

Ecole « techniques de base du détecteur » Cargèse

Pascal Vincent
Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies
Université Pierre et Marie Curie

Introduction
Les systèmes expérimentaux
Les interactions des particules chargées
Les interactions des particules neutres
Les détecteurs de particules
Visite d'une expérience

La méthode

L'expérimentation :

Le principe de la méthode

La mesure

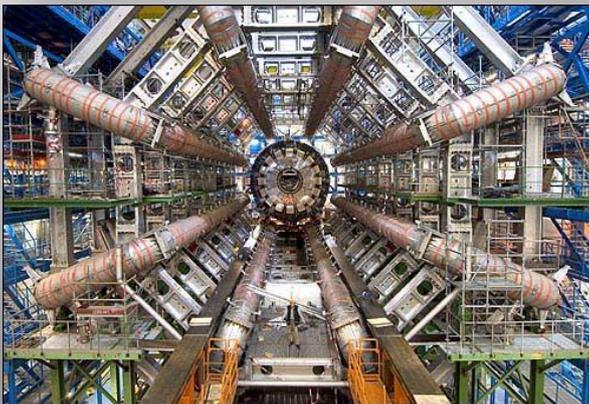
Les conditions initiales

Le détecteur

Le modèle

La méthode

Des **installations artificielles** conçues par des laboratoires de recherche



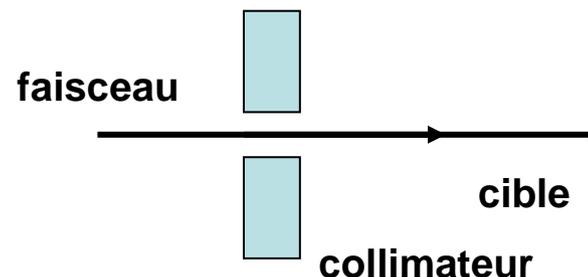
ou **naturellement produits** dans l'**Univers** par des événements cataclysmiques.



Le principe de la méthode expérimentale

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

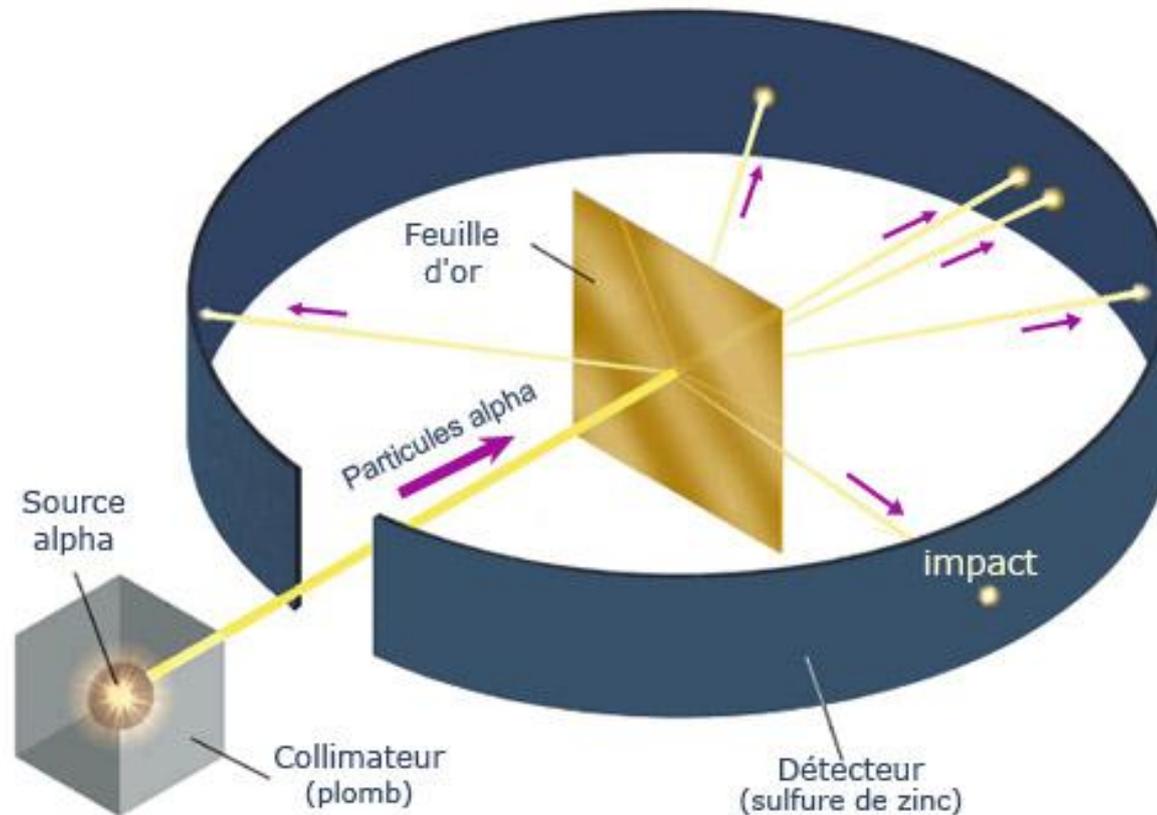
On **détecte** (dans toutes les directions) celles qui ont interagit avec un élément de la cible c'est à dire celles qui ont été défléchies.



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

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

Le principe de la méthode expérimentale



On reconstruit la distribution angulaire des particules diffusées :

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

Le principe de la méthode expérimentale

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

$dn(\theta, \phi)$?

La distribution angulaire du nombre de particules diffusées dépend :

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

$$dn(\theta, \phi) \propto \varphi_i$$

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

$$\left. \begin{array}{l} dn(\theta, \phi) \propto \text{Surface} = dS \\ dn(\theta, \phi) \propto \frac{1}{\text{distance}} = \frac{1}{r} \end{array} \right\} \Rightarrow dn(\theta, \phi) \propto \frac{dS}{r} = d\Omega$$

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

$$dn(\theta, \phi) \propto L'interaction = \sigma(\theta, \phi)$$

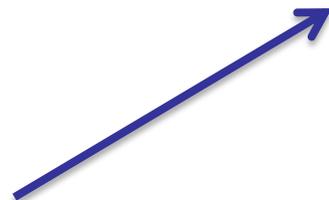
$dn(\theta, \phi) ?$

La distribution angulaire du nombre de particules diffusées :

$$dn(\theta, \phi) \propto \varphi_i$$



$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$



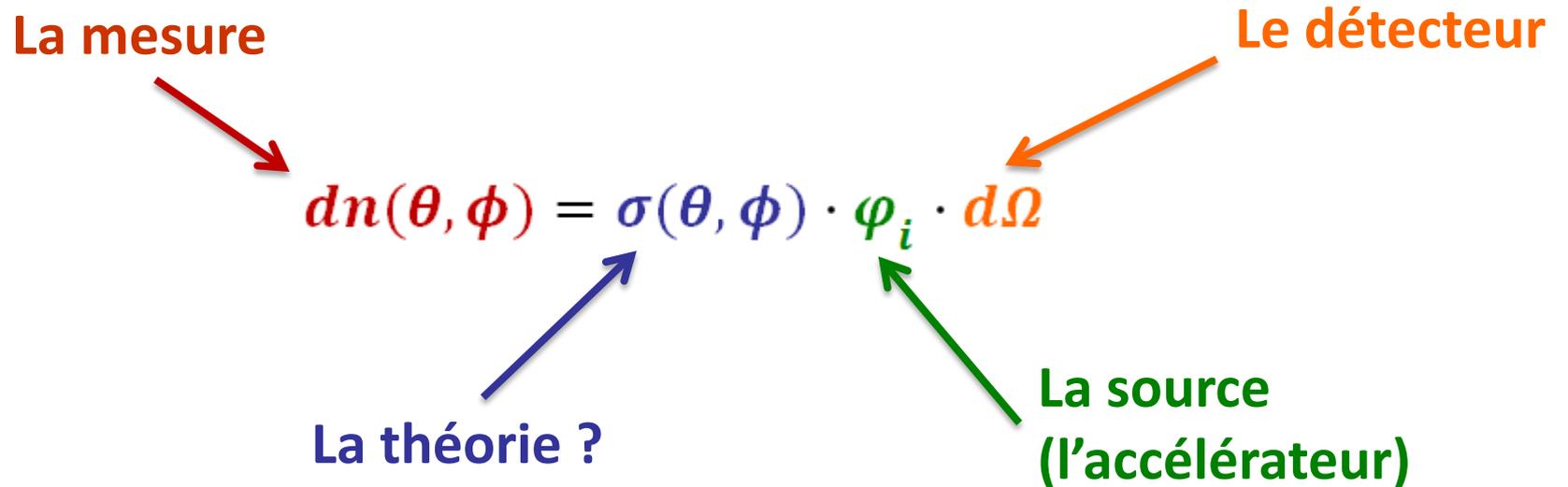
$$dn(\theta, \phi) \propto \sigma(\theta, \phi)$$



$$dn(\theta, \phi) \propto d\Omega$$

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.

Théorie du partage des tâches

Physicien
expérimentateur +
ingénieurs

Ingénieurs
(électronique,
mécanique,
informatique)
+ Physicien

$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$

Le théoricien

Ingénieurs (électronique,
mécanique,
informatique)
+ Physicien

Administration

La méthode

$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$

$dn(\theta, \phi)$

φ_i

$\sigma(\theta, \phi)$

$d\Omega$

$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$

LA MESURE

Les expériences sur cibles fixes

$$dn(\theta, \phi)$$



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}

▪ Energie : E

▪ Position : \vec{r}, t

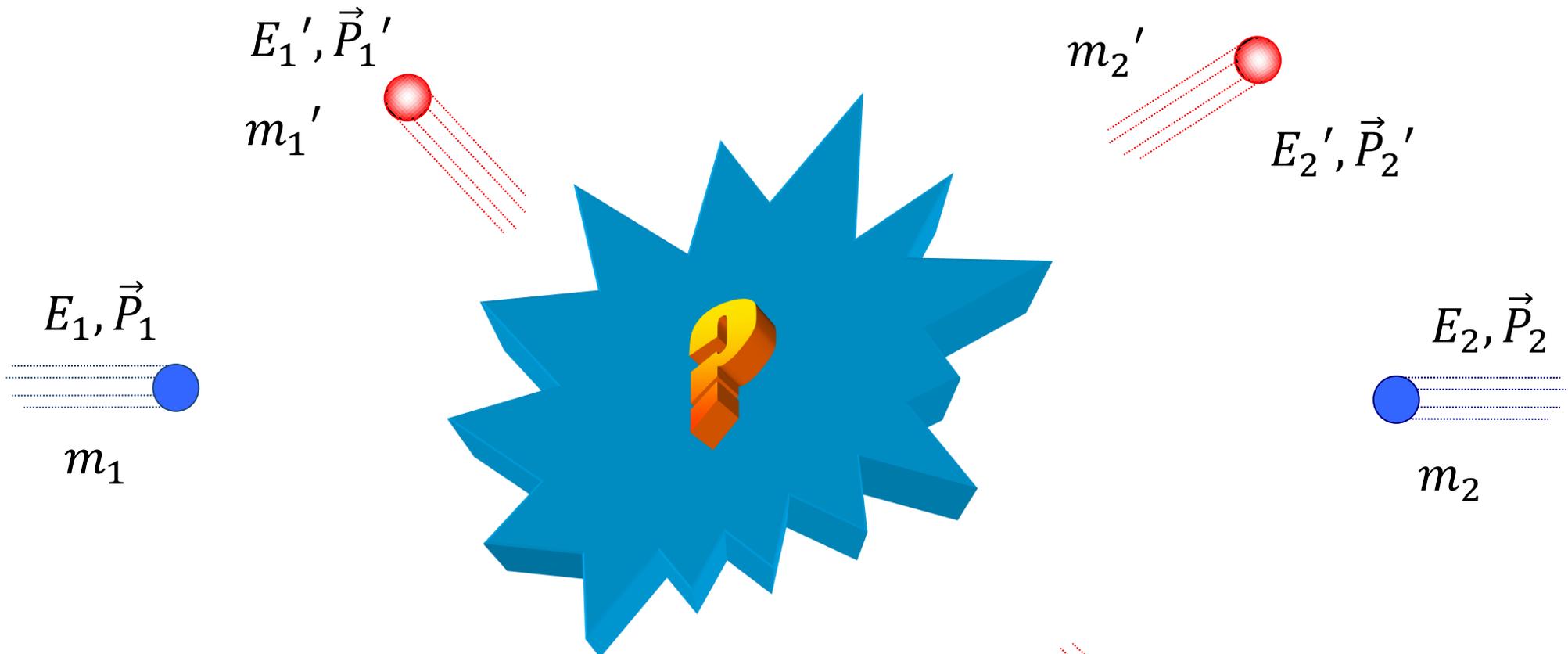
❖ Sa charge et autres nombres quantiques (spin, saveur, isospin ...).

❖ Sa masse (identification).

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

Les collisions

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



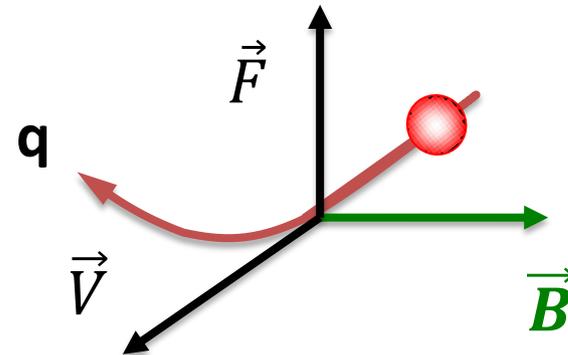
On utilise les lois de conservation ainsi que les paramètres de l'état initial pour déterminer les états intermédiaires et ainsi reconstruire l'événement.

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



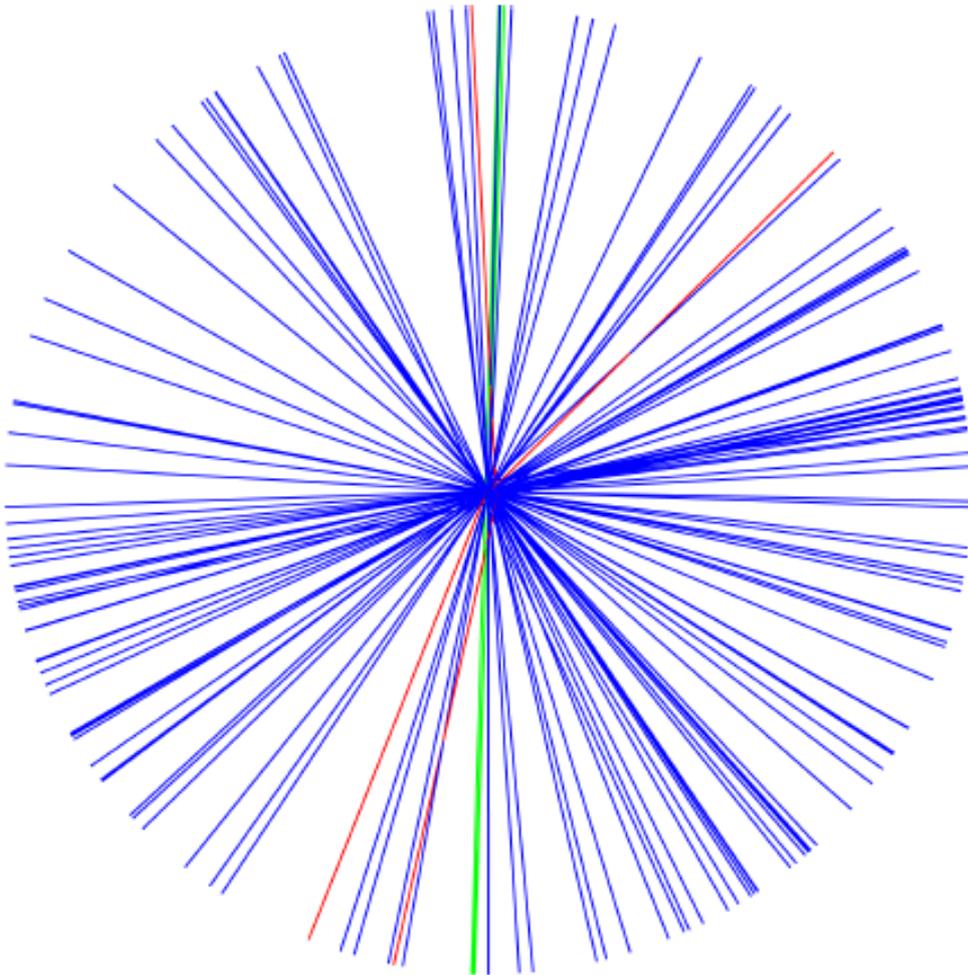
$$\Rightarrow R = \frac{mV}{qB} = \frac{P}{qB}$$

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

Déterminer l'impulsion (P)

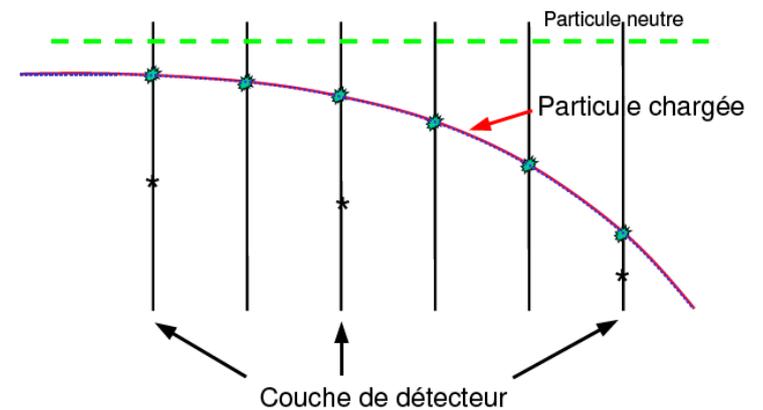
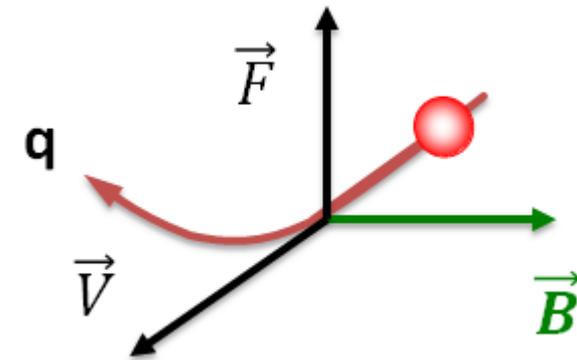
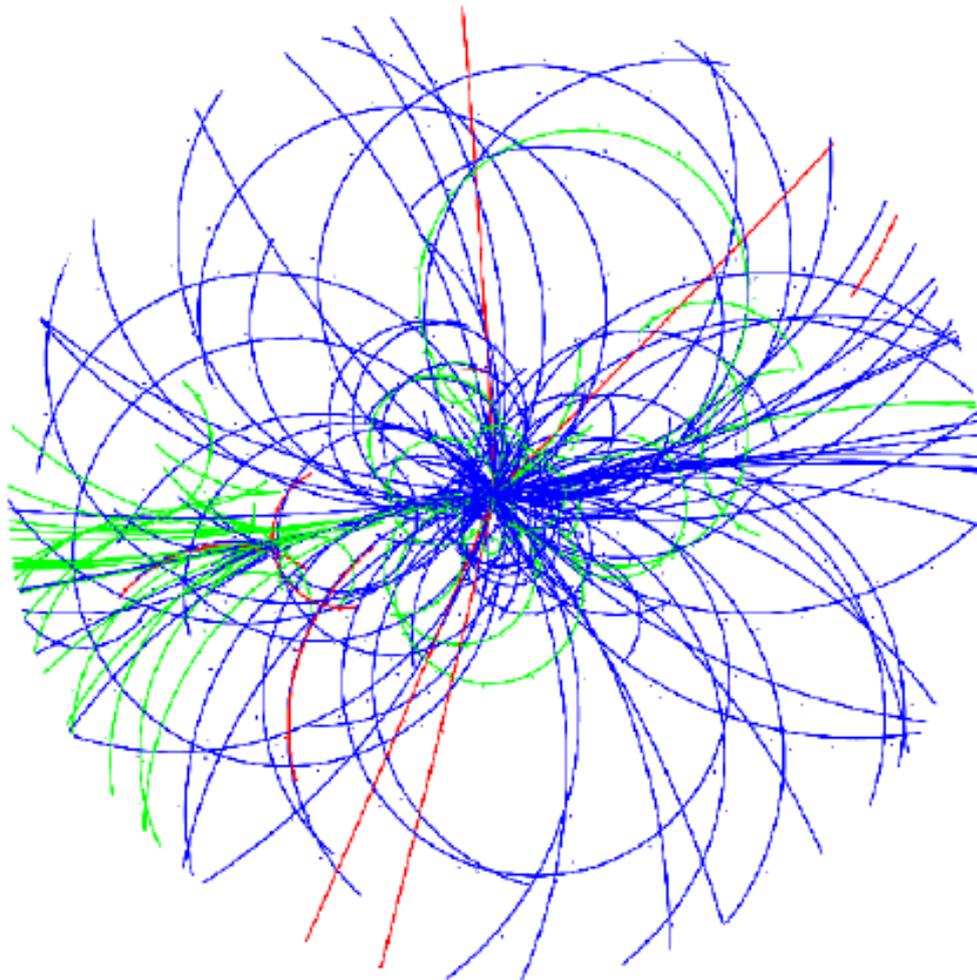
Sans champ magnétique

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



Déterminer l'impulsion (P)

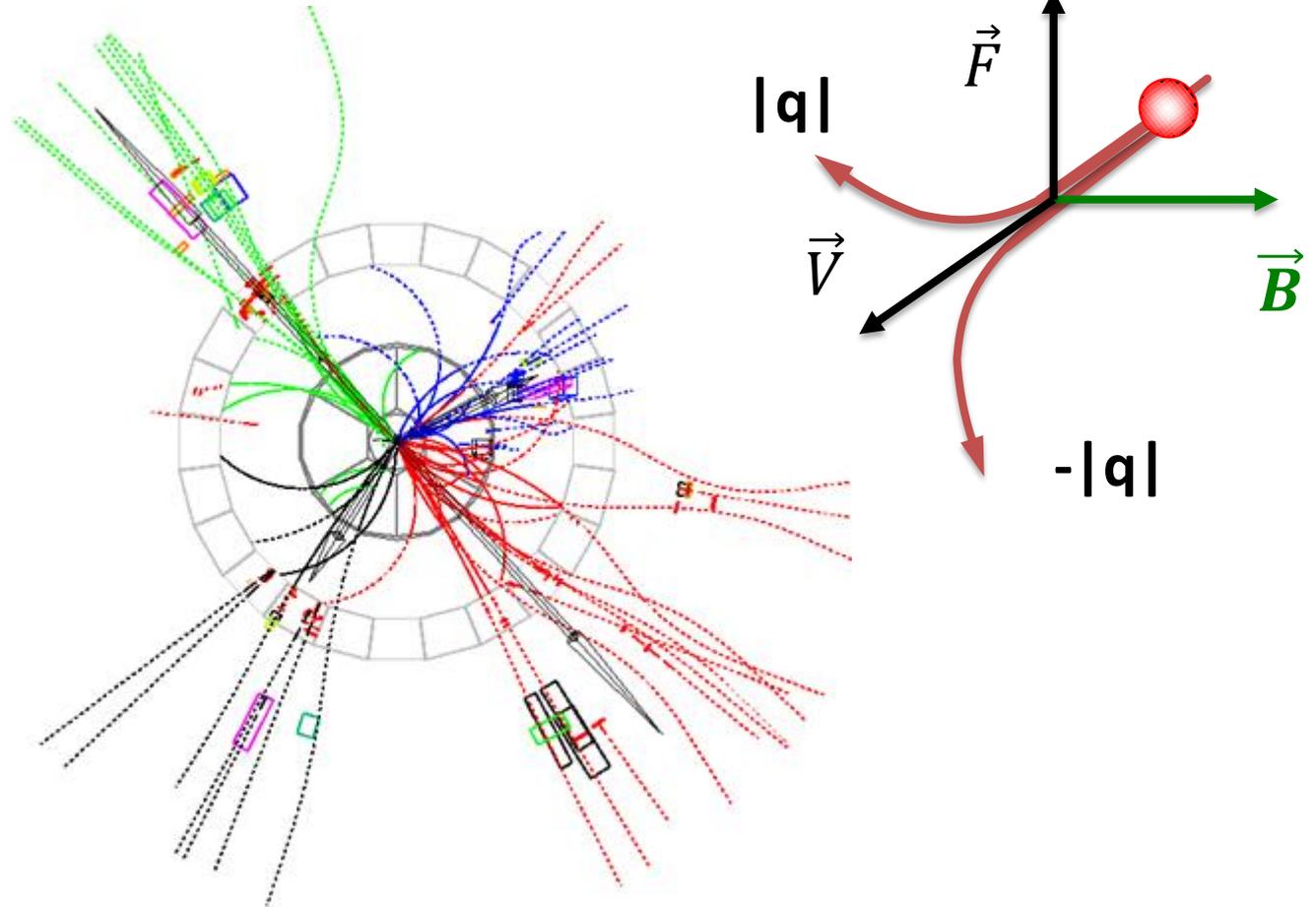
Avec un champ magnétique c'est quand même plus claire ...



