

Cargèse – mars 2009

Ecole « techniques de base du détecteur »

Pascal Vincent

Université Pierre et Marie Curie

LPNHE, Paris

Introduction

Les systèmes expérimentaux

Les interactions des particules chargées

Les interactions des particules neutres

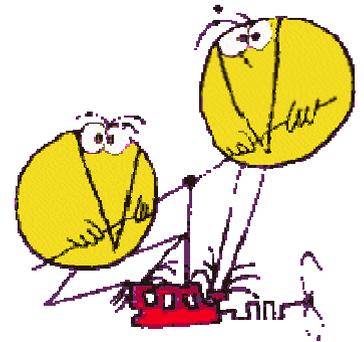
Les détecteur de particules

Visite d'une expérience



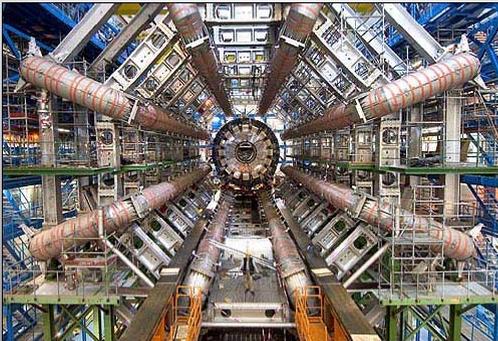
La méthode

L'expérimentation

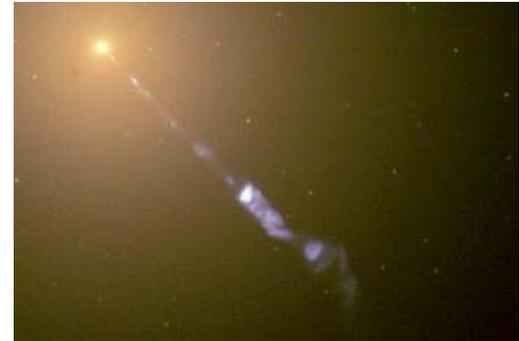


La méthode

Ces machines peuvent être des **installations artificielles** conçues par des laboratoires de recherche



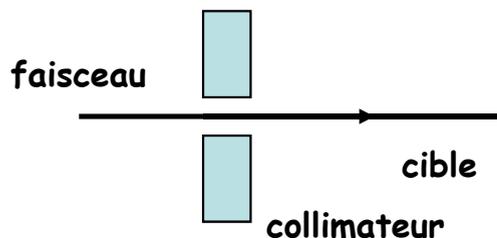
ou **naturellement produits dans l'Univers** par des événements cataclysmiques.



Recherche de l'infiniment petit : méthode expérimentale

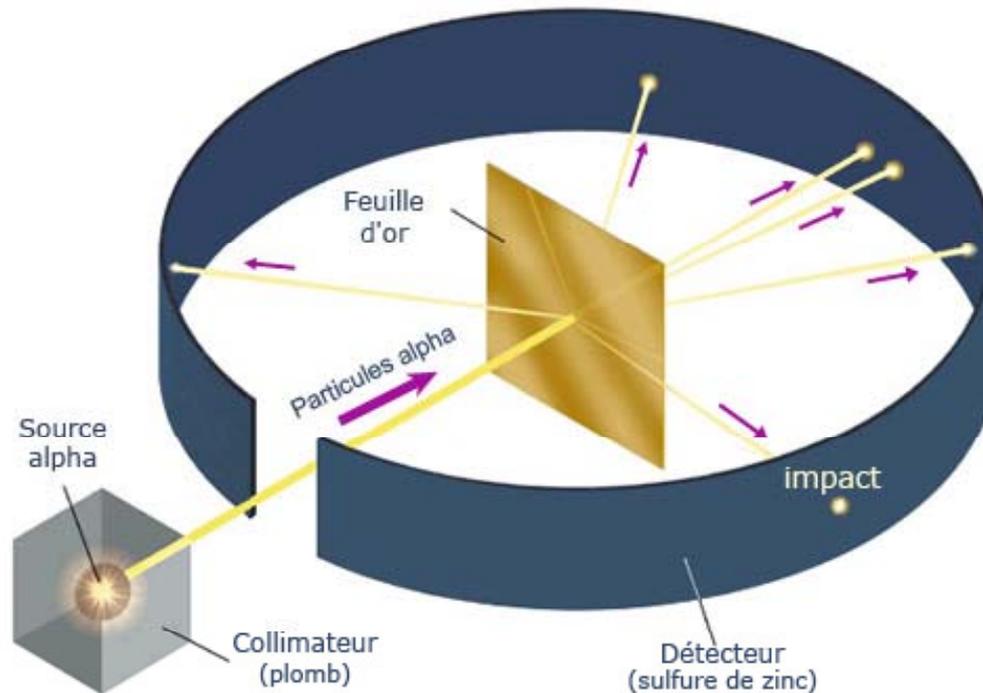
On dirige un **faisceau de particules déterminées** sur une **cible**.

On **détecte** (dans toutes les directions) celles qui ont interagit avec un élément de la cible c'est à dire celles qui ont été défléchies.



On reconstruit **la distribution angulaire des particules diffusées**.

Recherche de l'infiniment petit : méthode expérimentale



On reconstruit la distribution angulaire des particules diffusées :

$$dn(\theta, \varphi)$$

$dn(\theta, \varphi) ?$

La distribution angulaire du nombre de particules diffusées dépend :

1. Du nombre de particules initiales envoyées (flux incident) :

$$dn(\theta, \varphi) \propto \phi_i$$

2. De la taille et de l'éloignement du détecteur qui les reçoit :

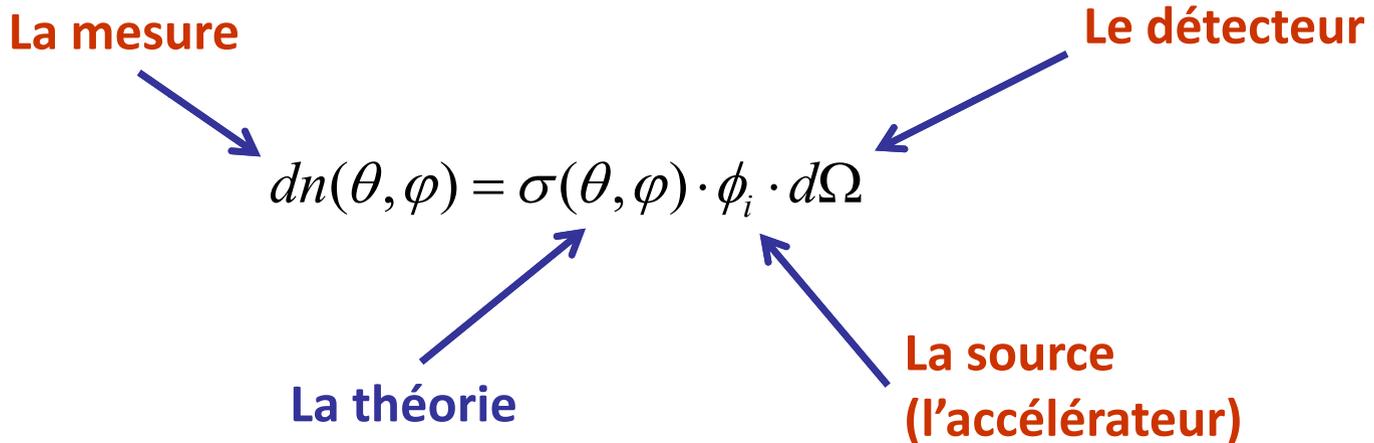
$$dn(\theta, \varphi) \propto \frac{\text{Surface}}{\text{distance}} = \frac{dS}{r} = d\Omega$$

3. Du **phénomène** qui s'est produit entre la particule et le ou les constituants de la cible :

$$dn(\theta, \varphi) \propto \text{L'interaction} = \sigma(\theta, \varphi)$$

Théorie de la diffusion

La distribution angulaire des particules diffusées :



La section **efficace différentielle** est reliée à l'**amplitude théorique** du phénomène de diffusion qui contient tous les détails de l'interprétation des processus entre les constituants de l'interaction.

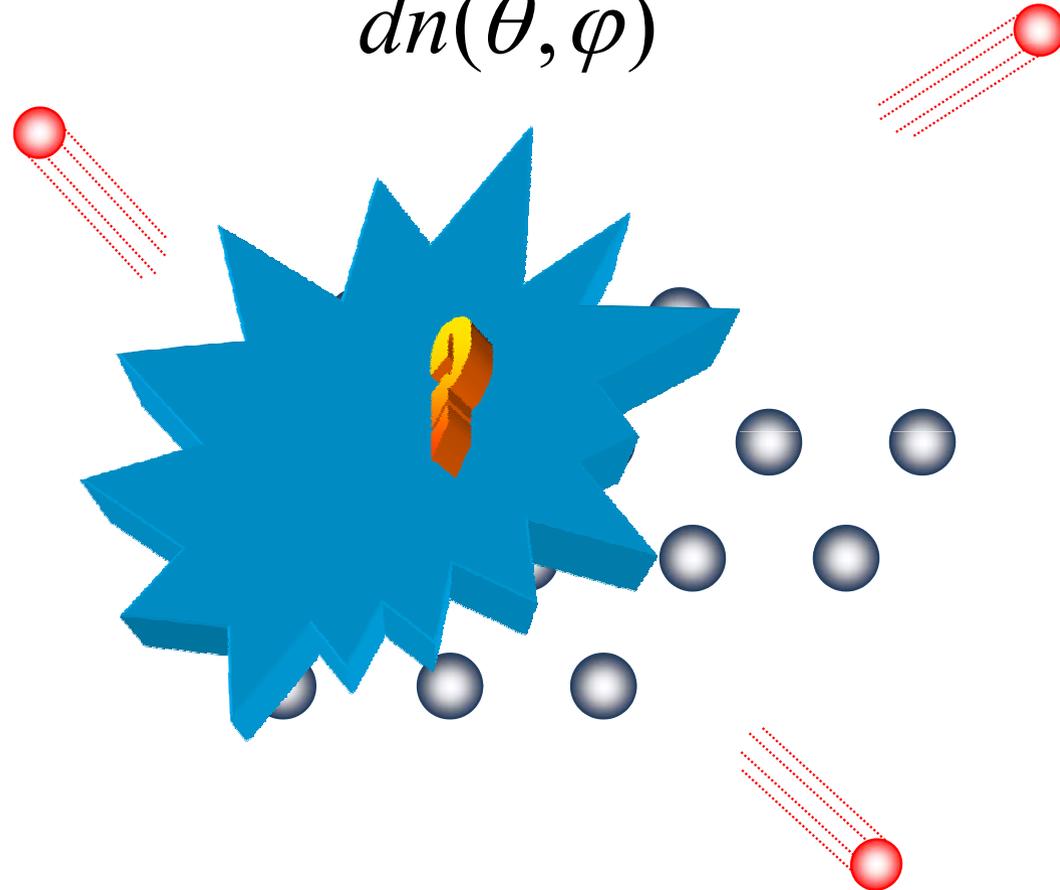
$$\sigma(\theta, \varphi) = |f(\theta, \varphi)|^2$$

$$dn(\theta, \varphi) = \sigma(\theta, \varphi) \cdot \phi_i \cdot d\Omega$$

LA MESURE

Les expériences sur cibles fixes

$$dn(\theta, \varphi)$$



Les expériences sur « collisionneur »

$$dn(\theta, \varphi)$$



Pour reconstruire le phénomène observé il faut extraire des informations des particules produites.

Qu'est ce qui caractérise une particule ?

❖ Son état dans « l'espace des phases » :

- Impulsion : $\vec{p} = \gamma m \vec{V}$ ($\vec{p} = m \vec{V}$) $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$
- Energie : $E = \gamma mc^2$ ($E = \frac{1}{2} m V^2$)
- Position : \vec{r}, t

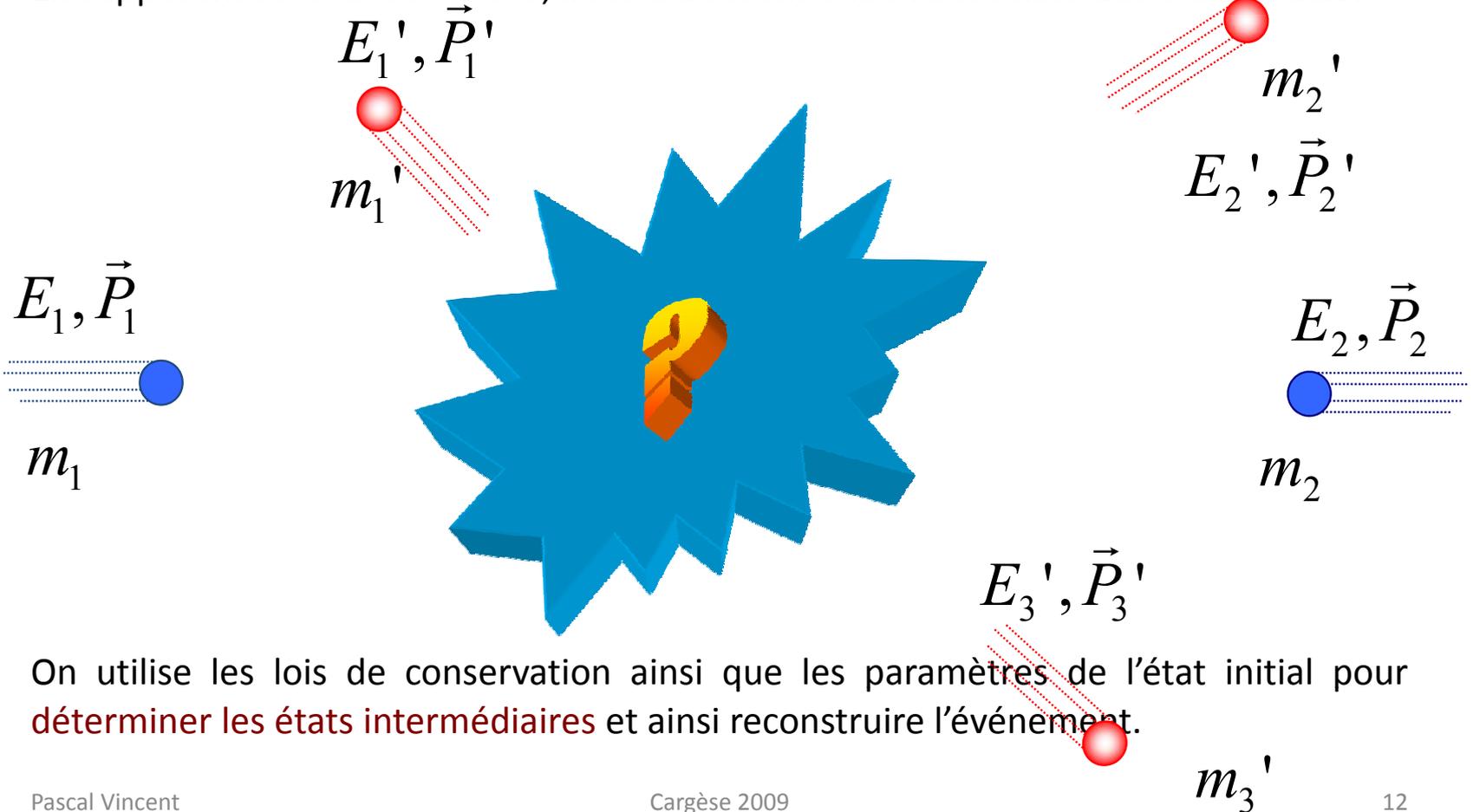
❖ Sa charge et autres nombres quantiques (spin, saveur, isospin ...).

❖ Sa masse (identification).

$$dn(\theta, \varphi, E, \vec{P}, m, \dots)$$

Les collisions

En supposant l'état initial connu, il reste à reconstruire l'ensemble des états finaux :



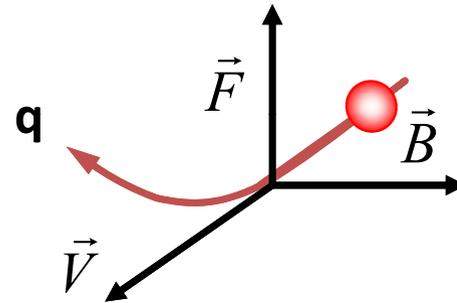
On utilise les lois de conservation ainsi que les paramètres de l'état initial pour déterminer les états intermédiaires et ainsi reconstruire l'événement.

Déterminer l'impulsion (P)

Il faut reconstruire la trajectoire de la particule dans un **champ magnétique** :

Newton : $\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{V^2}{R}\vec{i}$

Maxwell : $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$

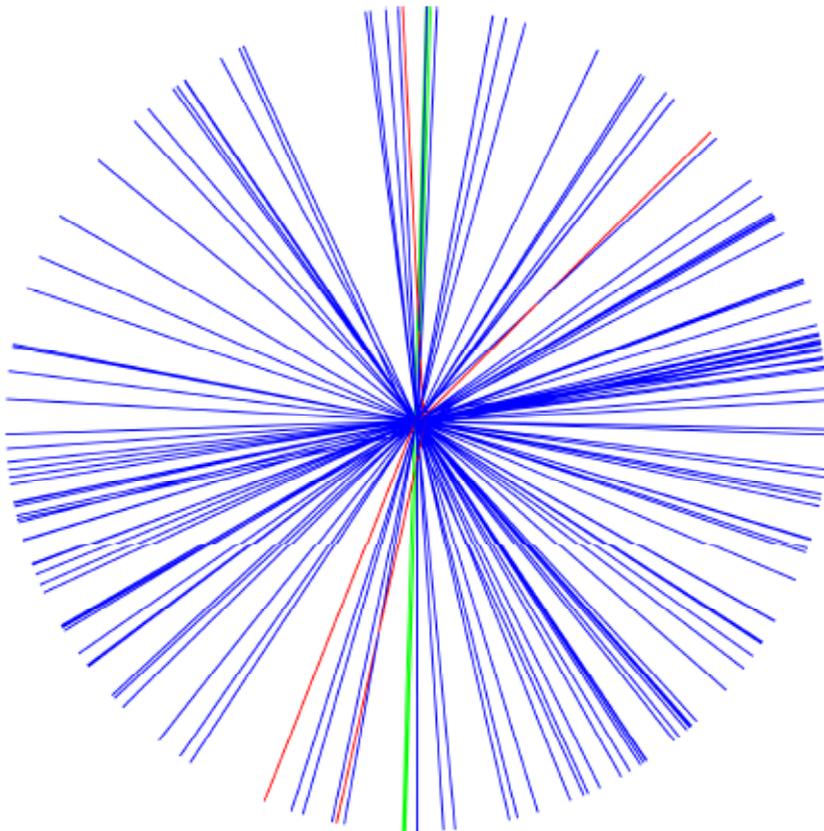


$$\Rightarrow R = \frac{mV}{qB} = \frac{P}{qB}$$

La courbure de la trajectoire donne une **mesure de l'impulsion**

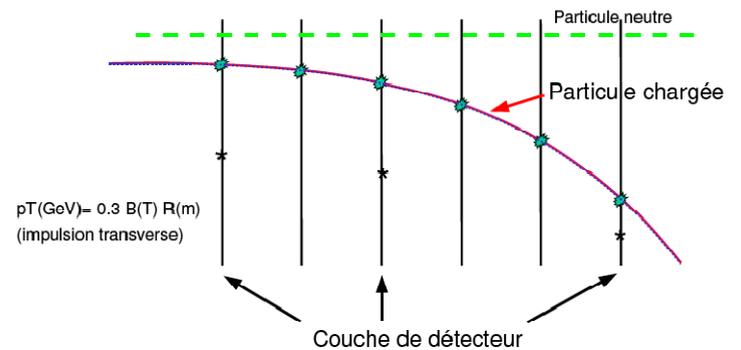
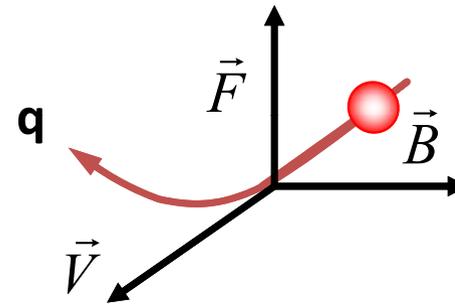
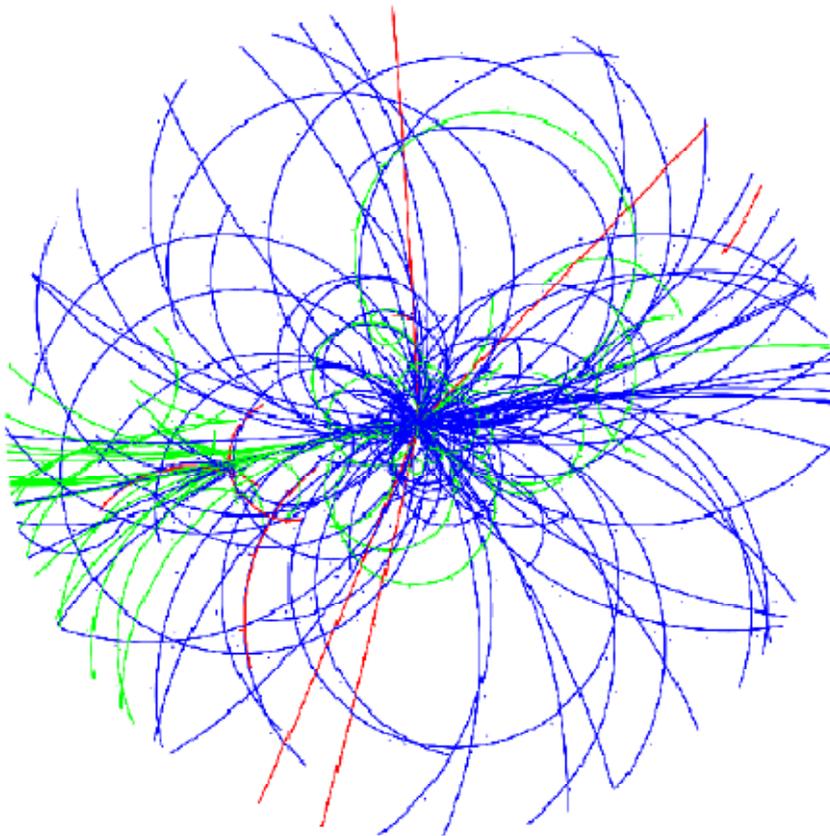
Déterminer l'impulsion (P)

