavité.

Machines circulaires : Le faisceau passe beaucoup de fois dans les mêmes cavités.

Les types de machines

Machines linéaires : Le faisceau traverse seulement une fois chaque cavité.

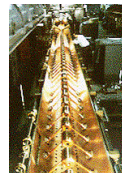
- Accélérateurs électrostatiques.
 - Accélération via une différence de tension.

Machines circulaires : Le faisceau passe beaucoup de fois dans les mêmes cavités.

Les types de machines

Machines linéaires : Le faisceau traverse seulement une fois chaque cavité.

- Accélérateurs électrostatiques.
 - Accélération via une différence de tension.
- Linac RF.
 - Accélération par des cavités RF.

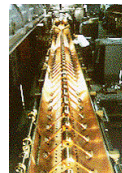


Machines circulaires : Le faisceau passe beaucoup de fois dans les mêmes cavités.

Les types de machines

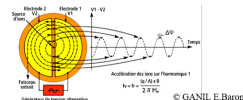
Machines linéaires : Le faisceau traverse seulement une fois chaque cavité.

- Accélérateurs électrostatiques.
 - Accélération via une différence de tension.
- Linac RF.
 - Accélération par des cavités RF.



Machines circulaires : Le faisceau passe beaucoup de fois dans les mêmes cavités.

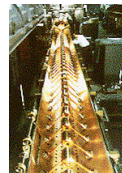
- Cyclotrons
 - Champ magnétique constant.
 - Rayon croissant de la trajectoire.



Les types de machines

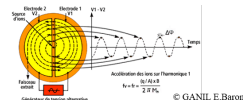
Machines linéaires : Le faisceau traverse seulement une fois chaque cavité.

- Accélérateurs électrostatiques.
 - Accélération via une différence de tension.
- Linac RF.
 - Accélération par des cavités RF.

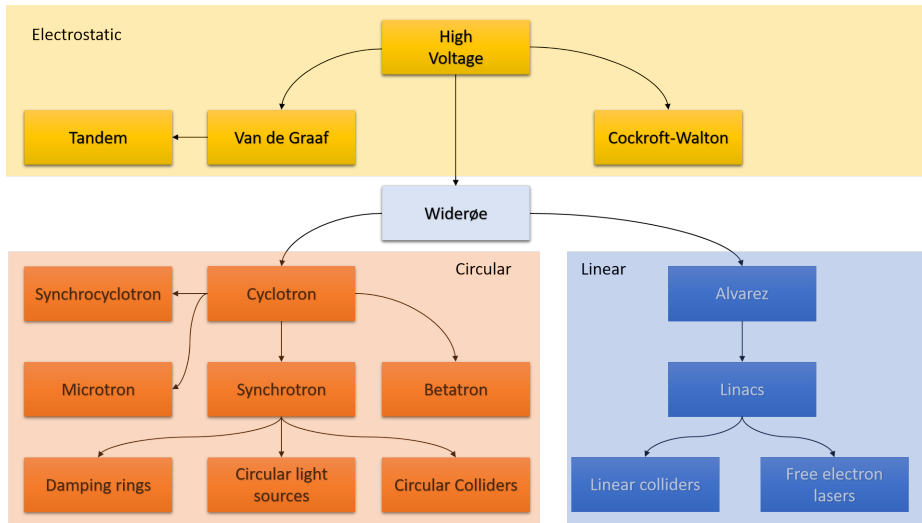


Machines circulaires : Le faisceau passe beaucoup de fois dans les mêmes cavités.

- Cyclotrons
 - Champ magnétique constant.
 - Rayon croissant de la trajectoire.
- Synchrotrons
 - Champ magnétique croissant.
 - Rayon de trajectoire constant.



Une très grande famille





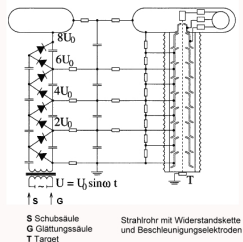
6. La famille des accélérateurs

Les accélérateurs électrostatiques

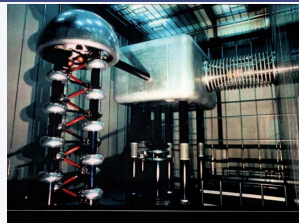
Le Cockroft-Walton

- 1930 : **Augmentation de la tension accélératrice** avec la cascade de Greinacher.
- 1932 : Cockroft et Walton : première décroissance de Li par des protons de 400 keV.
- Système toujours utilisé comme un **injecteur de hadrons** bien que souvent remplacé par un RFQ (Radiofrequency Quadrupole).

Principe



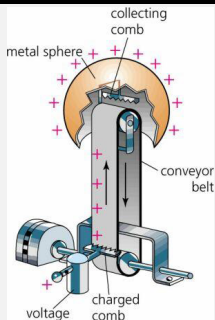
L'injecteur de 810 kV du cyclotron Mega-Watt (PSI-Suisse)



Le générateur électrostatique

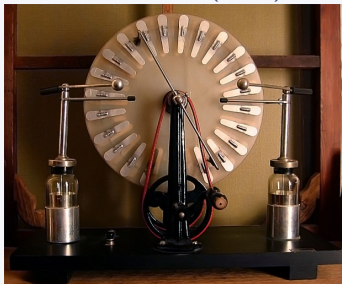
- 1929 : Robert Van de Graaf travaille à Princeton sur le principe d'une bande transportant des charges électriques.
- 1931 : 1.5 MV atteints avec 2 machines.

Principe

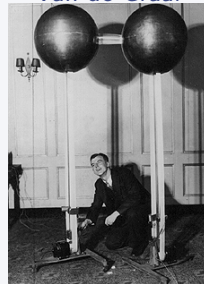


Exemples

Whimshurst (1880)



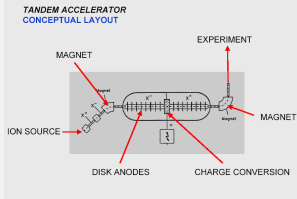
Van de Graaf



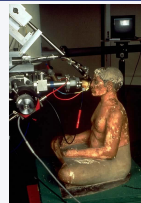
L'accélérateur tandem

- **Principe** : Accélérer des ions négatifs, les "éplucher" pour obtenir des ions positifs et les accélérer une seconde fois.
- Avantages et inconvénients :
 - 😊 2 accélérations successives.
 - 😊 La source d'ions et la cible sont à la masse.
 - 😞 Plus faible courant (ions négatifs).

