

# CHAPITRE III

## *Les instruments : machines et détecteurs*

### Plan

Arnaud Duperrin (CPPM)

1. Caractéristiques des collisions
2. Les partenaires de la collision
3. Les collisionneurs
4. Les fonctions des détecteurs
5. Expériences hors accélérateurs

## § 3.1 - Caractéristiques des collisions

**Les collisions, en faisant interagir les particules, permettent de les connaître**

- Énergie de la collision
- Section efficace
- Luminosité instantanée de la machine
- Taux d'acquisition
- Luminosité intégrée
- Produits de la réaction

## 3.1 - Caractéristiques des collisions

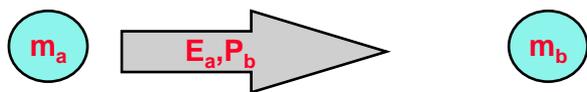
### Énergie de la collision $E_{cm}$

$$E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2 \quad \swarrow \sqrt{s}$$

- Énergie dans le « centre de masse » (c.m.)
  - Dans ce référentiel, la somme des impulsions ( $p_i$ ) des particules est nulle (par définition)
  - C'est l'énergie utile dans une collision:

$$\begin{aligned} s &= p_{ab}^2 = (E_a + E_b)^2 - (\mathbf{p}_a + \mathbf{p}_b)^2 \\ &= m_a^2 + m_b^2 + 2E_a E_b - 2\mathbf{p}_a \mathbf{p}_b \end{aligned}$$

- Collisions sur **cible fixe** ( $p_b=0$ )
  - Très utilisées avant l'arrivée des collisionneurs
  - La seule possible quand le projectile est une particule neutre, ou dans le cas de rayons cosmiques
  - Le centre de masse est en mouvement



$$s = m_a^2 + m_b^2 + 2 E_a E_b$$

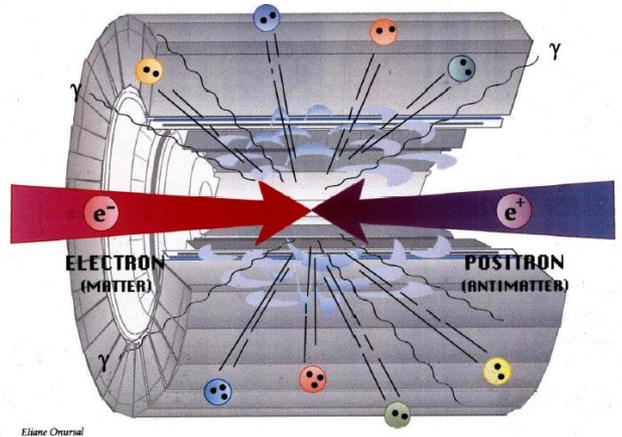
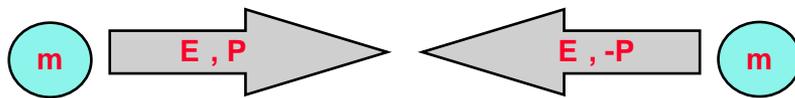
- ou dans le cas où l'énergie du faisceau est bien supérieure à la masse des particules (cas général) :

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2E_a m_b}$$

# 3.1 - Caractéristiques des collisions

## Énergie de la collision $E_{cm}$

- Collisions de deux particules identiques, allant en sens inverse : **collisionneurs**
  - Centre de masse immobile
  - Pas d'énergie perdue



$$\mathbf{p}_a = \mathbf{p}_b$$

- l'énergie utile sera dans le cas de deux particules identiques :

$$s = p_{ab}^2 = (E_a + E_b)^2 - \underbrace{(\mathbf{p}_a + \mathbf{p}_b)^2}_{\vec{0}}$$
$$= m_a^2 + m_b^2 + 2E_a E_b - 2\mathbf{p}_a \mathbf{p}_b$$

$$s = 2m_a^2 + 2E_a^2 + 2\mathbf{p}_a^2$$

- ou dans le cas où l'énergie du faisceau est bien supérieure à la masse des particules :

$$\sqrt{s} = 2 E$$

# 3.1 - Caractéristiques des collisions

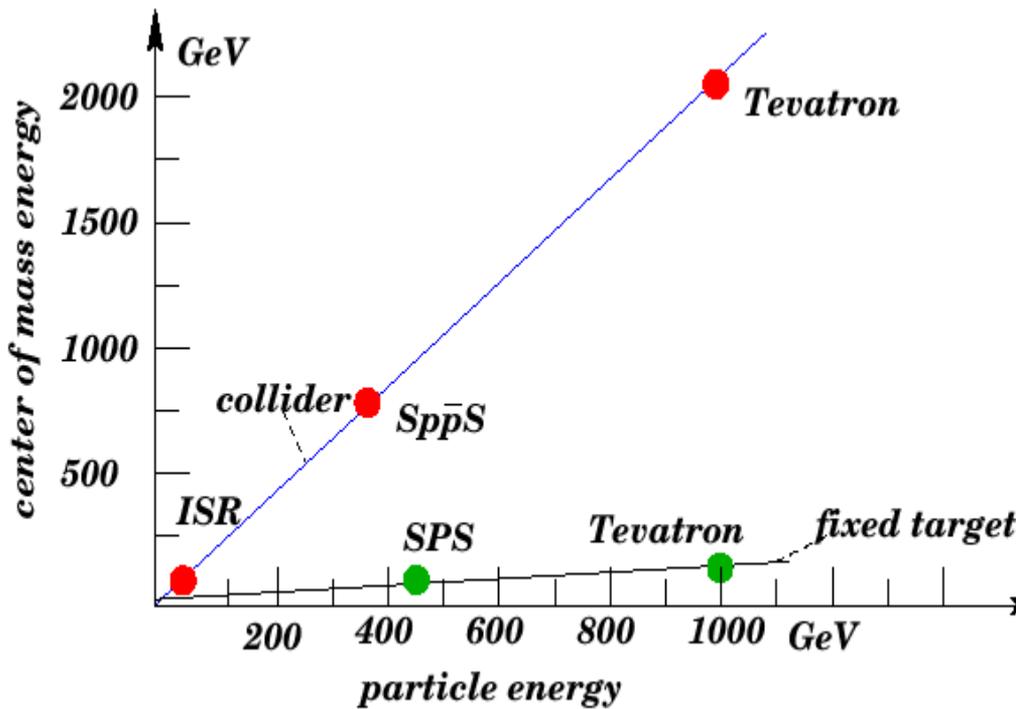
## Cibles fixes / collisionneurs

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2E_a m_b}$$

$$\sqrt{s} = 2 E$$

■ Comparaison:

- ▶ Proton de 7 TeV sur proton fixe :  $E_{cm} = 0.1 \text{ TeV}$
- ▶ 2 protons de 7 TeV en sens inverse :  $E_{cm} = 14 \text{ TeV}$  → **Tevatron, LHC**
- ▶ Pour atteindre la même énergie avec cible fixe, il faudrait
  - $E(\text{faisceau}) = 105000 \text{ TeV} !!!$



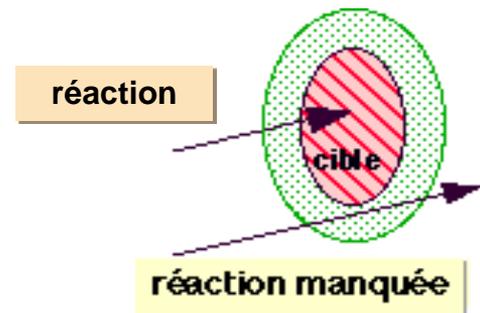
### Collisionneur : plus d'énergie utile

- Energie encore plus grande dans les rayons cosmiques, mais conditions initiales pas connues

## 3.1 - Caractéristiques des collisions

### Section efficace ou $\sigma$

- Sous le terme de **section efficace** se cache la probabilité de réaction
  - ▶ Section efficace totale : n'importe quel état final
  - ▶ Section efficace exclusive : état final particulier
- La section efficace a la dimension d'une petite surface
  - ▶ C'est la surface à travers laquelle le projectile doit passer pour que la réaction se produise



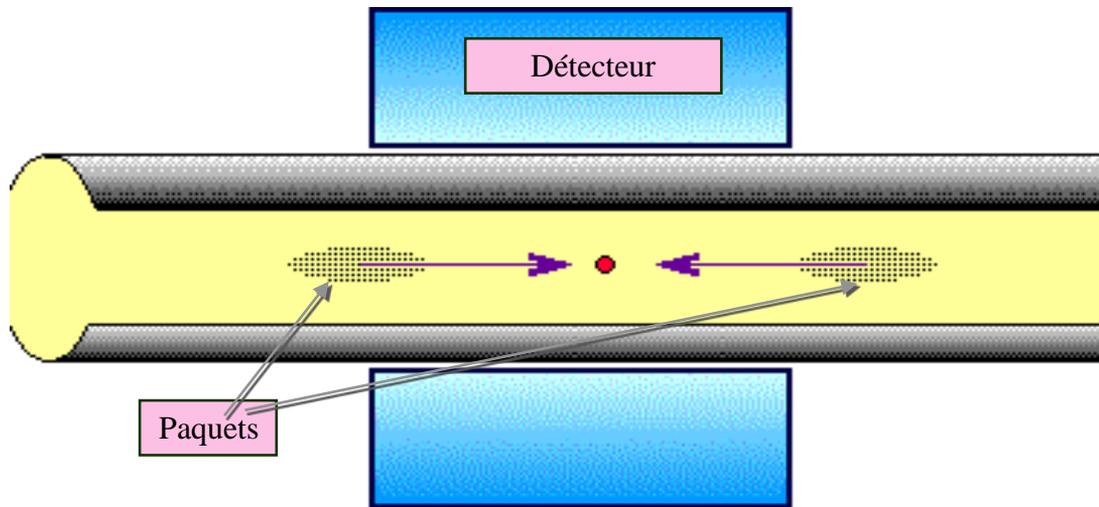
### ■ Unités :

- ▶ Le barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>
  - C'est la section d'un gros noyau
- ▶ Le millibarn =  $10^{-27}$  cm<sup>2</sup>
  - Au LHC, la section efficace totale de collision de deux protons est de l'ordre de  $\sigma(pp) \approx 100$  mb
  - Pour un photon  $\gamma$  sur un noyau:  $\sigma(\gamma p) \approx 0.1$  mb
- ▶ Le nanobarn =  $10^{-33}$  cm<sup>2</sup>
  - Production d'un  $Z^0$  au LEP à partir de collisions  $e^+e^-$  est  $\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0) \approx 40$  nb
- ▶ Le picobarn et femtobarn  $10^{-36}$  cm<sup>2</sup> et  $10^{-39}$  cm<sup>2</sup>
  - Probabilités de phénomènes rares
  - Ex.  $\sigma(\text{Higgs} \rightarrow \gamma\gamma) \approx 50$  fb au LHC

## 3.1 - Caractéristiques des collisions

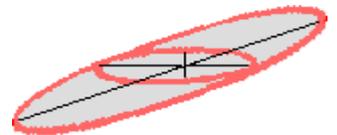
### Luminosité instantanée de la machine

- Capacité de la machine à produire des collisions



- Pour augmenter la luminosité :

- Accroître le nombre de particules/paquet :  $10^{11}$  au LHC
- Comprimer les paquets, réduire leur section
  - Ellipse de  $2.5 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  au LEP
- Augmenter la fréquence de collisions des paquets
  - Au LHC, 40 millions de collisions par seconde
- Multiplier les paquets : 8 au LEP, 2835 au LHC
  - Au LHC, distance entre paquets = 7.5 mètres



- Les luminosités sont exprimées par des nombres très grands

$\sim 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  luminosité du LEP de 1990 à 95  
 $3.5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  luminosité du Tevatron en 2009  
 $\sim 10^{33} - 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  luminosité attendue au LHC

## 3.1 - Caractéristiques des collisions

### Taux d'acquisition = Événements/seconde

- Pour un collisionneur, taux d'acquisition = produit de la probabilité de la réaction cherchée (**section efficace**) et de la **luminosité** de la machine

$$dN/dt = L \cdot \sigma_{\text{réaction}}$$

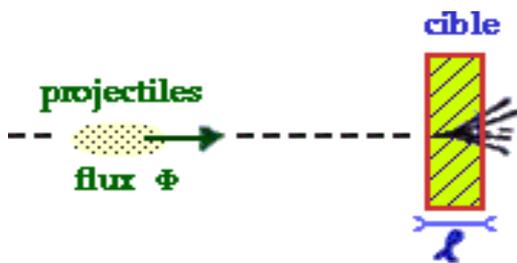
- ▶ Exemple du top au LHC

- $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ,  $\sigma(\text{tt}) = 850 \text{ pb} = 8.5 \cdot 10^{-34} \text{ cm}^2$
- Le LHC produira  $dN/dt = 8.5$  paires tt par seconde

- ▶ Exemple du Higgs au Tevatron

- $L = \sim 3 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ,  $\sigma(\text{H}) \sim 1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$
- Le Tevatron produit  $dN/dt = 0.0003$  Higgs par seconde: 10000 Higgs! pendant la durée du Run II...

- Cible fixe : grande densité par rapport à une cible en mouvement



<u>Cible</u> épaisseur : ● densité : $\rho$ Masse atomique : $A$
---

<u>projectile</u> flux : $\Phi$
------------------------------------

$$dN/dt = N_A \rho \bullet / A \cdot \Phi \sigma_{\text{réaction}}$$

- ▶ Exemple : ● = 1cm,  $A = 18 \text{ g mol}^{-1}$  (~eau),  $\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\sigma(\text{Z}^0) = 40 \text{ nb}$ ,  $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,  $\Phi = 10^{11} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  : taux événements par seconde  $dN/dt = 140 \text{ Hz}$

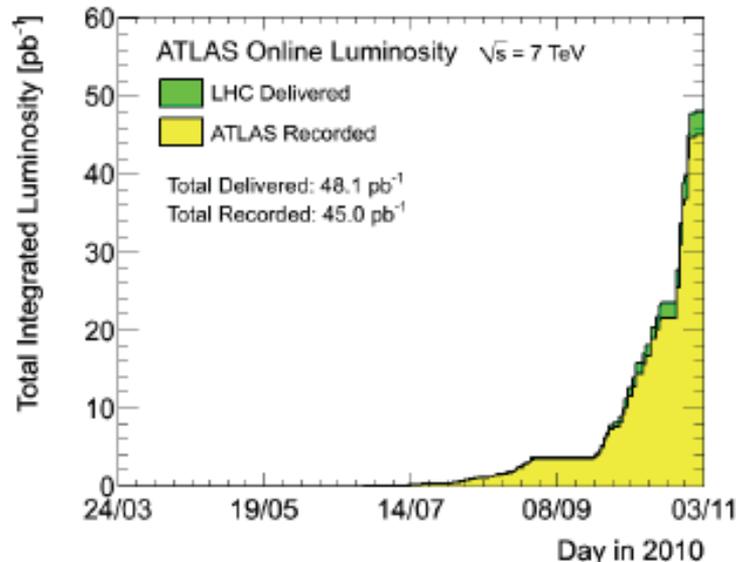
**Cible fixe: plus événements/seconde**

## 3.1 - Caractéristiques des collisions

### Luminosité intégrée $L^{int}$

- Performances du collisionneur lors d'une campagne de prise de données : elle prend en compte

- ▶ Les périodes d'arrêt « shut-down »
- ▶ Les temps de remplissage
- ▶ Les fluctuations de la machine



$$L^{int} = L(\text{moyenne}) \cdot \text{Durée}$$

- Unités : inverse d'une surface

- ▶ Les luminosités intégrées, produit de luminosités instantanées de l'ordre de  $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  par des durées de l'ordre de  $10^7$  s, sont exprimées par des nombres énormes
- ▶ On utilise des unités plus commodes : le  $\text{nb}^{-1}$  ou  $\text{pb}^{-1}$  ou  $\text{fb}^{-1}$

$$\text{Ex. LHC : } 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \cdot 10^7 \text{ s} = 100 \text{ fb}^{-1}$$

- Exemple

- ▶ Ex : Higgs  $\rightarrow \gamma \gamma$  au LHC, phénomène de petite section efficace,  $\sigma = 50 \text{ fb}$ , avec une luminosité intégrée de  $100 \text{ fb}^{-1}$ . On récoltera :

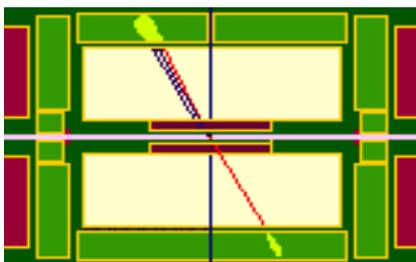
$$50 \times 100 = 5000 \text{ événements par an ... si tout va bien}$$

## 3.1 - Caractéristiques des collisions

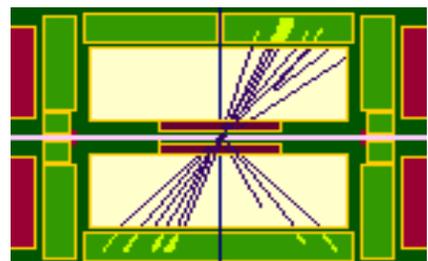
### Produits de la réaction

- L'état final est caractérisé par :
  - ▶ Le nombre de particules produites (multiplicité)
  - ▶ Leur type (e,  $\mu$ ,  $\pi$ , p, K, ...)
  - ▶ Leur impulsion
- Topologie des événements (exemple du LEP)
  - ▶ Les **événements leptoniques** ont une topologie simple, un état final avec peu de particules
    - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
    - $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
    - $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$
  - ▶ Les **événements hadroniques** ont une topologie compliquée, un état final avec beaucoup de particules sous forme de jets
    - $e^+e^- \rightarrow$  quark antiquark  $\rightarrow$  jets

Événement leptonique  $\tau^+\tau^-$



Événement hadronique



## 3.1 - Caractéristiques des collisions

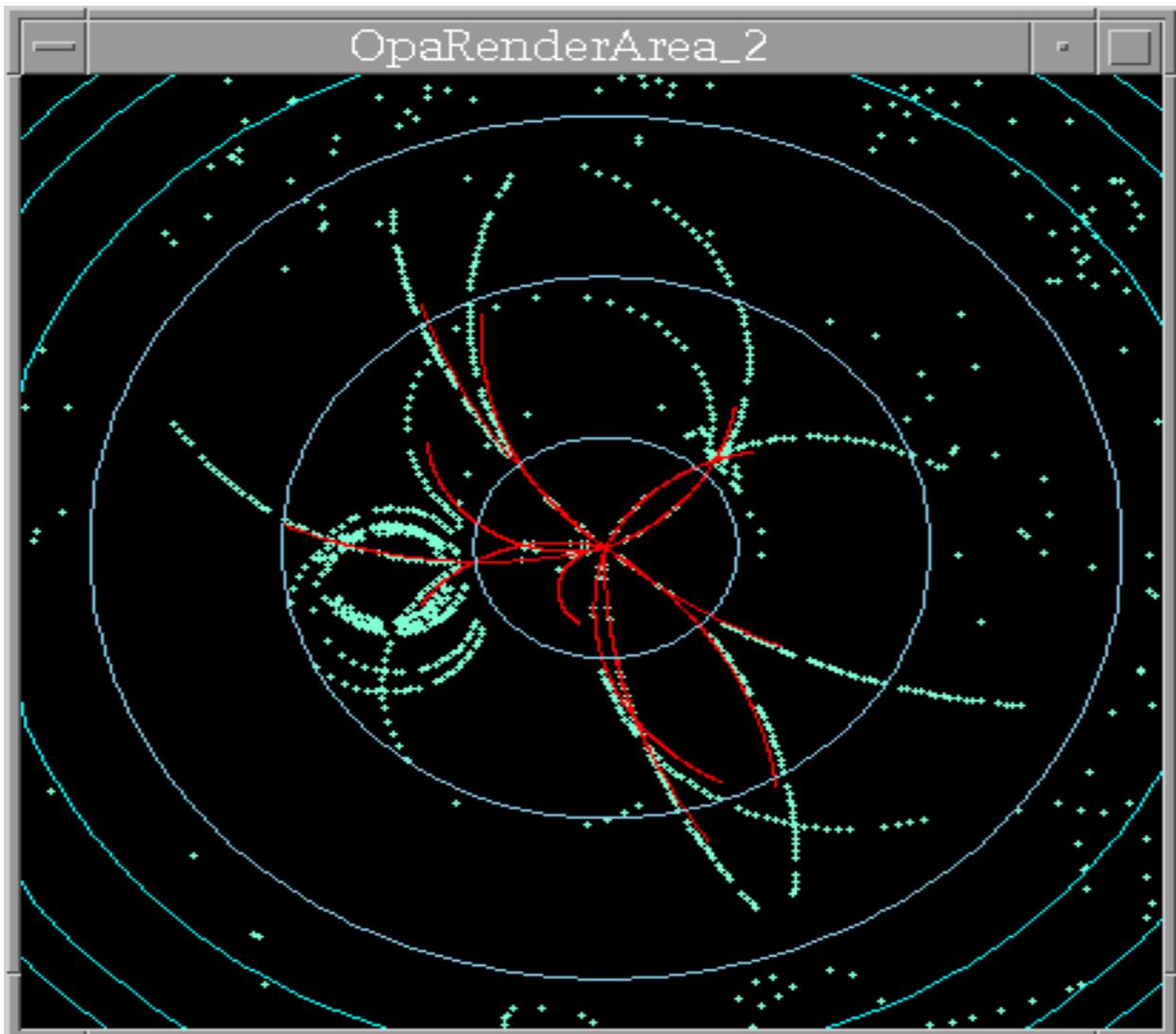
### Machines leptoniques et hadroniques

➤ Machine leptonique ( $e^+e^-$ ) (ex. LEP, SLAC)