Sans champ magnétique



Déterminer l'impulsion (P)

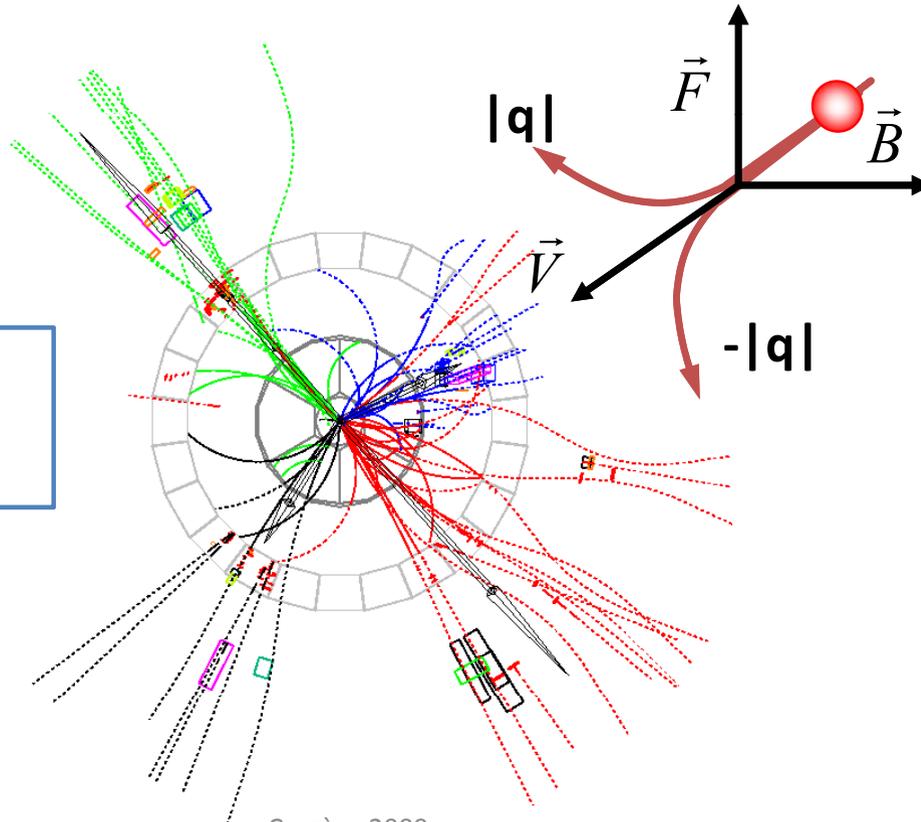
Avec un champ magnétique c'est quand même plus claire ...



Déterminer la charge (q)

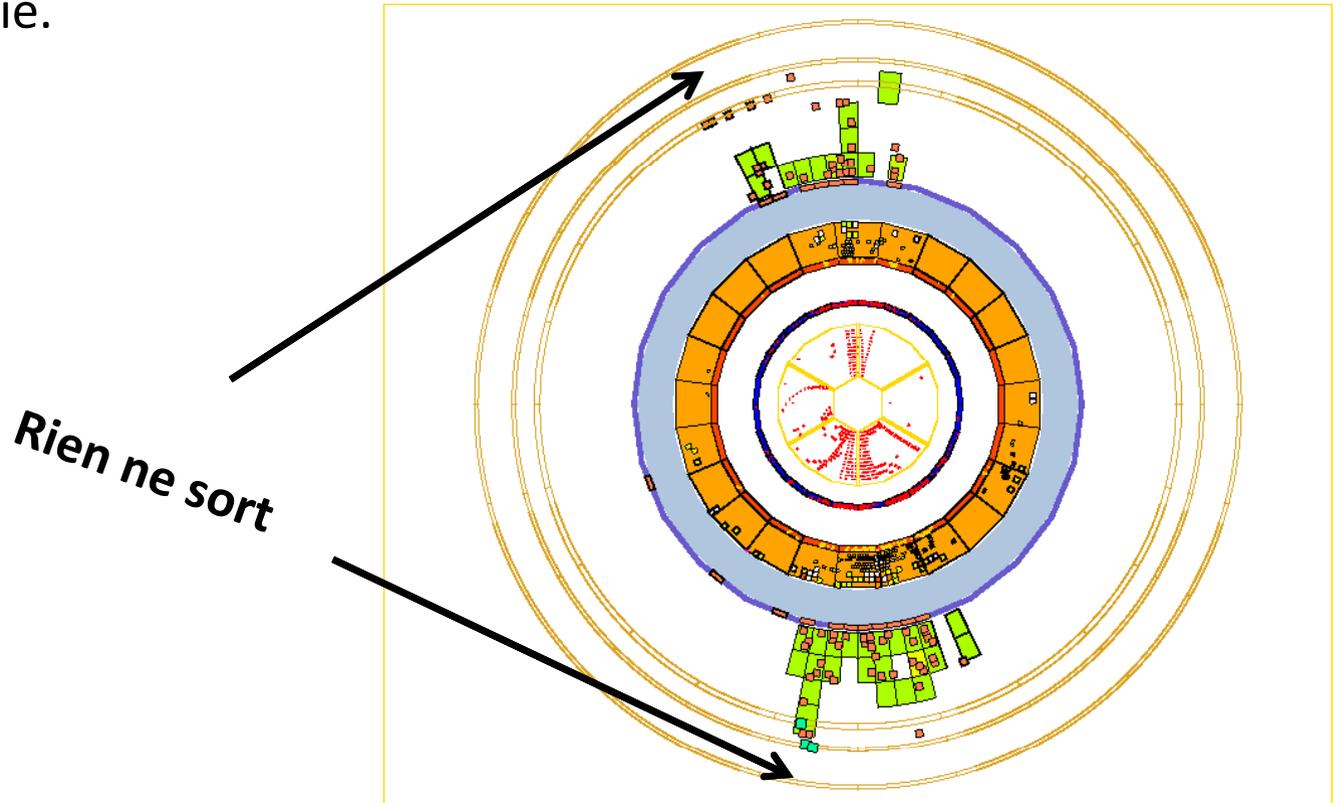
Les sens de la courbure déterminent le **signe et de charge**

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{P}{qB}$$



Mesurer l'énergie (E)

Il faut stopper la particule dans de la matière pour qu'elle dépose toute son énergie.



Détermination de l'identité (m)

Quelques outils :

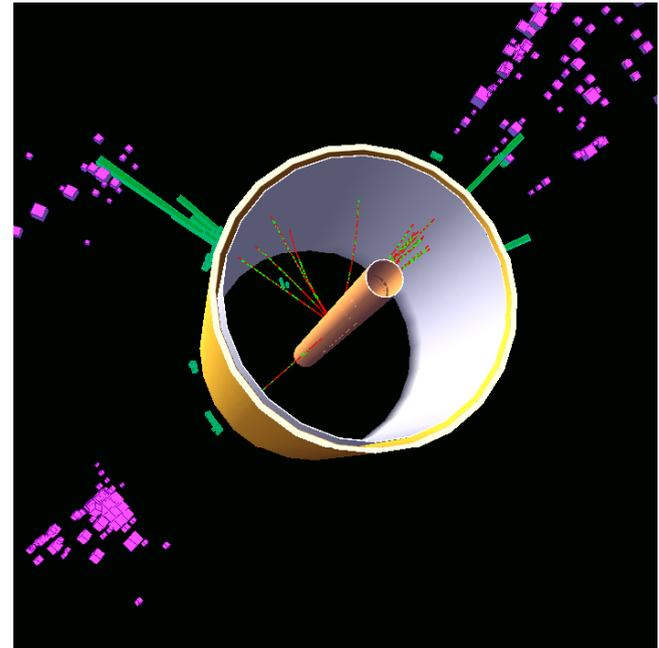
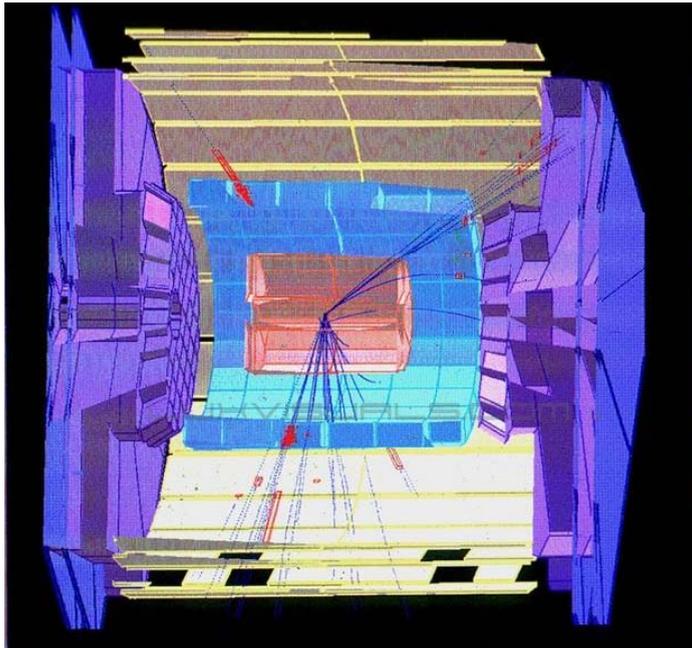
$$E^2 = P^2 + m^2 \quad : \quad (E, P) \Rightarrow m$$

$$E = \gamma(v)mc^2 \quad : \quad (E, v) \Rightarrow m$$

$$P = \gamma(v)mv \quad : \quad (P, v) \Rightarrow m$$

Détermination de l'identité (m)

L'interaction dépendra du type de la particule, ce qui permet également de l'identifier.



$$dn(\theta, \varphi) = \sigma(\theta, \varphi) \cdot \phi_i \cdot d\Omega$$

L'ÉTAT INITIAL

L'état initial

Le nombre de particules initiales par unité de surface et de temps.

$$\phi_i$$

L'énergie

Le type de particules

Leur état de polarisation.

Les sources de particules

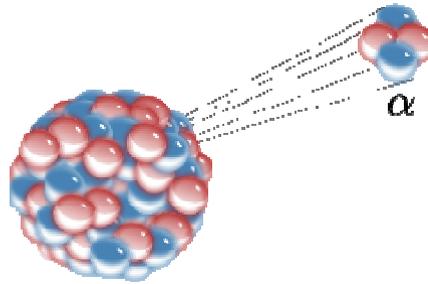


Les sources naturelles

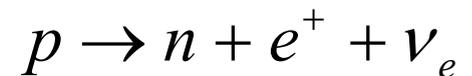
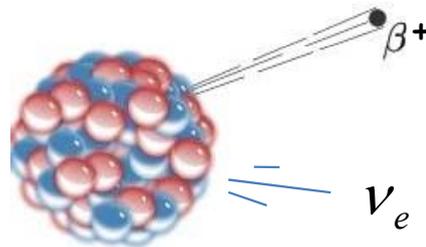
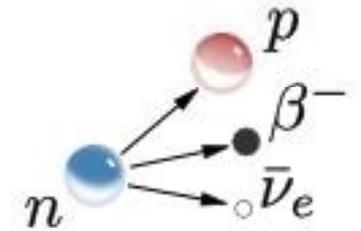
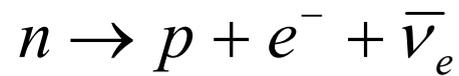
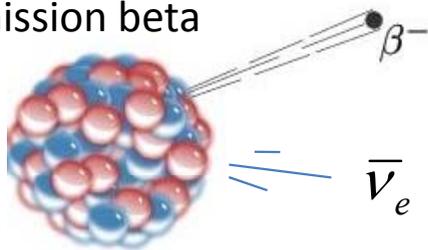
LA RADIOACTIVITÉ

Radioactivité

❖ La radioactivité alpha

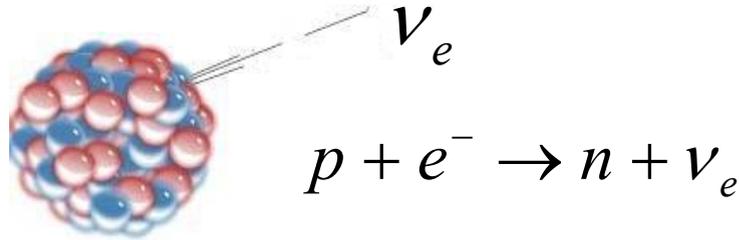


❖ L'émission beta

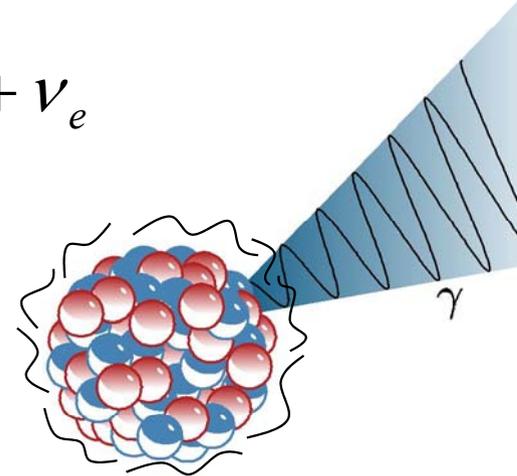


Radioactivité

❖ capture électronique



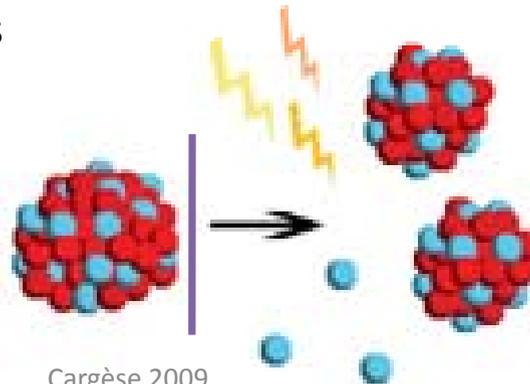
❖ émission gamma



❖ émission spontanée de neutrons

❖ émission spontanée de neutrons

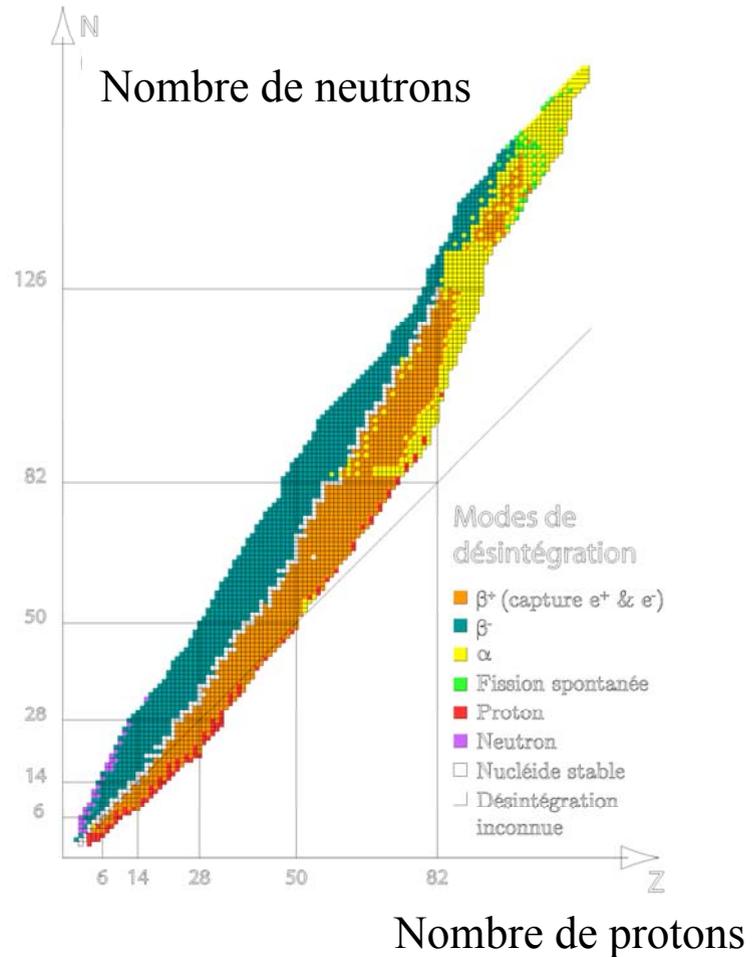
❖ La fission



Radioactivité

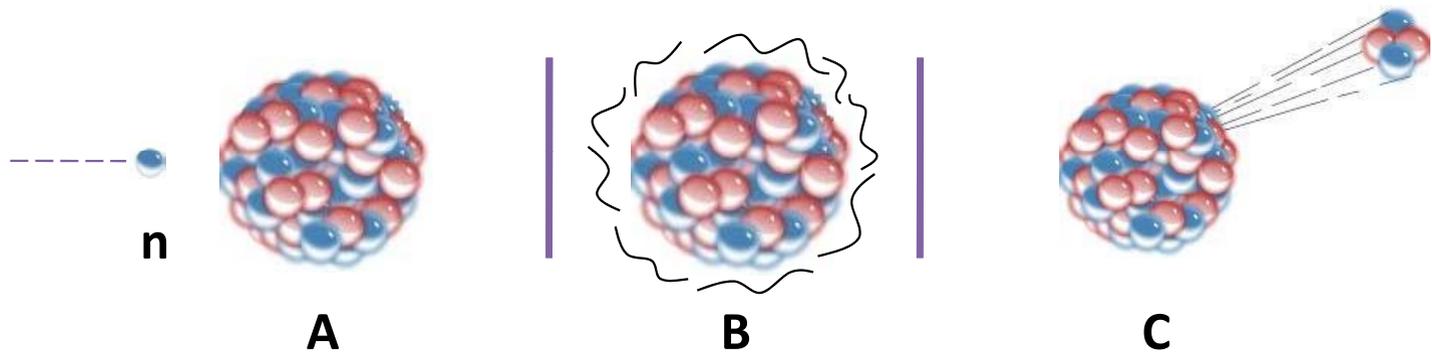
Dans la nature, il y a à peu près 270 nucléides stables et 70 nucléides instables.

$$A = Z + N$$
$${}^A_Z X$$

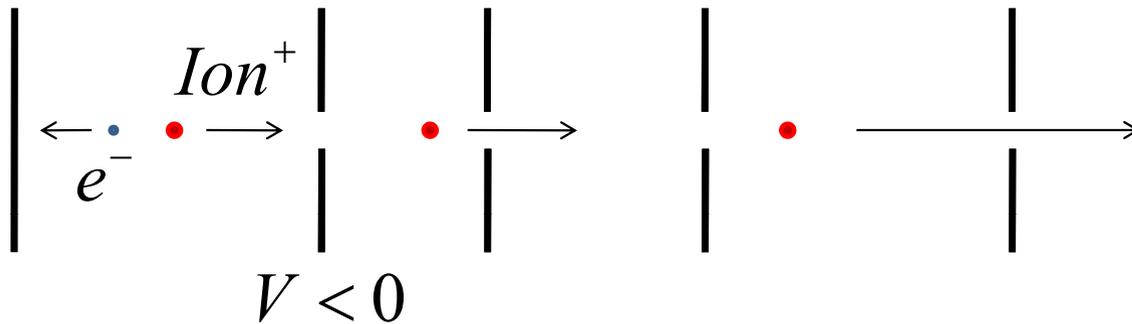


Emission provoquée

❖ L'activation de sources par des neutrons



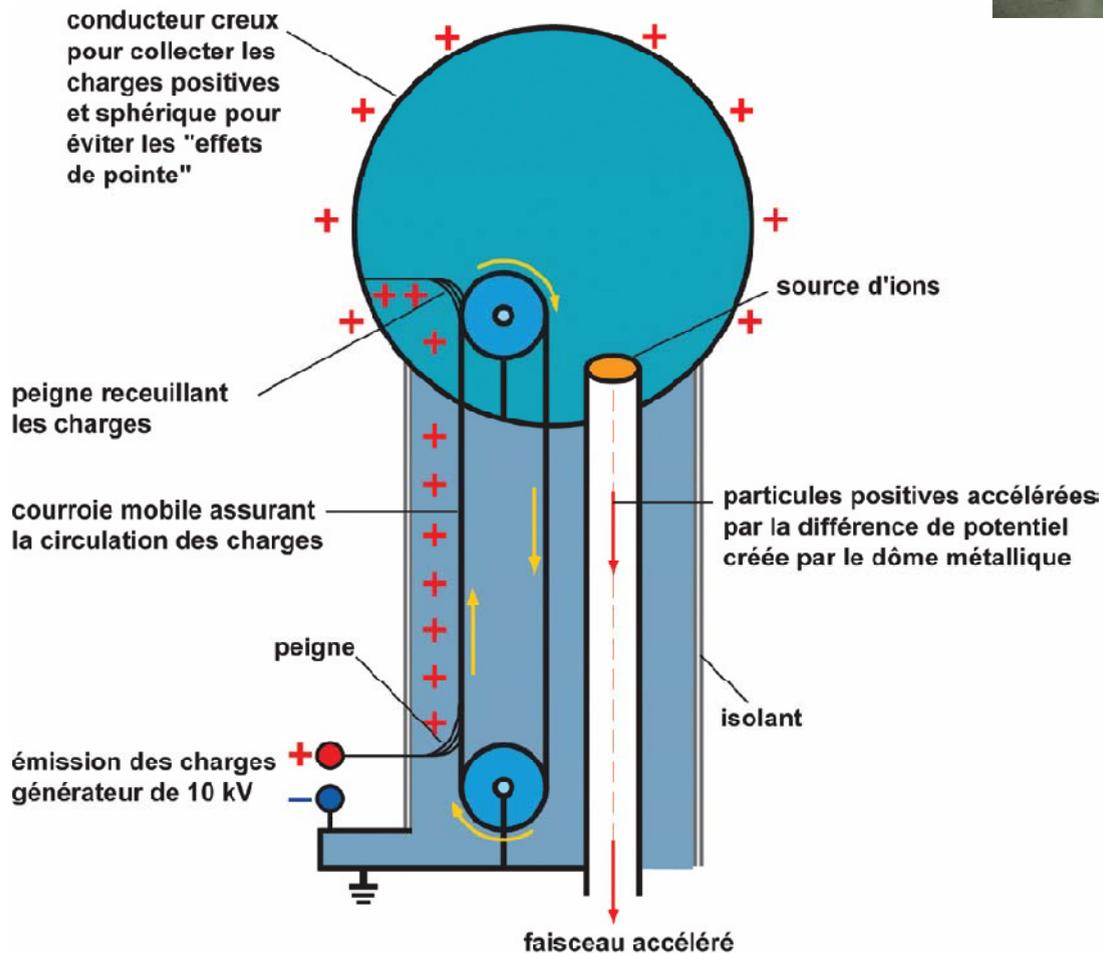
❖ Sources de protons (d'ions) :



