

Physique des particules

MASTER 1 de physique fondamentale
Université Joseph Fourier – Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M1Particules/>



Production et accélération de particules

La production de particules

Où trouver les particules à étudier ?

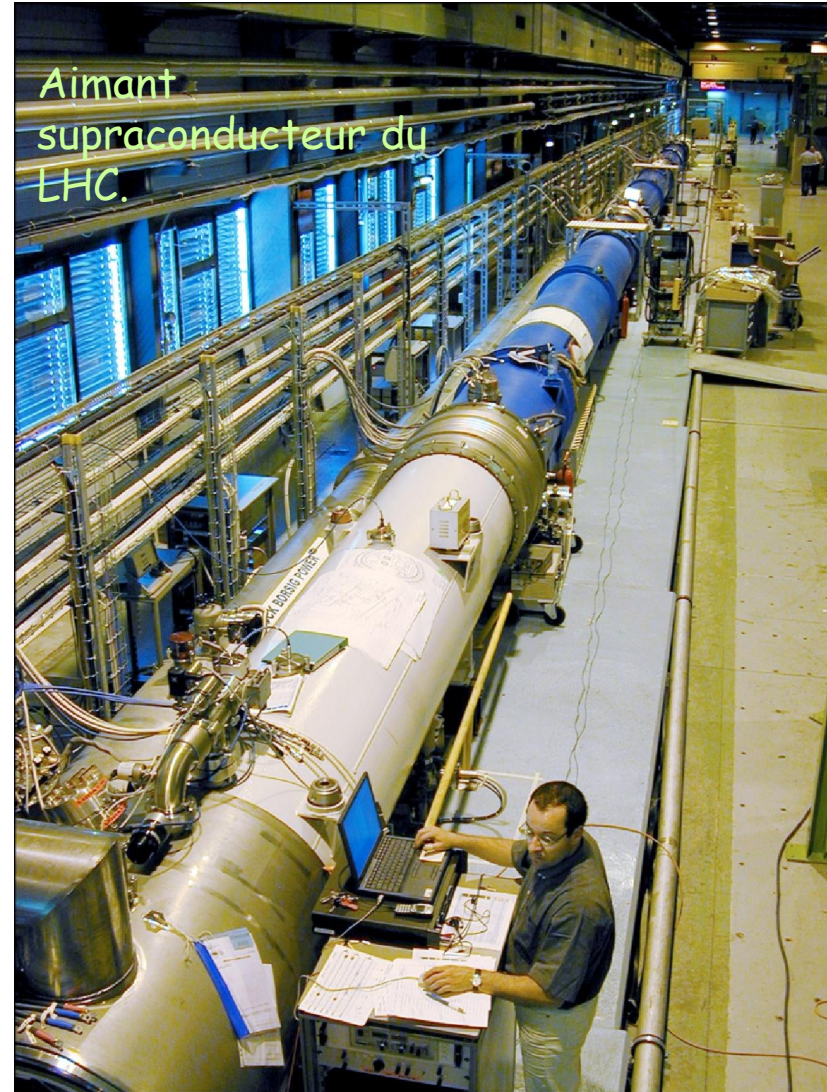
L'énergie de liaison dans les noyaux est trop élevée (interaction forte) pour espérer casser les noyaux par des processus chimiques ou thermiques, par exemple.

Il faut amener de l'énergie pour casser les nucléons : accélération puis collision de particules (protons, électrons)

- diffusion dure
- annihilation matière/antimatière

L'énergie disponible permet de produire de nombreuses particules.

Création de particules autres que celles de notre environnement ordinaire (autre que e^- , n , p , n et g).



Méthodes de production

Les particules étudiées peuvent être produites :

- par des **accélérateurs de particules** : cible fixe, collisionneur
- par des **objets cosmologiques** : rayonnement cosmique
- par des **réactions nucléaires** (neutrinos produits par les centrales électriques).

Le rayonnement cosmique

Rayonnement cosmique : particules accélérées dans des événements cosmiques violents, qui bombardent l'atmosphère terrestre :

protons, He ...

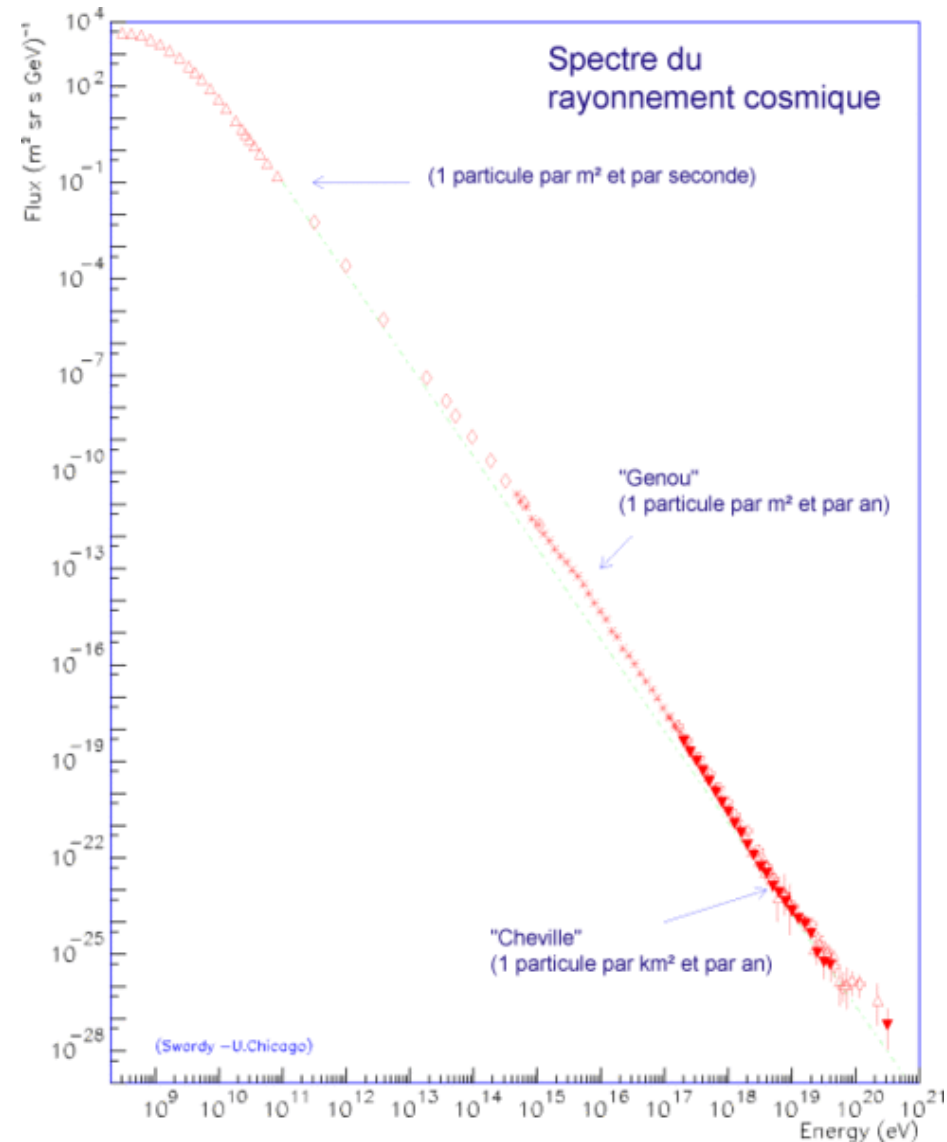
électrons

- **Intérêt** de l'étude de ces particules :

- pas besoin d'accélérateur,

- ces particules sont les messagers de phénomènes cosmiques (intérêt pour la cosmologie, l'astrophysique et la physique des particules).

