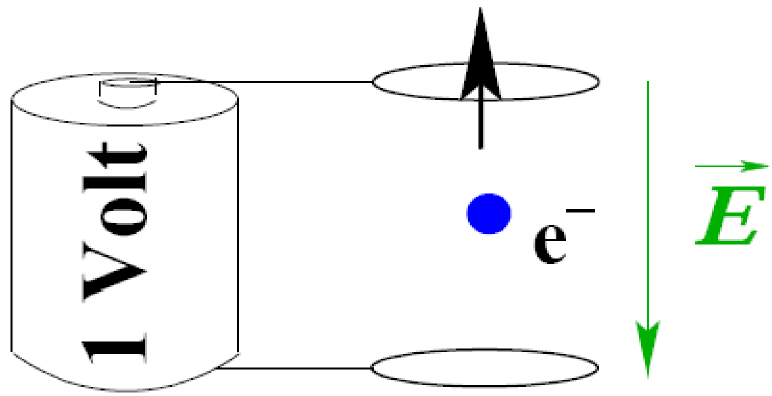
Les Accélérateurs: la physique sans les mathématiques

D. Brandt, CERN

Quelques généralités ...

Les Unités: L'électronvolt (eV)



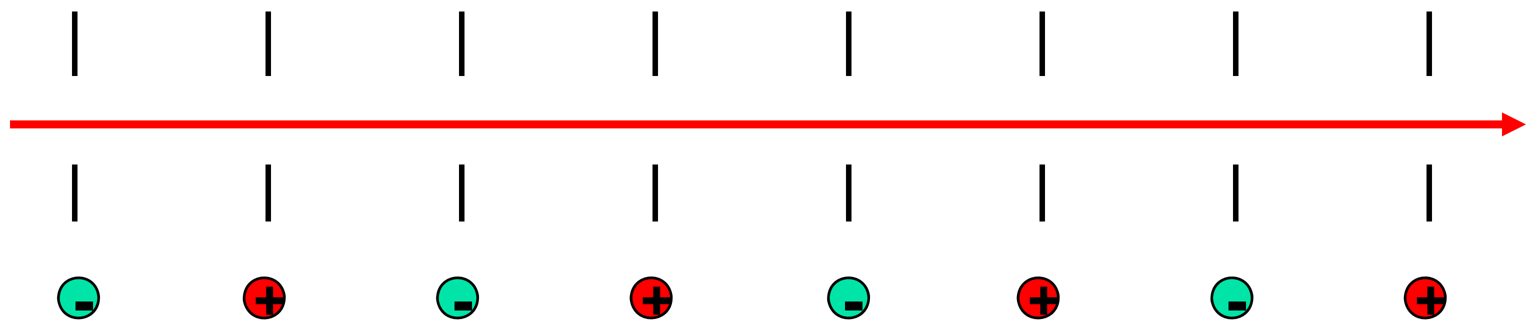
L'électronvolt (eV) est l'énergie acquise par un électron qui passe, dans le vide, d'un point à un autre ayant une différence de potentiel de 1 Volt. $1 \text{ eV} = 1.602\ 10^{-19}$ Joule

On utilise aussi fréquemment l'électronvolt pour exprimer les masses d'après $E=mc^2$: $1 \text{ eV}/c^2 = 1.783\ 10^{-36}$ kg

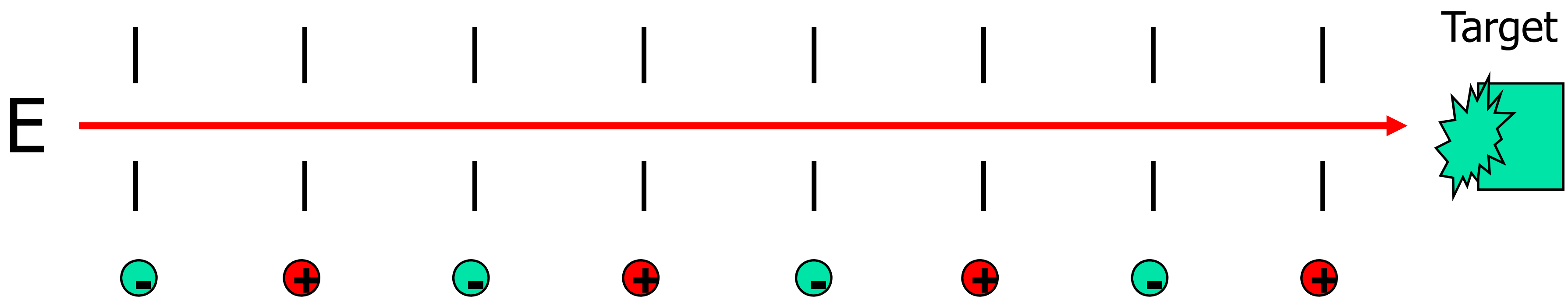
Qu'est-ce qu'un accélérateur ?

- Une machine pour accélérer des particules ! Comment ?

- Plusieurs possibilités, mais le principe de base est simple:



Machines linéaires idéales (linacs)



Energie disponible : $E_{c.m.} = m \,.\, (2+2\gamma)^{1/2} = (2m.(m+E))^{1/2}$

avec $\gamma = E/E_0$

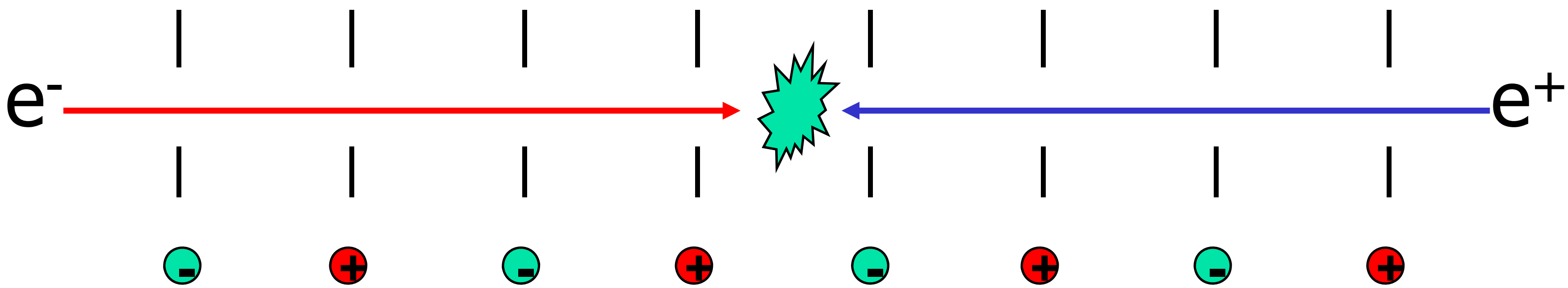
<u>Avantages</u>: un seul passage

intensité élevée

<u>Inconvénients</u>: un seul passage

énergie finale

Meilleure solution pour $E_{c.m.}$



Energie disponible : $E_{c.m.} = 2m\gamma = 2E$

avec $\gamma = E/E_0$

<u>Avantage</u>: Intensité élevée

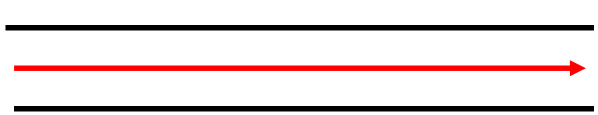
<u>Inconvénients</u>: un seul passage

dimensions !

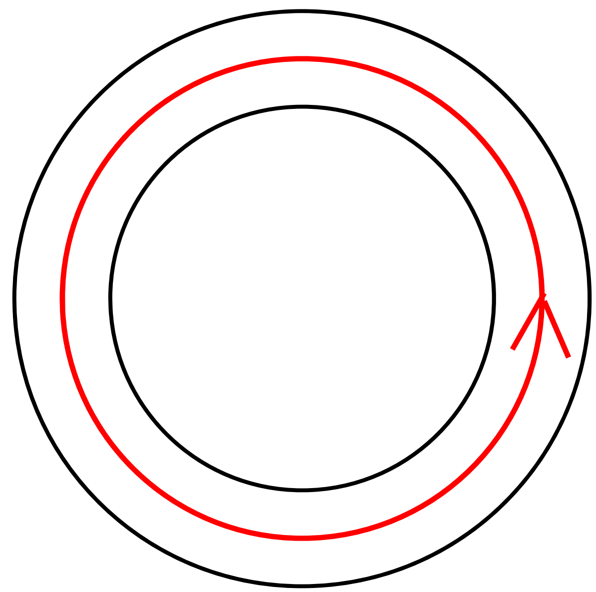
Conserver les particules…

Idée de base: conserver les particules dans la machine.