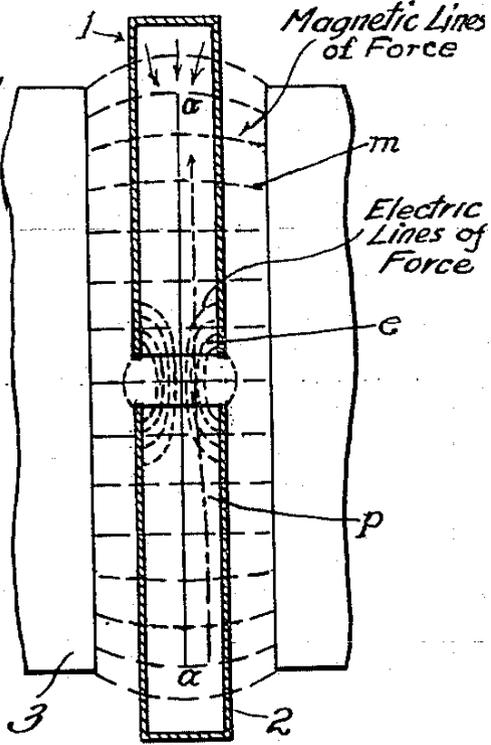
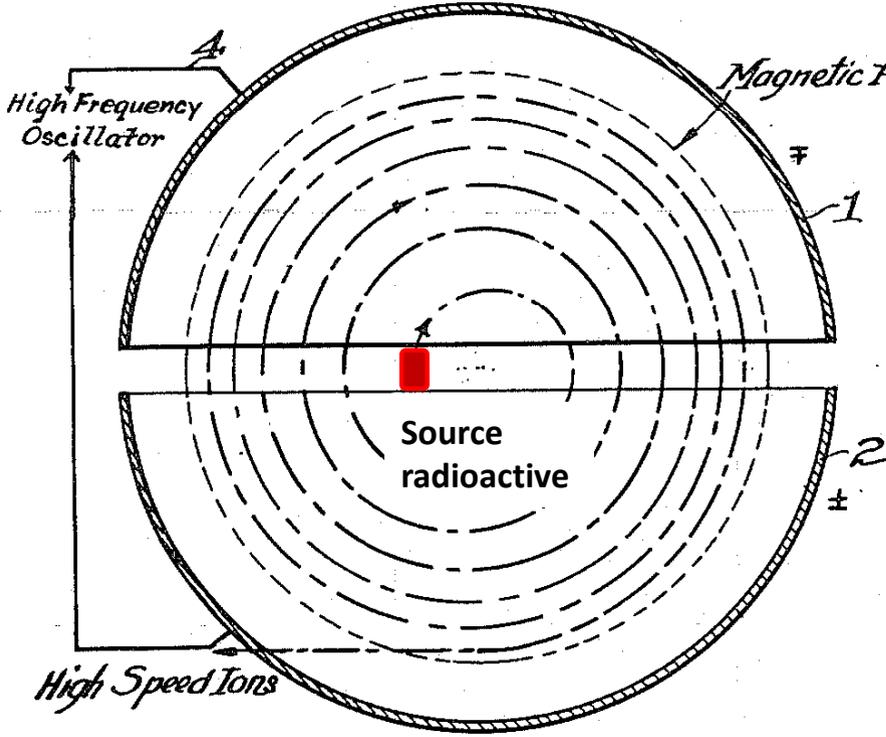
Les accélérateurs

PRINCIPES

Van de Graaff (1929)



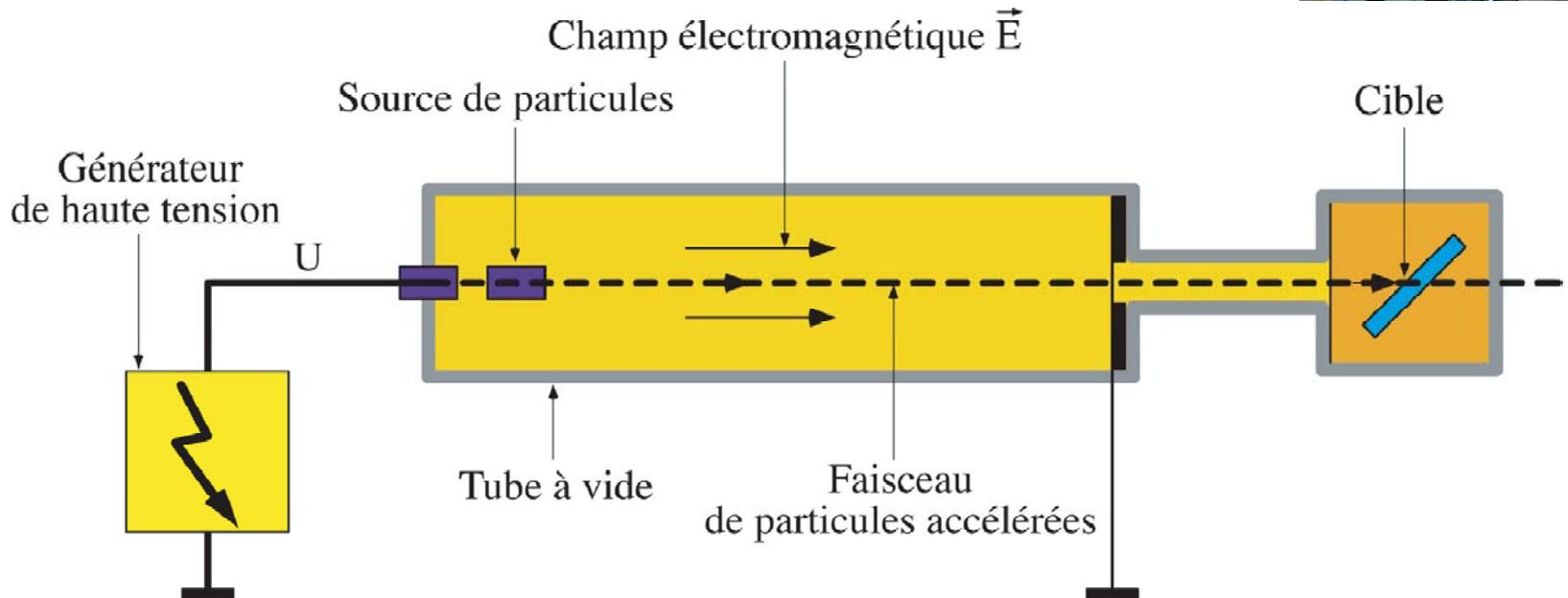
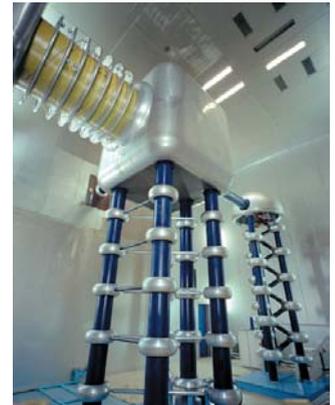
cyclotron (1929)



$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

= constante

Cockcroft (1930)

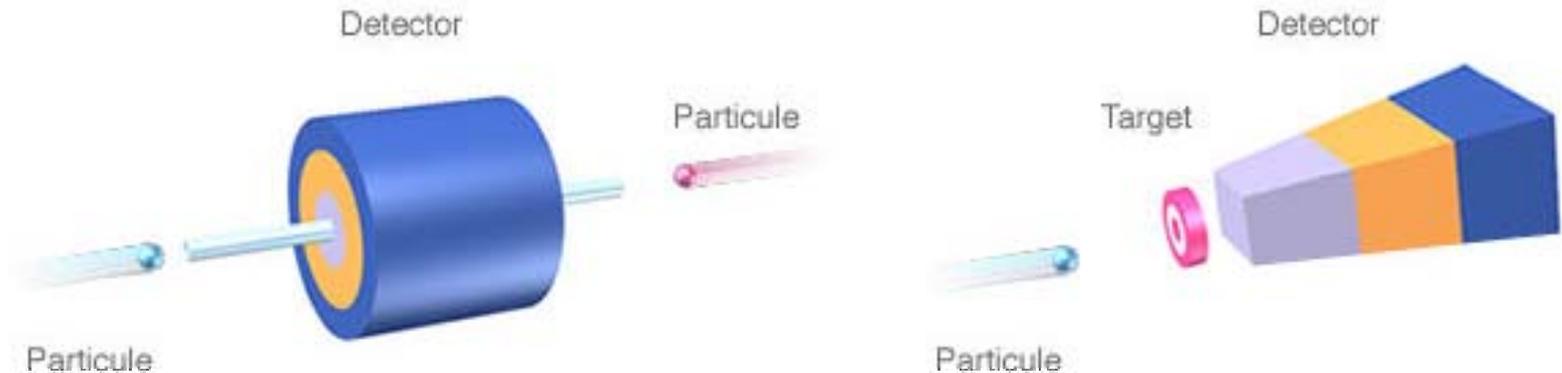


Les conditions initiales

Accélérer des particules pour qu'elles libèrent leur énergie :

❖ dans des collisionneurs $E_{cm} = 2\sqrt{E_1 E_2}$

❖ sur des cibles fixes $E_{cm} = \sqrt{2E_1 m_2}$



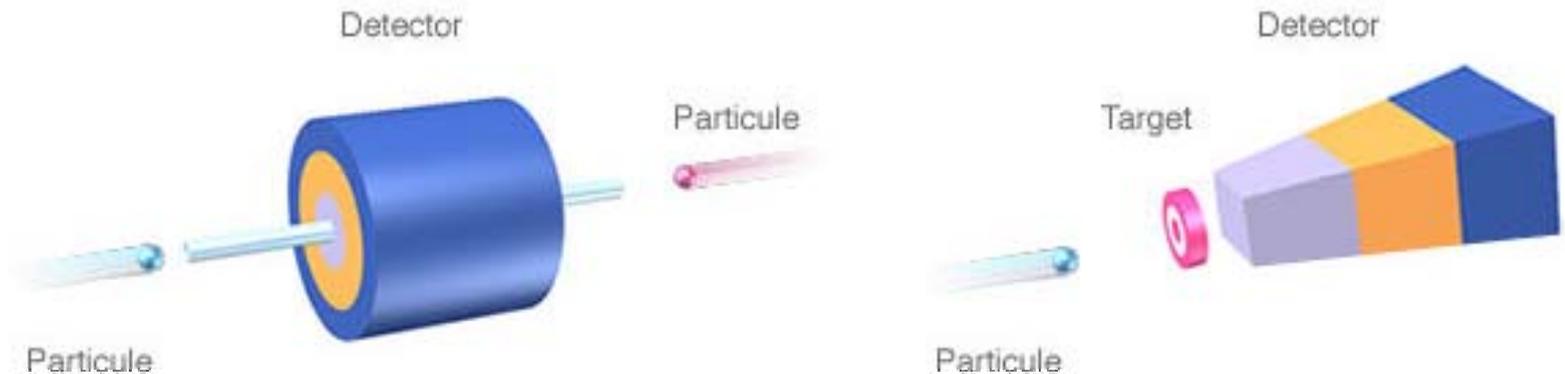
Les conditions initiales

Pour un faisceau de particules de 1 TeV :

❖ dans des collisionneurs $E_{cm} = 2 TeV$

❖ sur des cibles fixes d'hydrogène :

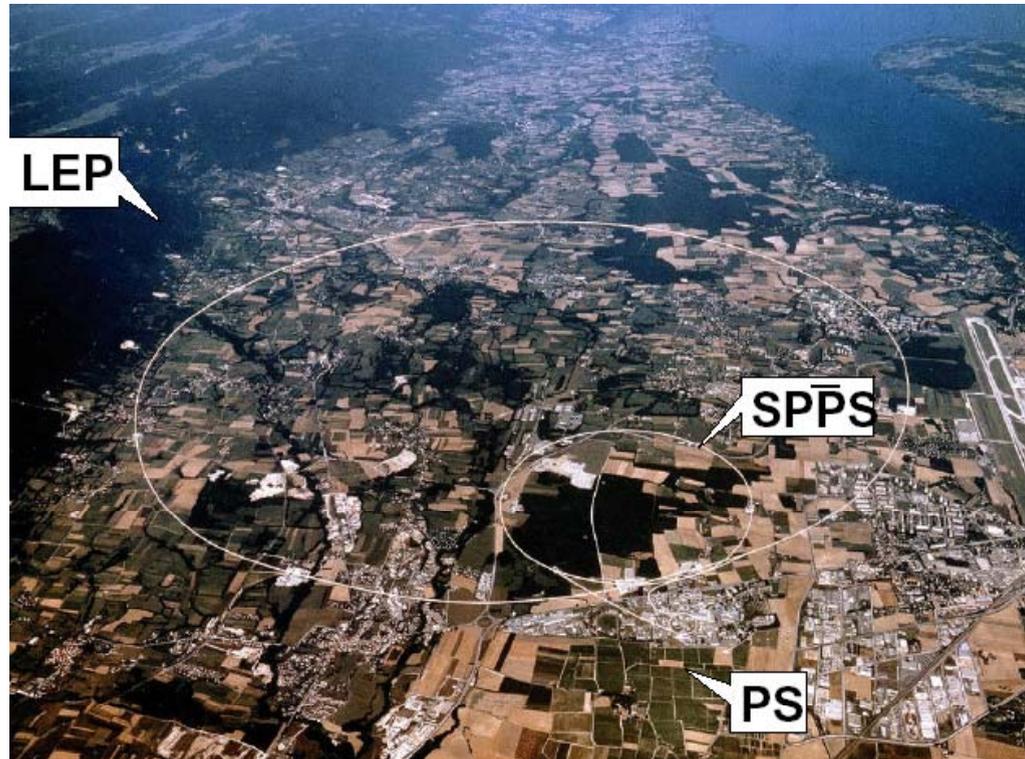
$$E_{cm} = \sqrt{2 \times 1 \times 938 \cdot 10^{-6}} = 43 GeV$$



Les accélérateurs

MACHINES A ELECTRONS

LEP @CERN



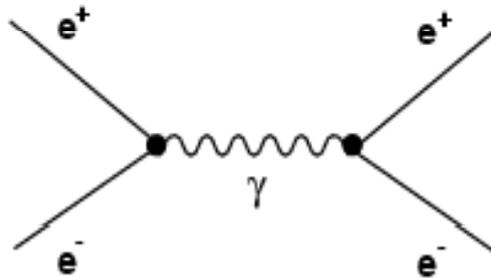
≤ 2000 : LEP, @CERN Genève
circulaire, e^+e^- , 27 Km de long, $E_{CM} < 206$ GeV

Collisionneurs e+e-

Toute l'énergie disponible dans le centre de masse est convertie dans la réaction :

$$E_{cm} = 2\sqrt{E_{e^+}E_{e^-}}$$

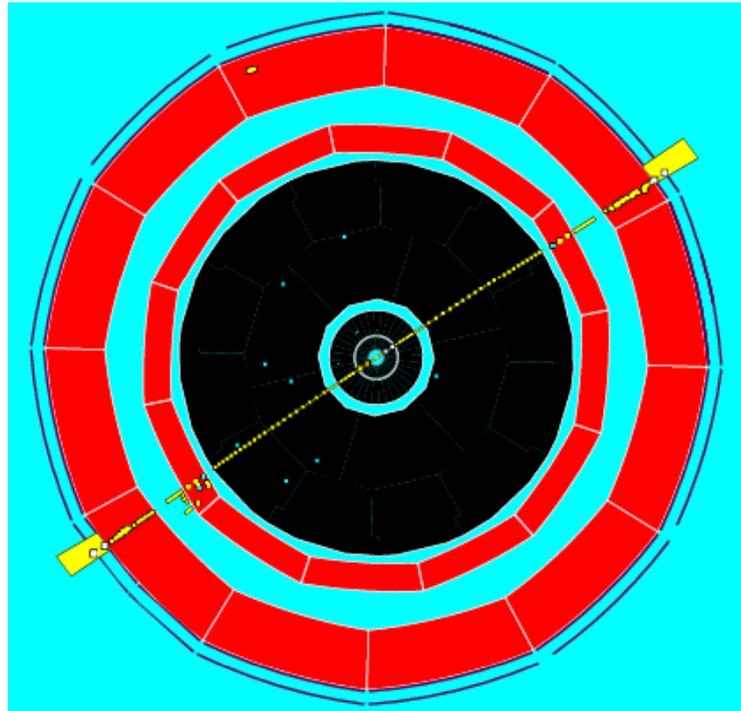
Environnement expérimental "propre"



Etat initial bien défini, énergie au centre de masse réglable

Comparaisons de collisionneurs ...