**Événement BABAR,  $E_{\text{cm}} = 10.58 \text{ GeV}$**

**Une topologie simple**

Une dizaine de particules  
chargées par événement

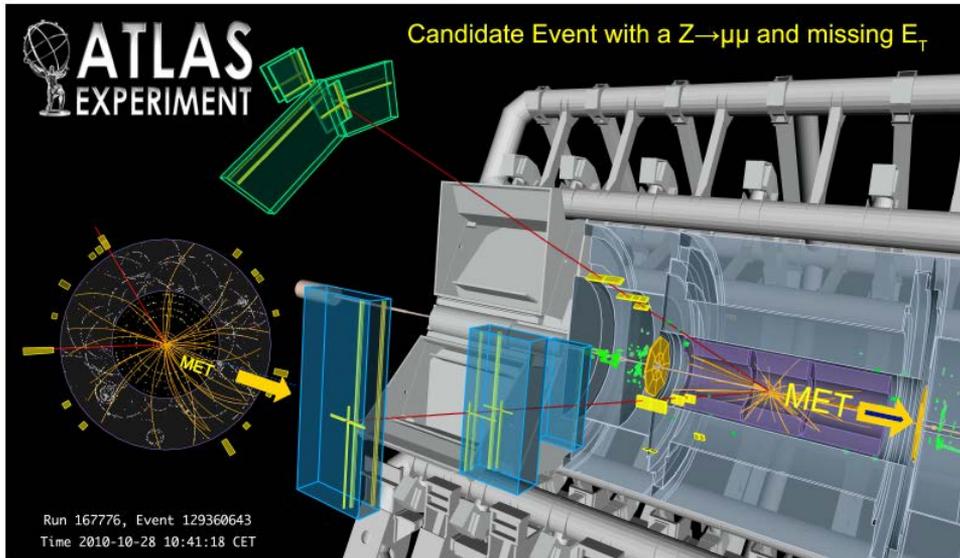


# 3.1 - Caractéristiques des collisions

## Machines leptoniques et hadroniques

➤ Machine hadronique (pp) (ex. LHC)

**Événement ATLAS,  $E_{cm} = 7000 \text{ GeV}$**



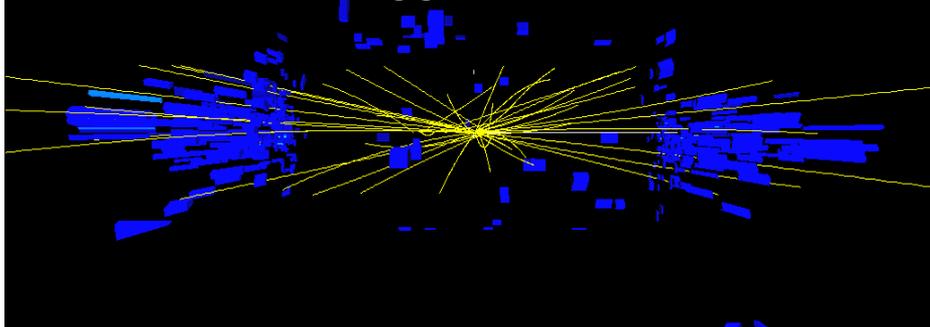
**Une topologie complexe**

Une centaine de particules chargées par événement

**c'est des données**

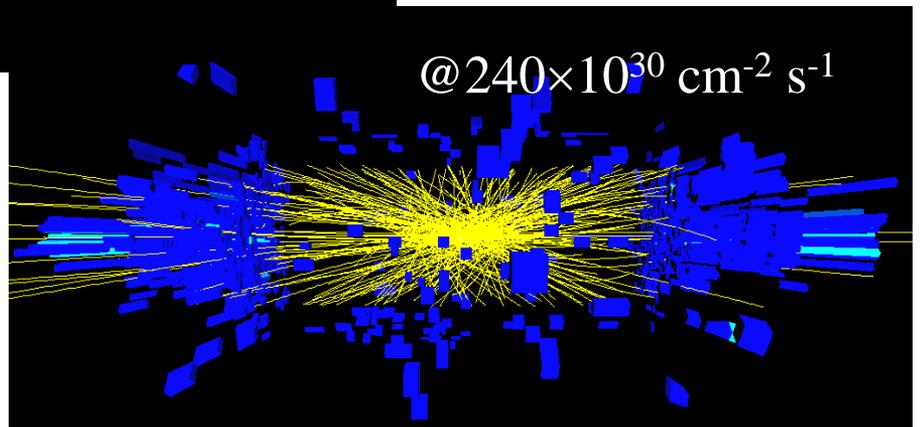
➤ Machine hadronique (ppbar) (ex. Tevatron)

data (min bias trigger) @  $60 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



**et c'est des données ...**

@  $240 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



## § 3.2 - Les partenaires de la collision

### Quelles particules fait-t-on entrer en collisions ?

- Faisceaux de particules
- Faisceaux d'électrons et de positrons
- Faisceaux de protons et d'antiprotons
- Faisceaux de pions, kaons, etc...
- Faisceaux de neutrinos
- Sources naturelles

## 3.2 - Les partenaires de la collision

### Faisceaux ou « beams »



- Définition d'un faisceau :
  - Ensemble de particules suivant des trajectoires voisines
- Paquets de particules :
  - ▶ Lors du processus d'accélération, les accélérateurs regroupent les particules par paquets ou « bunches »
- Faisceaux chargés peuvent être dirigés, focalisés, réglés en énergie
- Faisceaux neutres : inhomogènes en énergie (sous-produits de faisceaux chargés)
- Autres sources
  - ▶ Réacteurs nucléaires
  - ▶ Rayons cosmiques
- Faisceaux de tests d'appareillages
  - ▶ Etude de réponses des détecteurs aux diverses particules
- Collisions faisceau-faisceau :
  - ▶ électron – positron (LEP)
  - ▶ électron (ou positron) – proton (HERA)
  - ▶ proton – antiproton (Tevatron)
  - ▶ proton – proton (LHC)

## 3.2 - Les partenaires de la collision

### Faisceaux d'électrons et positrons

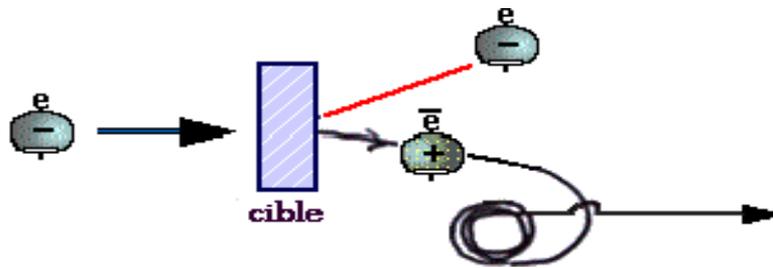
- Electrons et positrons sont stables et chargés
  - ▶ Ils peuvent être accélérés
  - ▶ Ils peuvent être guidés vers une cible
  - ▶ Ils peuvent tourner dans l'anneau d'un collisionneur et être maintenus au centre d'un tube à vide
  
- Production des électrons : elle est facile
  - ▶ La matière première est abondante
  - ▶ Les électrons sont faciles à arracher des atomes
  - ▶ Les faisceaux d'électrons font partie de la vie courante (ex: tube de télévision)

Ex: PEP II (SLAC): Les électrons sont produits par effet thermoélectrique dans un canon à électron.
  
- Production des positrons (= anti-électrons)
  - ▶ L'antimatière n'existe pas naturellement
  - Il faut **accumuler** des positrons dans de petits anneaux dits de «refroidissement», où ils sont compactés en paquets homogènes en énergie
  - ▶ **Ex: PEP II (SLAC):** les positrons sont produits par bombardement d'une cible de tungstène par une partie du faisceau d'électrons initialement produits.
  
  - ▶ Les positrons disparaissent en s'annihilant avec la matière
  - Il faut les **confiner** dans le vide

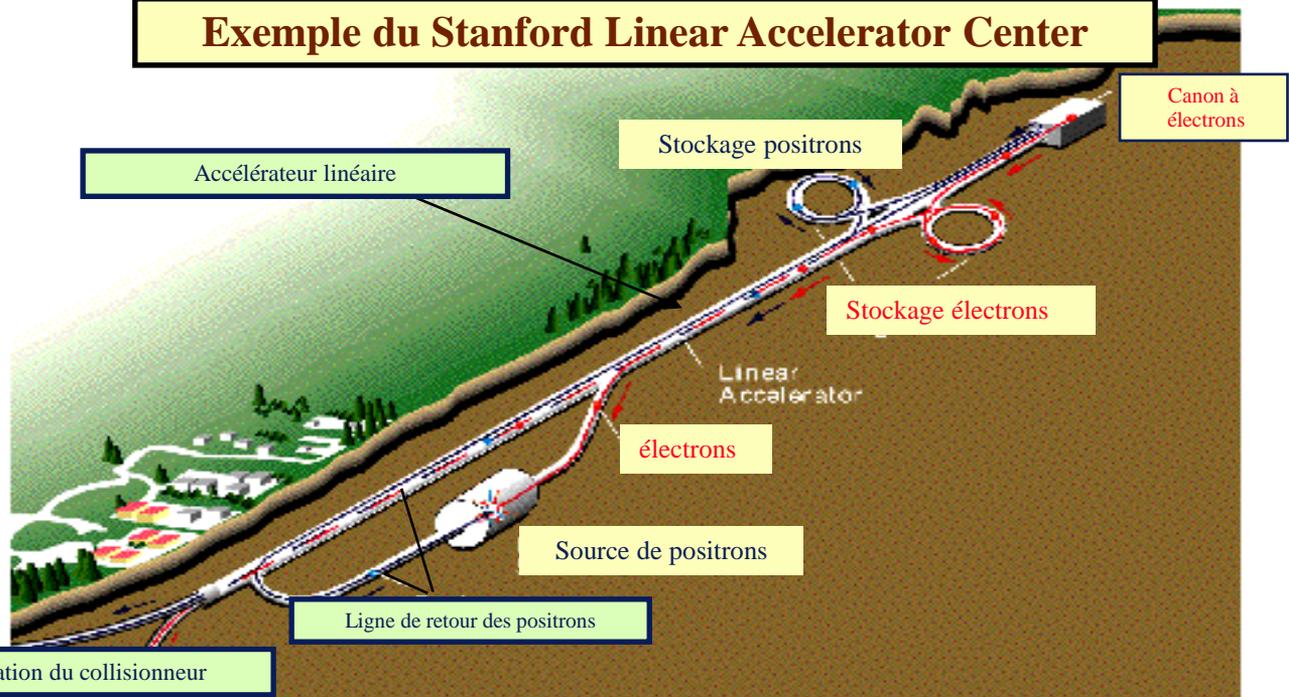
## 3.2 - Les partenaires de la collision

### La production de positrons

- Le cycle complexe des positrons :
  - 1) Accélération d'électrons sur une cible « lourde »
  - 2) Production de paires  $e^+e^-$
  - 3) Collection des positrons et stockage provisoire
  - 4) Accumulation des positrons et homogénéisation de leurs caractéristiques (énergie, quantité de mouvement)
  - 5) Lancement des paquets de positrons et accélération



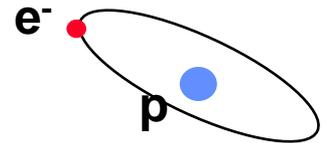
#### Exemple du Stanford Linear Accelerator Center



## 3.2 - Les partenaires de la collision

### Faisceaux de protons et antiprotons

- Protons et antiprotons sont stables et chargés
- Production des protons : elle est facile
  - ▶ Simple épluchage d'atomes d'hydrogène
- Production d'antiprotons:
  - ▶ Au CERN les antiprotons sont produits lors de la collision sur une cible d'un faisceau intense de protons de quelques GeV en provenance du PS
  - ▶ ceux-ci sont dirigés sur des cibles fixes ou stockés pour être injectés dans le collisionneur
- Stockage des antiprotons
  - ▶ Il faut accumuler les antiprotons s'ils doivent être envoyés dans un collisionneur
  - ▶ Avant d'être accélérés ceux-ci doivent être «refroidis», c'est-à-dire rassemblés en paquets de quantité de mouvement homogènes



**Simon Van der Meer**, inventeur d'une méthode de stockage et de refroidissement des antiprotons  
prix Nobel 1984



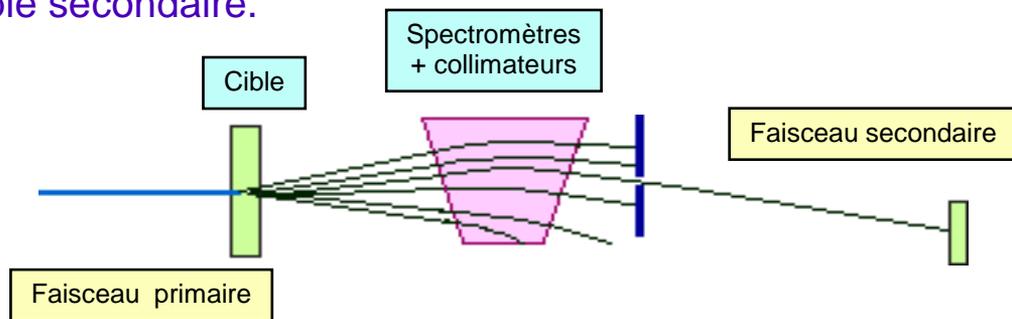
## 3.2 - Les partenaires de la collision

### Hadrons instables ( $\pi, K, \Sigma, \dots$ )

- Ce sont des faisceaux instables

- Production :

- ▶ Cible primaire bombardée par des protons. Nombreuses particules secondaires séparées par spectromètres et collimateurs, puis dirigées vers cible secondaire.



- On met à profit la dilatation relativiste du temps

- ▶ un kaon au repos vit, en moyenne,  $\tau = 1.2 \cdot 10^{-8}$  s
- ▶ accéléré, il vit  $\Gamma\tau$ , où  $\Gamma$  est le « facteur de Lorentz ». Avec  $\Gamma$  assez grand, le kaon vit suffisamment longtemps pour faire un faisceau

Ex.: Un kaon d'impulsion  $p = 100$  GeV parcourt  $\ell = \tau p/m = 750$  m

- Utilisation :

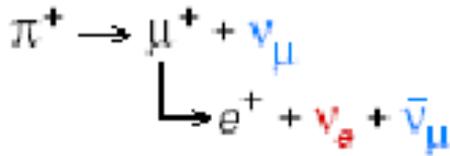
- ▶ uniquement sur **cible fixe**
- ▶ faisceaux de  $\pi$  et **K** très utilisés de 1960 à 1985, à l'époque des chambres à bulles, du PS et du SPS
- ▶ maintenant utilisés principalement pour tester la réponse des appareillages aux pions, kaons, ... = faisceaux tests ou test-beam
- ▶ faisceaux de **kaons neutres** utilisés par NA48 (CERN), KTeV (Fermilab)
- ▶ faisceaux d'**hypérons** utilisés pour une mesure précise des temps de vie :  $\Sigma$ ,  $\Xi$  et  $\Omega$

## 3.2 - Les partenaires de la collision

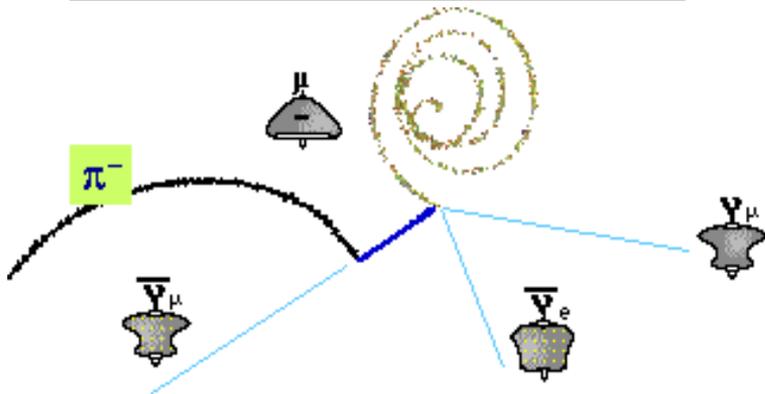
### Faisceaux de neutrinos

#### ■ Faisceaux de neutrinos auprès d'accélérateurs :

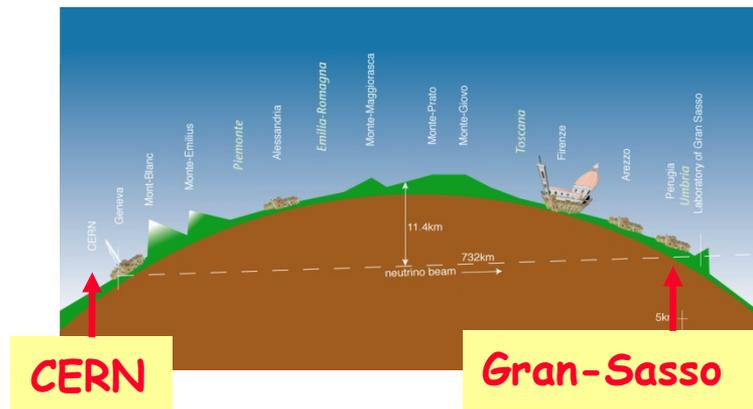
- ▶ Les faisceaux de neutrinos (principalement **neutrinos-mu**) proviennent de la désintégration en vol de mésons  $\pi$



Désintégration en cascade d'un méson  $\pi^-$  en  $\mu^-$  qui se désintègre à son tour en électron



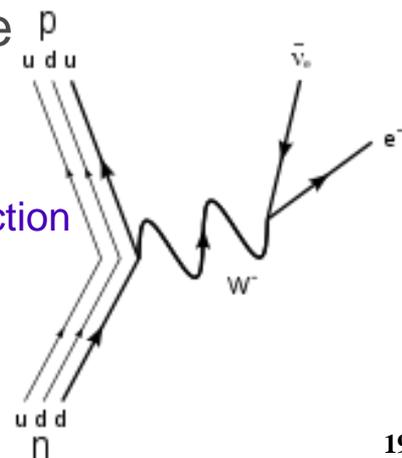
Faisceau de  $\nu_\mu$  envoyés depuis le CERN vers le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie



- ▶ Utilisés récemment dans les expériences « long-baseline » sur les neutrinos (K2K au Japon, Minos aux Etats-Unis, Icarus et Opéra en Europe)
- ▶ Projets de « super-faisceaux » et d'usines à neutrinos

#### ■ Neutrinos de basse énergie en provenance des réacteurs nucléaires

- ▶ Principalement antineutrinos-e ( $\bar{\nu}_e$ ) par radioactivité  $\beta$
- ▶ Faisceaux très intenses, mais les probabilités d'interaction sont extrêmement faibles
- ▶ Exemples : Chooz en France, Kamland au Japon



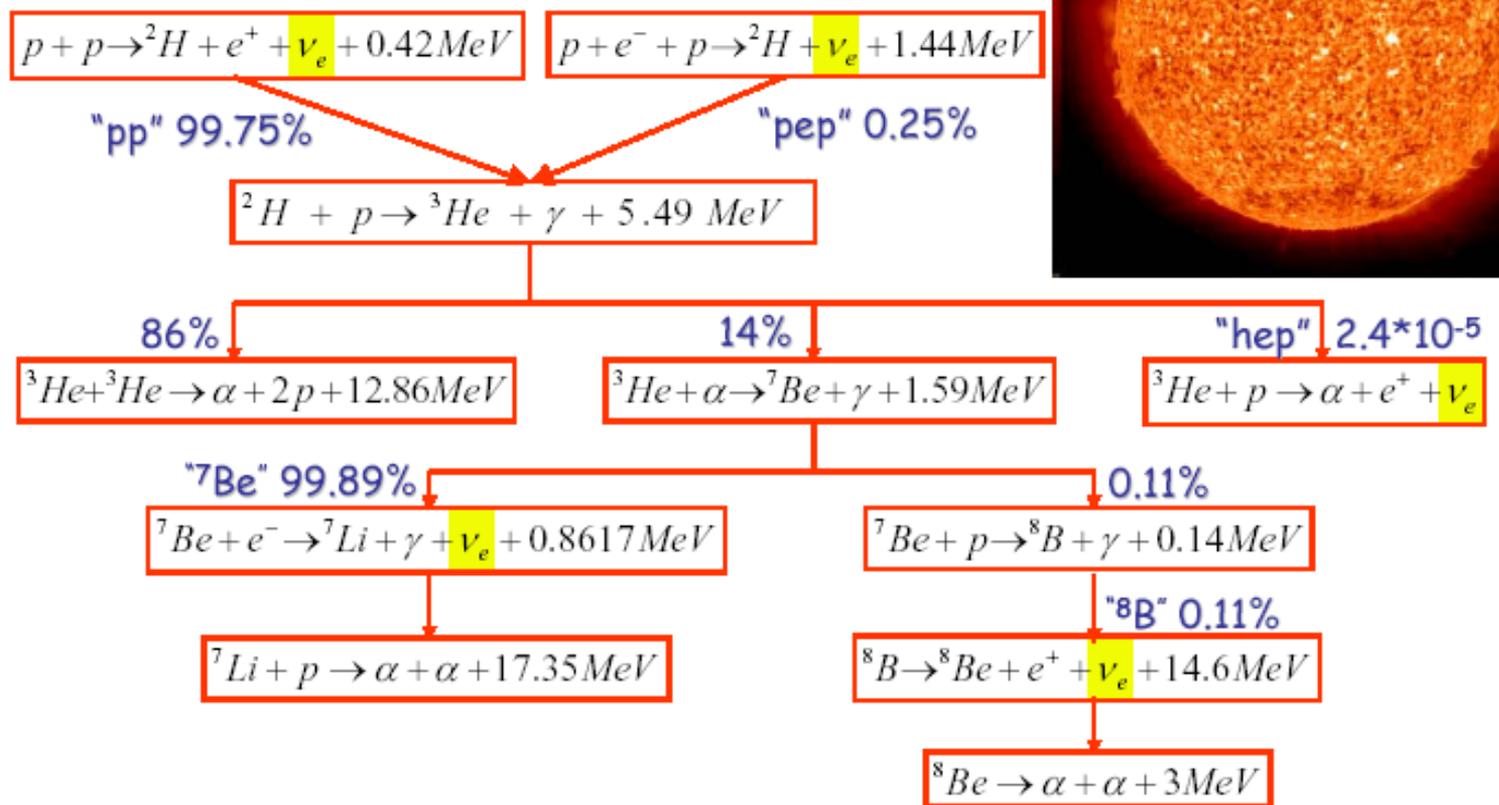
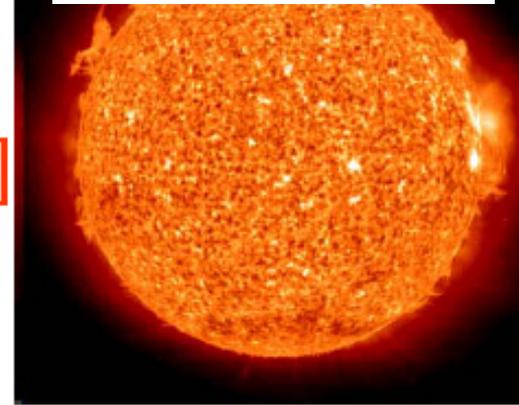
## 3.2 - Les partenaires de la collision

### Sources naturelles

- Le soleil, source de neutrinos de basse énergie

Les réactions thermonucléaires dans le soleil produisent des  $\nu_e$

$\nu_e$  are abundant by-products of nuclear fusion in the sun



- Photons prennent 10,000 ans à sortir
- Les neutrinos sortent à la vitesse de la lumière (les neutrinos n'interagissent avec la matière que par force faible)

## 3.2 - Les partenaires de la collision

### Sources naturelles

#### ■ Sources galactiques et extragalactiques

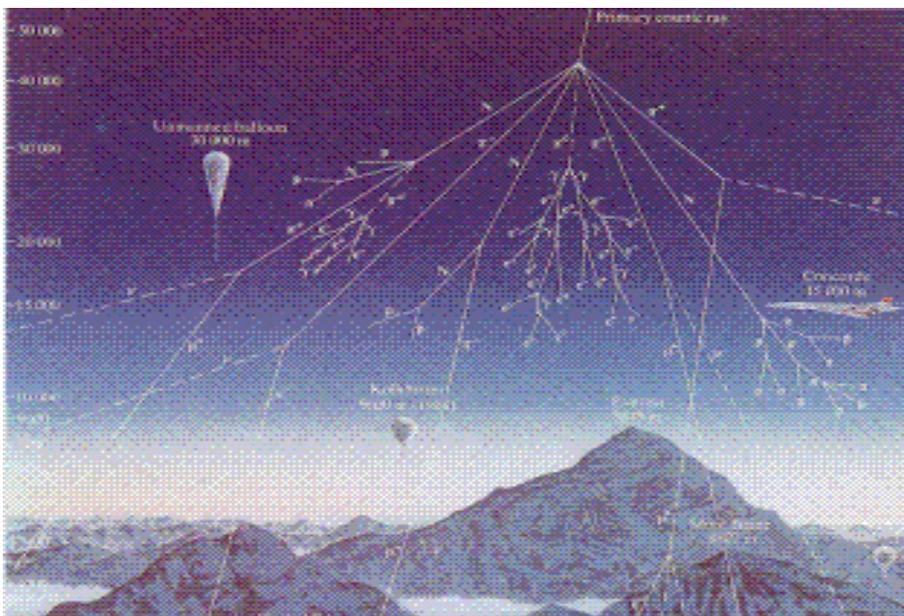
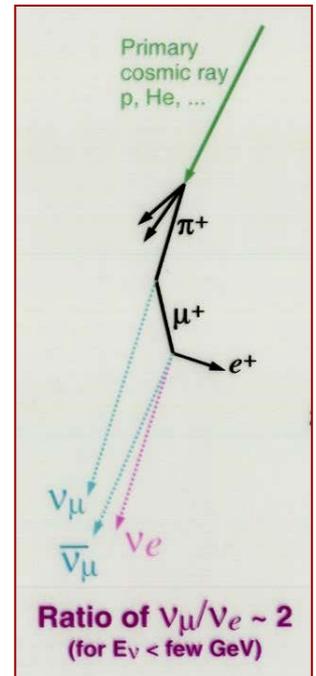
- ▶ Accélérateur naturel à l'échelle des étoiles : très hautes énergies!
- ▶ Certaines particules cosmiques possèdent des énergies supérieures au milliard de TeV...

