

Les accélérateurs en physique des particules

ULB ~ 12 mai 2007 ~ Xavier Rouby ~ CP3 ~ UCL

Contenu

- Accélérateurs de particules
- La force de Lorentz
 - Champ électrique
 - Champ magnétique
- La luminosité
- Ouvertures géométriques
- Détecteurs vers l'avant

Accélérateurs de particules

Pour pouvoir étudier les particules éphémères, il faut pouvoir les créer. Pour cela : accélérateurs/collisionneurs de particules (LHC, HERA, Tevatron, LEP,...)

→ créer une collision avec suffisamment d'énergie dans le centre de masse telle que

$$E_{CM} \geq m_{particule} c^2$$

Quelques nombres :

W : 80.4 GeV

Z : 91.2 GeV

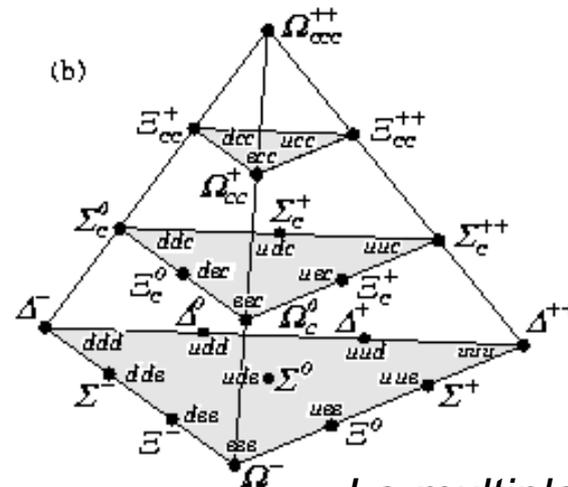
μ : 0.1 GeV ; 2.2×10^{-6} s

τ : 1,8 GeV ; 290×10^{-15} s

K^+ : 0.5 GeV ; 12.4×10^{-9} s

B^+ : 5.3 GeV ; 1.6×10^{-12} s

J/ψ : 3.1 GeV



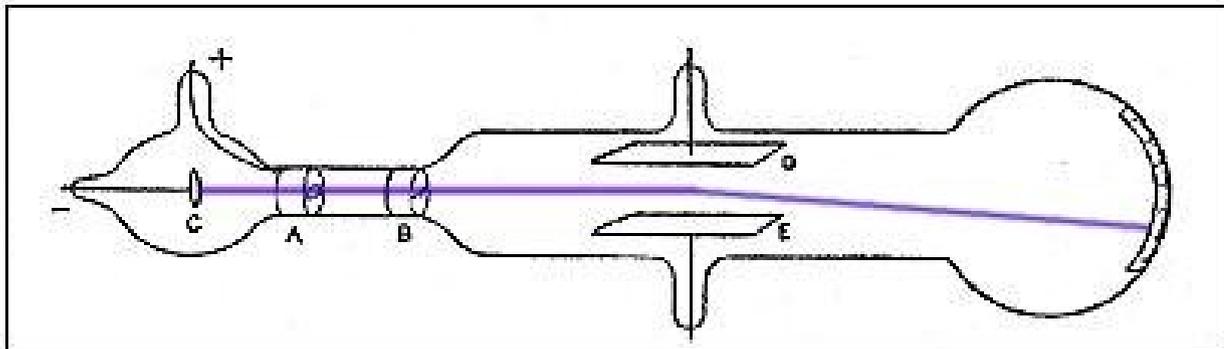
Le multiplet des baryons

Tubes à rayons cathodiques

JJ Thomson :

découverte de l'électron,
mesure de q/m

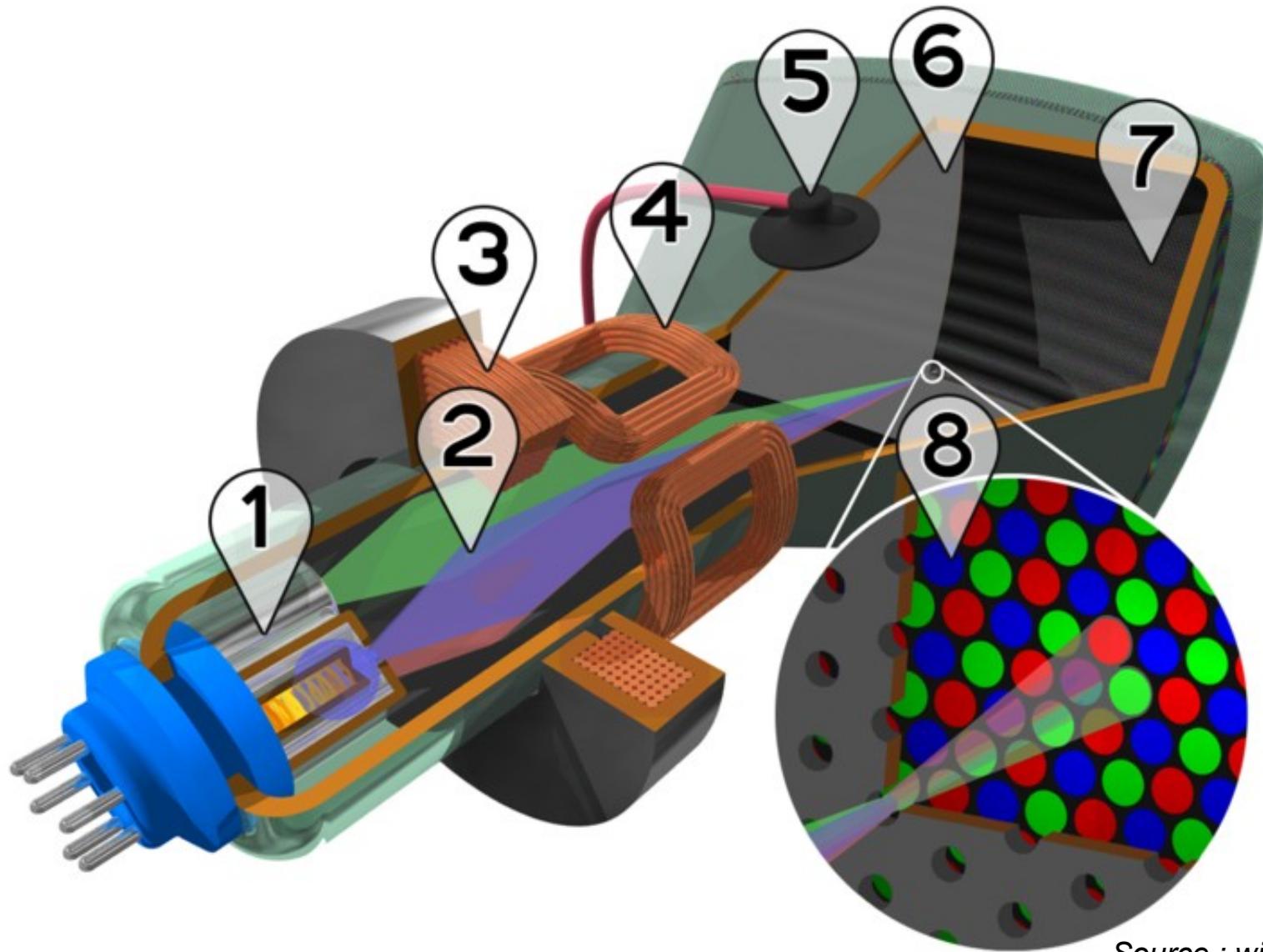
Prix Nobel de Physique 1906



Source : [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

Les rayons cathodiques réagissent aux champs électrique et magnétique

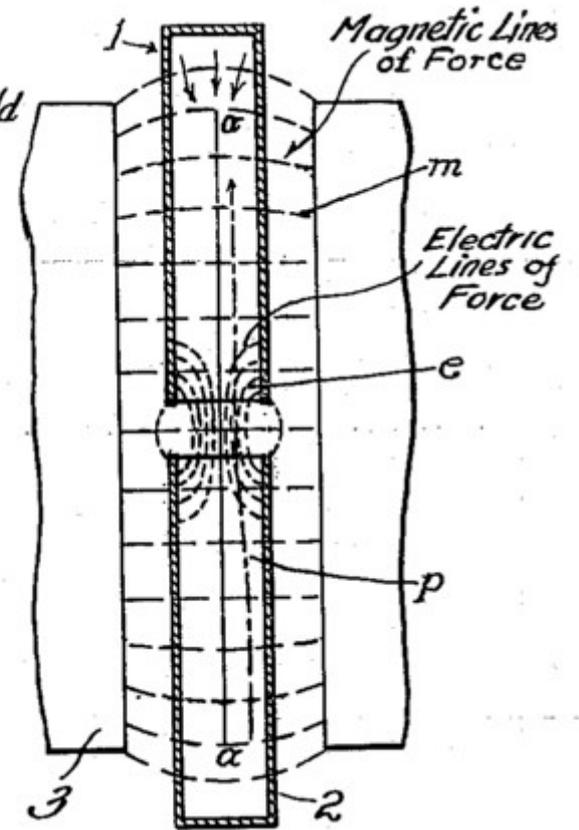
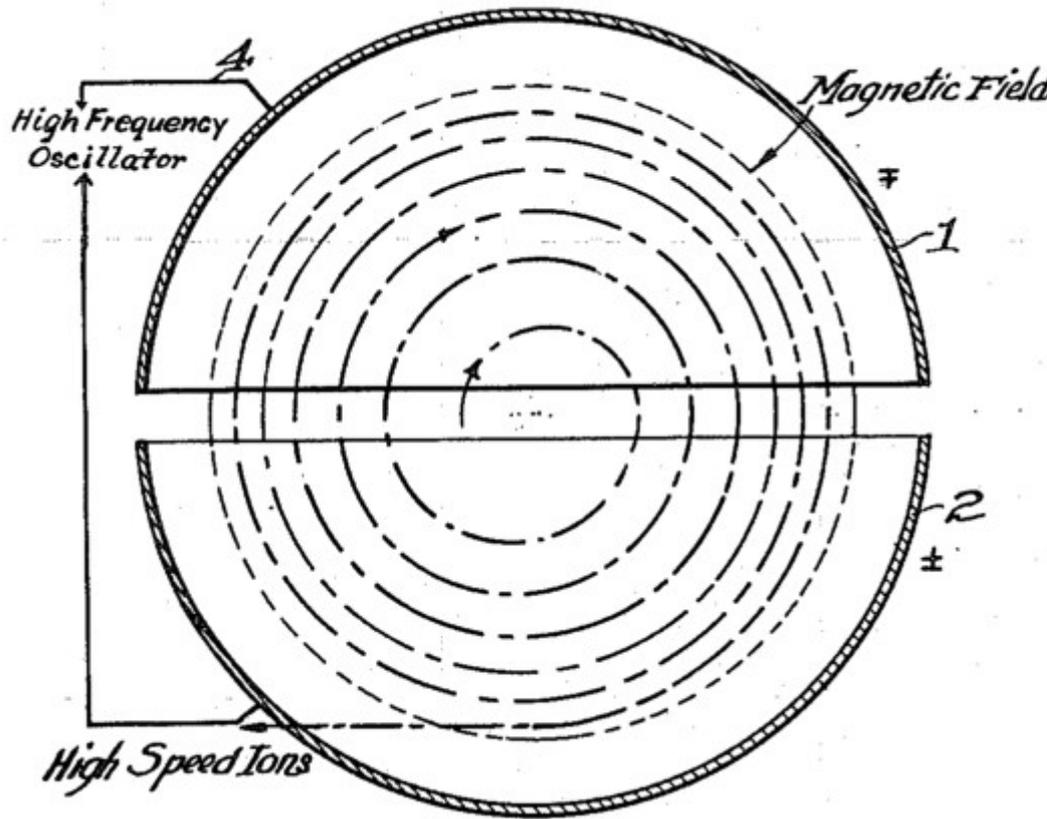
CRT : Télévision