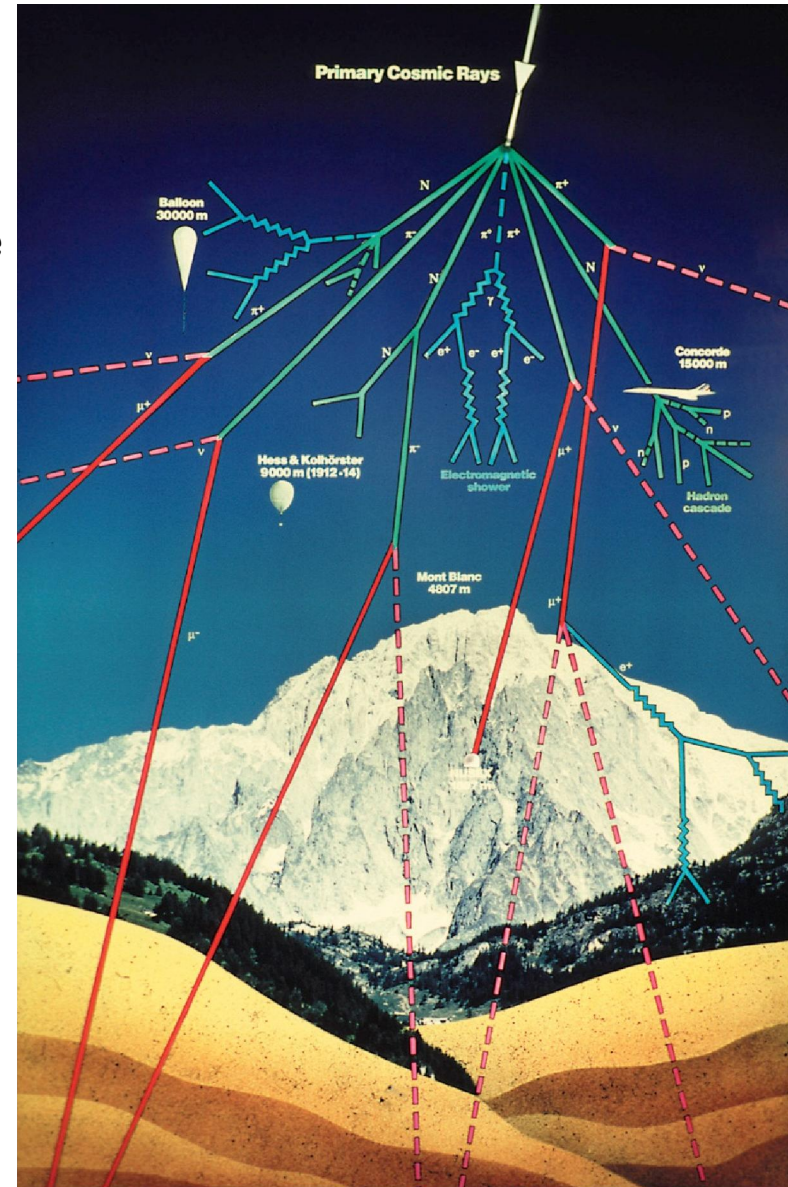
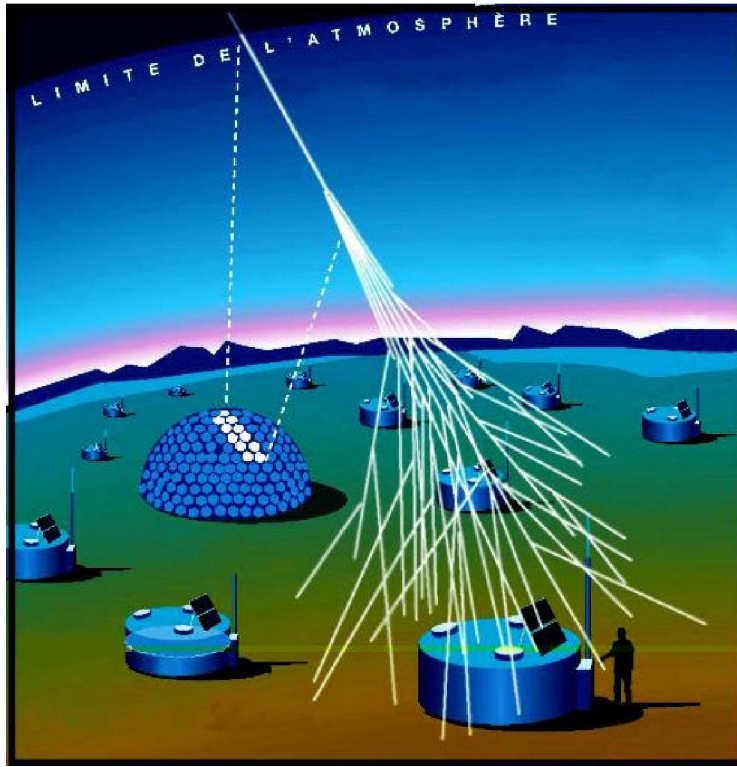
- **Désavantage** : contrairement à l'accélérateur, on ne sait rien *a priori* de l'état initial (origine, impulsion, énergie, type de la particule primaire, ...).



Les gerbes de rayons cosmiques

Pour détecter le rayonnement cosmique :

- **dans l'espace** : ballons, satellite, ISS (expérience AMS)
 - **au sol** : rayonnement cosmique secondaire produit par interaction du proton primaire avec un noyau d'azote ou d'oxygène
- **production d'une gerbe de particules** : pions, neutrons, photons, électrons, muons

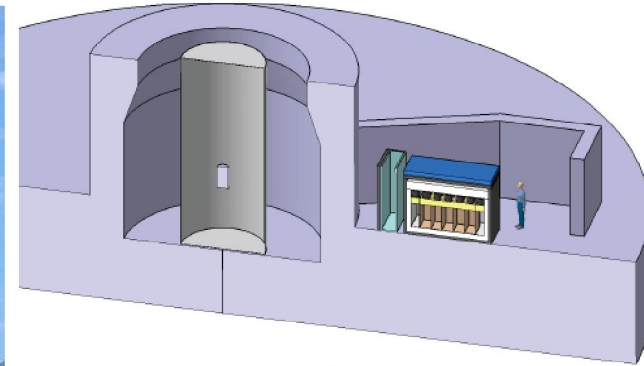


Réacteurs nucléaires

Etude des (anti)-neutrinos produits lors des réactions nucléaires.

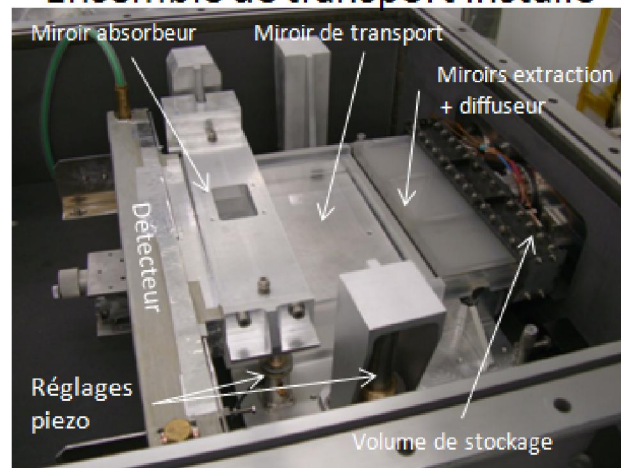
QQ exemples à l'ILL :

Neutrinos :
Expérience STEREO



Neutrons :
Expérience
GRANIT

Ensemble de transport installé



Cinématique de production

Energie d'une particules : $E^2 = m^2 + p^2$

Energie minimale pour une particule au repos : $E = m$

Pour produire une particule de masse m , il faut disposer, dans le centre de masse de l'interaction, d'une énergie minimale : $\sqrt{s} = m$

Pour créer plusieurs particules de masses m_1, m_2, m_3, \dots au repos :

- 4-imp dans le centre de masse : $p_i = (m_i, 0, 0, 0)$

- $s = |p_1 + p_2 + p_3 + \dots|^2 \Rightarrow \sqrt{s} = \sum m_i$

Si $\sqrt{s} > \sum m_i$, les particules finales ont de l'énergie cinétique

Dans le cas particulier de la désintégration d'une particule de masse M : $s = M^2 \Rightarrow M > \sum m_i$

