

Introduction à la détection des particules

ULB ~ 14 janvier 2006 ~ Xavier Rouby

Contenu

- Les particules à détecter
- Accélérateurs de particules
- Techniques de détection
 - Trajectographie
 - Calorimétrie
 - Chambres à muons
 - Détection des neutrinos

Exemples : CMS, ATLAS, ZEUS, ALEPH

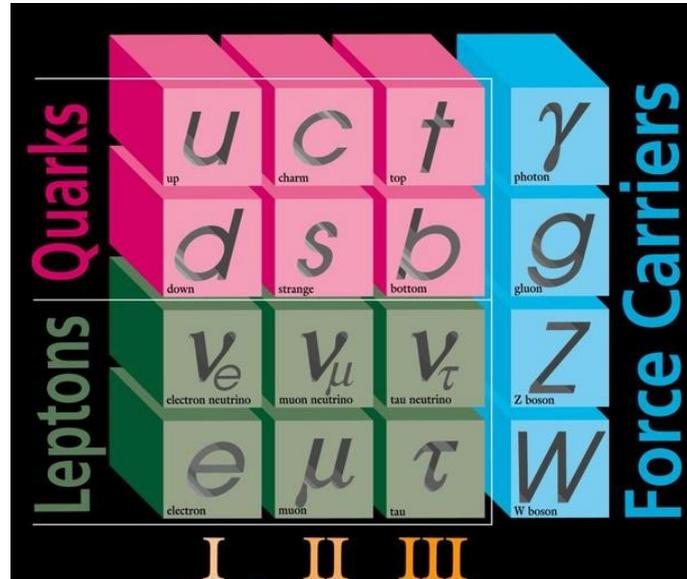
Identification des particules

Déclenchement en ligne

Boson de Brout-Englert-Higgs

Les particules à détecter

Modèle Standard :



... et leurs antiparticules !

- e^- et e^+ : légers, chargés, stables
- μ^- et μ^+ : plus lourds et chargés, relativement stables
- τ^- et τ^+ : chargés mais surtout instables
- quarks : chargés mais hadronisent !
- neutrinos : pas chargés, interagissent très très peu
- W^- , W^+ et Z^0 : instables
- gluons : vont produire un jet
- photons : pas chargés mais interagissent facilement

Accélérateurs de particules

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

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

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

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

Exemple : pour le LHC :

Source -> LINAC -> PSB -> PS -> SPS -> LHC (Animation 1)

linéaire

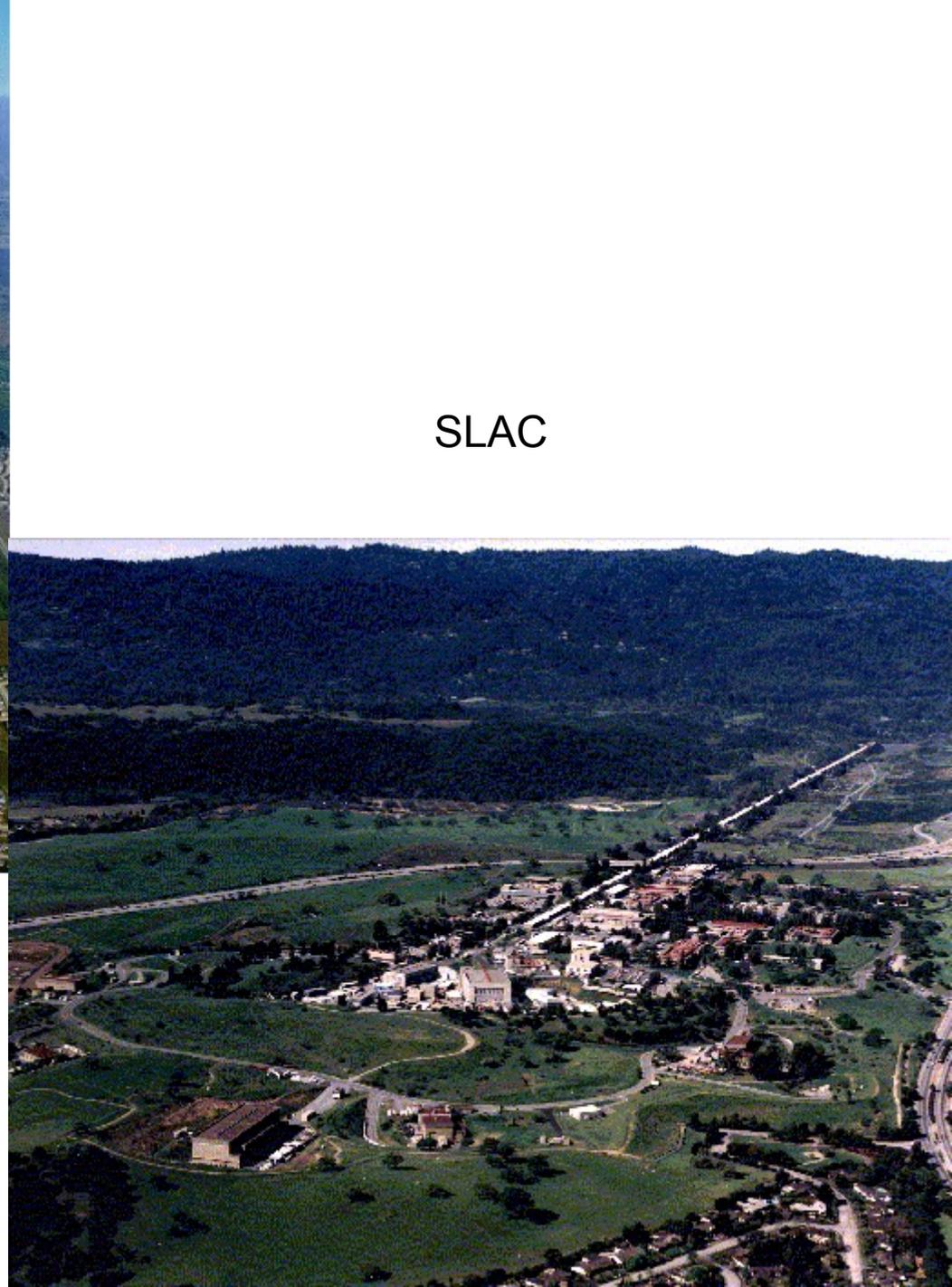
circulaires



LHC



Tevatron



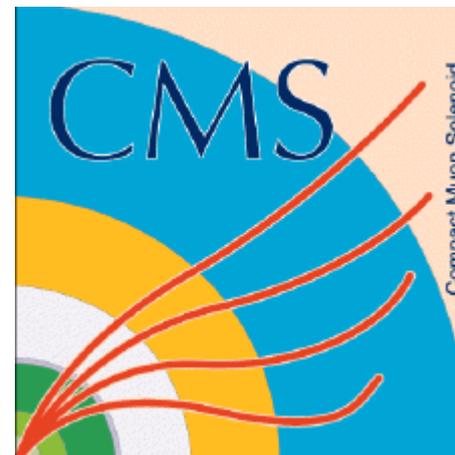
Techniques de détection

Détecteurs actuels : complémentarité entre deux types de techniques :
la **trajectographie** et la **calorimétrie**.