Principe



AGLAE : le Tandem du Louvre



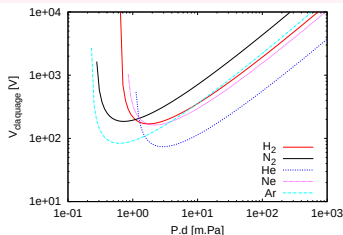
Limitations et avantages de l'accélération électrostatique

- 😊 Tous les ions.
- 😊 Très faible dispersion en énergie.

Pour éviter les claquages :

- Augmenter la taille du gap.
- Augmenter l'isolation avec des gaz à haute résistance électrique et pression.
- Opérer avec un très bon vide.

Limitation
Loi de Paschen :



Installation de plus en plus grosse

1933 : 1.2 MV



5 MV



Tandem Daresbury : 30 MV





6. La famille des accélérateurs

Les accélérateurs linéaires (linacs)

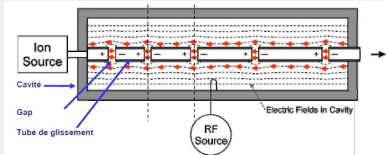
Les premiers linacs

- Widerøe (1928 durant son PhD ! K^+ à 50 keV) et Sloan (1931 Hg 1.26 MeV) : accélération résonnante.

Limitations à l'époque

- Pas de sources à haute fréquence (>10 MHz).
- Puissance électromagnétique perdue par rayonnement (antenne).
- 1947 : Luis Alvarez met les tubes de glissement (DTL) dans une cavité résonnante à 202.56 MHz (émetteur radio de l'armée US). Devient une fréquence standard pour les linacs.

Principe du DTL (Drift Tube Linac)



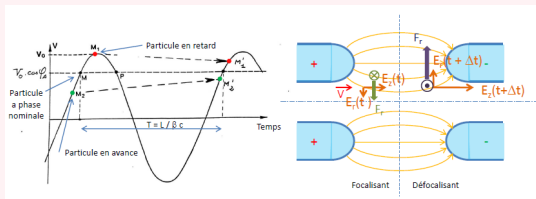
Linacs de Sloan et Alvarez



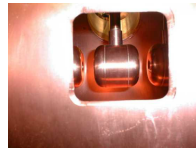
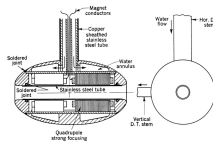
Problèmes de stabilité du DTL

Focalisation transverse et longitudinale incompatible

- Les particules devraient être sur la phase ascendante de la phase RF.
- Stabilité longitudinale → Défocalisation transverse.



⇒ Quadripôles dans chaque tube.

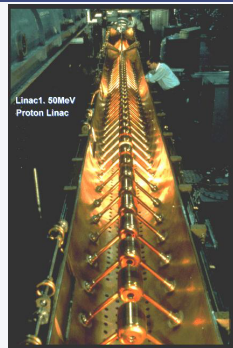


Le Drift Tube Linac (DTL)

- Facile d'injecter et extraire.
- Protons de 10 MeV à 100 MeV ($0.1 < \beta < 0.4$).
- Énergie fixée pour chaque ion.

Exemples de DTL

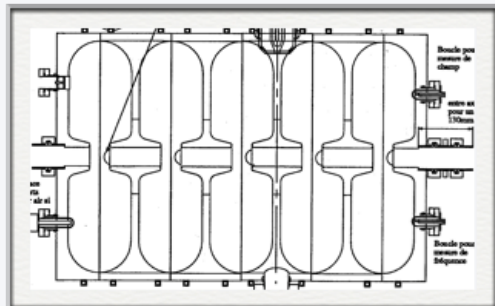
1957 : Lawrence Radiation Lab.



Le Linac à cavités couplées (CCL)

- Utilisé pour accélérer des faisceaux à haute vitesse ($\beta > 0.4$).
- Les cellules sont couplées par des fentes ou des cavités externes.
- Déphasage de π entre 2 cavités (inversion du signe du champ entre 2 cavités).
- Focalisation transverse réalisée par des quadripôles externes.

Exemples de CCL

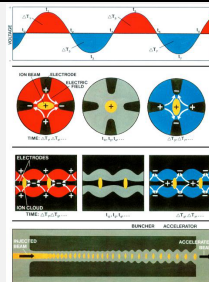
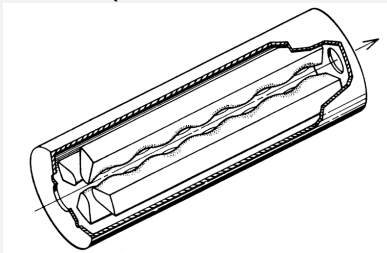


Le Radio-Frequency Quadrupole (RFQ)

- RFQ : concept inventé en 1970 par Kapchiski et Teplyakov.
- Focalise, groupe avec haute efficacité de capture et accélère un faisceau d'ion jusque quelques MeV ($\beta < 0.1$).
- Remplace le Cockroft-Walton comme injecteur d'ions.

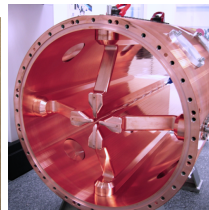
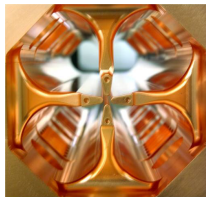
Principe

RFQ avec ses 4 vannes



Le RFQ : un usinage très délicat

- Tolérances d'usinage très strictes (centaines de micromètres).
- Refroidissement délicat en cas d'opération continue.
- Video : Usinage de Spiral2



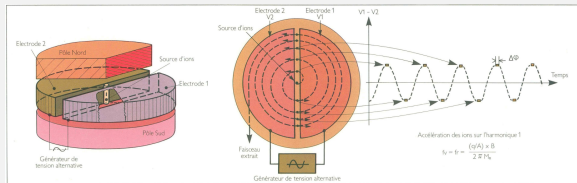


6. La famille des accélérateurs

Les cyclotrons

Le cyclotron

Principe du cyclotron



■ B uniforme.