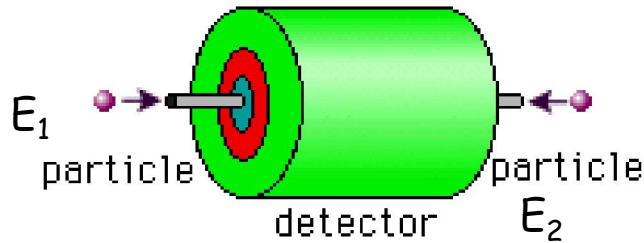
masse nulle \rightarrow particule stable

désintégration lourd \rightarrow léger

Différents types d'accélérateurs

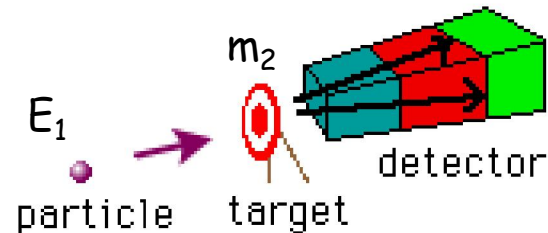
Les différents accélérateurs se caractérisent par :

- le **type des particules** accélérées (composites ou ponctuelles : $p\bar{p}$, pp , e^+e^- , ep),
- l'**énergie** des particules accélérées (les deux faisceaux à la même énergie ou non),
- la **luminosité instantanée**,
- la **luminosité intégrée** sur une année,
- le **mode de collision** (cible fixe ou collision de deux faisceaux).



masse invariante du système :

$$\sqrt{s} = \sqrt{4 E_1 E_2} = 2 E_{\text{beam}} \quad (\text{si } E_1 = E_2)$$



$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2 E_1 m_2}$$

⇒ intérêt des **collisionneurs** pour étudier des processus de **très haute énergie**.

⇒ La densité de la cible et la grande taille transverse du faisceau en mode **cible fixe** permettent des grandes luminosités pour étudier des **processus rares**.

L'accélération des particules

Accélérer des particules chargées (électrons, protons) :

champ électrostatique E : $F = qE \Rightarrow$ énergie $W = F.L \sim E$ et L

- soit un champ très intense (problème de claquage)
- soit une grande longueur \rightarrow accélérateurs circulaires.

Faire tourner une particule chargée :

champ magnétique B , orthogonal au plan de rotation.

- courbure inversement proportionnelle au champ : $R = p/qB$

Rem : pour $E \gg m$, $p \sim E$: $R \sim$ Energie du faisceau

- rayonnement synchrotron : une particule chargée dans champ magnétique perd de l'énergie :

$$\text{puissance rayonnée} = E^4/(m^4.R^2)$$

Energie perdue (GeV) : électron : $\Delta E = 8.85.10^{-8} E^4/R$ GeV/tour

E en GeV, R en km proton : $\Delta E = 7.8.10^{-21} E^4/R$ GeV/tour

Energie limite : perte par tour = énergie du faisceau.

$R=4.6\text{km}$ (LEP/LHC) $E_c(\text{électron}) = 373\text{GeV}$, $E_c(\text{proton})=8\text{ PeV}$

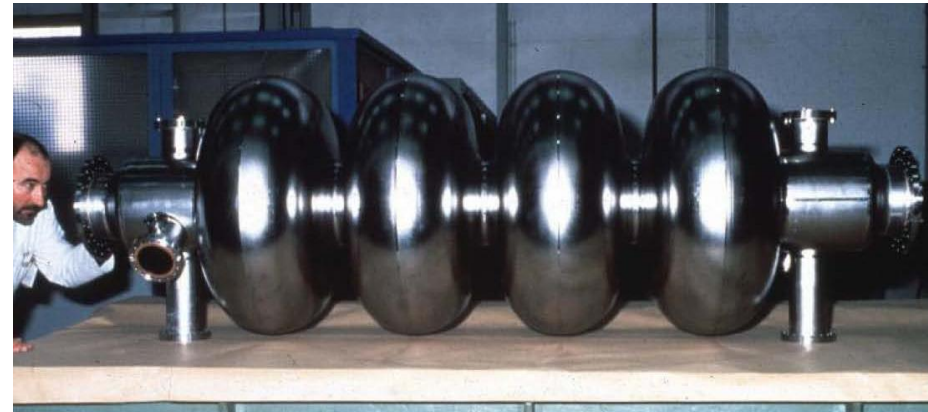
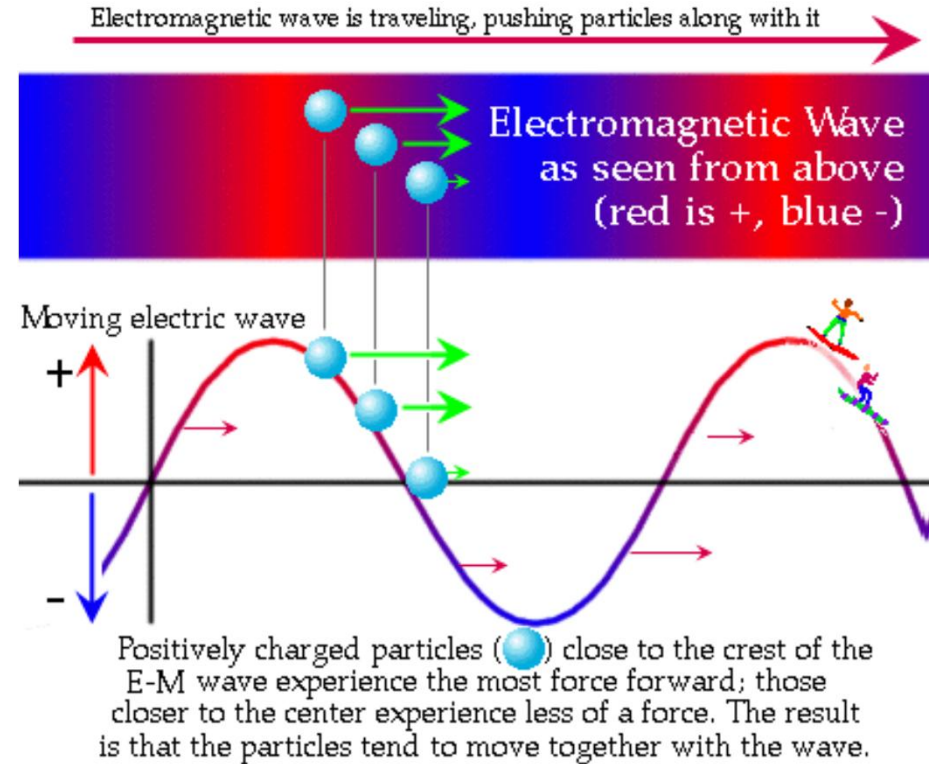
Cavité radio-fréquence

Comment obtenir un champ électrique élevé ?