En pratique, on a 3 couches de détecteurs distincts :

- le trajectographe
- le(s) calorimètre(s)
- les chambres à muons

-> *Structure en oignon*



Trajectographie

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

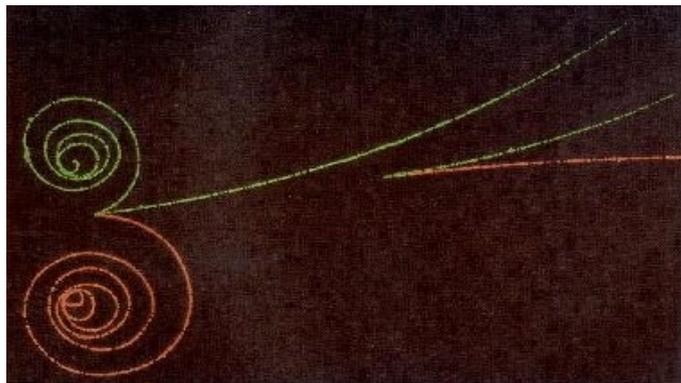
La force de Lorentz : $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Champ magnétique externe appliqué

Accélération

Incurvation de la trajectoire

Ainsi, observer la trajectoire —► charge, masse (impulsion).
—► différents vertex.



Traces laissées dans une chambre à bulle

Pour laisser une trace, la particule doit interagir avec le milieu, mais pas de trop...

-> 4 interactions fondamentales mais on ne peut utiliser que l'électromagnétisme
-> les particules électriquement neutres ne laissent pas de trace !

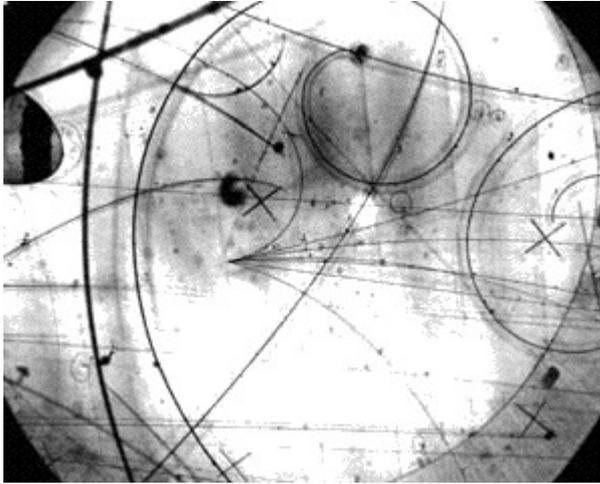
Trajectographie

Différentes techniques / différents milieux actifs :
-> *solide, liquide, gazeux*

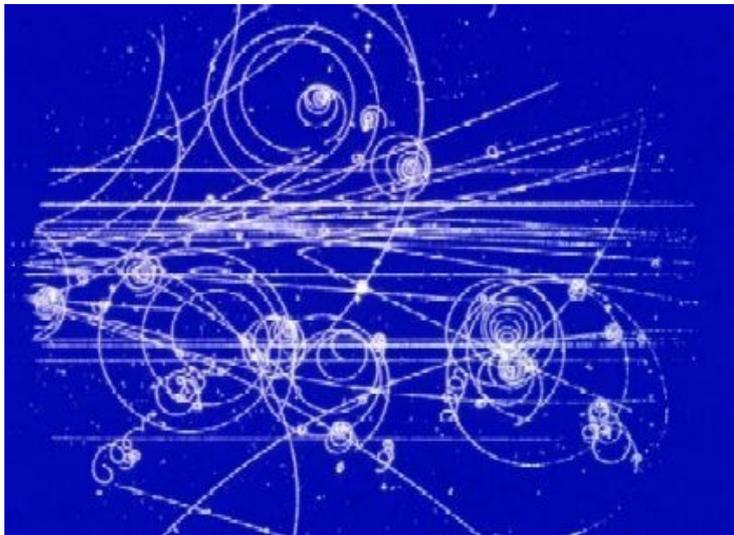
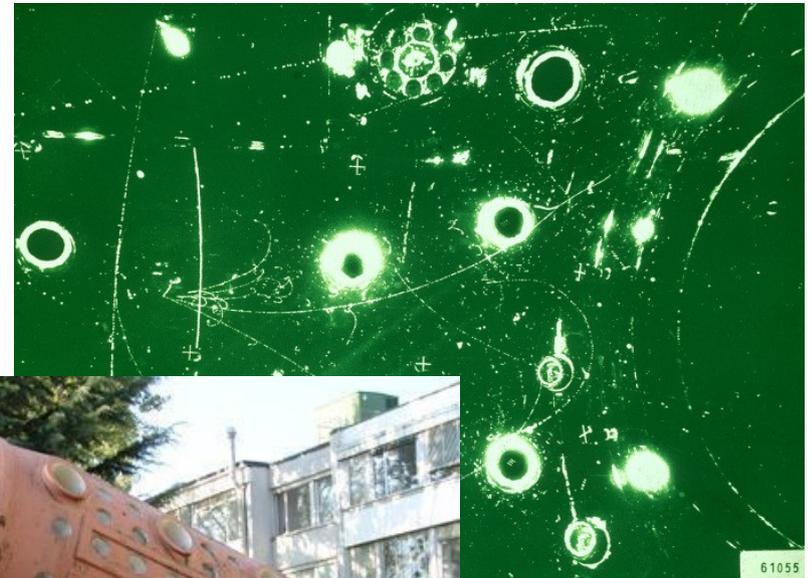
Par exemple :

- **Chambres à bulles**
- Chambres à étincelles
- **Chambres à fils**
- **Semiconducteurs à micropistes** (Si, Ge)
- Pixels
- Emulsions

Chambres à bulles

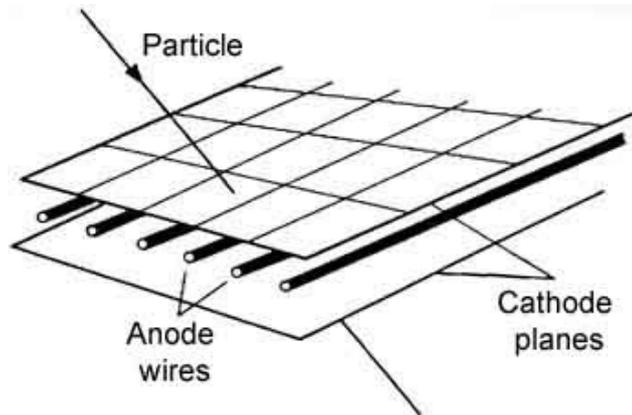


En perdant de l'énergie dans le liquide que contient la chambre, les particules chargées laissent une traînée de bulles, photographiée simultanément.