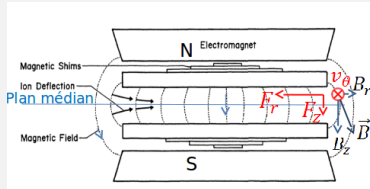
■ Rayon de courbure :

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

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

⇒ Isochrone à basse énergie.

Stabilité verticale



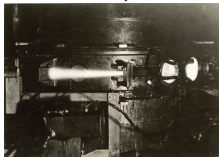
■ Stabilité assurée par les lignes de champ de B .

■ $\nabla \times \mathbf{B} = 0$

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

Des cyclotrons de plus en plus gros

1931 : 28 cm p^+ 1.2 MeV



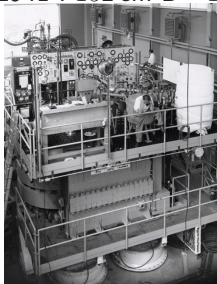
1932-1936 : 69 cm D^+ 4.8 MeV



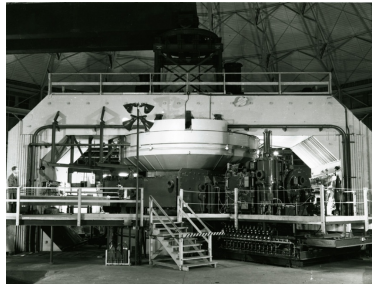
1937-1938 : 94 cm D^+ 8 MeV



1939-1941 : 152 cm D^+ 16 MeV



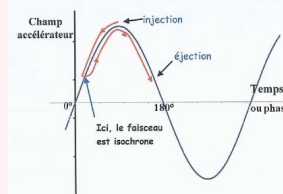
1942 : 467 cm ions lourds >100 MeV



Limitations du cyclotron

Problème du synchronisme

- Fréquence de révolution diminue avec γ . $\omega = \frac{v_\theta}{r} = \frac{qB_z}{\gamma m_0}$
- Déphasage entre les particules et la RF augmente continûment.
- p^+ jusque 20 MeV.



Quelques solutions

- Adapter la fréquence RF à l'énergie : **synchrocyclotron** (ions).
- Augmenter B avec le rayon : **cyclotron isochrone à secteurs** (ions).
- Adapter B et f en même temps : **synchrotron** (ions + e^-).
- Créer un champ électrique circulaire E : **betatron** (e^-).
- Sauter une période RF à chaque tour : **microtron** (e^-).
- Ne pas tourner ! : **Accélérateur Linéaire**.

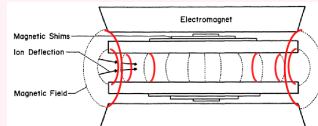
Cyclotron à secteurs

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

Stabilité verticales est perdue !

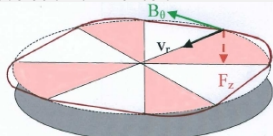
Lignes de champ orientées vers l'intérieur.

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



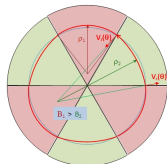
Solution : force additionnelle $qv_r \times B_\theta$

Modulation of B avec θ

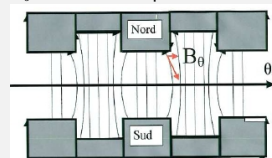


3) Hors du plan médian, une force verticale peut être assurée par une composante azimuthale de B (si l'orbite n'est pas circulaire)

Modulation of v_r avec θ



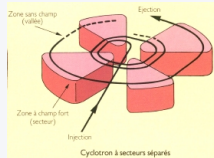
B_θ en dehors du plan médian



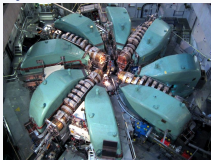
Monts et vallées

- Les faces du dipôle ne sont pas perpendiculaires à la trajectoire.
- 1938 : L. H. Thomas focalisation avec les coins.
- 1954 : Kerst (secteurs spiralisés)

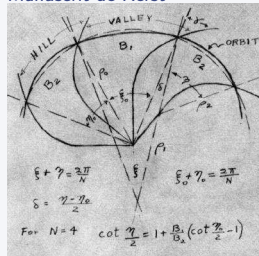
Cyclotrons secteurs



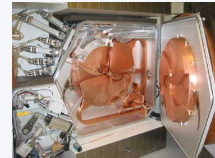
Cyclotron secteurs de PSI 590 MeV p^+



Manuscrit de Kerst



Cyclotrons spiralisés





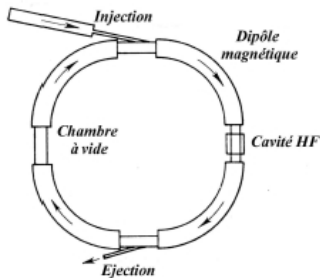
6. La famille des accélérateurs

Les synchrotrons

Le synchrotron

- **Intérêt** : réduire la taille de la chambre à vide.
- Chambre torique avec un rayon de trajectoire constant.
- Idée proposée par M. Oliphant en 1943 et réalisée en 1953 pour des protons de 1.0 GeV à l'université de Birmingham.
- Le champ magnétique et la fréquence RF doivent toujours suivre l'énergie du faisceau.