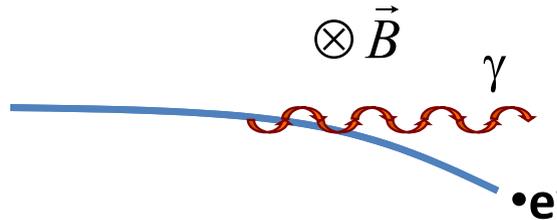
Un événement au LEP :



Collisionneurs e+e-

Accélérateurs circulaires de rayon R:

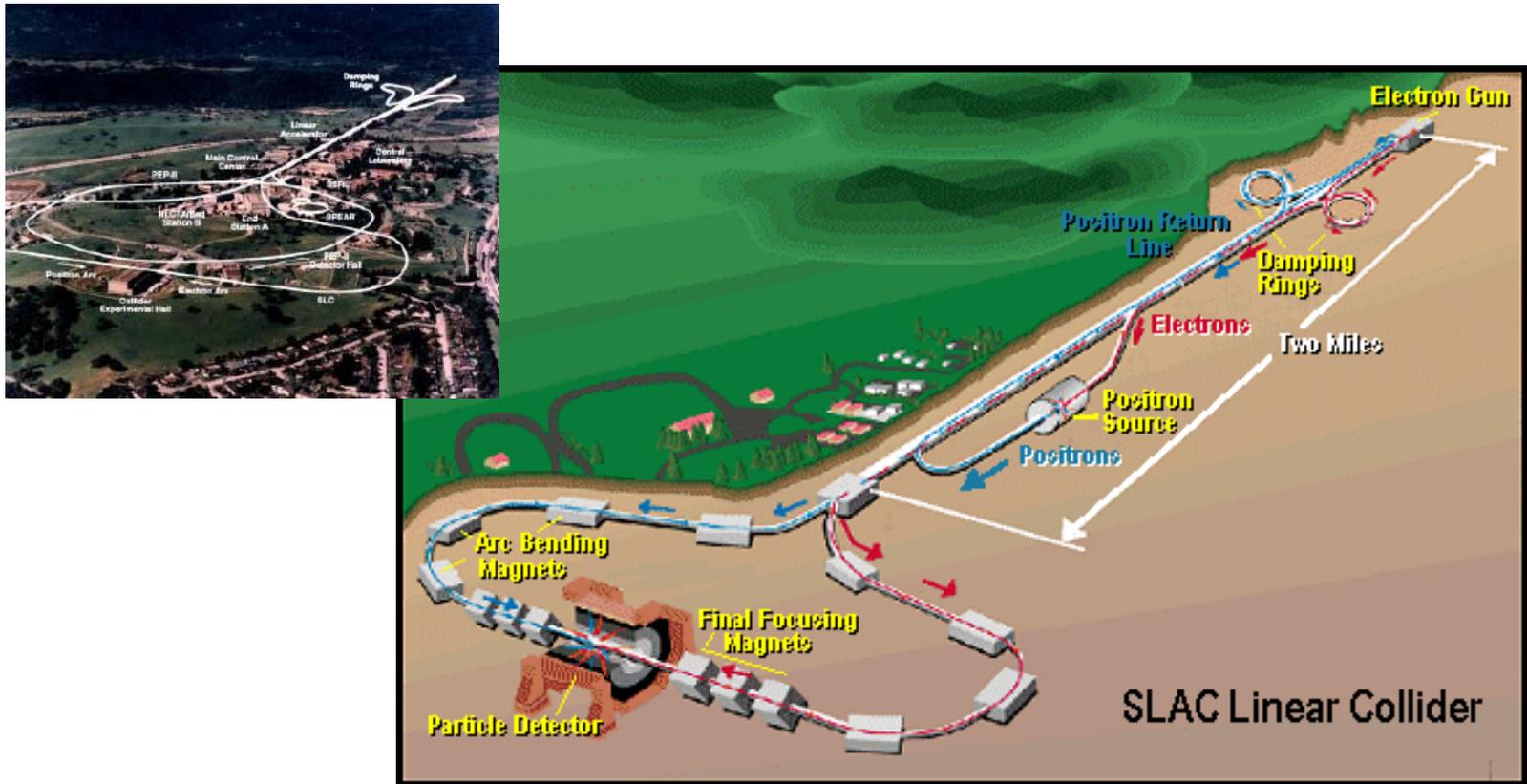
❖ limités par la radiation synchrotron:



$$\frac{\text{Perte d'energie}}{\text{Par tour}} = \frac{dE}{dT} \propto \frac{E^4}{m^4 R}$$

c.a.d environ 4 GeV par tour au LEP200

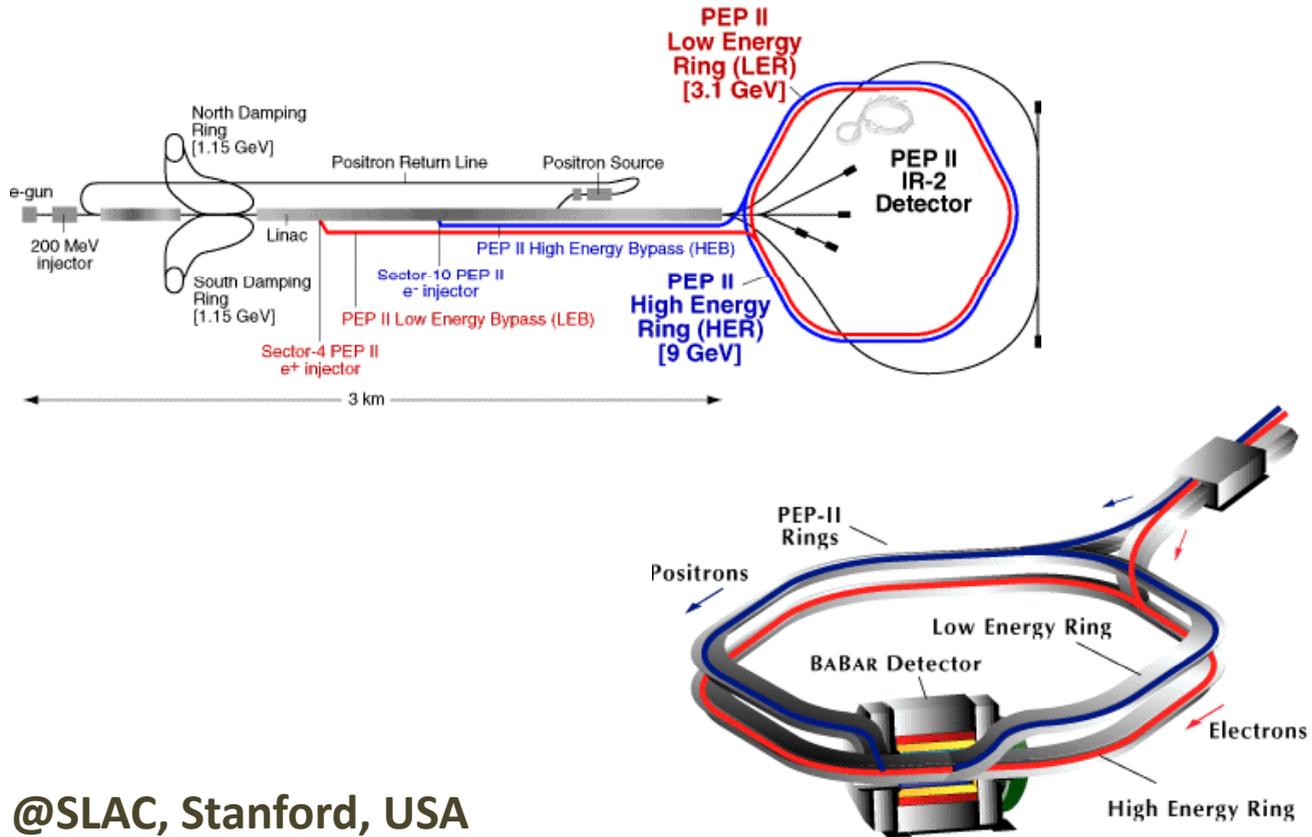
SLC @SLAC



SLC, @SLAC, Stanford, USA

linéaire, e^+e^- , 3.2 Km de long, $E_{CM} = 100$ GeV

PEP II@SLAC



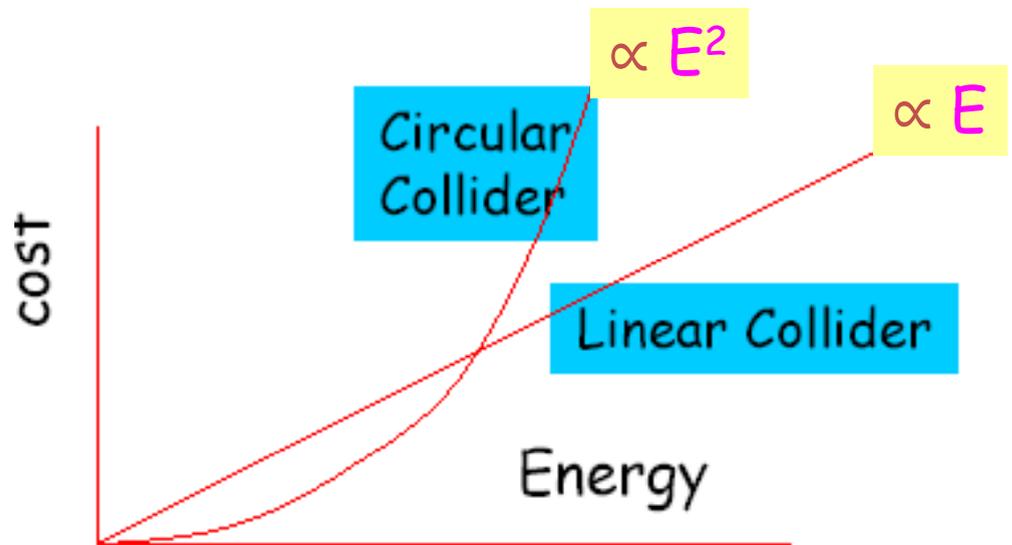
PEP II : , @SLAC, Stanford, USA

linéaire, e^+e^- , 3.2 Km de long, collisions asymétriques $E_{CM} = 10,56 \text{ GeV}$

Collisionneurs e+e- vs accélérateurs linéaires

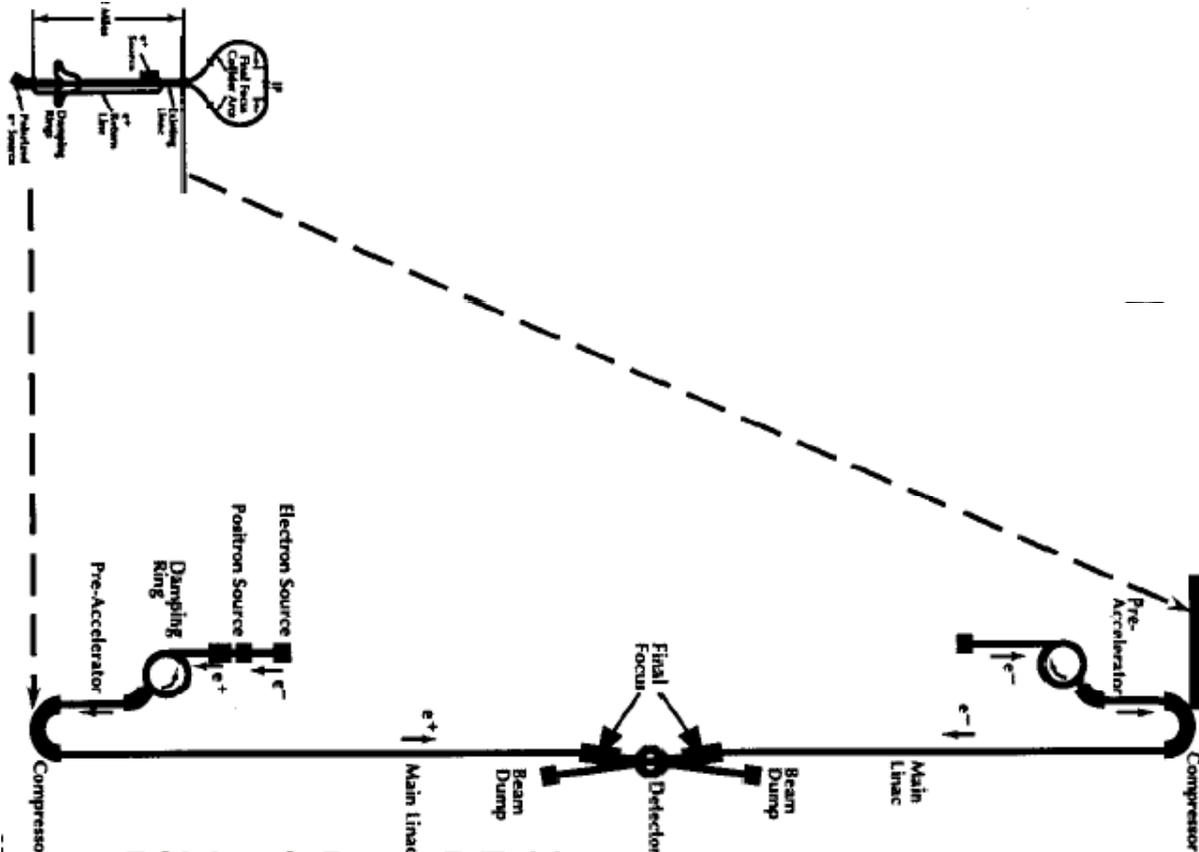
Accélérateurs circulaires de rayon R:
$$\frac{\text{Perte d'énergie}}{\text{Par tour}} = \frac{dE}{dT} \propto \frac{E^4}{m^4 R}$$

- ❖ pas ce problème pour les collisionneurs hadroniques car $(m_e/m_p)^4 \sim 10^{-13}$
- ❖ collisionneurs e+e- de très haute énergie doivent être linéaires!



ILC @ quelque part sur terre

SLC



ILC $\geq 201x$:

linéaire, e^+e^- , ECM = 0.5 – 1.5 TeV

Les accélérateurs

MACHINES ELECTRONS-PROTONS

HERA @ DESY

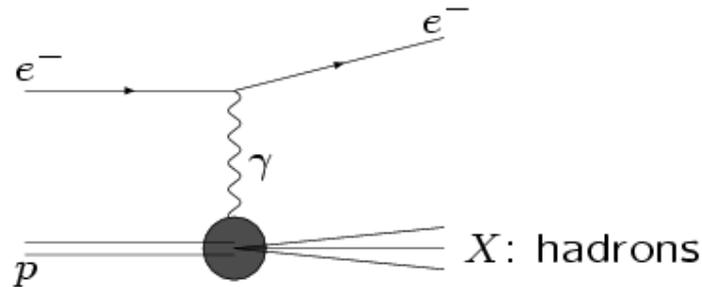


≥ 2000: Hera run II, 6.3 Km de long, @Desy Hambourg
circulaire, e^+/e^- de 27 GeV vs protons de 920 GeV

Collisionneurs e-p

Le faisceau d'électrons sonde la structure du proton:

- ❖ diffusion profondément inélastique : $ep \rightarrow eX$



- ❖ Relation entre la section efficace diffusion et la section efficace du sous-processus partonique (e-q)

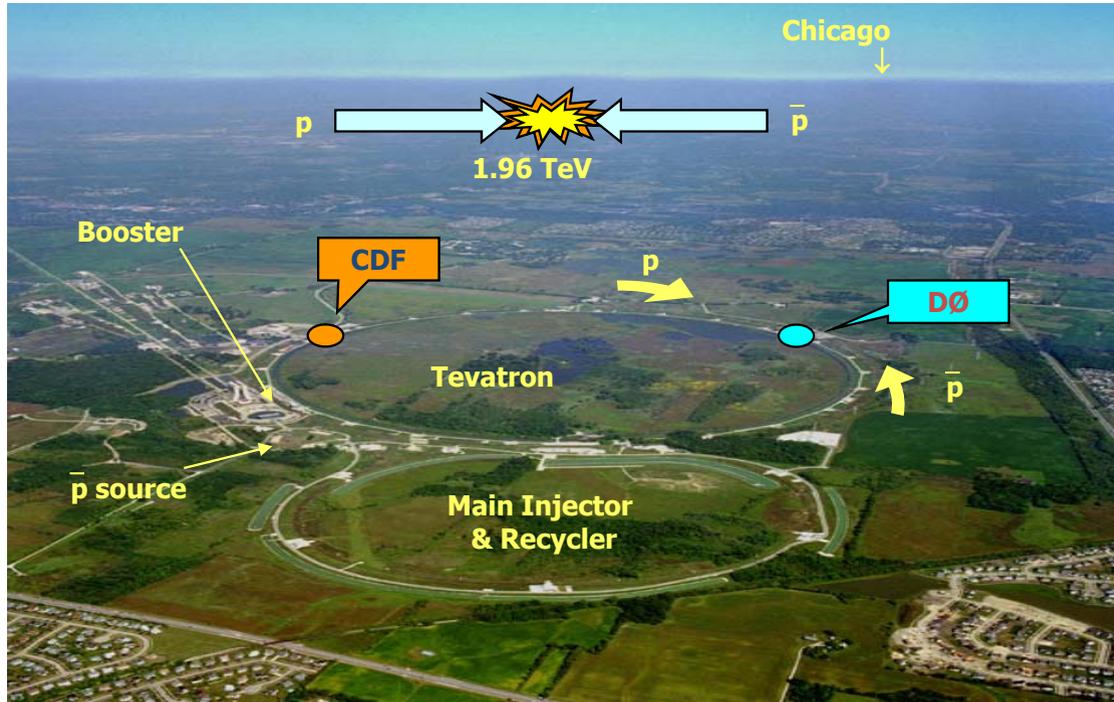
$$\sigma(ep) = \int_0^1 dx \sum_{q, \bar{q} \text{ in proton}} \underbrace{q^p(x)} \sigma(eq)$$

$q^h(x)dx$: est la probabilité de trouver un parton de type q dans le hadron h emportant une fraction de l'impulsion du hadron comprise entre x et $x+dx$

Les accélérateurs

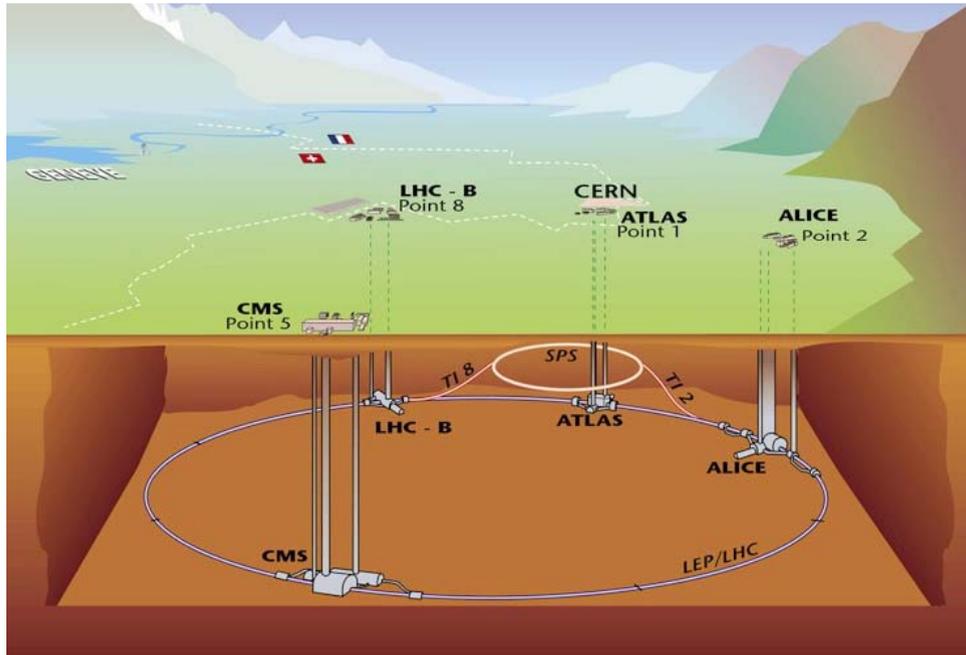
MACHINES A PROTONS

TeVatron @Fermilab



≥ 2000 : Tevatron run II, @Fermilab Chicago
circulaire, pp, 6.3 Km de long, $E_{\text{CM}} = 1\,960\text{ GeV}$

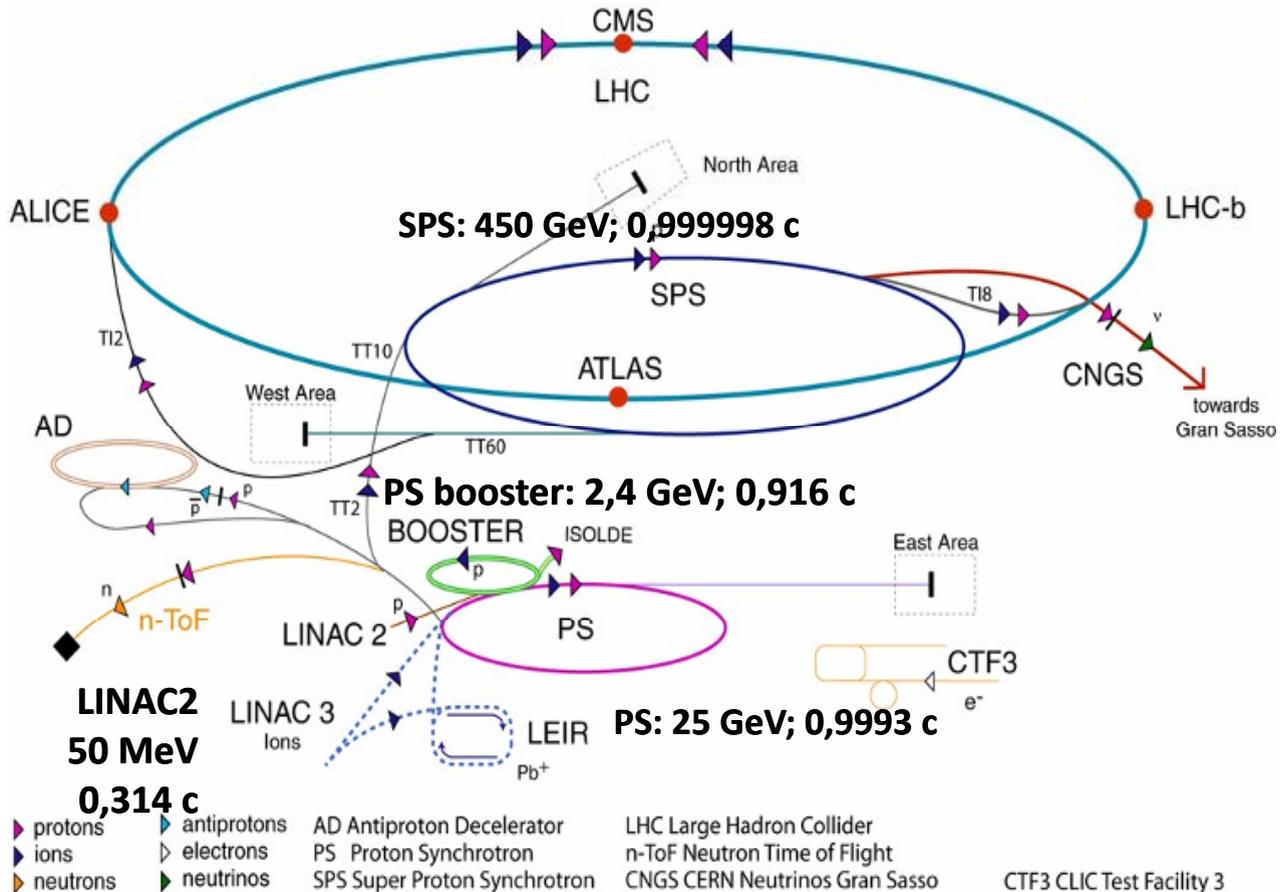
LHC @CERN



≥ 2007: LHC, @CERN Genève
circulaire, pp, 27 Km de long, $E_{CM} = 14 \text{ TeV}$

LHC @CERN

LHC: 7 TeV; 0,999999991 c



LHC @CERN

Un endroit presque aussi froid que l'Univers...