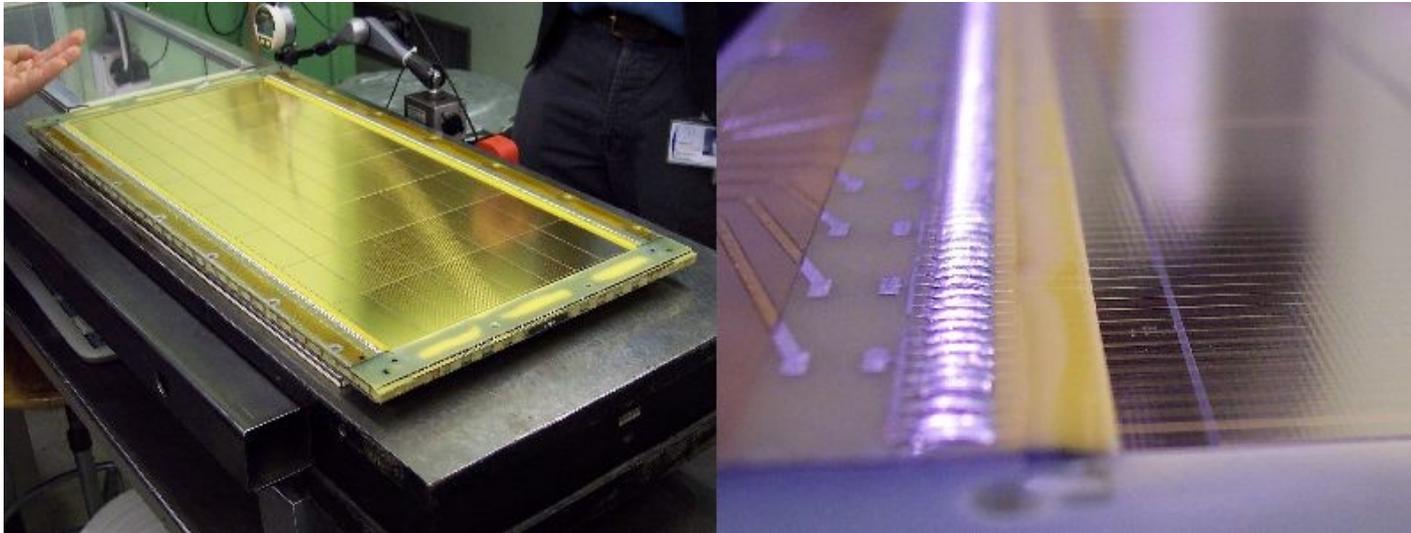
Source : CERN

Chambres à fils

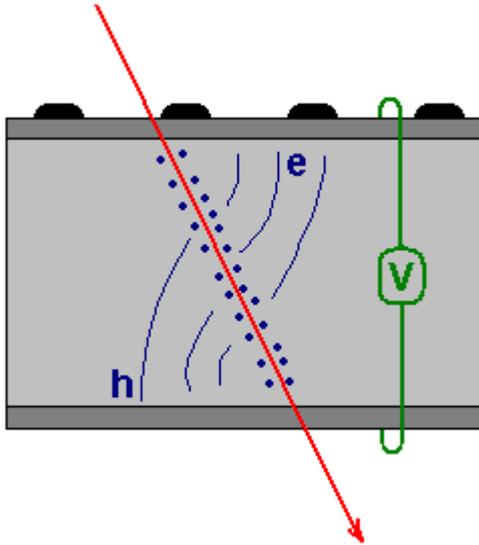


Dans une chambre à fils, les particules ionisent le gaz. Ces ions dérivent dans le champ électrique appliqué et la position *lue* correspond à celle des fils.

Chambres à fils de l'expérience LHCb



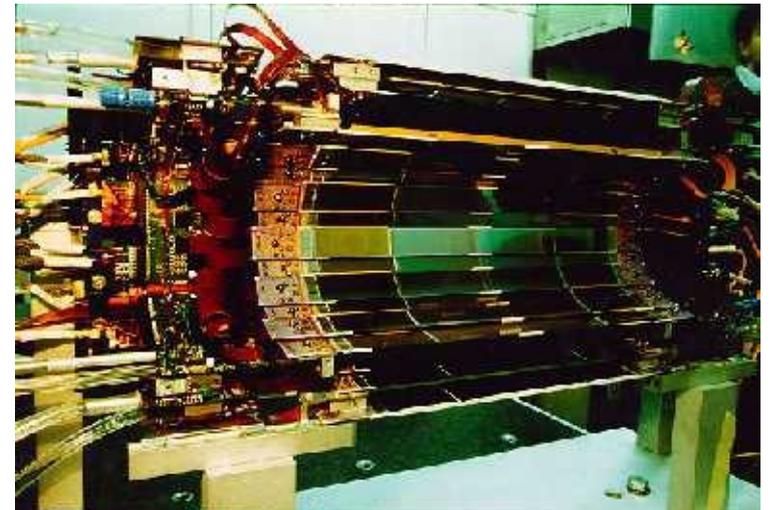
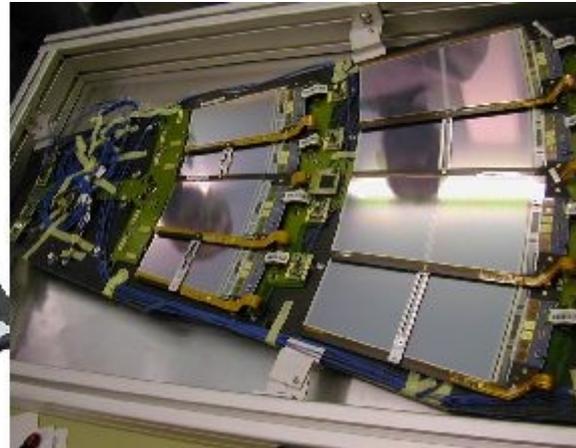
Détecteurs Si



Dans un semiconducteur, le passage d'une particule chargée dans le substrat solide peut libérer un **électron**, et créer en contre-partie un manque local d'électron, appelé **trou**, qui se comporte comme une particule de charge +1. En appliquant un champ électrique pour faire dériver ces particules chargées, on peut collecter le signal sur des micropistes métalliques et l'amener vers l'électronique d'acquisition.