Passer d'une machine linéaire



à une machine circulaire:

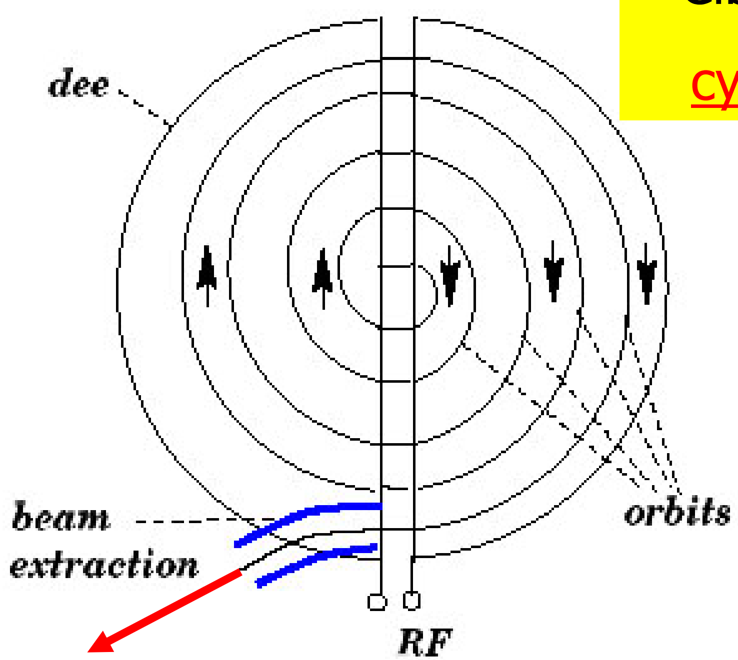


- courbure nécessaire
- besoin de Dipôles!

Machines circulaires ($E_{c.m.} \sim (mE)^{1/2}$)

Cible fixe:

cyclotron



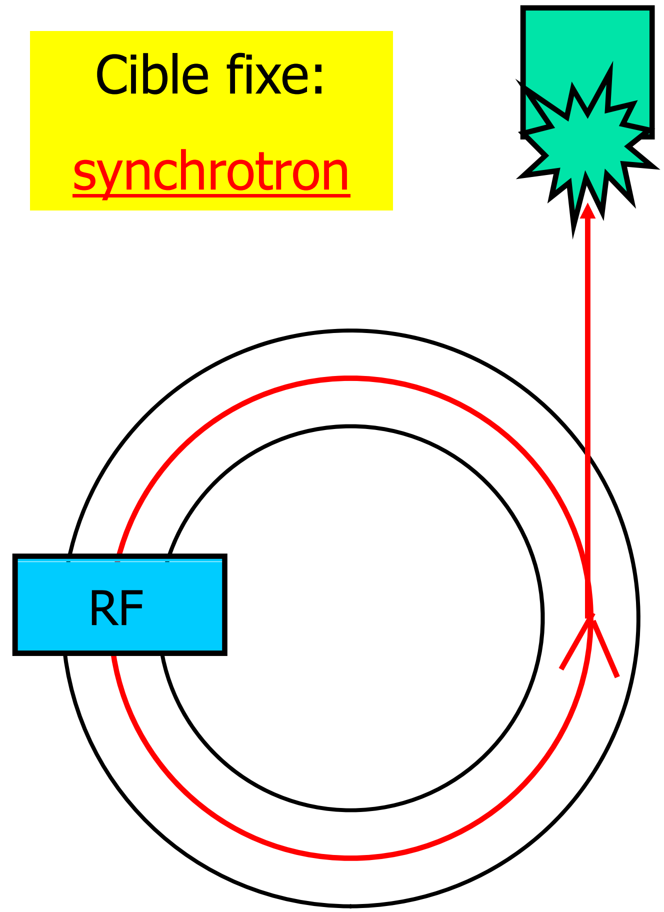
large dipôle, design compact,

B = constant

basse énergie, un passage!

Cible fixe:

synchrotron



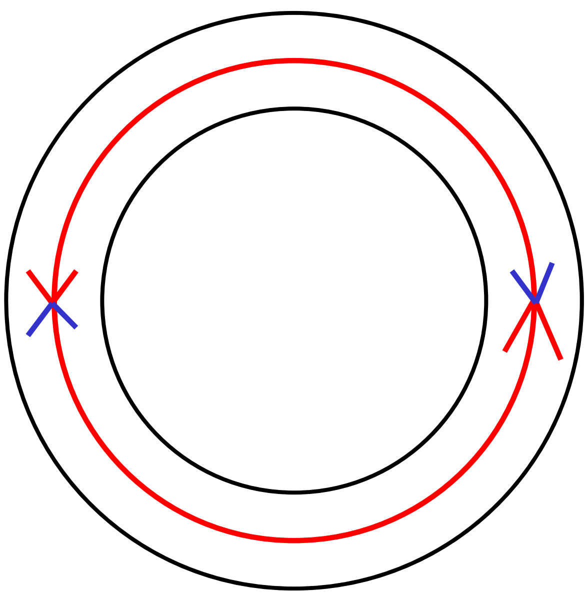
B variable, petits aimants,
haute énergie

Collisionneurs ($E_{c.m.}$=2E)

<u>Collisionneurs:</u>

électron – positron

proton - antiproton



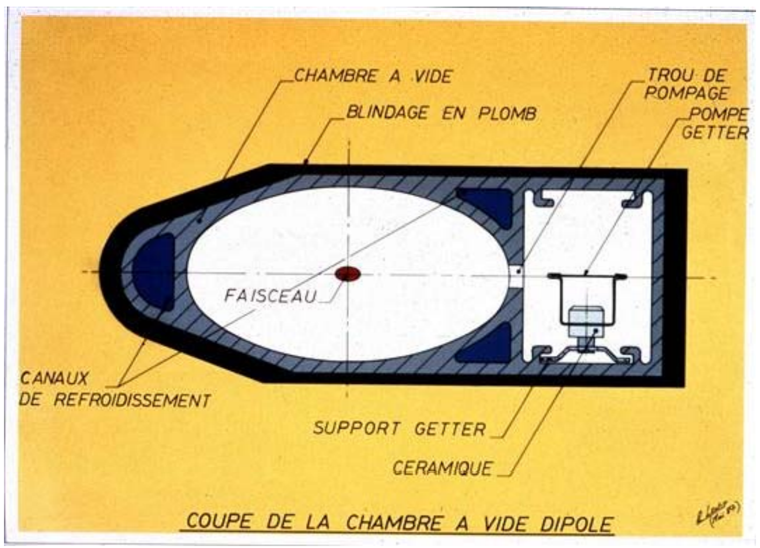
Collisionneurs avec particules identiques (p.ex. p-p) impliquent d'avoir deux chambres à vide séparées. Les faisceaux se retrouvent dans une chambre commune autour des expériences

Ex: LHC

8 régions d'intéractions possibles

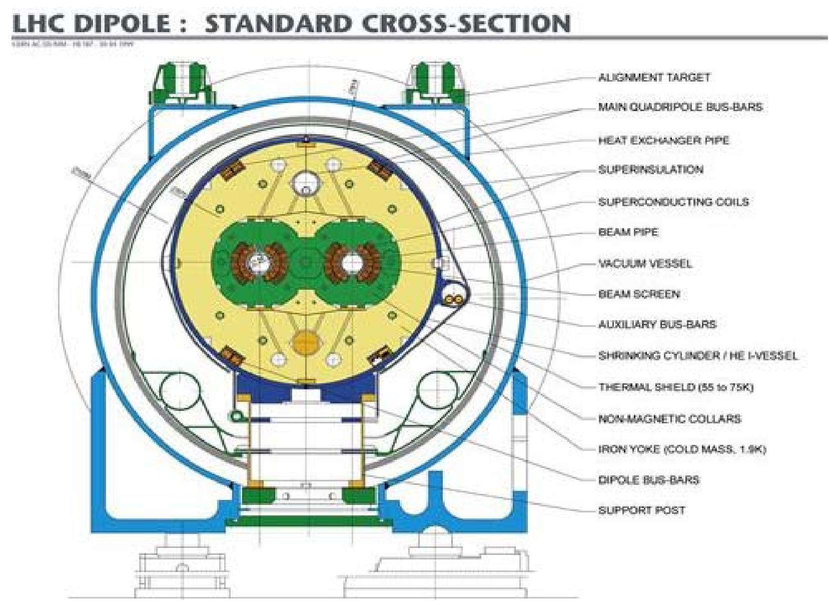
4 expériences actives

Colliders (e^+ - e^-) et (p – p)



LEP

LHC



Dynamique transverse

Dynamique du faisceau (1)

Pour décrire la dynamique, chaque particule est caractérisée par:

- Sa position le long de la machine: s
- Sa quantité de mouvement: p
- Sa position horizontale: x
- La pente horizontale de sa trajectoire à cette position: x'
- Sa position verticale: y
- La pente verticale de sa trajectoire à cette position : y'

c.a.d. un domaine à six dimensions:

$$(s, p, x, x', y, y')$$

Dynamique du faisceau (2)

- Dans un accélérateur conçu pour opérer à E_{nom}, toutes le particules ayant les paramètres $(s, E_{nom}, 0, 0, 0, 0)$ vont circuler au centre de la chambre à vide. Ce sont les "particules idéales".