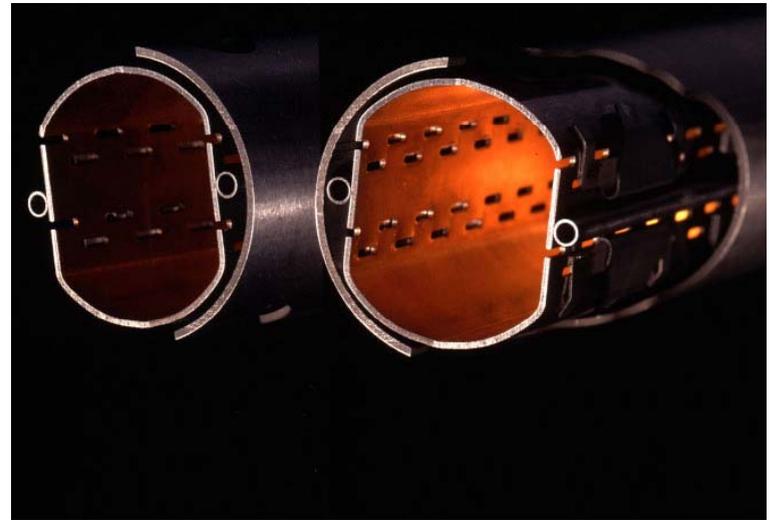
... avec une température en exploitation de $-268,5^{\circ}\text{C}$

$4,5^{\circ}$ seulement au dessus du zéro absolu!

Utilisant de l'hélium superfluide à $1,9\text{ K}$

LHC @CERN

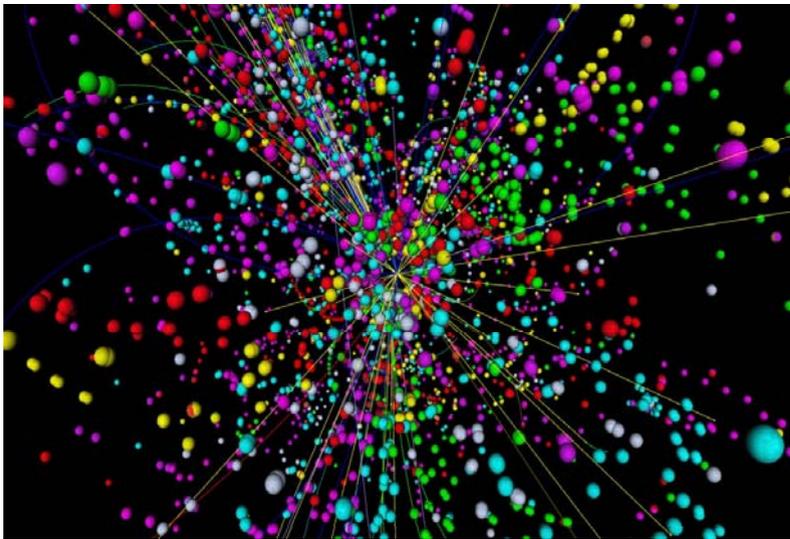
L'espace le **plus vide** du système solaire...



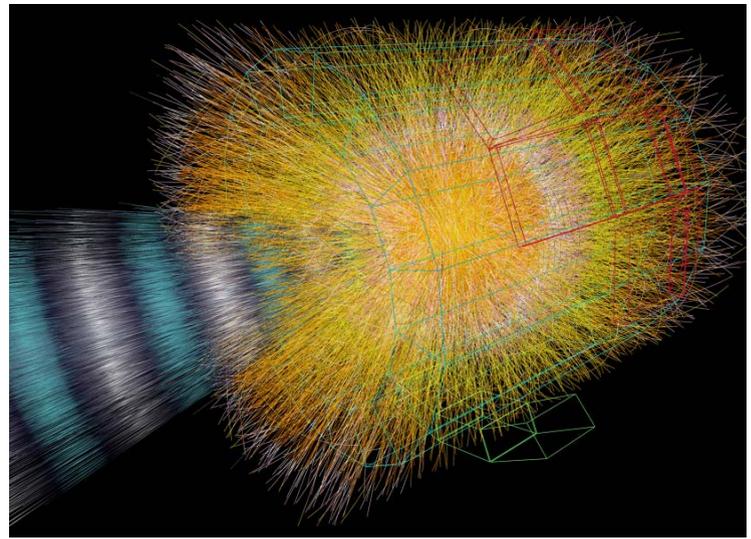
Les protons circulent dans un vide comparable à l'espace interplanétaire
 10^{-13} atmosphère !

LHC @CERN

Un des points les **plus chauds** de la galaxie...



Collision dans l'expérience CMS (simulation)



Collision dans l'expérience ALICE (simulation)

Deux protons en collision génèrent dans un espace minuscule des températures plus d'un milliard de fois celles au centre du Soleil.

LHC @CERN

Le faisceau circule 10 h dans le LHC et parcourt 10 milliards de km, soit un **aller-retour vers Neptune**.

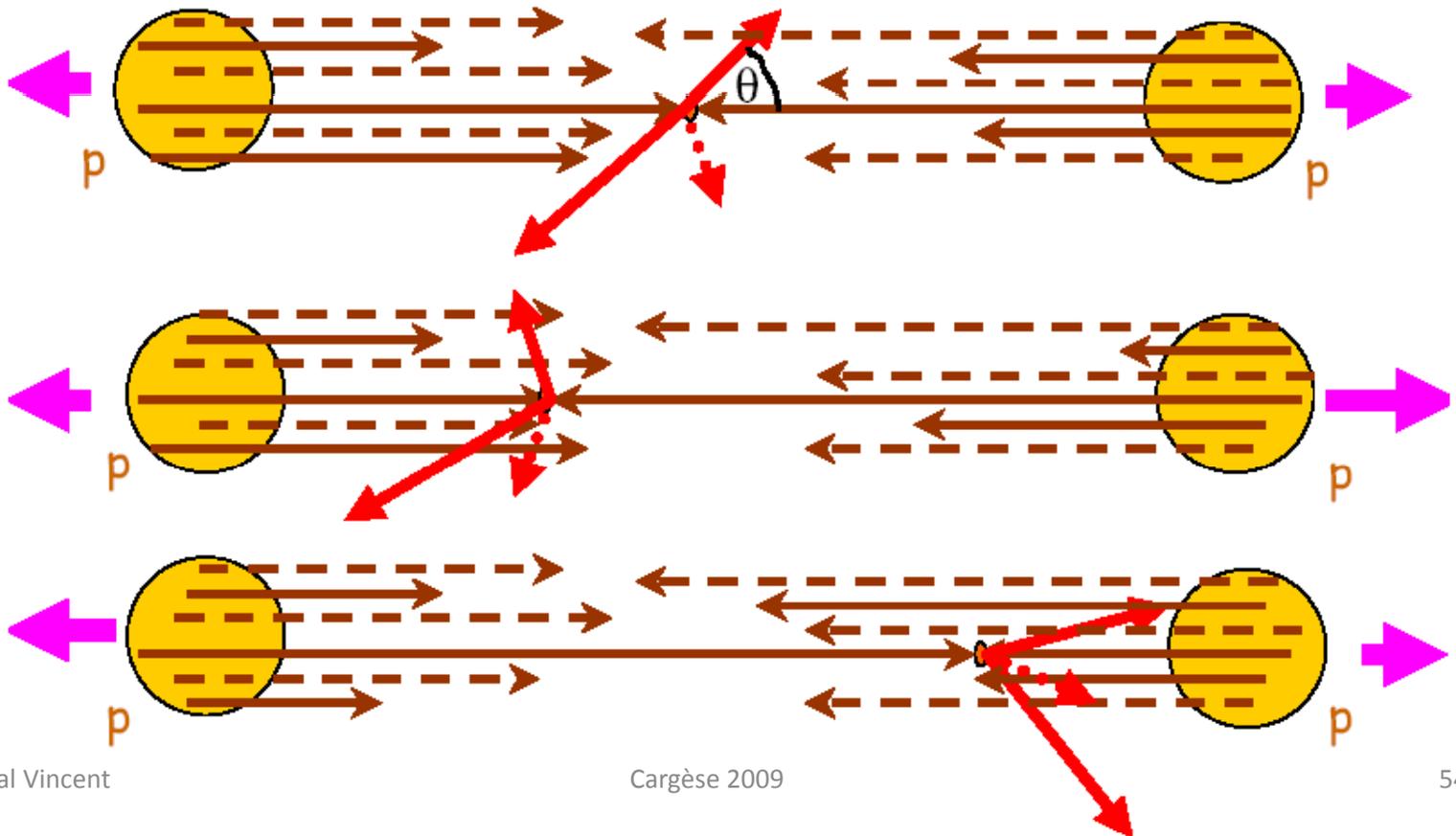
Les protons circulent à 99,9999991% de la vitesse de la lumière, soit 11245 tours (de 27 km) à la seconde Ils sont obtenus à partir d'une cible en hydrogène. Environ 2 nano-grammes d'hydrogène est accéléré chaque jour Il faudrait un million d'années au LHC pour accélérer un gramme ...

Les collisions ont lieu toutes les 25 ns (10^{-9} s), soit 40 millions de collisions faisceau-faisceau par seconde soit environ 600 millions de collisions de protons par seconde.

L'énergie d'un faisceau de protons de 1 TeV est équivalente à 350 MJ, soit un TGV (400 tonnes) lancé à 150 km/h serait suffisant pour faire fondre 500 kg de cuivre.

Collisions hadroniques ... cinématique

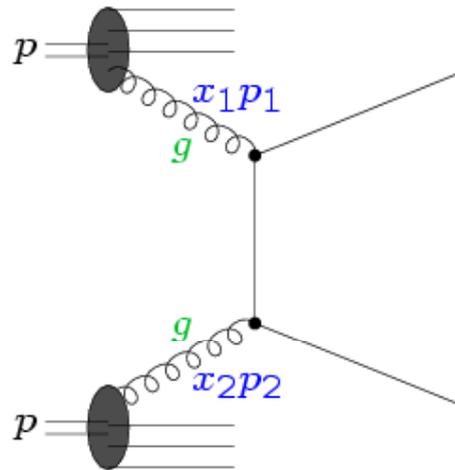
L'énergie dans le centre de masse des deux particules n'est à priori pas déterminée :



Collisionneurs pp

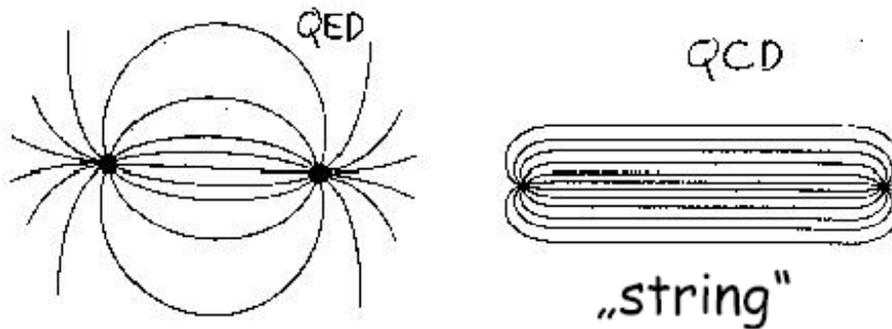
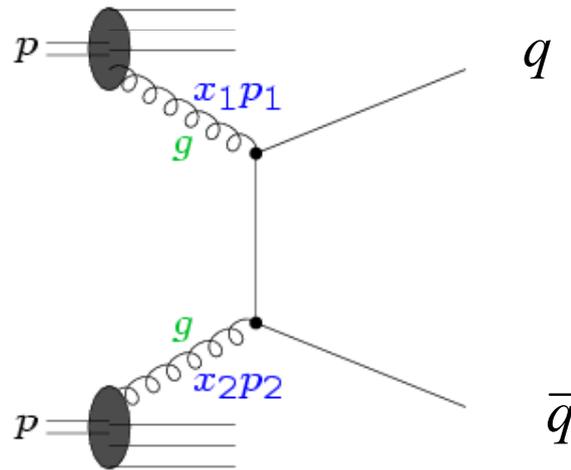
Les collisions proton-proton :

- ❖ contiennent des processus durs de partons quarks, anti-quarks, et gluons.



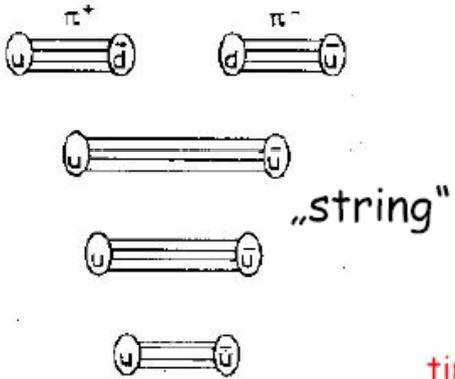
- ❖ (énergie)² disponible pour le sous-processus partonique est $\hat{s} = x_1 x_2 s$
au LHC, $s^{1/2} = 14$ TeV et $\hat{s}^{1/2}$ pourra aller jusqu'à quelques TeV
- ❖ Une fraction importante de l'énergie est emportée par les restes des protons

Etat final ... jets ...

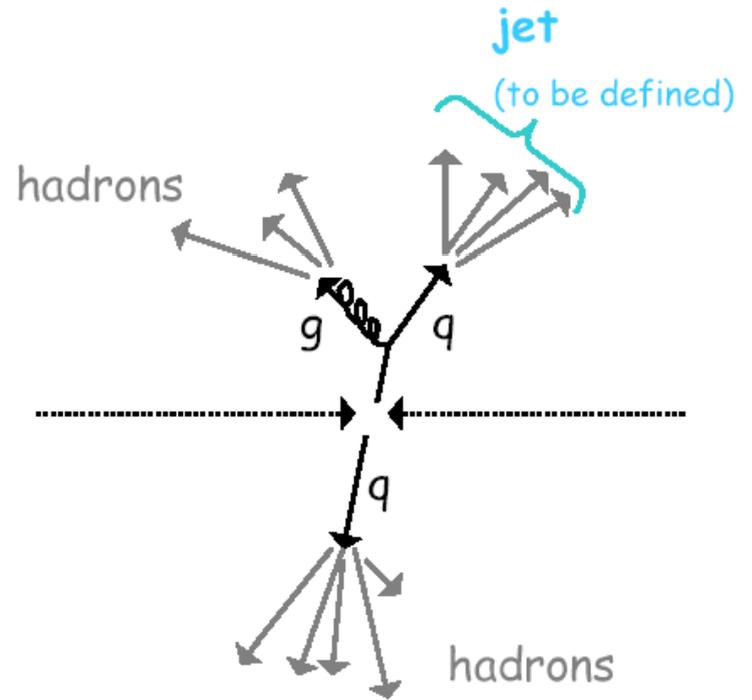
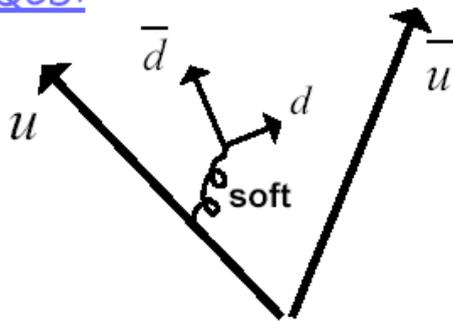


... jets ...

String model:



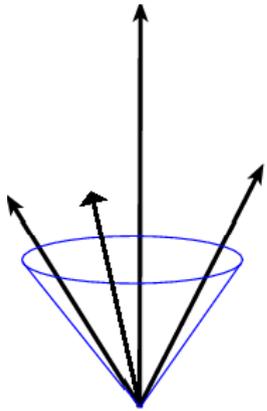
QCD:



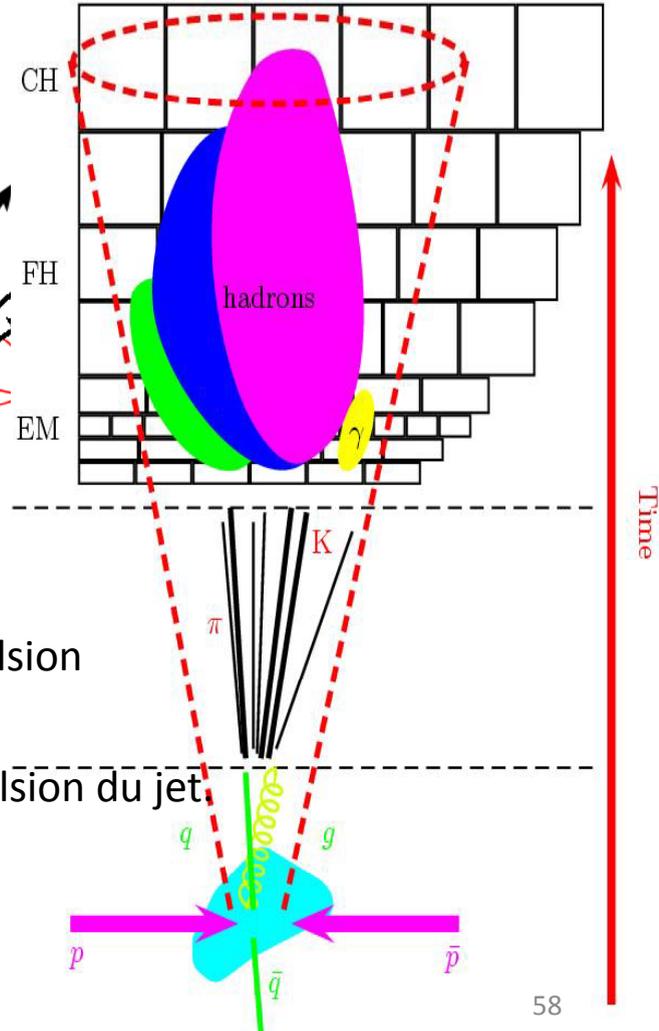
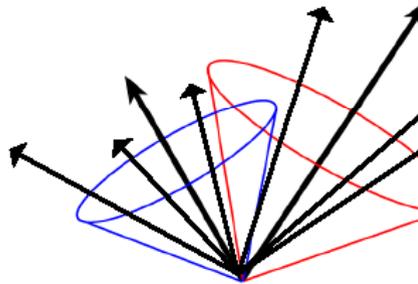
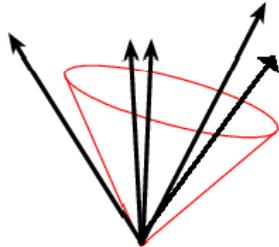
Hadronization: non-perturbative

⇒ need models!

... jets ...



cone jets

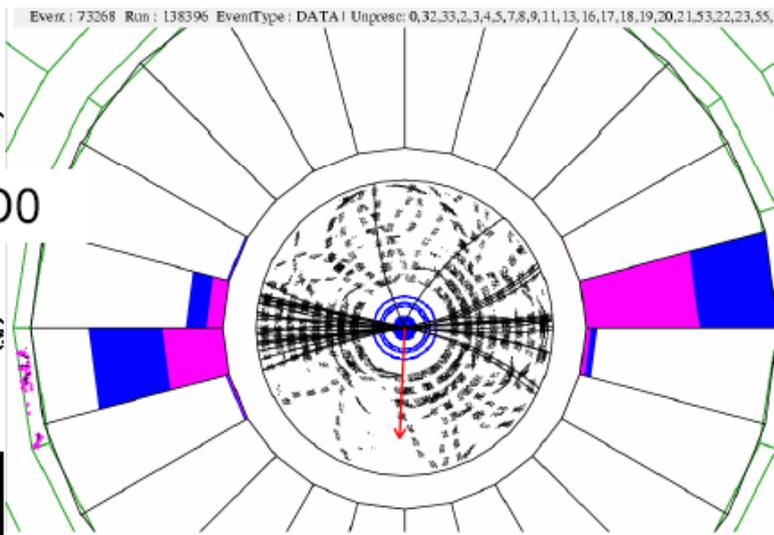
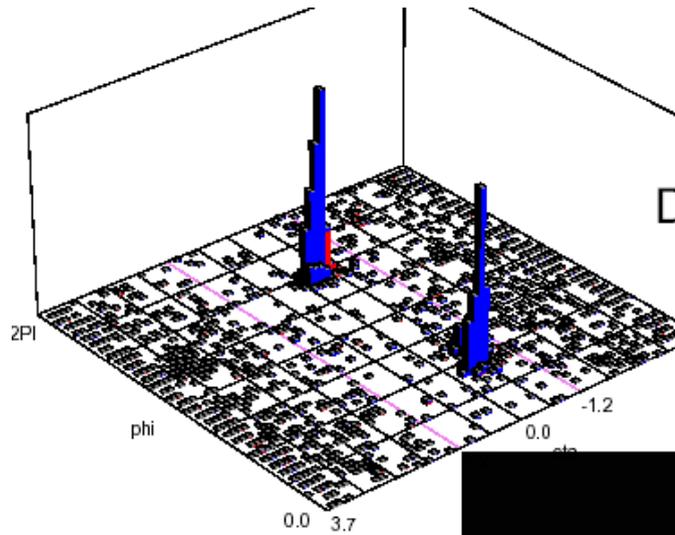


On définit un cône autour des particules de haute impulsion

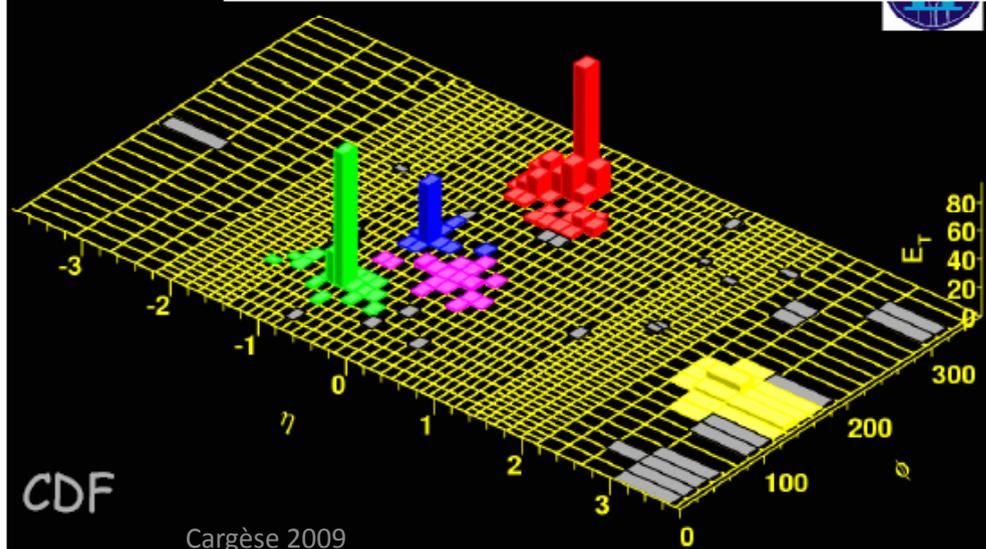
On ignore les traces de faible impulsion

On somme les impulsions des traces pour définir l'impulsion du jet

... jets ...