Schémas

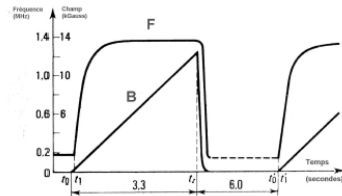


$$B(t) = \frac{\gamma(t)m_0 v(t)}{R}$$

$$\omega_{RF} = h \frac{v(t)}{R}$$

h : nombre harmonique

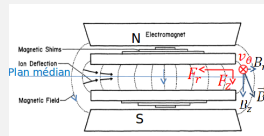
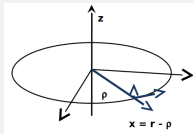
Cyclage de la fréquence RF et champ magnétique



La focalisation faible

Stabilité dans les 2 plans transverses

- Soit $\rho = \frac{mv}{qB_0}$ la trajectoire d'équilibre.
 - Soit x une petite différence avec le rayon de trajectoire ρ telle que :
$$r = \rho + x = \rho \left(1 + \frac{x}{\rho}\right)$$
 - Le mouvement est stable si $evB_z(r) \begin{cases} > \frac{mv^2}{r} & \text{quand } r > \rho \\ < \frac{mv^2}{r} & \text{quand } r < \rho \end{cases}$
 - Soit $n = -\frac{\rho}{B_0} \frac{\partial B_z}{\partial r}$ le gradient de champ ($B_z(r) = B_z(\rho) \left(\frac{\rho}{r}\right)^n$).
- $\Rightarrow \frac{mv^2}{r} \approx \frac{mv^2}{\rho} \left(1 - \frac{x}{\rho}\right)$ et $evB_z(r) \approx evB_0 \left(1 - n\frac{x}{\rho}\right)$
- Stabilité horizontale seulement si $n < 1$.
 - Stabilité verticale si les lignes de champ sont orientées vers l'intérieur $\Rightarrow 0 < n < 1$



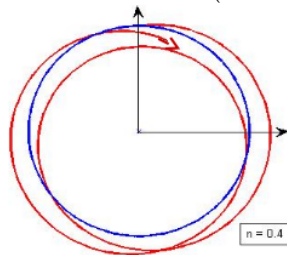
Limitations de la focalisation faible

- les équations du mouvement sont :

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

- Les périodes sont supérieures à la période de révolution :
 $f_x = \sqrt{1 - n}f_0 \quad f_z = \sqrt{n}f_0$
- Les variations de trajectoire sont alors grandes par rapport à la trajectoire de référence, **la chambre à vide et les gaps dans les dipôles sont larges.**

Oscillations horizontales ($n = 0.4$)



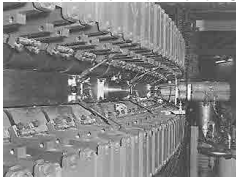
Les premiers synchrotrons

	Birmingham	Saclay Saturne I	Brookhaven Cosmotron	Berkeley Bevatron	Dubna Synchrophasotron
Rayon moyen [m]	4.5	11	10.7	18.2	30.5
Section de chambre [cm ²]	50 × 21	60 × 10	91 × 22	122 × 30	150 × 40
Date de démarrage	1953	1958	1952	1954	1957

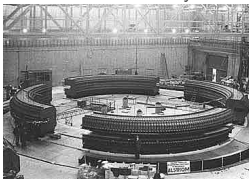
Les synchrotrons en images



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

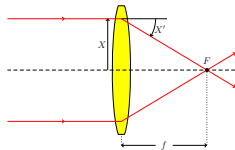


2002 : Après démantèlement

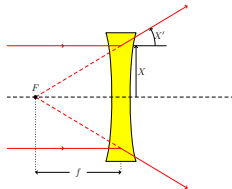


La focalisation forte

- 1952 : E. Courant, H. Snyder et S. Livingston proposent la focalisation forte ou avec gradients alternés.



$f > 0$ focalisant

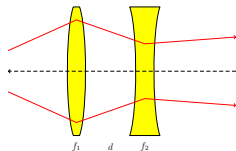


$f < 0$ défocalisant

Transport dans une lentille :

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

- L'alternance d'éléments focalisants/défocalisants est focalisante en moyenne.



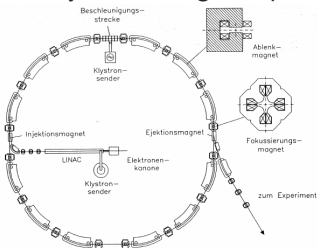
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ \frac{d-f_1-f_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix}$$

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

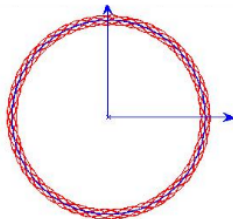
Le synchrotron avec focalisation forte

- Le gradient de dipôle constant est remplacé par des éléments magnétiques avec des buts dédiés :
 - des **dipôles** pour courber la trajectoire,
 - des **quadripôles** pour focaliser le faisceau,
 - d'autres **multipôles** pour corriger les aberrations.
- L'anneau est décomposé en mailles.

Un synchrotron générique



Oscillations horizontales



Des collisions : pour quoi faire ?

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 numérique au LHC

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

Cible fixe

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

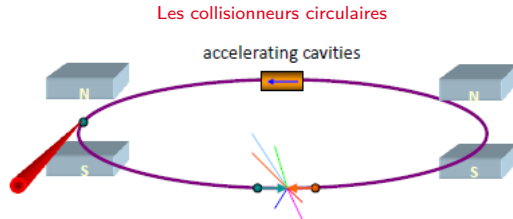
$$\left. \begin{array}{l} E_1 = 7 \text{ TeV} \\ E_2 = m_p c^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} E_{\text{cm}} = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 0.001} \\ E_{\text{cm}} = 0.118 \text{ TeV} \end{array}$$

Collisionneur

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

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

Les collisionneurs circulaires



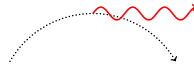
- ☺ Gain d'énergie en plusieurs tours dans quelques cavités.
- ☺ Collisions à chaque tour (plusieurs points d'interaction sont possibles).
 - ⇒ Forte luminosité (proportionnelle au nombre de collisions par unité de temps et de surface).
- ☺ Cavités RF et particules réutilisées.
 - ⇒ Efficace.
- ☹ Pertes par rayonnement synchrotron peuvent limiter le courant maximal $P \propto \frac{\gamma^4}{R}$
- ☹ Anneaux de courbure
 - ⇒ Fort champ magnétique (LHC : dipôles supraconducteurs).

Rayonnement synchrotron

- Quand des particules chargées et libres sont courbées, elles perdent de l'énergie cinétique en émettant un champ électromagnétique (équations de Maxwell)

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

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



- ☺ Source de lumière (SOLEIL, X-FeL)
- ☺ Amortit l'emittance.
- ☺ Limite le courant maximal que l'on peut stocker (à puissance électrique constante).