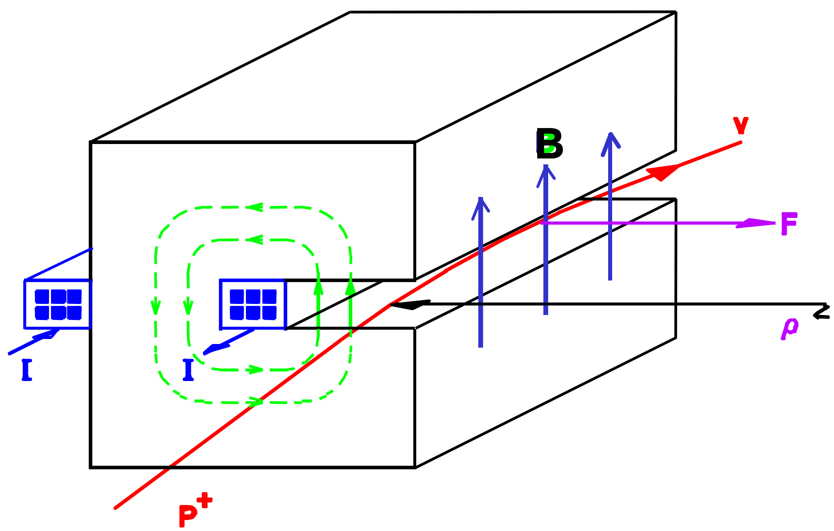
- Les difficultés commencent lorsque:

  - Nous introduisons des aimants dipôlaires

  - L'énergie $E \neq E_{nom}$ or $(p\text{-}p_{nom}/p_{nom}) = \Delta p/p_{nom} \neq 0$

  - L'un des paramètres $x, x', y, y' \neq 0$

Machines circulaires: Dipôles



<u>Mécanique classique</u>:

Equilibre entre deux forces

<u>Force de Lorentz</u>

$F = e.(\underline{v} \times \underline{B})$

<u>force centrifuge</u>

$F = mv^2/\rho$

$evB = mv^2/\rho$

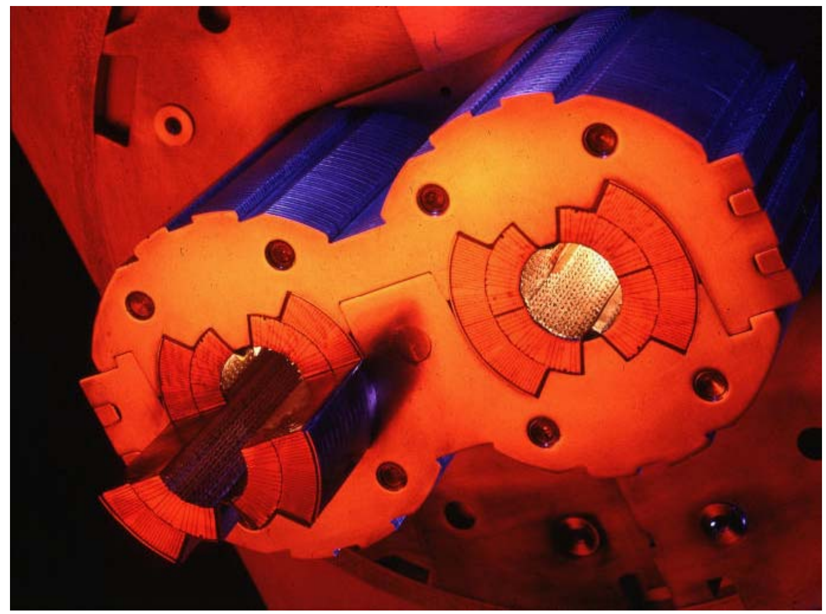
$p = m_0.c.(\beta\gamma)$

Rigidité magnétique:

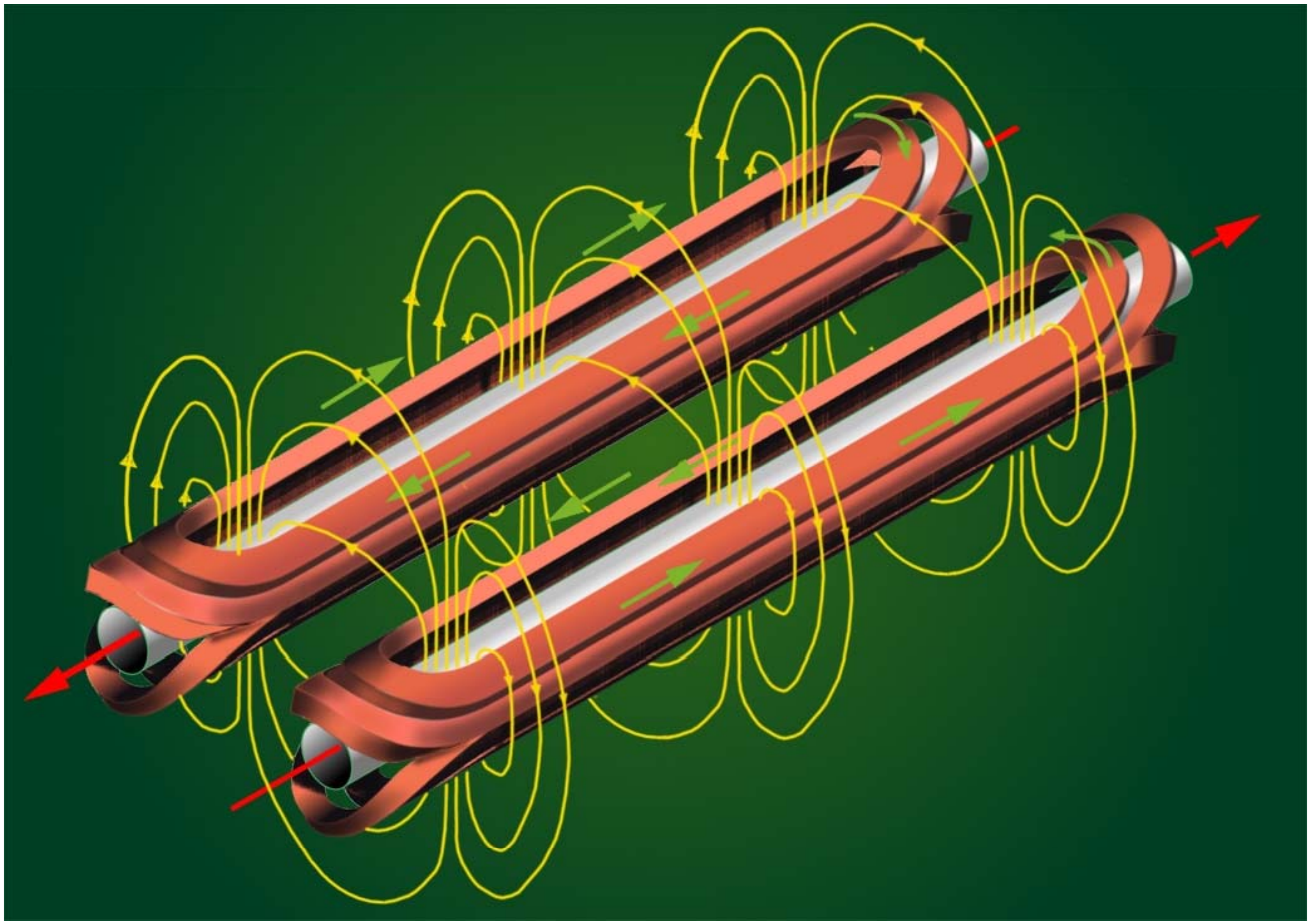
$B\rho = mv/e = p/e$

Relation aussi valide pour le cas relativiste si la quantité de mouvement mv est remplacée par la quantité de mouvement relativiste p

Dipôles (1):



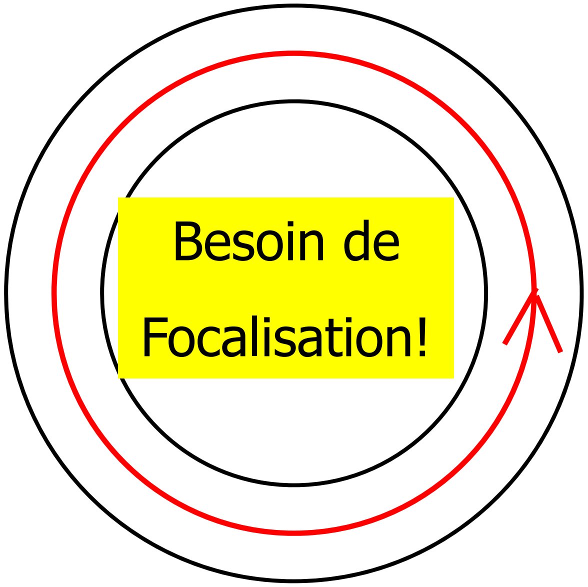
Dipôles (2):