Jet events

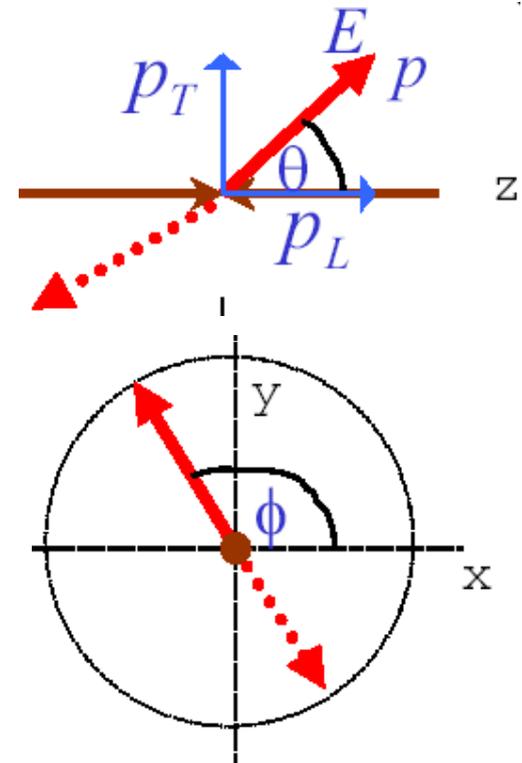


CDF

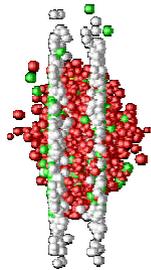
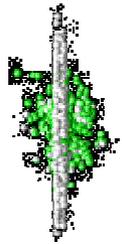
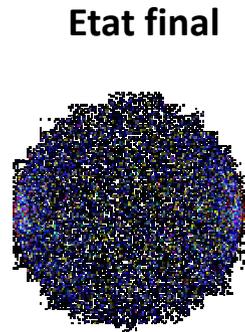
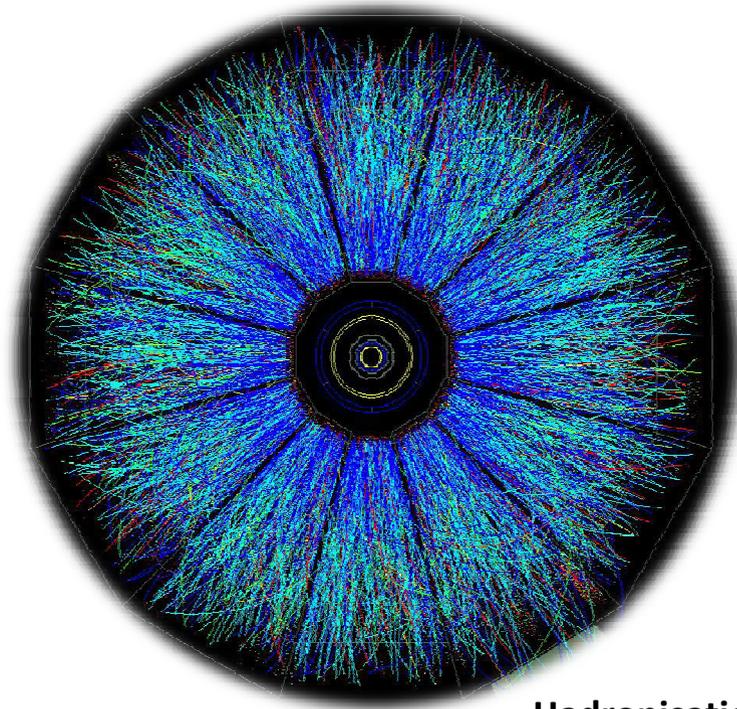
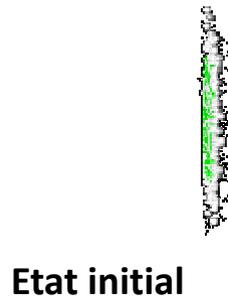
Collisions hadroniques ... cinématique

Variables cinématiques sont globales aux jets de particules :

- ❖ Angle azimutal (ϕ)
- ❖ Angle polaire (θ)
- ❖ Energie (E)
- ❖ Quantité de mouvement (P)
- ❖ Impulsion transverse (P_T)
- ❖ Impulsion longitudinale (P_L)

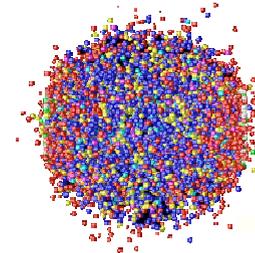
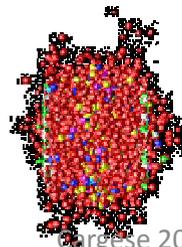


Collisions hadroniques ... QGP



Hadronisation

PLASMA



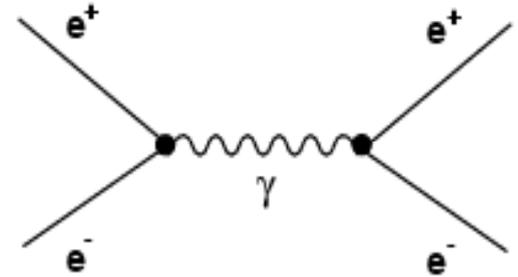
Comparaisons de collisionneurs

Les machines leptoniques (LEP, SLC, ILC, ...):

- ❖ Environnement expérimental “propre”
- ❖ Toute l'énergie est utilisée dans le processus => cette contrainte est utilisée dans l'analyse des données
- ❖ Etat initial bien défini, polarisation des faisceau possible, énergie au centre de masse réglable
- ❖ Bon rapport signal sur bruit
- ❖ Pratiquement tous les événements peuvent être enregistrés

=> physique de précision

espace de découverte limité par l'énergie disponible dans le centre de masse



Comparaisons de collisionneurs

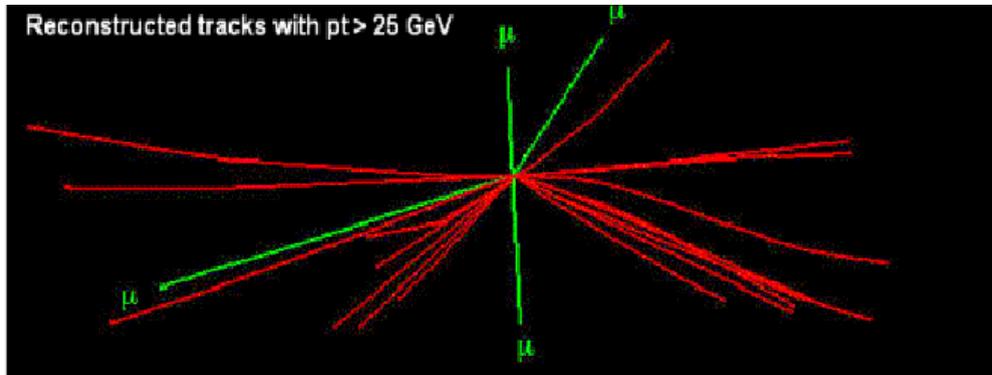
Les machines hadroniques (TEVATRON, LHC, ...) :

- ❖ Plus facile d'obtenir de très hautes énergies
- ❖ Au point de vue cinématique, on ne peut en général qu'utiliser la conservation de l'impulsion transverse
- ❖ La nature composite des protons donne lieu a un événement sous-jacent
- ❖ Particules dans l'état initial sont sensibles à l'interaction forte:
 - énormes bruits de fond QCD
 - rapport signal/bruit en général plus mauvais
- ❖ seulement une petite fraction des événements peut être enregistrée => nécessaire de développer des mécanismes de déclenchement en ligne très sélectifs. Au LHC il faudra un facteur de rejection de l'ordre de 10^7

=> en général **espace de découverte** moins limité
mais environnement expérimental plus difficile

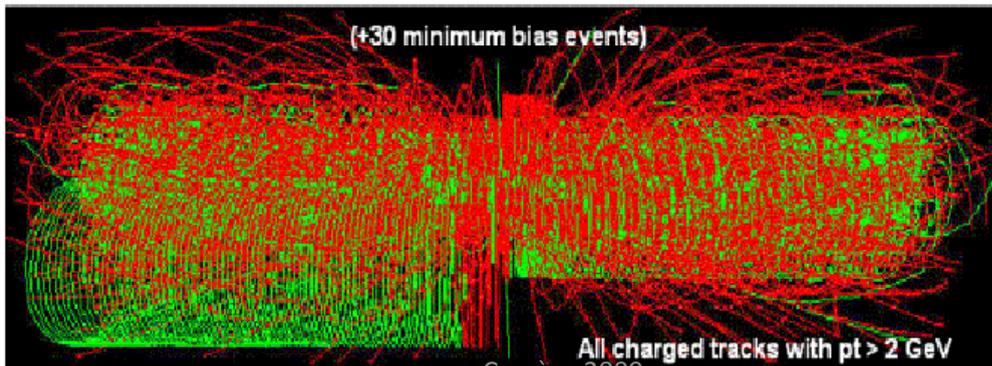
Comparaisons de collisionneurs ...

Simulation d'un événement : $gg \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$



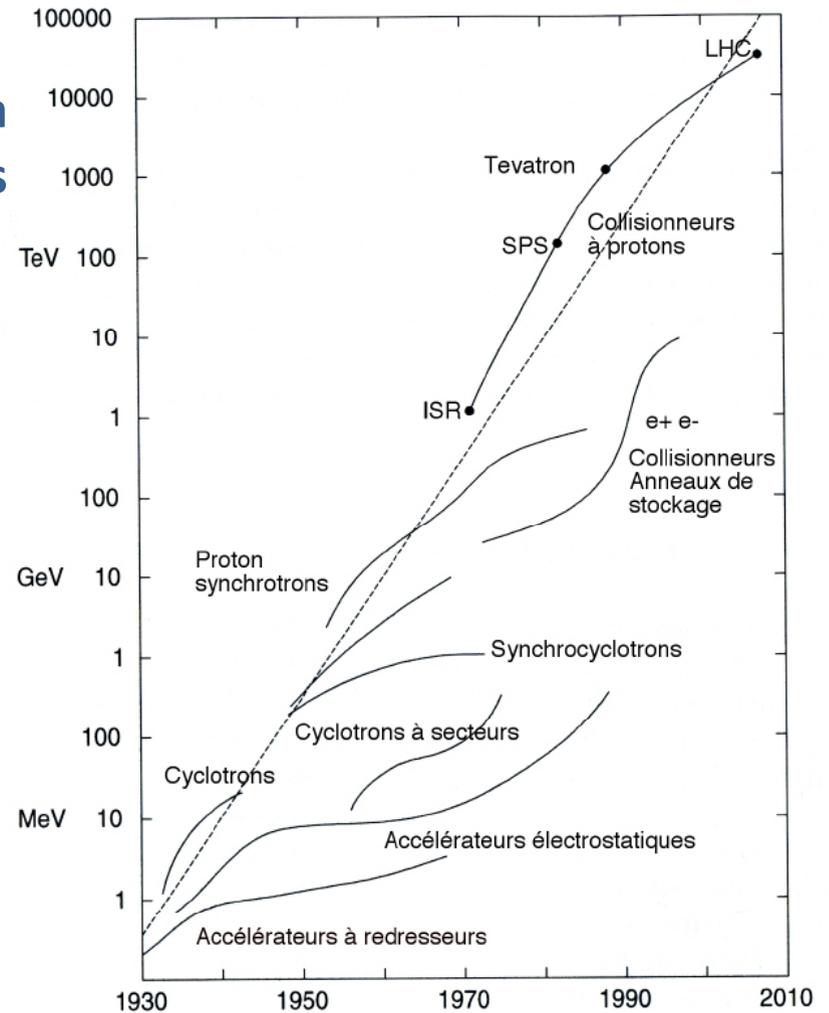
1 Higgs en 4 muons pour 10^{13} événements

1 000 traces par événement



Accélérateurs ... survol

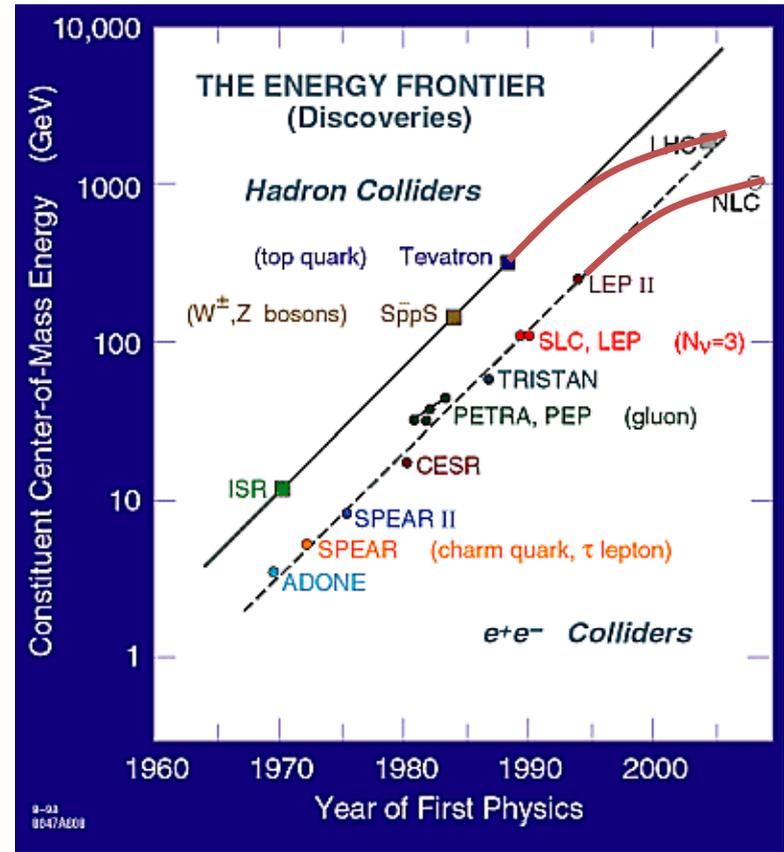
Evolution de l'énergie et de la conception des machines



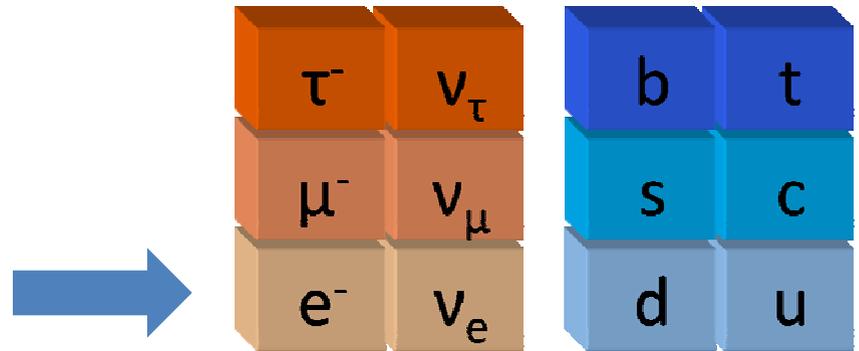
Accélérateurs hadroniques vs leptonique

saturation des courbes
à cause du cout par GeV

=> besoin de concepts nouveaux



**Il faudrait quelque chose de propre comme l'électron
plus lourd comme le proton**



Les accélérateurs

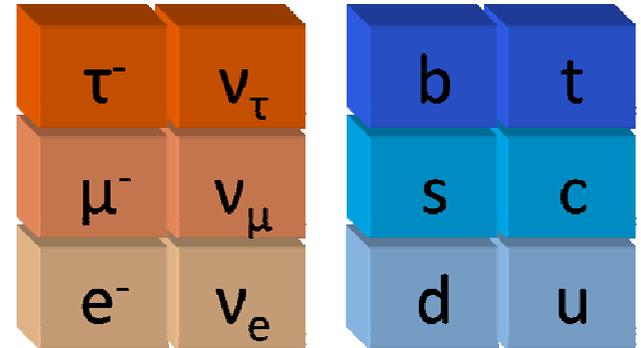
MACHINES A MUONS

Les collisionneurs à muons

Les muons sont des « électrons lourds ».

$$m_{\mu} \sim 200 \times m_e$$

Mais ils meurent très vite ...



$$\tau_{\mu} \sim \frac{1}{500\,000} \text{seconde}$$

Le temps dépend
du référentiel où
on observe



Les collisionneurs à muons

Le temps (la durée de vie d'une particule) se dilate (augmente) avec l'énergie :

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

$$\gamma = \frac{E}{m} \nearrow \quad E \nearrow$$

et les distances se contractent :

$$L_0$$



$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$



Les collisionneurs à muons

Distance parcourue et durée de l'expérience :

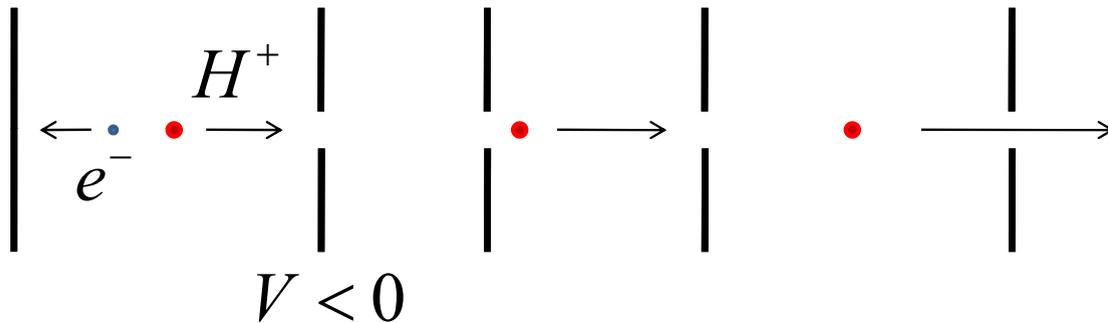
$$\begin{aligned} m_\mu &\sim 105 \text{ MeV} \\ E &= 1 \text{ TeV} \end{aligned} \quad \gamma = \frac{E}{m} \sim 10^4$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = 10^4 \times 2,2 \cdot 10^{-6} = 22 \text{ ms}$$

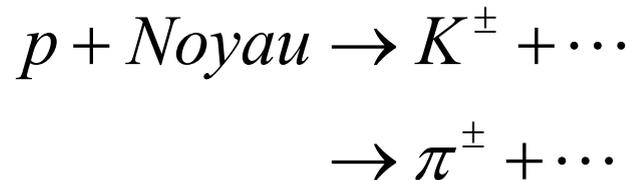
$$\Delta x = c \gamma \Delta t = 3 \cdot 10^8 \times 10^4 \times 2,2 \cdot 10^{-6} = 6\,600 \text{ km}$$

Source de muons

Hydrogène ionisé (proton) puis accéléré :



Collision entre protons de hautes énergies (10 GeV) et une cible fixe. Production de kaons et/ou pions chargés :



Source de muons

Désintégration des kaons et pions chargés :

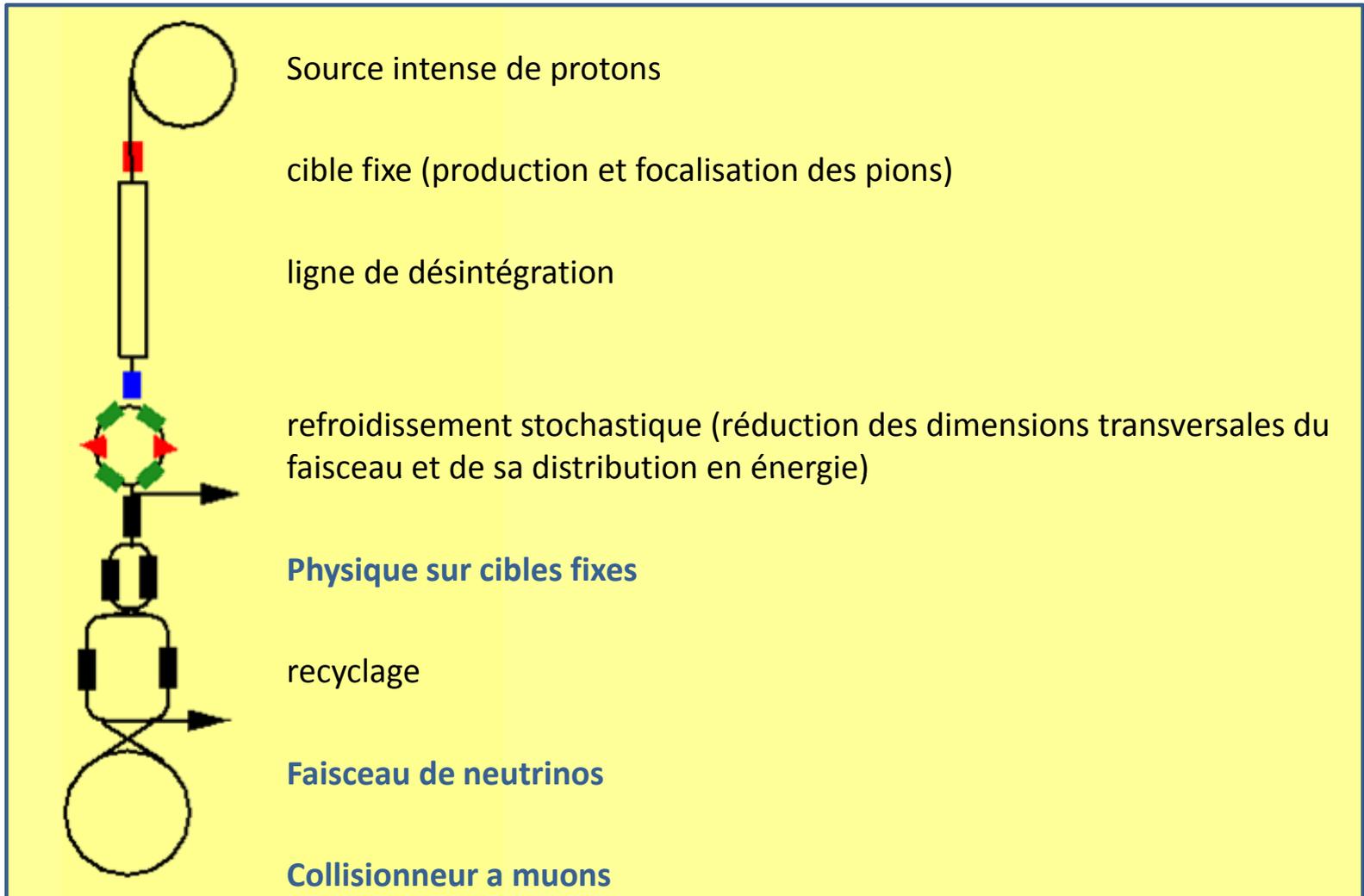
$$\tau = 1,24 \cdot 10^{-8} s = 12,4 ns$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \quad (63.54 \pm 0.14)\%$$

$$\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} s = 26 ns$$

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \quad (99.98770 \pm 0.00004)\%$$