Exemple d'électrons de 7 TeV dans le LHC

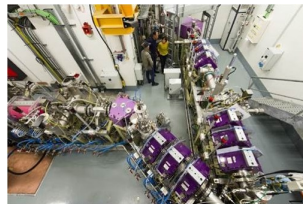
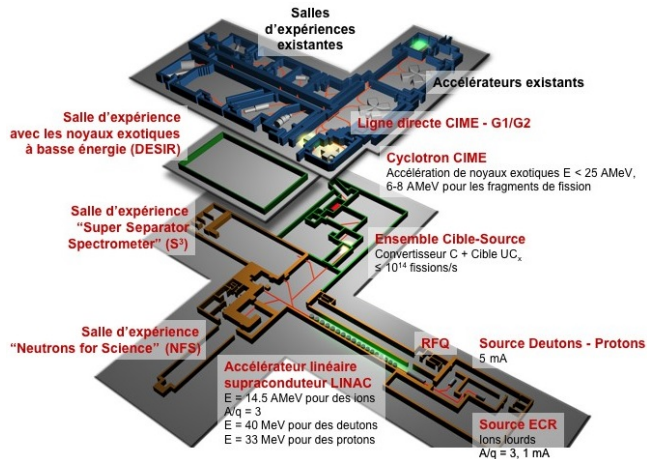
$$\left. \begin{array}{l} E = 7 \text{ TeV} \\ R \approx 5 \text{ km} \end{array} \right\} P_{\text{rayonnée/tour}} \approx 42\,000 \text{ TeV!!!}$$



7. Grands projets accélérateurs

Quelques exemples d'installations existantes et futures

SPIRAL2 au GANIL : pour la physique nucléaire



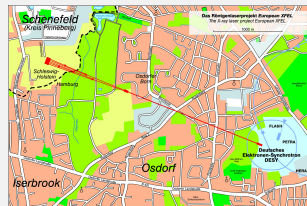
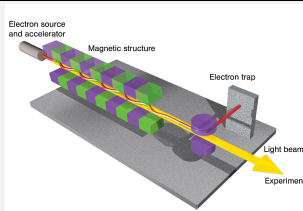
Spiral2 SC linac



XFeL : une source de rayons X (laser à électrons libres)

X-FeL en quelques images

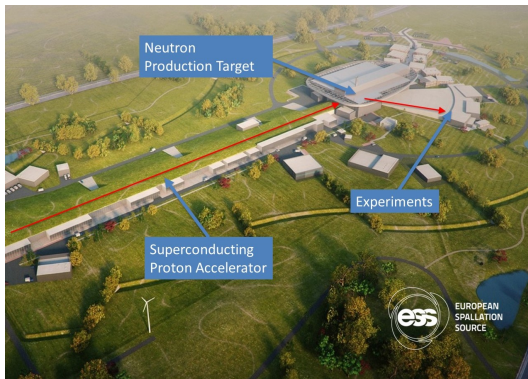
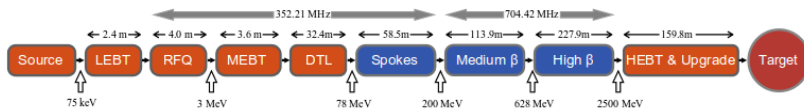
- Premier faisceau : 2017
- Longueur : 2 km
- Énergie finale : 17.5 GeV
- 101 modules
- $\lambda_\nu = 0.05 \text{ nm à } 6 \text{ nm}$



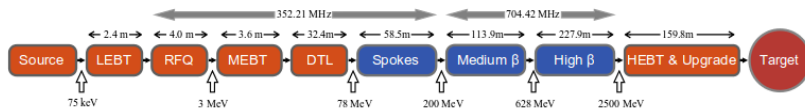
Cryomodule : 12 mètres de long



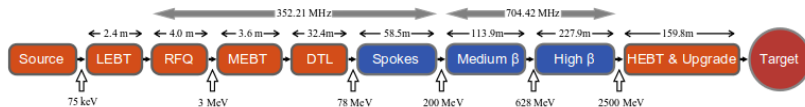
ESS : une source de spallation pour sonder la matière



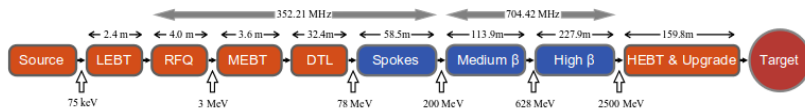
ESS : une source de spallation pour sonder la matière



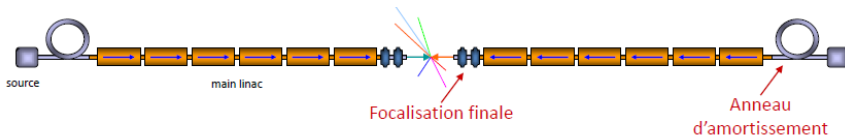
ESS : une source de spallation pour sonder la matière



ESS : une source de spallation pour sonder la matière



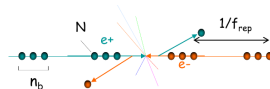
Les collisionneurs linéaires : ILC ou CLIC



Collisionneurs linéaires

- Moins de pertes par rayonnement synchrotron (causé par la courbure de trajectoire).
- Gaine d'énergie par simple passage.
 - ⇒ Large gradient accélérateur pour minimiser la taille de la machine.
- Collision unique par particule.
 - ⇒ Faisceau très dense pour obtenir une large luminosité.

$$\mathcal{L} = \frac{f_{\text{rep}} n_b N^2}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*}$$



- ⇒ Taille de faisceau très petite (nanomètre!), large taux de répétition. L'alignement et la stabilité de la machine sont critiques.
- ⇒ Efficacité énergétique à optimiser.



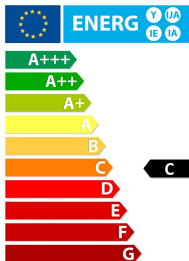
Efficacité énergétique



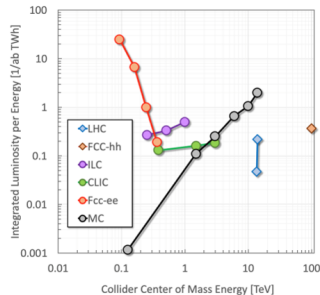
En 1940



En 2022

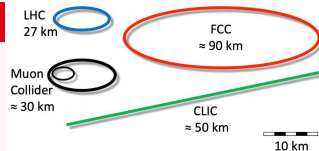


Demain ?