Machine circulaire idéale:

- Négligeant les pertes dues à la radiation
- Négligeant la force de gravitation

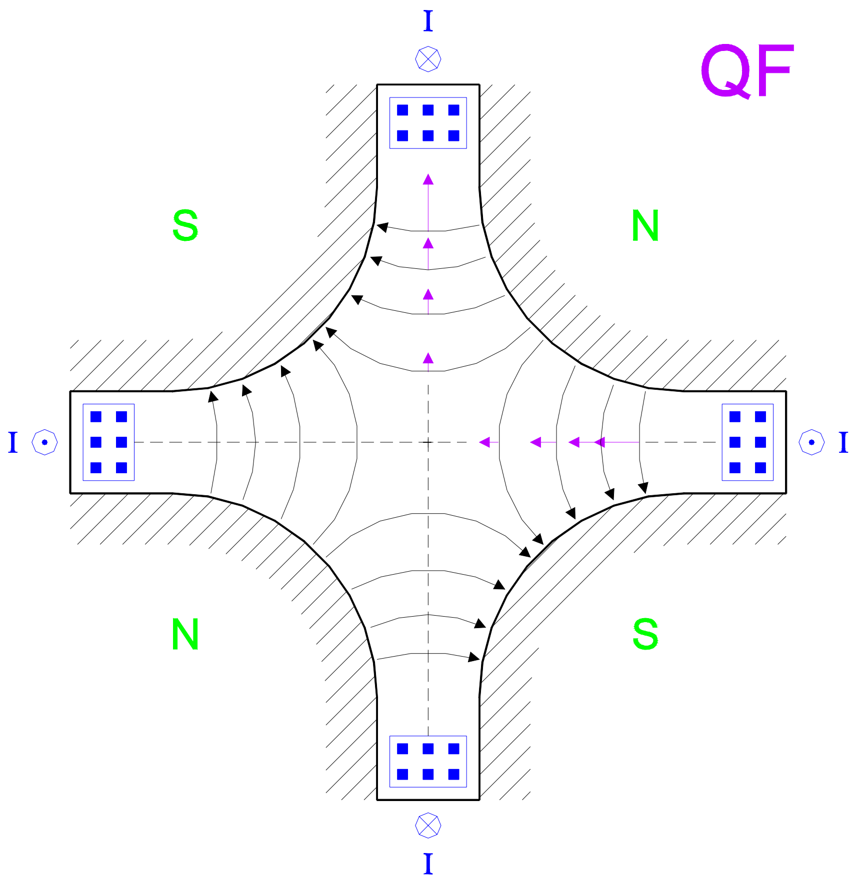
La particule idéale circulerait au centre de la machine pour toujours!



Malheureusement: la réalité est différente!

Gravitation: Δy = 20 mm en 64 msec!	
Alignement de la machine	Ouverture physique limitée
Mouvements du sol	Erreurs de champs
Mauvaise énergie des particules et/ou $(x, x')_{inj} \neq (x, x')_{nominale}$	
Erreur dans la force des aimants (alimentation et calibration)	

Focalisation avec des quadrupôles



$F_x = -g.x$

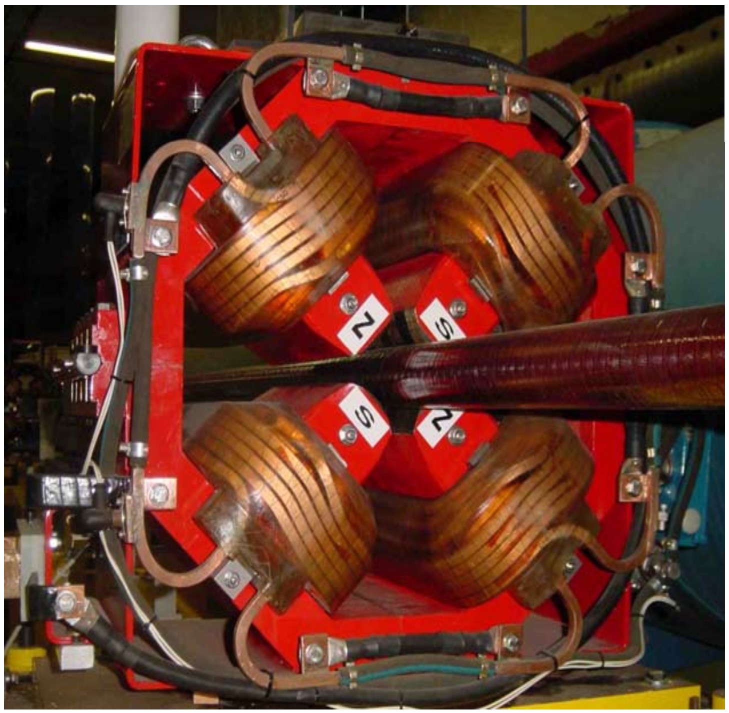
$F_y = g.y$

Force augmente linéairement avec le déplacement.

Malheureusement, l'effet est opposé dans les deux plans (H and V).

Rappel: ce quadrupôle est focalisant dans le plan horizontal mais défocalisant dans le plan vertical !

Quadrupôles:



Propriétés de la focalisation …

Un quadrupôle procure l’effet recherché dans un plan…

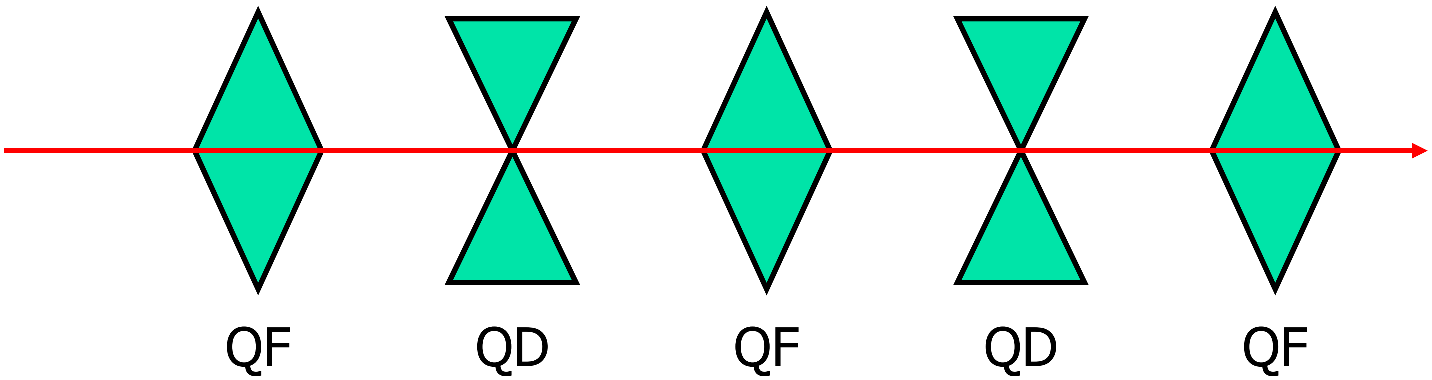
mais l’effet opposé dans l’autre plan!

Est-ce vraiment intéressant?

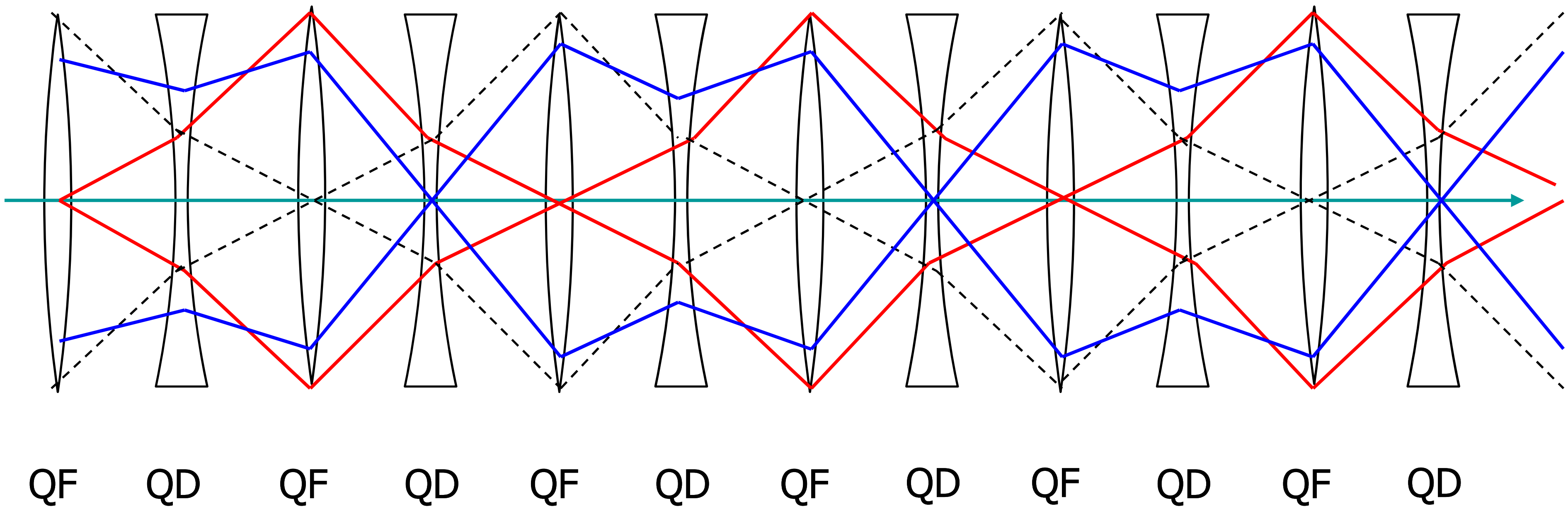
Focalisation à gradients alternés

Idée de base:

Alterner les QF et les QD



Focalisation à gradients alternés



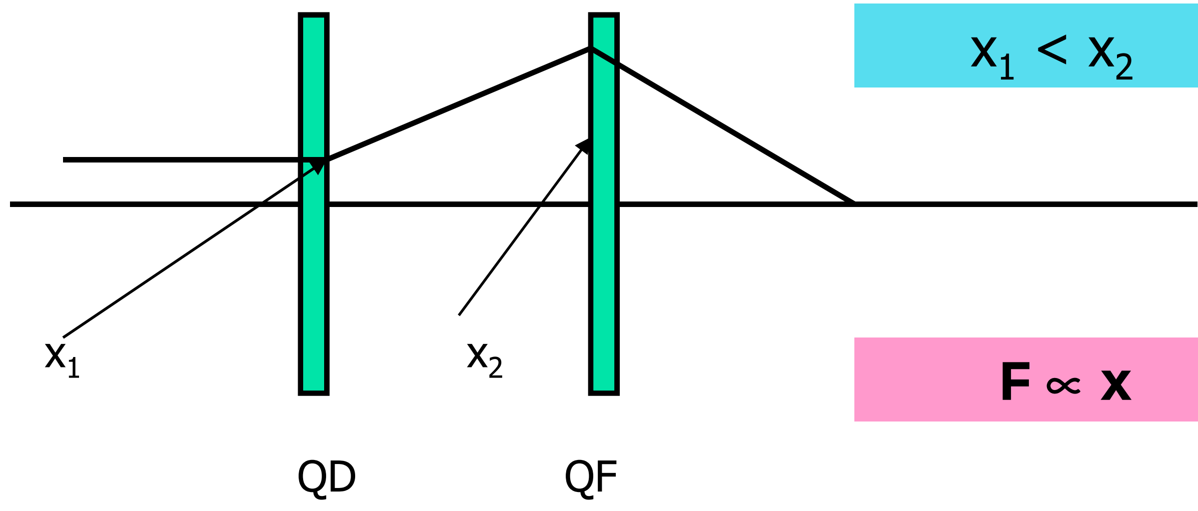
Focalisation à gradients alternés:

Les particules pour lesquelles x, x′, y, y′ ≠ 0 oscillent donc autour de la particule idéale …

et les trajectoires restent confinées à l'intérieur de la chambre à vide !

Pourquoi un effet global focalisant?

Purement intuitif:

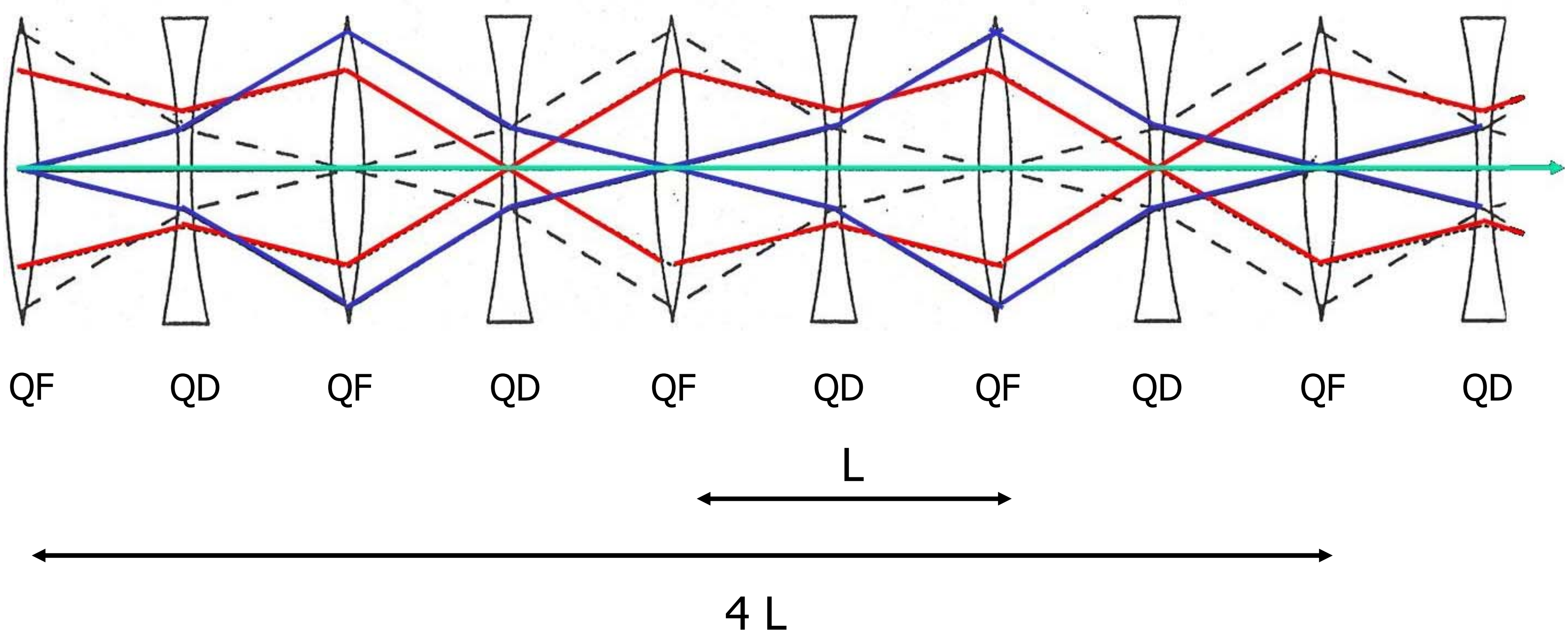


$x_1 < x_2$

$\mathbf{F \propto x}$

Démonstration rigoureuse très simple !

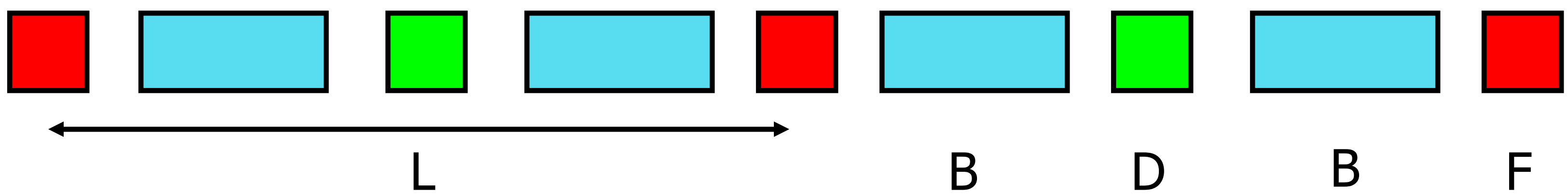
Le concept de la “cellule” FODO



Une oscillation complète en 4 cellules $\Rightarrow$ 90°/ cellule $\Rightarrow$ **μ = 90°**

Machines circulaires (sans erreurs!)

La machine est composée d'une répétition périodique de cellules:



- L'avance de phase par cellule μ peut être modifiée, dans chaque plan, en modifiant la force des quadrupôles.