- Champ statique : risque de claquage
- Onde EM : Valeur du champ fluctue dans le temps
 - onde libre : champ orthogonal à la propagation
 - avec des conditions au limite particuliere champ E aligné

Cavité RF

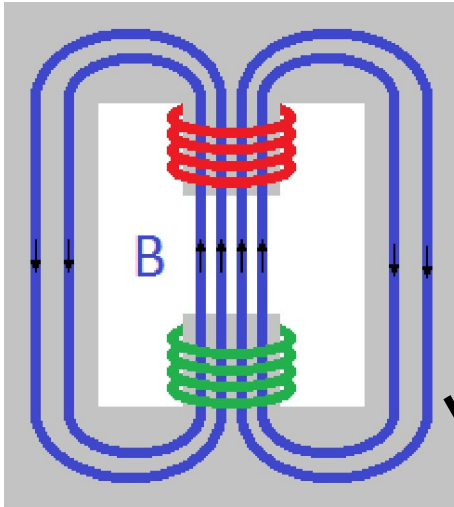
On injecte une onde EM dans la cavité, qui cède son énergie aux particules chargées



Guidage magnétique

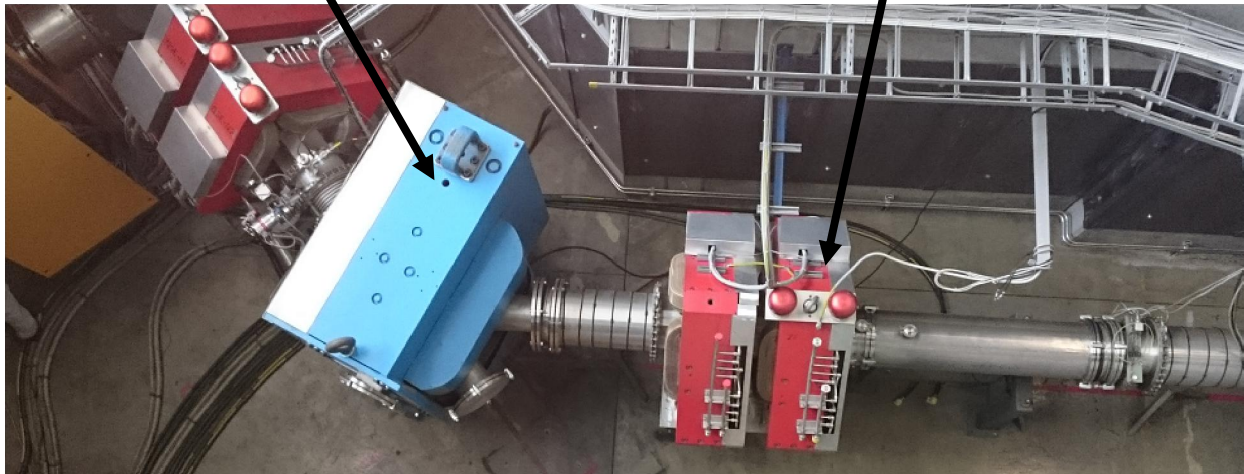
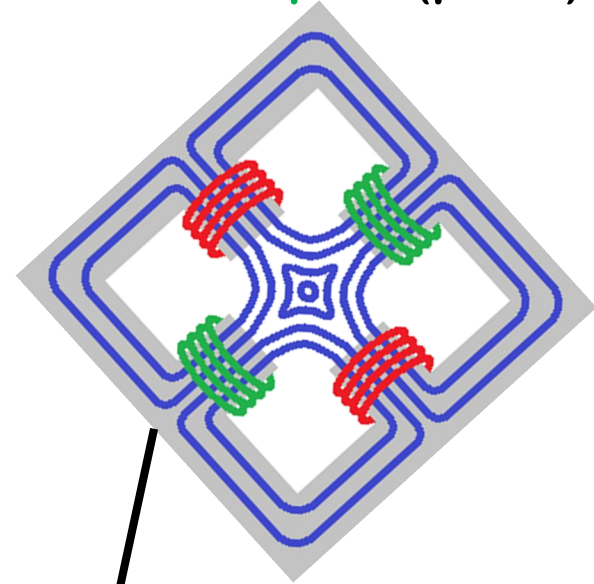
Courbure de la trajectoire

Dipole

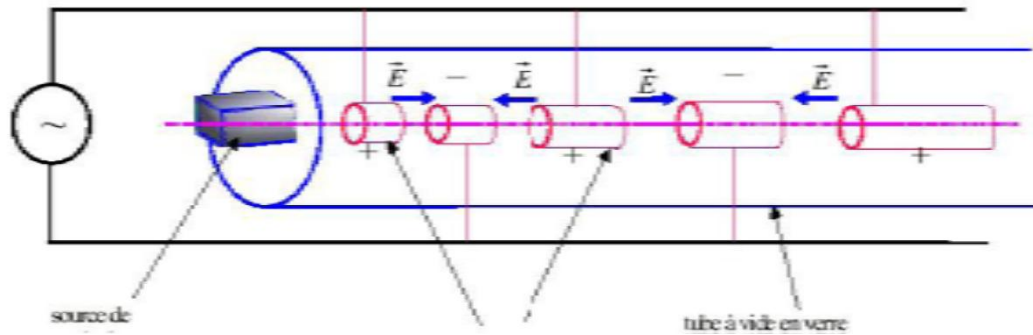


Focalisation (lentille magnétique)

Quadrupole (paire)



Types d'accélérateur



Accélérateur linéaire "LINAC"

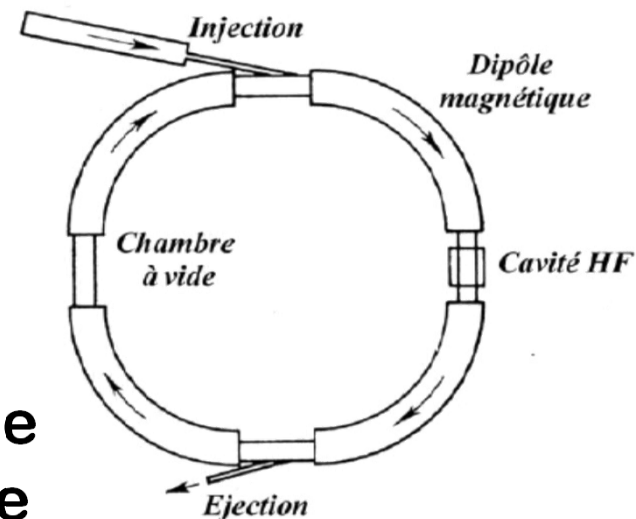
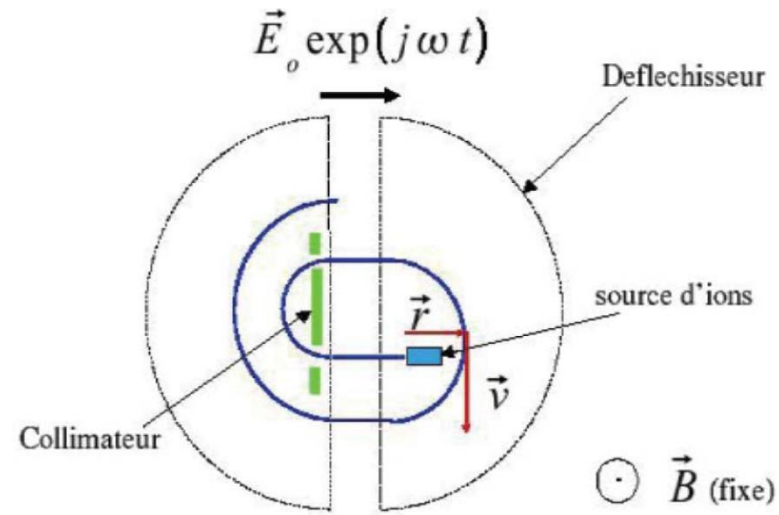
- Longeur \sim Energie
- Pas de rayonnement synchrotron

Cyclotron

- Champ magnétique fixe \rightarrow le rayon de courbure augmente avec l'énergie.
- Extraction du faisceau sur l'extérieur de l'anneau

Synchrotron

- Rayon fixe, champ magnétique variable
- Peut servir d'anneau de stockage et de collisionneur



Energie dans le centre de masse

Sites des grands accélérateurs modernes :

CERN (Genève)