Déterminer la charge (q)

Le sens de la courbure détermine le **signe de la charge**

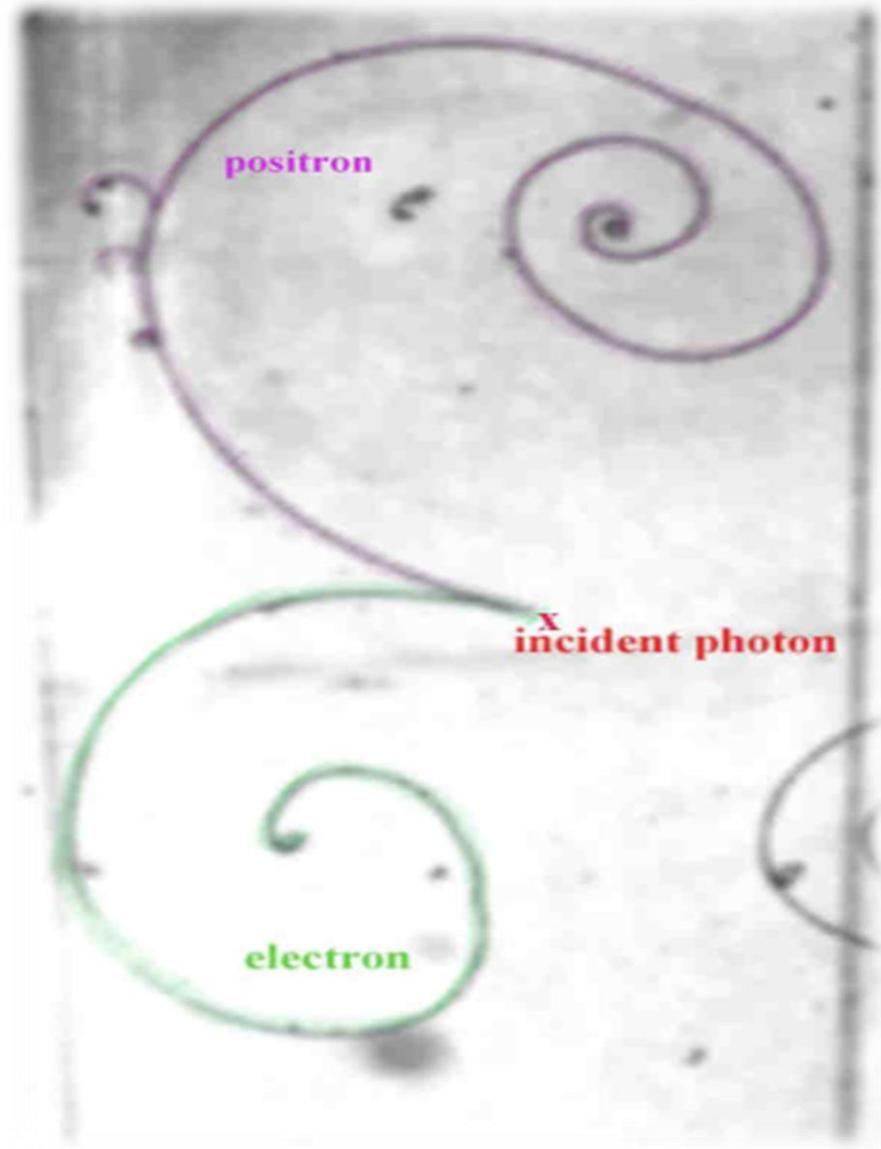
$$R = \frac{P}{qB}$$



Déterminer **la charge** (q)

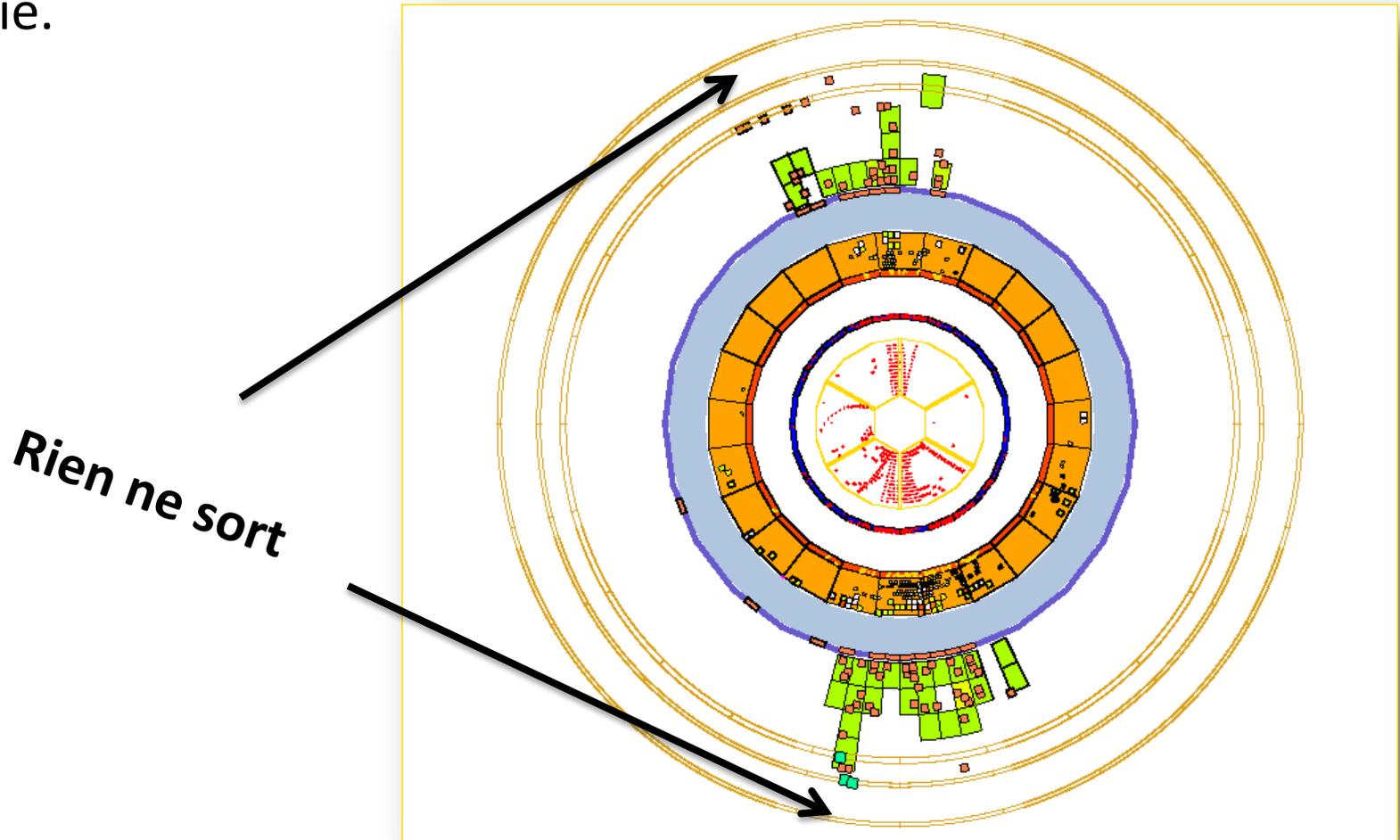
Les sens de la courbure
détermine le **signe et de charge**

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



Mesurer l'énergie (E)

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



L'identification (m)

Quelques outils :

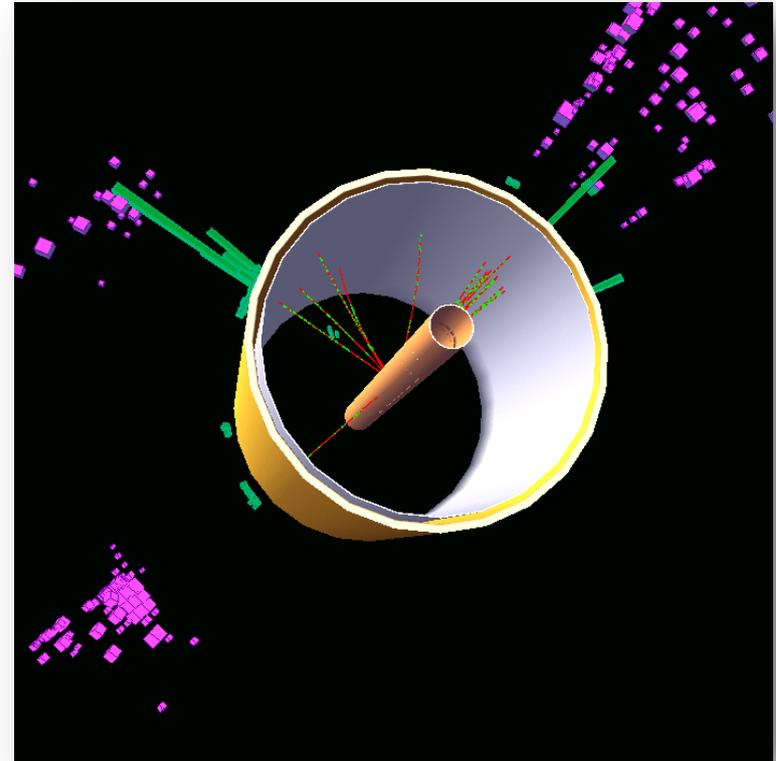
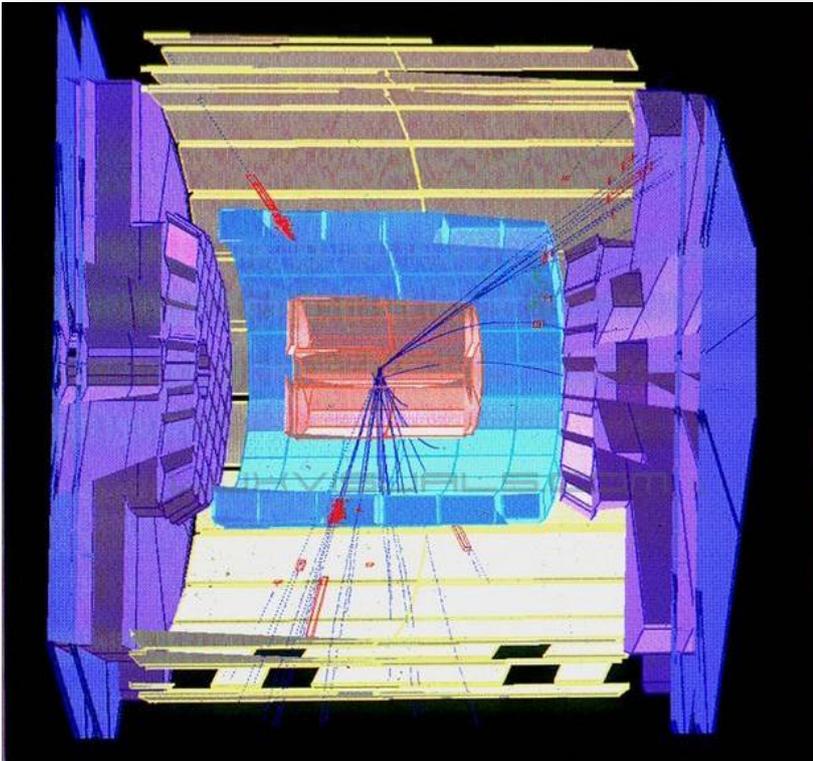
$$E^2 = P^2 + m^2 \quad : \quad (E, P) \Rightarrow m$$

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

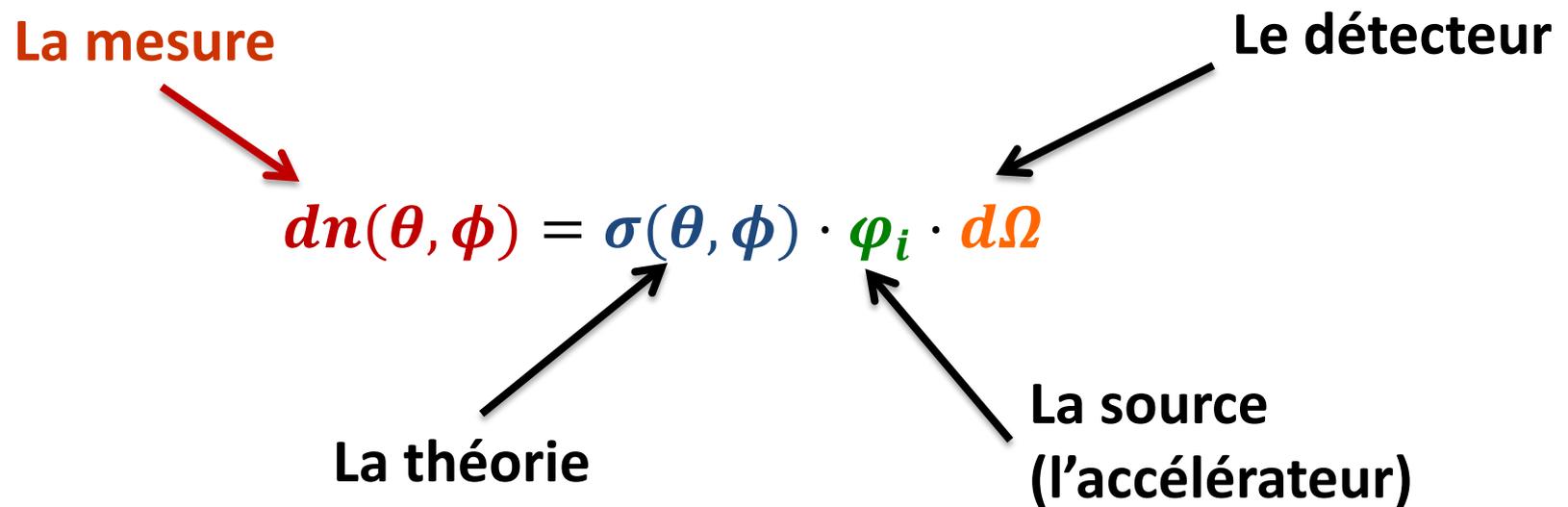
$$P = \gamma(v)mv \quad : \quad (P, v) \Rightarrow m$$

L'identification (m)

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

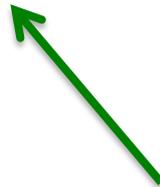


Ou en étions nous ...



$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$

La source
(l'accélérateur)



L'ÉTAT INITIAL

L'état initial

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

φ_i

L'énergie

Le type de particules

Leur état de polarisation.

Sources :

Radioactivité

Accélérateurs artificiels

Accélérateurs naturels

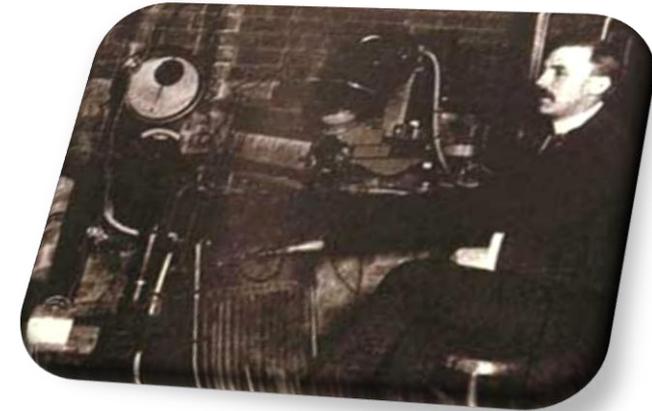
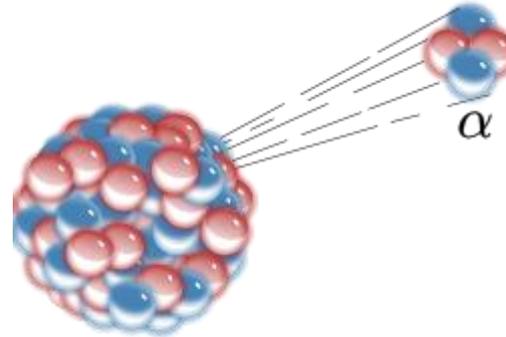
Les sources de particules

Les sources naturelles

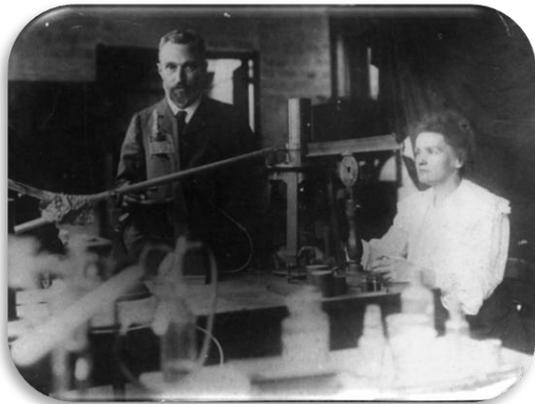
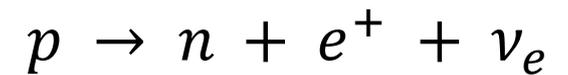
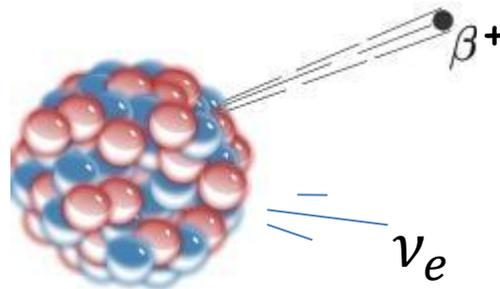
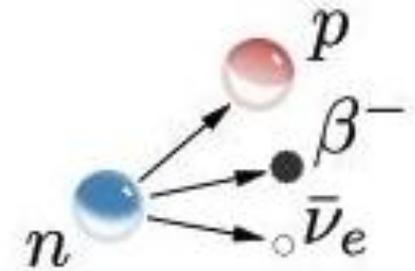
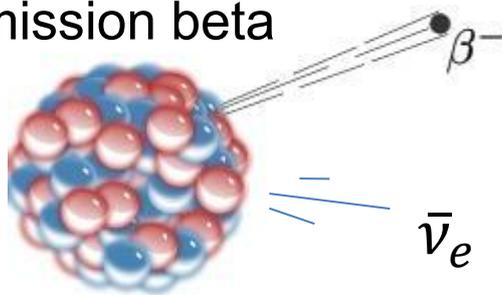
LA RADIOACTIVITÉ

Radioactivité

❖ La radioactivité alpha

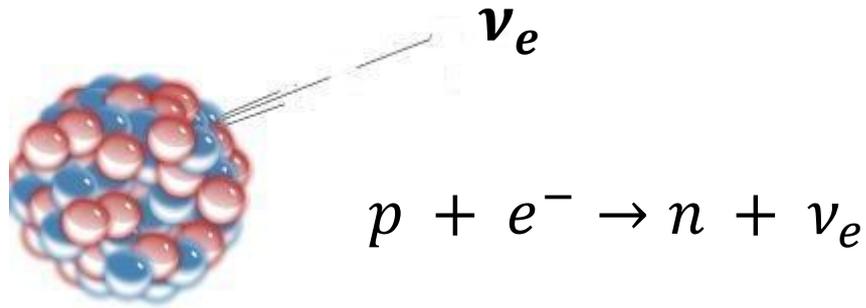


❖ L'émission beta

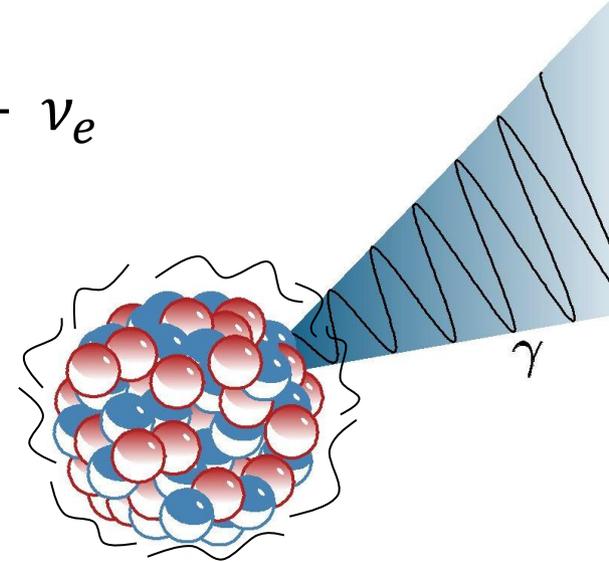


Radioactivité

❖ capture électronique



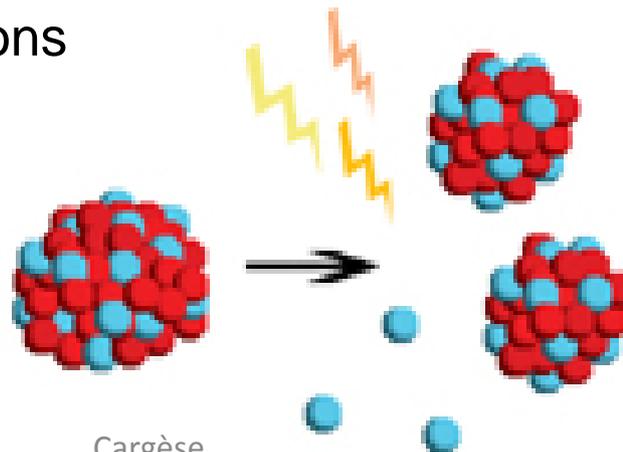
❖ émission gamma



❖ émission spontanée de neutrons

❖ émission spontanée de neutrons

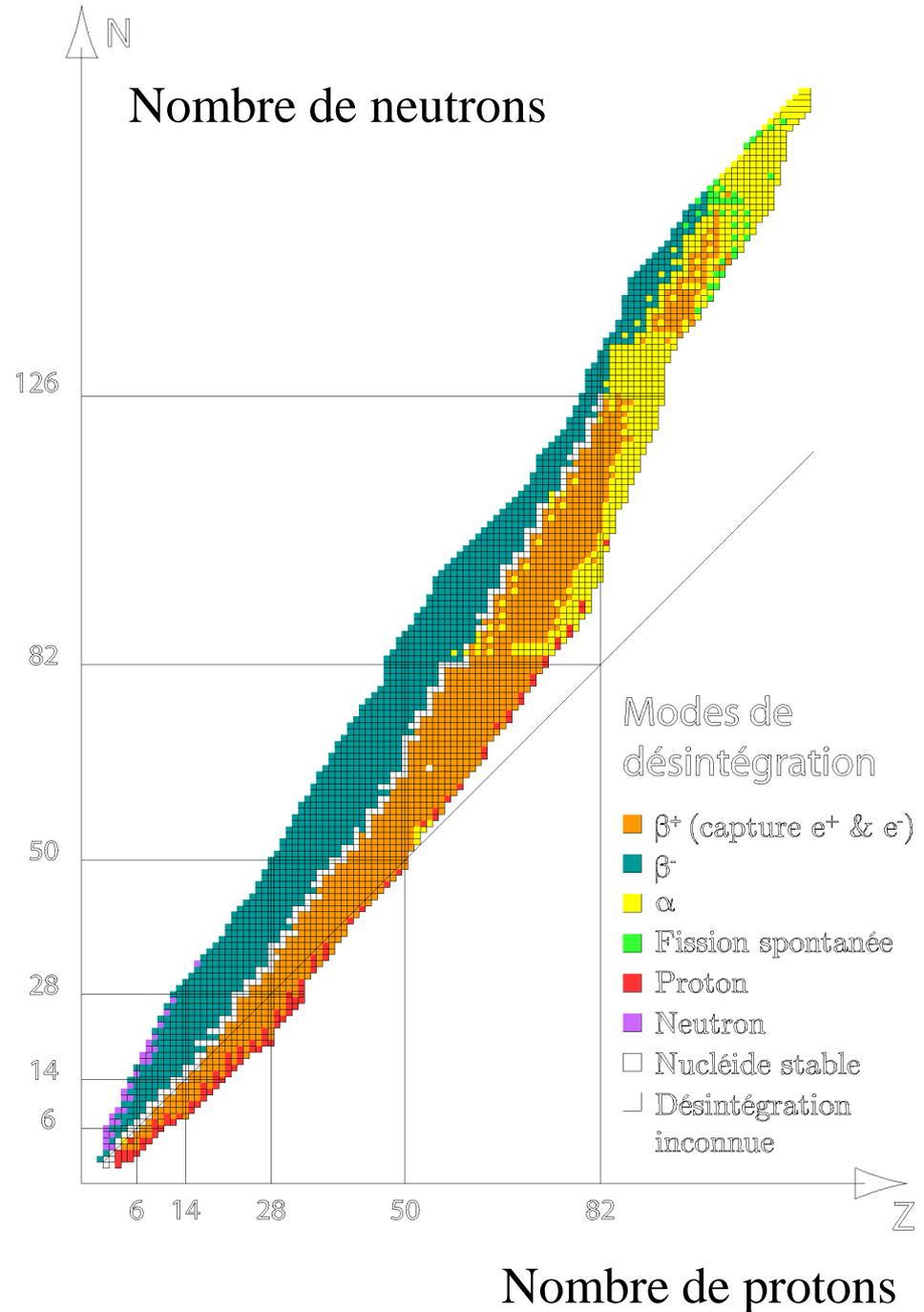
❖ La fission



Radioactivité

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

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

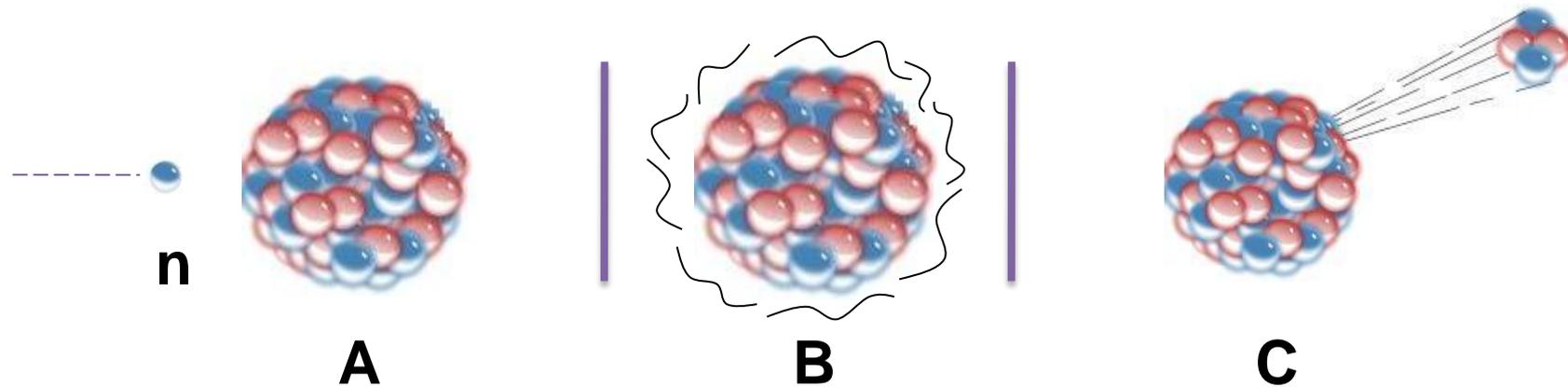


Les accélérateurs

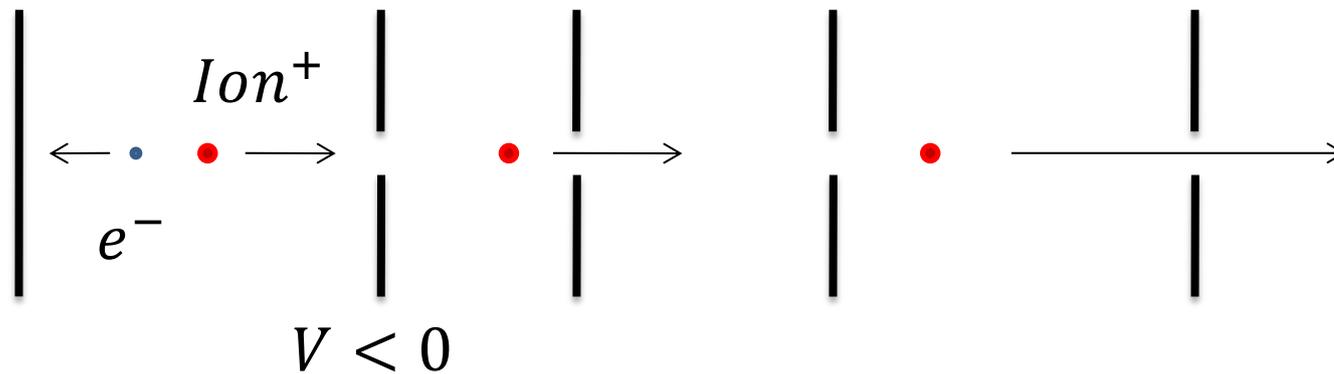
PRINCIPES

Emission provoquée

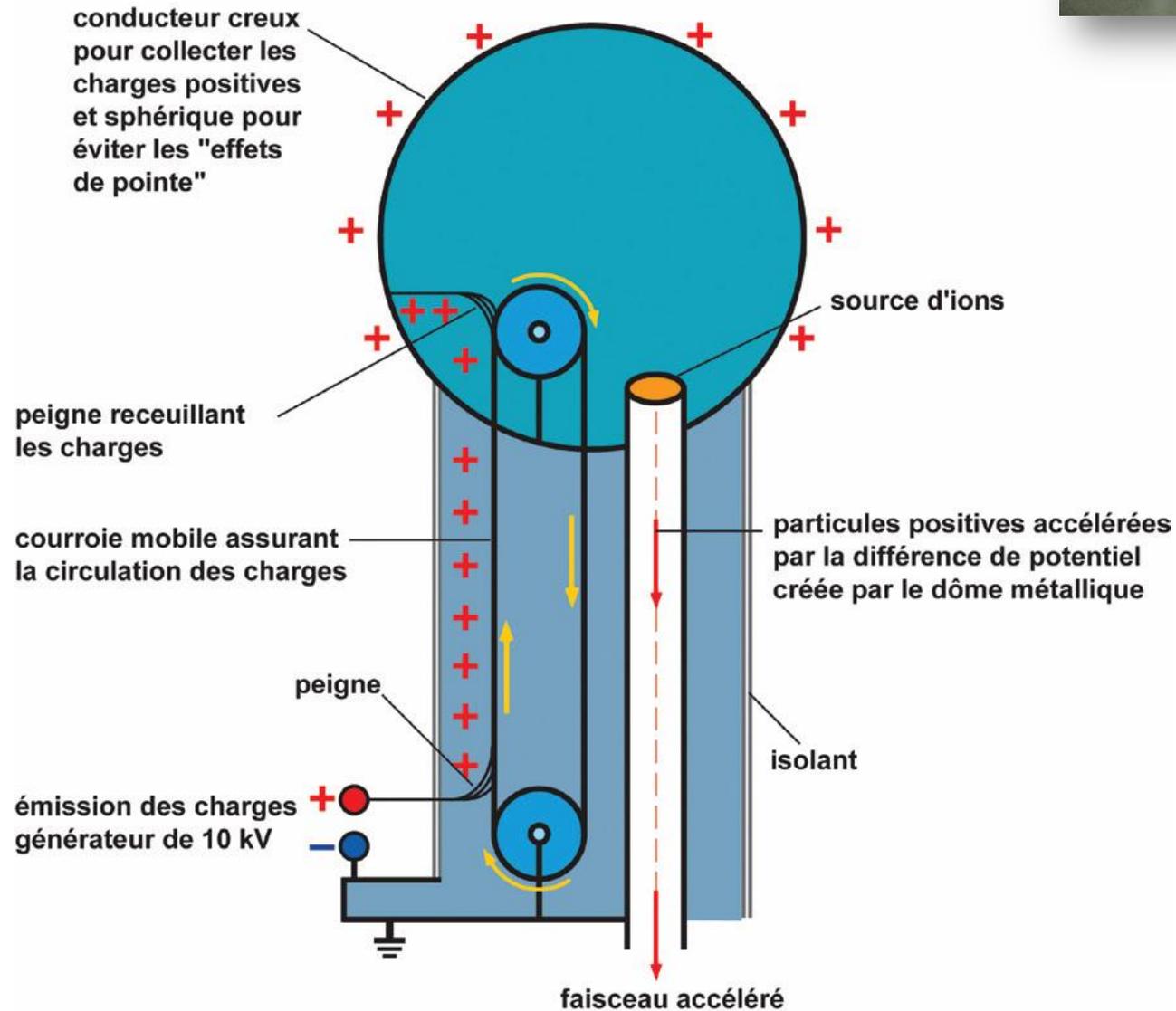
- ❖ L'activation de sources par des neutrons



- ❖ Sources de protons (d'ions) :