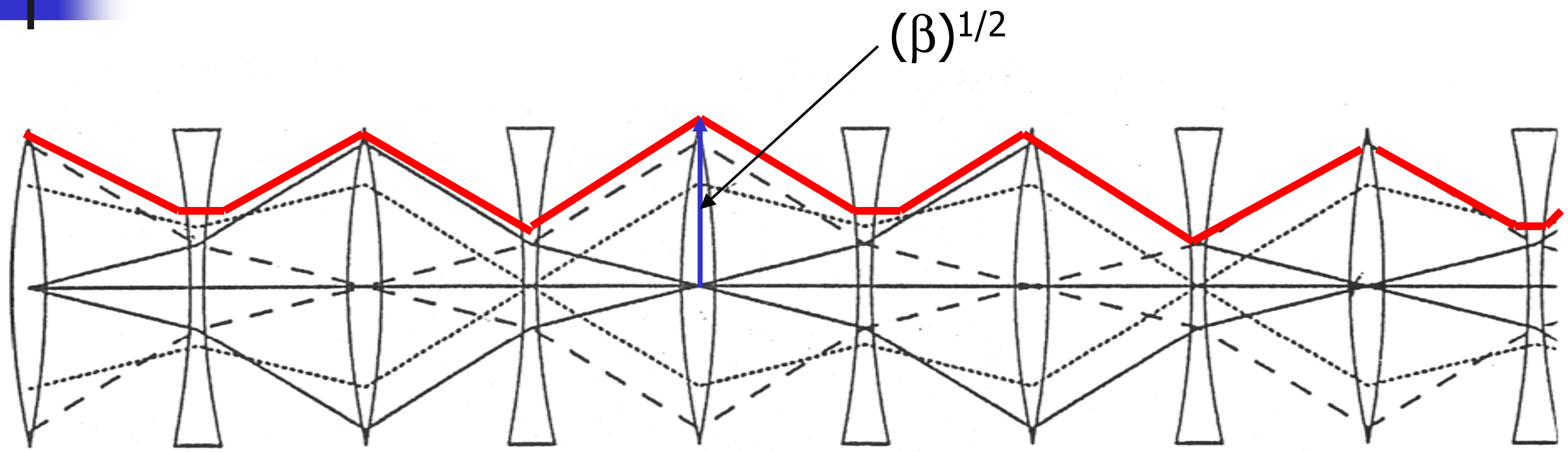
- La particule idéale suivra une trajectoire particulière, qui se ferme sur elle-même après un tour: c'est l'orbite fermée.

- Les autres particules vont osciller autour de cette orbite fermée.

- Le nombre d'oscillations pour un **tour complet** est appelé le **Tune Q** de la machine (Qx et Qy).

Maille régulière: l'Arc

La fonction β(s):



La fonction β est l'enveloppe autour de toutes les trajectoires des particules circulant dans la machine.

La fonction β a un minimum aux QD et un maximum aux QF, garantissant un bilan positif de focalisation dans la maille.

C'est donc une fonction périodique (répétition de cellules). Ces oscillations sont appelées mouvement betatronique ou **oscillations betatroniques**.

Pourquoi introduire cette fonction?

La fonction β est fondamentale car elle est directement liée aux dimensions du faisceau (quantité mesurable!):

Dimension du faisceau [m]

$$\sigma_{x,y}(s) = (\varepsilon.\beta_{x,y}(s))^{1/2}$$

σ (IP) = 17 μm

at 7 TeV (β=0.55 m)

L'emittance ε est une caractéristique de la qualité du faisceau (mesure de combien les particules s'éloignent de la trajectoire idéale). C'est un invariant pour une énergie donnée.

ε = propriété du faisceau

β = propriété de la machine (quads)

Particules “Off momentum”:

- Ce sont les particules qui ne sont pas idéales, dans le sens où elles n’ont pas la bonne énergie, c.à.d. toutes les particules avec $\Delta p/p \neq 0$

Que se passe-t-il pour ces particules dans les aimants ?

Particules “off momentum” ($\Delta p/p \neq 0$)

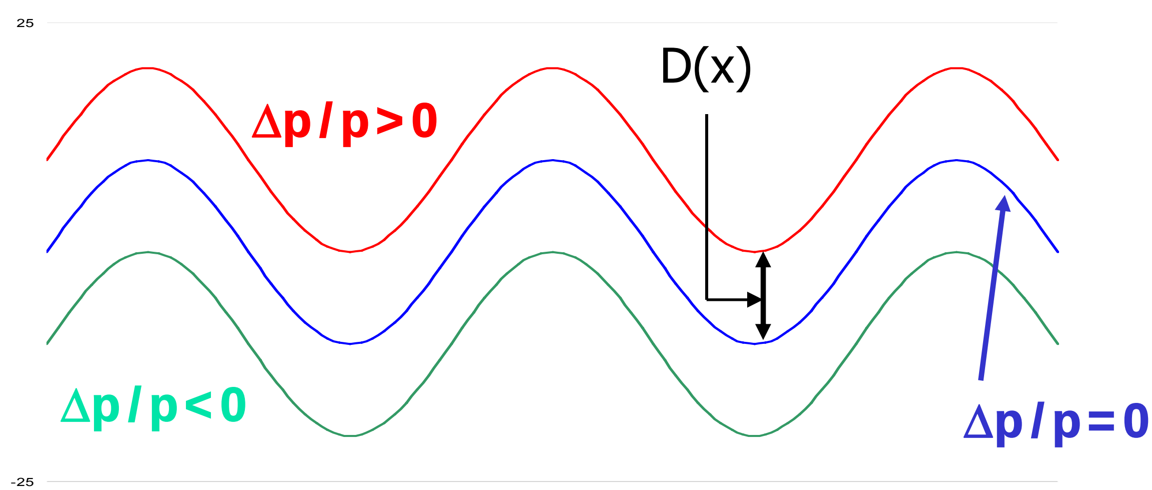
Effet dans les Dipôles

- Si $\Delta p/p > 0$, les trajectoires sont moins courbées dans les dipôles ➔ elles devraient s’éloigner du centre!

- Si $\Delta p/p < 0$, les trajectoires sont plus courbées dans les dipôles ➔ elles devraient se rapprocher du centre !

Non!

Il s’établit un équilibre avec les forces stabilisatrices des quadrupôles



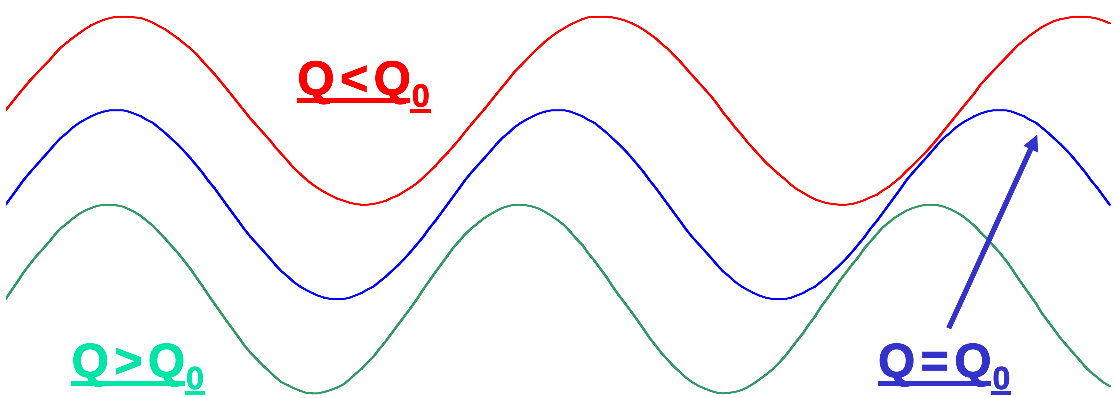
Particules “off momentum” ($\Delta p/p \neq 0$)

Effet dans les Quadrupôles

- Si $\Delta p/p > 0$, les particules sont moins focalisées ➔ **Q plus petit!**

- Si $\Delta p/p < 0$, les particules sont plus focalisées ➔ **Q plus grand!**

Particules avec momentum différent ont un tune différent $Q=f(\Delta p/p)$!



La chromaticité Q’

Particules avec ($\Delta p/p$) différents auraient donc des tunes Q différents.
Et alors… ?

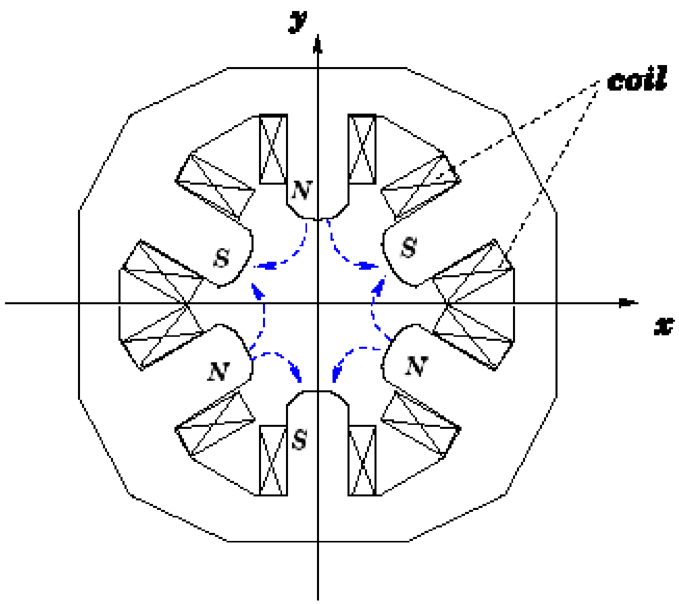
Malheureusement:

- La dépendance du tune en fonction du momentum a une importance fondamentale pour la stabilité du faisceau. Cette dépendance est décrite par la chromaticité de la machine Q’:

$$Q' = \Delta Q / (\Delta p/p)$$

Pour des raisons de stabilité, la chromaticité doit être contrôlée et corrigée très précisèment.