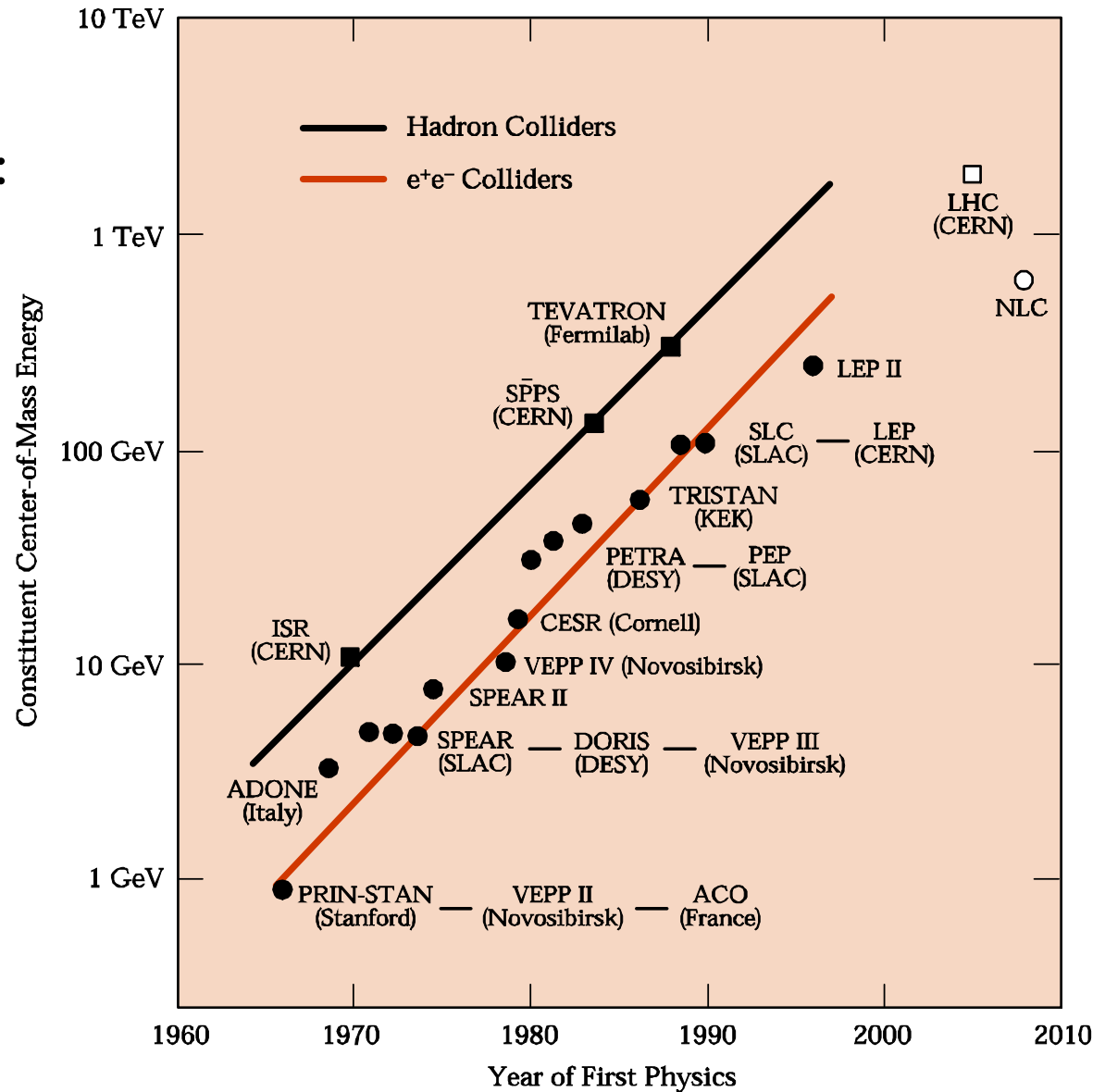
DESY (Hamburg)

SLAC (San Francisco)

FNAL (Chicago)

Brookhaven (New-York)

KEK (Tsukuba).



Luminosité

- **Luminosité instantanée** : $dN/dt = \Lambda(t) \sigma$ ← section efficace du processus
nombre d'interactions par seconde
lumi instantanée en $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Collisions à la fréquence f de deux paquets de n_1 et n_2 particules :

$$\Lambda = f \cdot n_1 \cdot n_2 / 4\pi \cdot \sigma_x \sigma_y$$

avec σ_x et σ_y la taille transverse du faisceau selon les axes horizontal et vertical

Luminosité instantanée : en $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Luminosité intégrée : $L = \int \Lambda(t)$ en pb^{-1} ou fb^{-1}

Nombres total d'interaction : $N = L\sigma$

La luminosité intégrée mesure la quantité de données enregistrées

Quelles particules accélérer

Les plus accessibles : **électron** et **proton**

Protons sur cible fixe : → production de π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} , π^0

- production d'antiprotons
- production de positrons : filtre particule chargées (champ B) laisse $p^0 \rightarrow g g$ puis $g \rightarrow e^+e^-$ (dans la matière)
- faisceau instables de pions, kaons,...
- faisceaux de muons et de neutrinos : $\pi^\pm \rightarrow \mu + \nu_\mu$

Réaccélération des antiprotons et positrons : collisionneurs

- électron – positron : particules ponctuelles, $s=Q^2$ déterminé
- proton-(anti)proton : particules composites.
- électron – proton : sonder la structure du proton.

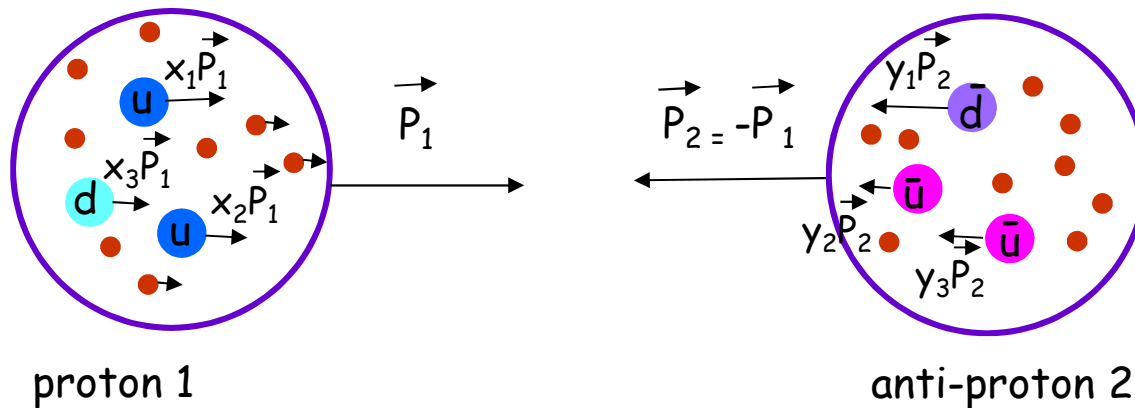
Collisions hadroniques

Seules des sous-structures du proton (partons) interagissent:

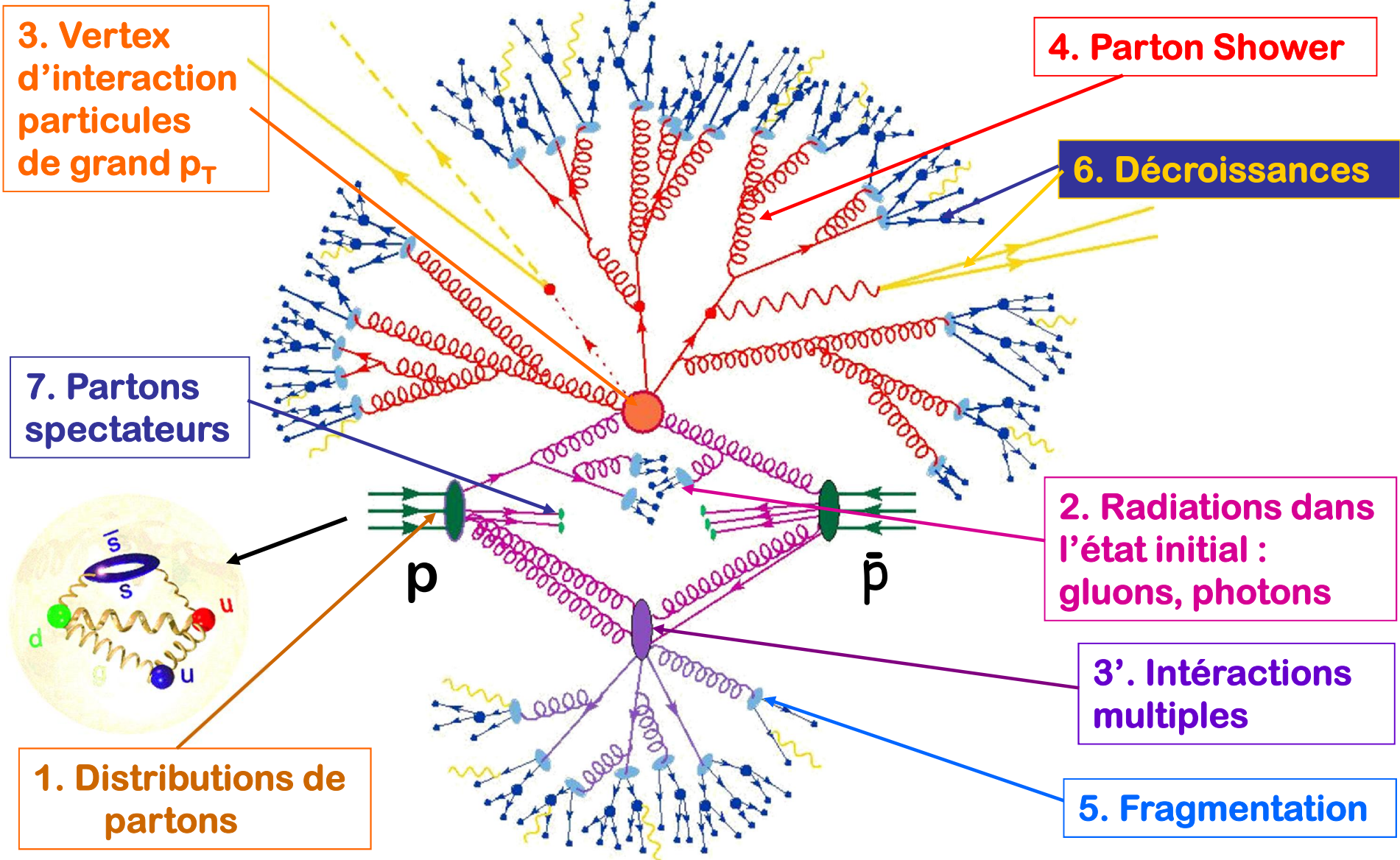
- Quark de valence (u,d)
- Quark de la mer (u,d,s,c,b,t)
- Gluons

Chaque parton porte une fraction x de l'impulsion totale du proton

- ☺ **Permet de couvrir une large gamme d'énergie de collision.**
- ☹ **L'énergie totale de la collision est inconnue (bilan nul dans le plan transverse).**



Une collision hadronique (simplifiée)



Sections efficaces TeVatron/LHC

Théorème de factorisation : découple les effets perturbatifs et non perturbatifs

$$\sigma_{p\bar{p} \rightarrow X} = \sum_{\text{partons } i,j} \int_0^1 \int_0^1 f_i^p(x_1) f_j^{\bar{p}}(x_2) \hat{\sigma}_{ij \rightarrow X} dx_1 dx_2$$

Distributions de partons

Décrivent la physique QCD non perturbative :

$f_p(x, Q^2)$ = Proba de trouver un **parton p** donné (quark u,d,s,c,b,t, gluon) de **fraction d'impulsion x**, à l'échelle d'énergie (ie de longueur) Q^2 dans un proton

Inclut la physique de $E < Q$

Section efficace partonique (pQCD)

Décrit l'interaction dure entre deux partons

Calcul par les diagramme de Feynman (QCD perturbative) pour un Q^2 élevé.

Inclut la physique $E > Q$

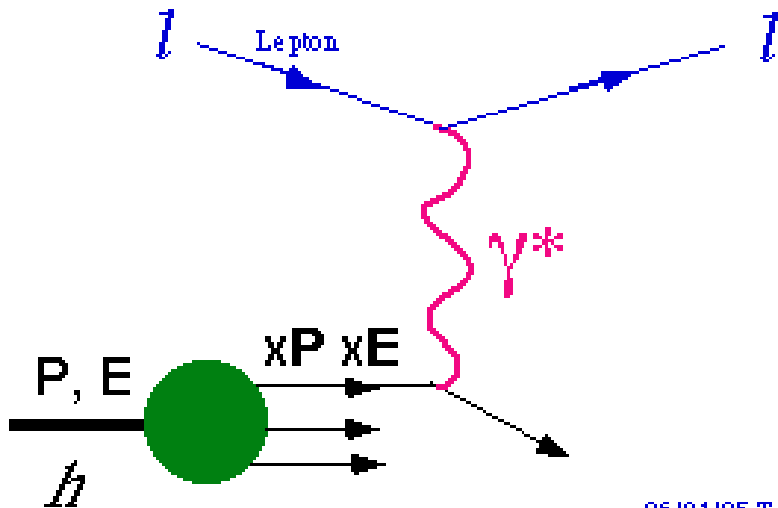
Densités de partons (PDF)

Détermination expérimentale par diffusion profondément inélastique d'un électron (ponctuel, énergie connue) sur un proton.

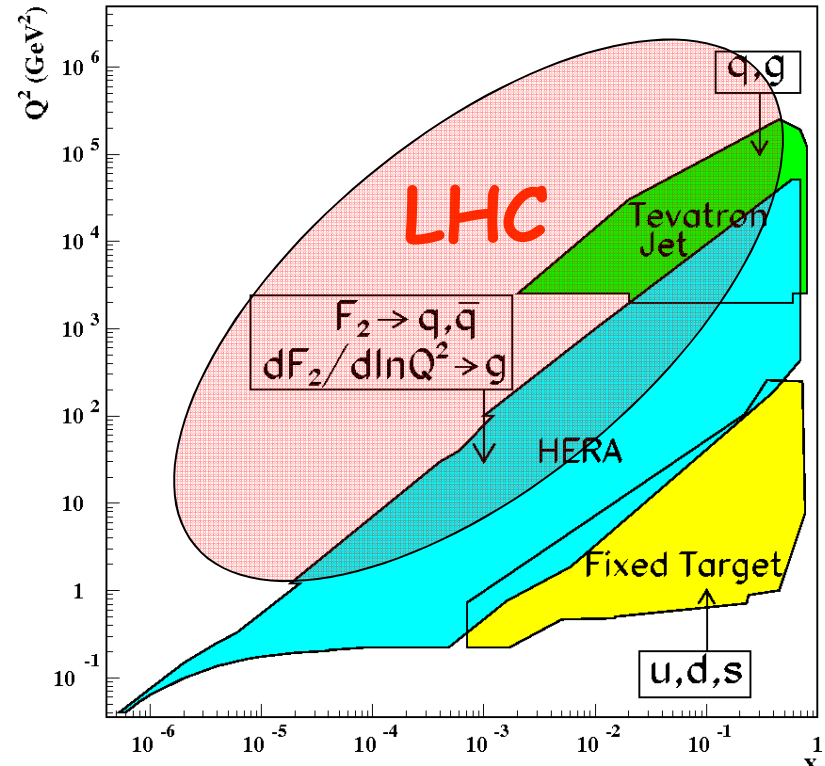
Accélérateur Héra à Desy (Hambourg) + Cibles fixes

- Mesures à "petit" Q^2
- évolution en fonction de Q^2 : équations théoriques DGLAP.