Détecteur Si du trajectographe de CMS



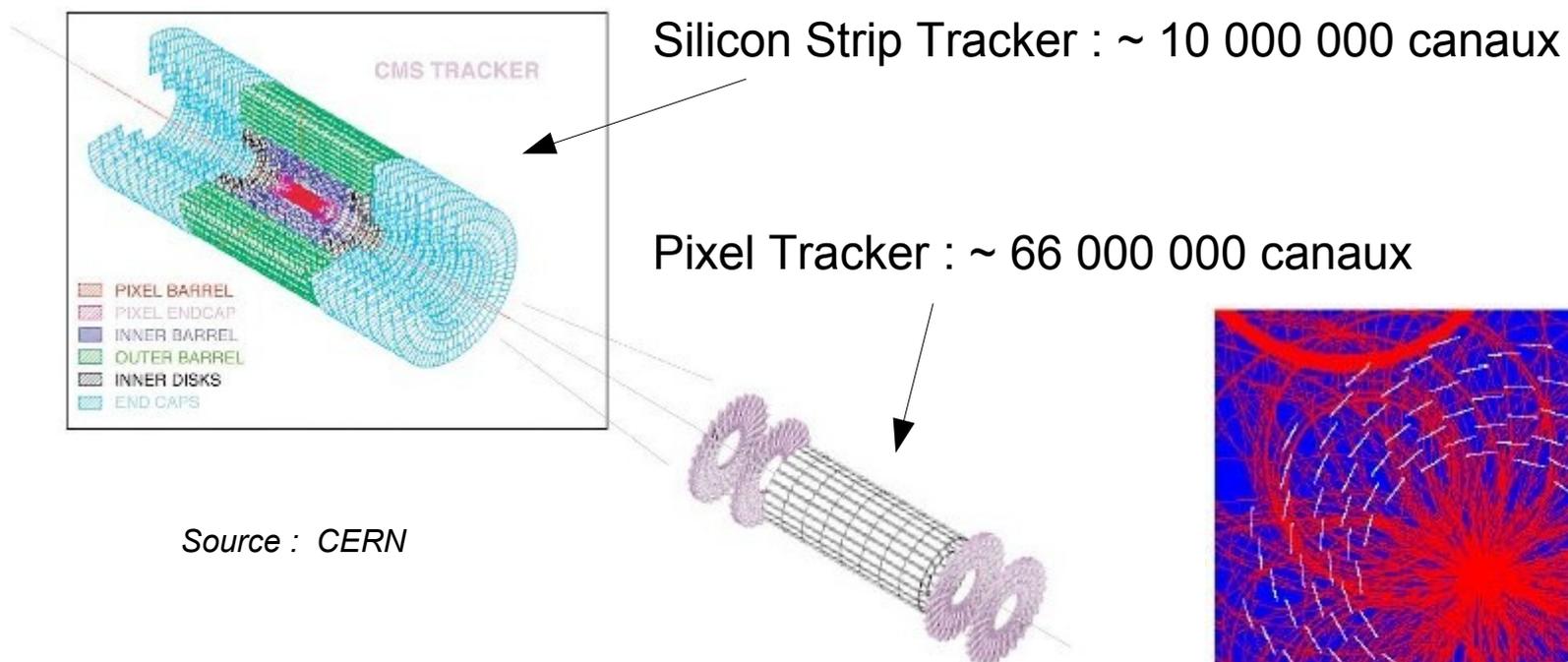
Détecteur de vertex de DELPHI (LEP)

Source : CERN

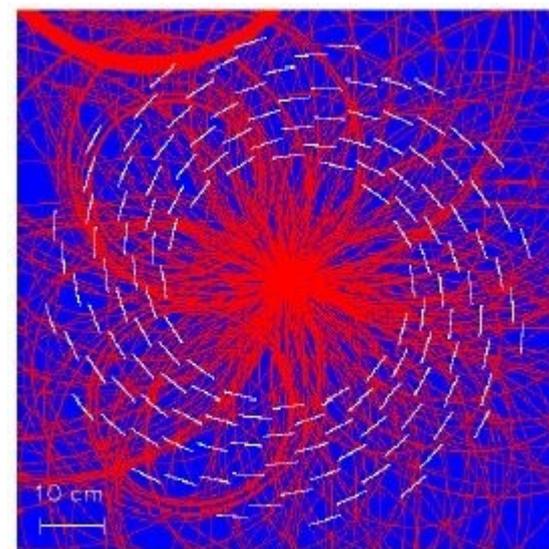
Trajectographie dans CMS

Comme exemple, l'expérience CMS (LHC).

Trajectographe : entièrement basé sur le silicium



Source : CERN



Simulations des traces lors d'un croisement de faisceaux

Calorimétrie

La calorimétrie mesure l'énergie (cinétique) des particules.

(-> particule libre)

Contrairement à un trajectographe, un calorimètre doit donc **interagir un maximum** et arrêter la particule pour recueillir toute son énergie.

Arrêter = mettre suffisamment de matière ! <-> masse de la particule
On n'arrête pas aussi facilement un camion qu'une mouche...

Dans les expériences actuelles on utilise généralement 2 calorimètres :

- un **électromagnétique** : arrête les électrons, les positrons, les photons
- un **hadronique** : arrête tout le reste, sauf les muons et les neutrinos

En plus, les calorimètres sont en général très **rapides**
———▶ déclenchement en ligne...

Calorimètre électromagnétique

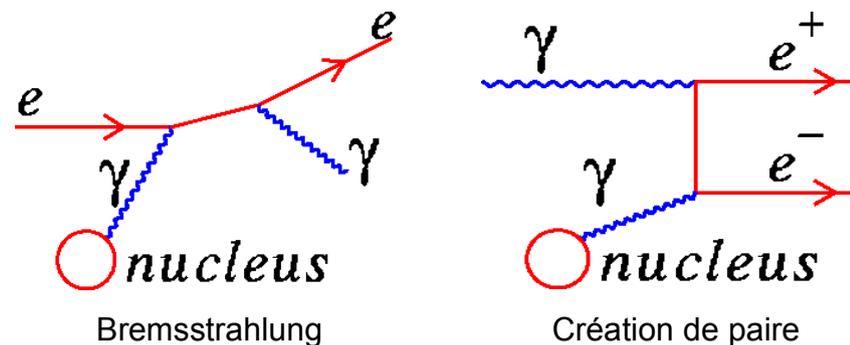
Interaction électromagnétique :

- > arrêter les particules légères : électrons et positrons
- > le photon interagit facilement.

Deux processus vont dominer :

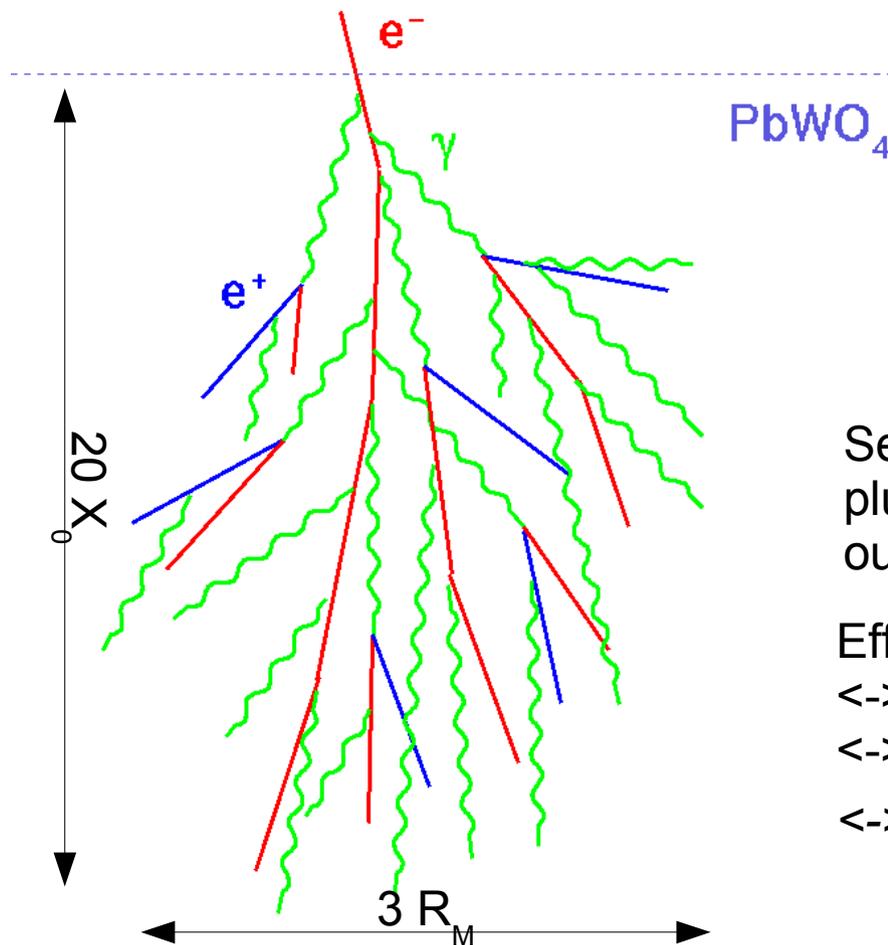
Bremsstrahlung : lorsqu'un électron est ralenti, il émet un rayonnement de freinage sous la forme d'un photon.