#### ■ Rayonnement cosmique primaire

- ▶ Protons
- ▶ Photons
- ▶ Noyaux
- ▶ Neutrinos

#### ■ Au niveau du sol : muons cosmiques

Très utilisés pour les tests d'appareillages hors périodes de faisceaux



collis. électrom.

$$e \rightarrow e + \gamma$$
$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

collis. sur noyaux.

$$p, n$$
$$\pi^+ / \pi^- / \pi^0$$

Désintégrations

$$\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$$
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

## § 3.3 - Les collisionneurs

### Où l'on passe en revue ces machines et leur utilisation

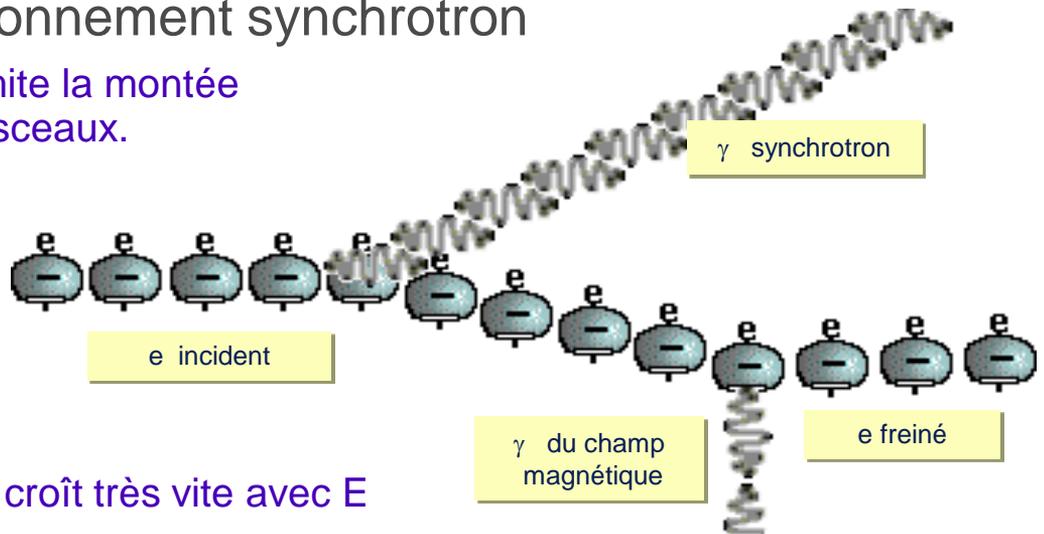
- Les collisionneurs permettent d'atteindre de beaucoup plus grandes énergies utiles que les expériences traditionnelles sur cible fixe
- Les particules doivent être stables et chargées : on ne peut remplir un collisionneur qu'avec des électrons, positrons, protons, antiprotons
- Ces machines se classent en 4 principales catégories :
  - ▶ Collisionneurs électron-positron (ex. LEP)
  - ▶ Collisionneurs électron (ou positron) –proton (ex. HERA)
  - ▶ Collisionneurs antiproton-proton (ex. Tevatron)
  - ▶ Collisionneurs proton-proton (ex. LHC)

## 3.3 - Les collisionneurs

### Machines $e^+e^-$

- L'énergie est toute dans le centre de masse
  - ▶ état final assez simple
  - ▶ pas d'interaction forte (dans l'état initial)
- Faibles sections efficaces
  - ▶ taux d'acquisition faibles
- Problème : Rayonnement synchrotron
  - ▶ Ce phénomène limite la montée en énergie des faisceaux.

} **Mesures précises**



- ▶ La perte d'énergie croît très vite avec E

$$\text{Perte d'énergie synchrotron} \\ \Delta E \propto (E/m)^4 / R^5$$

- ▶ Elle pénalise les électrons ( $m$  petit) par rapport aux protons
- ▶ Solutions :
  - augmenter le rayon  $R$  : au LEP,  $R = 4.3 \text{ km}$  pour 100 GeV
  - Futur : Etude de collisionneurs linéaires pour éviter cela

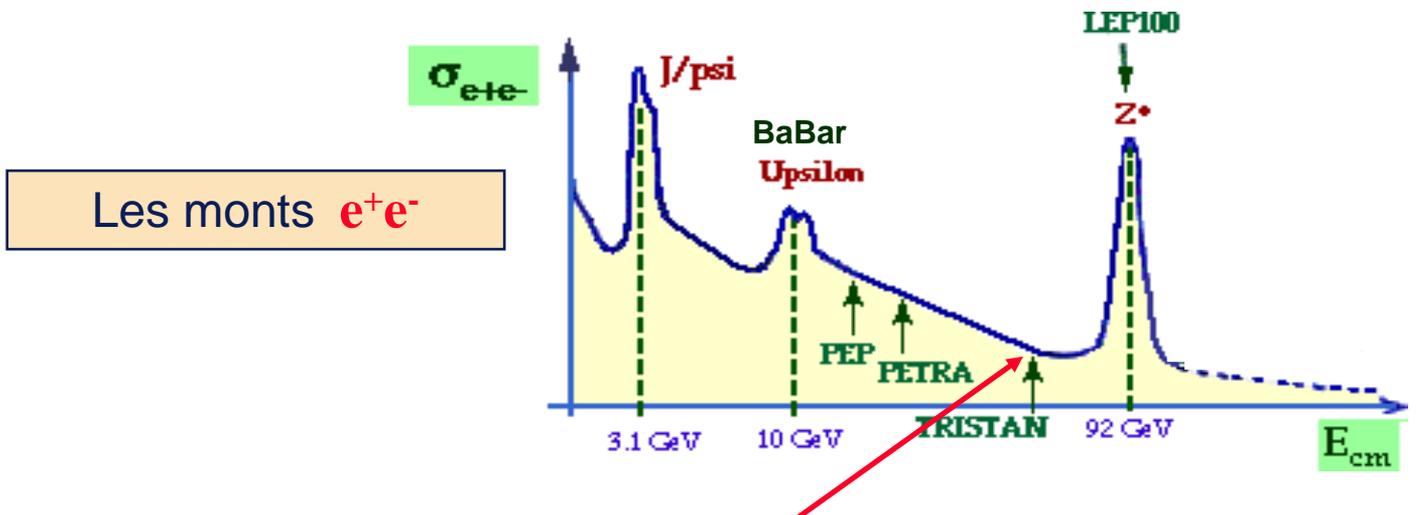
Collisionneurs  $\mu^+ \mu^-$

### 3.3 - Les collisionneurs

## $e^+e^-$ à haute énergie : le LEP (CERN) et le SLC (SLAC)

**ALEPH, DELPHI, L3, OPAL**      **SLD**

- La probabilité d'interaction  $\sigma_{e^+e^-}$  varie énormément avec l'énergie  $E_{cm}$  de la collision
- Les physiciens utilisent les «pics» de la section efficace pour leurs machines



- Il vaut mieux bien choisir son point de fonctionnement !!
- Le LEP au CERN et le SLC à Stanford (années 90) : usines à  $Z^0$ 
  - ▶ A l'énergie de **92 GeV**, maximum isolé de la section efficace
  - ▶ A cette énergie, la paire  $e^+e^-$  produit une particule très intéressante pour les interactions faibles : le  $Z^0$
  - $\sigma(Z^0) = 40000 \text{ pb}$ . Pour  $L_{int} = 100 \text{ pb}^{-1}$ , le LEP produit **4 millions de  $Z^0$** , une véritable usine
- Terre inconnue au delà de 215 GeV
  - 215 GeV, énergie atteinte en 2000. Arrêt pour préparer le LHC...

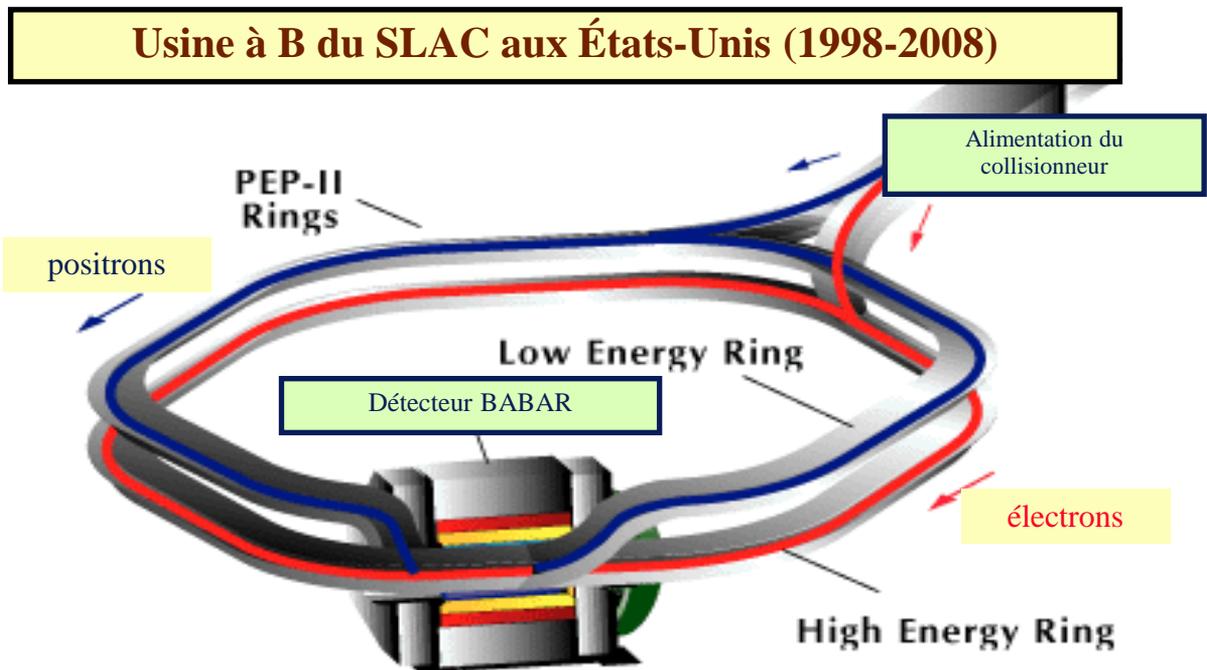
### 3.3 - Les collisionneurs

#### $e^+e^-$ à basse énergie : PEP II (SLAC) et KEKB (JAPON)

# BABAR

# BELLE

- On désire étudier des désintégrations très rares des mésons B porteurs de quarks  $b$ 
  - ▶ Parmi tous les quarks  $b$  produits, la proportion de désintégrations intéressante est de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-8}$
  - ▶ Il faut produire des millions de mésons B
- On utilise des collisions  $e^+e^-$  asymétriques
  - ▶ Des paires de mésons B sont produites en abondance à l'énergie de 10.5 GeV, dite du «Upsilon(4S)» = **usines à B**
  - ▶ On choisit des faisceaux d'énergie différente. Ceci facilite l'identification des mésons B en leur donnant du «mouvement»



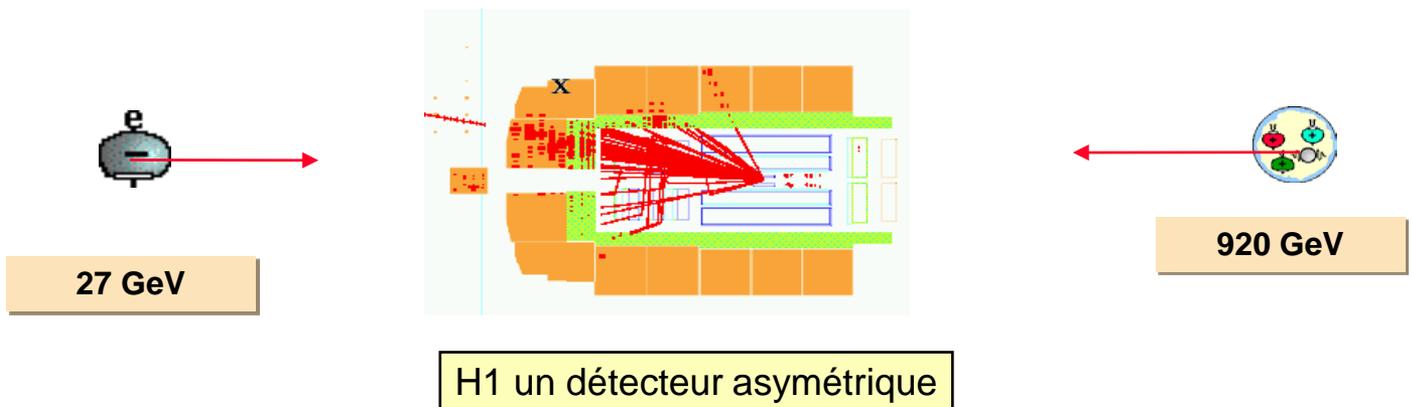
Les énergies étant différentes, électrons et positrons ne peuvent circuler dans le même anneau

### 3.3 - Les collisionneurs

## $e^{\pm}p$ à haute énergie : HERA

# H1, ZEUS

- Projectile propre : l'électron n'a pas de structure
  - ▶ Il constitue une sonde idéale pour la matière nucléaire
- Cible complexe
  - ▶ Le proton est complexe. Il s'agit de comprendre sa structure fine.
- Le collisionneur HERA à Hambourg
  - ▶ Il a pris le relais de l'accélérateur linéaire de Stanford qui a joué un rôle de pionnier ( Le SLAC a alimenté ensuite des collisionneurs  $e^+e^-$  : PEP, SLC et maintenant PEP-II).
  - ▶ L'énergie utile dans HERA est beaucoup plus élevée, et permet de sonder de très petits détails du proton ( $10^{-18}$  mètres !!)
- Les détecteurs H1 et ZEUS
  - ▶ Détecteurs asymétriques, car collisions asymétriques
  - ▶ électrons ou positrons de 27 GeV - protons de 920 GeV
  - ▶ 318 GeV d'énergie utile



### 3.3 - Les collisionneurs

## Machines Antiproton-Proton : SPS (CERN) et Tevatron (Fermilab)

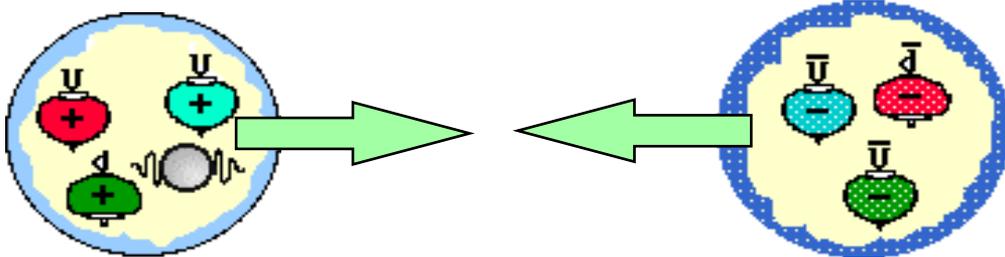
# UA1, UA2

# DO, CDF

- Energies très élevées dans le centre de masse
  - ▶ Les protons peuvent être accélérés à plus grande énergie que les électrons (rayonnement synchrotron faible)
  - ▶ SPS au CERN : Maximum = 0.9 TeV
  - ▶ Tevatron à Fermilab : ~2 TeV
- Interaction forte, donc sections efficaces importantes

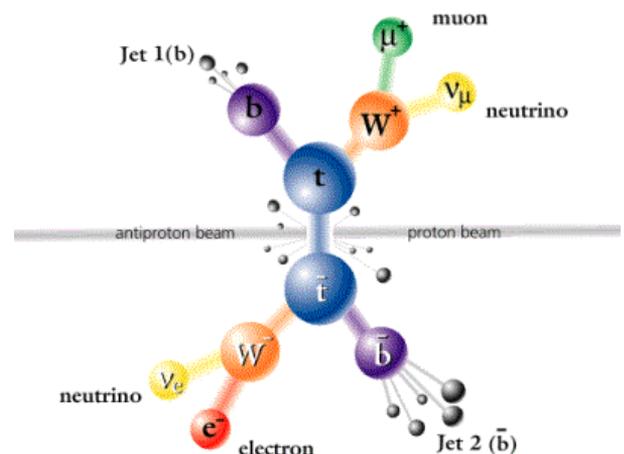
$$\sigma (\text{proton - antiproton}) \approx 1 \text{ million de fois } \sigma (e^+e^-)$$

- ... et taux d'acquisition élevés
  - ▶ Machines beaucoup plus bruyantes que  $e^+e^-$
  - ▶ Sélection des événements et déclenchements : conditions extrêmes
- Collision complexe de quarks et de gluons



- Le **Tevatron** à Fermilab (près de Chicago)

- ▶ Découverte du quark top (1995), produit par une collision d'un quark et d'un anti-quark.
- ▶ Une partie seulement de la collision est utilisée pour produire le quark top, le reste étant emporté par d'autres quarks et gluons

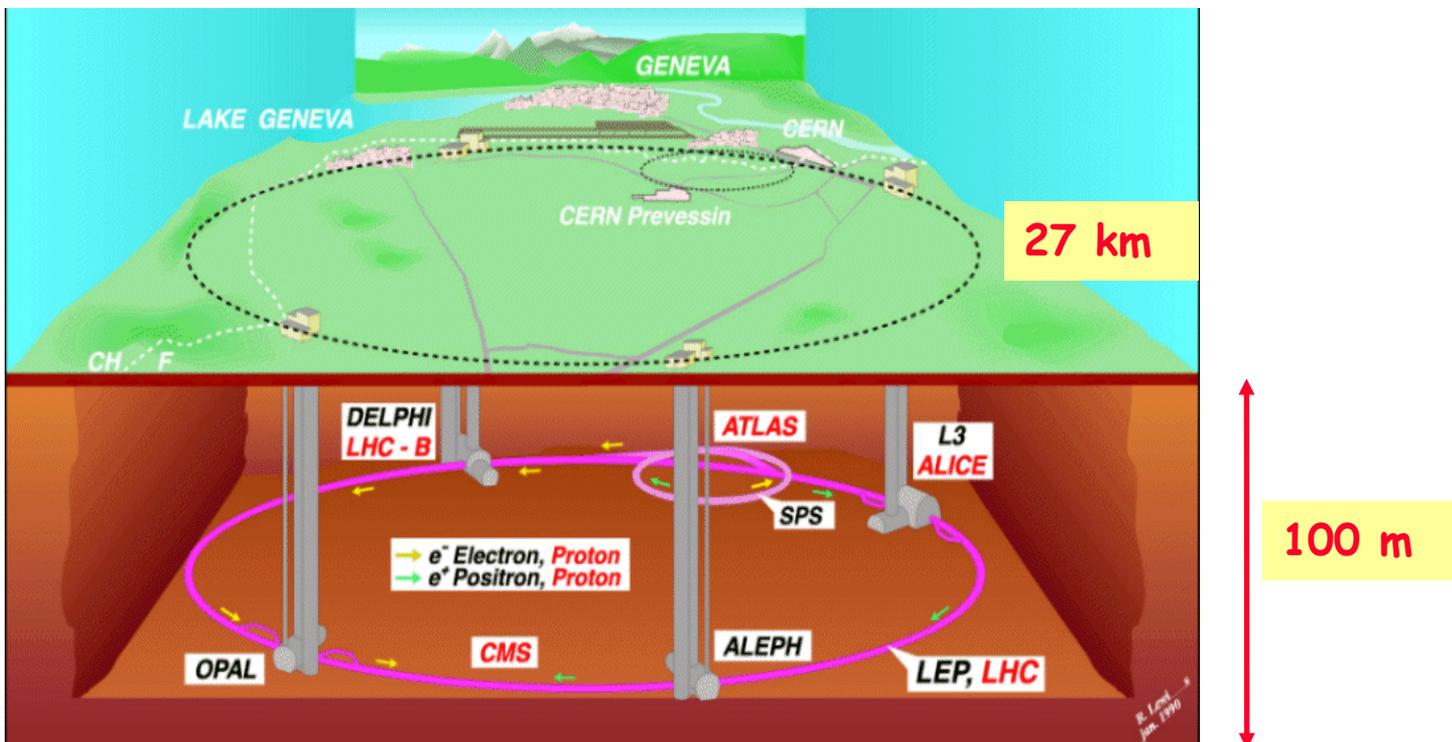


## 3.3 - Les collisionneurs

### Très hautes énergies en proton- proton : le LHC

## ATLAS, CMS, LHCb, ALICE

- Proton contre proton :
  - ▶ Il faut deux tubes à vide (deux faisceaux de même charge, en sens inverse, ont besoin de champs magnétiques opposés)
  - ▶ Energie colossale : **14 TeV**
- Installation :
  - ▶ L'anneau utilise le tunnel creusé pour le LEP. Deux tubes à vide situés dans le même aimant à «double ouverture».
  - ▶ Démarré en 2010
- Quatre détecteurs : ATLAS, CMS, LHCb, ALICE
- Le gigantisme à tous points de vue
  - ▶ Evénements très complexes