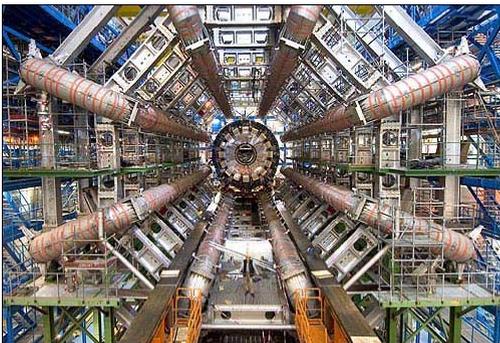
Les collisionneurs à muons



**Pour aller encore plus haut en
énergie**

La méthode

Ces machines peuvent être des **installations artificielles** conçues par des laboratoires de recherche



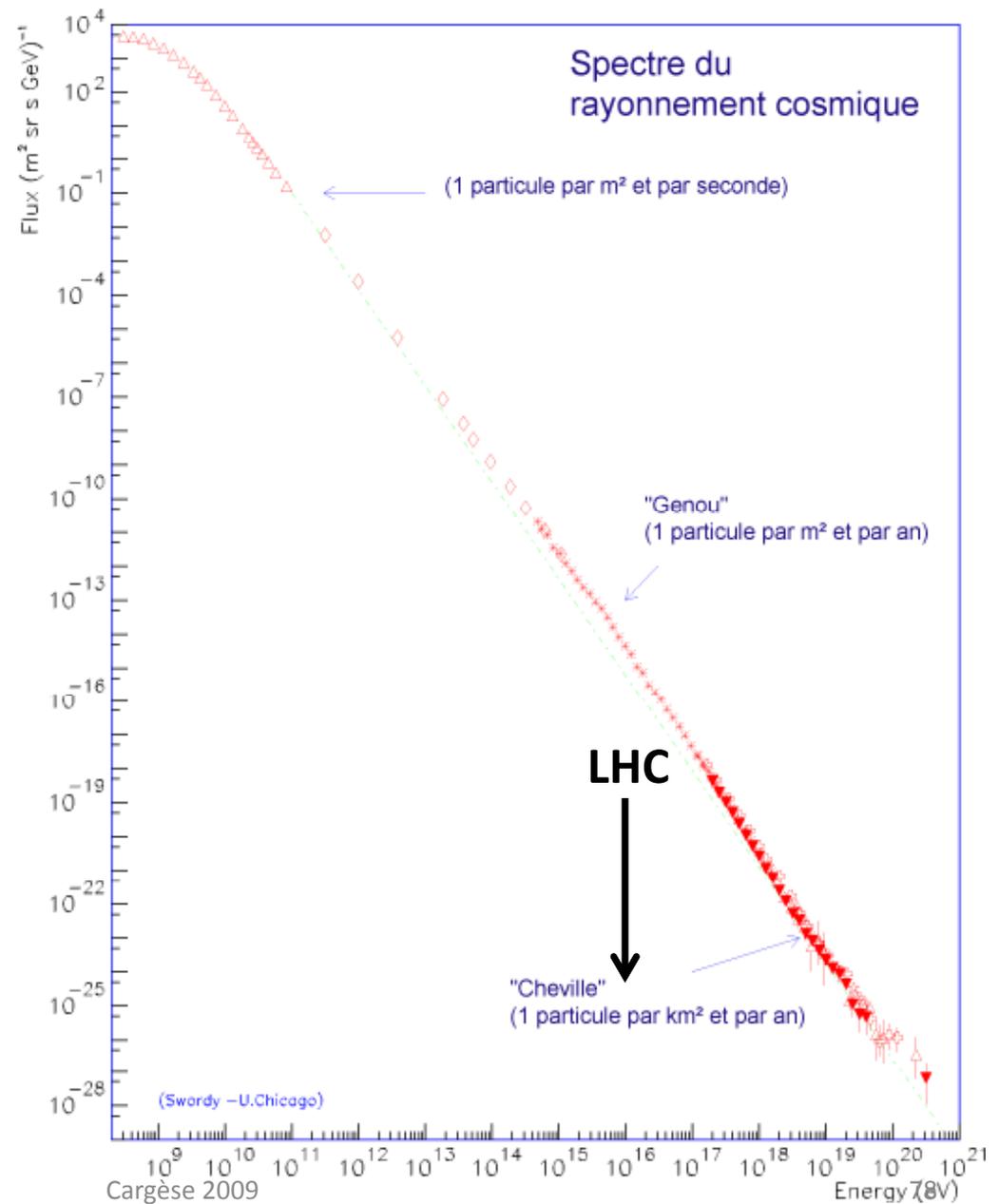
ou **naturellement produits dans l'Univers** par des événements cataclysmiques.



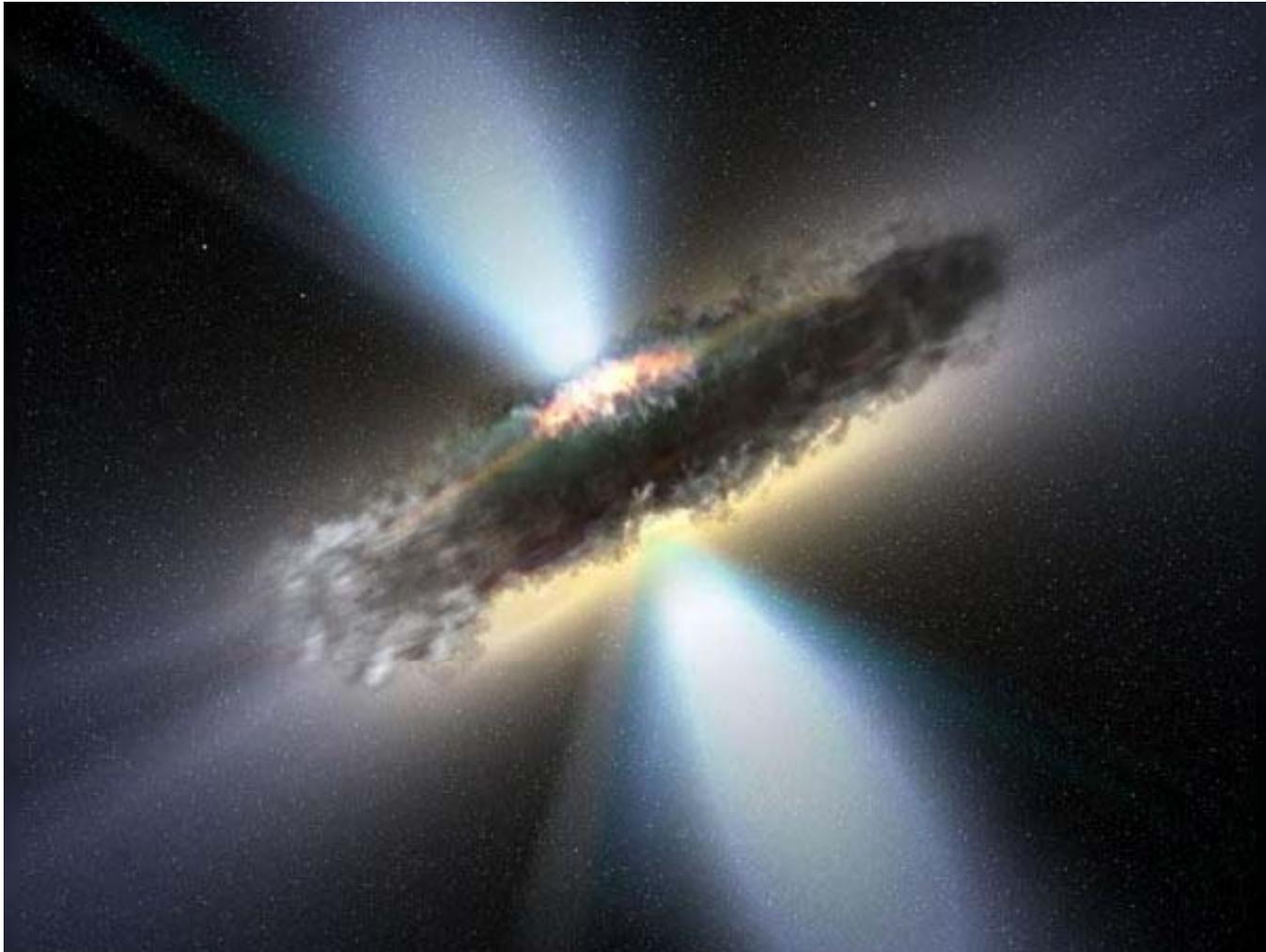
Les accélérateurs

MACHINES NATURELLES

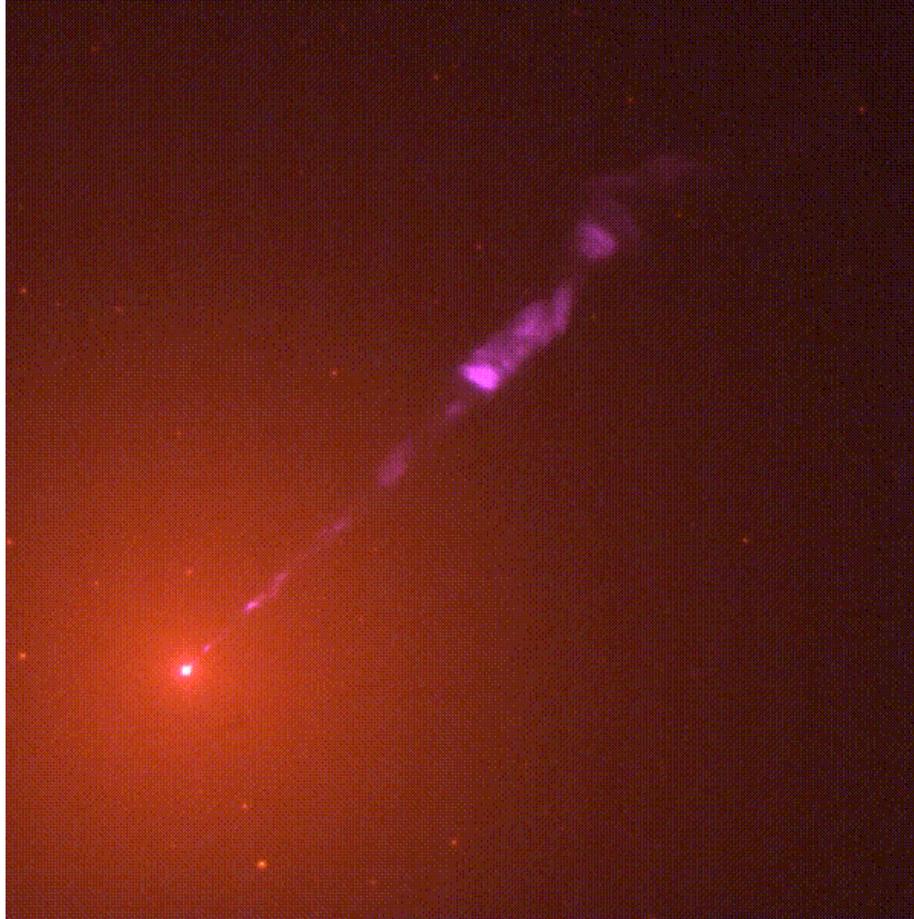
Le spectre des rayons cosmiques



Les accélérateurs cosmiques



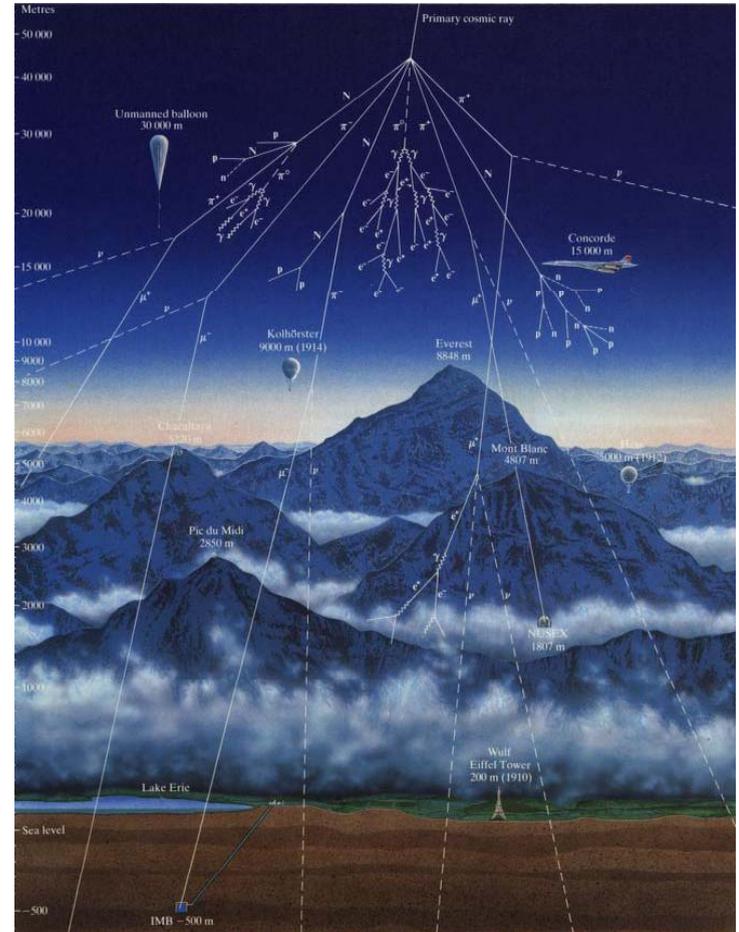
Les accélérateurs cosmiques



Les accélérateurs naturels

Les années 30 :

Les triomphes de l'astroparticule
de nouveaux faisceaux de particules.

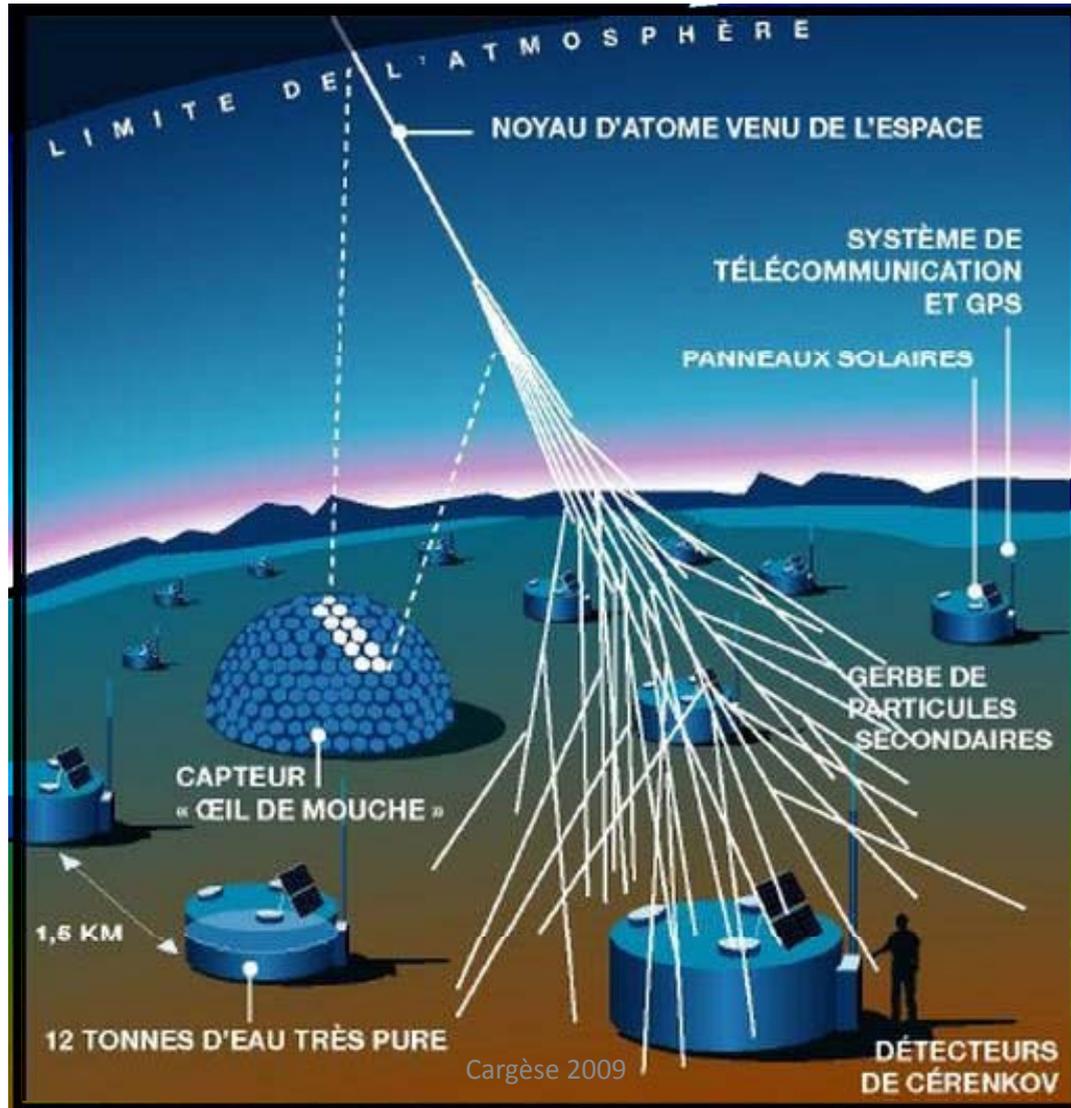


Palmarès



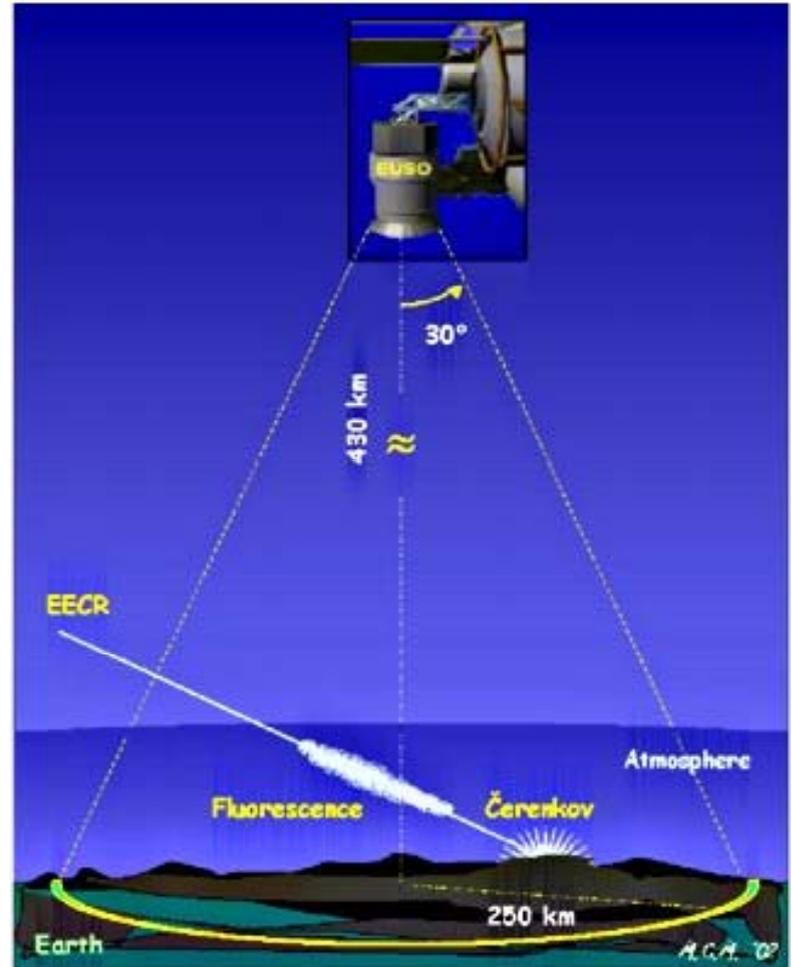
- 1933** : découverte de l'**antimatière** (e^+) dans l'interaction entre rayonnement cosmique avec l'atmosphère (Carl David Anderson).
- 1937** : découverte du **muon** dans les particules issues du rayonnement cosmique (C. D. Anderson).
- 1947** : détection d'un **pion** dans des émulsions exposées à des rayons cosmiques (C. Powell, C. Lattes et G. Occhialini).
- 1949** : découverte des premières **particules étranges** (K^\pm) dans une chambre à brouillard (G. D. Rochester & C. C. Butler).
- 1951** : découverte du **kaon neutre** (K^0), baptisée « V-particule » à cause de sa désintégration en deux pions chargés qui permirent de reconstruire une particule d'une masse égale à la moitié de la masse du proton.