Création de paire : lorsqu'un photon de grande énergie traverse un milieu dense, il peut interagir avec les atomes et produire une paire e^+e^- .



Source : www.hep.lu.se

Gerbe électromagnétique



Source : www.hepl.hiroshima-u.ac.jp

Lorsque les deux processus s'enchaînent, cela donne une **gerbe électromagnétique**.

La gerbe s'arrête quand les particules ont trop peu d'énergie.

Selon le milieu traversé, la gerbe ira plus ou moins loin et s'étendra plus ou moins loin.

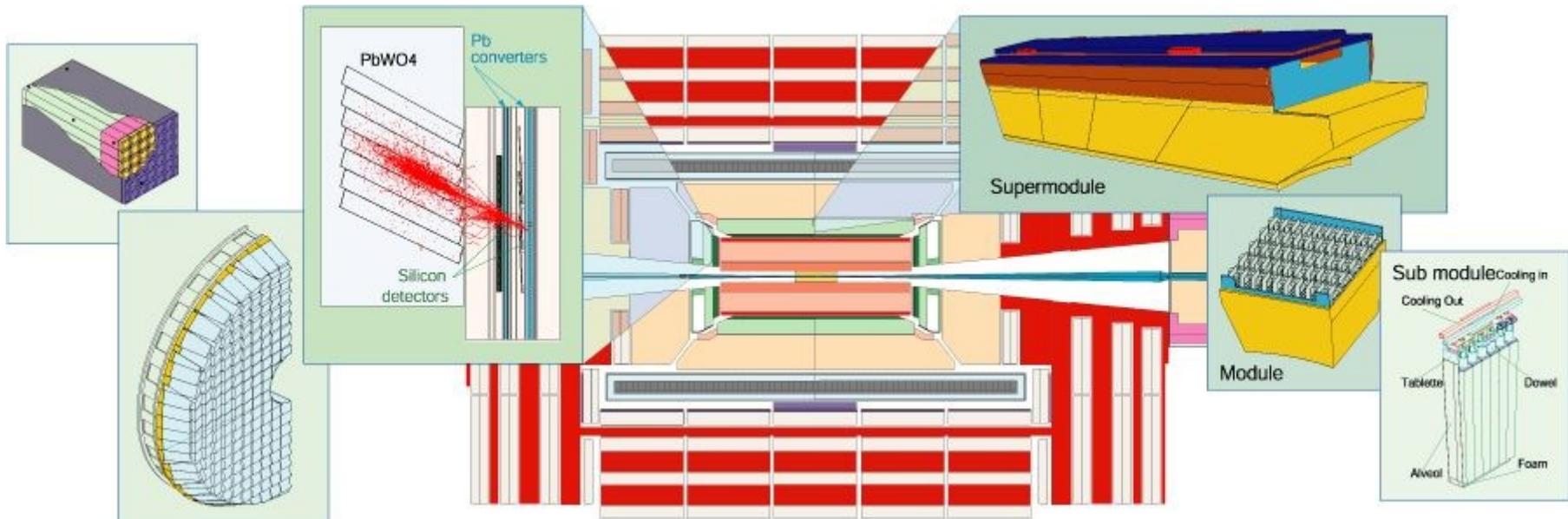
Efficacité du calorimètre

<-> certitude d'arrêter ces particules

<-> Longueur de radiation X_0 (longueur)

<-> Rayon de Molière R_M (largeur)

Calorimètre é.m. de CMS



CMS a choisi un calorimètre électromagnétique composé de 80000 cristaux de verre au plomb (PbWO_4).

Lorsqu'une gerbe est créée dans un cristal, elle y reste, en produisant un rayonnement (scintillation) qui est observé par une électronique dédiée. Par une calibration préalable, on fait le lien entre ce rayonnement et l'énergie déposée.

Source: CERN

14 Janvier 2006

~~ Xavier Rouby ~~

17

Calorimètre hadronique

A part les muons et les neutrinos, toutes les particules qui parviennent à traverser le calorimètre électromagnétique doivent être arrêtées par le calorimètre hadronique.

Les particules à détecter sont des hadrons (p, n et autres), qui proviennent de jets.

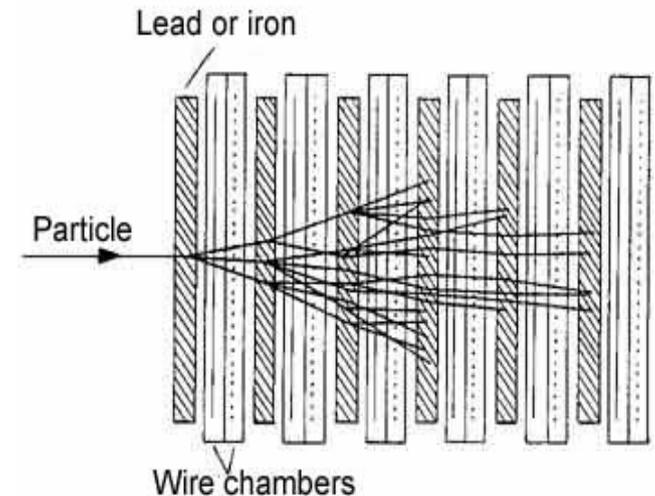
Principe : beaucoup de matière (absorbeur) et des couches de scintillateurs (collecteur)

-> réactions nucléaires

-> longueur d'interaction

Les particules interagissent principalement par l'interaction forte (résiduelle) avec les noyaux de l'absorbeur, ce qui crée des particules secondaires et par la suite une *douche hadronique*.

Probabilité faible -> besoin de beaucoup de matériau !

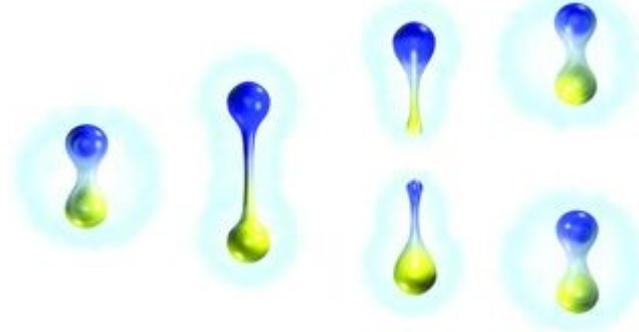


Hadronisation

Observation d'un quark ou d'un gluon solitaires impossible !

Phénomène de *confinement*.