## 3.3 - Les collisionneurs

### Le complexe du CERN

- 1954 : Premier synchrotron à protons (**PS**)
  - ▶ Il atteindra 30 GeV. Expériences sur cible fixe
- 1976 : Mise en fonctionnement du Super Synchrotron à protons de 300 GeV ou **SPS**
  - ▶ Le SPS est alimenté par le PS
  - ▶ Premier collisionneur proton-proton : les ISR (anneaux de stockage à intersections)
- 1981 : Transformation du SPS en collisionneur  $p\bar{p}$ 
  - ▶ Introduction d'antiprotons
- 1980 -1990: Construction de l'anneau du **LEP**
  - ▶ Faisceaux d'électrons et de positrons de 90 GeV
- 2007 : Réutilisation du tunnel du LEP pour **LHC**
  - ▶ Collisionneur de proton-proton de très haute énergie

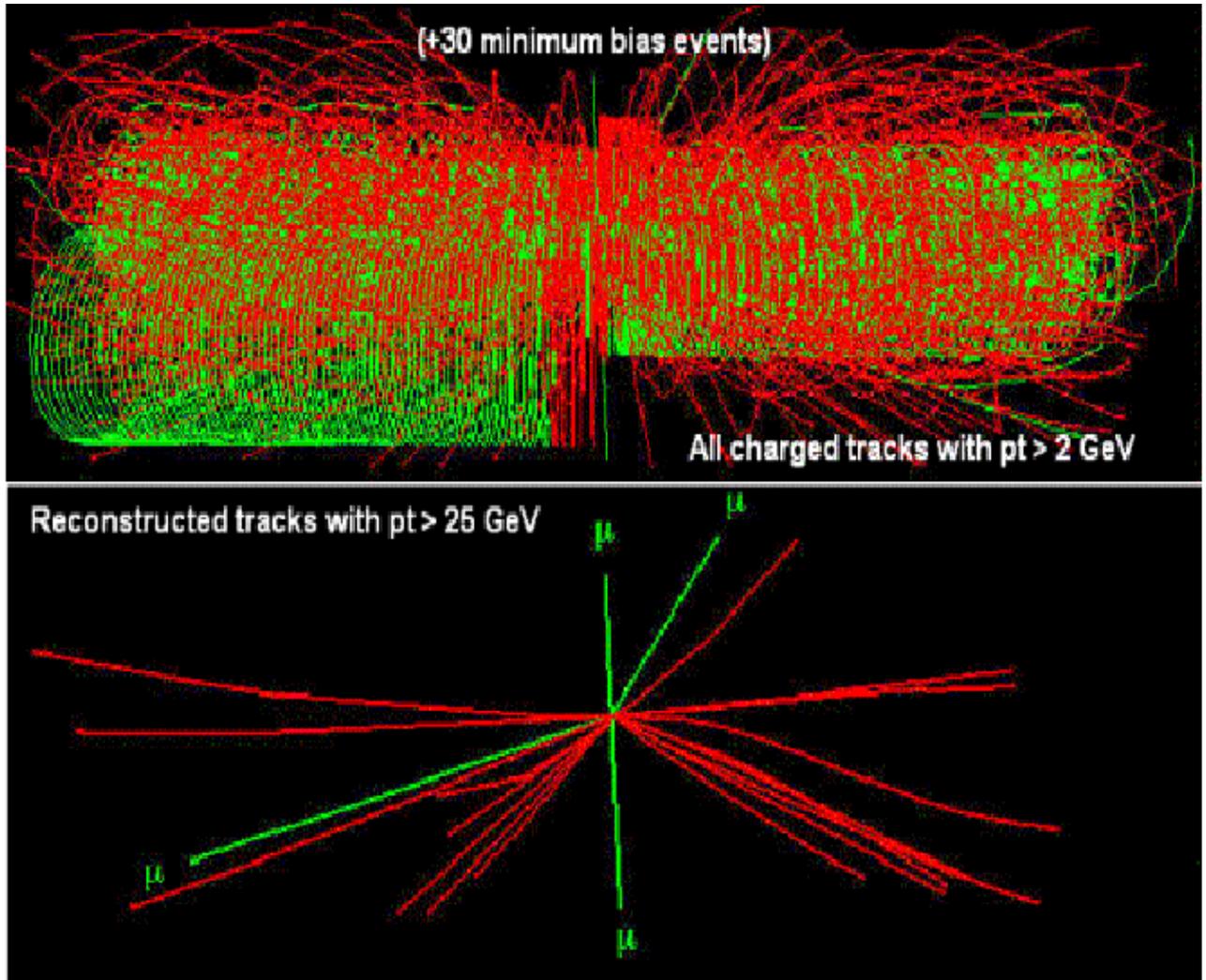


### 3.3 - Les collisionneurs

## Un événement simple au LHC

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \mu$$

*En principe un événement simple avec 4 traces chargées*



1 Higgs decay in 4 muons in  $10^{13}$  events

1000 charged tracks/event, most of them  $p < 0.5$  GeV

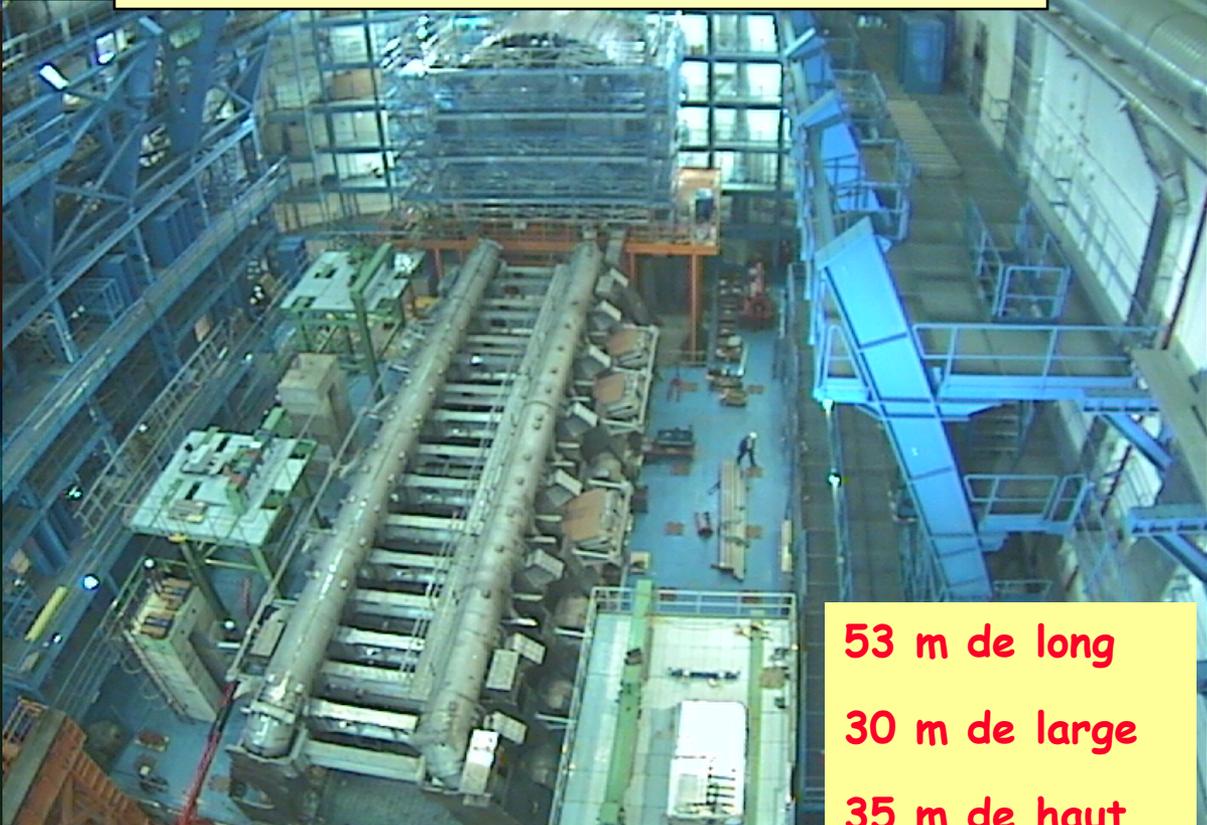
Fort heureusement les évènements  
et particules intéressantes ont  
un grand  $P_T$  et sont plutôt centrales

### LHC, projet mondial

- Le projet LHC dépasse le cadre européen : les japonais, les américains, les chinois, ... y participent
- Une machine mondiale qui mettra plus d'une décennie à être construite, avec des détecteurs et défis techniques en proportion

UX15 Jura

**La caverne d'ATLAS, en cours d'installation**



**53 m de long**

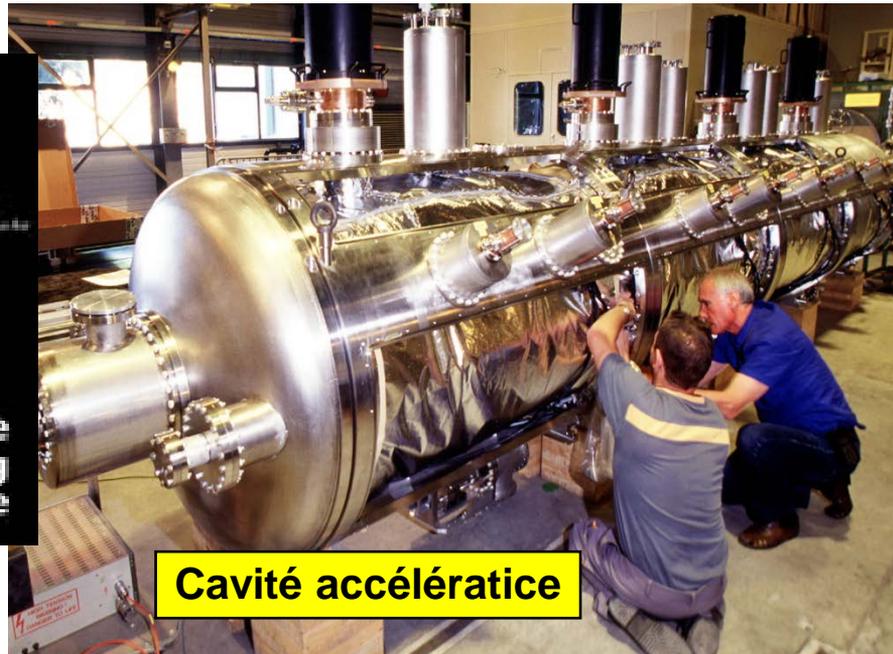
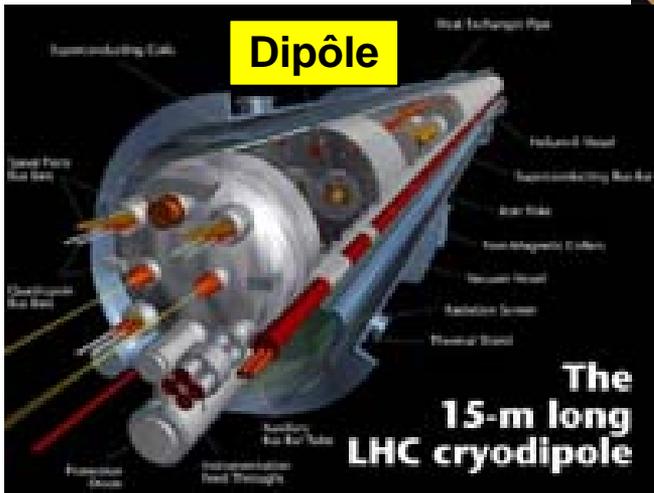
**30 m de large**

**35 m de haut**

### 3.3 - Les collisionneurs

## L'accélérateur LHC

Le LHC, la plus grande installation supraconductrice du monde : 1.8 K, hélium superfluide sur 27 km



### 3.3 - Les collisionneurs

## L'accélérateur LHC



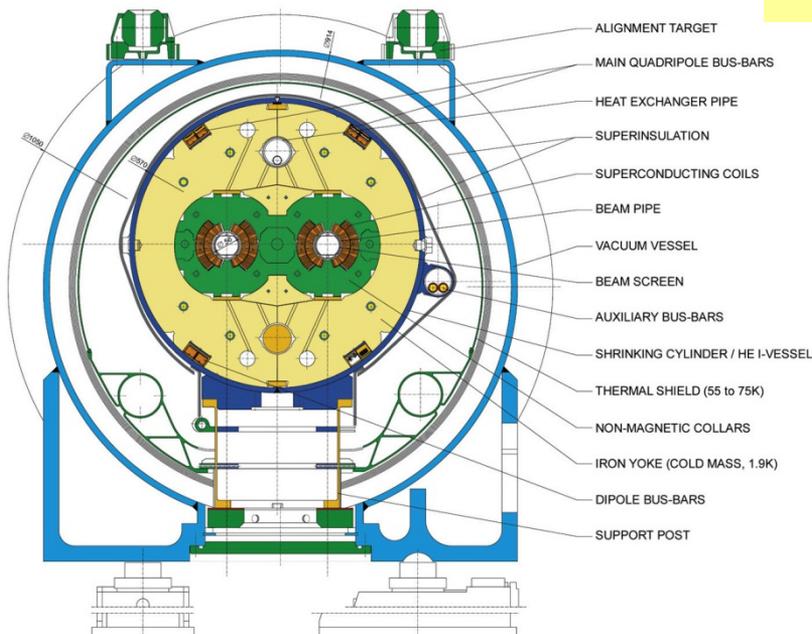
Descente du dernier  
des 1746 aimants le  
26 avril 2007



Soudage entre les  
aimants en Nov. 2007

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE 107 - 30 04 1999



# LHC Inauguration

## 21-10-2008

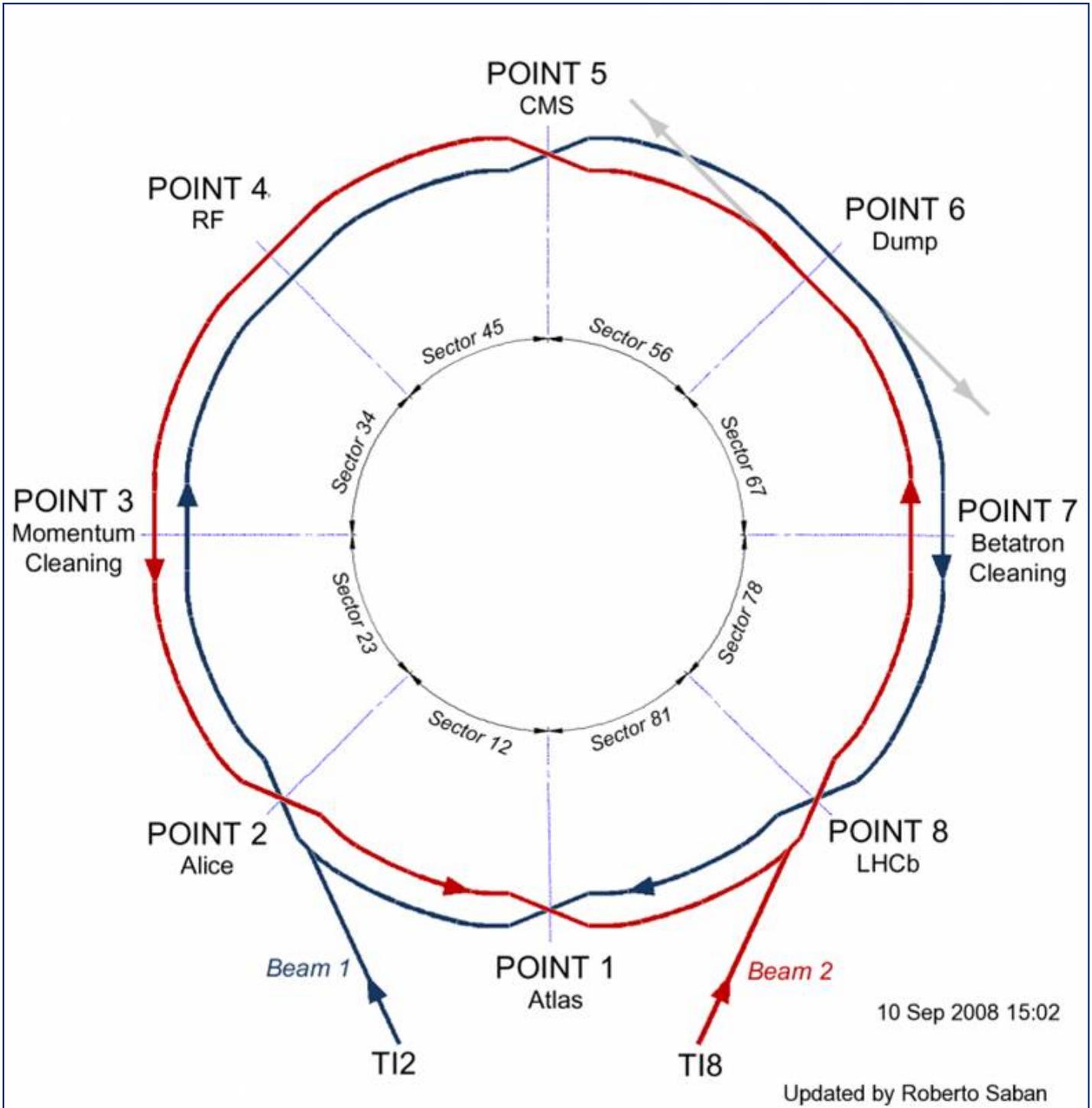


Carolyn Kuan, Guest Conductor

### 3.3 - Les collisionneurs

## L'accélérateur LHC

Premiers faisceaux: 10 Septembre 2008 !



# 3.3 - Les collisionneurs

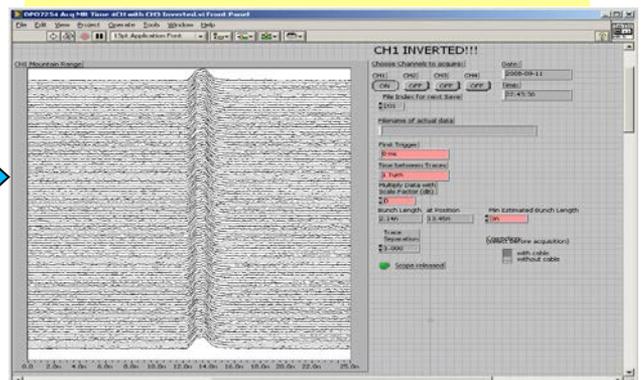
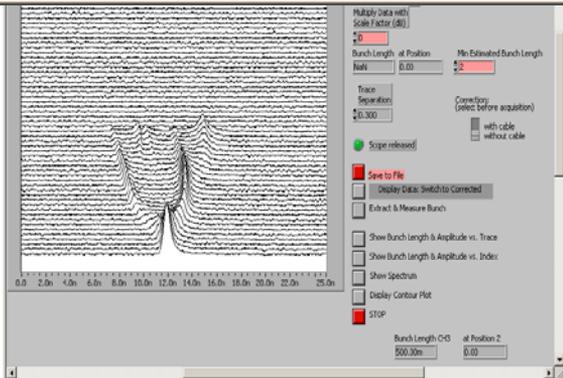
## L'accélérateur LHC

Premiers faisceaux 10 Septembre 2008 !

The screenshot displays the LHCFAST2 control software interface. The main window is titled "BTV - SPS.USER.LHCFAST2". The interface is divided into several sections:

- Selection:** Lists various devices, with "LHC.BTVSI.C5L2.B1" selected.
- Status:** Shows the device status as "OK", mode as "OFF", and control as "REMOTE".
- Setting:** Includes tabs for "Basic", "Advanced", and "Expert". Under "Basic", acquisition parameters are set: "One extraction", "Acquisition Number: 1", "Camera Switch: ON", "Screen: AI", "Filter: Out", "Video Gain: x 1", "Lamp Switch: ON", "First Lamp: 300 mV", "Second Lamp: 160 mV", and "Motor Enable: enable".
- Image:** A central heatmap showing the beam profile. A box highlights a specific point: "Image (16.6148, -0.4876, 3196)".
- Horizontal projection:** A graph of Amplitude [a.u.] vs X [mm]. Statistics: Mean = -12.75 [mm], Sigma = 20.61 [mm], Amplitude = 6447.0 [a.u.].
- Vertical projection:** A graph of Amplitude [a.u.] vs Y [mm]. Statistics: Mean = -2.11 [mm], Sigma = 16.98 [mm], Amplitude = 245.09 [a.u.].
- Bottom Panel:** Contains buttons for "Acquire", "Start Monitoring", "Stop", "Save", and "Continuous Saving". It also shows acquisition type, camera switch, screen, filter, video gain, and lamp settings.