Source : wikipedia.org

Cyclotron

$$\frac{mv^2}{r} = Bqv$$

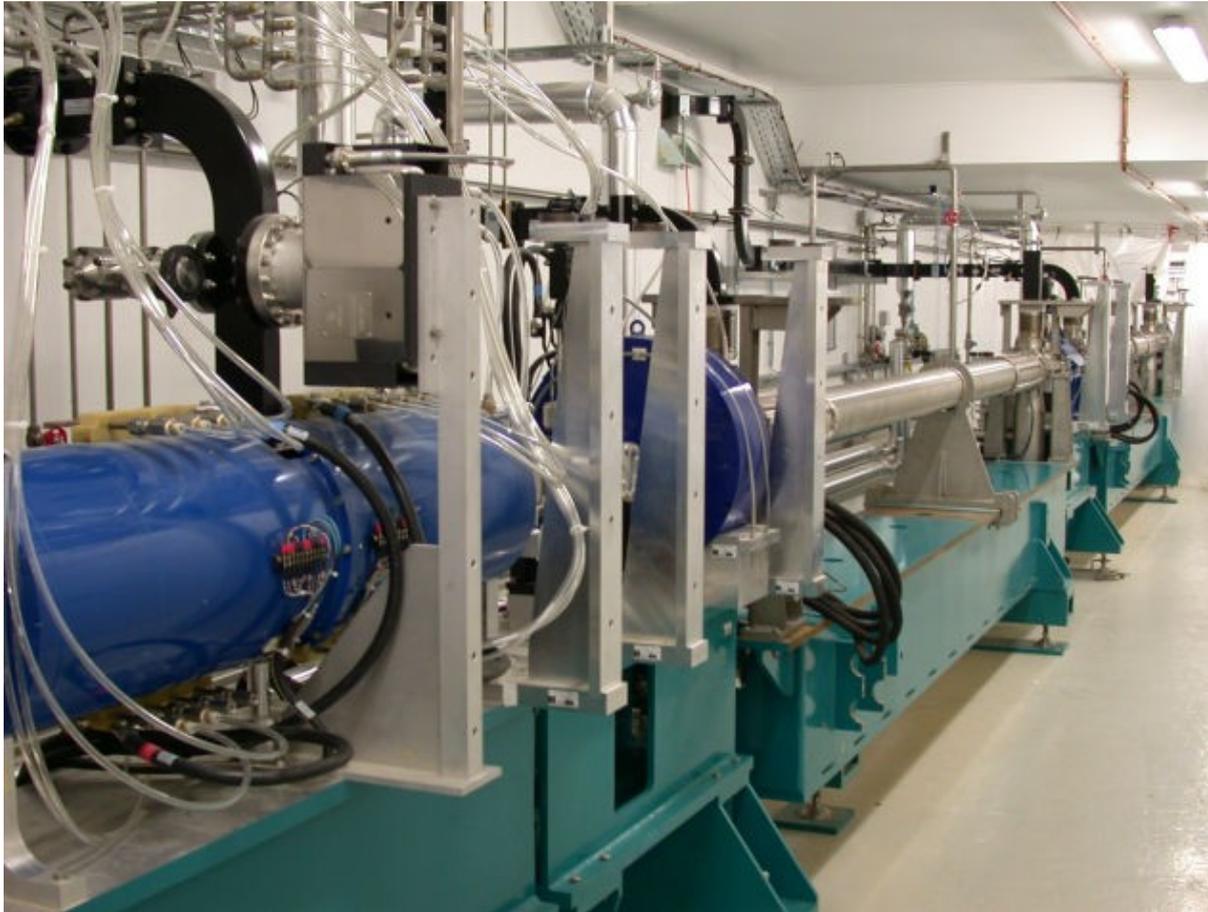


Source : wikipedia.org

Prix Nobel de Physique 1939

Ernest O. Lawrence : invention du cyclotron in 1929.

Accélérateur linéaire

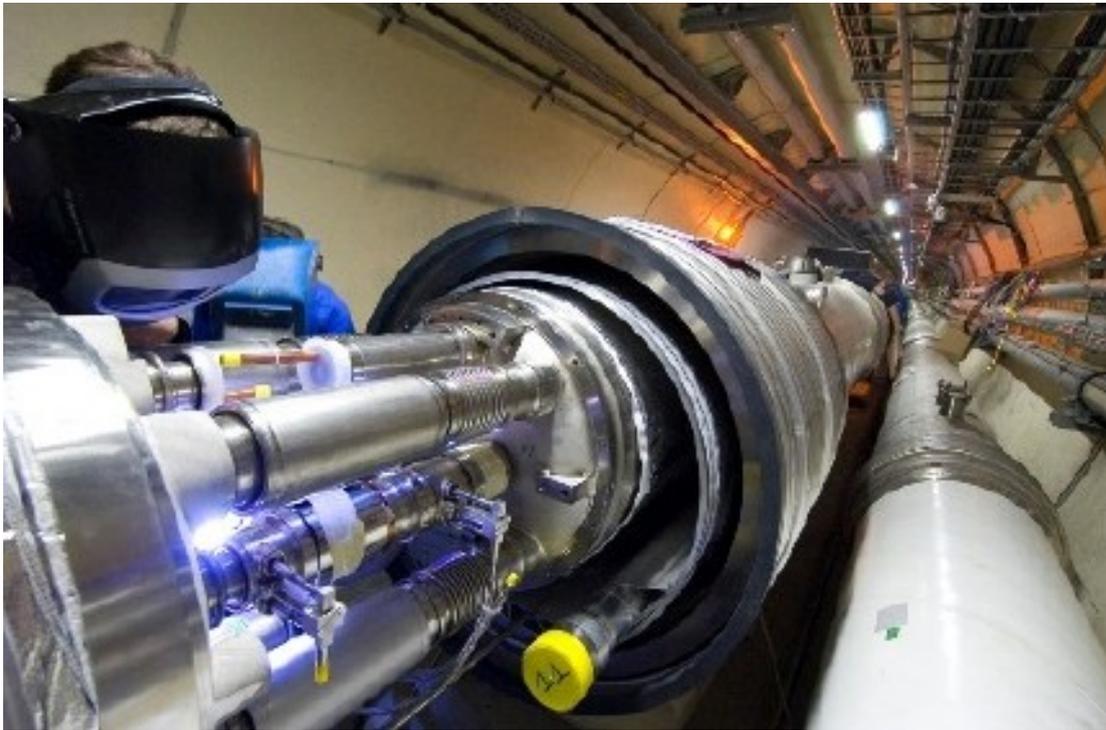


Exemple d'un accélérateur linéaire (linac)