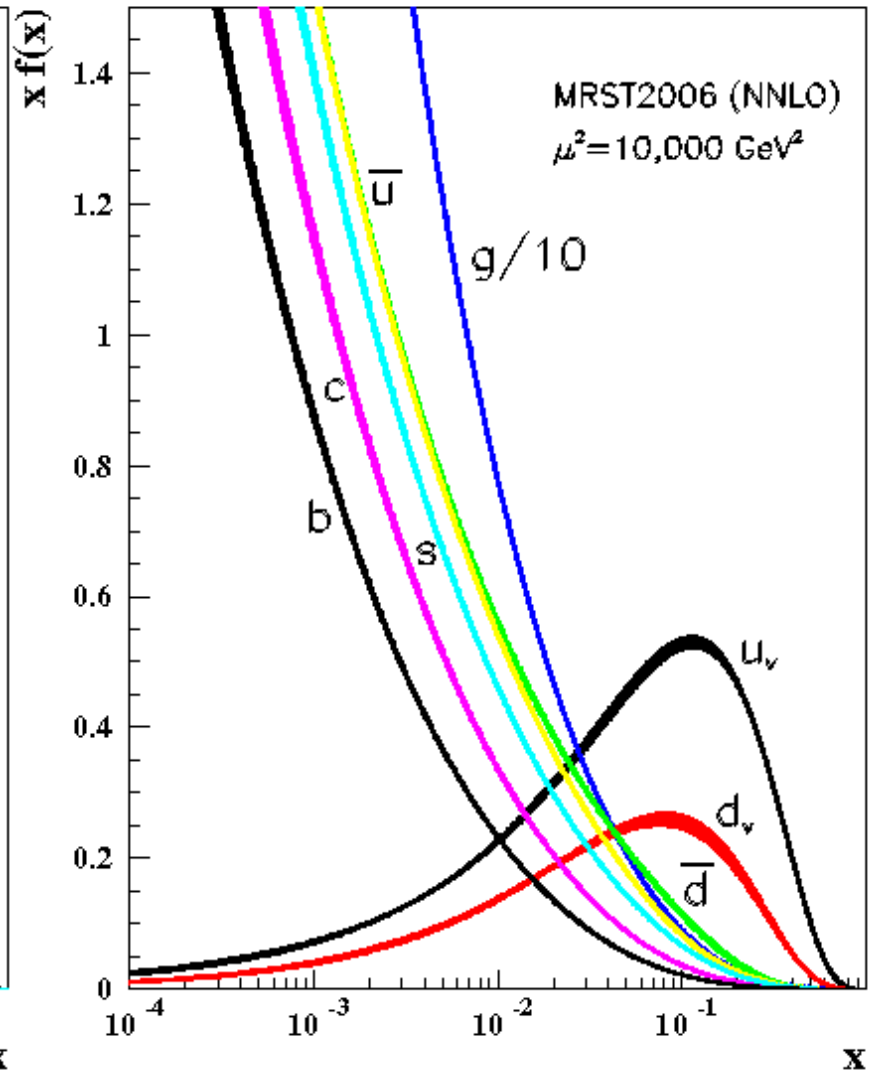
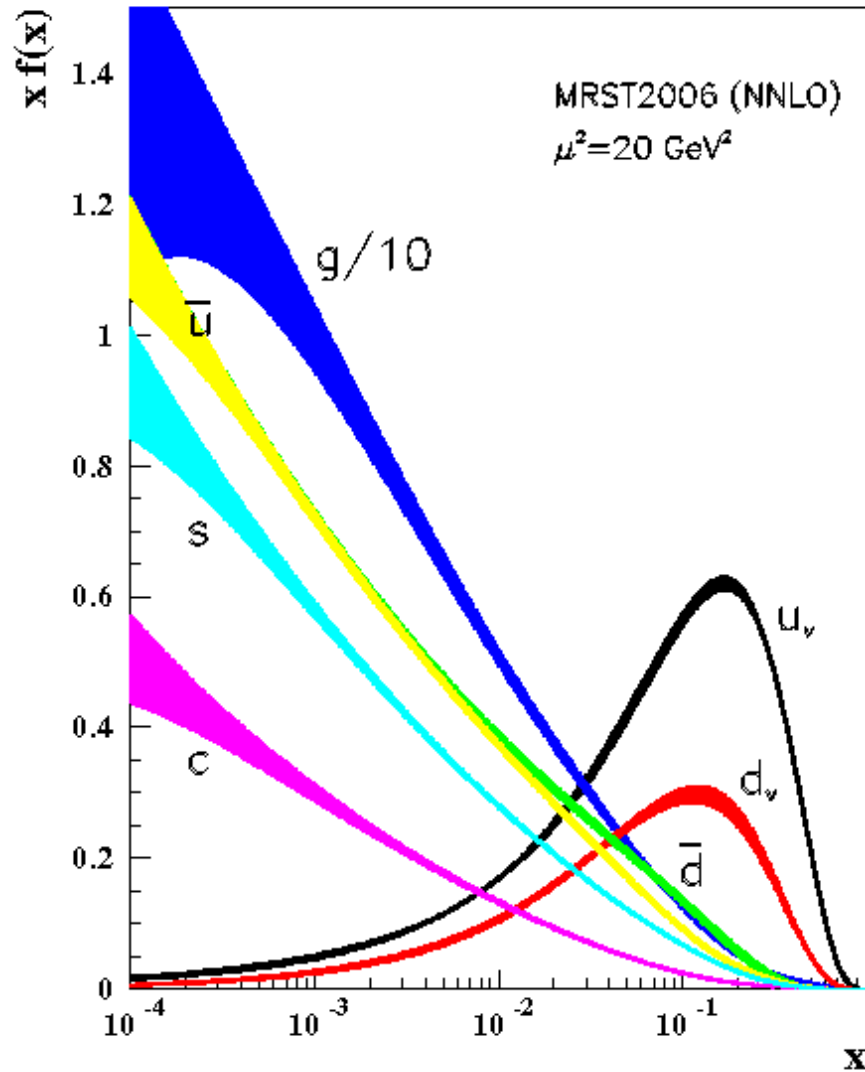
Deep Inelastic Scattering in Parton Model



06/01/95 T.I.



Densités de partons du proton



Différents types de collisions

p-p vs p-antip :

- similaire à haute énergie (Pdf dominées par la mer)
- p-antip plus intéressant à plus basse énergie (annihilation q-antiq)
- taux de production d'anti-p limite la luminosité

e-e vs p-(anti)p

- ee : collision ponctuelle , \sqrt{s} fixé par les faisceaux, mesures de précisions si on sait ou chercher.
- pp : hadrons composites, large gamme de \sqrt{s} , “bruit” QCD (domaine non perturbatif) , nombreuses incertitudes expérimentales et théoriques.
- énergie plus grande en pp (moins de synchrotron)

ee et pp sont complémentaires

(ex découverte W/Z au SPS, mesures de précision au LEP)

Vue aérienne du Tevatron

Accélérateur **proton anti-proton**, $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$, en surface, de circonférence 10 km. Une collision toutes les 396 ns.

Axes de recherche :

- étude du quark top
- aussi : étude de la violation de CP, recherche de physique au-delà du Modèle Standard, recherche du boson de Higgs (mais découverte déjà exclue par le LEP), mesures de précision.



Arrêté en 2011

L' accélérateur LHC (CERN)

Collisionneur **proton proton**

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$, en 2011

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, en 2012

nominal 14 TeV (>2014 ?)