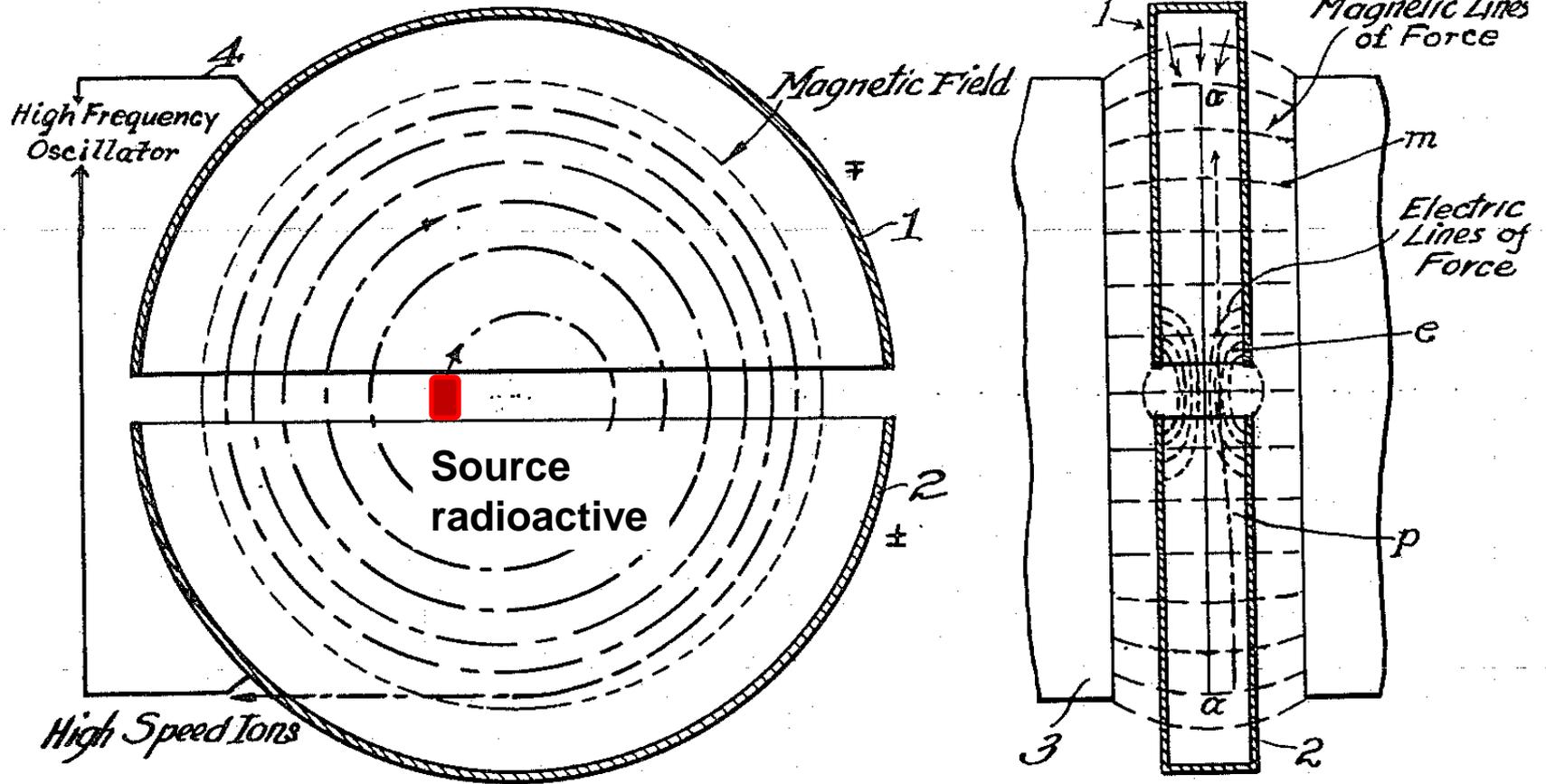
Van de Graaff (1929)



Van de Graaff (1929)



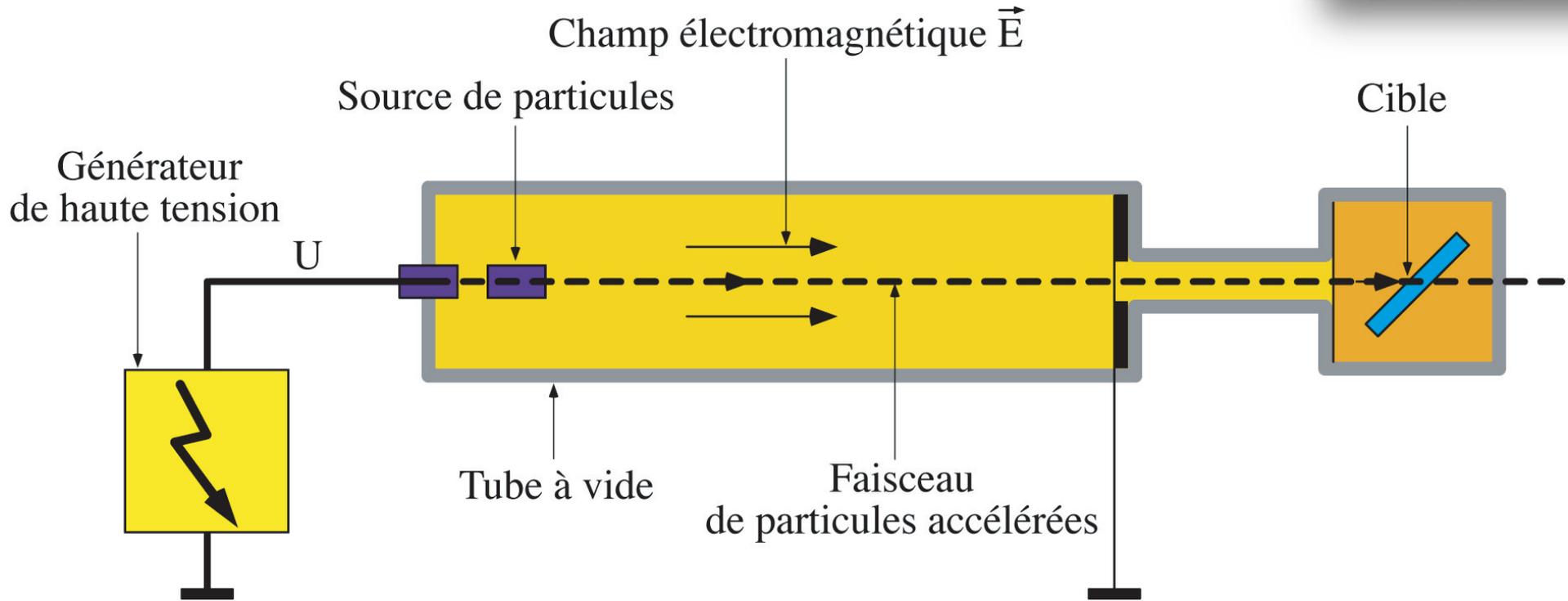
cyclotron (1929)



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

= constante

Cockcroft (1930)



Les conditions initiales

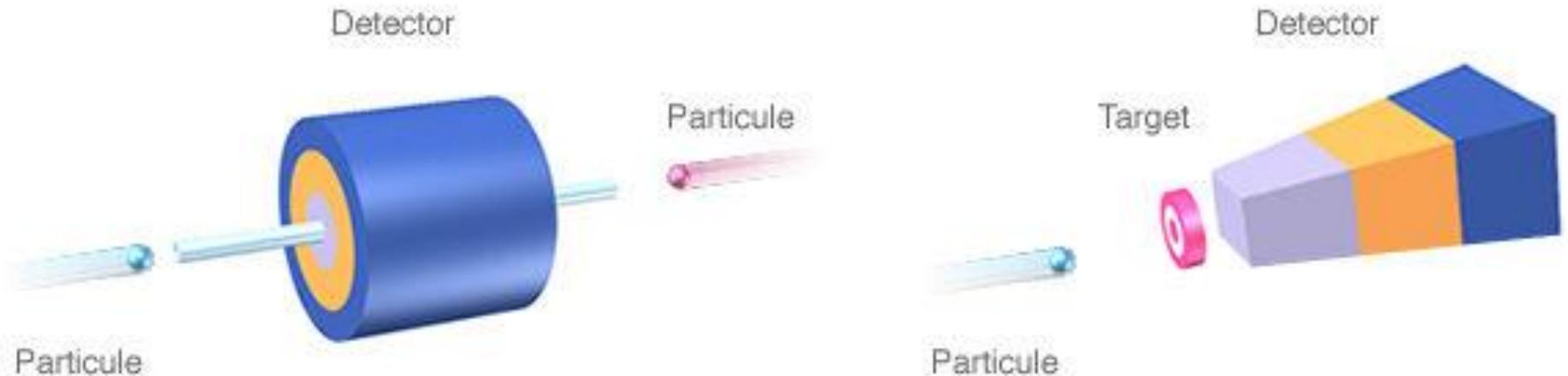
Accélérer des particules pour qu'elles libèrent leur énergie :

❖ dans des collisionneurs

$$E_{cm} = 2\sqrt{E_1 E_2}$$

❖ sur des cibles fixes

$$E_{cm} = \sqrt{2E_1 m_2}$$

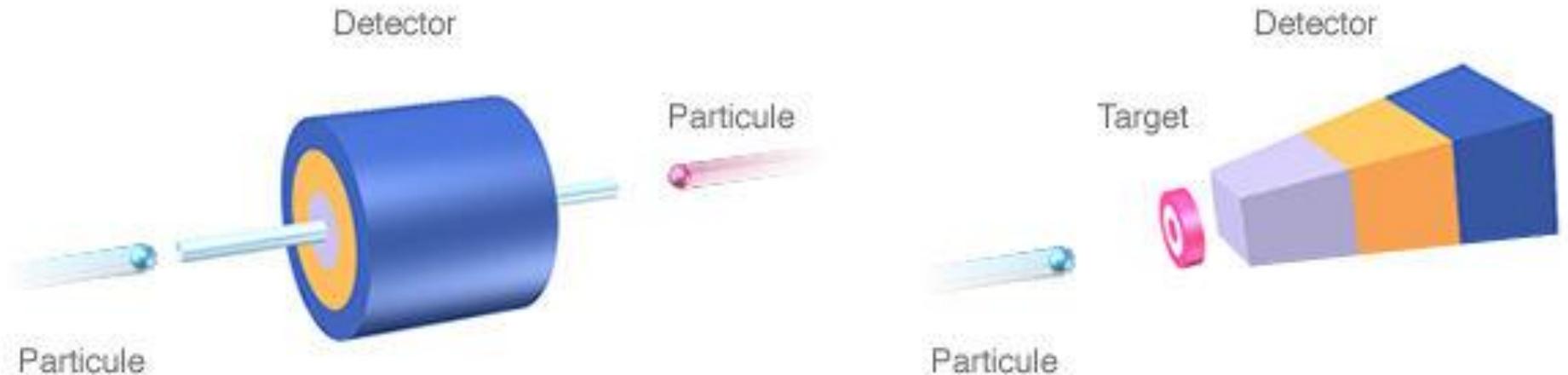


Les conditions initiales

Pour un faisceau de particules de 1 TeV :

❖ dans des collisionneurs : $E_{cm} = 2\,000\text{ GeV}$

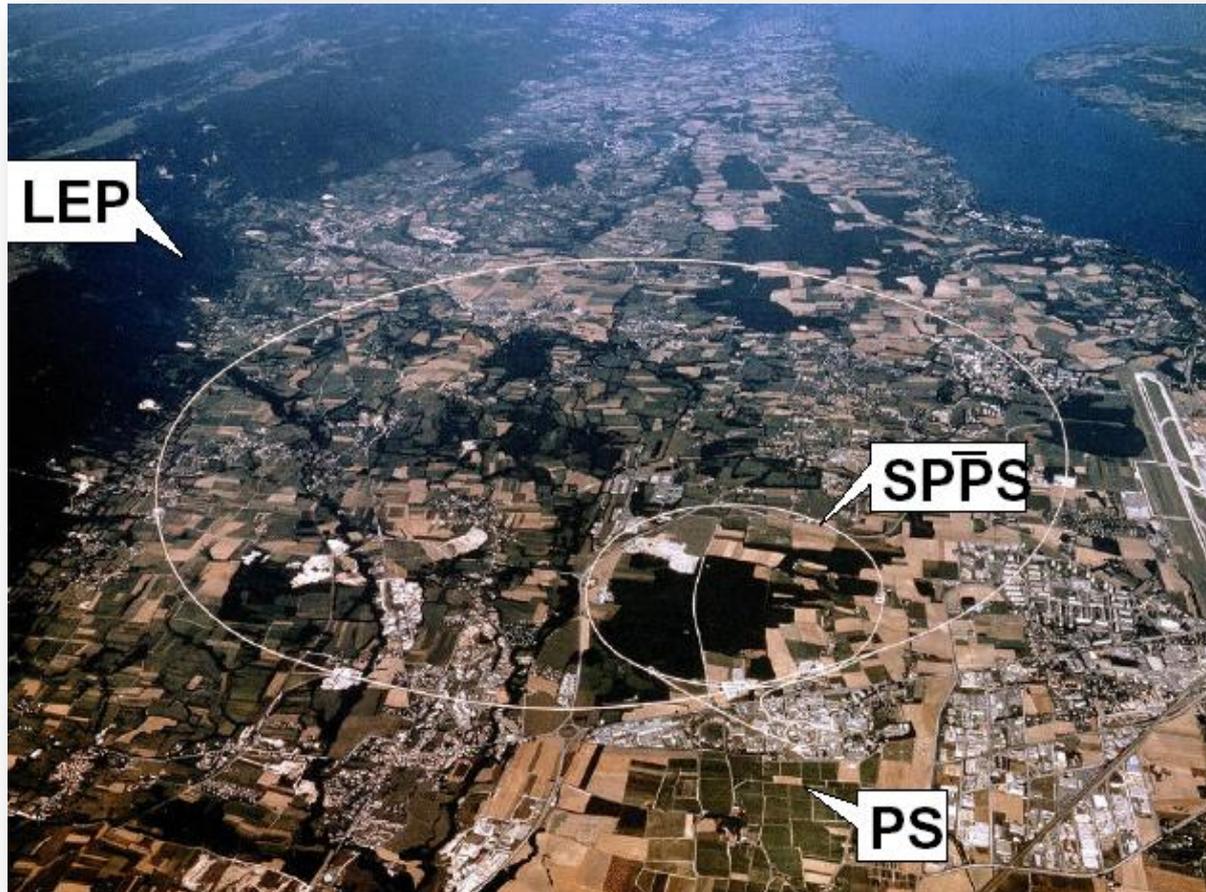
❖ sur des cibles fixes d'hydrogène : $E_{cm} = 43\text{ GeV}$



Les accélérateurs

MACHINES A ELECTRONS

LEP @CERN



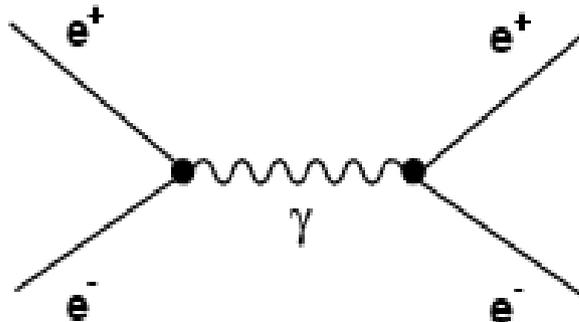
**≤ 2000 : LEP, @CERN Genève
circulaire, e^+e^- , 27 Km de long, $E_{CM} < 206$ GeV**

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"

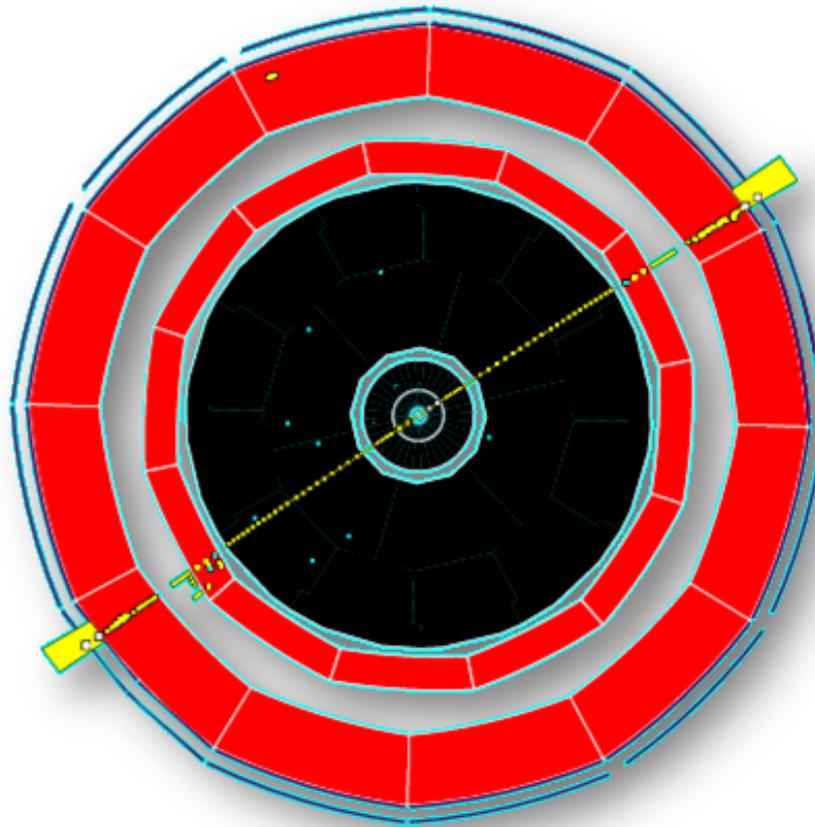


Etat initial bien défini, énergie au centre de masse réglable

Exemple

Un événement au LEP :

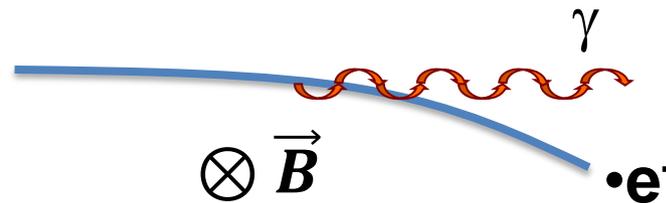
$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$



Collisionneurs e+e-

Accélérateurs circulaires de rayon R:

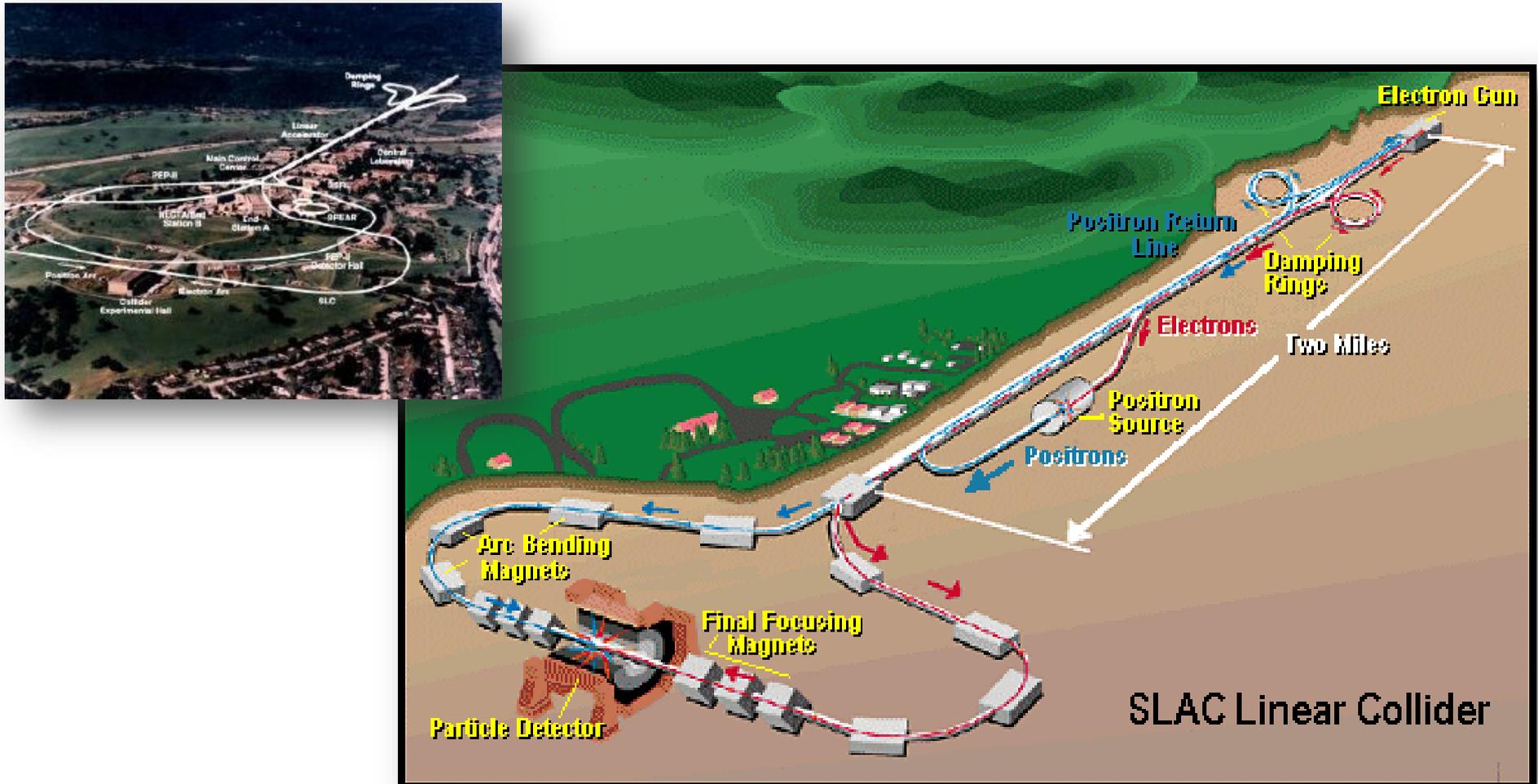
❖ limités par la radiation synchrotron:



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

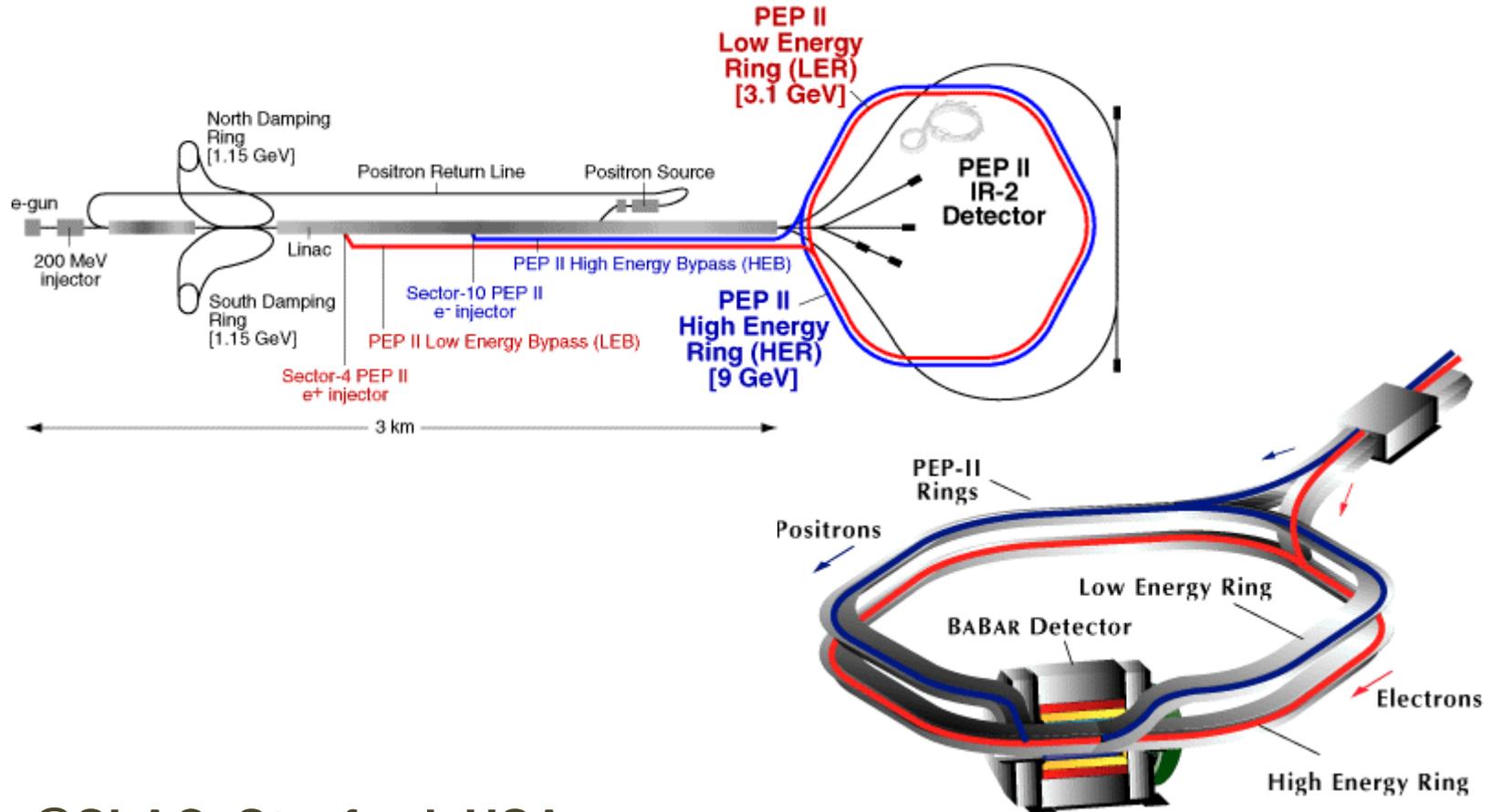
c.a.d environ 4 GeV par tour au LEP200

SLC @SLAC



SLC, @SLAC, Stanford, USA
linéaire, e^+e^- , 3.2 Km de long, $E_{CM} = 100$ GeV

PEP II @ SLAC



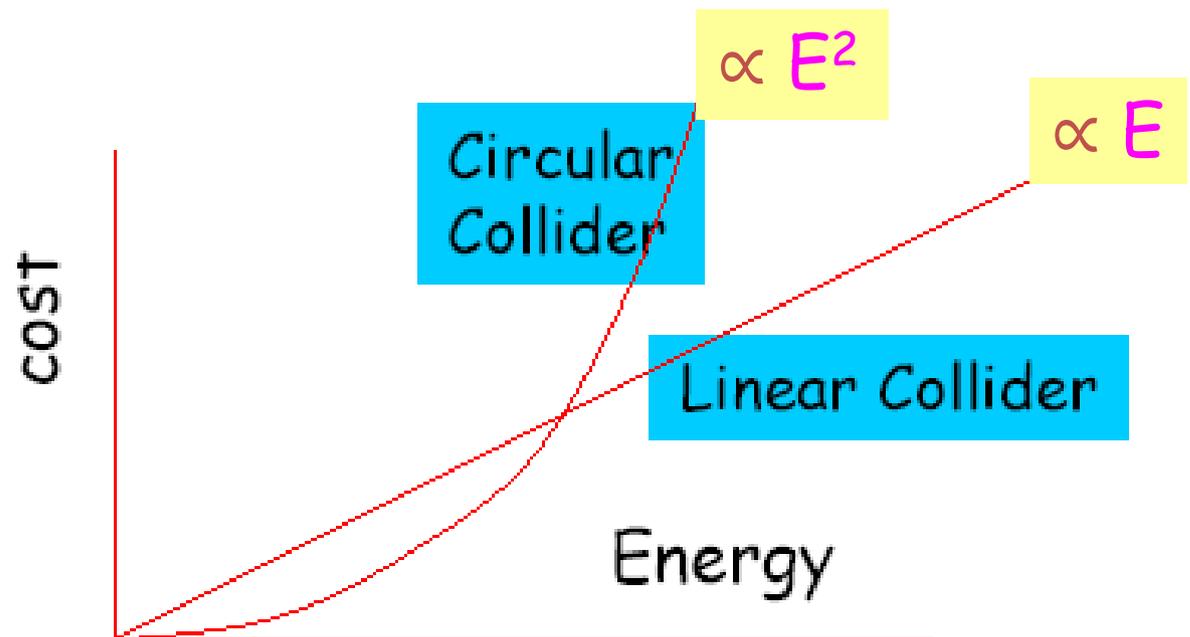
PEP II : , @SLAC, Stanford, USA
 linéaire, e⁺e⁻, 3.2 Km de long, collisions asymétriques $E_{CM} = 10,56$ GeV

Collisionneurs e+e- vs accélérateurs linéaires

Accélérateurs circulaires de rayon R:

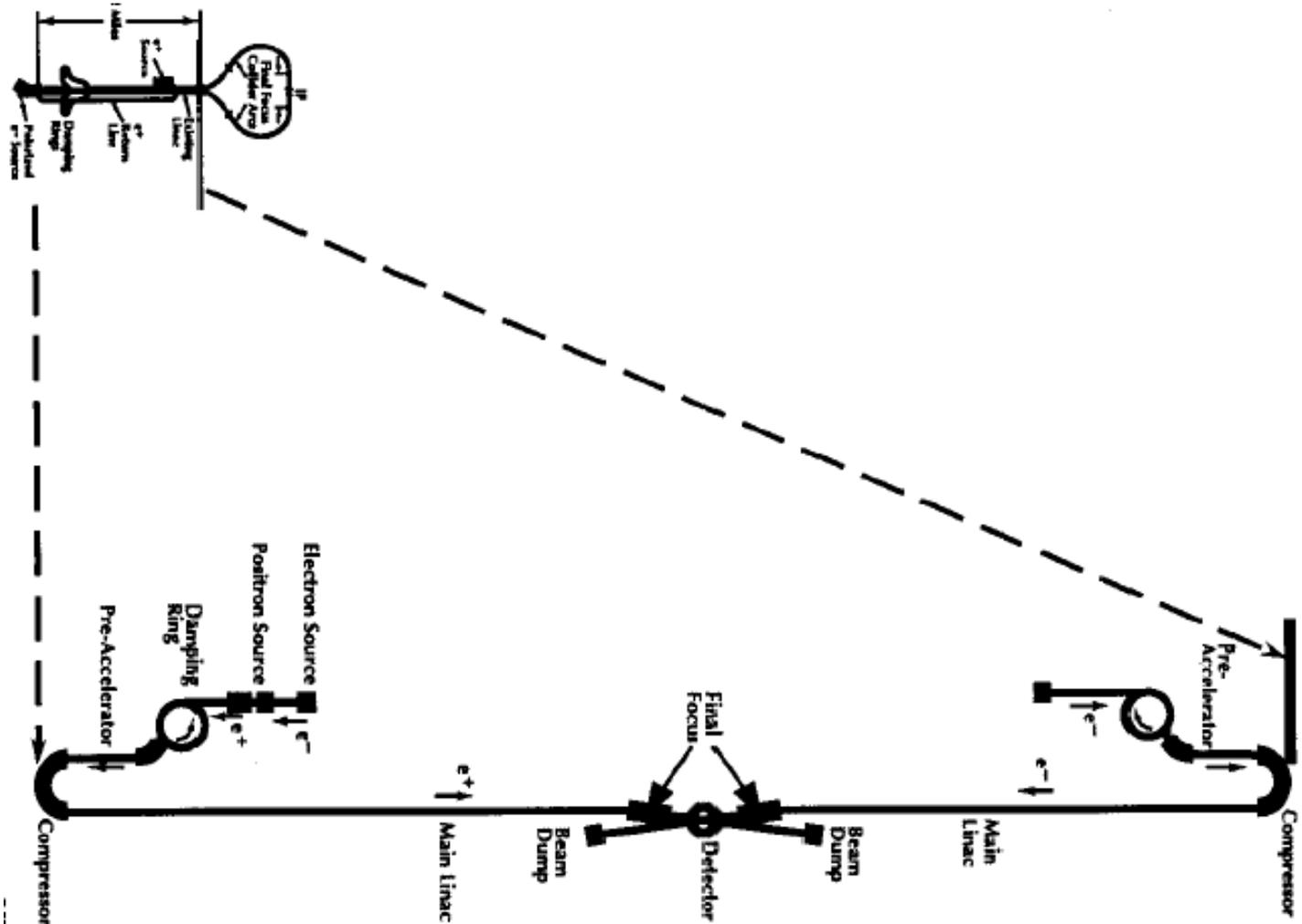
$$\frac{\text{Perte d'énergie}}{\text{Par tour}} = \frac{dE}{dT} \propto \frac{E^4}{m^4 R}$$

- ❖ pas de 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

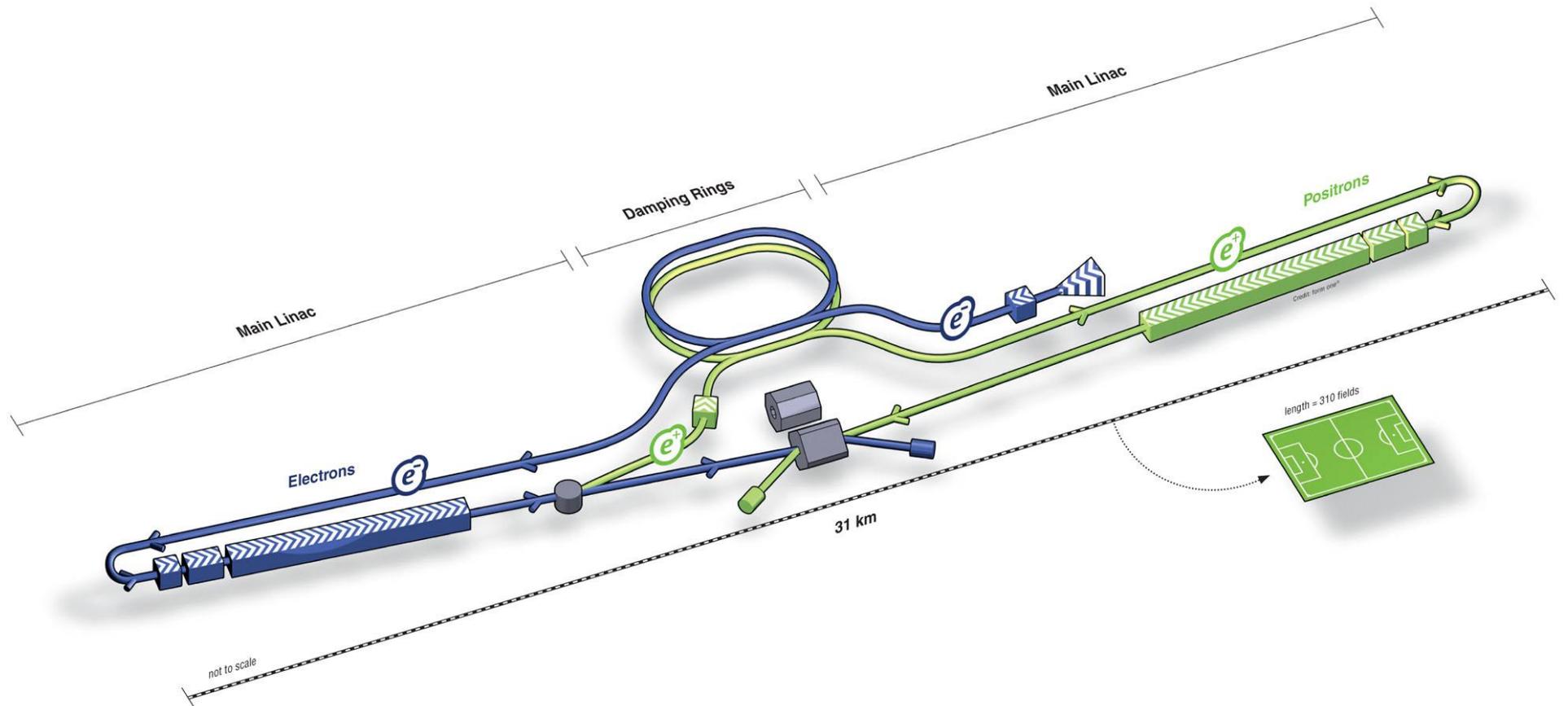
SLC



ILC : $\geq 201x$:

linéaire, e^+e^- , $E_{CM} = 0.5 - 1.5 \text{ TeV}$

ILC @ quelque part sur terre



ILC : \geq 201x:

linéaire, e^+e^- , $E_{CM} = 500 \text{ GeV}$

Machines Electrons-Protons

DES CIBLES FIXES EN MOUVEMENT

HERA @ DESY

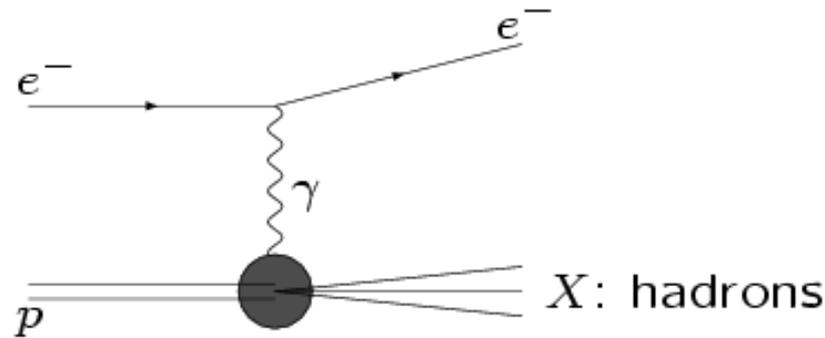


≥ 2000: Hera run II, 6.3 Km de long, @Desy Hambourg
circulaire, e+/e- de 27 GeV vs protons de 920 GeV

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)

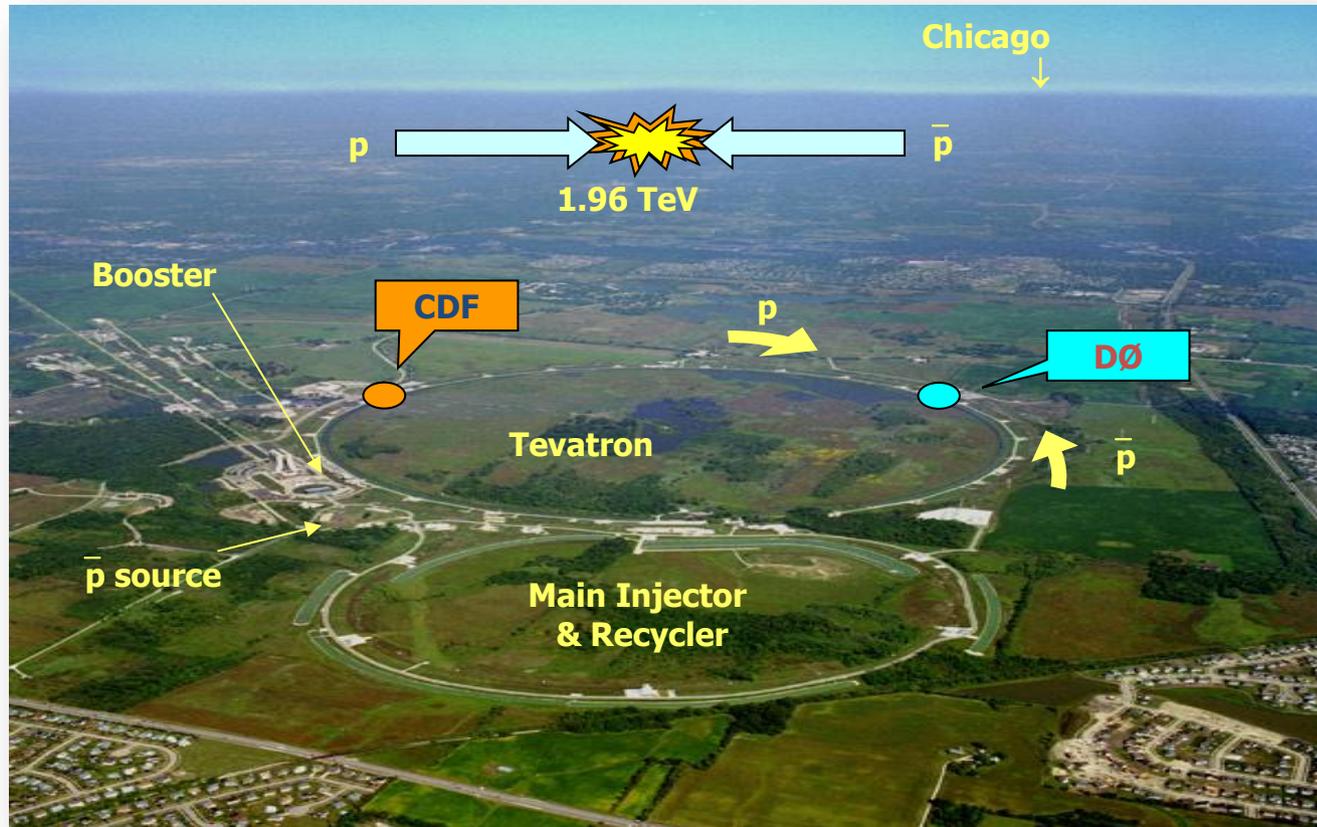
$$\sigma(ep) = \int_0^1 dx \sum_{q, \bar{q} \text{ in proton}} \underbrace{q^p(x)} \sigma(eq)$$

$q^h(x)dx$: 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

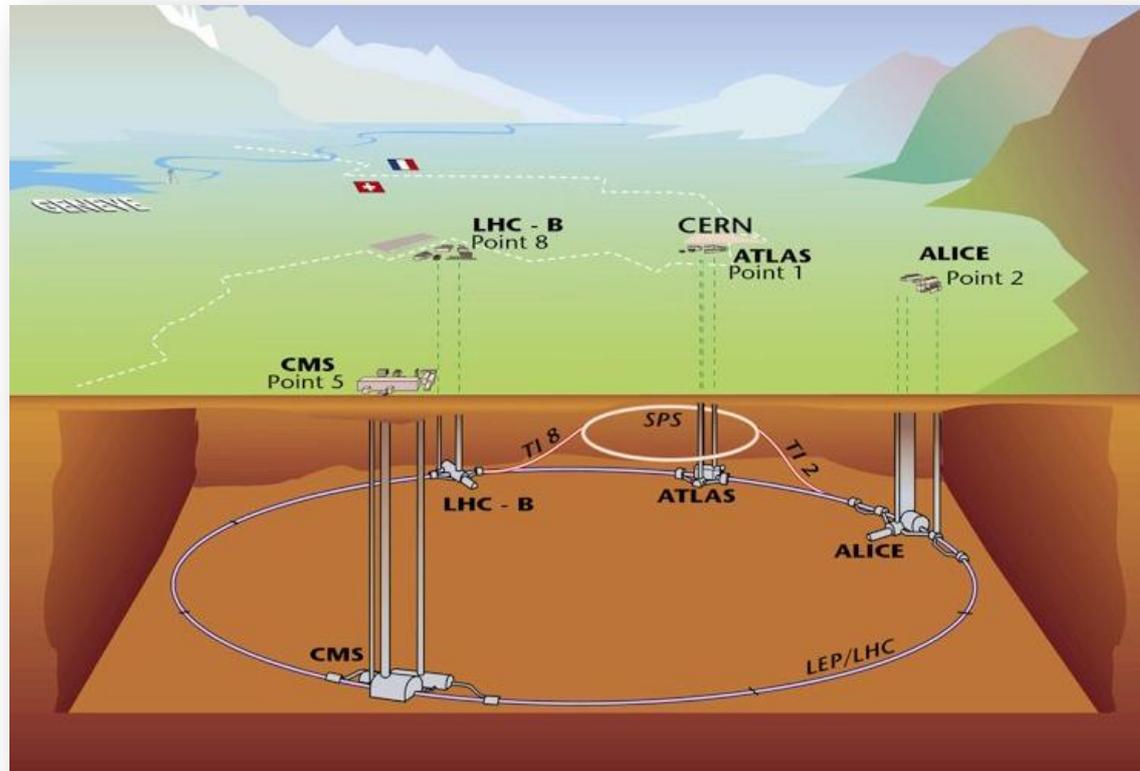
MACHINES A PROTONS

TeVatron @Fermilab



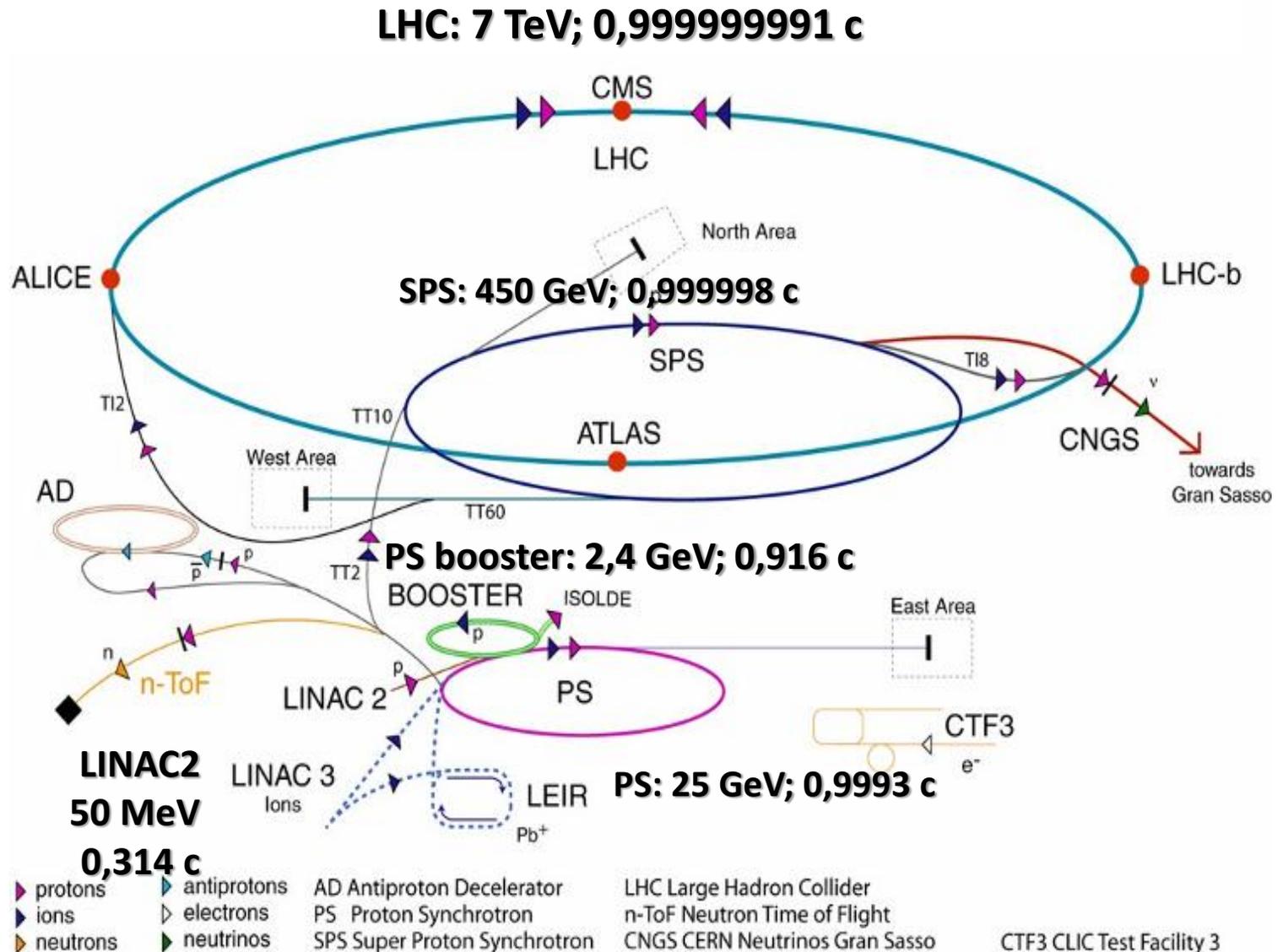
≥ 2000: Tevatron run II, @Fermilab Chicago
circulaire, p/anti-p, 6.3 Km de long, $E_{CM} = 1\,960\text{ GeV}$

LHC @CERN



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

Tout ne se fait pas en un jour



LHC @CERN

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



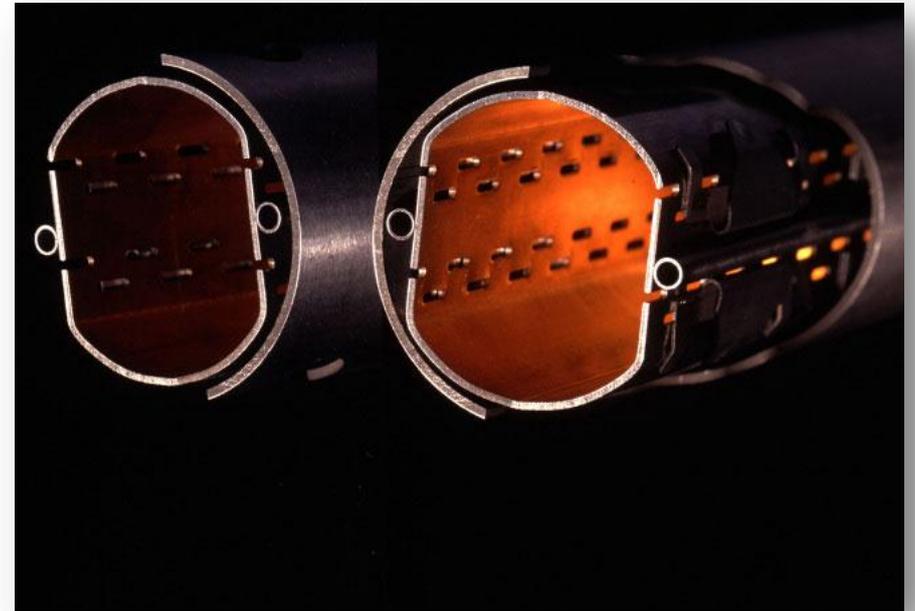
Slide from Frédéric DERUE



**... 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...



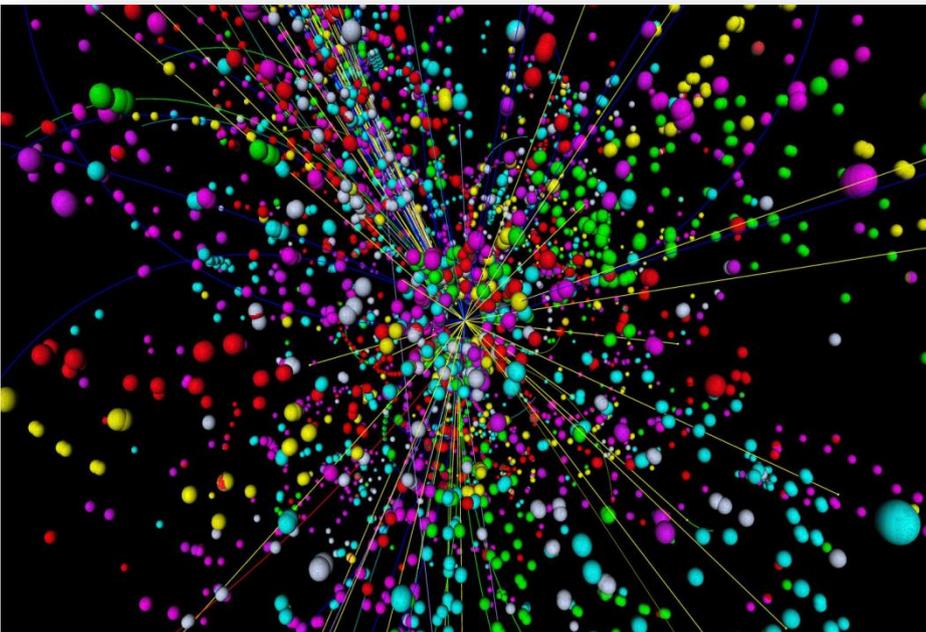
Slide from Frédéric DERUE

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

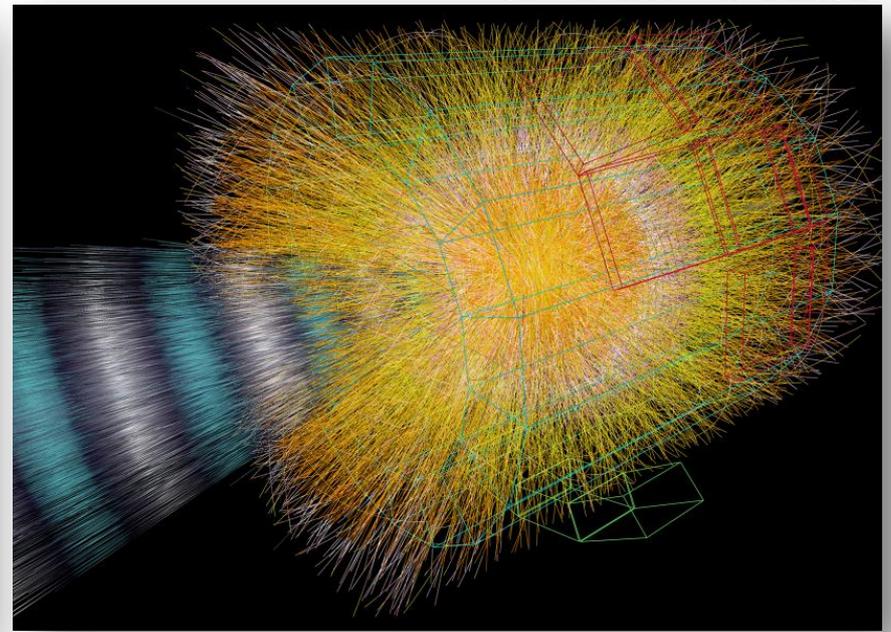
LHC @CERN

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

Slide from Frédéric DERUE



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.

Encore des chiffres

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 11 245 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** ;

La longueur totale des câbles supraconducteurs nécessaire est d'environ 7.600 kilomètres. Chaque câble étant constitué de filaments, la longueur totale des filaments est de **10 fois la distance de la Terre au Soleil** ;

LHC @CERN

Le LHC va stocker un **faisceau d'énergie de 360 mégajoules** environ : $2.808 \text{ bunches} \times 1,15 \times 10^{11}$ protons d'une énergie de 7 TeV chacun = $2808 \times 1,15 \times 10^{11} \times 10^{12} \times 7 \times 1,602 \times 10^{-19}$ joules = 362 MJ par faisceau. Cela peut être comparé à :

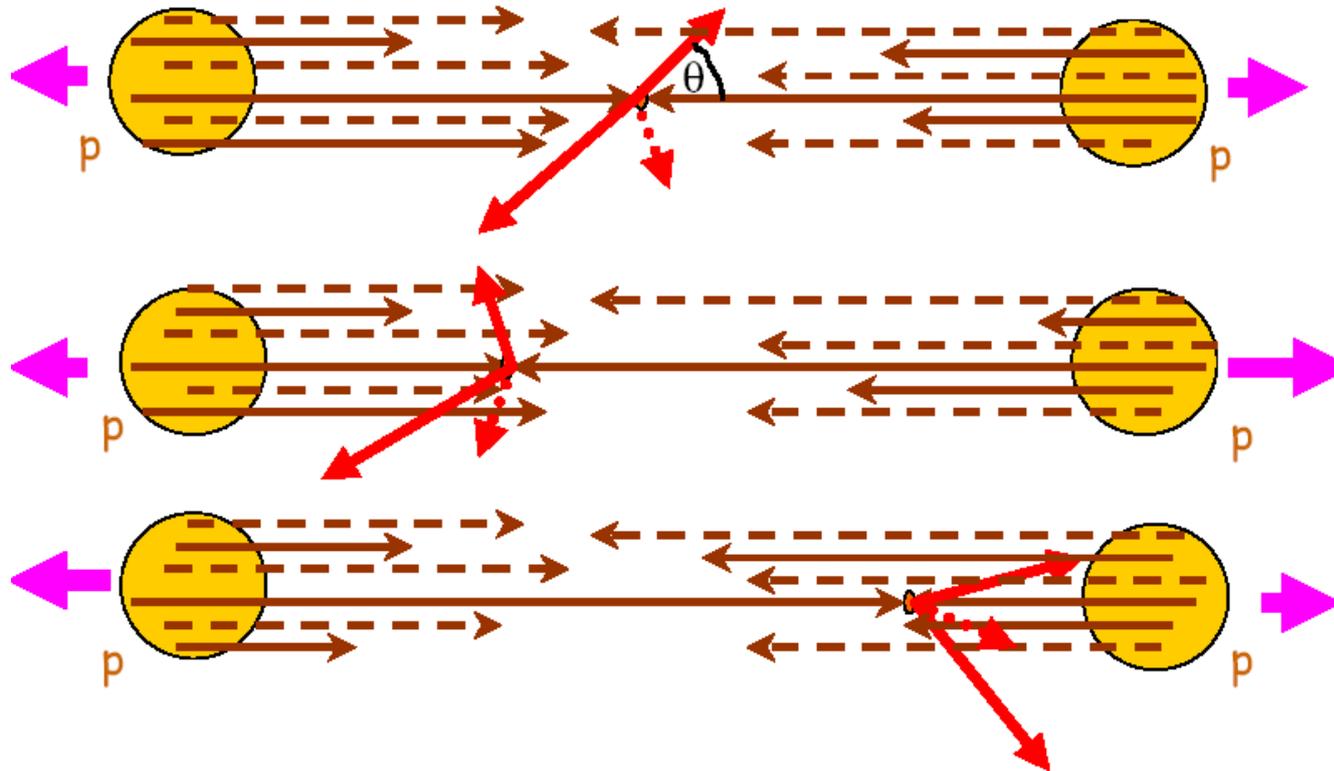
- **En énergie cinétique :**
 - 1 petit navire de croisière de 10.000 tonnes se déplaçant à 30 km/h ;
 - 450 véhicules de 2 tonnes se déplaçant à 100 km/h.
 - Un TGV (400 tonnes) lancé à 150 km/h
- **En énergie chimique :**
 - L'explosion de 80 kilos de TNT ;
- **En énergie thermique :**
 - Ce qu'il faut pour fondre 500 kilos de cuivre ;
 - Ce qu'il faut pour porter 1 mètre cube d'eau à 85 ° C
 - Ce qu'il faut pour préparer 1 tonne de thé.

Collisionneurs hadroniques

OÙ EST DONC LE PROBLÈME ?