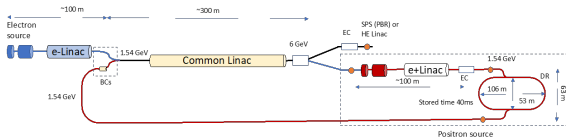
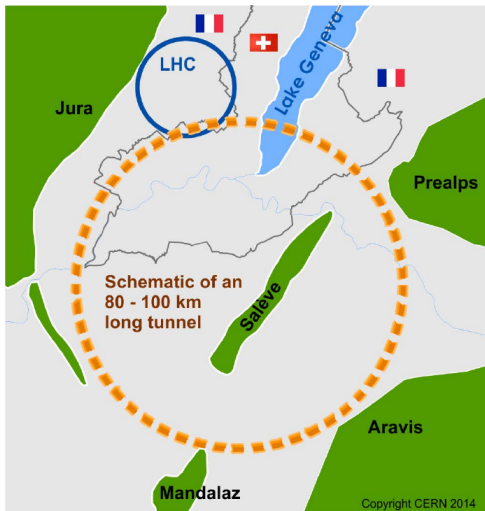


Limitations pour la physique des hautes énergies

- Énergie du faisceau.
- La taille.
- Le coût (construction, opération et démantèlement).



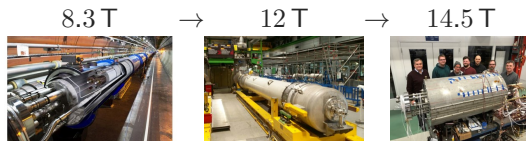
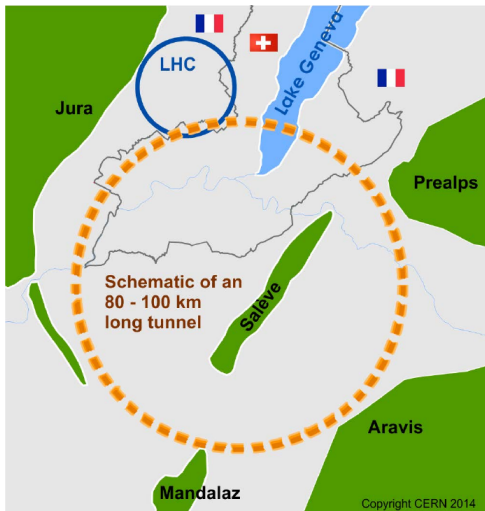
FCC-ee (Future Circular Collider for electrons)



Une machine qui rayonne

- 91 km (3 × LHC).
- $P_{\text{rayonnée}} = 50 \text{ MW/beam}!$
- La puissance rayonnée limite la puissance du faisceau. Le courant du faisceau dépend de l'énergie de collision.
- 1280 mA à 45.6 GeV
→ 5.0 mA à 182.5 GeV

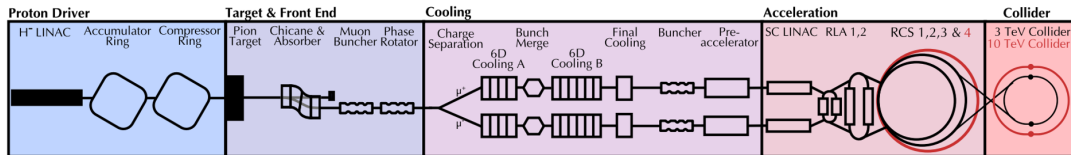
FCC-hh (Future Circular Collider pour hadrons)



De nombreux défis

- 91 km (3 x LHC).
- $E_{c.m.}=100$ TeV ! (7 x LHC).
- $B_{dipole}=16$ T ! (2 x LHC).
- Energie stockée : 8.2 GJ/beam (1/2 A380 en vol) ! (20 x LHC).
- Puissance rayonnée : 26 W/m.
- Protection machine.
- Après FCC-ee.

Collisionneurs à muons



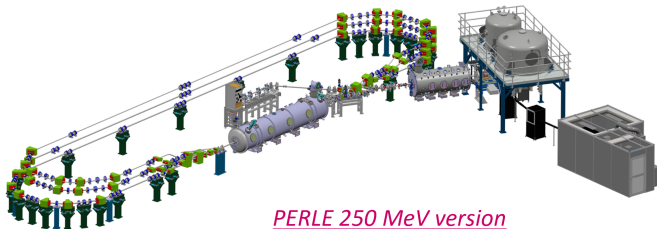
- ☺ **Leptons.** Toute l'énergie de collision est pour la physique (contrairement aux particules comme les protons).
- ☺ Particule **200 fois plus lourde que l'électron**. Puissance synchrotron rayonnée réduite par 1.6×10^9 à même énergie de collision.
- ☺ **Particule instable**. temps de demi-vie : $2.2 \mu\text{s}$. Besoin d'accélérer très vite !
- ☺ Besoin de **produire** et **refroidir** très vite pour obtenir des collisions efficaces et une luminosité intégrée compétitive !

PERLE : un futur ERL à l'IJCLab

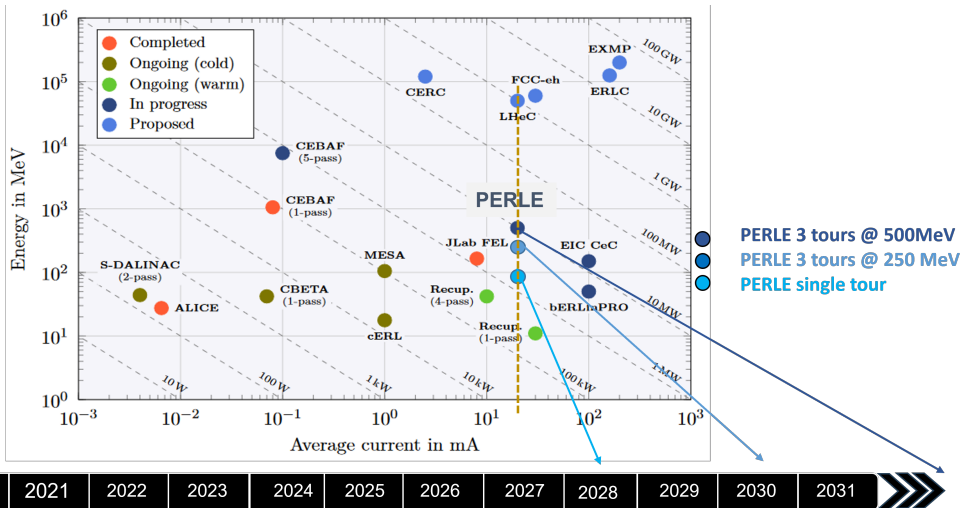
ERL : Energy Recovery Linac (Linac à recouvrement d'énergie). PERLE :