- + pas trop de rayonnement
- une seule accélération

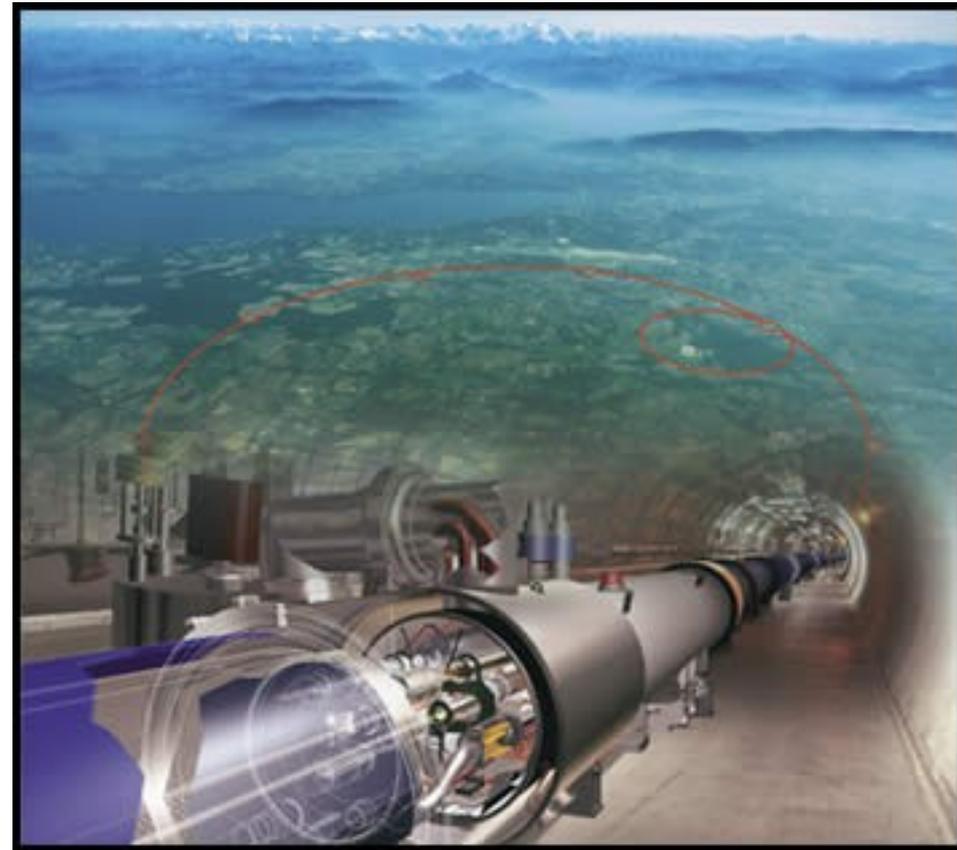
Source : wikipedia.org

Accélérateur circulaire

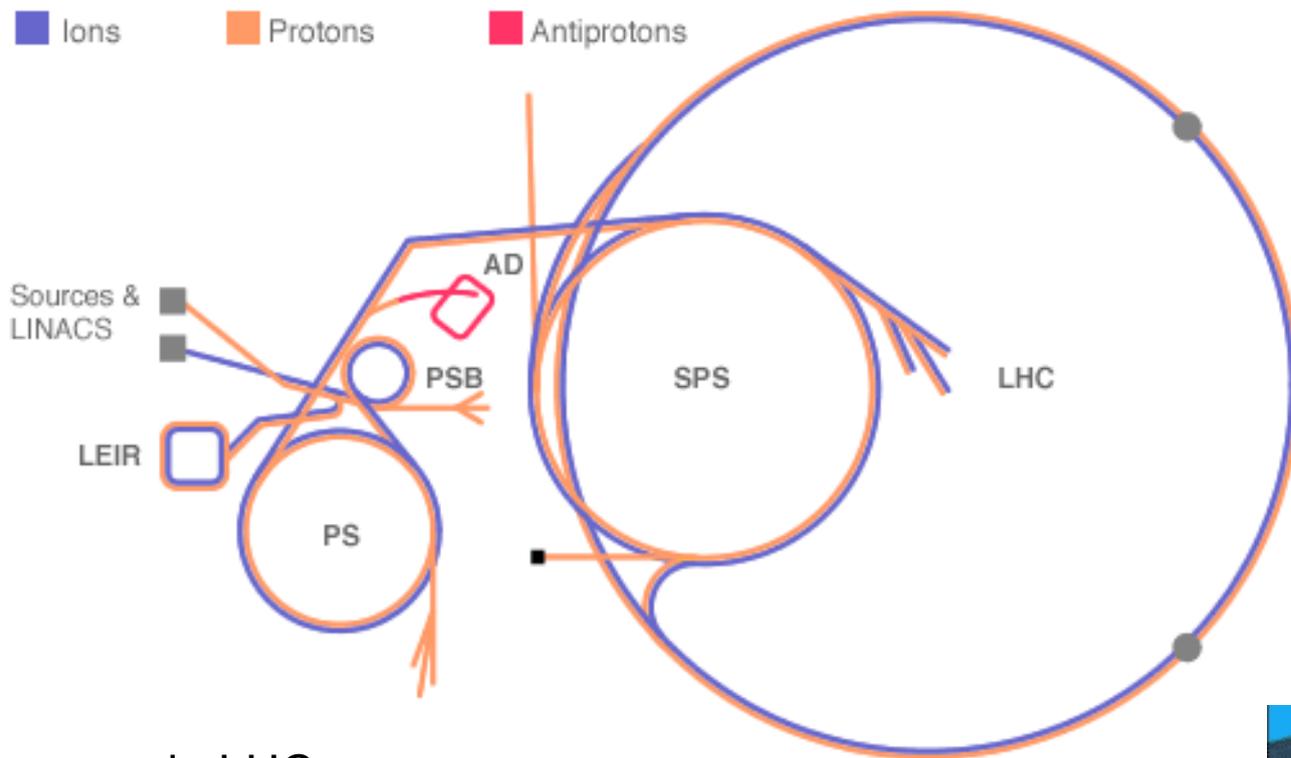


+ faisceau accéléré à chaque tour
- rayonnement synchrotron

Exemple d'un accélérateur circulaire : le LHC
(malgré les apparences)



Accélérateurs linéaires et circulaires... Souvent une suite d'accélérateurs !

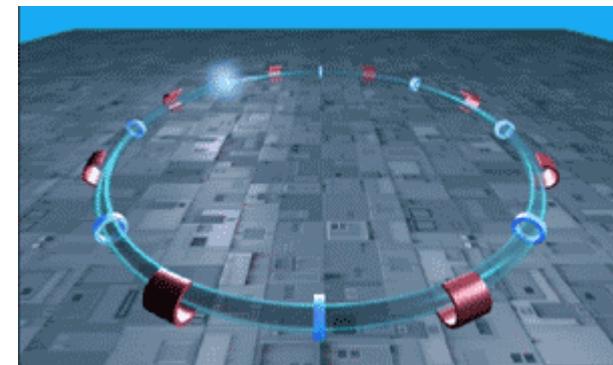


Exemple : pour le LHC :

Source -> LINAC -> PSB -> PS -> SPS -> LHC

linéaire

circulaires



- Accélérateurs de particules

- La force de Lorentz

- Champ électrique
- Champ magnétique

- La luminosité
- Ouvertures géométriques
- Détecteurs vers l'avant

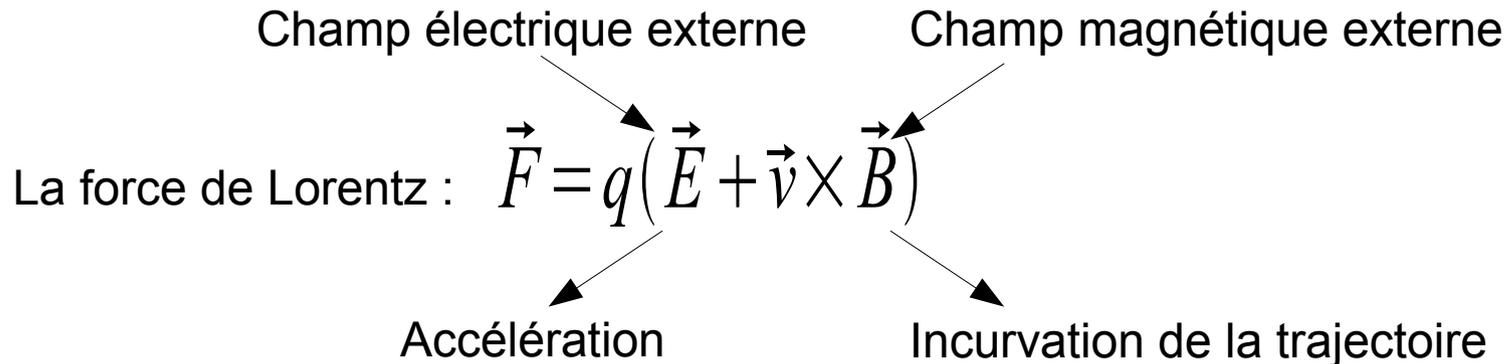
La force de Lorentz

D'un point de vue classique, la force de Lorentz nous dit qu'un champ électrique va permettre d'accélérer une particule, tandis qu'un champ magnétique va incurver sa trajectoire :

Champ électrique externe Champ magnétique externe

La force de Lorentz : $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Accélération Incurvation de la trajectoire



Les deux composantes ont des influences complémentaires :

- un champ **électrique** : augmente l'énergie cinétique des particules
- un champ **magnétique** : incurve la trajectoire

Champ électrique

Augmentation de l'énergie (cinétique) des particules.

$$\vec{F} = q \vec{E} = m \vec{a}$$

Pour accélérer une particule,

il faut de **grands gradients** (risque de claquage)

il faut passer **souvent** dans le champ accélérateur

(pas pour accélérateurs. linéaires – attention à la *radiation synchrotron*)

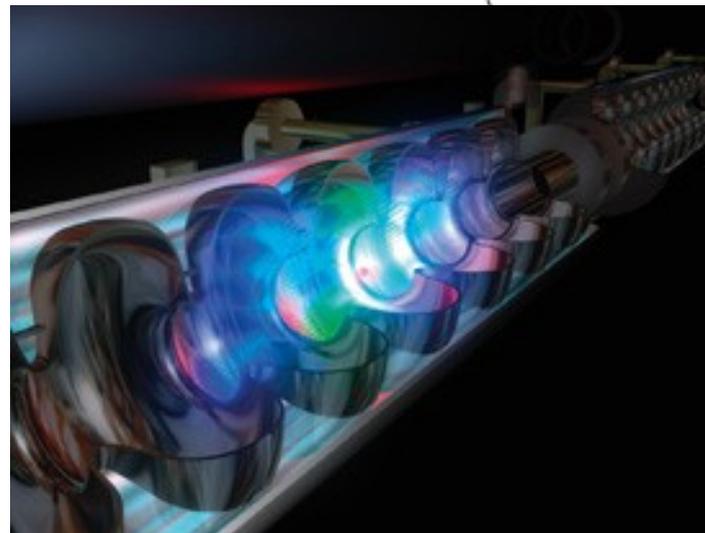
Accélération

Condensateur

Champs statiques

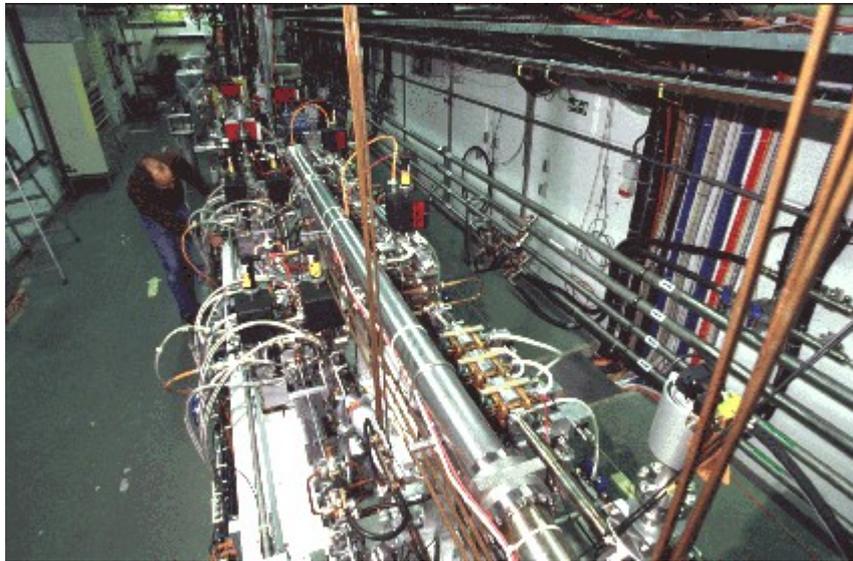
Cavité HF

Champs variables (\sim GHz)



Futur (???)