Les sextupôles (SF and SD)

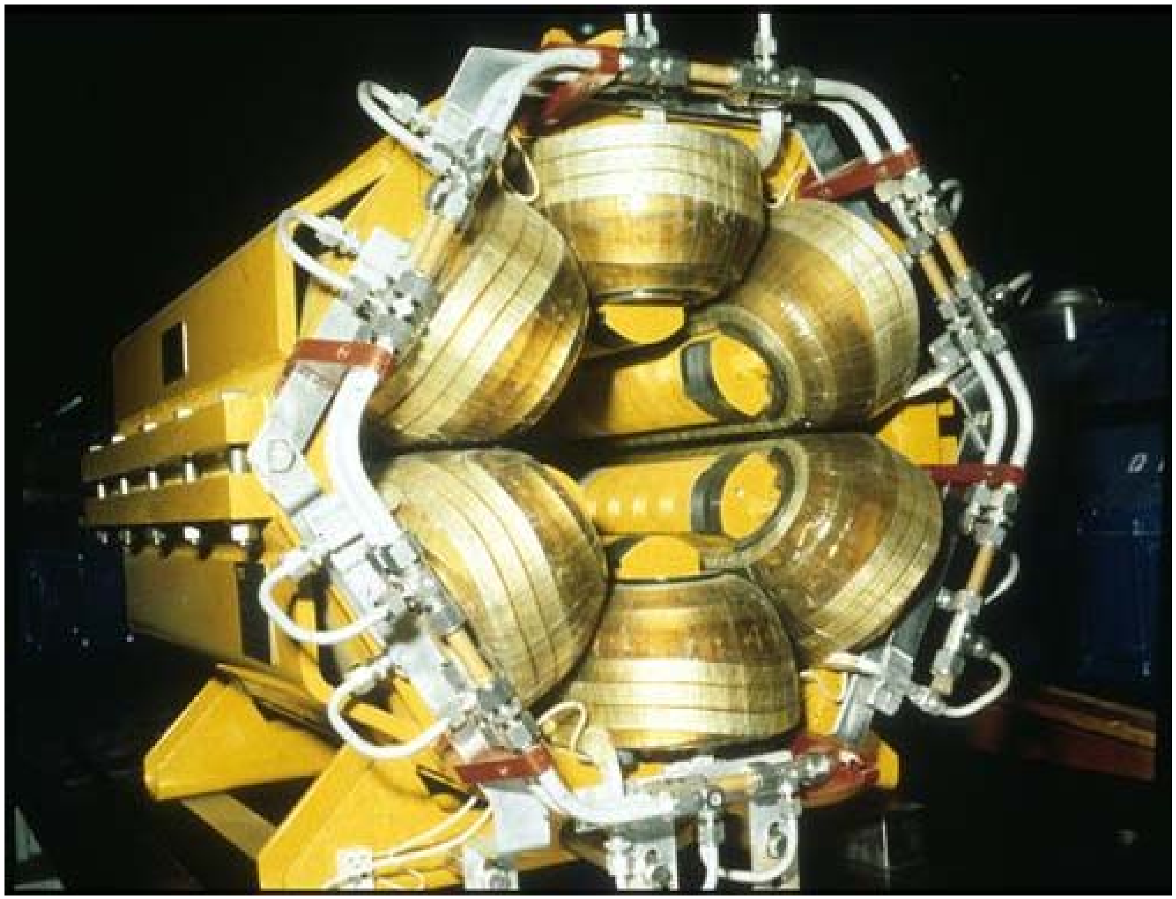


- $\Delta x' \propto x^2$

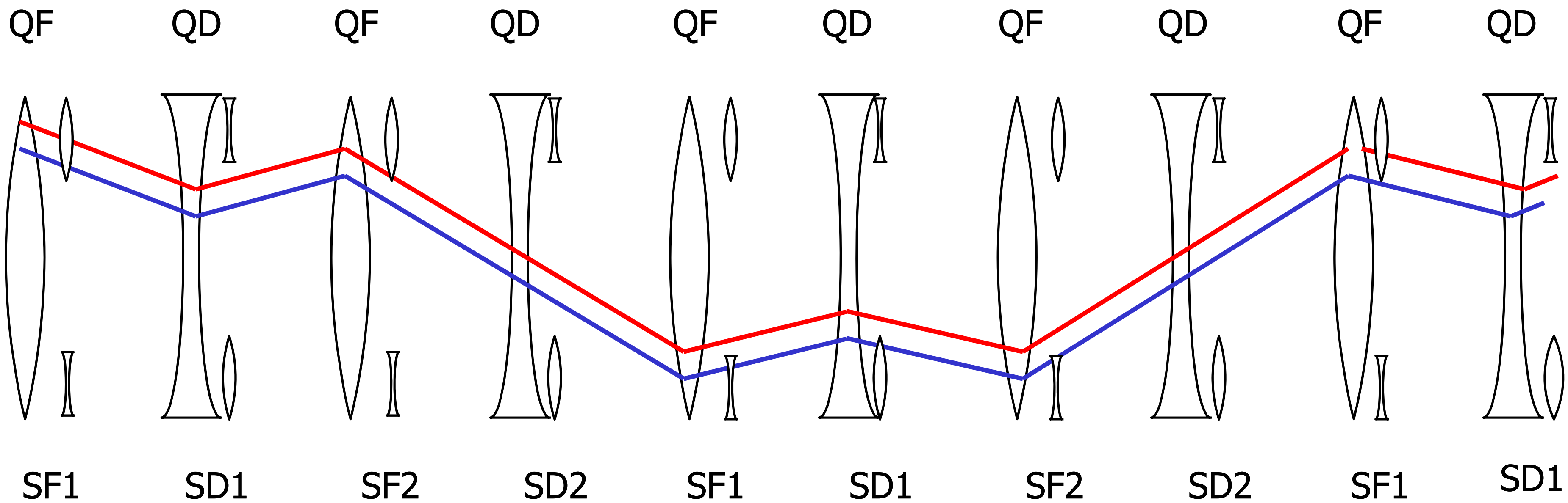
- Un sextupôle SF « ajoute » de la focalisation pour les particules avec $\Delta p/p > 0$, et la « diminue » pour $\Delta p/p < 0$.
- La chromaticité est corrigée en ajoutant un sextupôle après chaque quadrupôle de la maille.

Sextupôles:

SPS



Correction de la chromaticité:



L'effet non-désiré des sextupôles sur les particules ayant déjà l'énergie nominale peut être évité en groupant les sextupôles en « familles ».

Nr. de familles:
N = (k . 180 °/μ) = Entier
p.ex. 180 °/ 90 ° = 2

Stabilité transverse du faisceau:

Nous avons vu, qu'apparemment, les valeurs des tunes Q_x et Q_y devaient être choisies et contrôlées de façon très précises. Pourquoi?

LHC in collision:

$Q_x = 64.31$

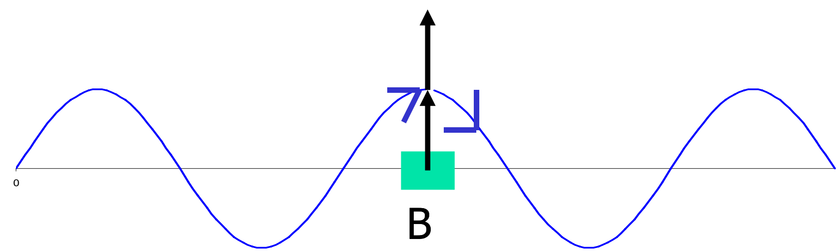
$Q_y = 59.32$

Valeurs interdites pour $Q_{x,y}$

- Une erreur dans un dipôle produit un changement de la pente de la trajectoire (kick) qui a toujours le même signe!

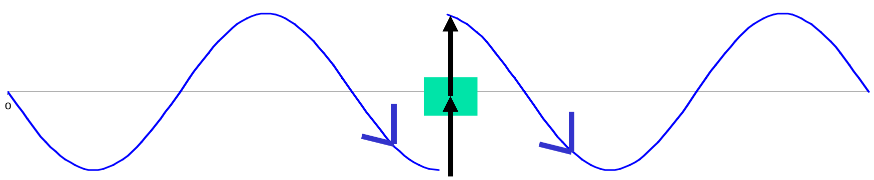
Tune Q entier = N

Interdit!
Les perturbations s'additionnent!