Collisions hadroniques ... cinématique

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



Collisions hadroniques ... cinématique

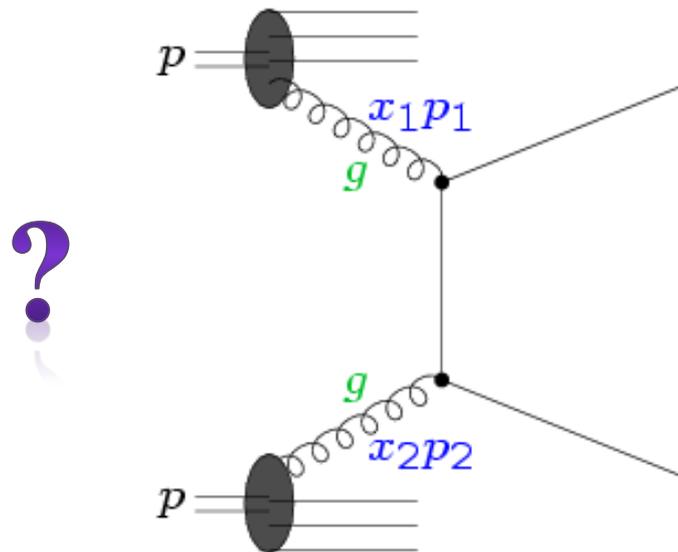
L'énergie dans le centre de masse des deux particules n'est à priori pas déterminée :

$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \quad \cdot d\Omega$$



Collisionneurs pp

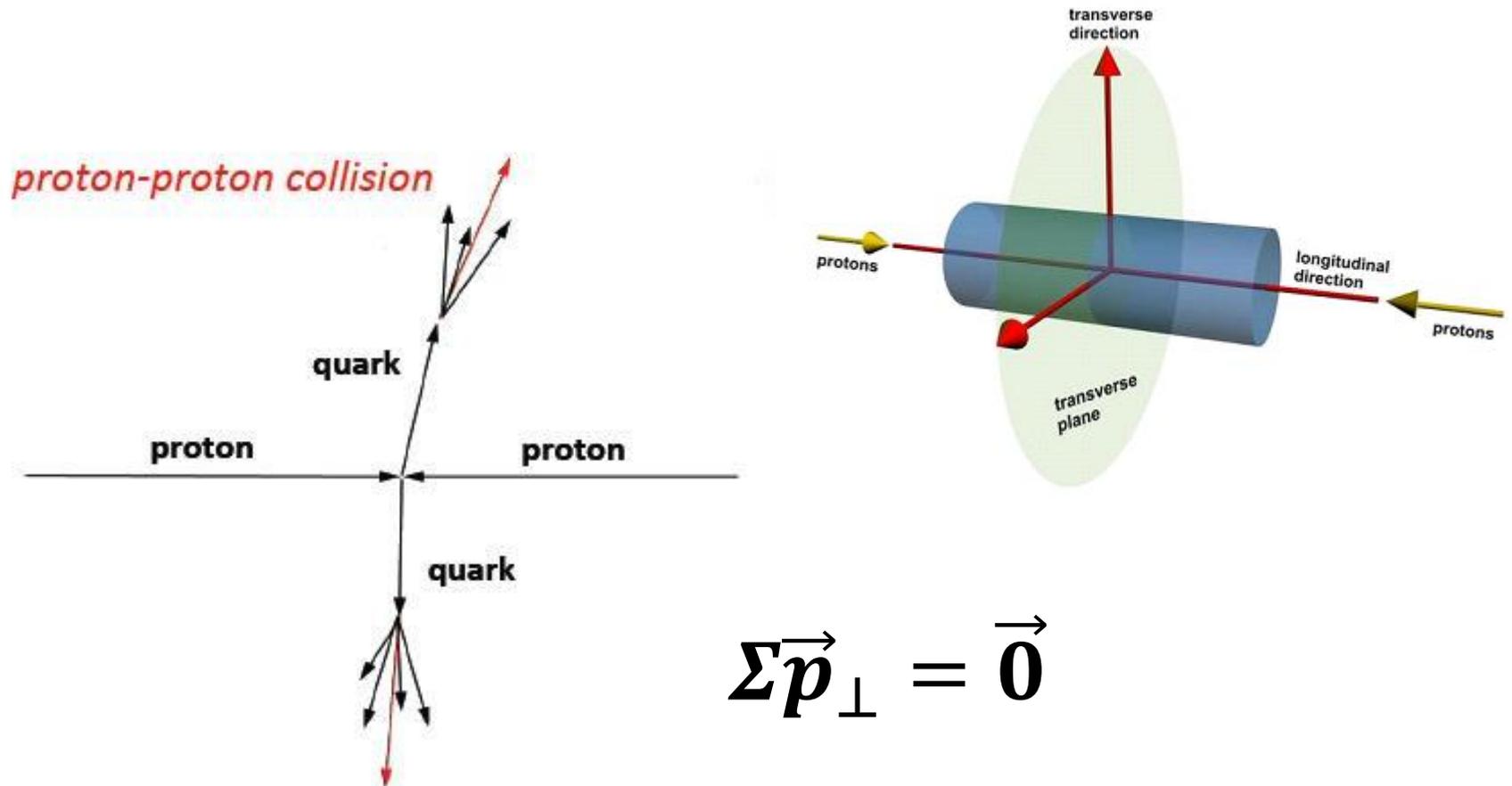
Les collisions proton-proton : contiennent des processus durs de partons quarks, anti-quarks, et gluons.

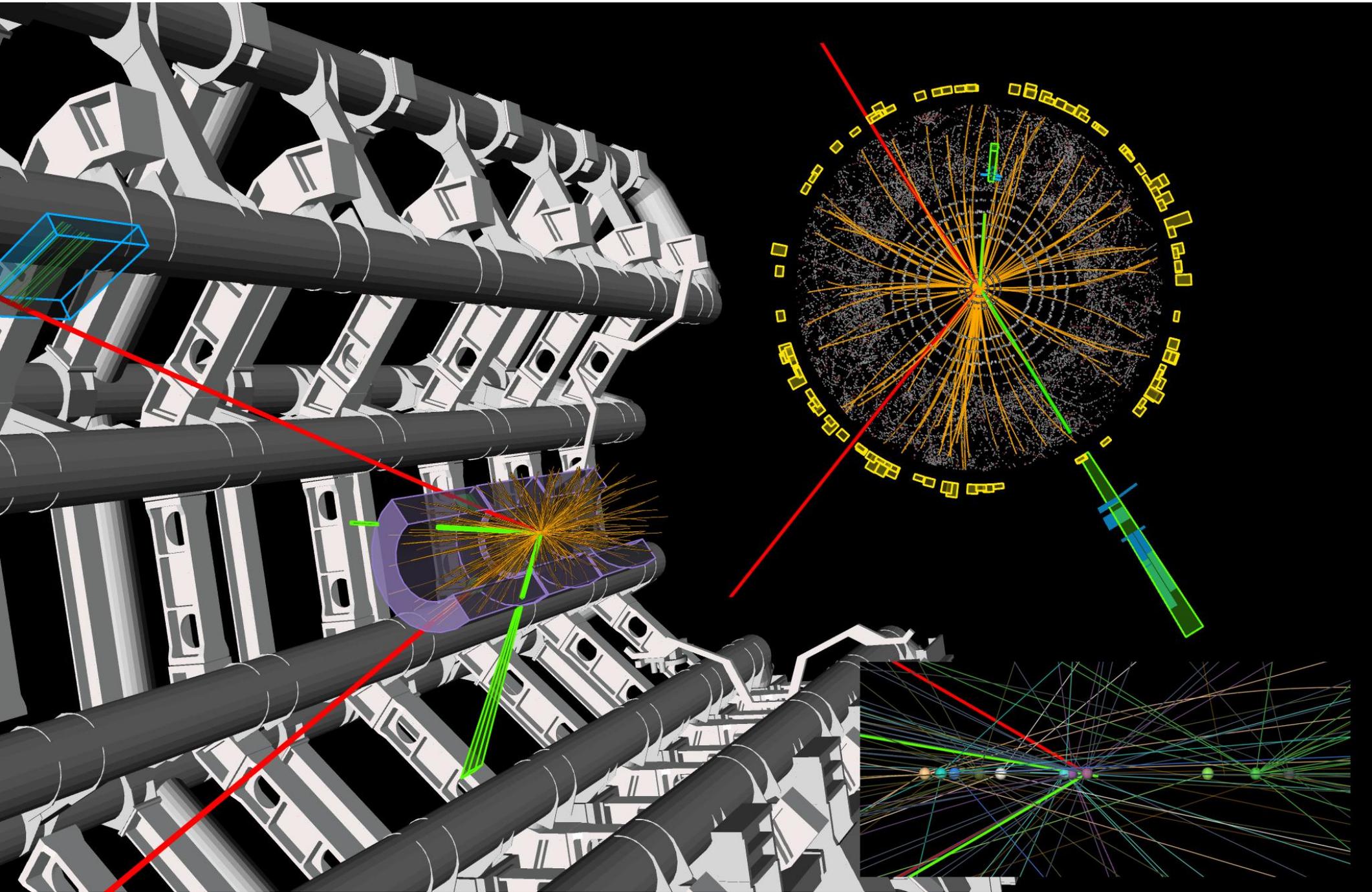


- ❖ (énergie)² disponible pour le sous-processus partonique est $\hat{s} = x_1 x_2 s$
au LHC, $s^{1/2} = 14$ TeV et $\hat{s}^{1/2}$ pourra aller jusqu'à ~ 3 TeV
- ❖ Une fraction importante de l'énergie est emportée par les restes des protons

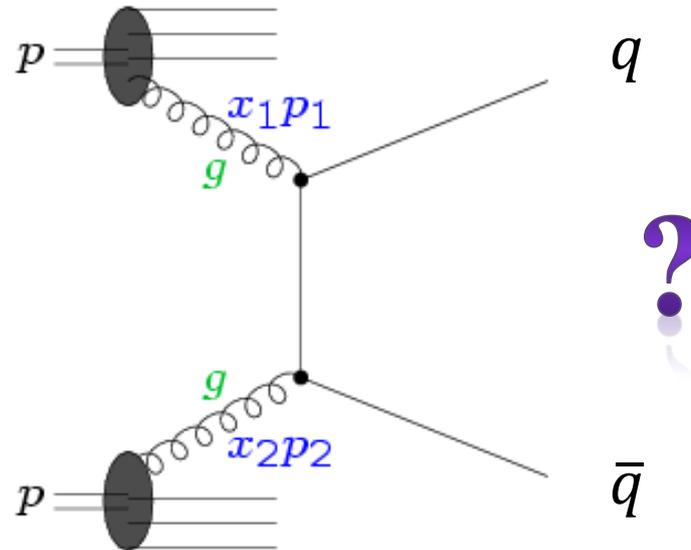
Collisionneurs pp

La projection dans le plan transverse équilibre les relations



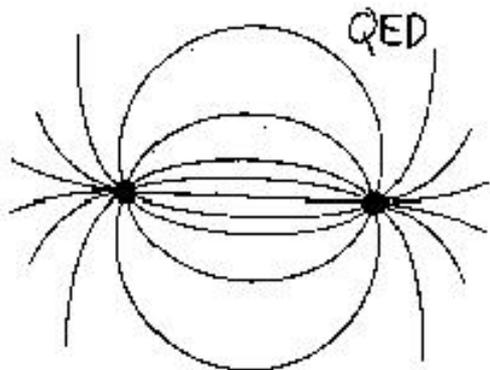


Et ça se complique, l'état final ... des jets ...



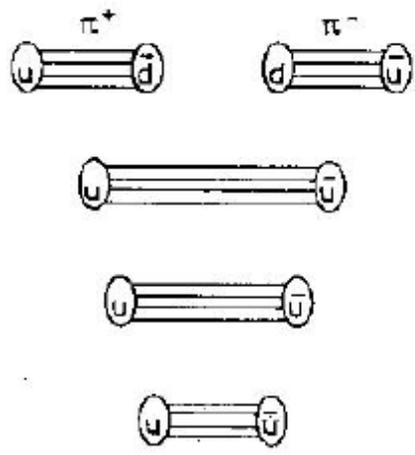
Pour des leptons

chez les quarks

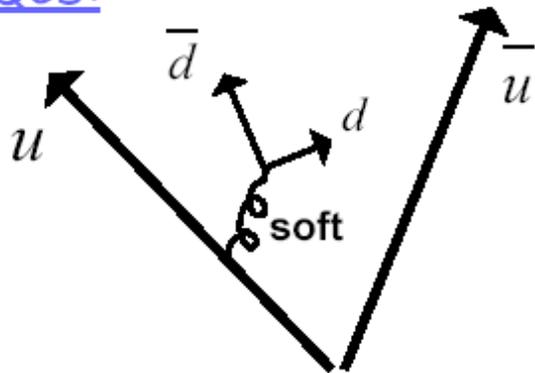


... jets ...

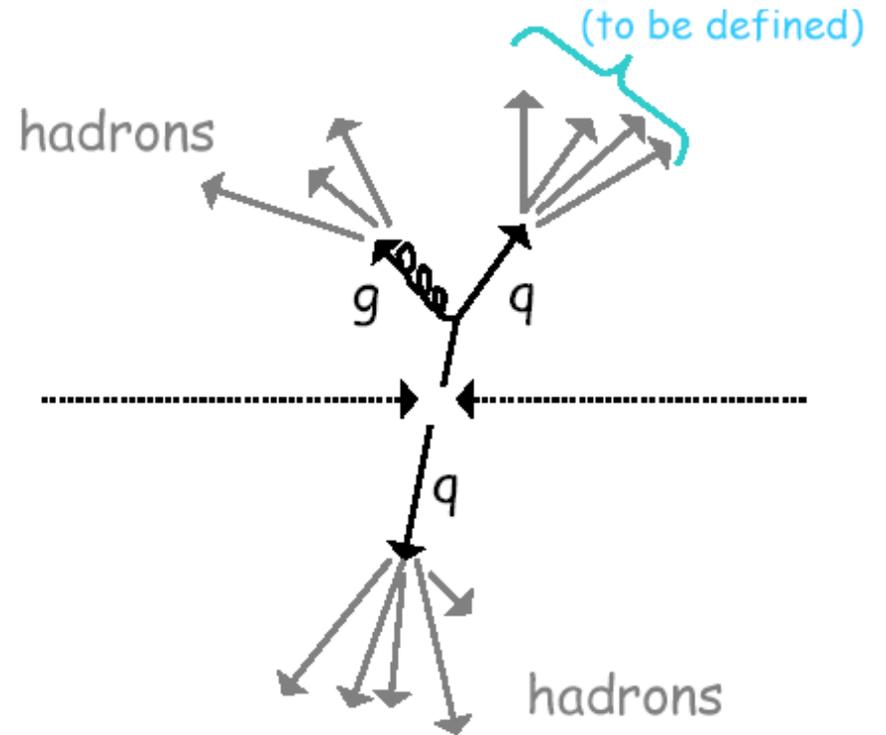
Modèle des cordes



QCD:



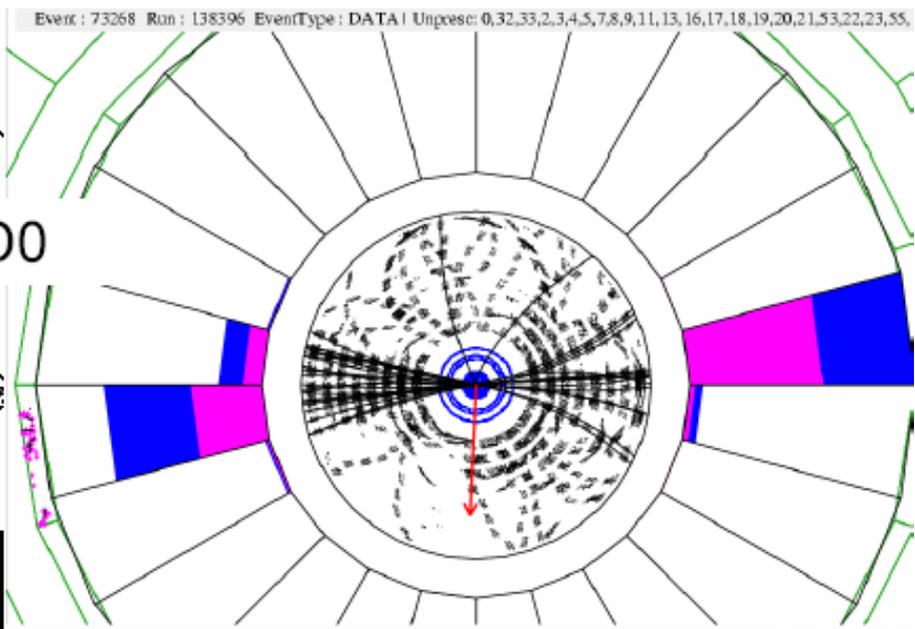
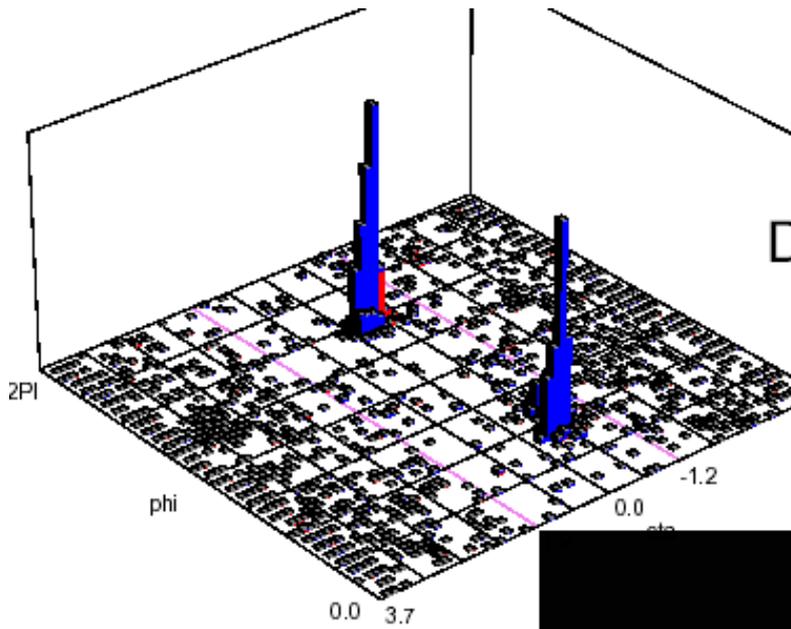
Production de jets



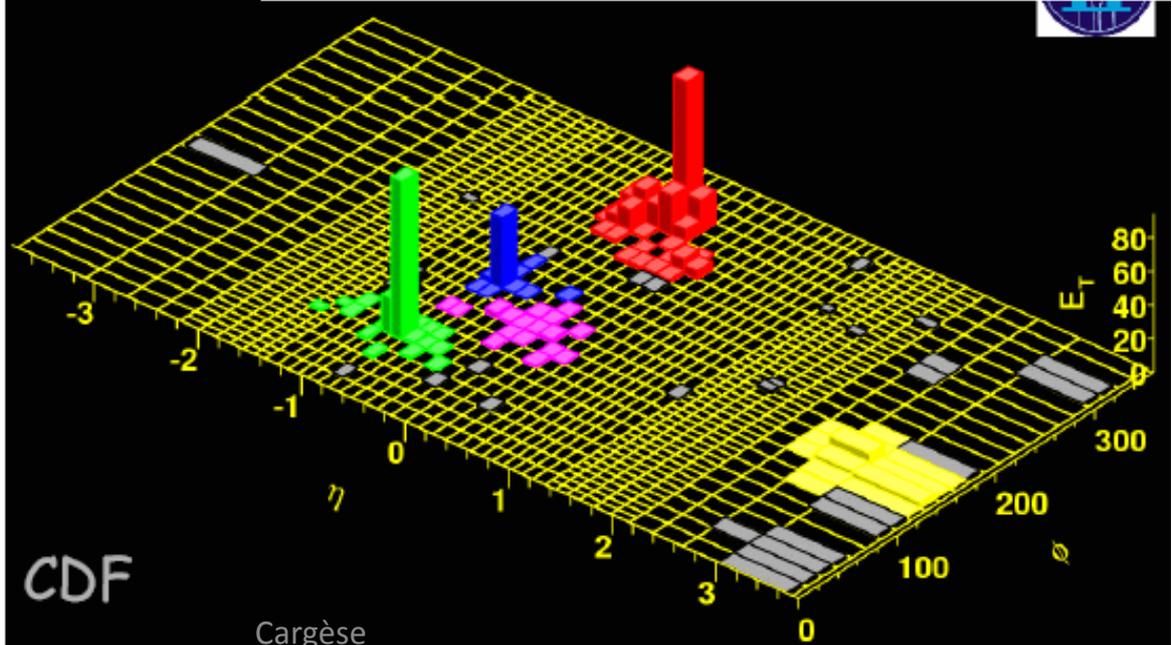
Hadronization: non-perturbative

⇒ need models!

... jets ...

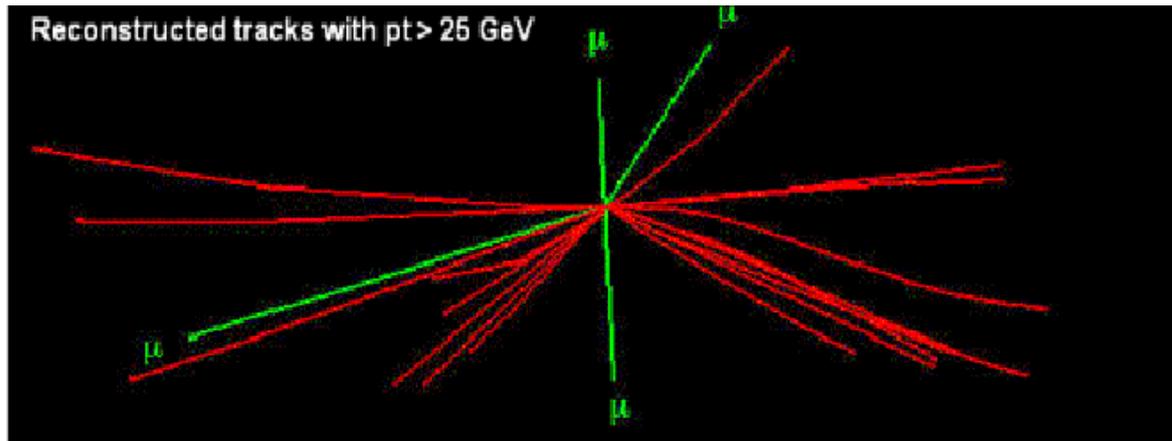


Jet events



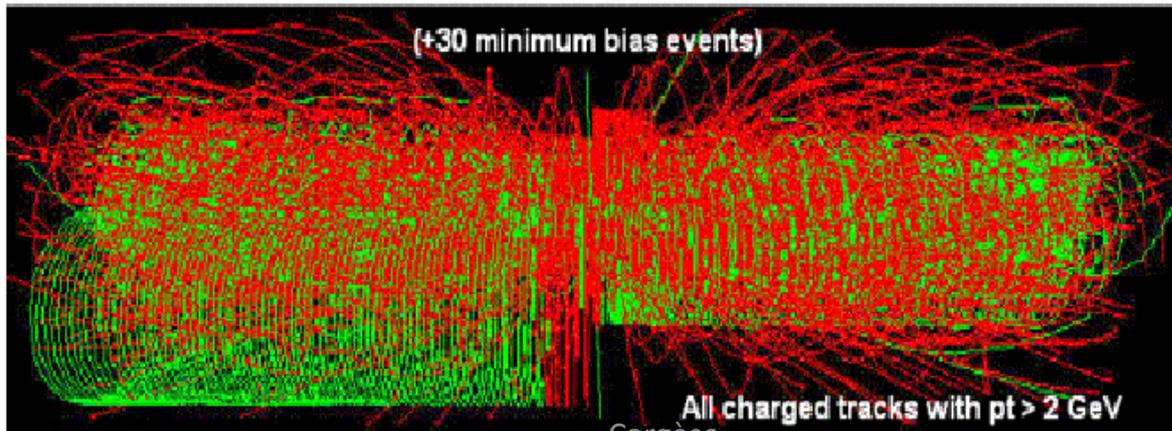
... et on est pas seuls ...

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



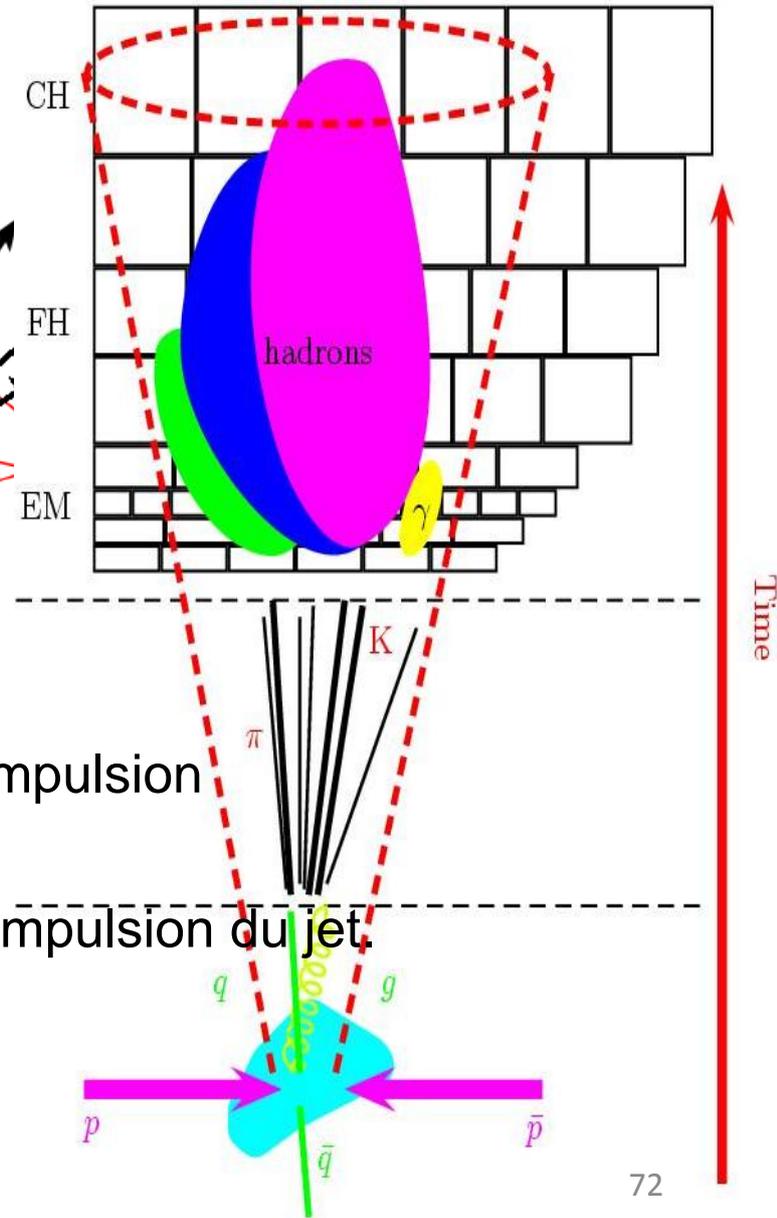
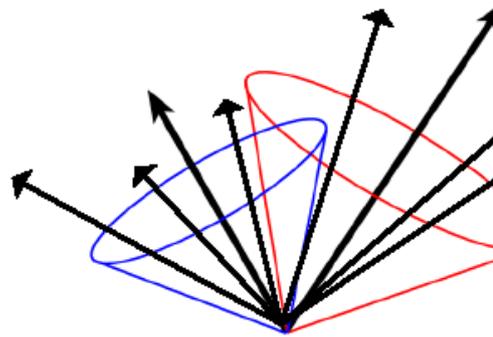
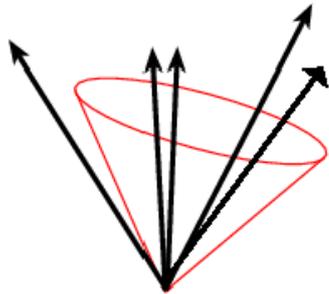
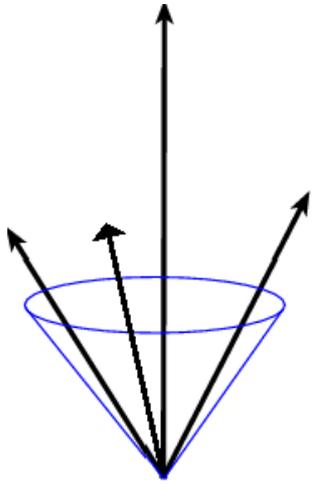
1 Higgs en 4 muons pour 10^{13} événements

1 000 traces par événement



... jets ...

cone jets



On définit un cône autour des particules de haute impulsion

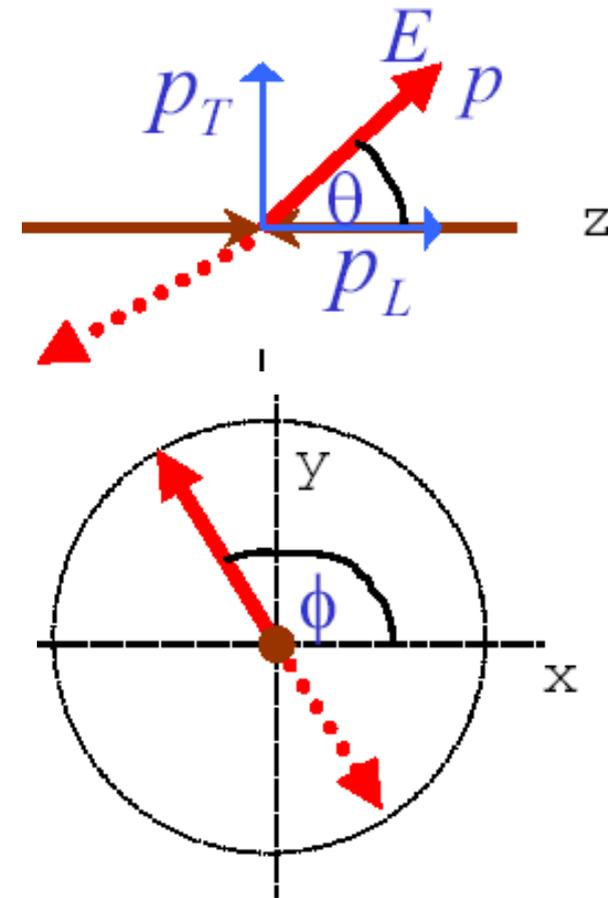
On ignore les traces de faible impulsion