Accélération par un autre faisceau (*Clic*)



Interaction Laser-Plasma (*Dream Beam*)

Champ magnétique

Modification de la trajectoire des particules.

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} = m \vec{a}$$

Puissance liée au champ magnétique

$$P = \vec{v} \cdot \vec{F} = \vec{v} \cdot (q \vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

Le champ magnétique ne peut donc pas modifier l'énergie des particules

Développement en pôles

$$\frac{q}{p} B_y(x) = \frac{q}{p} B_y + \frac{q}{p} \frac{\partial B_y}{\partial x} x + \frac{q}{p} \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} x^2 + \dots$$

Dipôle

Quadrupôle

Sextupôle



Dipôles

Terme constant : rotation

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \frac{q}{m} \vec{v} \times \vec{B}$$

Solution à l'équation du mouvement (calcul relativiste !)

$$x(t) = x_0 + \frac{v_{x0}}{\omega} \sin \omega t + \frac{v_{z0}}{\omega} \cos \omega t$$

$$y(t) = y_0 + v_{y0} t$$

$$z(t) = z_0 - \frac{v_{x0}}{\omega} \cos \omega t + \frac{v_{z0}}{\omega} \sin \omega t$$

Equation d'un cercle de rayon $R = \frac{m}{q} \frac{v}{B_y}$

Quadrupôles

Gradient constant : focalisation

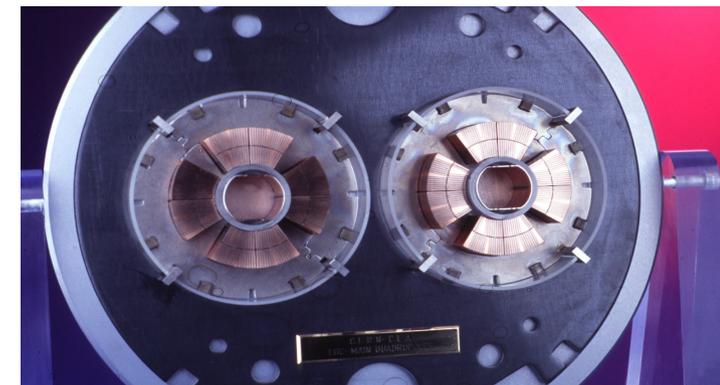
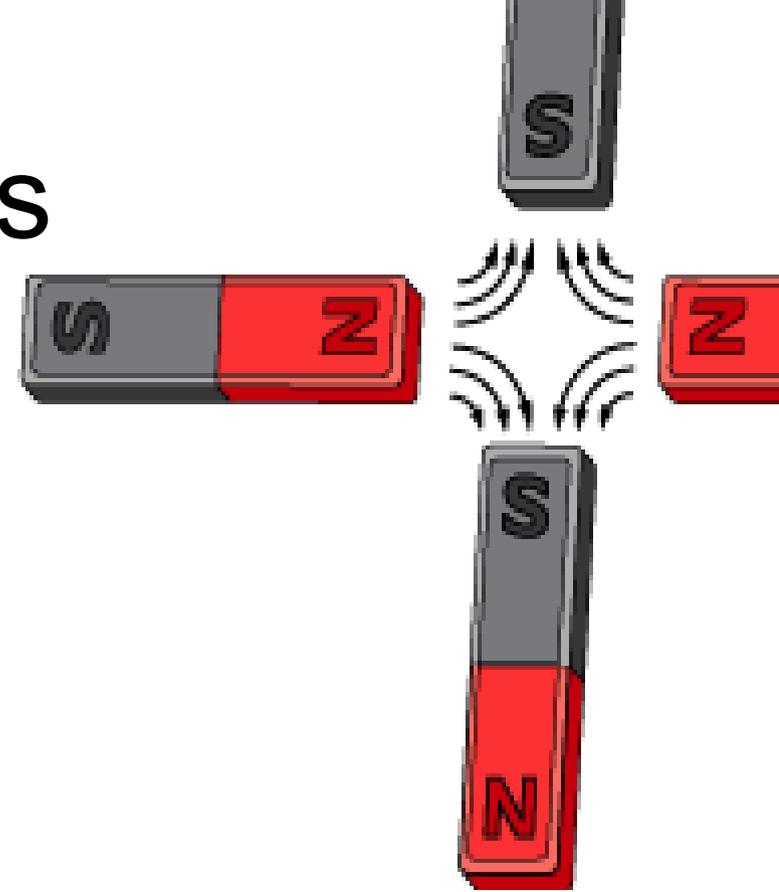
$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \frac{q}{m} \vec{v} \times \frac{d\vec{B}}{dx}$$

Solutions :

$$x \text{ et } v_x : A \cosh(\Omega) + B \sinh(\Omega)$$

$$y \text{ et } v_y : C \cos(\Omega) + D \sin(\Omega)$$

Focalisation dans un plan + défocalisation dans l'autre



Solutions générales

Pour une succession de dipôles ($1/R$) et de quadrupôles (k) :

$$x''(s) + \left(\frac{1}{R^2(s)} - k(s) \right) x(s) = \frac{1}{R(s)} \frac{\Delta p}{p}$$

$$y''(s) + k(s)y(s) = 0.$$

Linéarisation possible : **matrices de transport**

$$X(s) = X(0) \underbrace{M_1 M_2 \dots M_n}_{M_{\text{beamline}}}$$

Exemple :

$$M_{\text{vertical-quadrupole}} = \begin{pmatrix} \cosh(\omega) & \sqrt{k} \sinh(\omega) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1/\sqrt{k}) \sinh(\omega) & \cosh(\omega) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega) & -\sqrt{k} \sin(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1/\sqrt{k}) * \sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dipôles / quadrupôles LHC

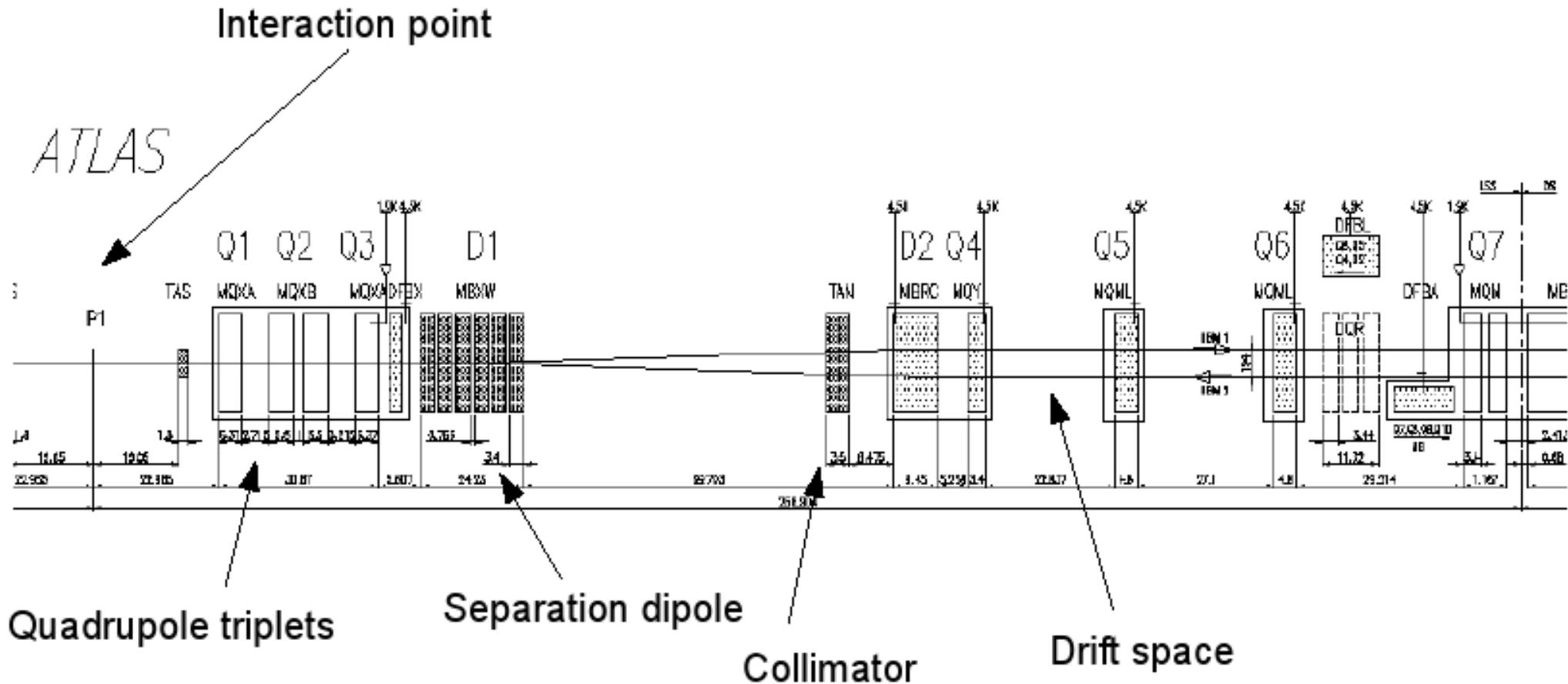
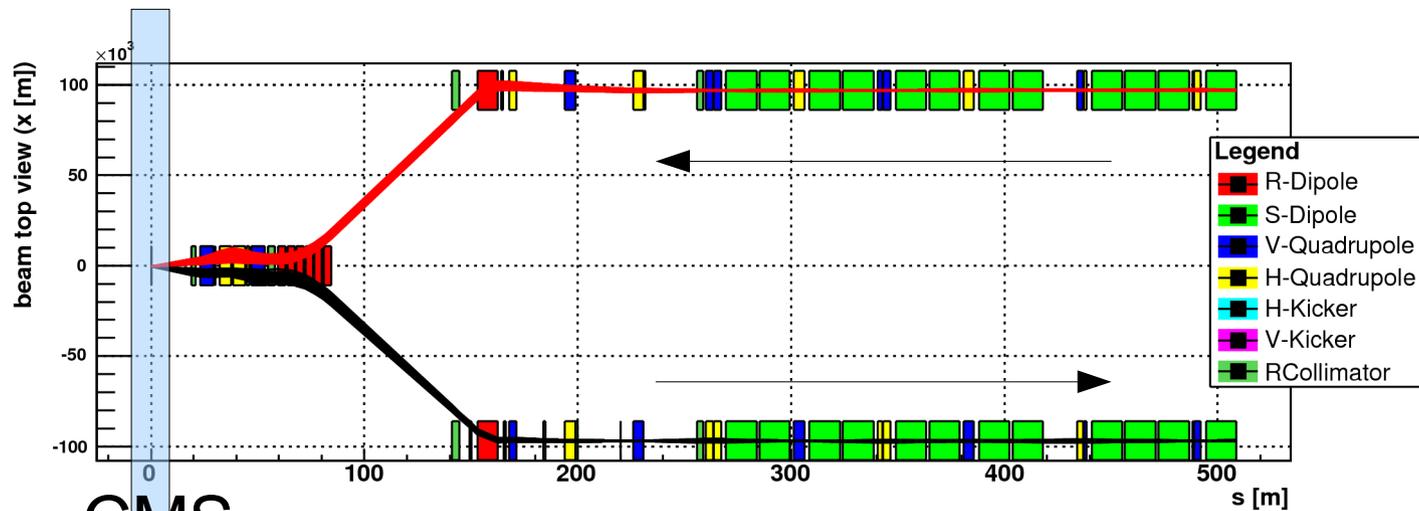
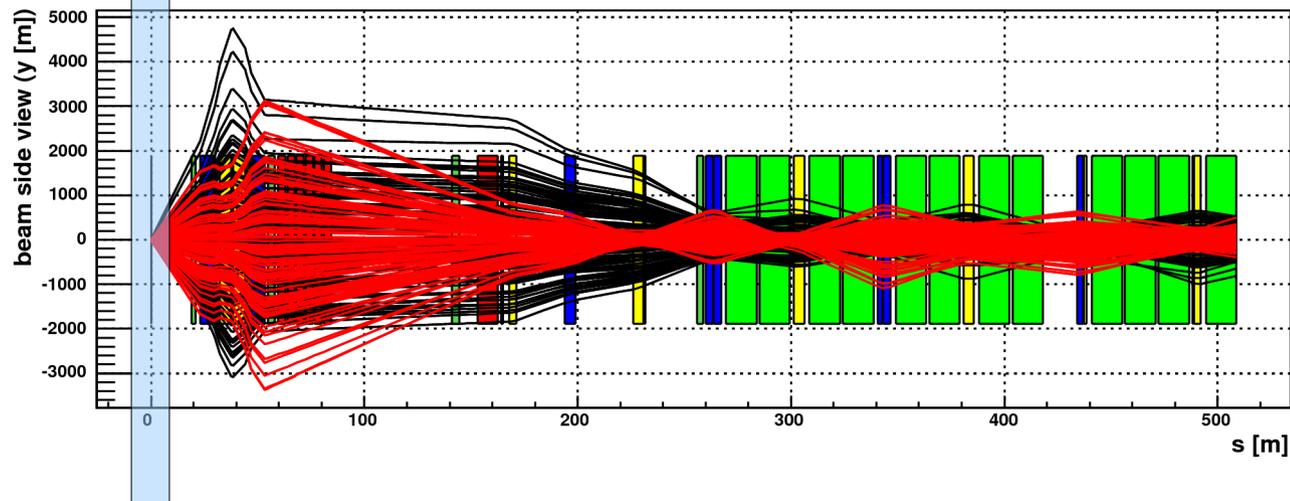