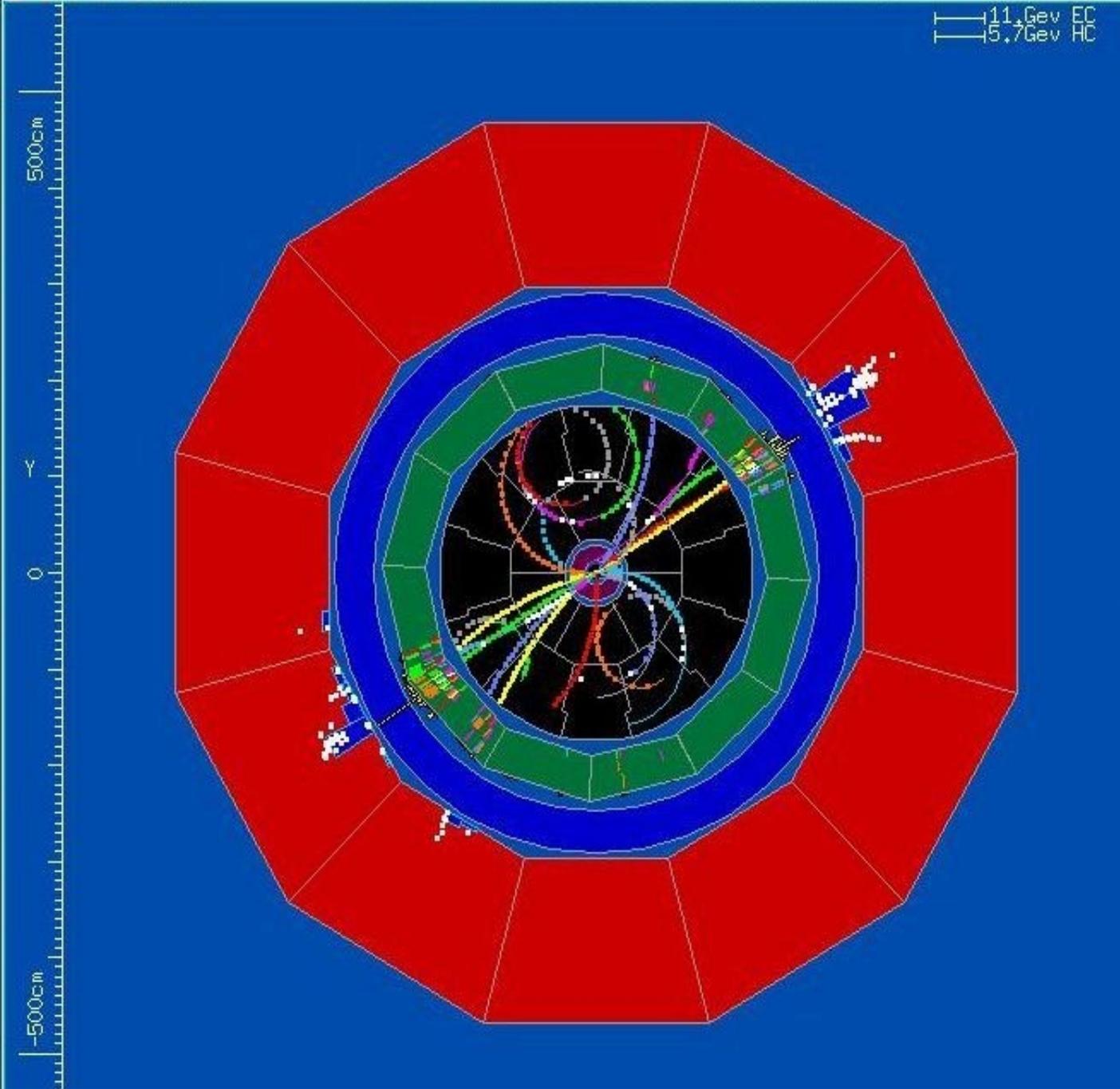
Lorsque deux quarks essaient de se séparer (par exemple après une collision), cela devient de plus en plus difficile pour une interdistance croissante...



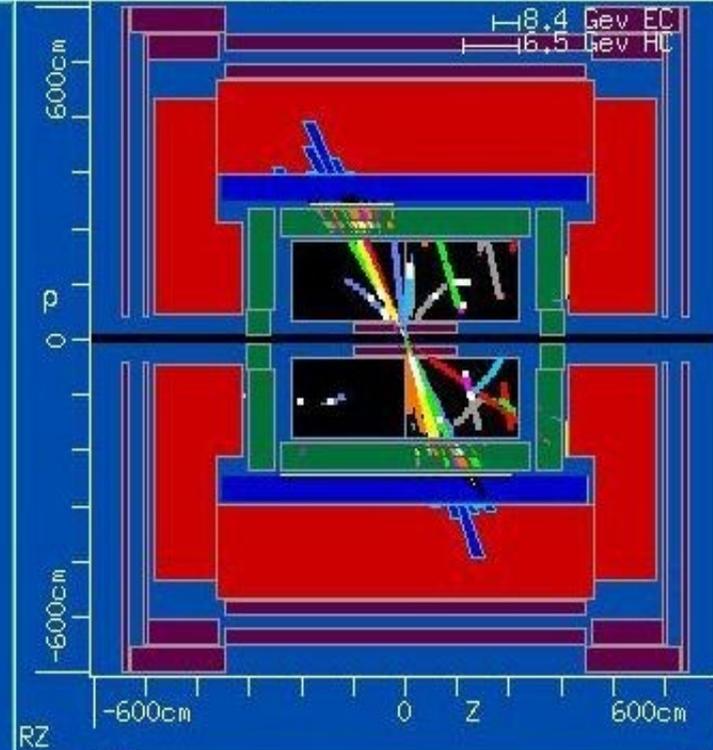
Du point de vue énergétique : créer une nouvelle paire de quarks.
—► nombre croissant de hadrons.

Le processus continue, et crée énormément de telles particules :
hadronisation.

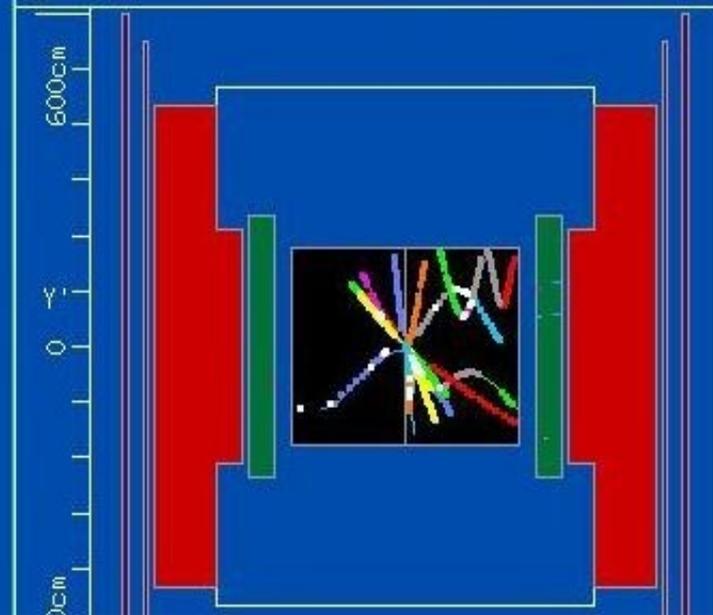
Dans le détecteur, on observera donc un jet de nombreuses particules.