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

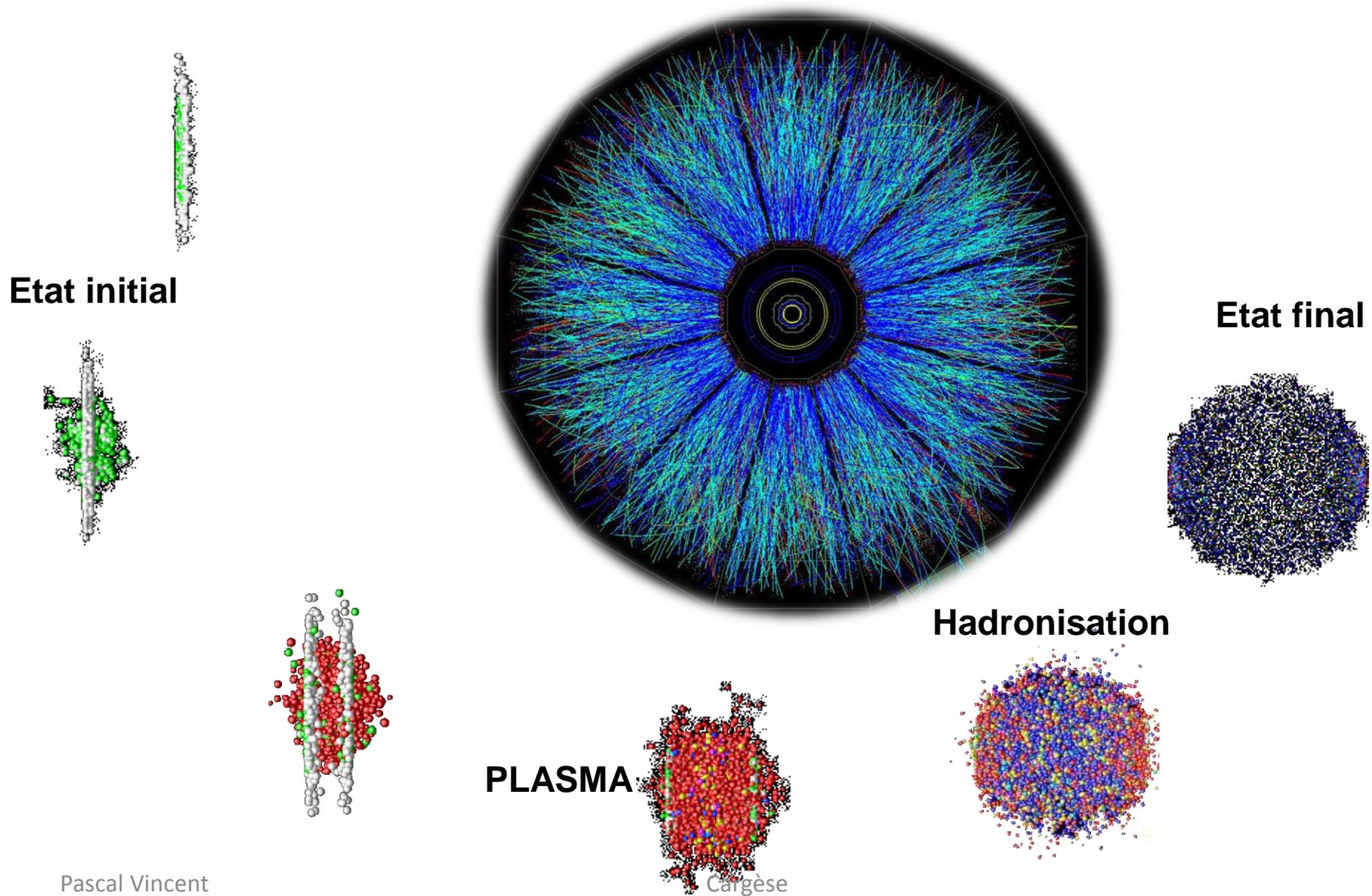
Collisions hadroniques ... cinématique

Variables cinématiques sont globales aux jets de particules :

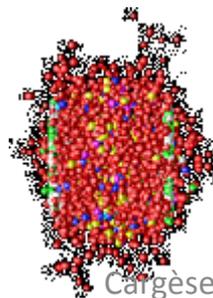
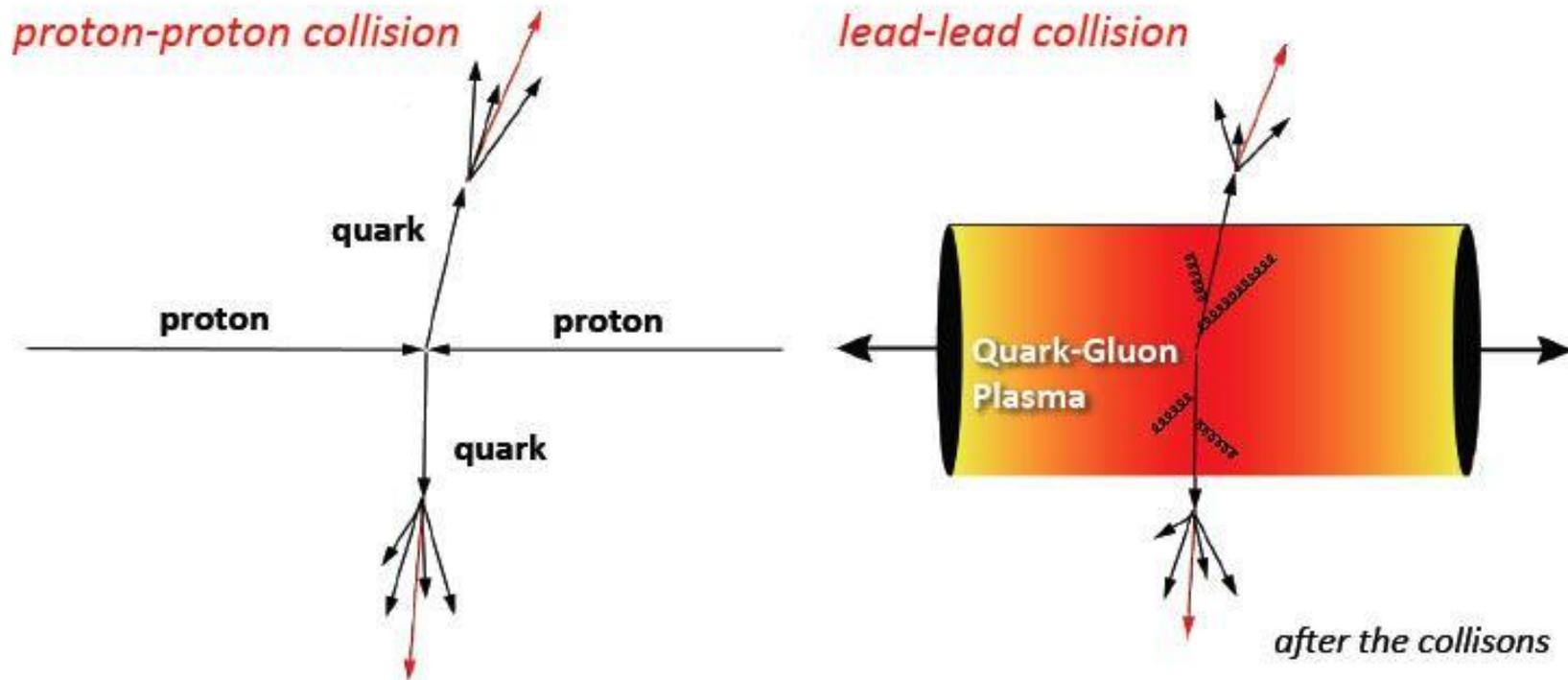
- ❖ Angle azimutal (ϕ)
- ❖ Angle polaire (θ)
- ❖ Energie (E)
- ❖ Quantité de mouvement (P)
- ❖ Impulsion transverse (P_T)
- ❖ Impulsion longitudinale (P_L)



Collisions hadroniques ... QGP



Collisions hadroniques ... QGP

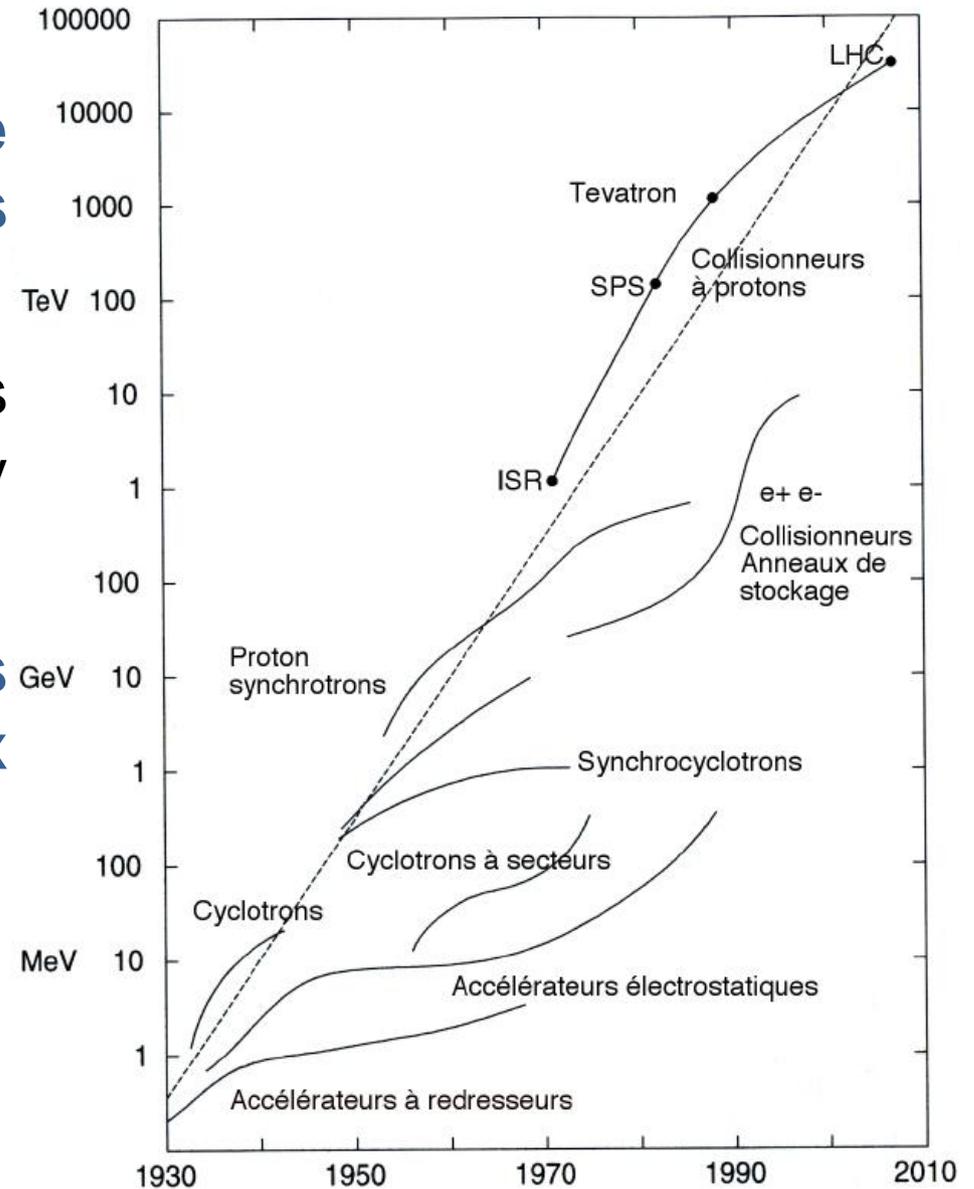


Accélérateurs ... survol

Evolution de l'énergie et de la conception des machines

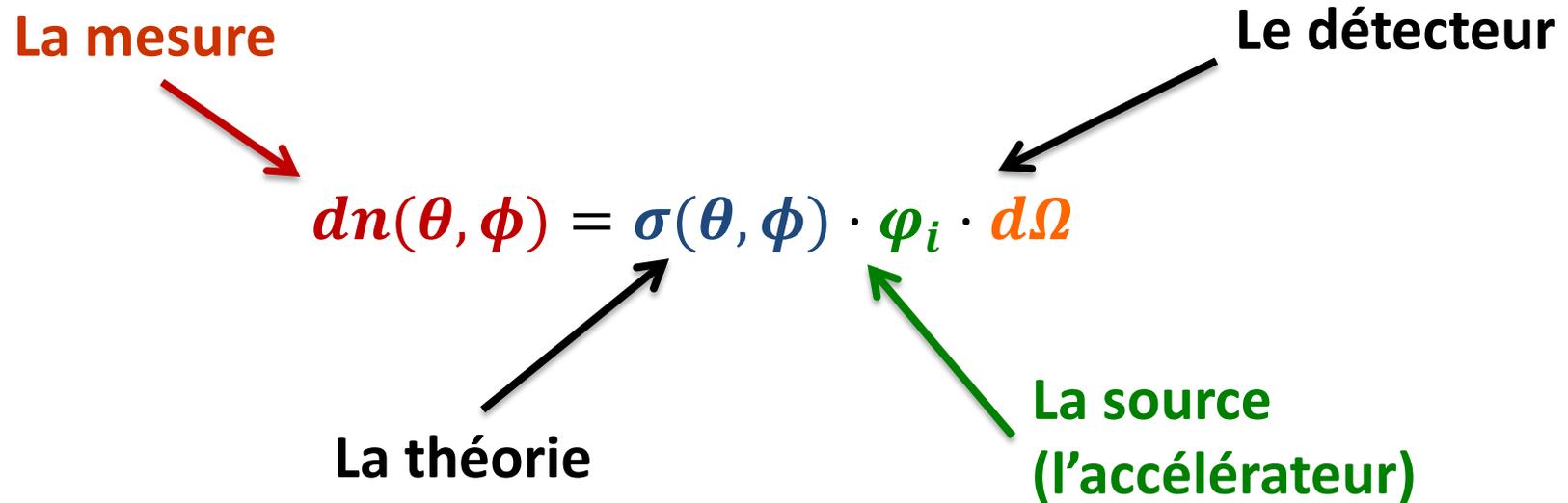
saturation des courbes à cause du cout par GeV

=> besoin de concepts nouveaux



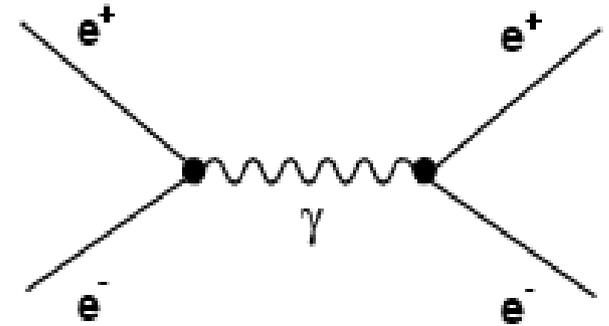
Rappel

Le principe de la méthode expérimentale



Rappel : Machines à électrons

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.

=> **physique de précision**

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

Rappel : Machines à protons

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

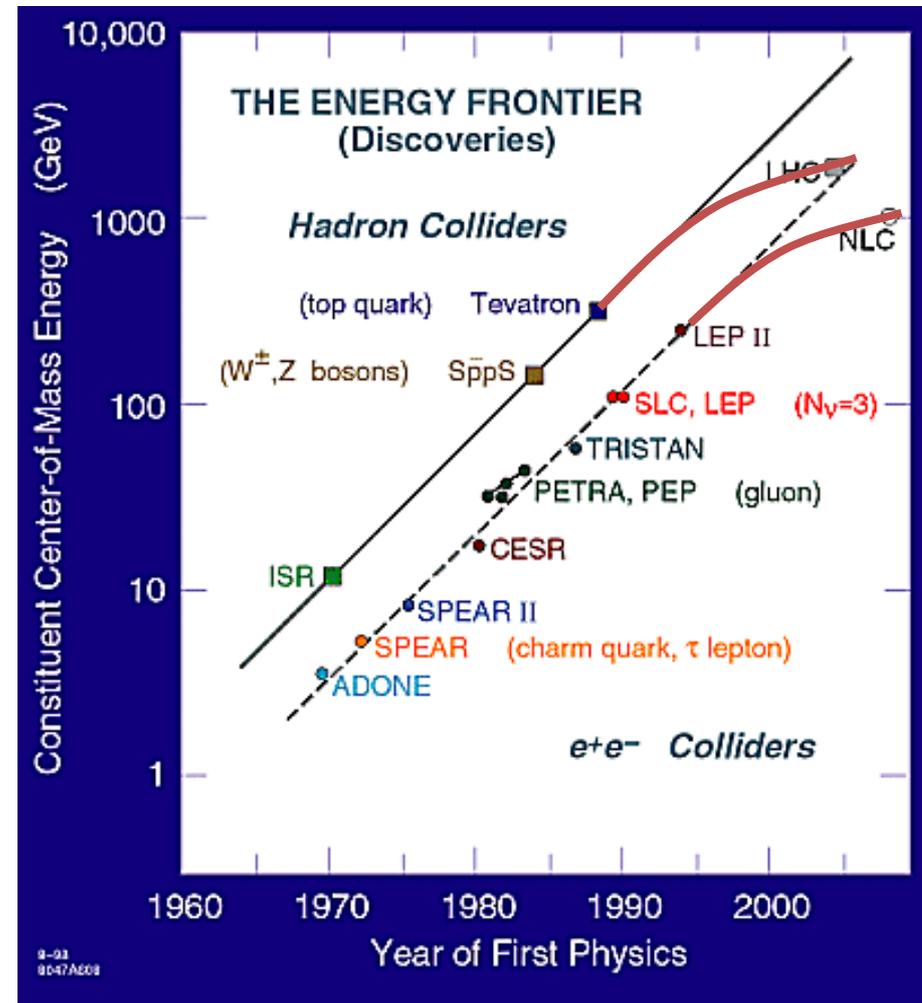
- ❖ Plus facile d'obtenir de très hautes énergies
- ❖ Au point de vue cinématique, on ne peut en général pas caractériser séparément toutes les particules émergentes.
- ❖ La nature composite des protons donne lieu à un événement sous-jacent
- ❖ Particules dans l'état initial sont sensibles à l'interaction forte:
 - énormes bruits de fond QCD
 - rapport signal/bruit en général plus mauvais

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

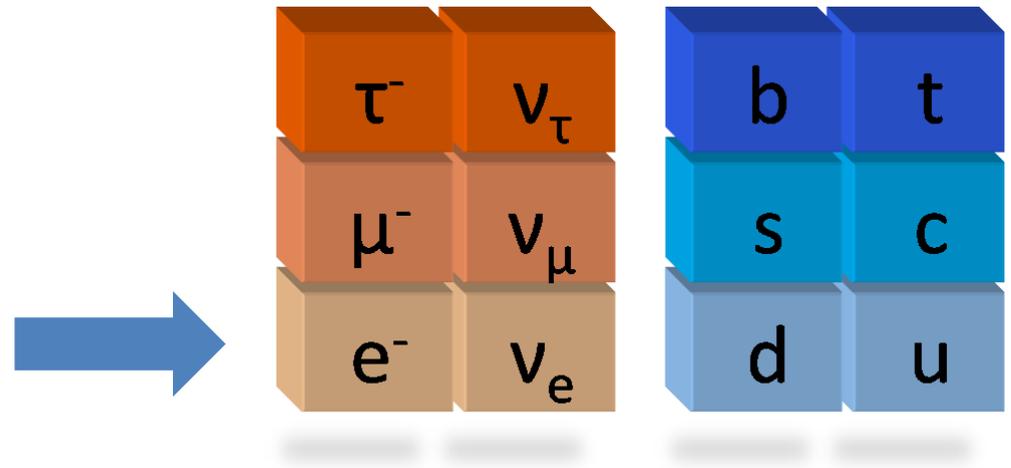
Accélérateurs hadroniques vs leptonique

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

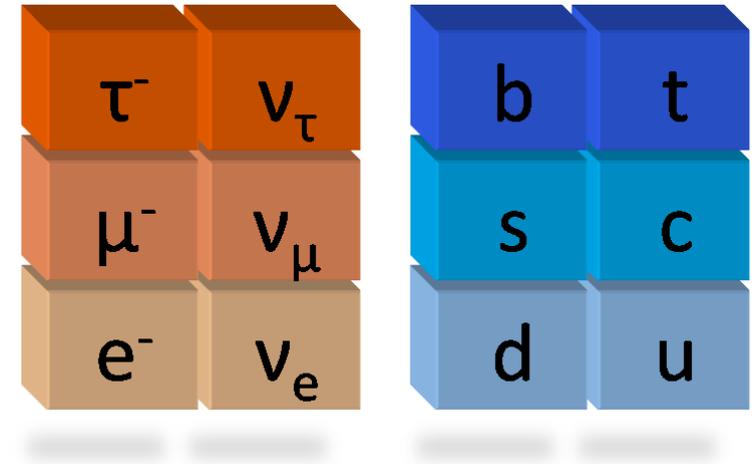
Les collisionneurs à muons

Les muons sont des « électrons lourds ».

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

Mais ils meurent très vite ...

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

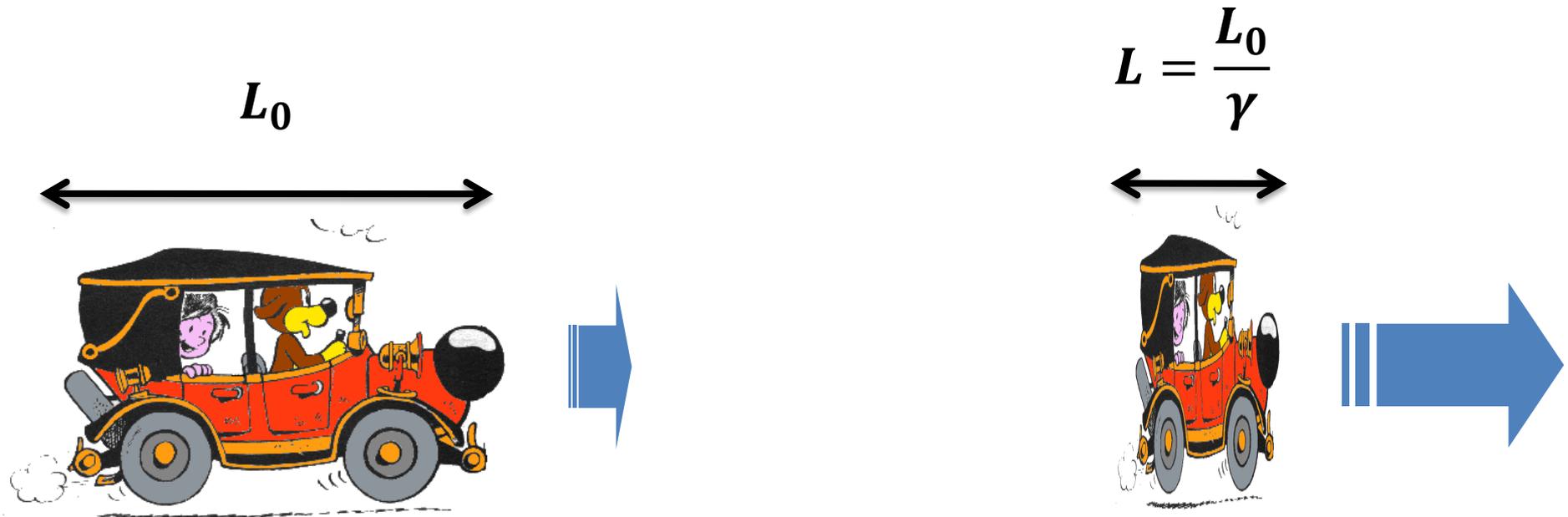


Les collisionneurs à muons

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

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 \quad \gamma = \frac{E}{m} \quad \nearrow \quad E \quad \nearrow$$

et les distances se contractent :



Les collisionneurs à muons

Distance parcourue et durée de l'expérience :

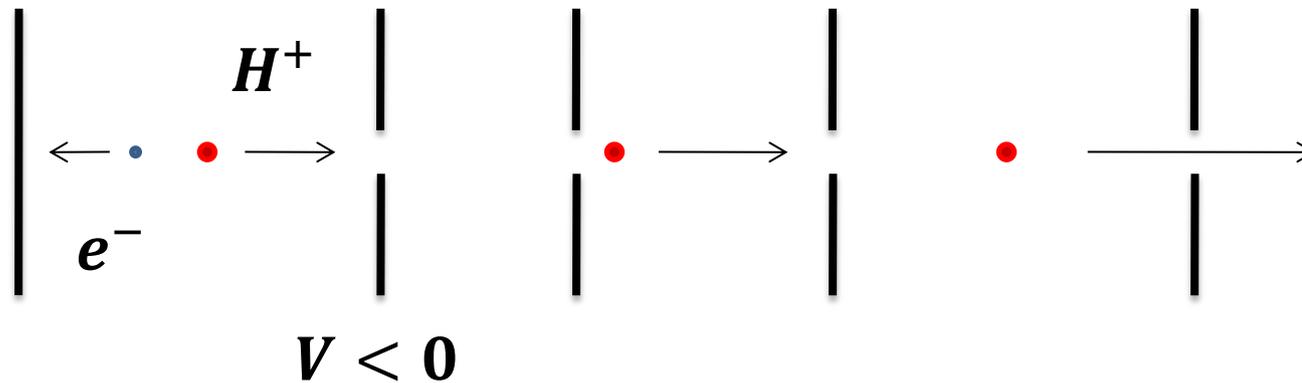
$$\begin{array}{l} m_{\mu} \sim 105 \text{ MeV} \\ E = 1 \text{ TeV} \end{array} \quad \gamma = \frac{E}{m} \sim 10^4$$

$$\begin{array}{l} \Delta t = \gamma \Delta t_0 = 10^4 \times 2,2 \cdot 10^{-6} \\ < \mathbf{22 \text{ ms}} \end{array}$$

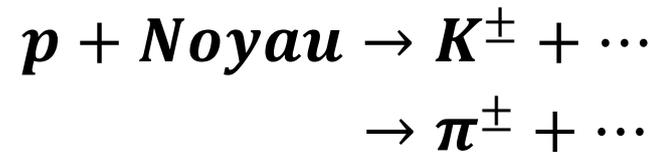
$$\begin{array}{l} \Delta x < c \gamma \Delta t \\ = 3 \cdot 10^8 \times 10^4 \times 2,2 \cdot 10^{-6} \\ = \mathbf{6\,600 \text{ km}} \end{array}$$

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 :



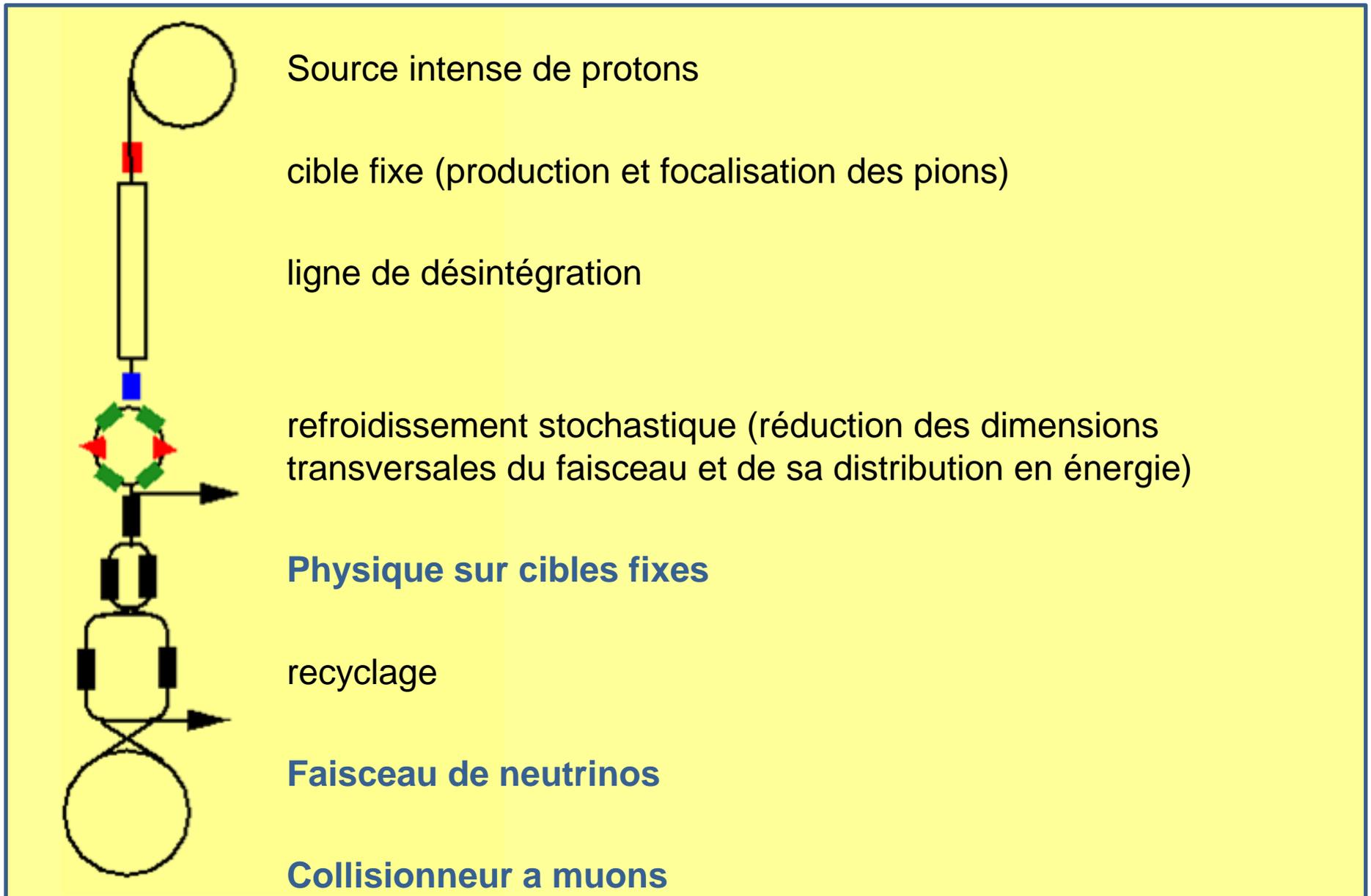
Source de muons

Désintégration des kaons et pions chargés :

$$\tau = 1,24 \cdot 10^{-8} s = 12,4 ns$$
$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \quad (63.54 \pm 0.14)\%$$

$$\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} s = 26 ns$$
$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \quad (99.98770 \pm 0.00004)\%$$