Illustration : faisceaux LHC à CMS...



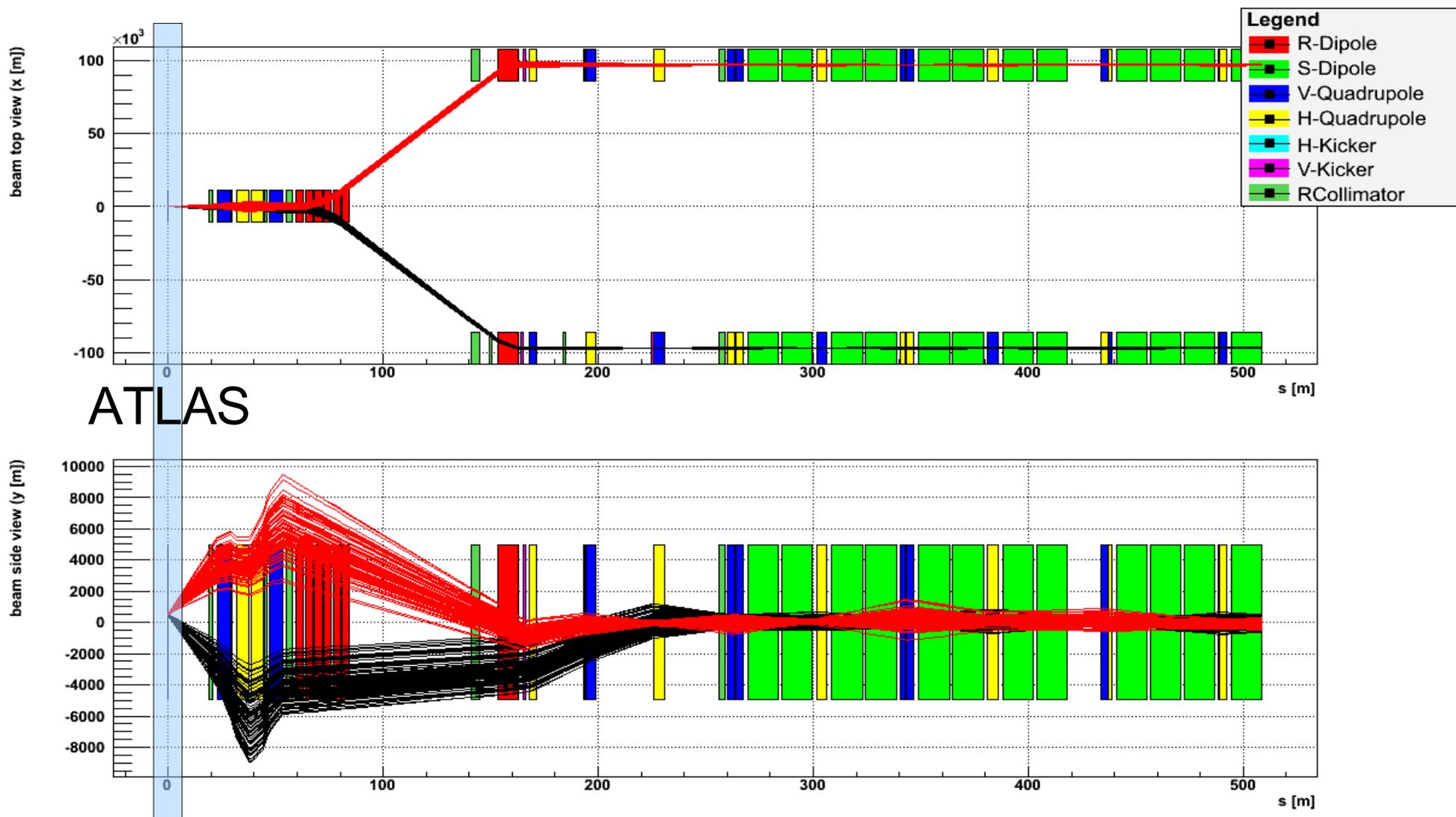
CMS



Hector : logiciel de transport de particules

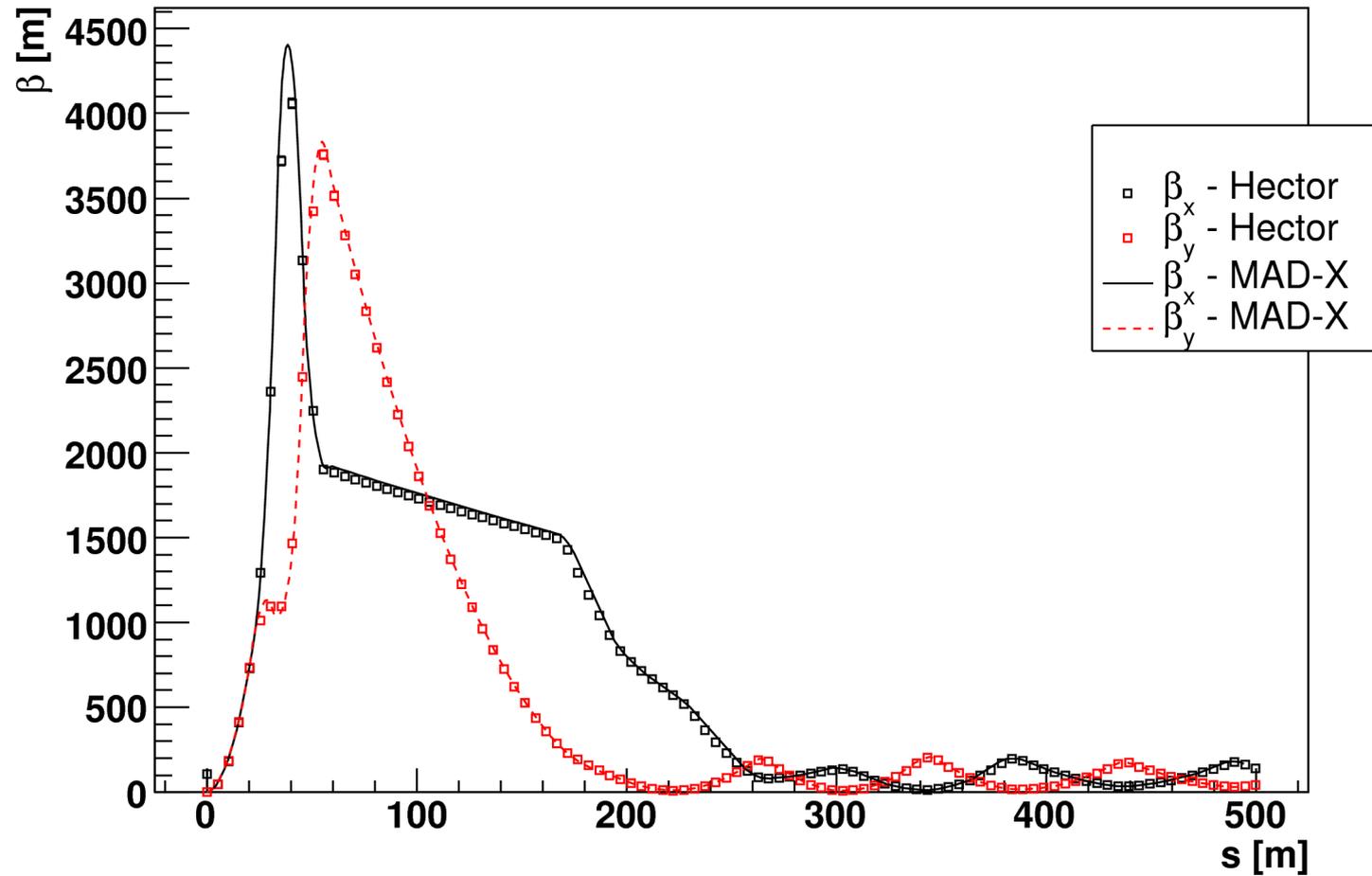
J. de Favereau – X. Rouby

... et à Atlas



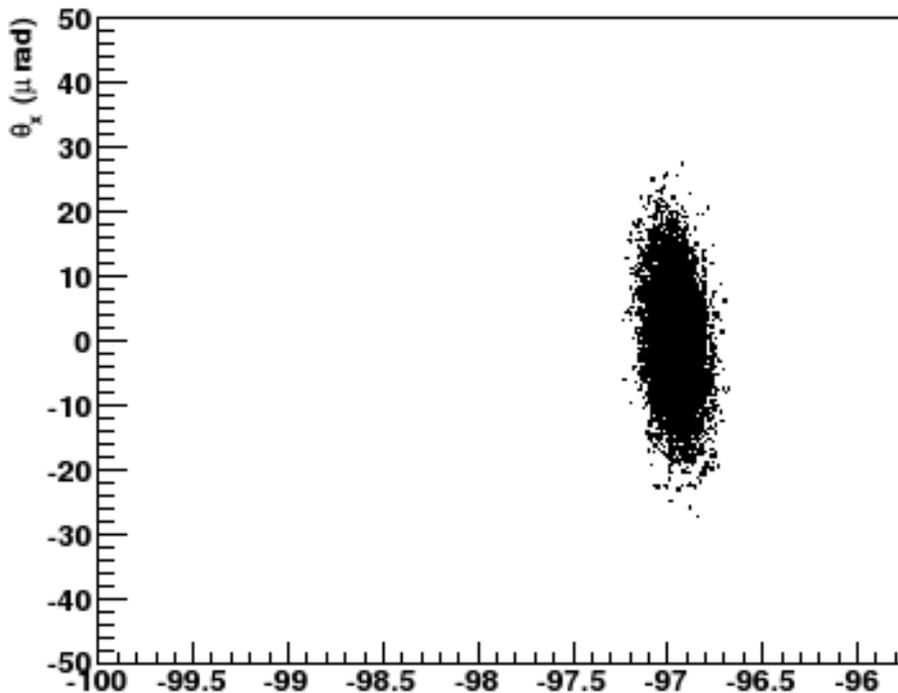
Fonctions β

β functions - beam 1, backward



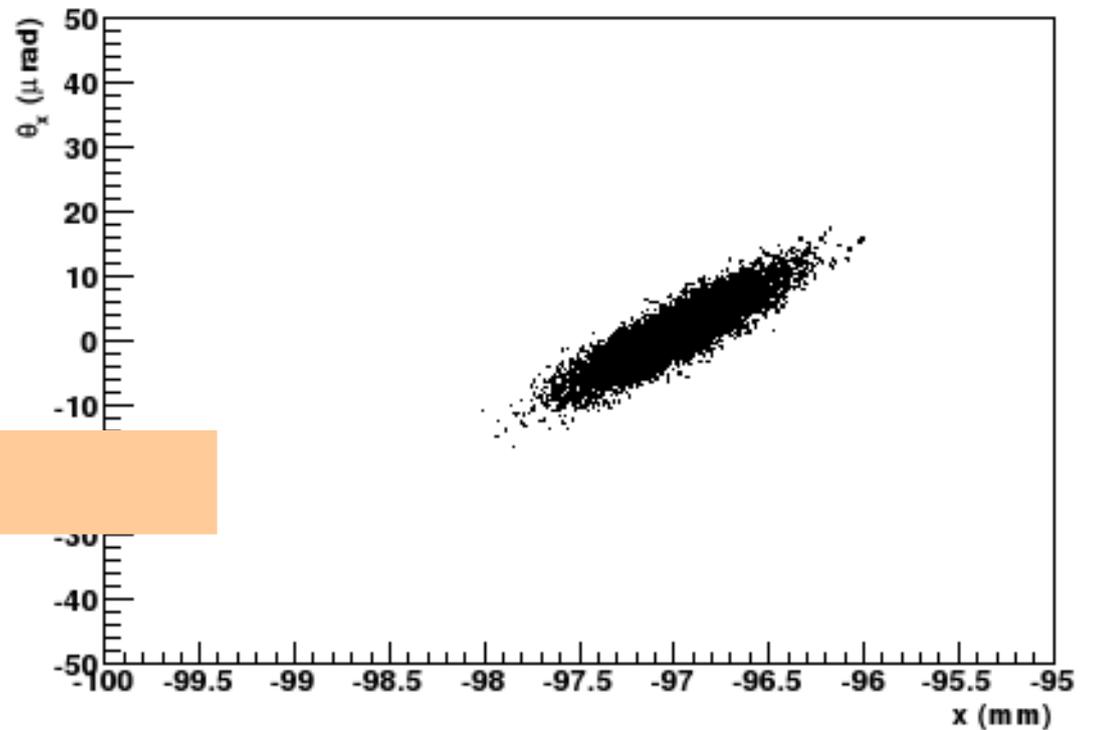
Théorème de Liouville

Beam 1 profile at 220m



L'hyper-volume dans l'espace de phase (r , p) est conservé

Beam 1 profile at 420m



L'émittance du faisceau reste constante

Rayonnement synchrotron

Une charge accélérée radie de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques :

Accélération linéaire :

$$P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0(m_0 c^2)^2} \left(\frac{dE}{dx} \right)^2 \quad \text{négligeable}$$

Accélération circulaire :

$$P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^2} \quad \text{non négligeable}$$