Capture du faisceau





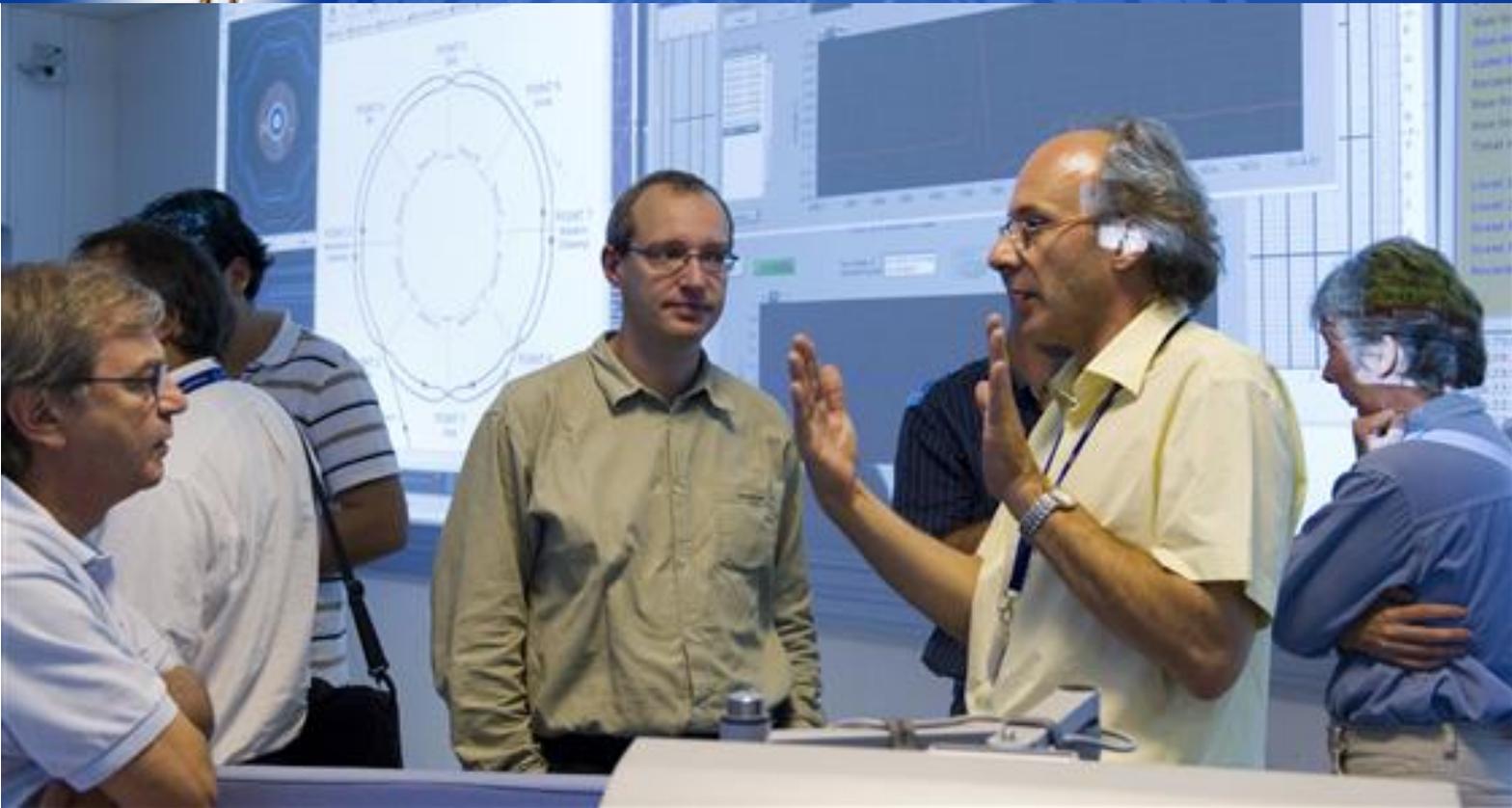
# The ATLAS Experiment

CERN

Public

ATLAS Cavern Webcam

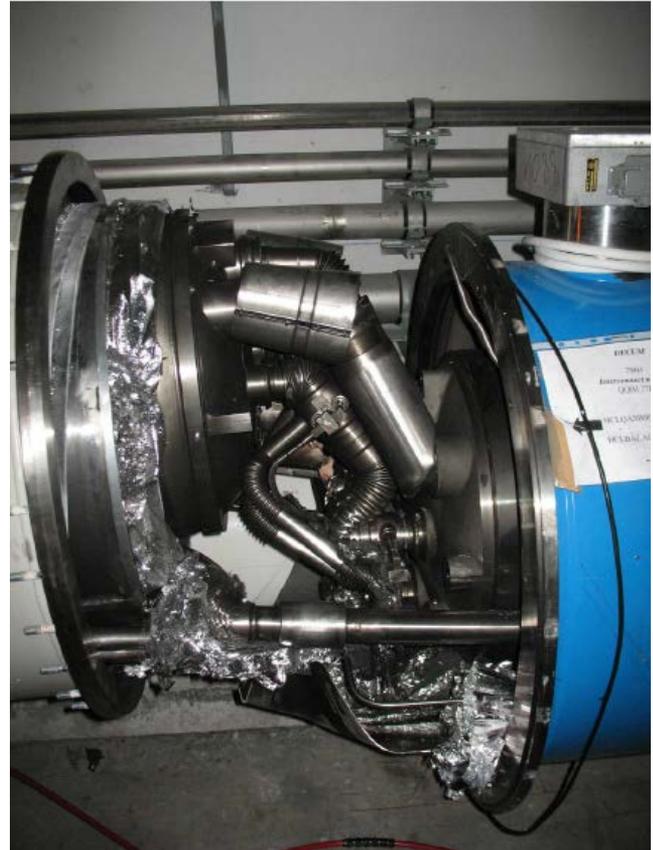
Operation



## 3.3 - Les collisionneurs

### L'accélérateur LHC

Puis incident 9 jours plus tard  $\Rightarrow$  1 année de réparation



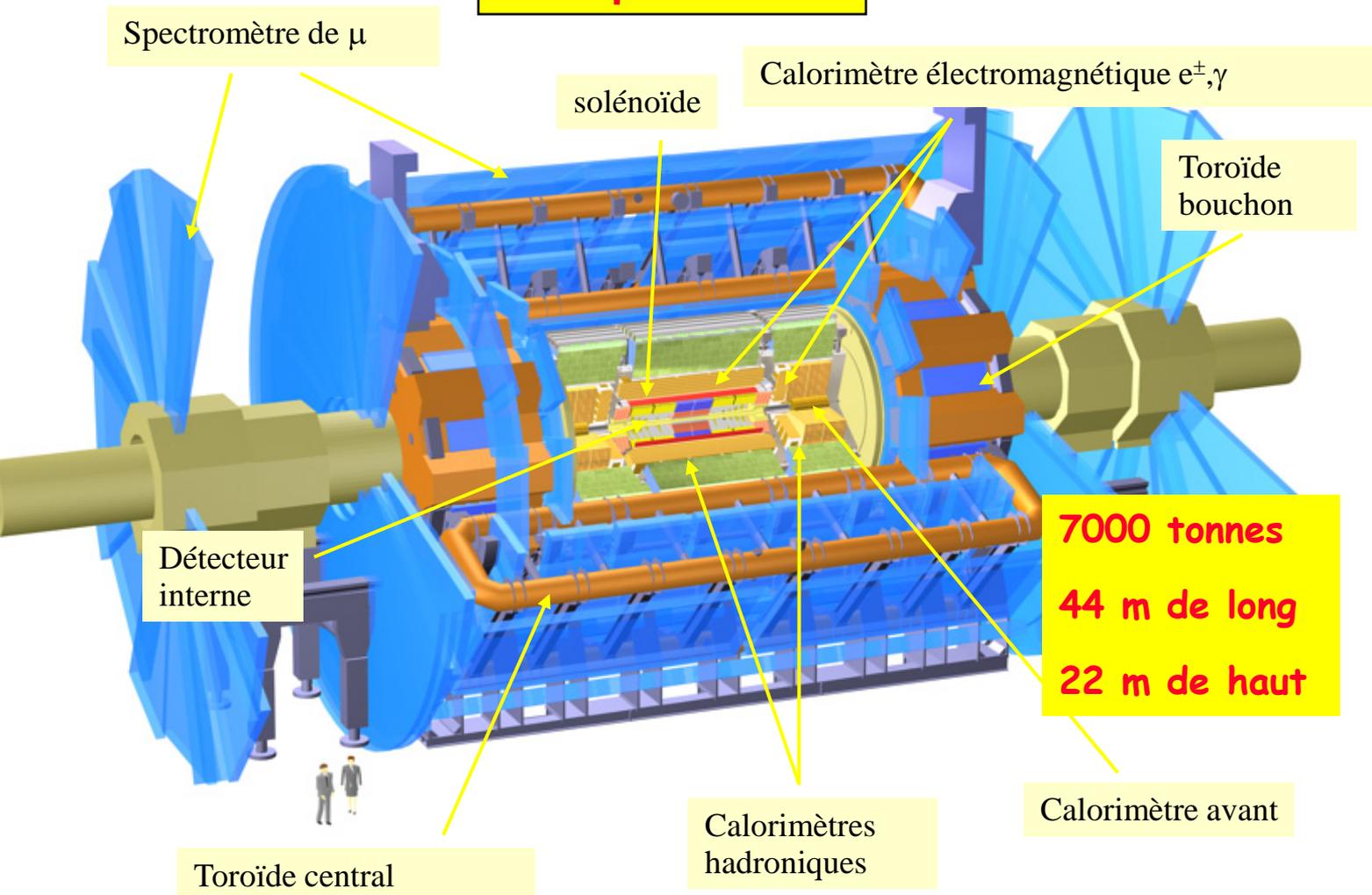
### Incident during powering

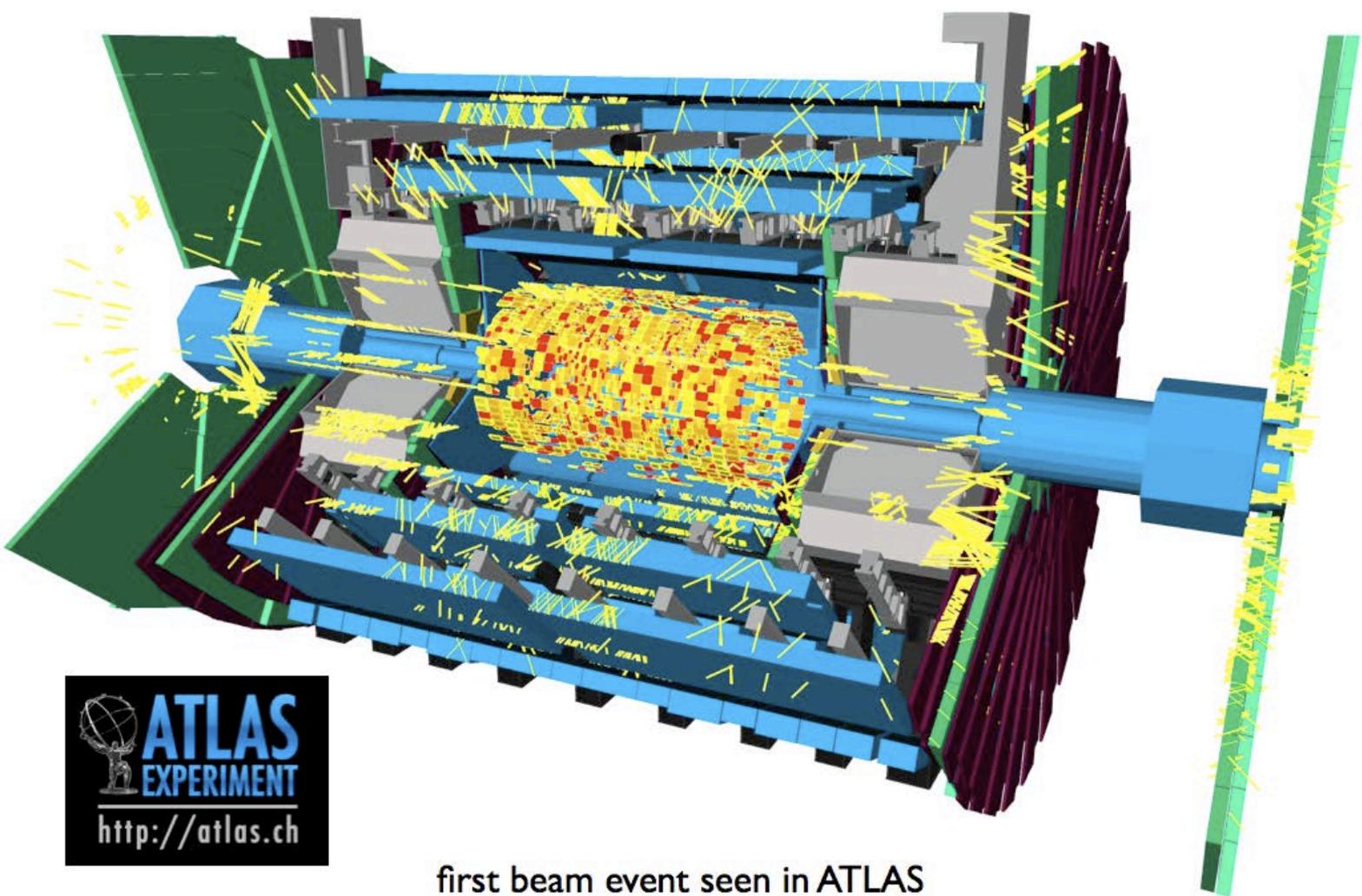
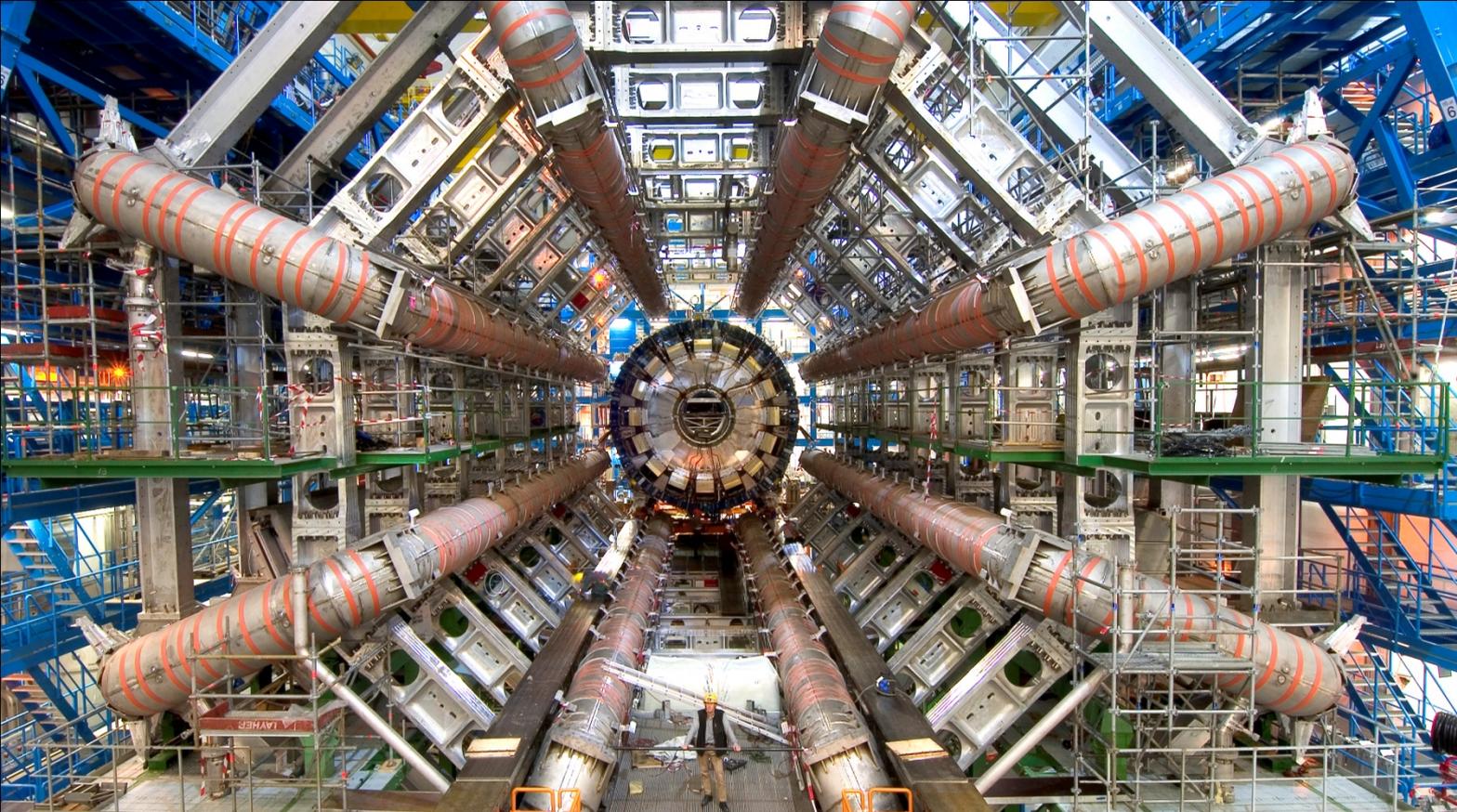
On 19 September 2008 morning, the current was being ramped up to 9.3 kA in the main dipole circuit at the nominal rate of 10 A/s, when at a value of 8.7 kA, a resistive zone developed in the electrical bus in the region between dipole C24 and quadrupole Q24. No resistive voltage appeared on the dipoles of the circuit, so that the quench of any magnet can be excluded as initial event. In less than 1s, when the resistive voltage had grown to 1 V and the power converter, unable to maintain the current ramp, tripped off, the energy discharge switch opened, inserting dump resistors in the circuit to produce a fast power abort. In this sequence of events, the quench detection, power converter and energy discharge systems behaved as expected.

# Assemblages de sous-détecteurs

- L'anatomie d'un gros détecteur : structure en oignon
  - ▶ Couches internes : mesure des trajectoires
  - ▶ Aimant : courber les particules chargées
  - ▶ Calorimètres : arrêter et mesurer l'énergie des particules
  - ▶ A l'extérieur, chambres détectant les muons
- Ces détecteurs essaient de couvrir tout l'espace ( $4\pi$ )

## Exemple : ATLAS





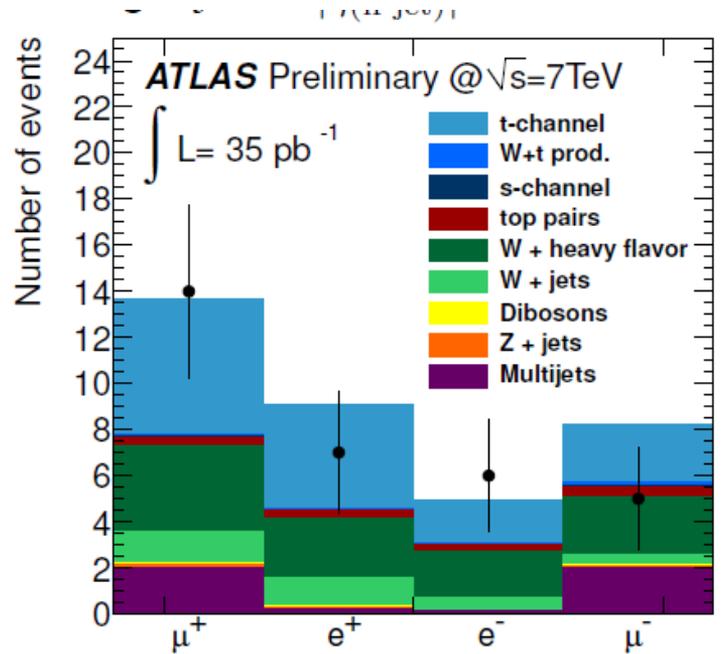
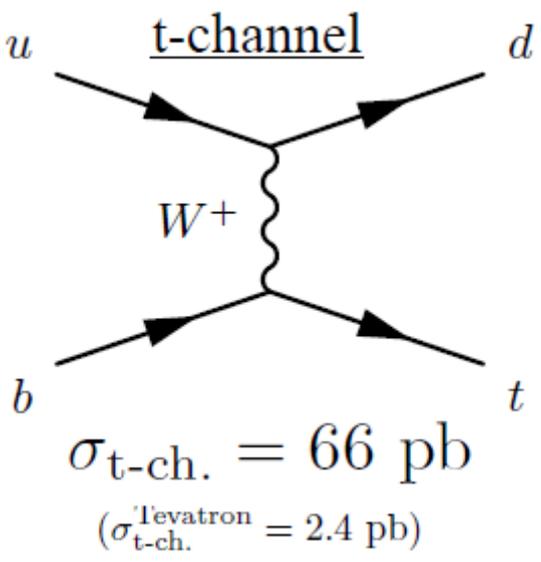
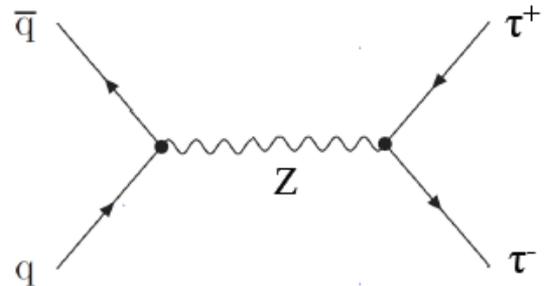
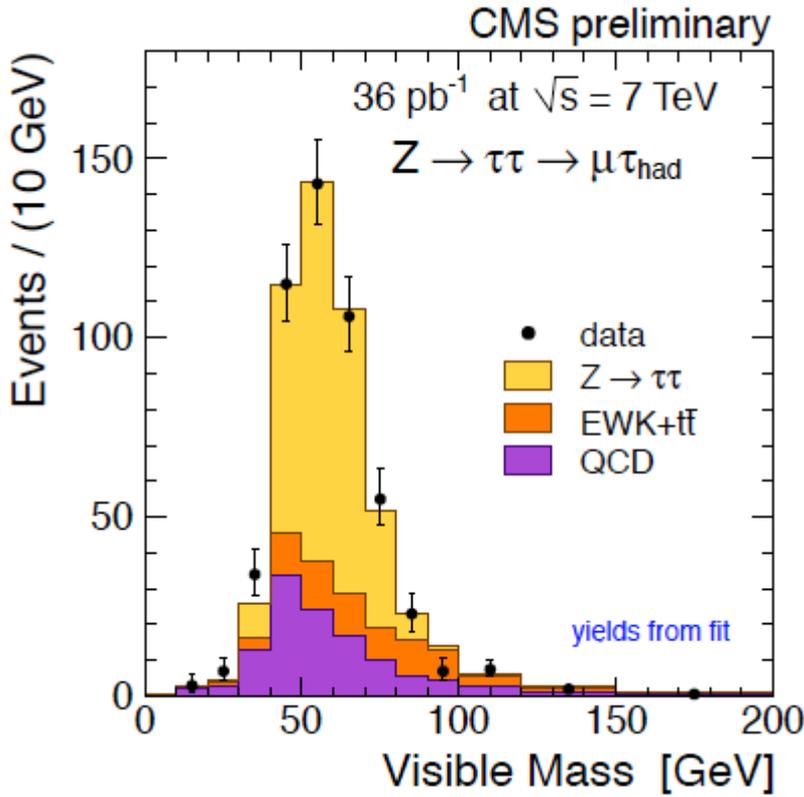
 **ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

first beam event seen in ATLAS

# 3.3 - Les collisionneurs

## Premiers résultats au LHC

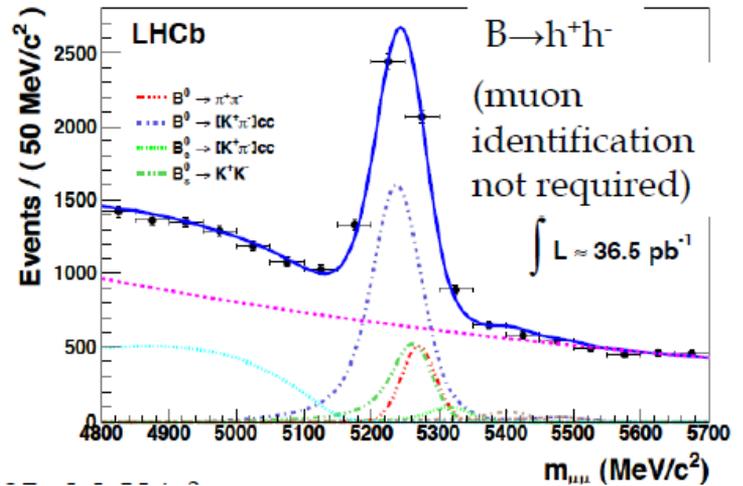
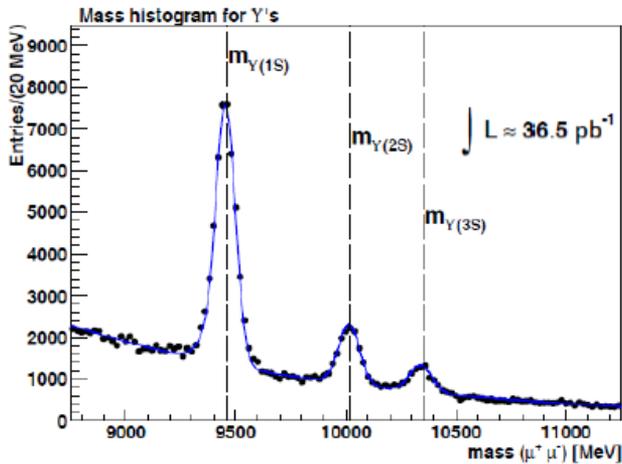
Excellents résultats sur les données 2010