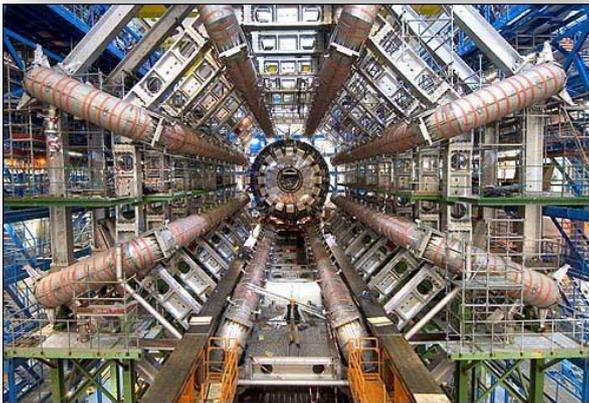
Les collisionneurs à muons



**Pour aller encore plus haut en
énergie**

La méthode

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



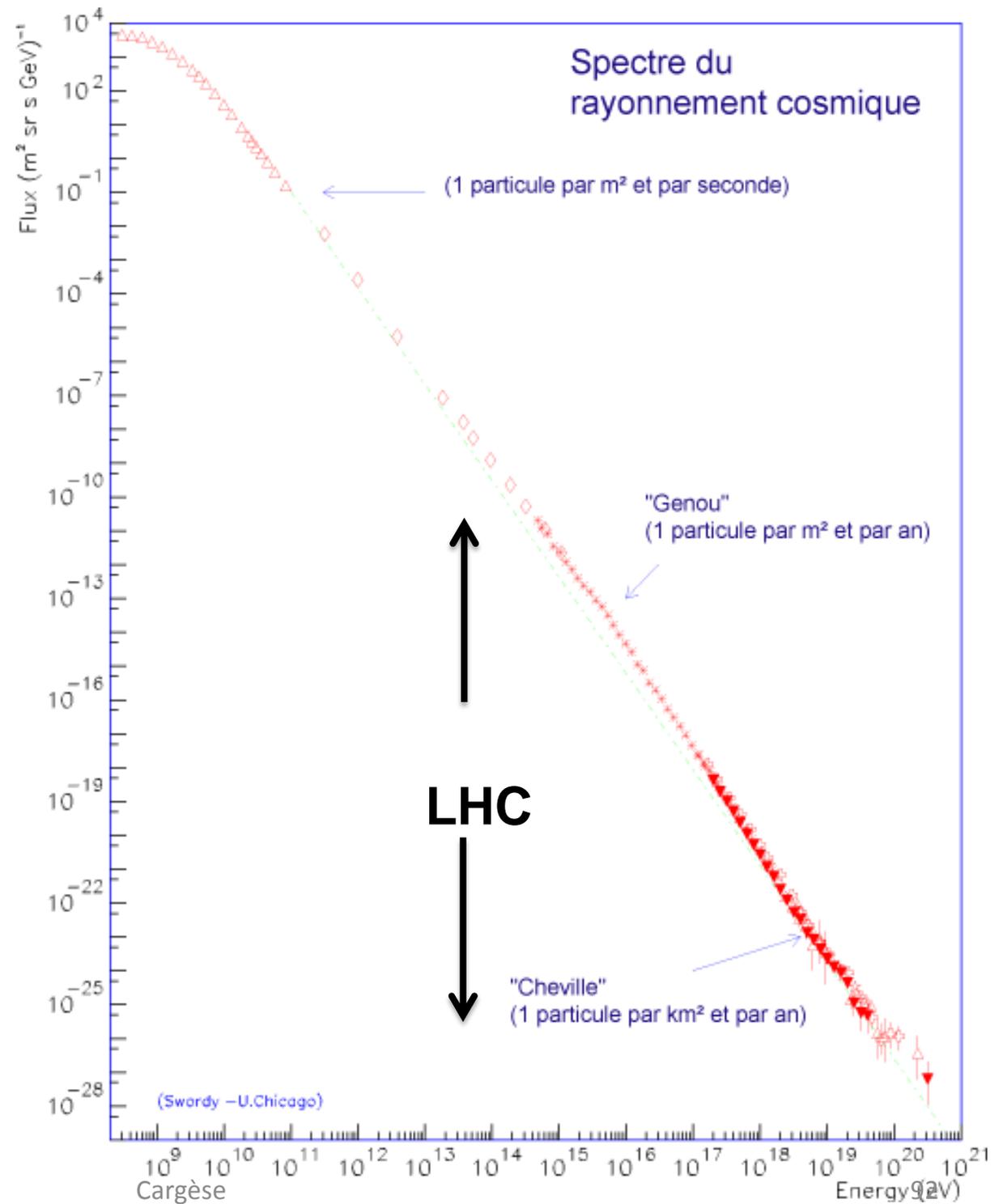
ou **naturellement produits** dans l'Univers par des événements cataclysmiques.



Les accélérateurs

MACHINES NATURELLES

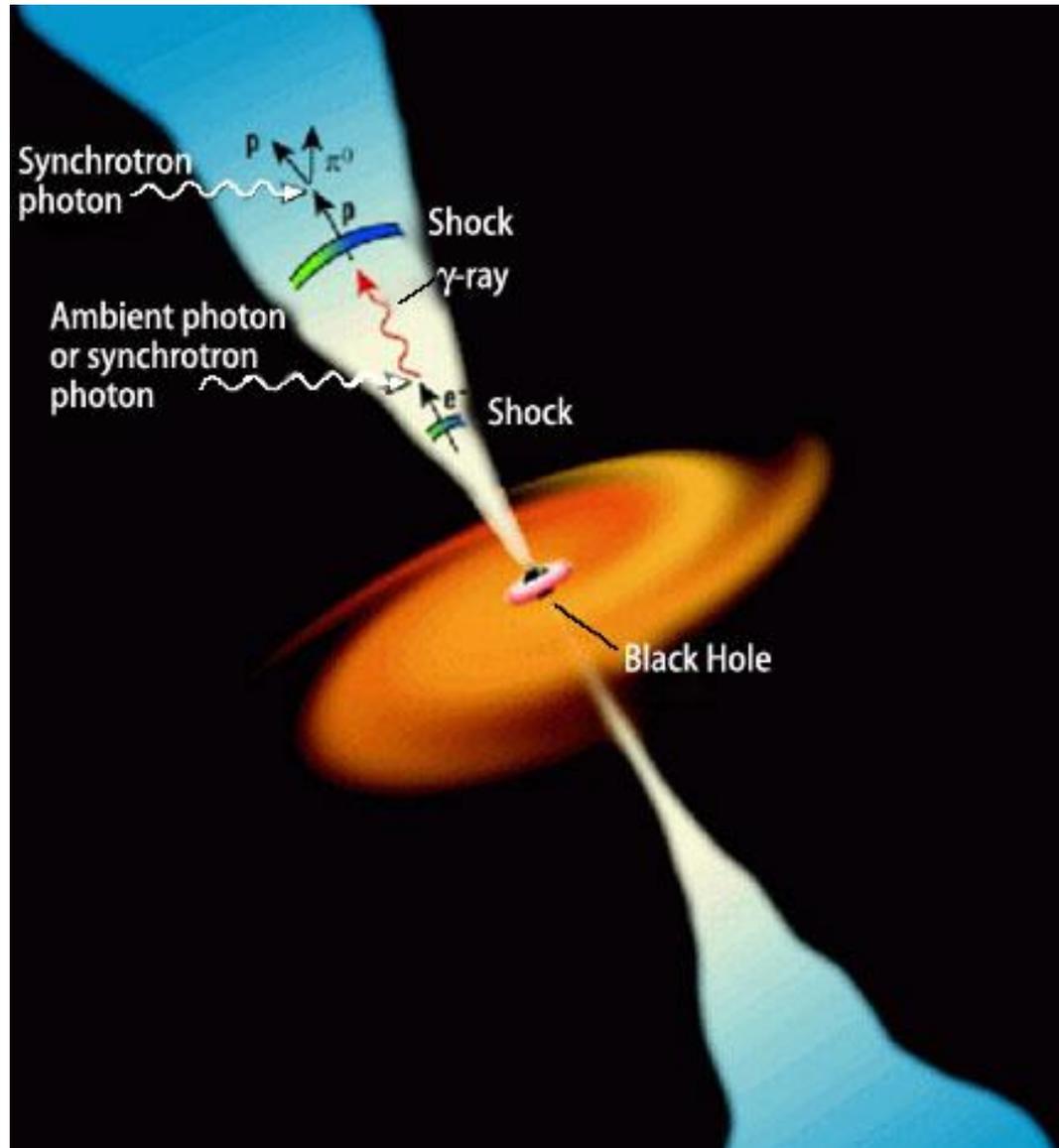
Le spectre des rayons cosmiques



Les accélérateurs cosmiques



Les accélérateurs cosmiques



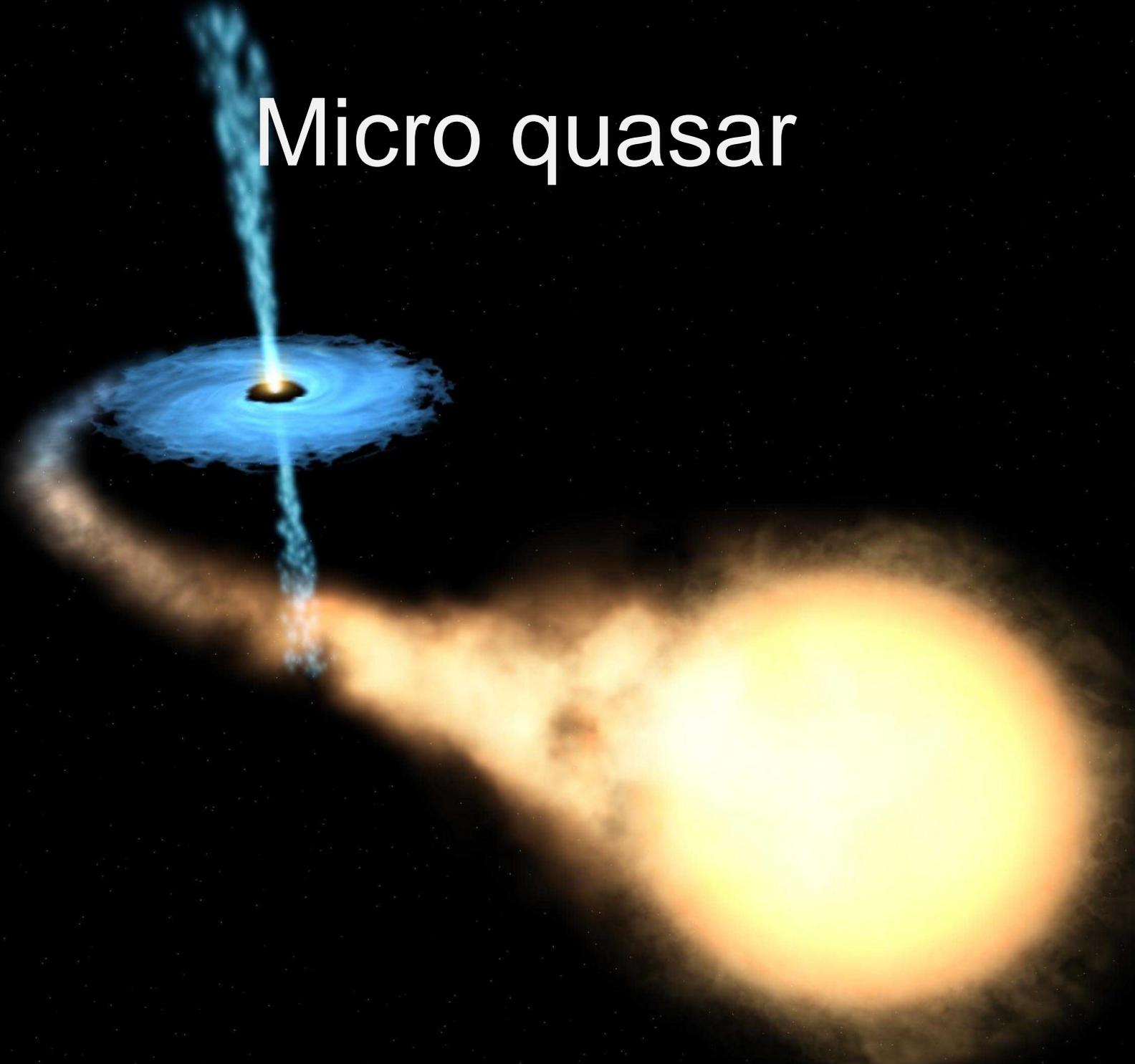
Les accélérateurs cosmiques



Restes de supernova



Micro quasar

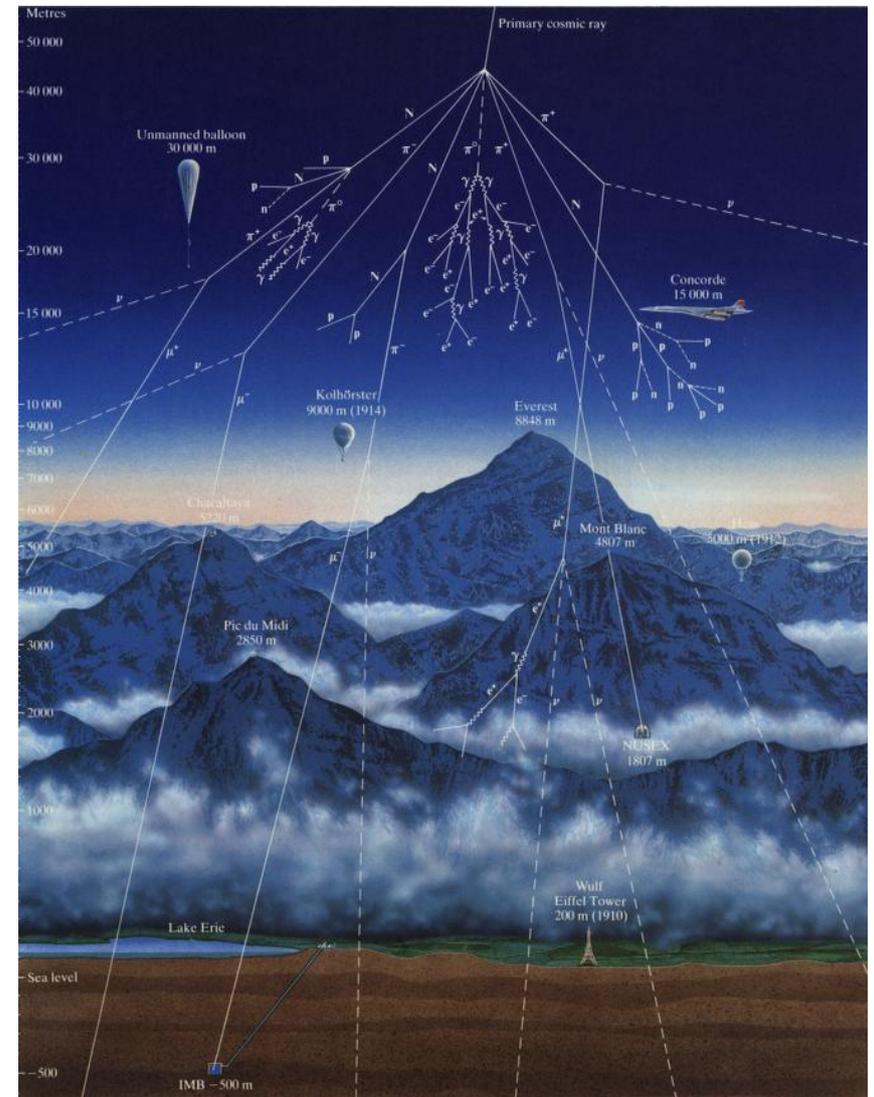


Les accélérateurs naturels

Les années 30 :

Les triomphes de l'astroparticule

de nouveaux faisceaux de particules.

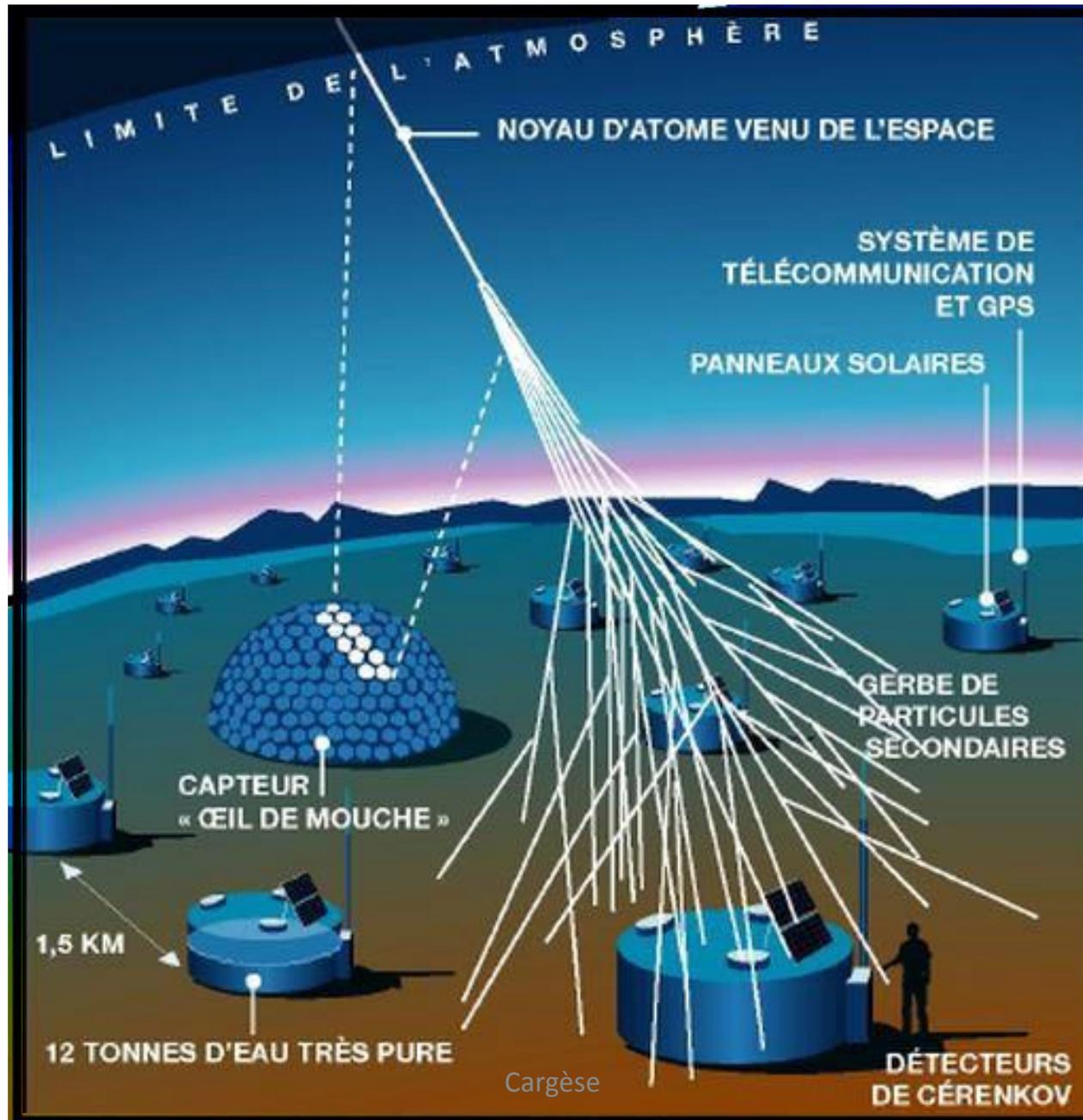


Palmarès



- 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 : des protons

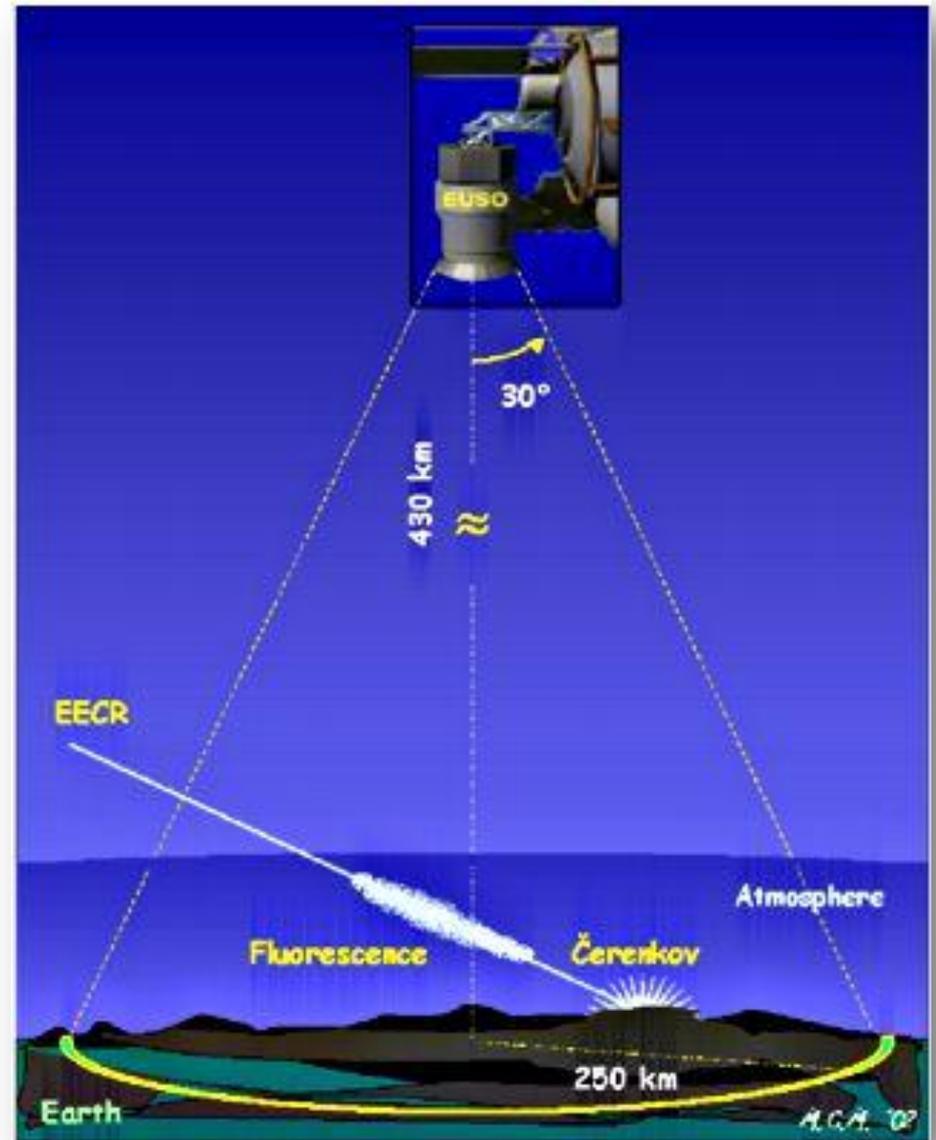


HESS : des photons

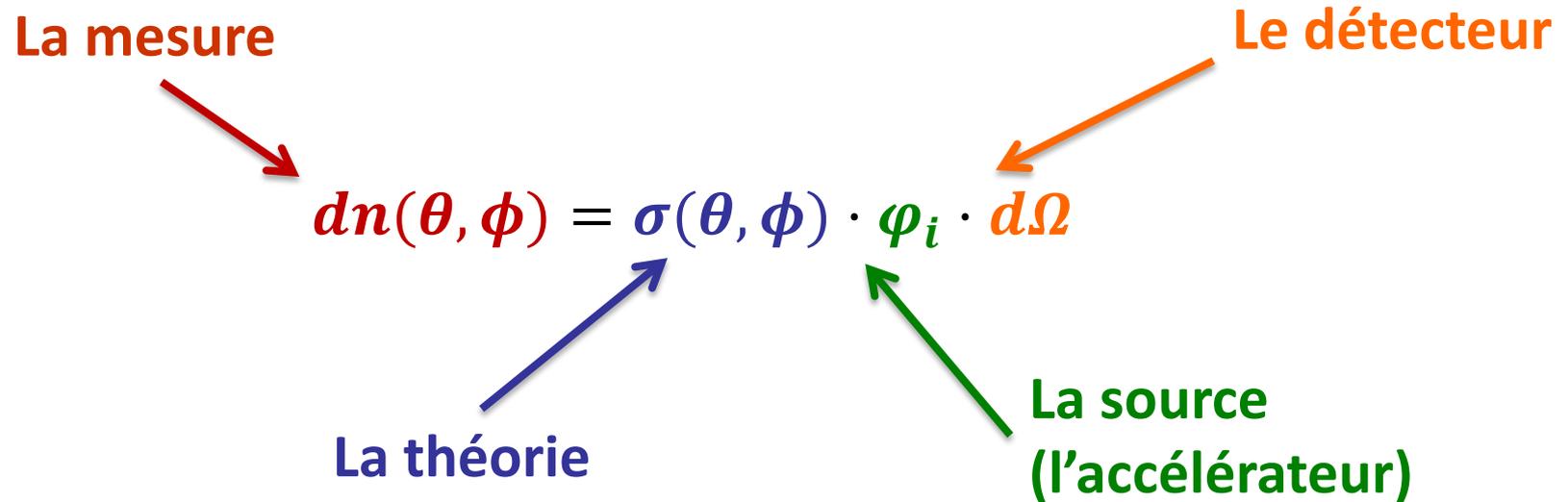


EUSO

(Extreme Universe Space Observatory)



Rappel



$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$

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							
L_e	+1	+1											
L_μ			+1	+1									
L_τ					+1	+1							
B (baryonique)							+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	
S (étrangeté)									-1				
C (charme)										+1			
B (beauté)											-1		
T (vérité)												+1	
Π (parité)	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
I (isospin)							1/2	1/2					
I_3							-1/2	1/2					
Y (hypercharge)							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 invalidées pour reconstituer le puzzle :

Les lois de conservation :

❖ Energie/impulsion ou 4-moment :

on connaît : $\Sigma \mathbf{E}_i = \Sigma \mathbf{E}_f$ en relativité :

$$\Sigma \vec{\mathbf{P}}_i = \Sigma \vec{\mathbf{P}}_f \quad \vec{\mathbf{P}} \cdot \vec{\mathbf{P}} - E^2 = \textit{invariant}$$

❖ Nombres quantiques :

Charge,

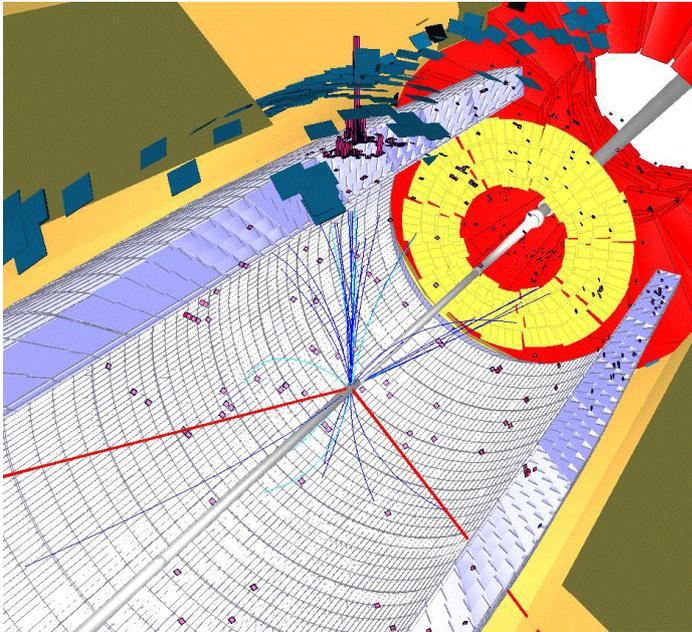
Nombres leptoniques, baryoniques ...