$$\Delta E [keV] = 88.5 \frac{E^4 [GeV^4]}{R [m]} \quad \text{pour les électrons}$$

limitation des accélérateurs circulaires...

Accélérateurs de particules

La force de Lorentz

Champ électrique

Champ magnétique

- La luminosité

Ouvertures géométriques

Détecteurs vers l'avant

La luminosité

Taux d'interactions : R : expériences de comptage

$$R = L \times \sigma$$

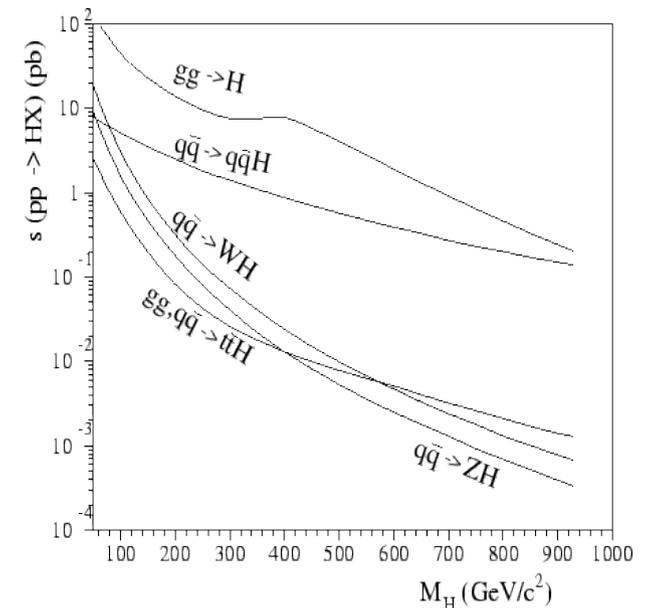
Luminosité : dépend de l'accélérateur
Section efficace : dépend du processus

$$L = \frac{f n_1 n_2}{4 \pi \sigma_x \sigma_y}$$

f : fréquence de collisions
 n1 et n2 : nombre de particules
 σ_x et σ_y : tailles des faisceaux à la collision

Grande luminosité requise pour la statistique

mais attention au *pile-up* ...



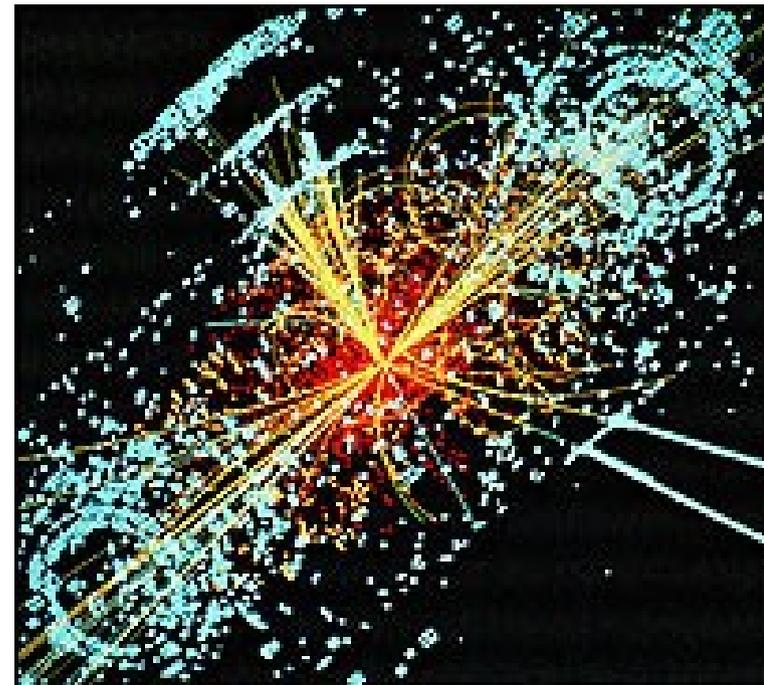
Interactions simultanées

L'augmentation de la luminosité peut avoir pour effet d'augmenter le nombre d'**interactions simultanées** !