## 3.3 - Les collisionneurs

### Premiers résultats au LHC

Excellents résultats sur les données 2010



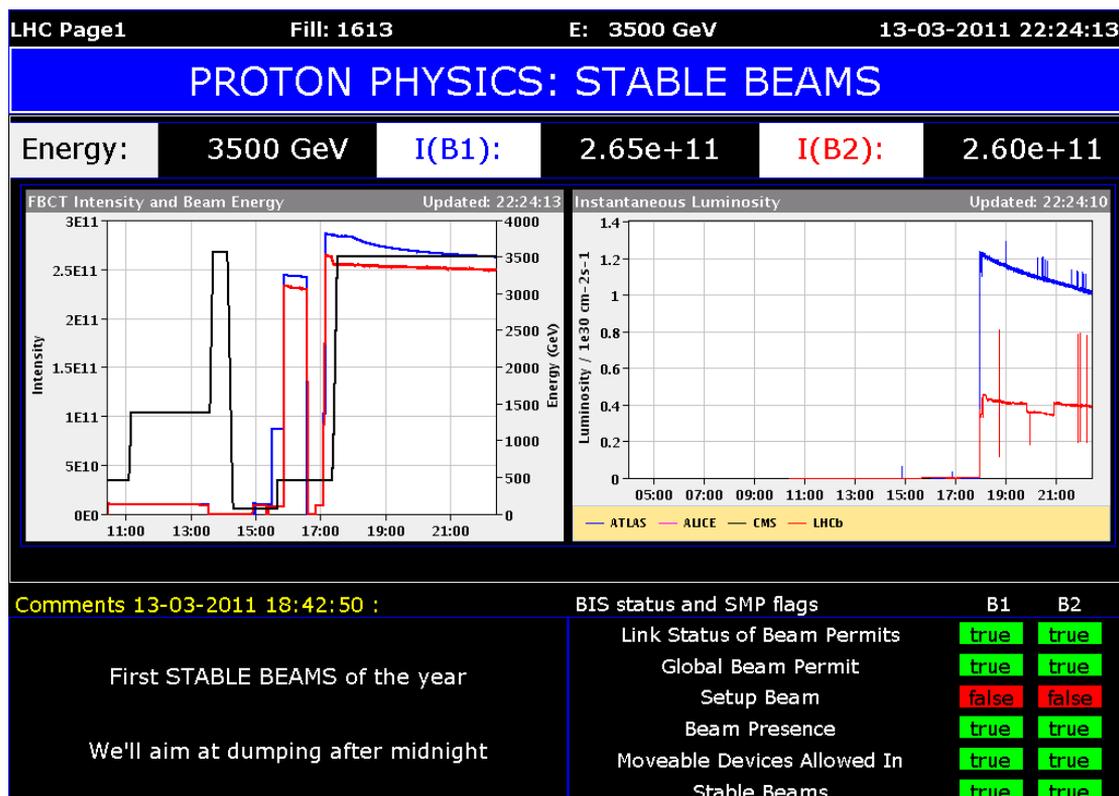
## Present LHC proton parameters

Parameter	End 2010	Nominal
N (p/bunch)	$1.2 \times 10^{11}$	$1.15 \times 10^{11}$
$k_b$ (no. bunches)	368	2808
$\varepsilon$ ( $\mu\text{m rad}$ )	2.4-4	3.75
$\beta^*$ (m)	3.5	0.55
$\sigma^*$ ( $\mu\text{m}$ )	45-60	16
L ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$2 \times 10^{32}$	$10^{34}$

## 3.3 - Les collisionneurs

### L'accélérateur LHC en 2011

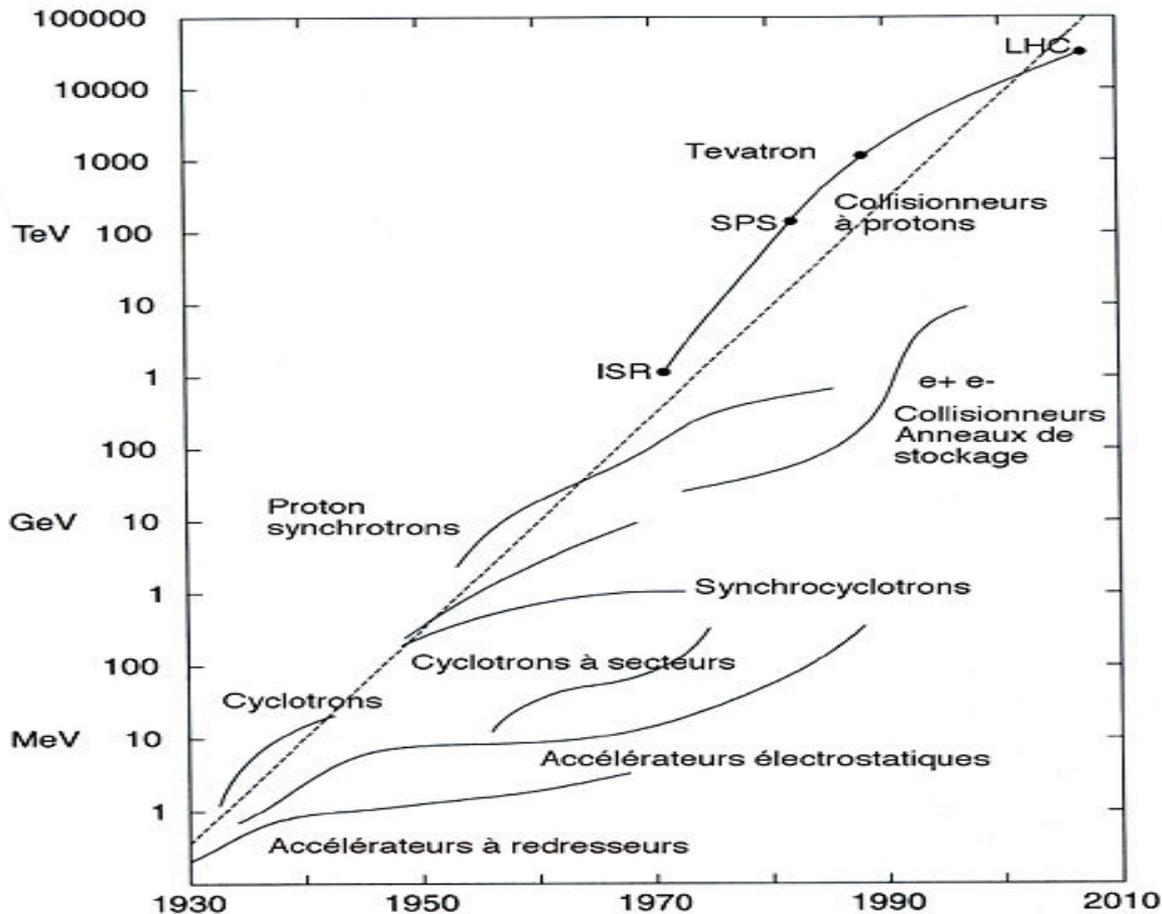
- Beam energy will stay at 3.5 TeV for 2011 run
  - For 2012 run, can be revisited based on 2011 run experience
- Estimated no. of days at high luminosity ~135 days (for a total time of 260 days !) – 50% !!
- Luminosity of  $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  could be reached with 75 ns beams.
  - *Integrated L ~1-3 fb<sup>-1</sup>.*
  - *Optimum parameters to be selected carefully*
- Not given yet... (UFOs, e-cloud, SEU)...but on the good way



## 3.3 - Les collisionneurs

### Evolution des machines

- Malheureusement, la loi linéaire n'est plus trop vérifiée
  - ▶ Coût, délai, technique



- Machines en fonctionnement (ou qui viennent juste de s'arrêter)
  - ▶ Belle (Japon), BABAR stoppé en 2008 (SLAC) :  $e^+e^-$
  - ▶ Tevatron (Chicago) : p-anti p (jusqu'en sept. 2011 )
  - ▶ Hera (Hambourg) stoppé en 2007 : e-p
- Futures Machines
  - ▶ LHC : proton-proton (2010)
  - ▶ ILC :  $e^+e^-$  (2025?)

## § 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Quelques principes. Les principales fonctions des détecteurs :

- Assemblages de sous-détecteurs
- Mesures de trajectoires et de quantité de mouvement
- Mesures d'énergie
- Identification de particules
- Problèmes d'acceptance
- Déclenchements et sélection d'événements

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Les trajectographes (1)

#### ➔ Mesurer la quantité de mouvement P

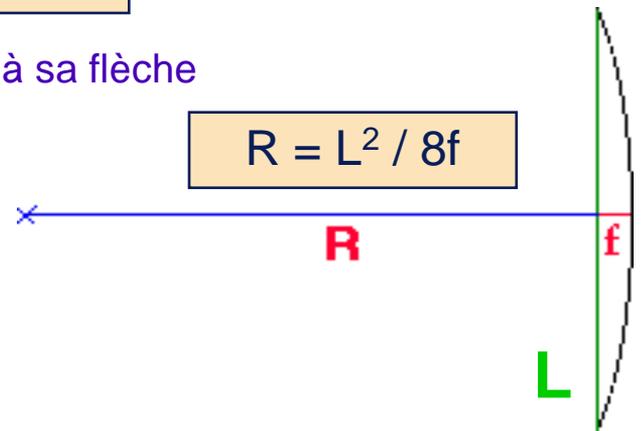
- Mesure de P = mesure de trajectoire (traces chargées)
  - ▶ Valeur de P proportionnelle au rayon de courbure

$$P \text{ (GeV)} = 0.3 B \text{ (tesla)} R \text{ (m)}$$

- ▶ Le rayon de courbure d'un arc est lié à sa flèche



$$R = L^2 / 8f$$



Reconstitution de la trajectoire à partir de pointés dans divers détecteurs

- Exemple détecteur LEP : L = 2m, B = 1.2 Tesla

P(GeV)	R(m)	f(cm)
1.0	2.8	18.
10.0	27.8	1.8
45.0	125.	0.4

- Pour avoir une bonne mesure de P
  - ▶ Mesurer assez long
  - ▶ Bien aligner les détecteur
  - ▶ Champ magnétique intense
  - ▶ Minimisation de la matière (quasi vide)



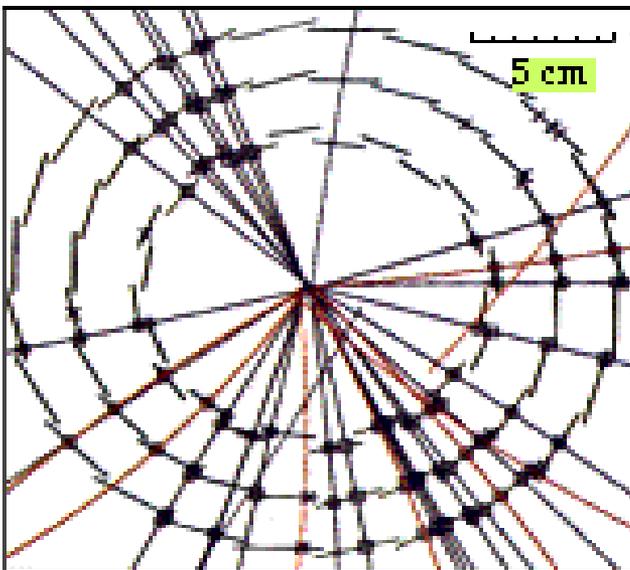
## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Les trajectographes (2)

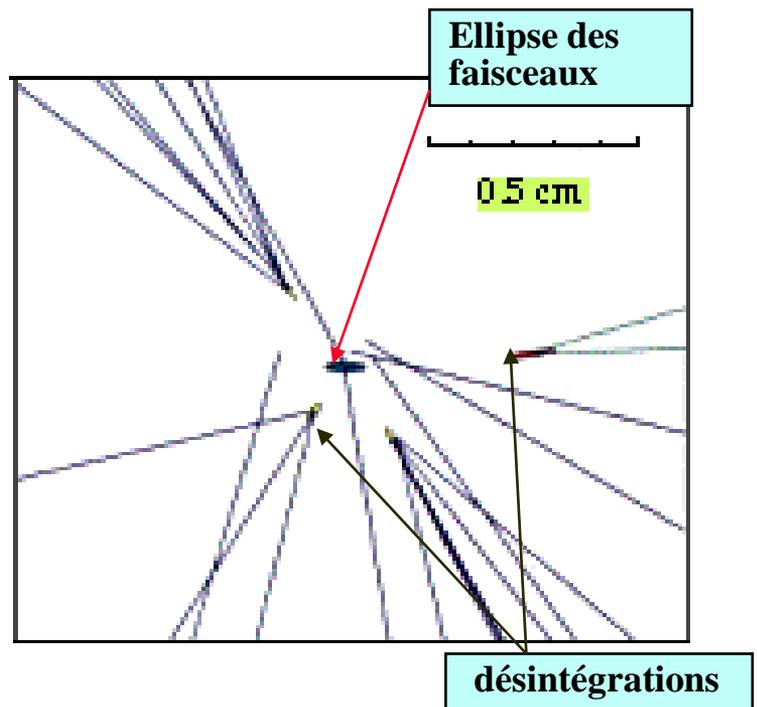


## Mesurer les courtes durées de vie

- Très courts parcours et «**micro vertex**»
  - ▶ Observer les désintégrations de mésons «charmés» et «beaux» avec des détecteurs «micro vertex»
- **Défi** : voir des parcours de 1 mm en extrapolant de 5 cm
  - ▶ La zone où se produisent les désintégrations est dans le tube à vide, à quelques cm de la première couche du détecteur
  - ▶ Le détecteur comprend 2 à 3 couches minces destinées à fournir des pointés très précis
  - ▶ Précision d'un pointé micro vertex : une dizaine de microns avec des micro pistes de silicium



Le tube à vide et les pointés du micro vertex de DELPHI

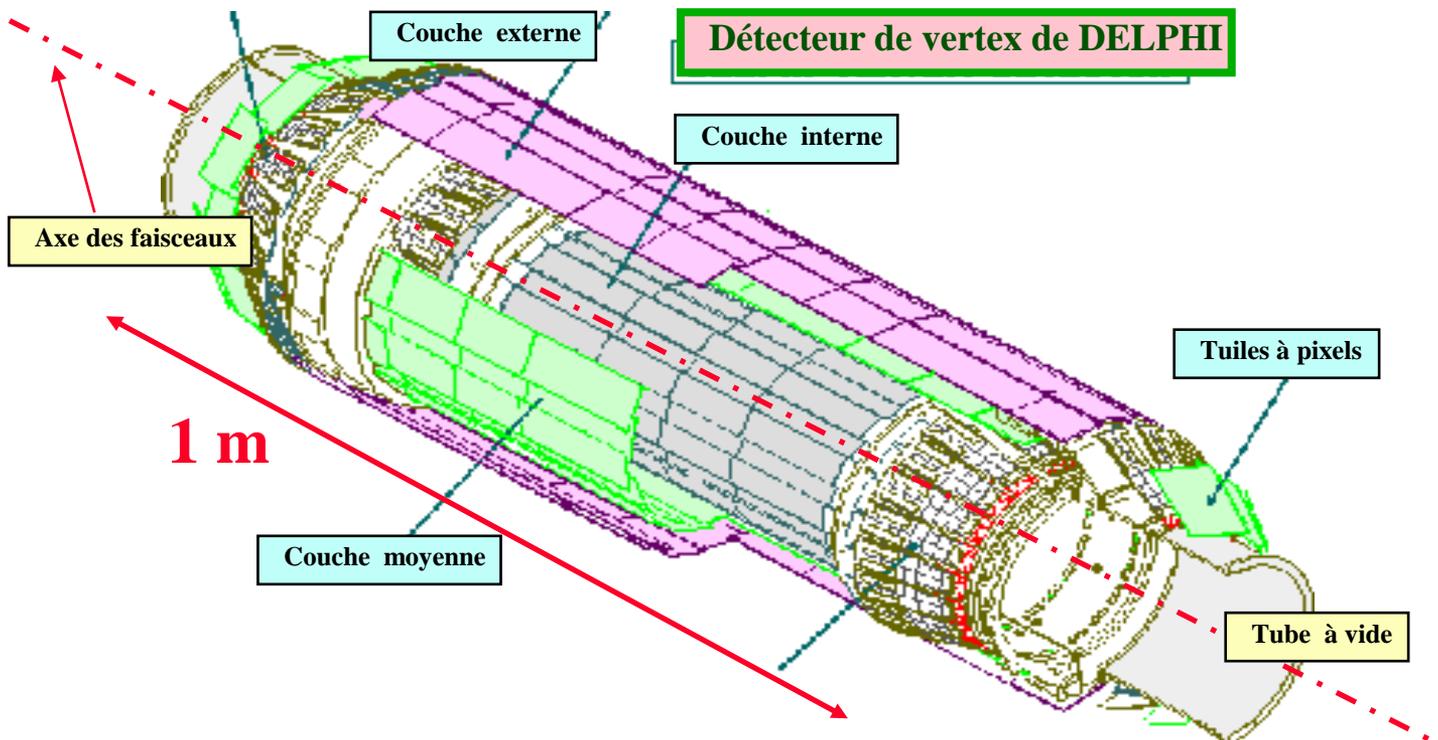


Agrandissement

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Un détecteur de vertex (DELPHI LEP 200)

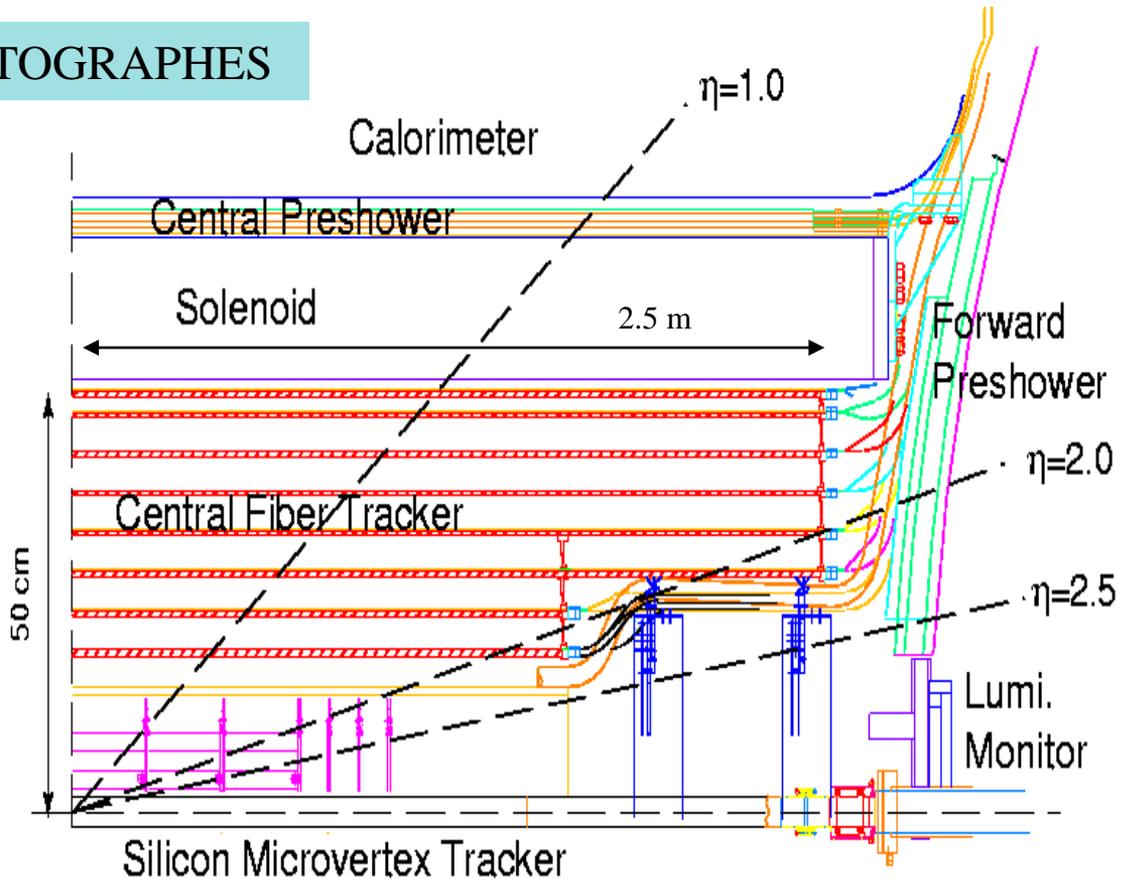
- Couverture de la partie centrale
  - ▶ Trois couches cylindriques de micro pistes pour la mesure des coordonnées
    - x,y perpendiculaires au faisceau
    - z le long du faisceau
- Couverture des parties avant et arrière
  - ▶ détecteurs à pixels et micro pistes inclinés pour garder une bonne incidence pour les particules le long de l'axe des faisceaux
- Il faut un alignement très précis des multiples composantes (tuiles) du détecteur



## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Trajectographie dans D0

#### TRAJECTOGRAPHES



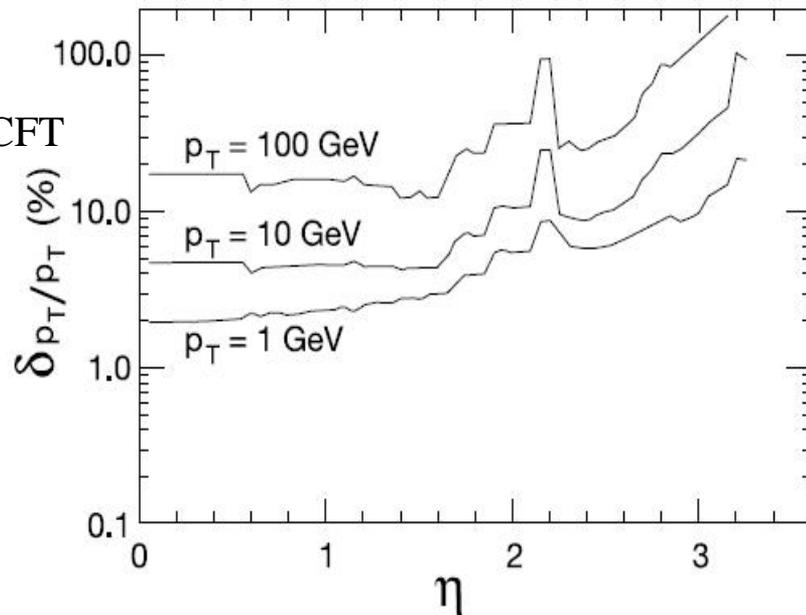
#### CFT

⇒ **trigger L1** (traces au dessus de seuils avec  $p_{T\min} \geq 1.5$  GeV / trigger limité  $|\eta| < 1.8$ )

⇒ traces utilisées par le trigger L2

⇒ L3 : utilise la lecture complète du CFT

- Position du vertex primaire:  $\sigma_z = 35 \mu\text{m}$
- Traces :  $\sigma(p_T)/p_T$  :



# 3.4 - Les fonctions des détecteurs

## Trajectographie dans D0

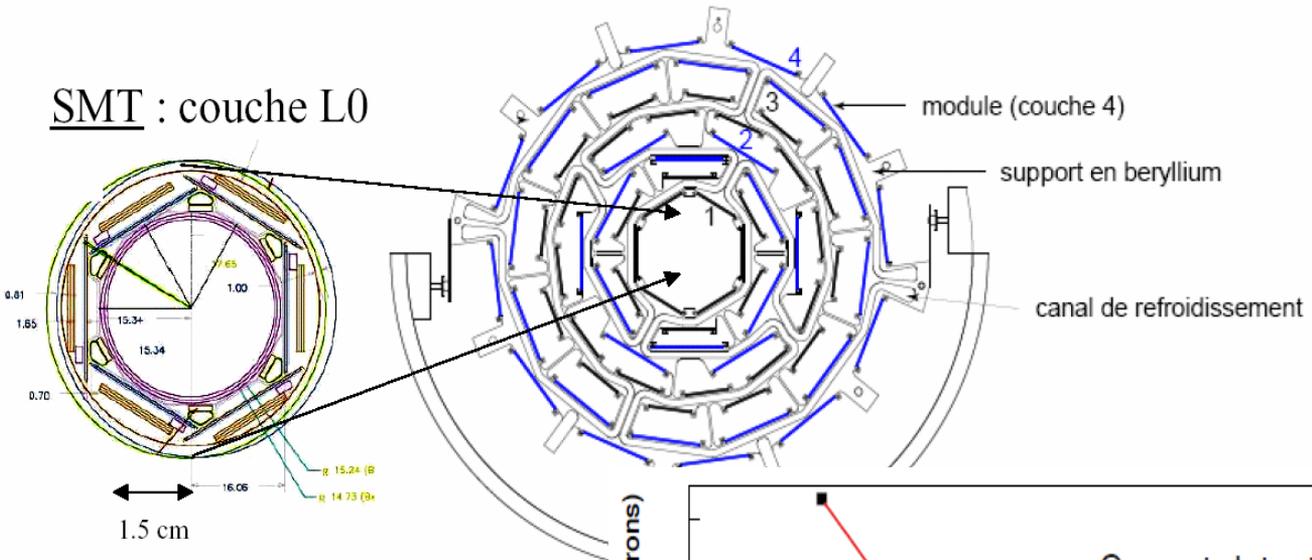


Phase de construction du SMT en 2000

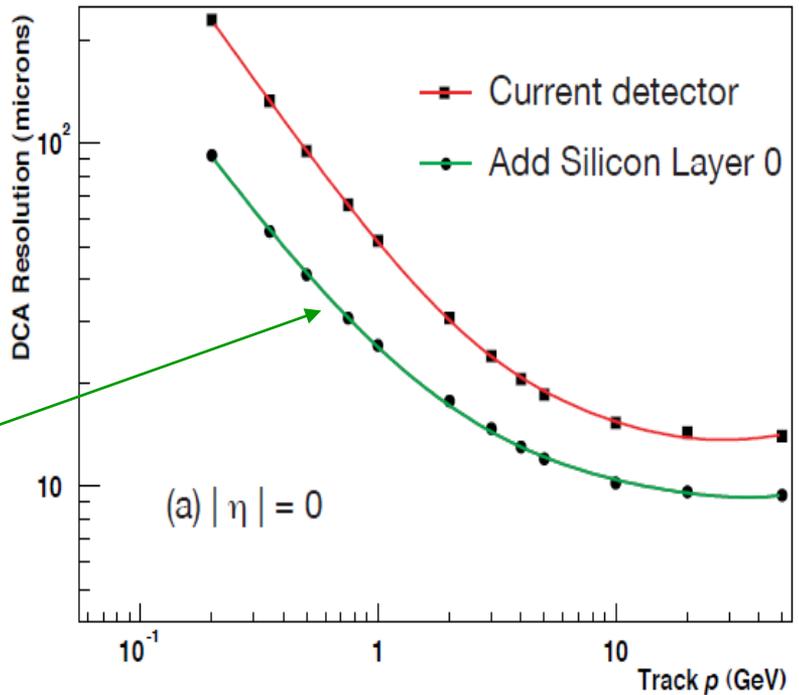


LE TRAJECTOGAPHE À MICRO-PISTES SILICIUM

3 m<sup>2</sup> de Si



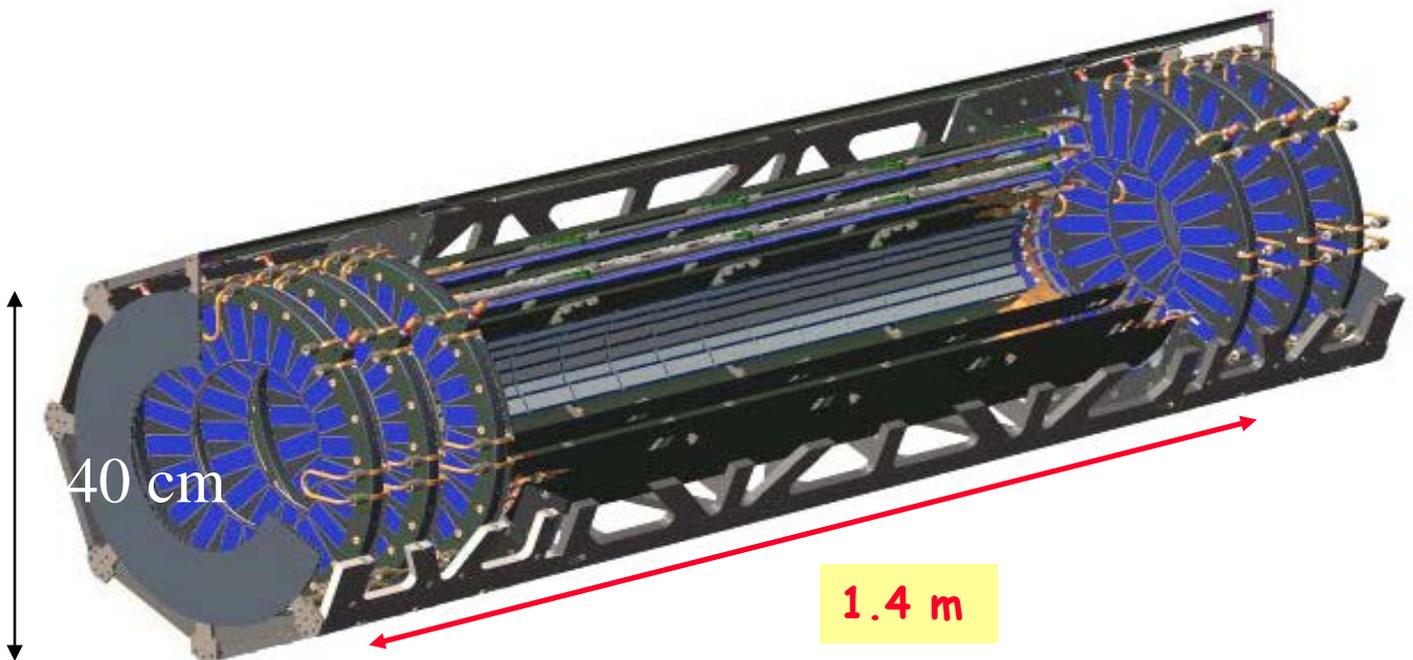
- couverture  $|\eta| \approx 3$
- $\sigma_z = 40 \mu\text{m}$
- $\sigma_{r-\phi} = 10 \mu\text{m}$
- L0:  $1.5 \rightarrow 2.3\text{cm} \Rightarrow \sigma_{\text{IP}} \times 4$  ( $p_T \sim 1\text{GeV}$ )
- $\varepsilon(\text{b-tag}): +10\%$



## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

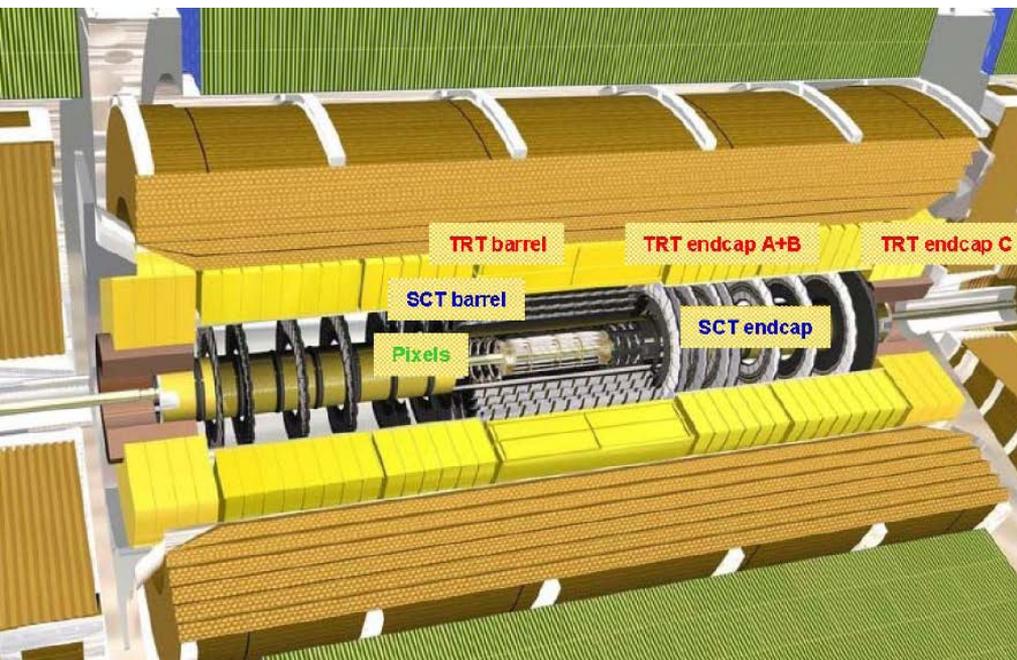
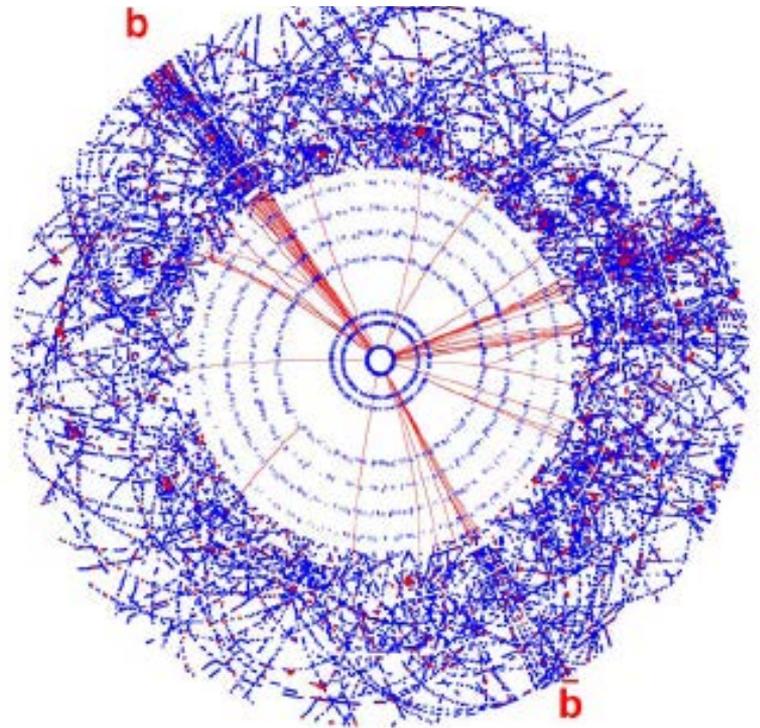
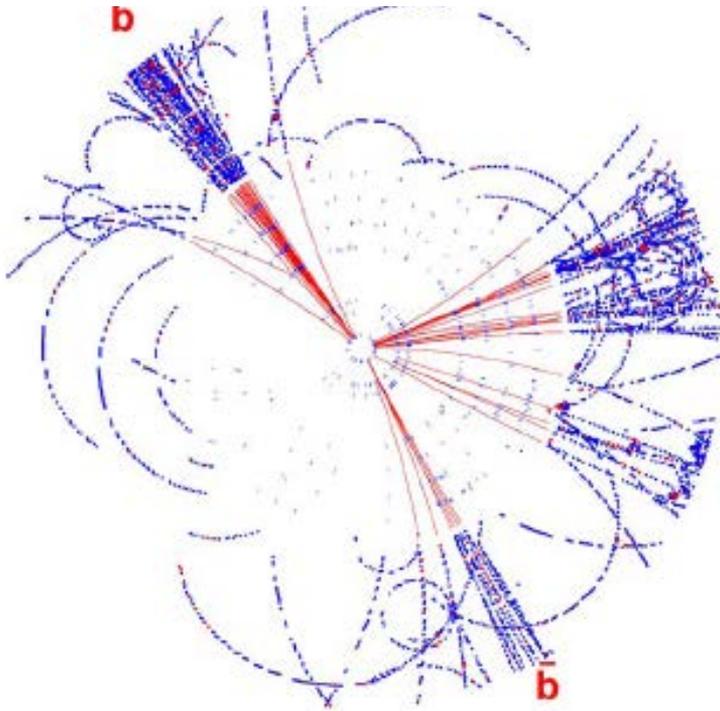
### Le détecteur de vertex d 'Atlas

- Pixels au lieu de micro pistes
- 3 couches à  $R=5, 9, 12$  cm  
soit  $\sim 100$  millions de canaux électroniques !
- 3 disques pour détecter les particules a petits angles
- Résolution  $60 \mu\text{m}$  le long de l'axe du faisceau  
et  $12 \mu\text{m}$  dans le plan perpendiculaire au faisceau
- Insertion du détecteur de pixels indépendante du  
reste du détecteur



# Le détecteur de traces d'Atlas

- Le “B-tagging” sera essentiel
- Exemple d'événement  $H \rightarrow b\bar{b}$  à zéro luminosité et à la luminosité nominale:



- **TRT**: gaz, à rayonnement de transition
- **SCT**: 61 m<sup>2</sup> de micro-piste de silicium
- **Pixels**: 1.8 m<sup>2</sup> de silicium et 80M de canaux

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Le système calorimétrique

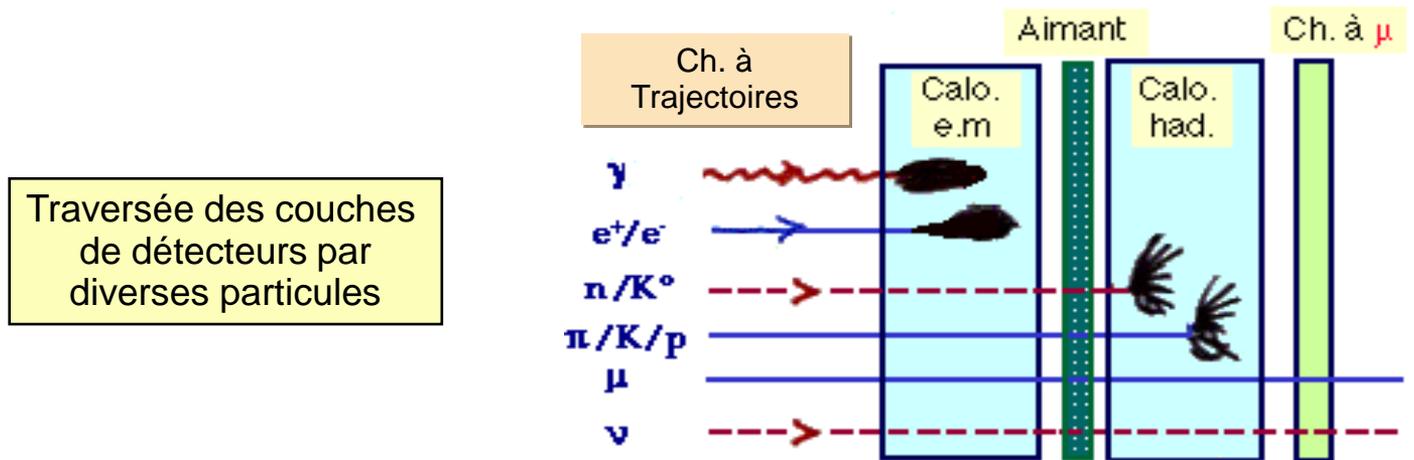


**Identification des particules**



**Mesure de leur énergie**

- Passage des particules dans la matière :
  - ▶ Les électrons sont vite arrêtés par la matière, car leur masse est faible et ils rayonnent beaucoup de photons
  - ▶ Les autres particules «rayonnent» peu, mais interagissent nucléairement, ... sauf les muons
  - ▶ Les muons sont donc les plus pénétrants (sauf neutrinos)
- Dispositif classique de **3 couches de calorimètres**
  - ▶ Calorimètre électromagnétique (gerbes  $e^+$   $e^-$   $\gamma$ )
  - ▶ Calorimètre hadronique
  - ▶ Chambre à muons



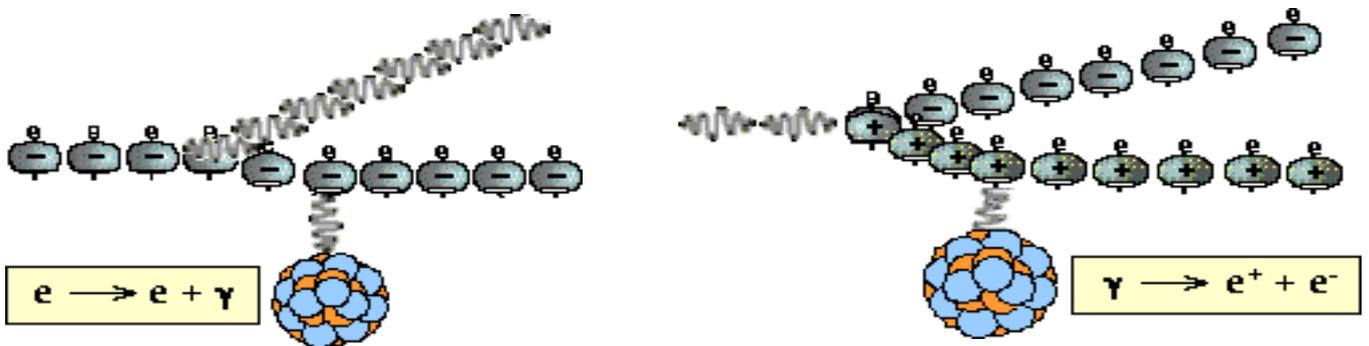
- Schéma idéalisé :
  - ▶ Un neutron ou un pion peuvent interagir dès le calorimètre électromagnétique, les gerbes se chevaucher, etc...