11,4 GeV EC
 5,7 GeV HC

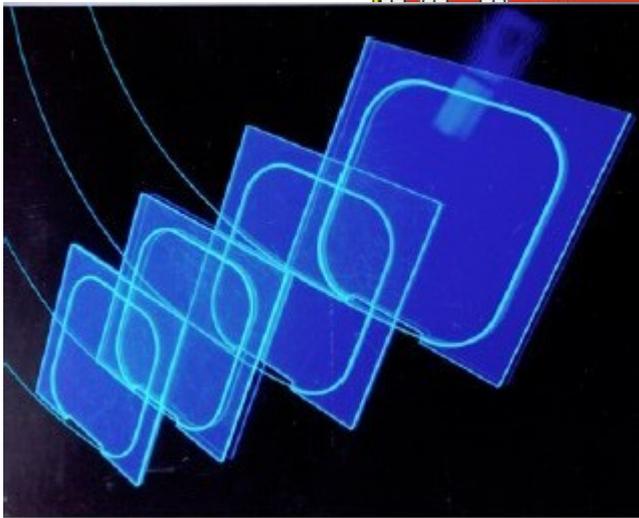
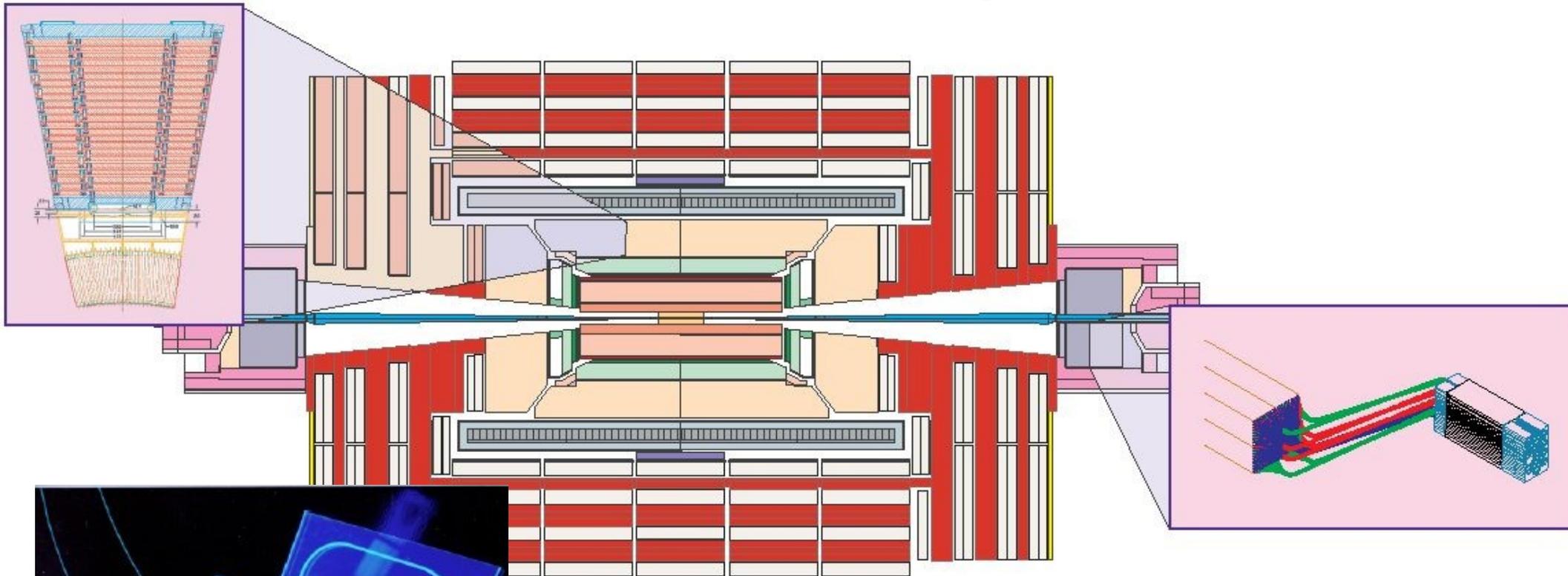


8,4 GeV EC
 6,5 GeV HC



Exemple d'événement $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ dans le détecteur ALEPH (LEP)
 2 jets visibles !

Calorimètre hadronique de CMS



Source: CERN

CMS : successions des plaques de cuivre et de scintillateurs.



14 Janvier 2006

~~ Xavier Rouby ~~

22

Chambres à muons

Interactions faibles et électromagnétiques
Masses $m_\mu = 105.7 \text{ MeV}$ vs $m_e = 0.5 \text{ MeV}$.

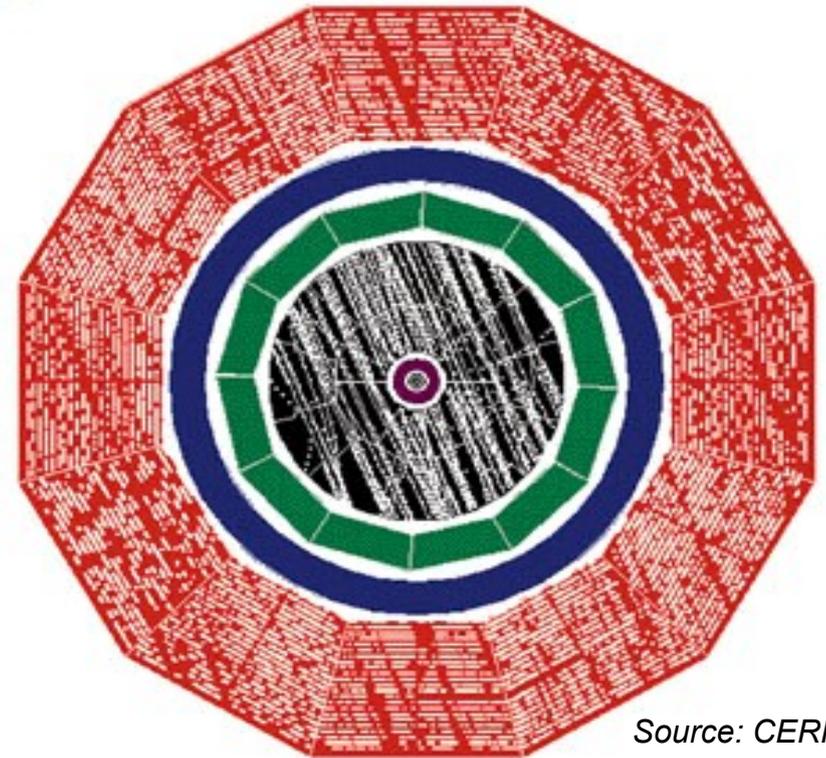
Un muon n'est pas facilement arrêté !