La parité, le spin ...

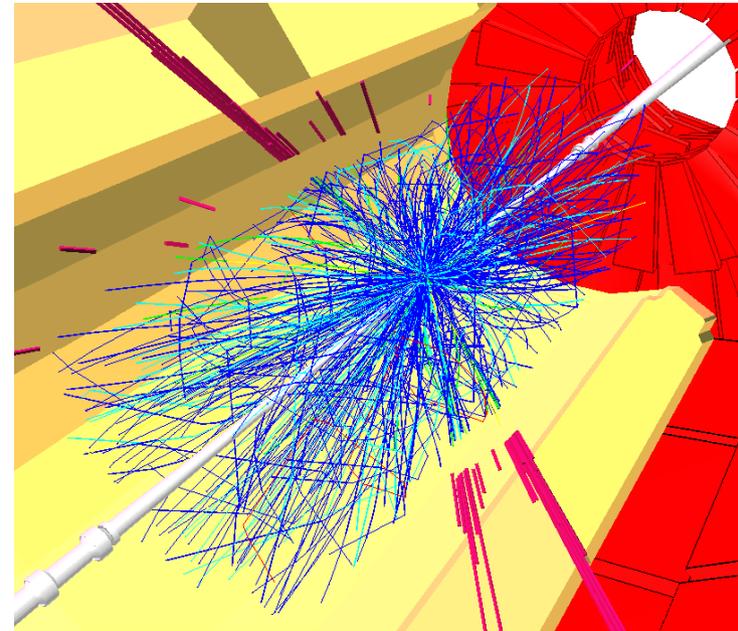
Remarque : si l'une des lois n'est pas conservée c'est soit que l'un des états finaux n'était pas détectable, soit un indice pour une nouvelle physique.

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

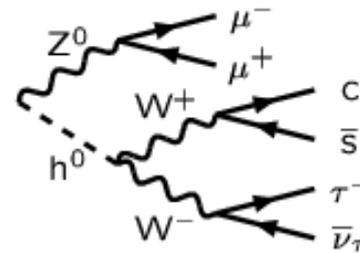
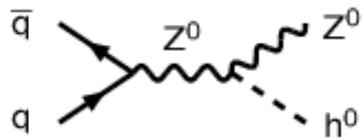
TOUT CELA EST BIEN COMPLEXE ...

Simulation ... générateurs

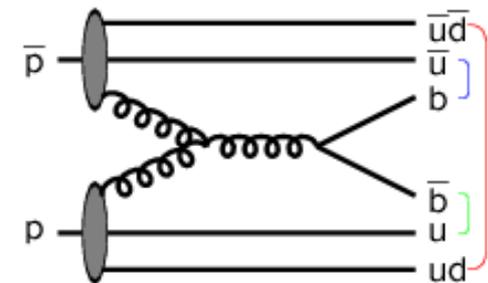
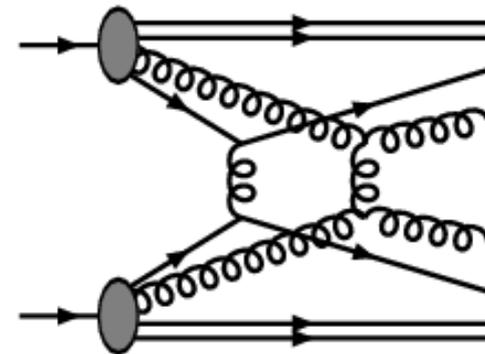
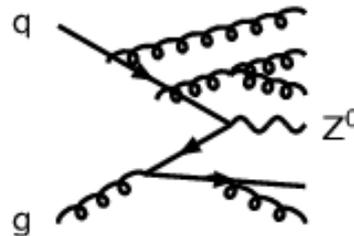
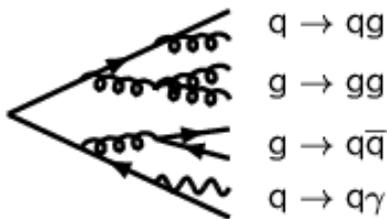
Les **générateurs** permettent d'effectuer des études théoriques et expérimentales de physique des particules complexes.

Générateurs ... processus de base

1. Processus de base

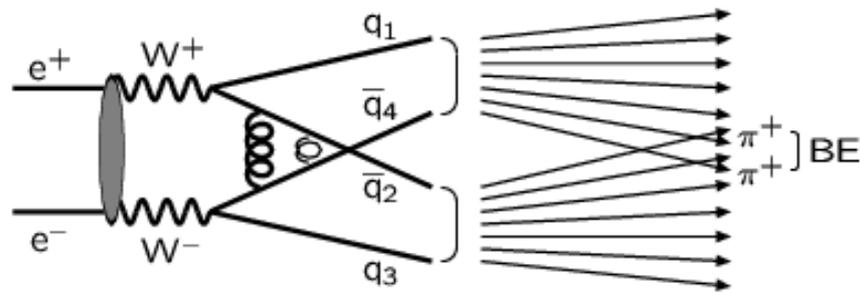


2. Fragmentation

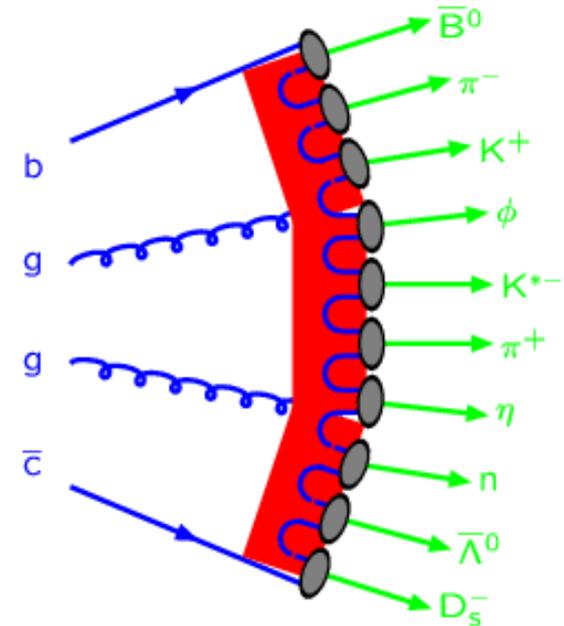
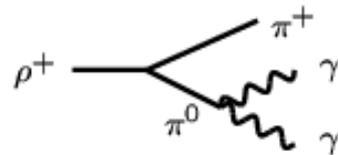


Générateurs ... processus de base

3. Hadronisation



4. Désintégrations



Simulation ... générateurs

Les **générateurs** permettent d'effectuer des études théoriques et expérimentales de physique multi particule complexes.

Ils véhiculent 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

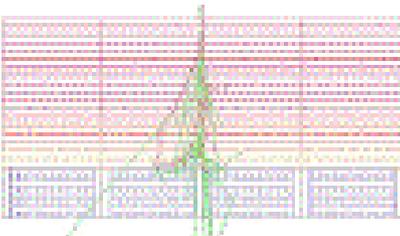
Simulation ... détecteurs ... un exemple

- ❖ **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*

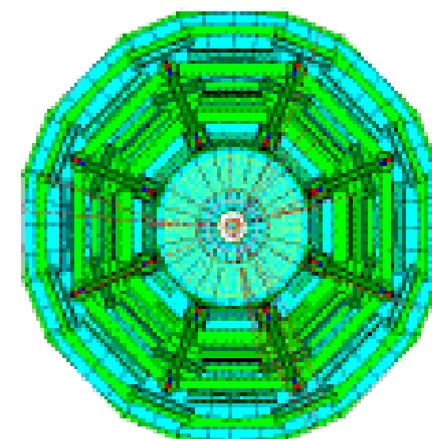


<http://cern.ch/geant4>

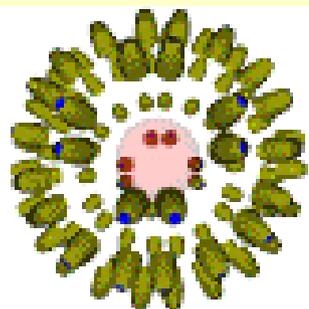
Geant 4

Geant 4 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.



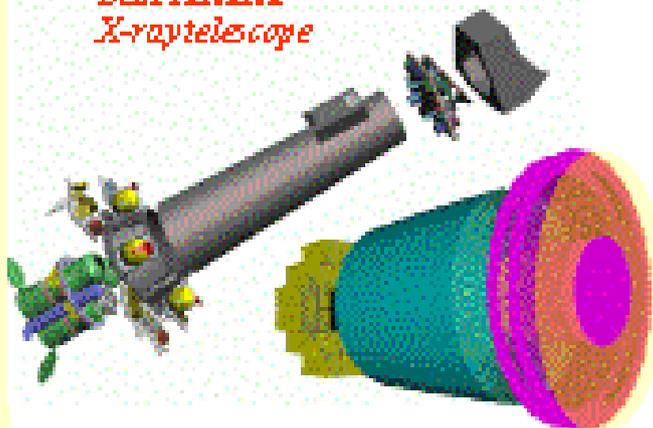
ATLAS at LHC CERN



Borexino
*at Gran Sasso
Laboratory*

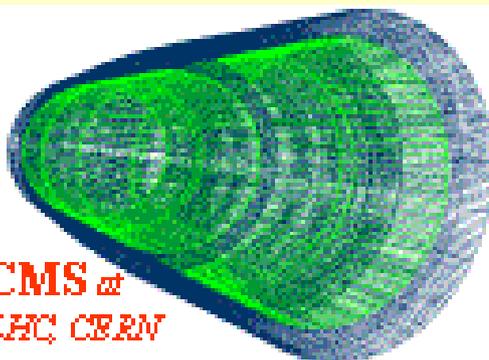
Its application areas include high energy physics, astrophysics and nuclear physics experiments, medical, accelerator and space science studies.

ESA XMM
X-ray telescope

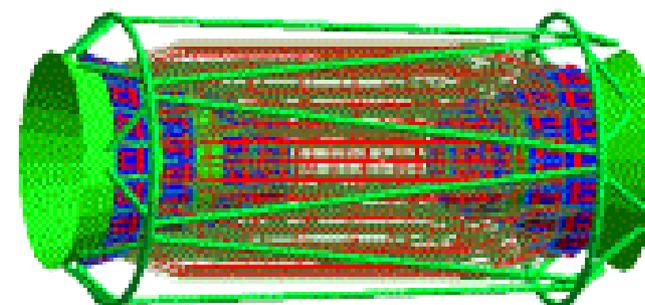


Cargèse

**CMS at
LHC CERN**

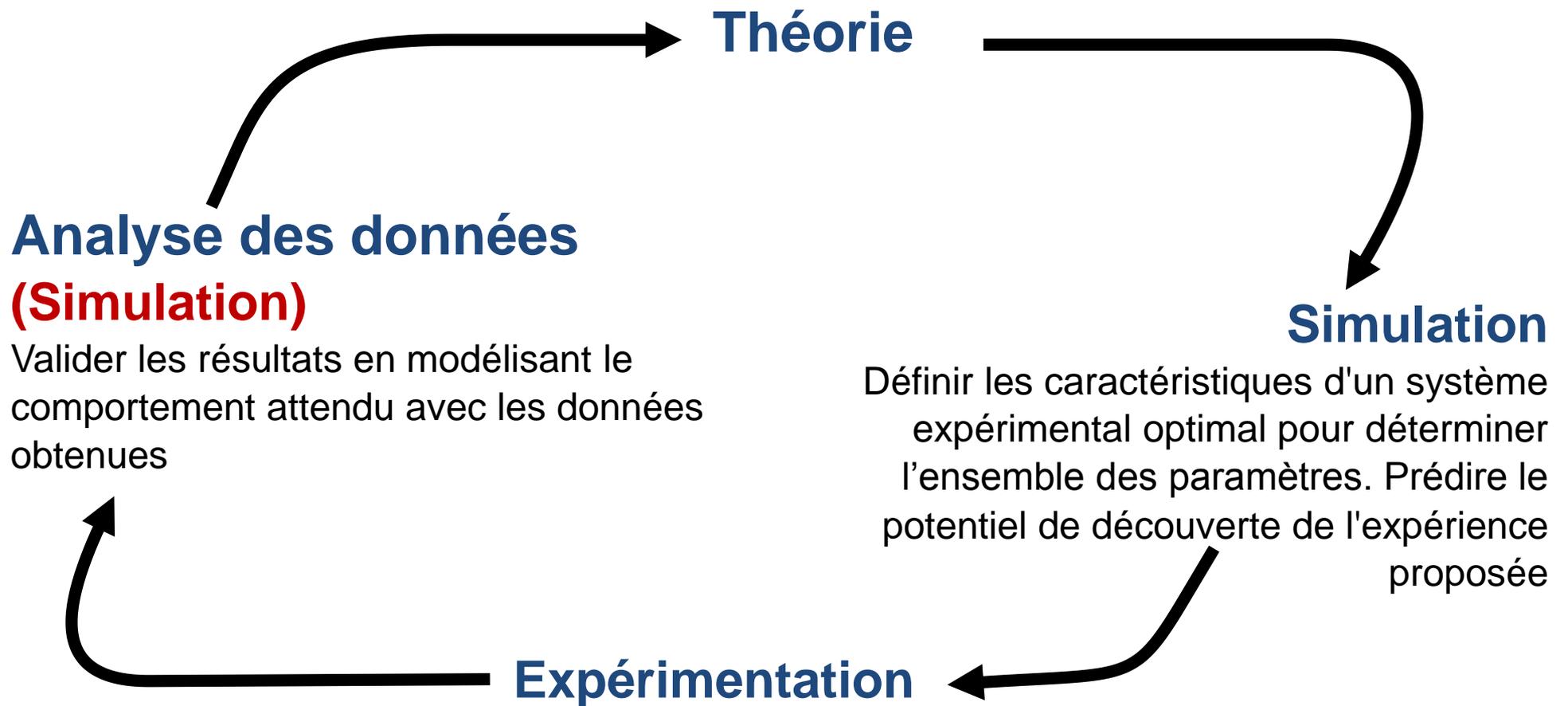


Pascal Vincent

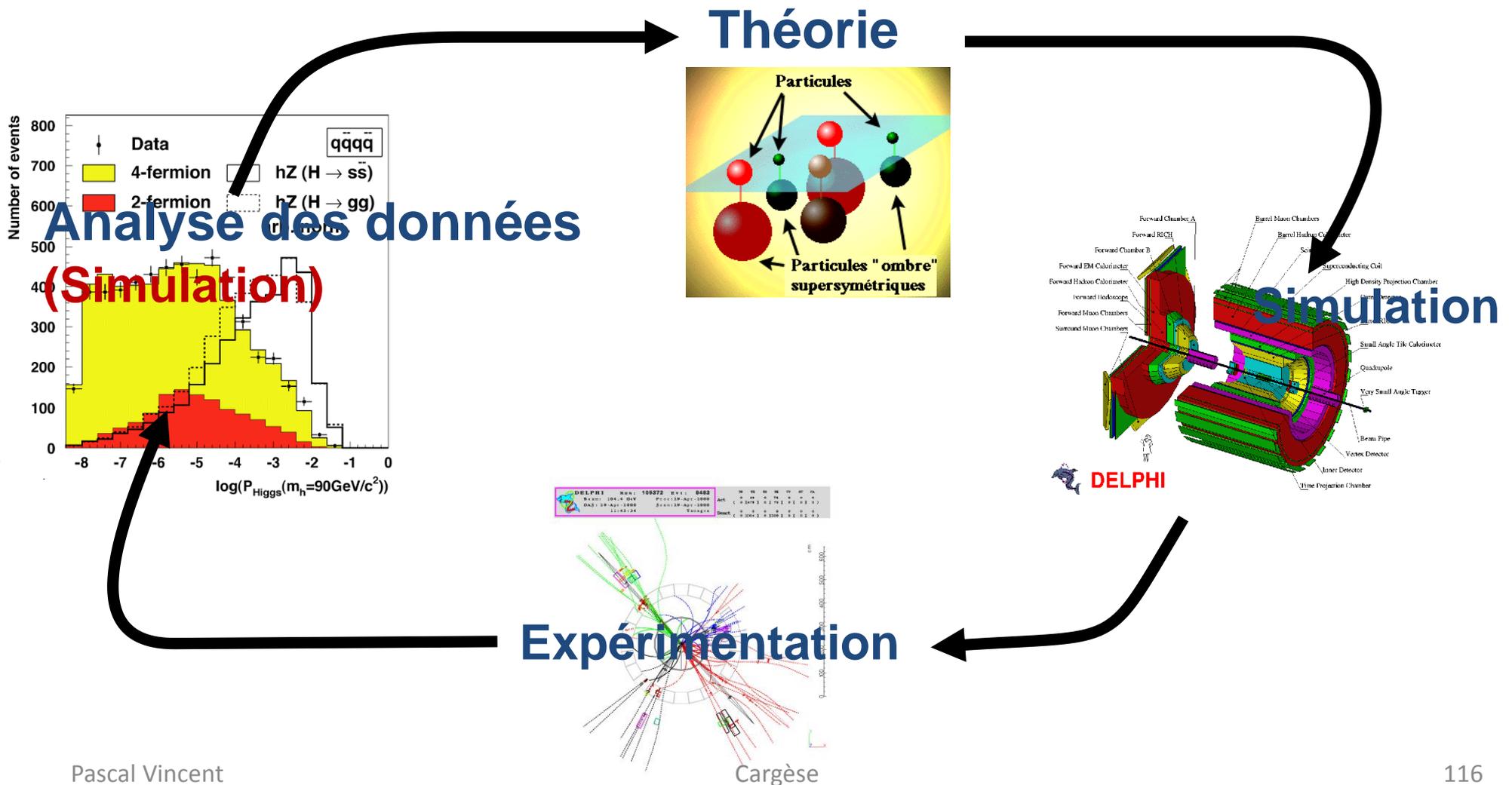


BaBar at SLAC

Méthode expérimentale

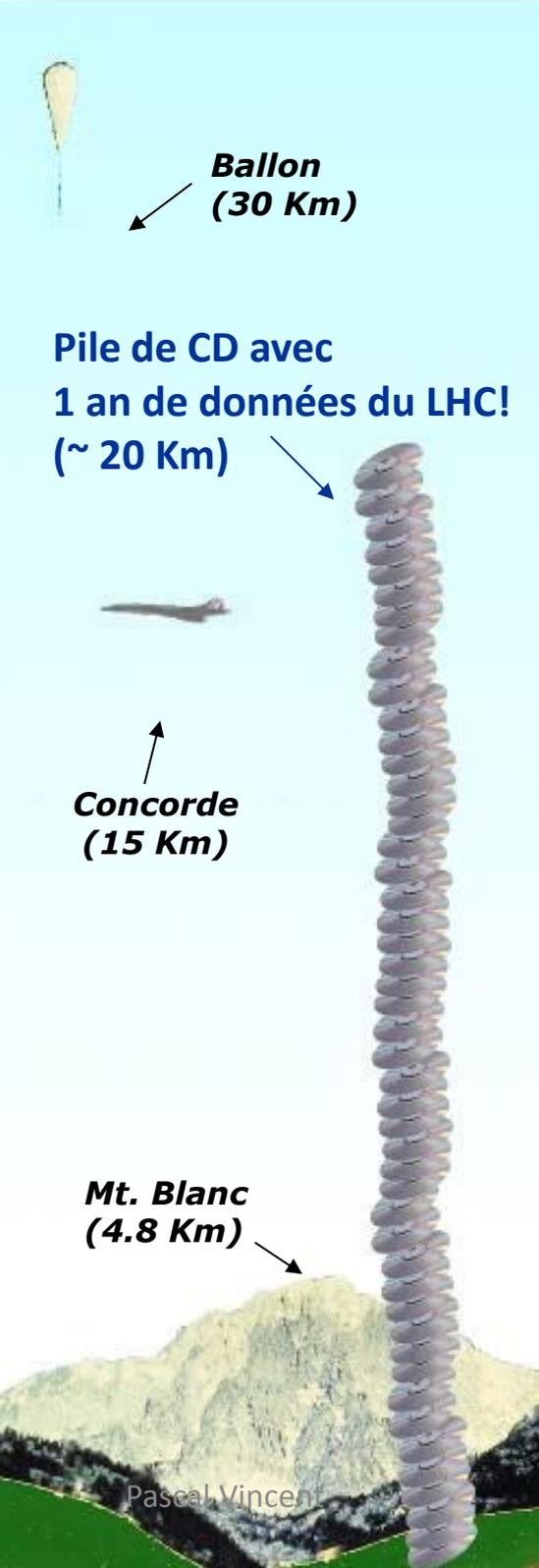


Exemple



=> 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



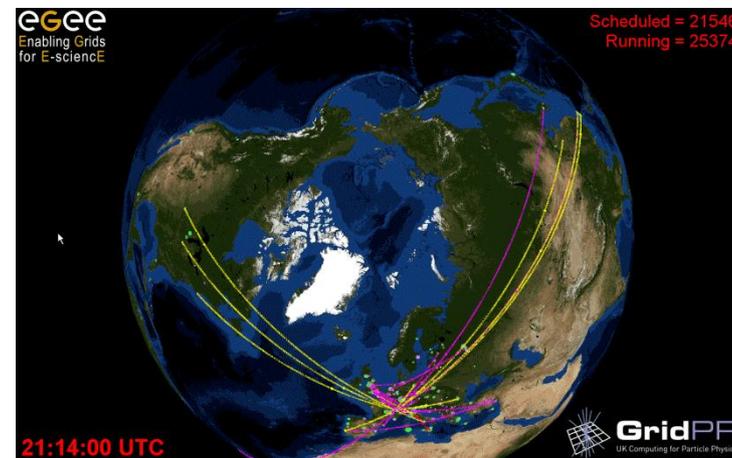
Enabling Grids for
E-science in Europe

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

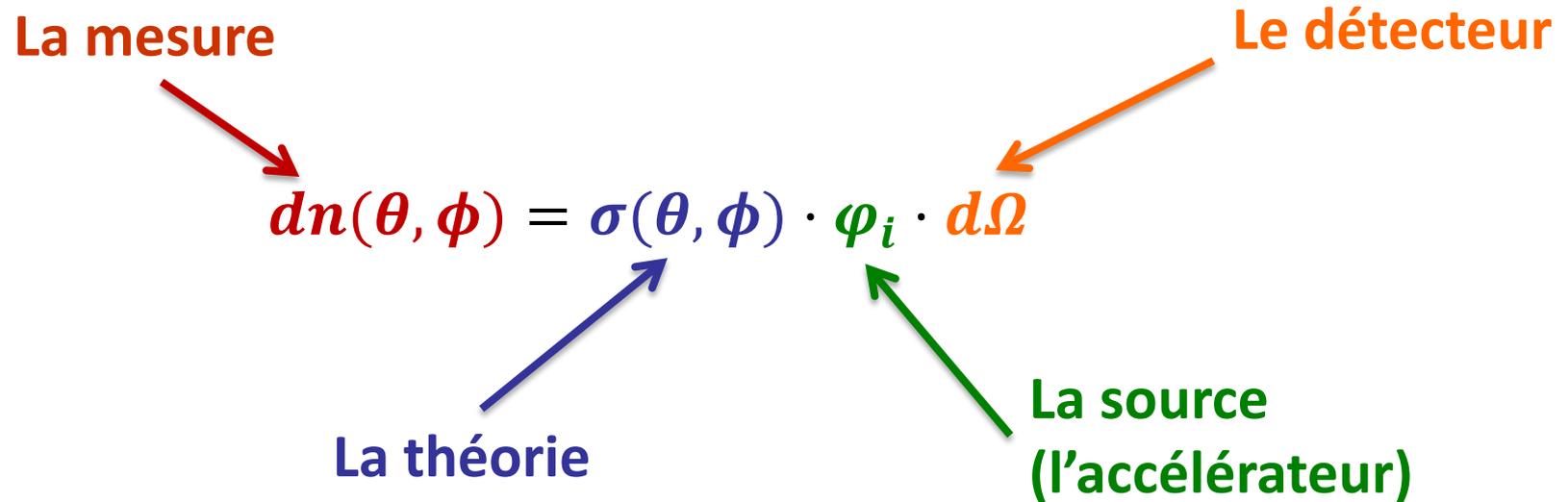
Résumé

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.

Il nous manque le détecteur

Rappel



$$dn(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \cdot \varphi_i \cdot d\Omega$$

LA DETECTION

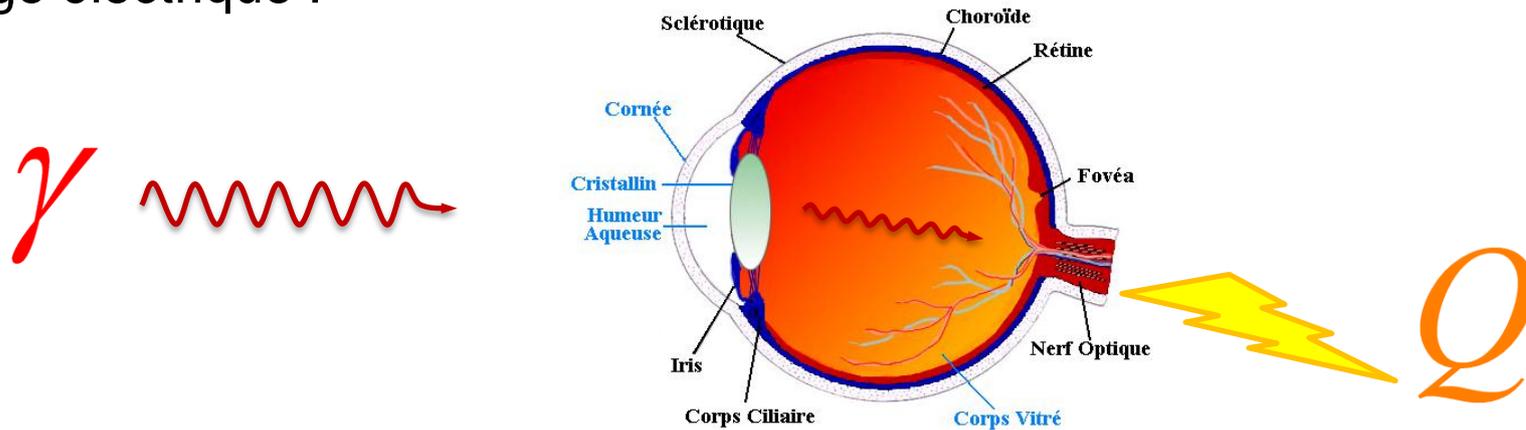
La méthode

Elle nécessite **capteur**; (qui convertit les caractéristiques de la particule en charge électrique); on l'instrumente avec une **électronique** rapide de mise en forme des signaux et **de déclenchement** qui véhicule l'information vers un **système d'acquisition** performant; le tout maintenu dans une **structure mécanique** pour créer :

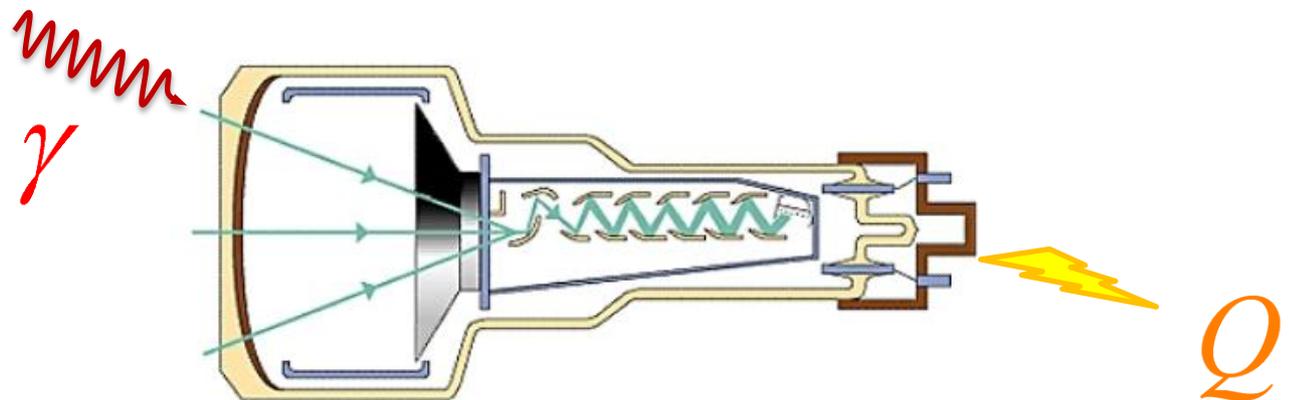
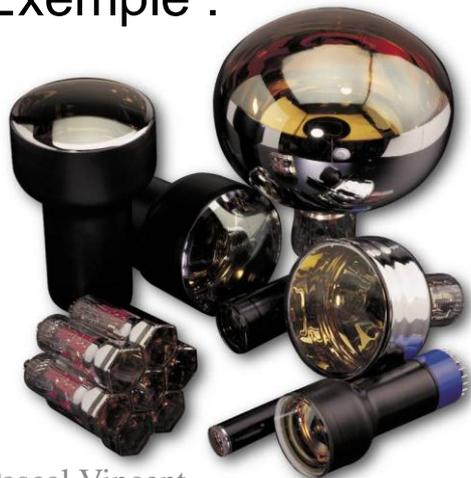
Un détecteur « opérationnel »

La méthode

On saisi les constituants à l'aide du **capteur** qui convertit l'information en charge électrique :



Exemple :



A suivre ...