- Démontre l'opération multi-tours et haut courant → de nouveaux régimes de puissance.
- Valide des choix techniques importants :
 - Canon à électrons de haute charge High-charge : 500 pC à 40 MHz.
 - Système RF supraconducteur à 800 MHz.
 - Arcs communs pour les faisceaux accélérés et décélérés.
 - Diagnostics non-invasifs.
- Abrite des expériences d'intérêt.

Target Parameter	Unit	Value
Injection energy	MeV	7
Electron beam energy	MeV	500
Normalised Emittance $\gamma\epsilon_{x,y}$	mm mrad	6
Average beam current	mA	20
Bunch charge	pC	500
Bunch length	mm	3
Bunch spacing	ns	25
RF frequency	MHz	801.58
Duty factor		CW



PERLE : calendrier





8. Pour nous rejoindre

Pour rejoindre la famille des accélérateurs

Pour rejoindre le monde fascinant des accélérateurs

- Master PLATO : <http://www.master-gi-plato.fr/gi-plato/>
- Écoles :
 - 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/>
- GdR SCIPAC : <https://scipac.in2p3.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

ENSTA
alessandro.flacco@ensta-paris.fr

INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS
serena.bastiani@polytechnique.fr

ECOLE POLYTECHNIQUE

instn
guy.bonnaud@cea.fr

CentraleSupélec
Mohammed.serhir@centralesupelec.fr

école normale supérieure paris-saclay
thomas.rodet@ens-paris-saclay.fr

INSTITUT d'OPTIQUE
Francois.goudail@institutoptique.fr

Grands instruments Plasmas Lasers Accélérateurs Tokamaks

Grands infrastructures partenaires d'accueil et de formation

Fédération Sciences Fusion Plasmas Chauds

Fédération « Formation aux Sciences de la Fusion et des plasmas chauds »

Nancy
Univ. de Lorraine

Bordeaux
Univ. de Bordeaux

Marseille
Aix-Marseille Univ.
Ecole Centrale Marseille

LASERIX

Cilex Apollon

West

Le Laser Mégajoule

SCALP

JANNUS

SOLEIL SYNCHROTRON

institut Curie

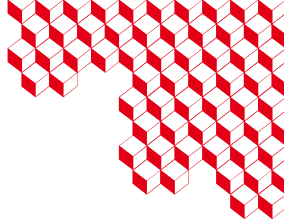
ITER

CERN

Informations et inscription
www.master-gi-plato.fr/

Bibliographie

- Ecole 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.

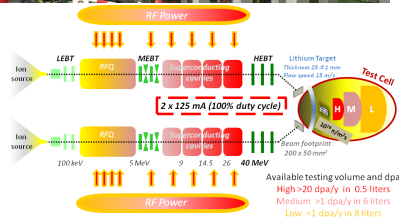
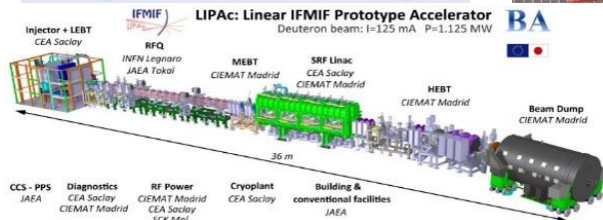
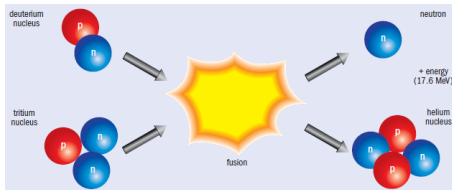


Merci pour votre attention!
Aucune idée pour les machines du futur?

CEA PARIS-SACLAY
91 191 Gif-sur-Yvette Cedex
France
antoine.chance@cea.fr

IFMIF/EVEDA : pour la fusion

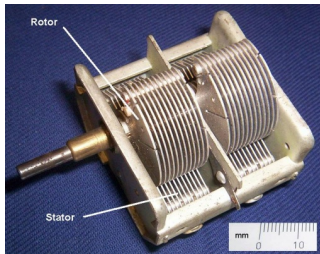
- IFMIF/ EVEDA : source de neutrons de 14 MeV au Japon pour des tests de matériau et centrales à fusion.



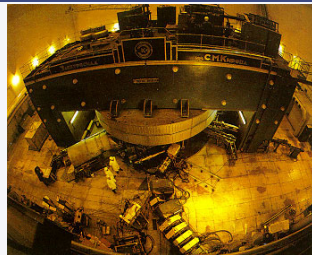
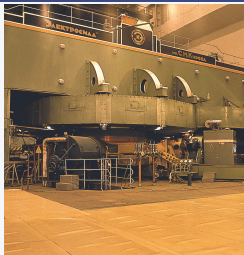
The synchrocyclotron

- 1945 : Edwin McMillan (USA) and Vladimir Veksler (URSS).
- The RF frequency cycles thanks to a very big rotating capacitor (period 1 Hz à 100 Hz).
 - Very large number of turns $\Rightarrow$ less RF voltage.
 - Energy limitation comes from the dipole size (Leningrad : diam. 7 m 7000 t 1 GeV p^+)
 - But the beam is pulsed : reduce average intensity.
- Still a few machines under operation like the Centre of Protontherapy in Orsay until 2008.