Tune Q demi-entier = N + 0.5

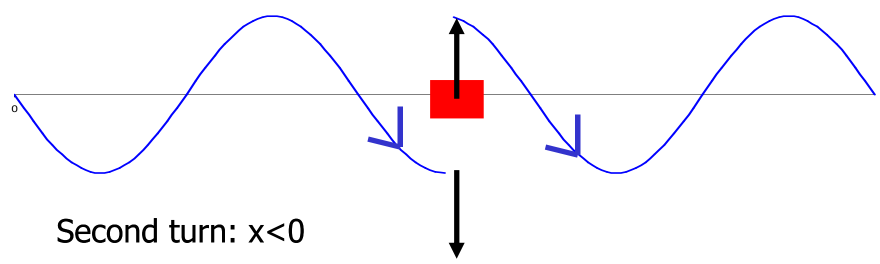
O.K. pour erreur dans un dipôle!
La perturbation s'annule après chaque tour!



Valeurs interdites pour $Q_{x,y}$

- Une erreur dans un quadrupôle donne un kick dont le signe dépend de x

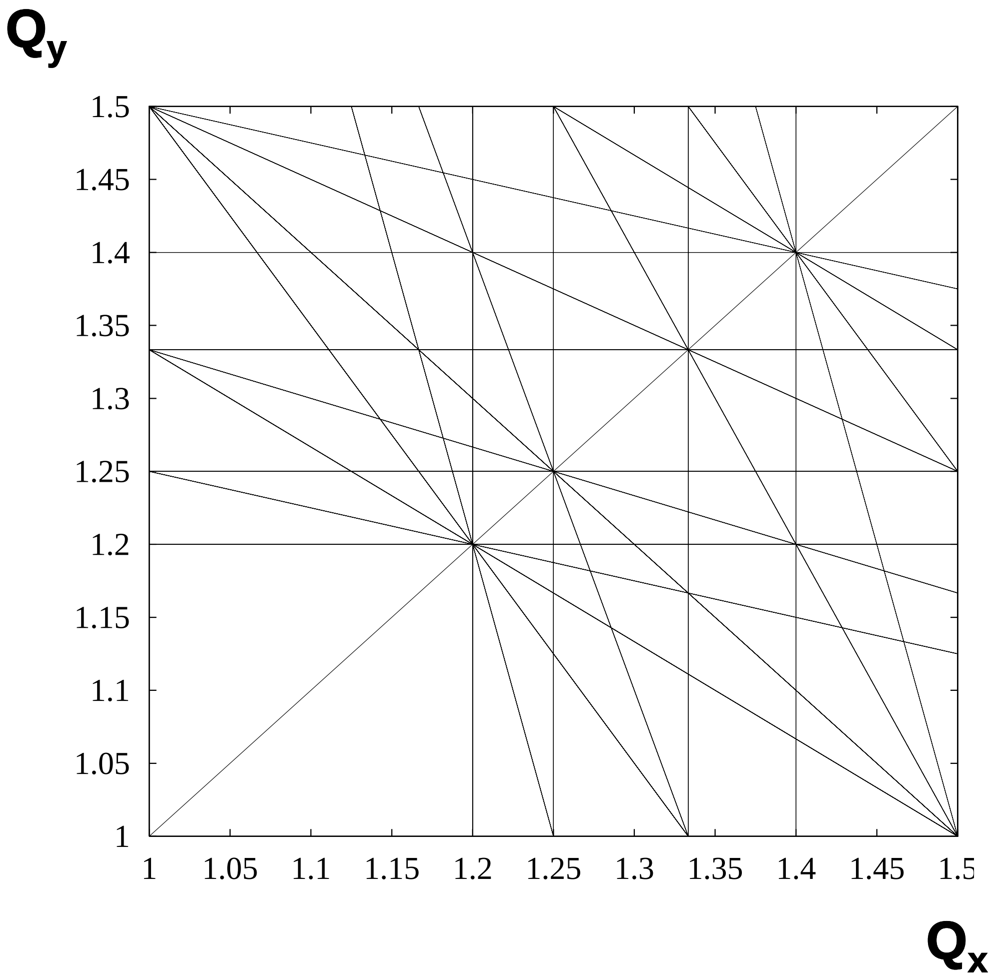
Tune Q demi-entier = N + 0.5



Interdit !
L'amplitude de l'oscillation augmente constamment!

Tune 1/3 d'entier serait o.k. pour un quadrupôle, mais pas pour un sextupôle…

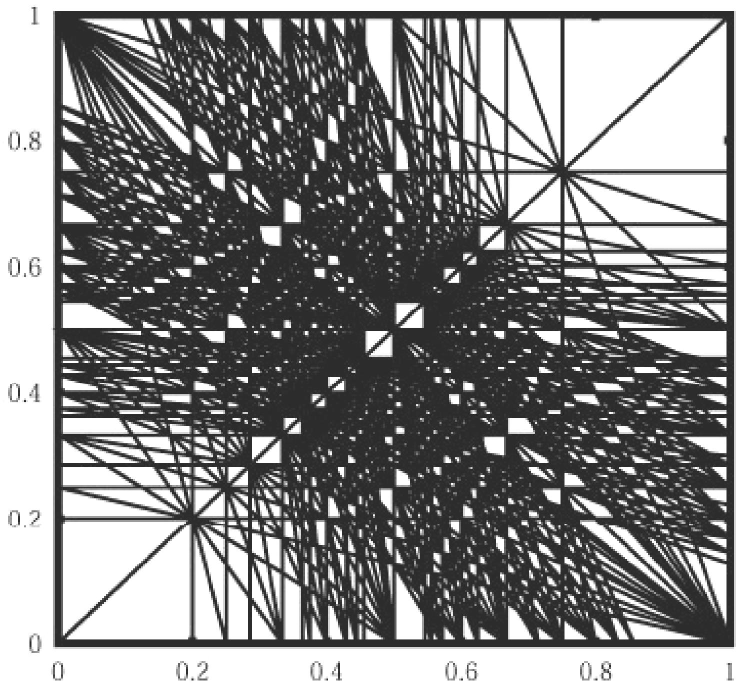
Diagramme des tunes pour leptons:



Valeurs des tunes (Qx et Qy) qui sont interdites pour éviter des résonnances.

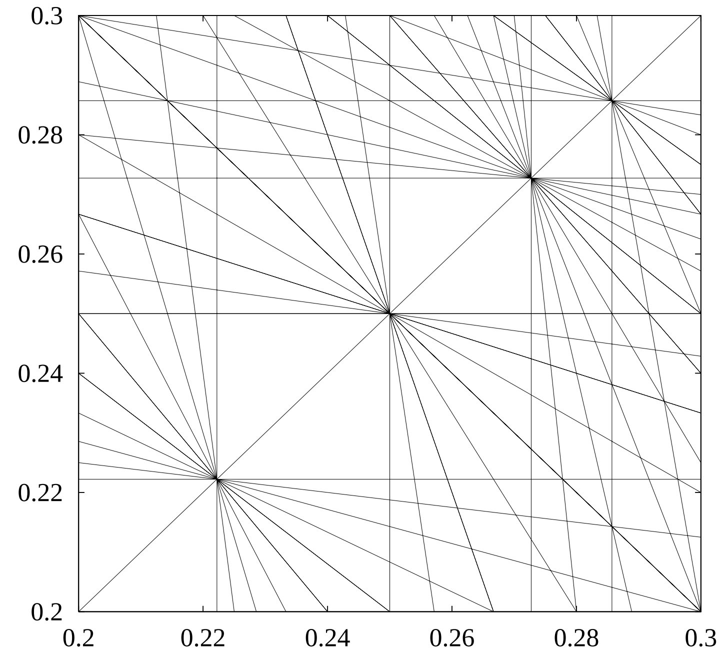
Plus l'ordre de la résonnance est bas, plus la résonnance est dangereuse.

Diagramme des tunes pour protons



Les particules ont une certaine distribution en énergie, le paquet de particules est donc représenté par une surface dans le diagramme plutôt que par un point.

LHC



Résumé pour les plans transverses:

- Une particule est décrite par sa position et sa pente (x, x') and (y, y')
- La trajectoire circulaire est obtenue avec des dipôles.
- Les particules sont maintenues ensemble grâce aux quadrupôles.
- Les particules éxécutent des oscillations betatroniques autour de l'orbite fermée.
- Le nombre de ces oscillations par tour (le tune Q) doit être choisi très précisément afin d'éviter les résonances.
- L'avance de phase par cellule (μ) peut être modifiée avec les quadrupoles.
- La chromaticité naturelle de la machine (<0) est corrigée avec les sextupoles.

Où en sommes-nous?

Nous avons vu toute la dynamique transverse du faisceau et nous savons que, essentiellement, la machine est composée d'une répétition périodique de dipôles, quadrupôles et sextupôles. Que nous manque-t-il encore?

Un système pour accélérer les particules

Un système pour avoir des collisions efficaces