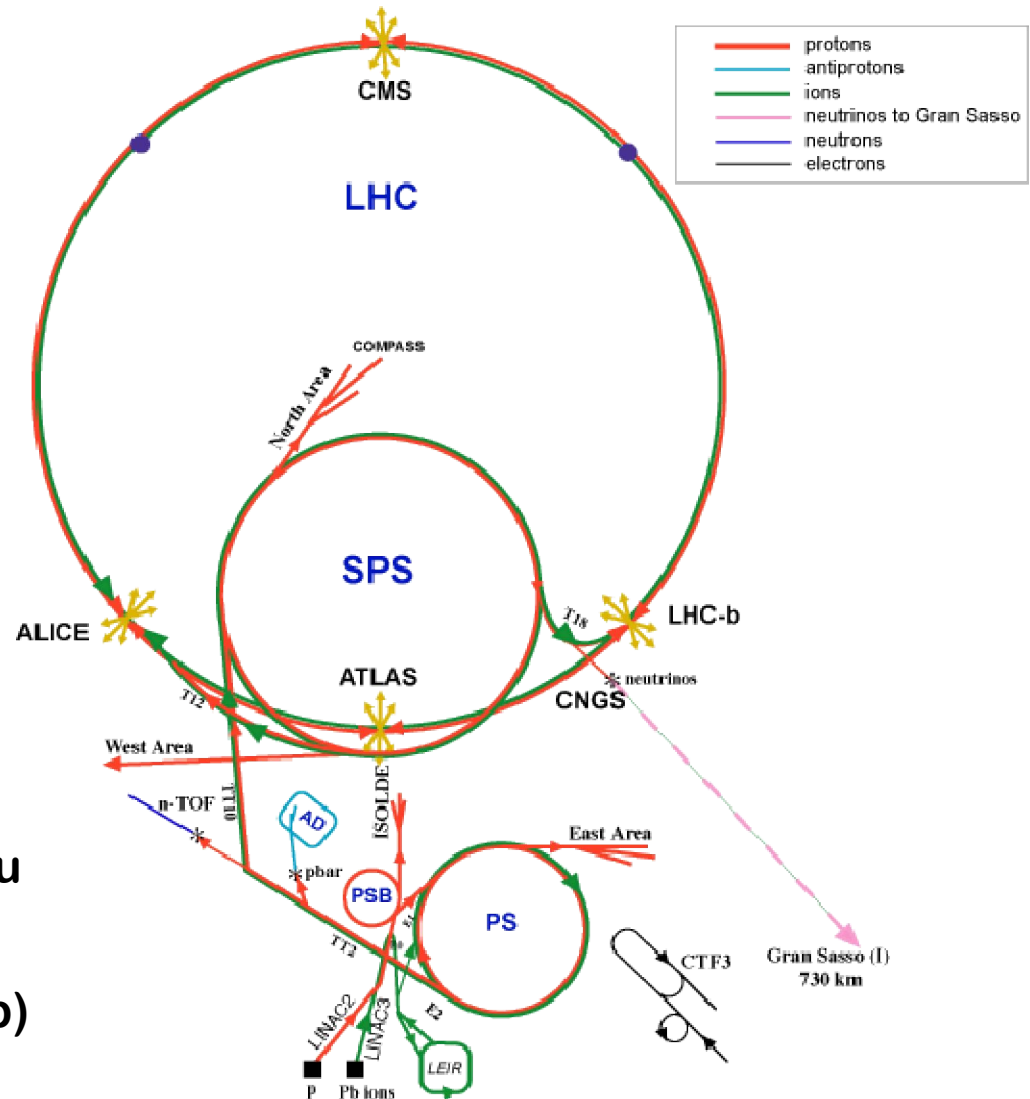
de 27 km de circonférence,
enterré, au CERN.

Une collision toutes les 25 ns (de
l'ordre de 20 interactions par
collision).

Démarré en 2008.

Axes de recherche :

- étude du boson du Higgs (ATLAS/CMS)
- recherche de physique au-delà du Modèle Standard. (ATLAS/CMS)
- Etude de la violation de CP (LHCb)
- étude du plasma de quarks et de gluons (collisions Pb-Pb, ALICE)



Le complexe d'accélérateurs pour le LHC

Vue aérienne du LHC

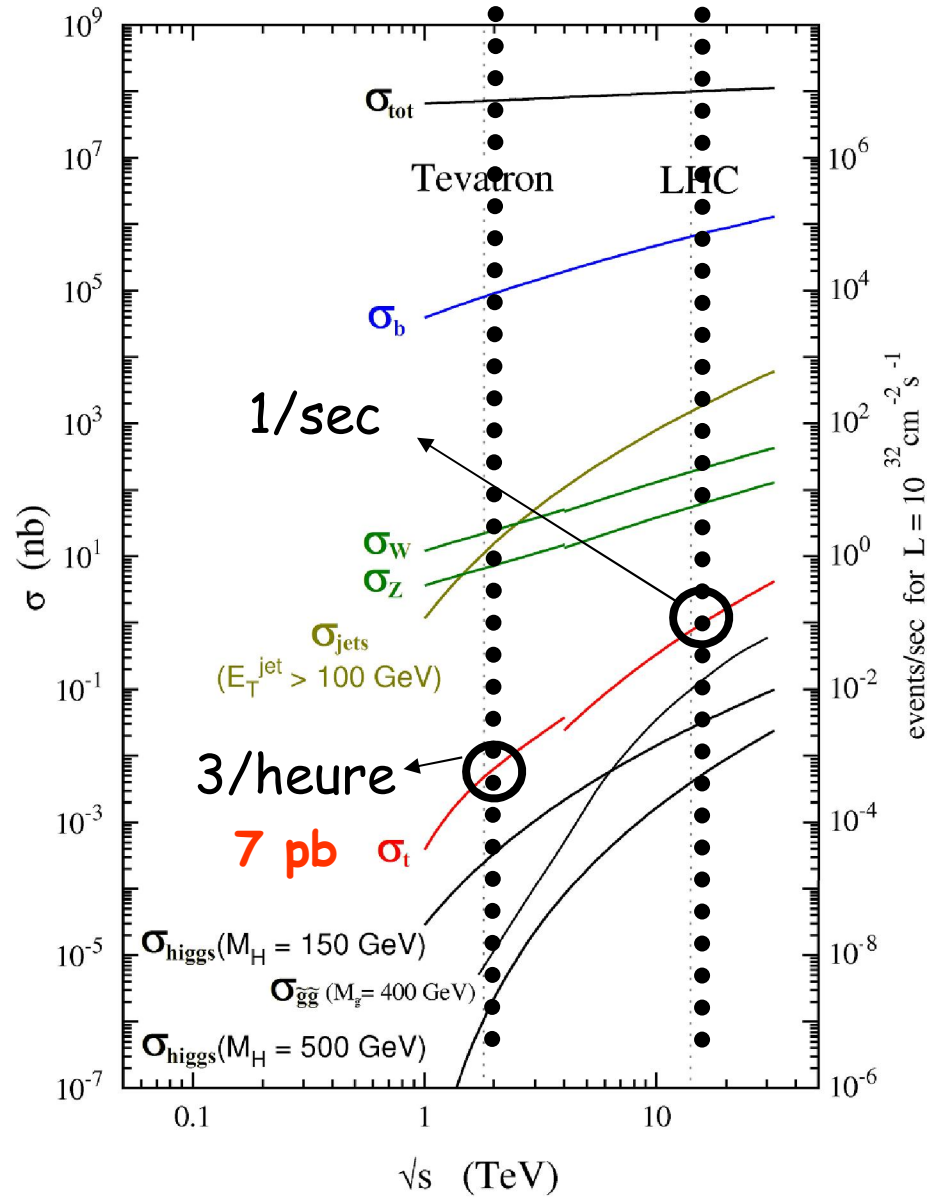


Quelques collisionneurs actuels

	Hera	KEK	LEP	TeVatron	LHC
Localisation	Desy Hambour g	Tsukuba, Japon	CERN, Genève	Fermilab, Chicago -	CERN, Genève
Particules	$e^- p$	e^+e^-	e^+e^-	pp	pp
Energie par faisceau (GeV)	$e^- : 30$ $p : 920$	$e^- : 8$ $e^+ : 3.5$	45 - 100	980	4000 7000 (nom)
Luminosité ($10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.75	170	0.24 - 1	3	2 100 (nom)
Expériences	H1 ZEUS Hermes	Belle (physiqu e du B)	ALEPH L3 DELPHI OPAL	D0 CDF	ATLAS CMS ALICE LHCb
Durée	1992 2007	1999 -	1989 2000	1987 2011	2008 -

Sections efficaces TeVatron/LHC

proton - (anti)proton cross sections



Nombre d'événements

$N = \text{Luminosité} \times \text{section efficace}$

Tevatron -> LHC

Sections efficaces

- | | |
|-----------------------------|-------|
| Production inclusive : | x 1.2 |
| Bosons électrofaibles W/Z : | x 10 |
| Quarks top (paires) : | x 100 |
| Boson de Higgs : | x 100 |
| Susy, particules lourdes : | x ??? |

Luminosité intégrée

- | | |
|------------------------|------|
| 3 ans LHC basse lumi : | x 3 |
| 3 ans LHC haute lumi : | x 30 |