Auger



EUSO

(Extreme Universe Space Observatory)



Rappel

La mesure

Le détecteur

$$dn(\theta, \varphi) = \sigma(\theta, \varphi) \cdot \phi_i \cdot d\Omega$$

La théorie

La source
(l'accélérateur)

$$dn(\theta, \varphi) = \sigma(\theta, \varphi) \phi_i \cdot d\Omega$$

LA THÉORIE

Qu'est ce qui caractérise une particule d'une autre ?

❖ Sa masse

❖ Sa charge

❖ spin

❖ saveur

❖ couleur

❖ isospin

❖ ...

Nombre	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ	d	u	s	c	b	t
Q (charge électrique)	-1	0	-1	0	-1	0	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
L (leptonique)	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	0	0	0	0
L_e	+1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L_μ	0	0	+1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
L_τ	0	0	0	0	+1	+1	0	0	0	0	0	0
B (baryonique)	0	0	0	0	0	0	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3
S (étrangeté)	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
C (charme)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0
B (beauté)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
T (vérité)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1
Π (parité)	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
I (isospin)	0	0	0	0	0	0	1/2	1/2	0	0	0	0
I_3	0	0	0	0	0	0	-1/2	1/2	0	0	0	0
Y (hypercharge)	0	0	0	0	0	0	1/3	1/3	-2/3	4/3	-2/3	4/3

On se base sur les lois connues de la physique ou tout au moins pas encore invalidée **pour reconstituer le puzzle :**

Les lois de conservation :

❖ Energie/impulsion ou 4-moment :

on connaît : $\sum E_i = \sum E_f$ en relativité :

$$\sum \vec{P}_i = \sum \vec{P}_f \quad \vec{P} \cdot \vec{P} - E^2 = \text{invariant}$$

❖ Nombres quantiques :

Charge,

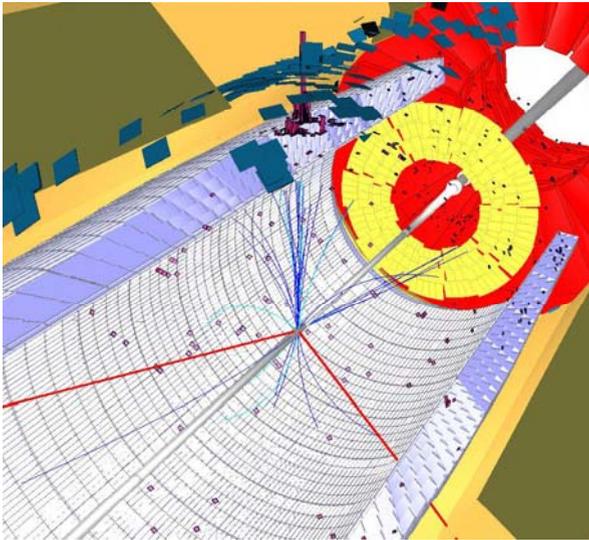
Nombres leptoniques, baryoniques ...

La parité, le spin ...

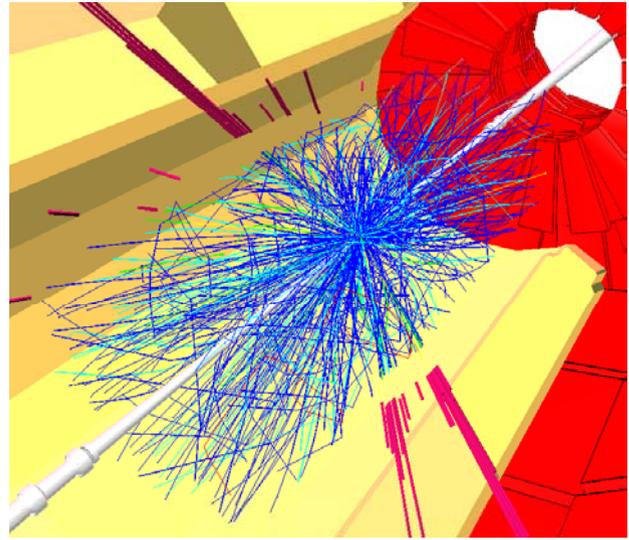
Remarque : si l'une des lois n'est pas conservée c'est que l'un des états finaux n'était pas détectable. Dans le cas contraire, c'est un **indice pour une nouvelle physique.**

Ca se complique ...

interactions additionnelles (molles) dans chaque croisement de faisceau.



SUSY (sans « pileup »)



SUSY ($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

=> **nécessité d'outils de simulation**
au niveau processus physiques qu'au niveau détecteur

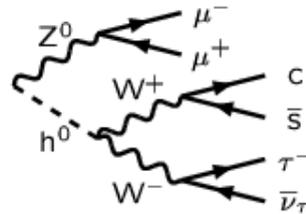
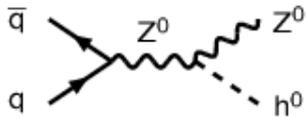
TOUT CELA EST BIEN COMPLEXE ...

Simulation ... générateurs

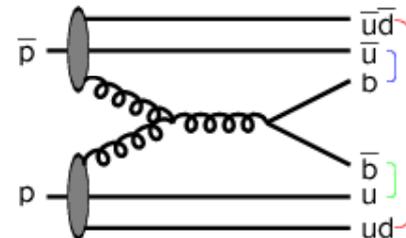
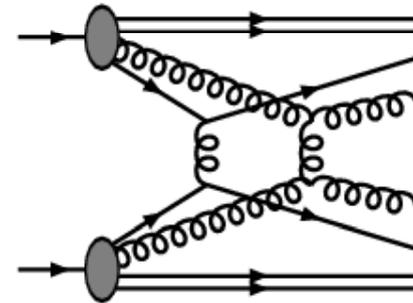
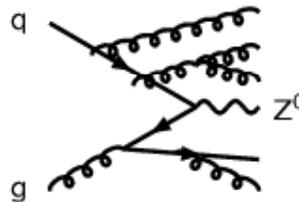
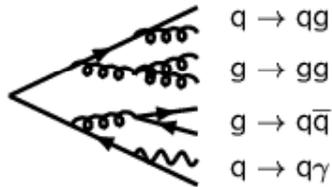
Les **générateurs** permet d'effectuer des études théoriques et expérimentales de physique multi particules complexe

Générateurs ... processus de base

1. Processus de base

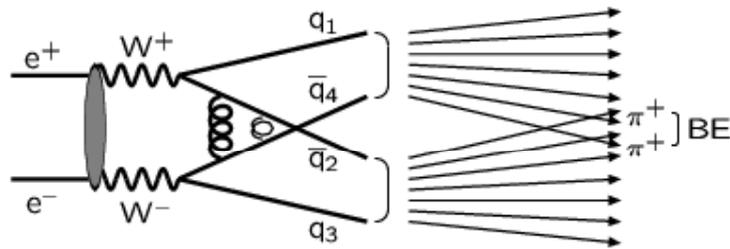


2. Fragmentation

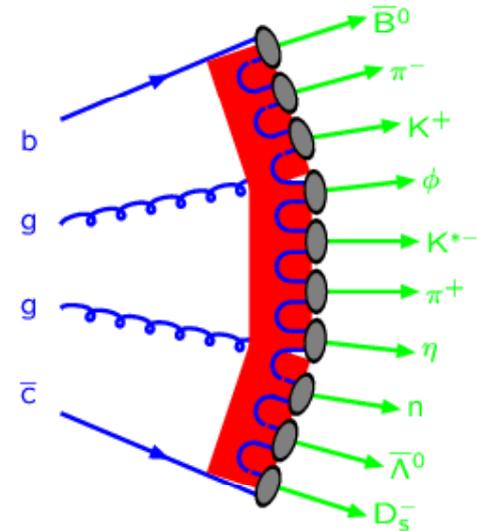
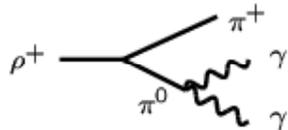


Générateurs ... processus de base

3. Hadronisation



4. Désintégrations



Simulation ... générateurs

Les **générateurs** permet d'effectuer des études théoriques et expérimentales de physique multi particule complexe

Il véhicule pour disséminer des idées entre théoriciens et expérimentateurs

❖ ils sont utilisés pour:

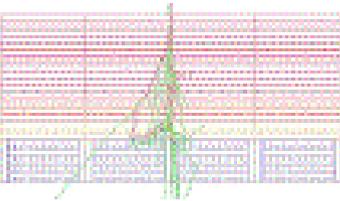
- prédire des taux et topologies d'événements
=> permet d'estimer la faisabilité
- simuler les bruits de fond possibles
=> permet d'optimiser les stratégies d'analyse
- étudier les caractéristiques requises des détecteurs
=> permet d'optimiser la conception des détecteurs/triggers
- étudier les imperfections des détecteurs
=> permet d'évaluer les corrections d'acceptance

Simulation ... détecteurs ... un exemple

- ❖ **GEANT : logiciel qui exploite des techniques avancées de développement logiciel et de technologie orientée objet**
- ❖ **Il permet de simuler avec précision le passage de particules au travers la matière. Il inclut:**
 - description de la géométrie du système
 - description des matériaux utilisés
 - la génération des événements primaires (générateur)
 - le suivi des particules au travers des matériaux et des champs électromagnétiques
 - les processus physiques gouvernant les interactions des particules
 - la réponse des composantes sensibles des détecteurs
 - la génération des données des événements
 - le stockage des événements et des traces
 - la visualisation des détecteurs et des trajectoires des particules

Simulation ... détecteurs ... un exemple

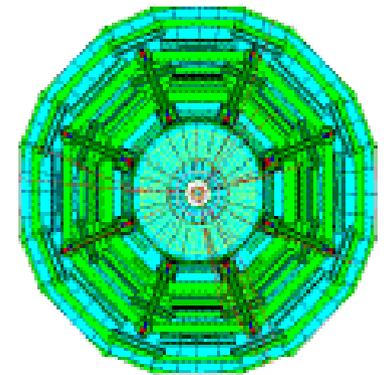
GLAST *Gamma-ray
Large Area
Space
Telescope*



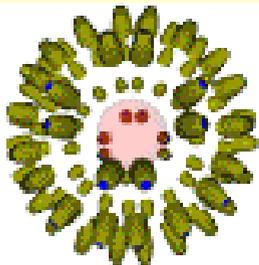
<http://cern.ch/geant4>

Geant 4

Geant4 is a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter.
It has been developed and maintained by a world-wide Collaboration of approximately 100 scientists.

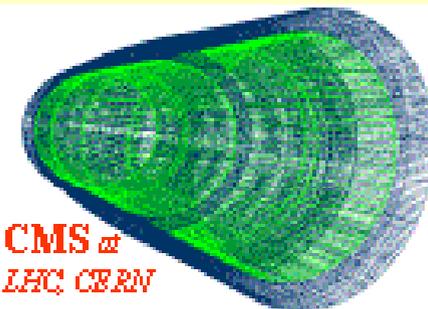


ATLAS at LHC, CERN



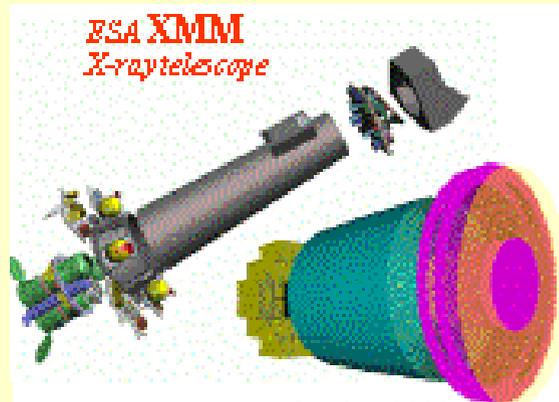
Borexino
at Gran Sasso
Laboratory

Its application are as include
high energy physics, astrophysics and nuclear physics
experiments, medical, accelerator and space science studies.

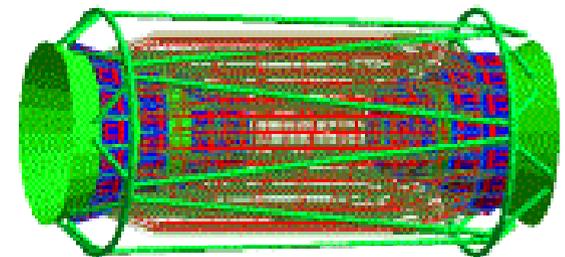


CMS at
LHC, CERN

Pascal Vincent



Cargèse 2009



BaBar at SLAC

Méthode expérimentale

Théorie

Analyse des données

(Simulation)

Valider les résultats en modélisant le comportement attendu avec les données obtenues

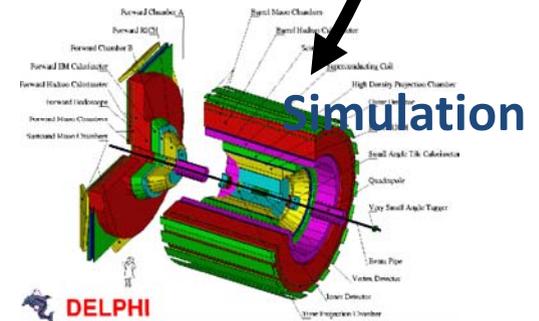
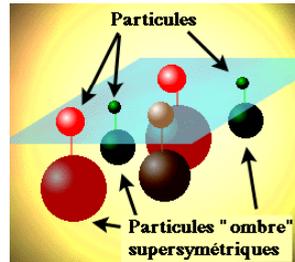
Simulation

Définir les caractéristiques d'un système expérimental optimal pour déterminer l'ensemble des paramètres. Prédire le potentiel de découverte de l'expérience proposée

Expérimentation

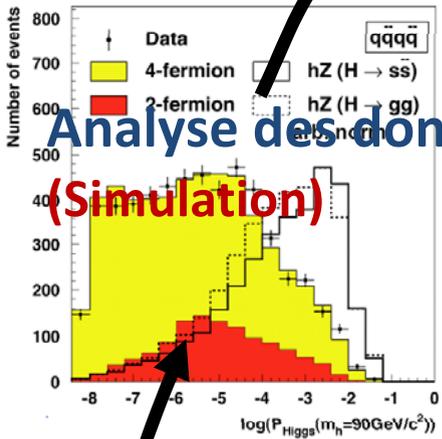
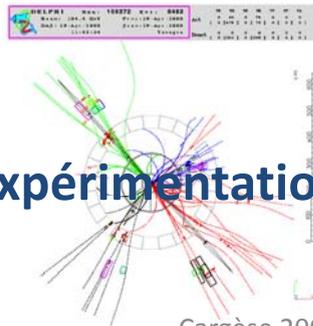
Exemple

Théorie



Simulation

Expérimentation



Analyse des données (Simulation)

=> cela nécessite des outils informatiques

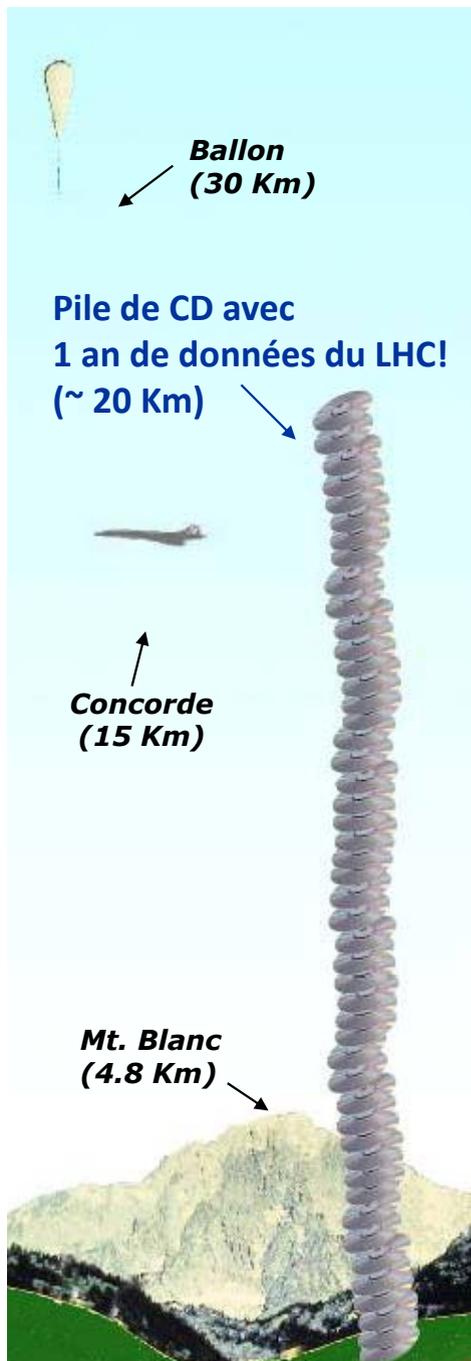
QUE DE CALCUL ...

Quelques chiffres

Les expériences du LHC produiront 15 péta-octets de données par an :

- ❖ près de 1% du volume total d'informations produit par l'homme

=> La grille de calcul mondiale



Slide from Frédéric DERUE

La GRILLE



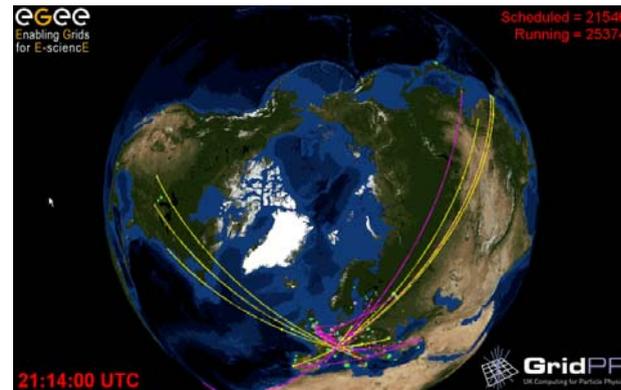
Enabling Grids for
E-science in Europe

La grille de calcul mondiale EGEE/WLCG (« World Lhc Computing Group »)

- ❖ ~250 centres de calcul
- ❖ ~50 pays
- ❖ 3 grilles : EGEE, OSG, NorduGrid



Centre de calcul du Cern

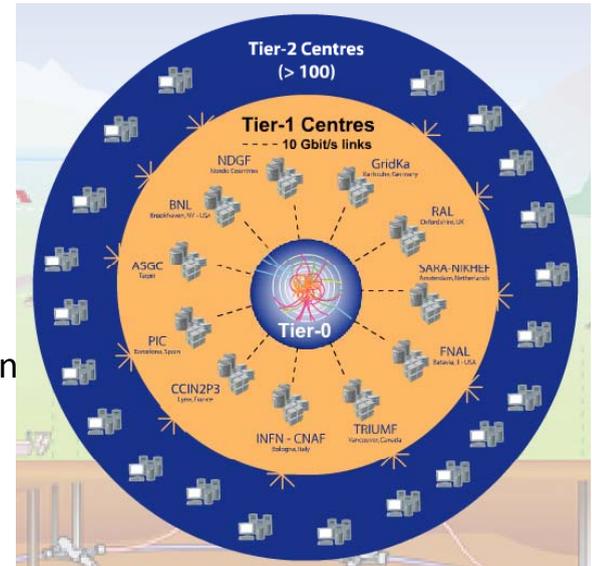


La grille de calcul mondiale

Slide from Frédéric DERUE

La GRILLE

- **Tier-0 (CERN):**
 - ❖ Acquisition des données brutes
 - ❖ 1^{ère} reconstruction
 - ❖ Stockage de masse à long terme
 - ❖ Distribution des données aux Tier-1s
 - **Tier-1 (centres régionaux):**
 - ❖ Reçoivent une partie des données (stockage et “doublement”)
 - ❖ reconstruction (alignements, étalonnages)
 - ❖ distribuent les ESD/AOD aux Tier2s
 - ❖ support “grille” national et régional
 - **Tier-2 (~proches des laboratoires):**
 - ❖ analyse de données
 - ❖ simulation de données (→Tier 1)
 - **Tier-3 (laboratoires):**
 - ❖ analyse de données
 - ❖ pas/peu d’obligations de service
 - **Facilités d’analyse (CERN, Lyon)**
- 10 Gbits/s
- 1 Gbits/s



Slide from Frédéric DERUE

Résumé

Un système expérimental en physique des hautes énergies est constitué :

- ❖ Des accélérateurs naturels ou artificiels (cryogénie, technique du vide ...) pour créer **un état initial**.
- ❖ Les outils informatiques pour mettre en œuvre **une mesure**.
- ❖ Les lois de la physique (**théorie**) pour tester la cohérence des mesures.
- ❖ **Des détecteurs** bourrés d'électronique, de matière, d'informatique temps réel ...