Variable capacitor :



1949 : Dubna 6 m 700 MeV p^+



Le Bétatron

- 1940 : D. Kerst (2.2 MeV) jusqu'à 300 MeV en 1950.
- Surtout pour la production de rayons X.
- E généré par la variation du champ B (accélérateur à induction).

Condition de stabilité de l'orbite du faisceau

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\iint_S \nabla \times \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

$$2\pi r E_\theta = -\frac{\partial}{\partial t} \Phi_0$$

$$E_\theta = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \Phi_0}{\partial t}$$

$$\frac{d}{dt}(mv_\theta) = qE_\theta \Rightarrow mv_\theta = -\frac{q}{2\pi r} \Phi_0$$

$$m \frac{v_\theta^2}{r} = -qv_\theta B_z(r) \Rightarrow mv_\theta = -qrB_z(r)$$

$$B_z(r) = \frac{\Phi_0}{2\pi r^2}$$

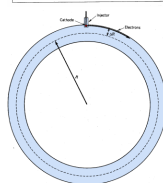
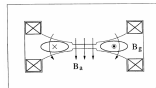
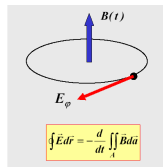
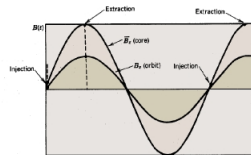


Figure 15.4. Injection point in a betatron.



Kerst et son premier betatron



Le microtron

- 1944 : inventé par Verskler

Principe du microtron

- Rester en phase avec la RF en sautant une période entière à chaque tour.

$$\omega_{\text{RF}} = n\omega_{\text{revolution}} = n\frac{qB}{\gamma_n m_0}$$

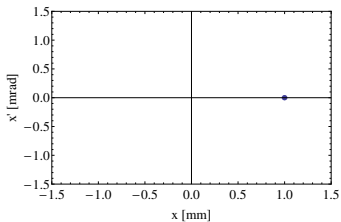
$$\gamma_n = n\frac{qB}{m_0\omega_{\text{RF}}} = n\gamma_0$$

$$\gamma_n = \gamma_{\text{inj}} + n\frac{\Delta E}{E_0} = n\gamma_0$$

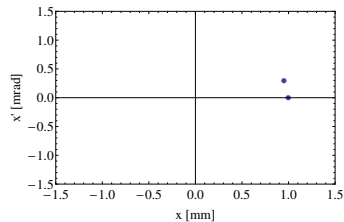
$$\Delta E = E_0 + E_{\text{inject}} \geq 511 \text{ keV pour } e^-$$

Particle motion in a ring

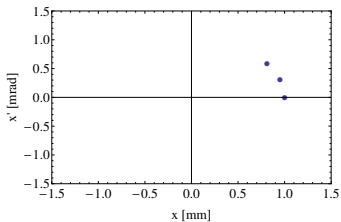
Initial position



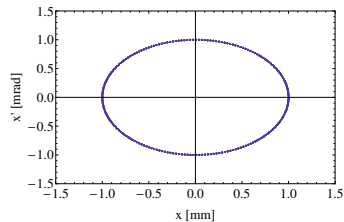
After 1 turn



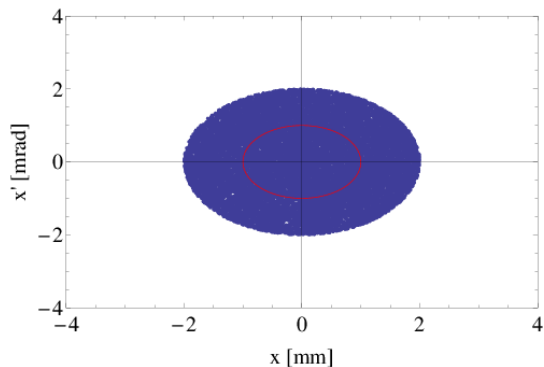
After 2 turns



After n turns

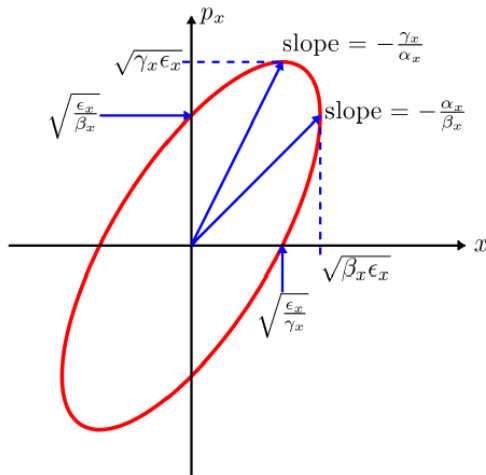


Emittance



The **emittance** is proportional to the beam ellipse area in the phase space.

Beam parameters



L'émittance

- Native property of the beam.
- Product of a size by a divergence at a waist.
- Limits the beam ability to be transported parallel and focused small.
- Is conserved in linear forces (motion invariant).
- Can only increase with non-linear forces (but under specific conditions).

Particle accelerators in a few numbers



More than

400 B€

of end products are produced, sterilized, or examined using industrial accelerators annually worldwide.

More than **24 000** particle accelerators have been built globally over the past **60 years** to produce charged particle beams for use in industrial processes.

This number does not include the more than **11 000** particle accelerators that have been produced exclusively for medical therapy with electrons, ions, neutrons, or X-rays.

More than

24 000

patients have been treated by hadron therapy in Europe.

More than

75 000

patients have been treated by hadron therapy in the world.

Around

200

accelerators are used for research worldwide, with an estimated

yearly consolidated cost of

1 B€

The world's largest particle accelerator, the Large Hadron Collider (LHC), is installed in a tunnel **27 km** in circumference, buried 50-175 m below ground.

The temperature of the superconducting magnets in the LHC reaches **- 271 °C**. In contrast, the temperature at collision point is 1000 million times hotter than that of the Sun's core.

References

Numbers related to industrial accelerators

Robert W. Hamm and Marianne E. Hamm, Eds., "Introduction to the Beam Business" in *Industrial Accelerators and their Applications* (World Scientific, Singapore, 2012), ISBN-13 978-981-4307-04-8, pp.1-8.

Numbers related to LHC

CERN (European Organization for Nuclear Research) website

<http://home.web.cern.ch>