C'est le **pile-up**

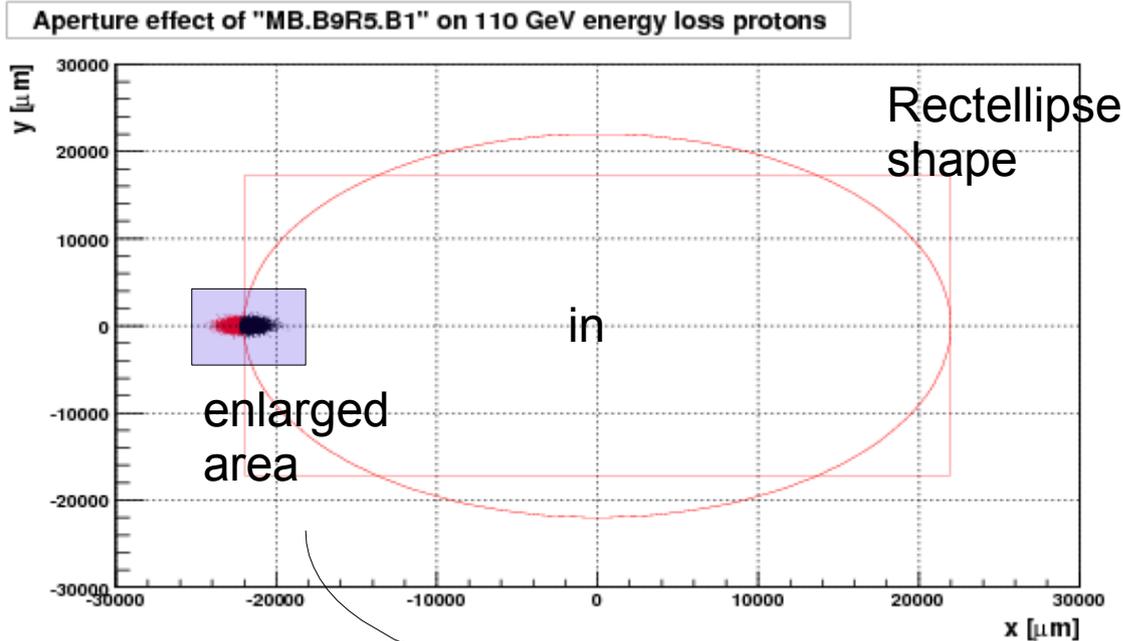
L ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	événements simultanés
10^{32}	1
10^{33}	~8
10^{34}	~20

Attention aux bruits de fond...



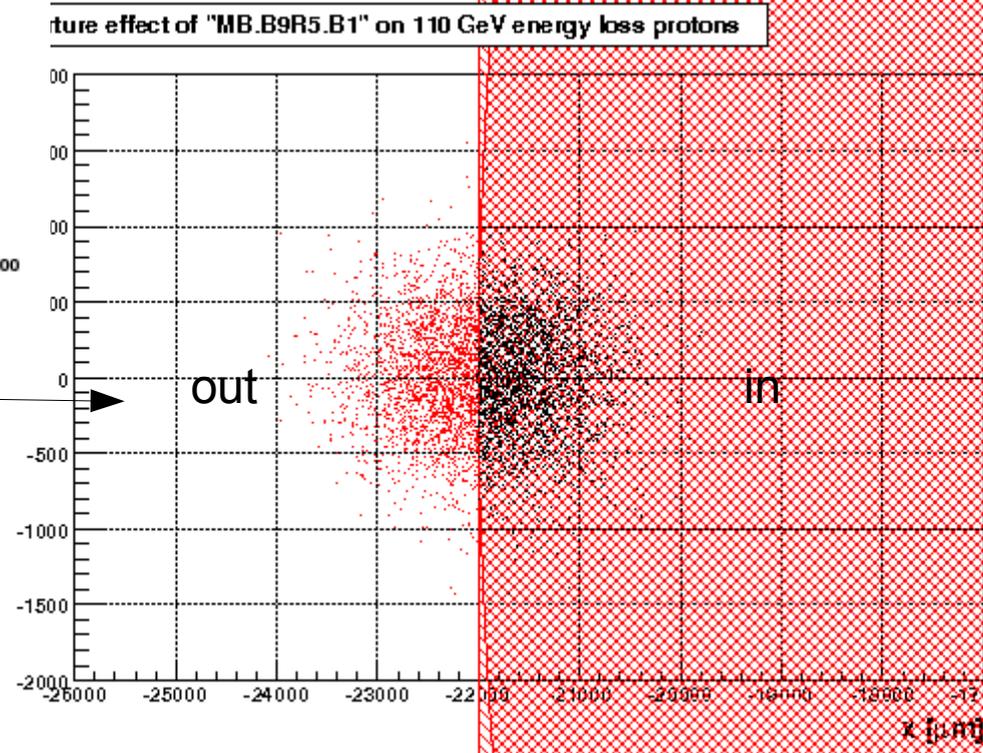
- Accélérateurs de particules
- La force de Lorentz
- La luminosité
- Ouvertures géométriques
- Détecteurs vers l'avant

Ouvertures géométriques



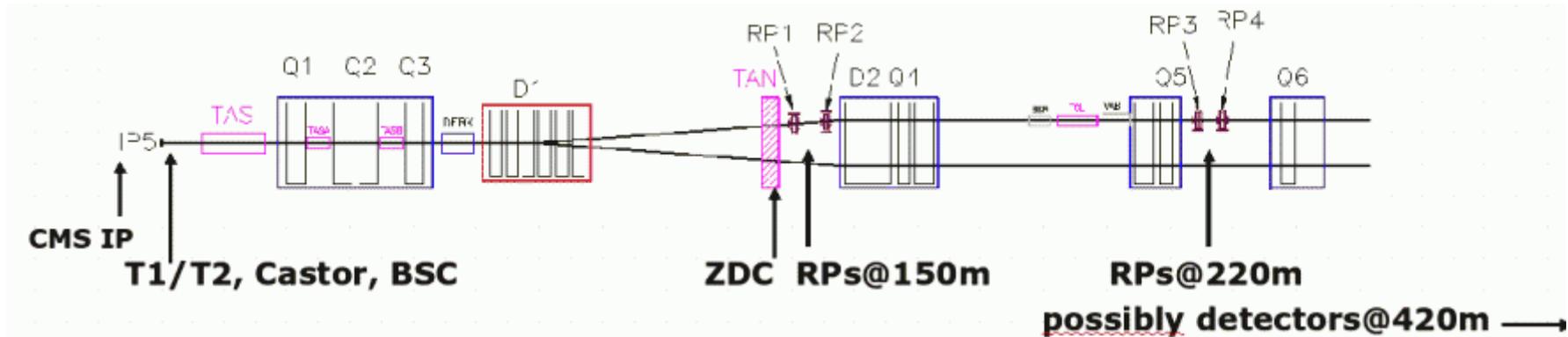
Aperture :

geometrical aperture



- Accélérateurs de particules
- La force de Lorentz
- La luminosité
- Ouvertures géométriques
- Détecteurs vers l'avant