Ex: muons cosmiques observés dans ALEPH

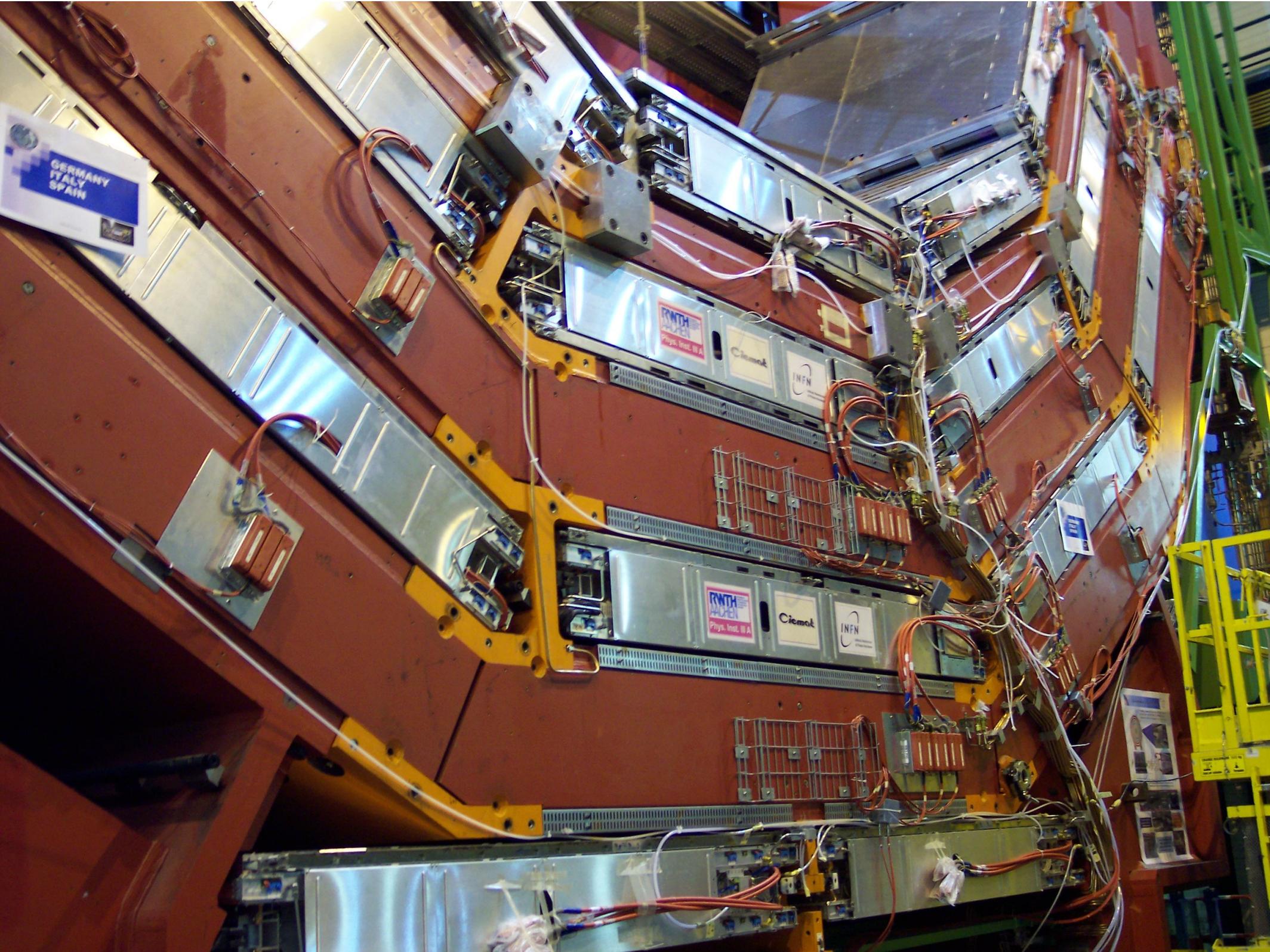
Malgré tout :

- > mesure de l'impulsion
- > déclenchement en ligne

Détecteurs : Ex: CMS (gaz)
Cathode strip chambers
Drift Tubes
Resistive Plate Chambers



Source: CERN



GERMANY
ITALY
SPAIN

RWTH AACHEN
Phys. Inst. III A

Ciemat

INFN

RWTH AACHEN
Phys. Inst. III A

Ciemat

INFN

GERMANY
ITALY
SPAIN

Détection des neutrinos

Les neutrinos : uniquement interaction faible !

Très difficiles à détecter -> invisibles dans les détecteurs autour de collisionneurs !

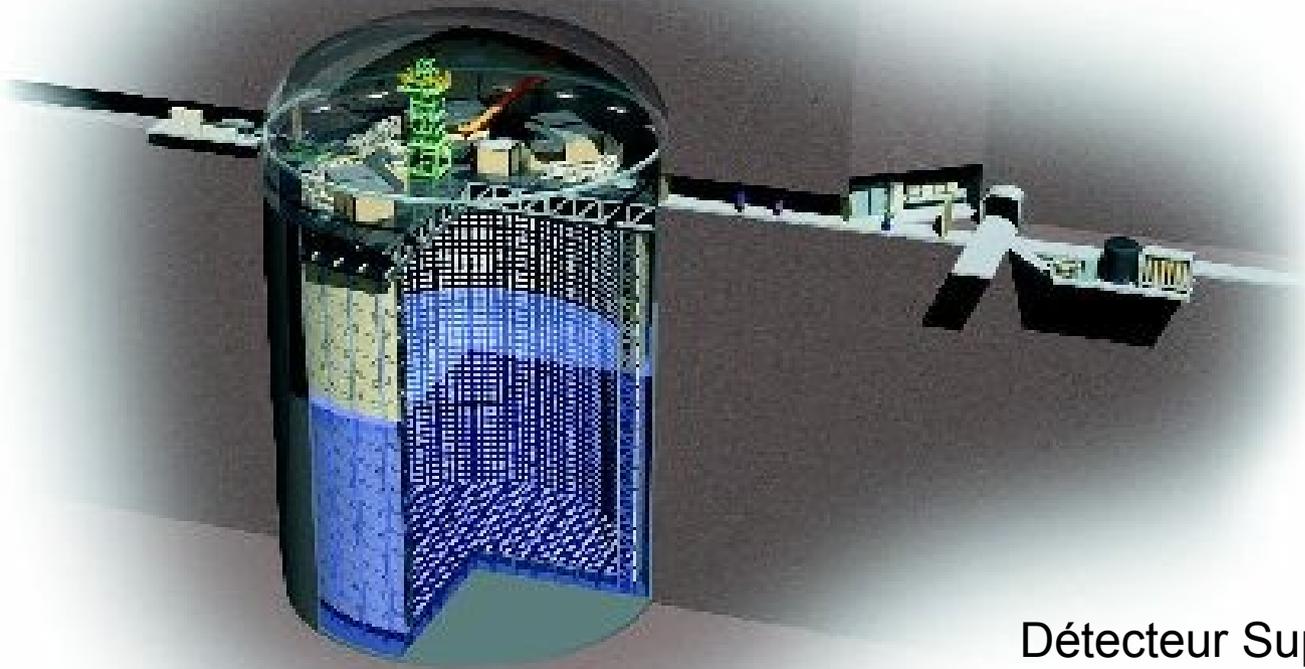
Neutrinos : solaires, cosmiques, *naturels*...

Détecteurs spécifiques :

SNO (Canada) / superkamiokande (Japon) :
cuves gigantesques d'eau pure + photomultiplicateurs

Amanda / icecube (pôle sud) :
glace + photomultiplicateurs

-> Grand milieu de détection ; long temps d'expérience...



Détecteur Super-Kamiokande



A M A N D A