Détecteurs vers l'avant



But : Augmenter la couverture de CMS

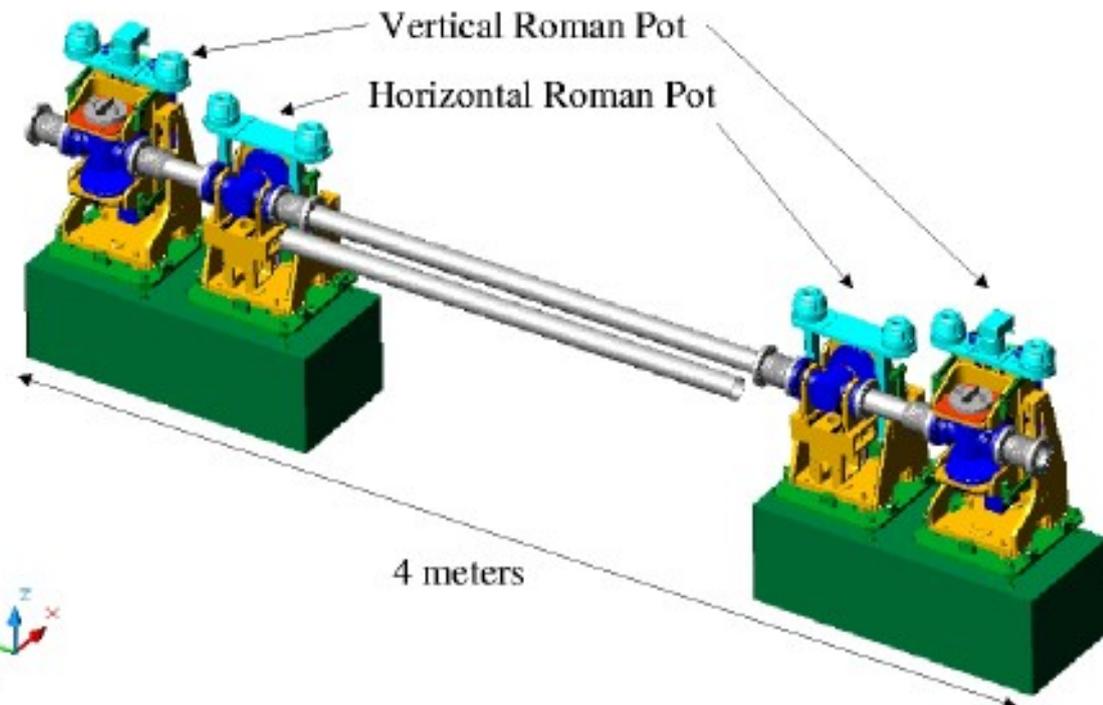
Calorimètres : Castor, ZDC

Trajectographes : T1/T2/Roman Pots

But : Surveiller les faisceaux

Beam Position Monitors

Luminosity Monitors

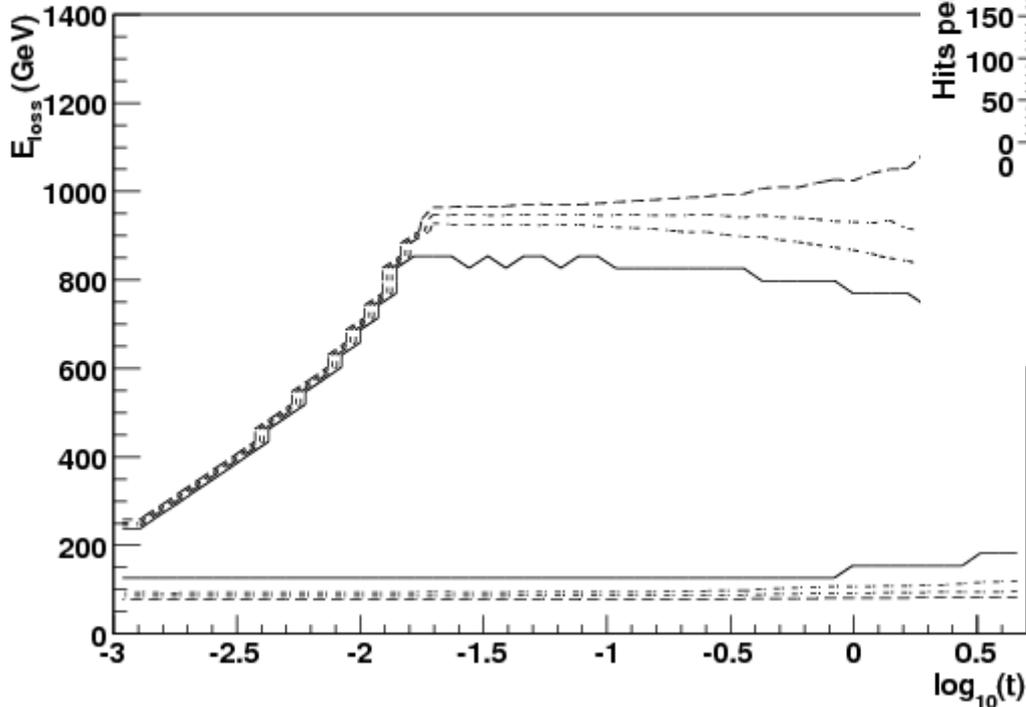


Détecteurs vers l'avant

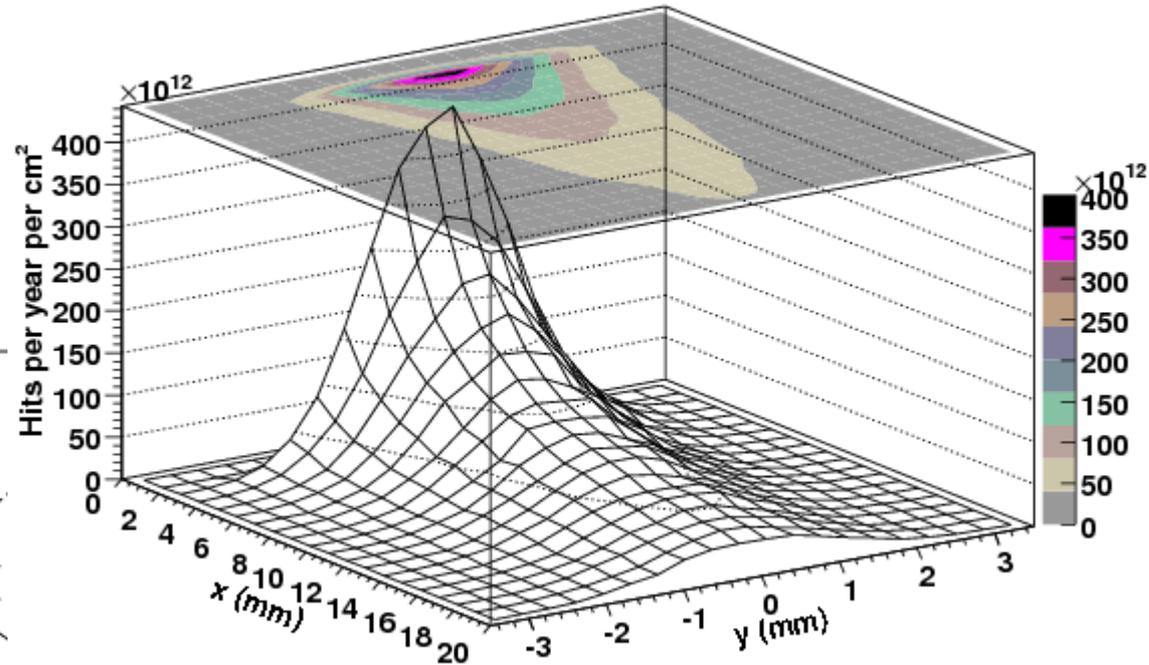
ex : physique diffractive, photon, ...

Chaque détecteur a une certaine fenêtre *d'acceptance* pour les protons

Acceptance of roman pots at 220m (2000 μm) for beam 1



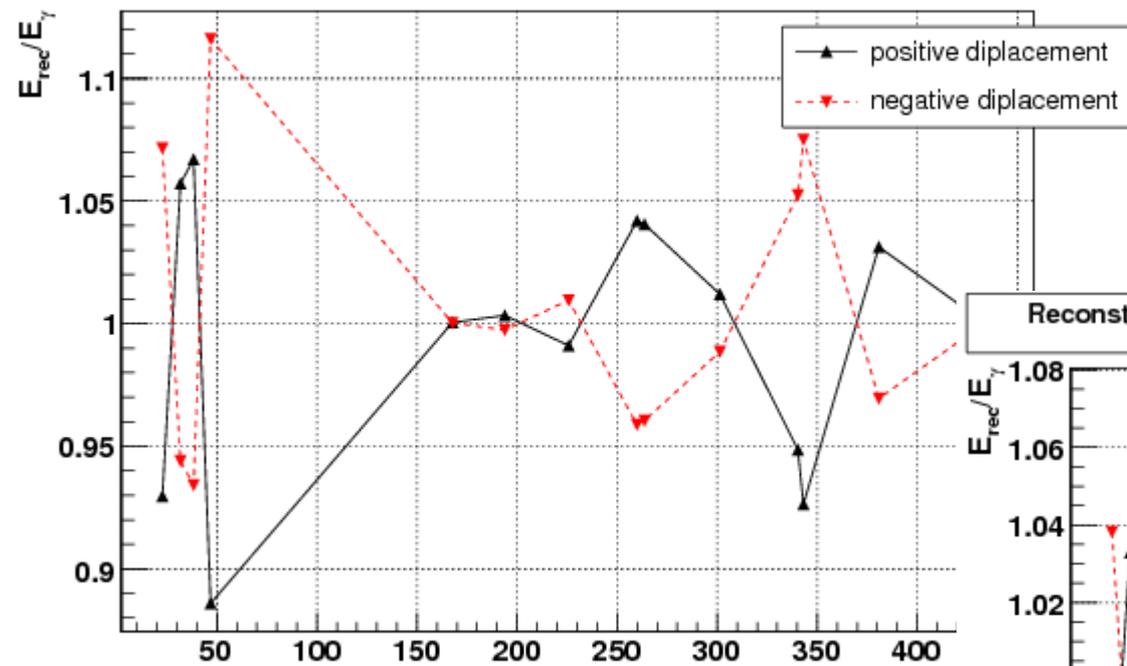
Hits in the roman pots at 220m ($L=2 \times 10^6 \text{ mb}^{-1} \text{ s}^{-1}$)



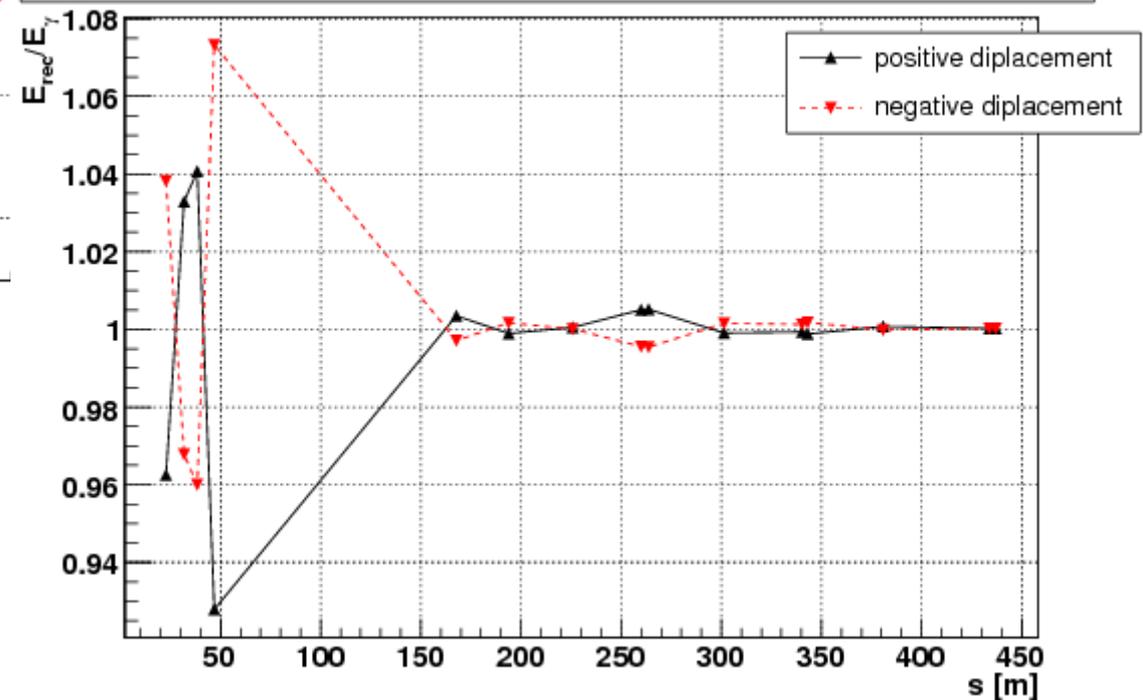
La principale cause de radiations est ... la physique qui nous intéresse !

Misalignement du faisceau

Reconstructed energy for quadrupole displacement of $500\mu\text{m}$ ($E_\gamma = 100\text{ GeV}$)



Reconstructed energy for quadrupole displacement of $500\mu\text{m}$ ($E_\gamma = 100\text{ GeV}$)



Misalignment

Misalignment impact on Higgs mass reconstruction