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Calorimètres électromagnétiques (1)

- Deux phénomènes arrêtent  $\gamma$ , électrons et positrons à proximité de noyaux lourds :

- ▶ Rayonnement de freinage :  $e \rightarrow e + \gamma$
- Production de paires :  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$



- ▶ Ils multiplient le  $\gamma$  ou  $e^+$  ou  $e^-$  initial en une gerbe d'électrons et positrons de basse énergie

Gerbe  
électromagnétique



- Gerbes : photons, électrons, positrons et  $\pi^0$

- ▶ Le fait que l'impact soit précédé d'une trajectoire différencie une particule chargée ( $e^+/e^-$ ) et un  $\gamma$
- On utilise des métaux lourds (Pb) intercalé avec un milieu «détecteur» (par ex. Argon liquide)
- Les particules chargées cèdent leur énergie au milieu par ionisation

Somme énergies recueillies =  $E(\text{particule primaire})$

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Calorimètres électromagnétiques (2)

#### ➤ Mesure de l'énergie

– Photons, électrons, positrons sont relativistes :  $E \approx P$

#### ■ Les gerbes électromagnétiques sont spécifiques des $\gamma$ et $e^+ / e^-$

▶ La propriété des électrons de rayonner beaucoup de photons est liée à leur faible masse. Les autres particules «rayonnent» peu

#### ■ Précision de la mesure en énergie :

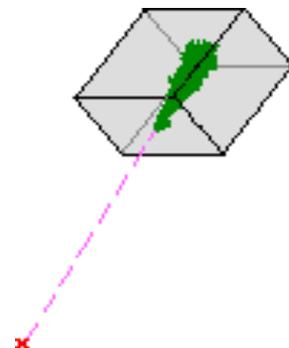
▶ Exemple d'un bon calorimètre : SPACAL H1

$$\sigma_E / E = 1.0 \% + 7\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

▶ Pour un photon de 10 GeV, la précision est de 3%

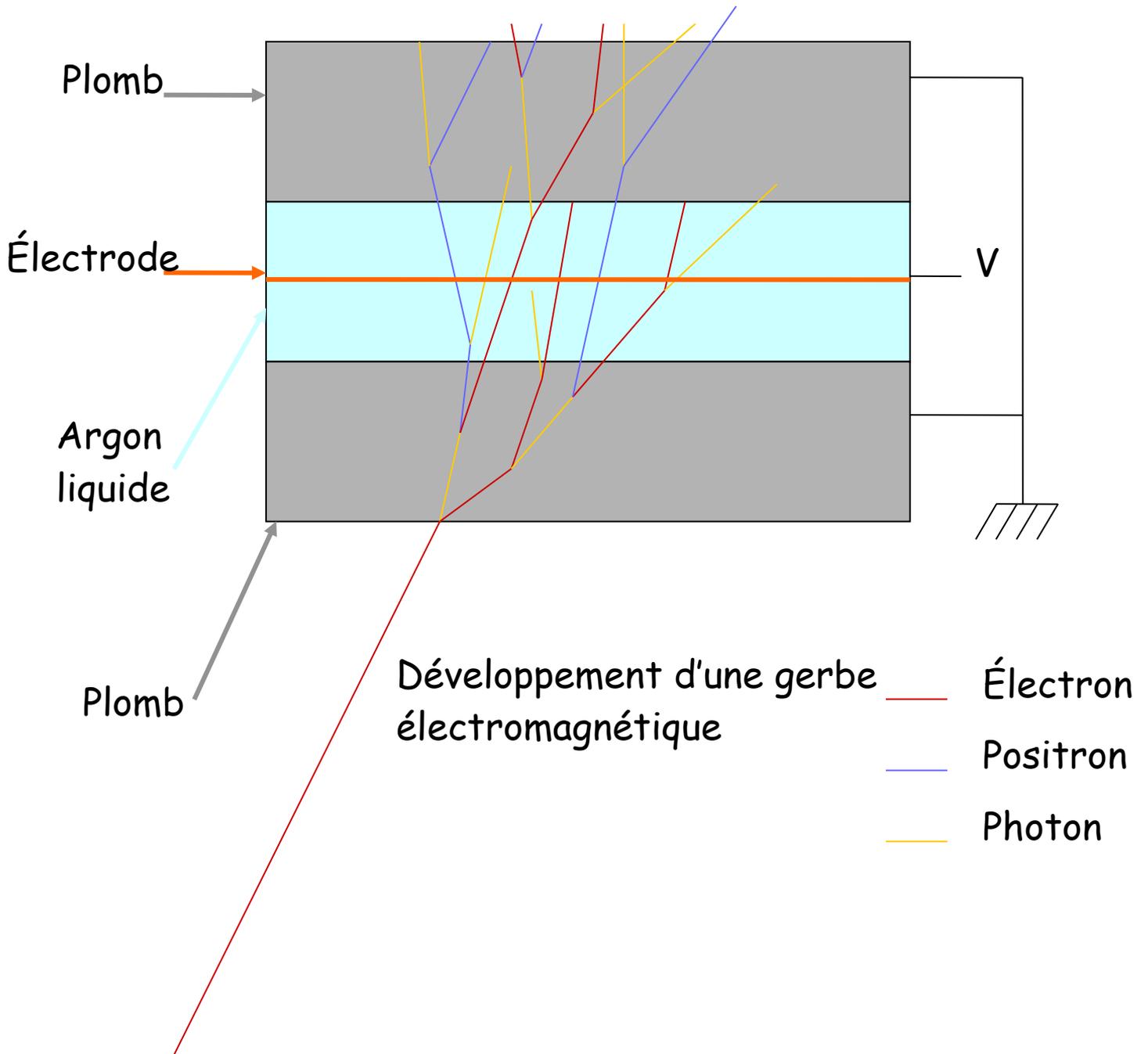
#### ➤ Mesure de la direction : le pied de gerbe fournit la direction d'un gamma

Reconstitution de la direction d'un gamma en connectant le point d'interaction et le pied de gerbe



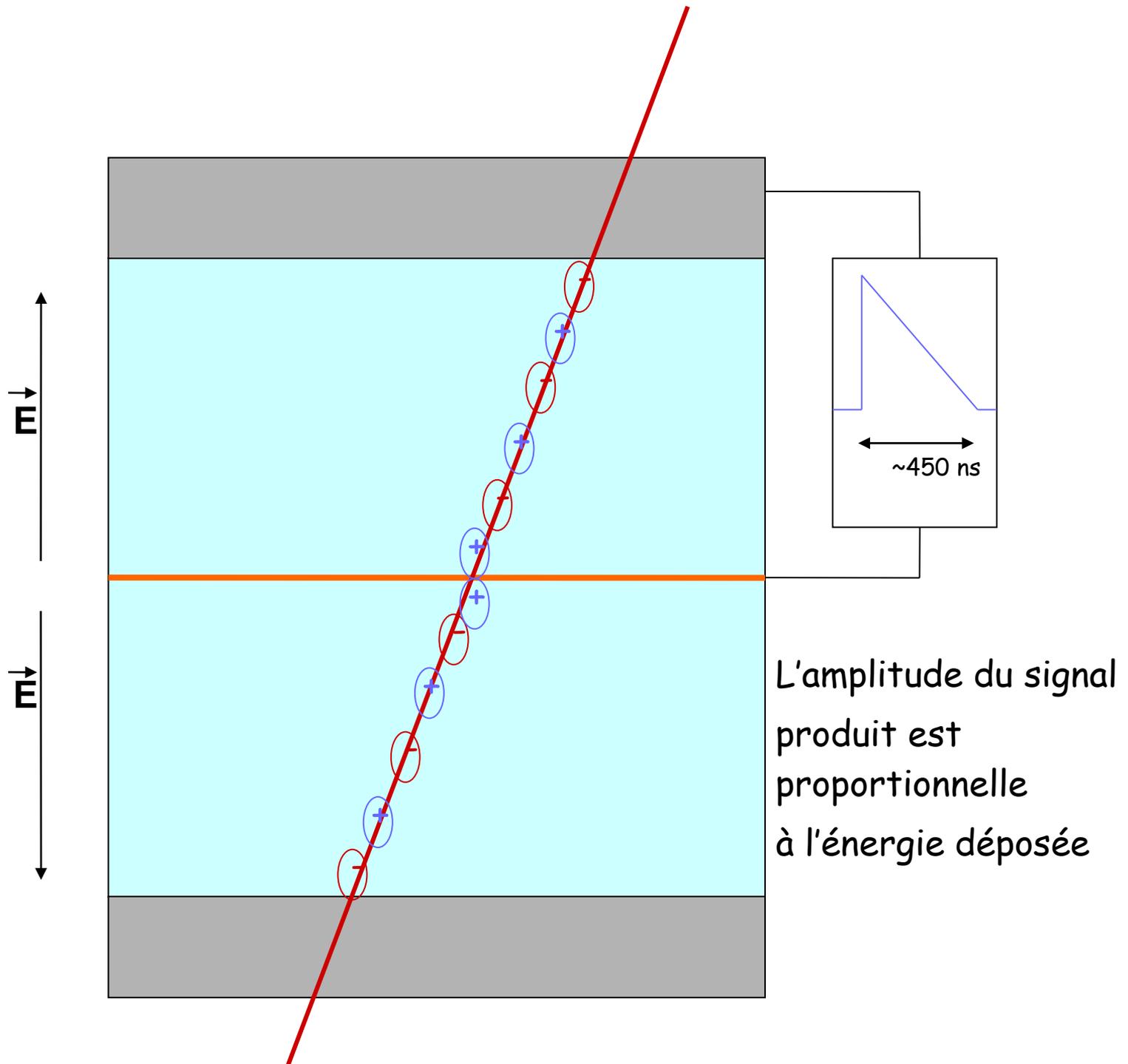
### 3.4 - Les fonctions des détecteurs

## Principe de fonctionnement (1)



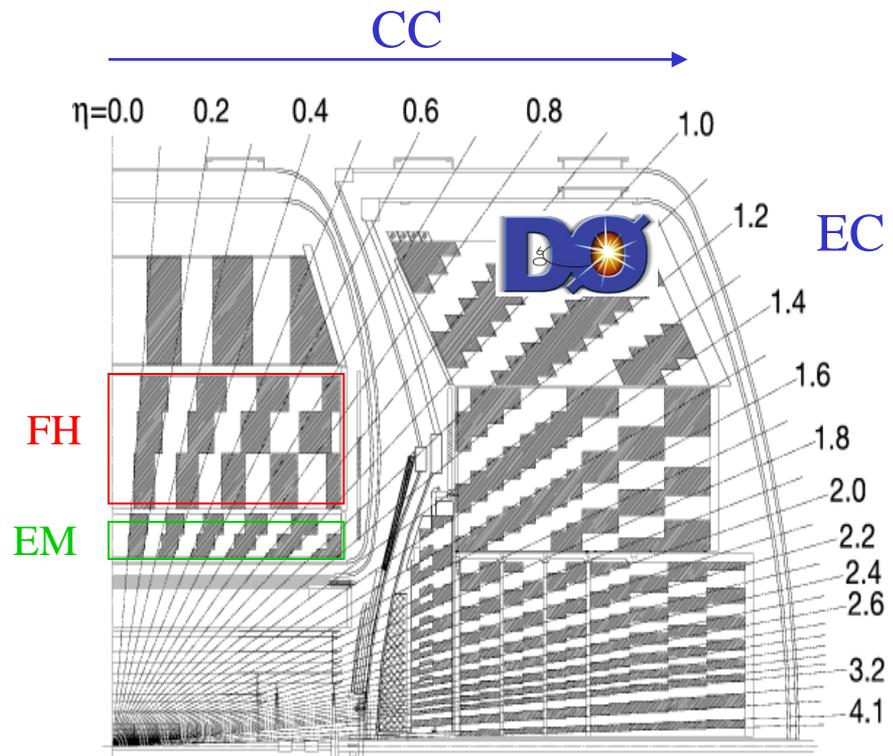
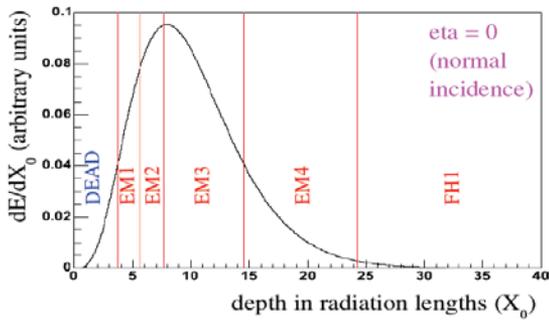
## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Principe de fonctionnement (2)

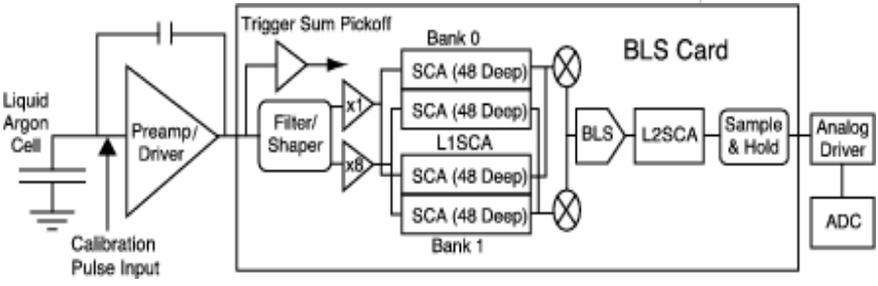


# 3.4 - Les fonctions des détecteurs

## Le CALO Argon Liquide D0

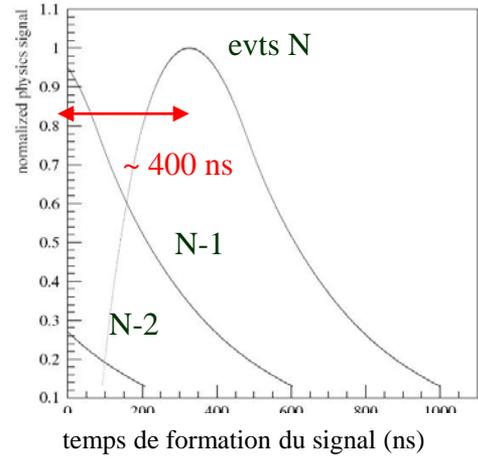


- **BLS:** mise en forme du signal pour la *lecture de précision* et pour le *signal de déclenchement* (+ les mémoires analogiques et la sélection du gain).



**SCA:** mémorise le signal en attendant la décision du L1 (4  $\mu$ s)

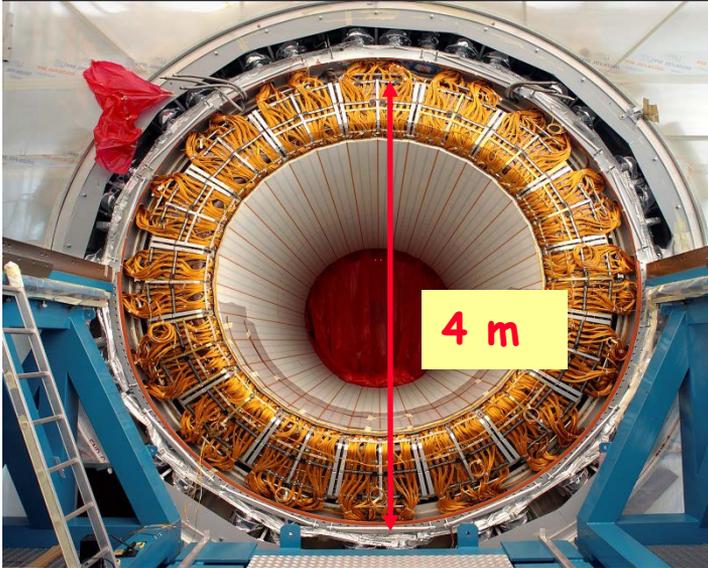
- Le signal issu des préamplificateurs a un temps de montée de 430 ns
- Le temps entre deux croisements de faisceaux est de 396 ns  $\Rightarrow$  *superposition de signal* à la sortie des préamplificateurs
- *Mise en forme rapide* (en parallèle) avec un temps de montée de 150 ns  $\Rightarrow$  *envoyé au L1 et L2*
- Signaux sont sommés par tour = *éléments de base pour le déclenchement du niveau L1*



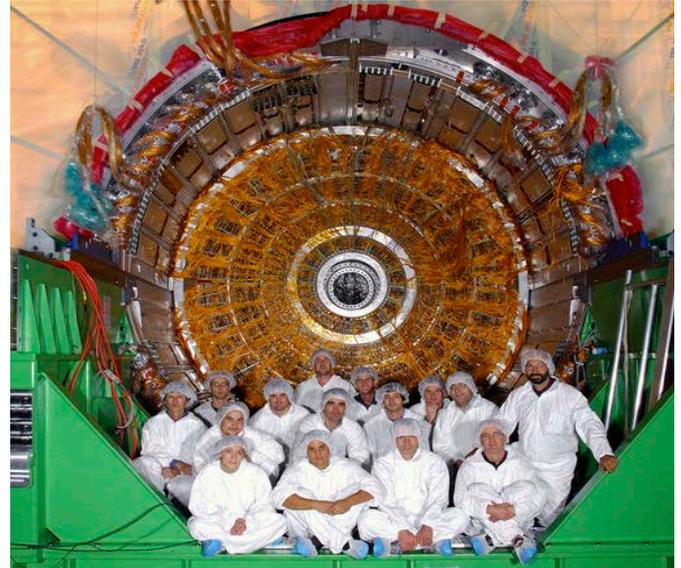
## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Le calorimètre électromagnétique d'ATLAS

partie centrale



partie « tonneau »



Géométrie en accordéon



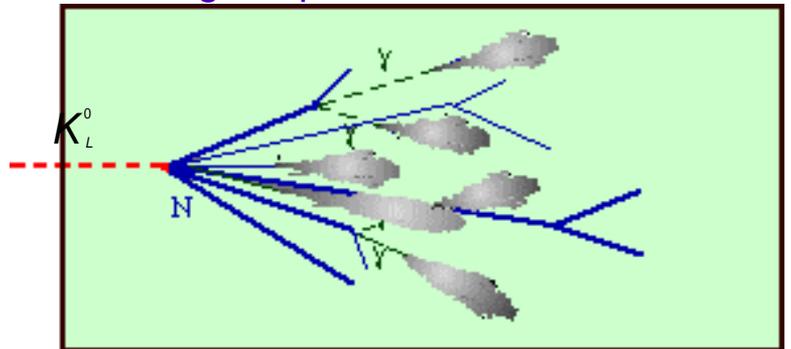
## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Calorimètres hadroniques

#### ■ Le mécanisme des gerbes hadroniques

- ▶ Les hadrons génèrent aussi des gerbes en traversant des matériaux lourds
- ▶ le mécanisme est plus complexe que celui des gerbes électromagnétiques. Les hadrons ne sont pas ou peu sujets au rayonnement de freinage, mais ils interagissent fortement avec des noyaux. Lors de ces interactions des  $\pi^0$ , puis des  $\gamma$  sont aussi produits qui génèrent des sous-gerbes électromagnétiques

Neutron produisant une gerbe dans la ferraille instrumentée d'un calorimètre hadronique



#### ■ Les calorimètres hadroniques

- ▶ Situés après les calorimètres électromagnétiques
- ▶ Matériaux lourds : ex. ATLAS = 2900 tonnes !

#### ■ La précision sur l'énergie est médiocre

- ▶ Exemple d'un calorimètre typique

$$\sigma_E / E = 2.0 \% + 50\% / \sqrt{E (\text{GeV})}$$

- ▶ Pour un neutron de 10 GeV, la précision est de 18%

# 3.4 - Les fonctions des détecteurs

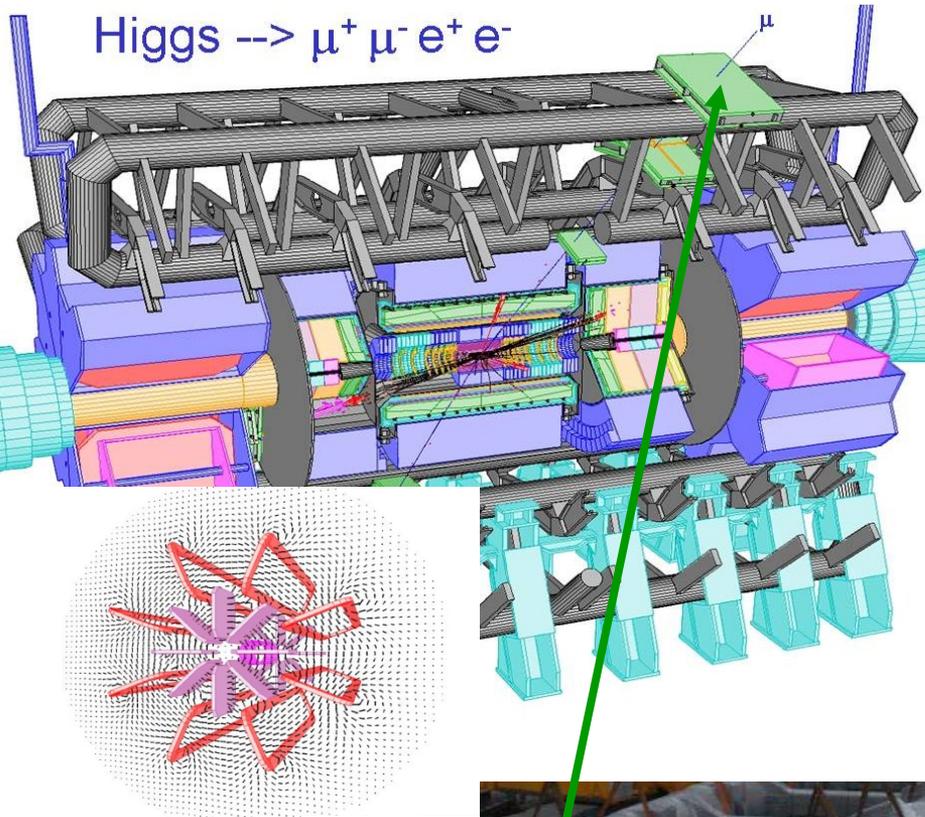
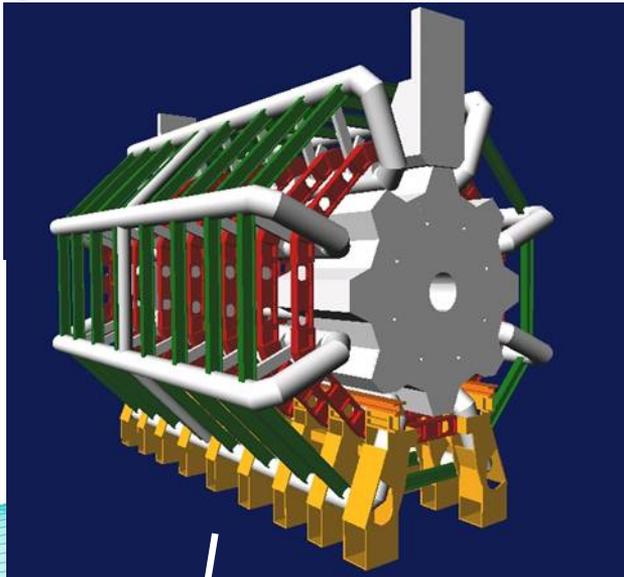
## Le spectromètre à muons

### Spectromètre à muons

- Reconstruire les traces des muons
- Mesurer leur impulsion
- Créer un champ magnétique pour courber les trajectoires



### Aimant toroïdal



650  
chambres à  
muons sur  
trois niveaux  
(tubes à  
dérive)



système d'alignement  
permettant d'atteindre  
des précisions de 30  
microns sur des  
distances de plus de 10m

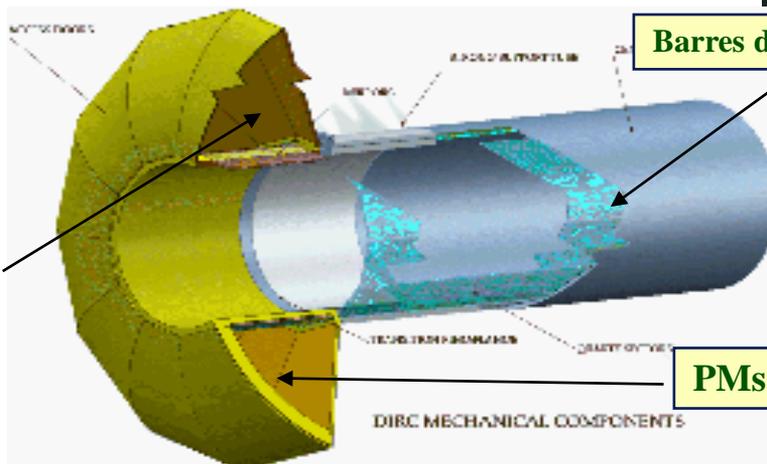
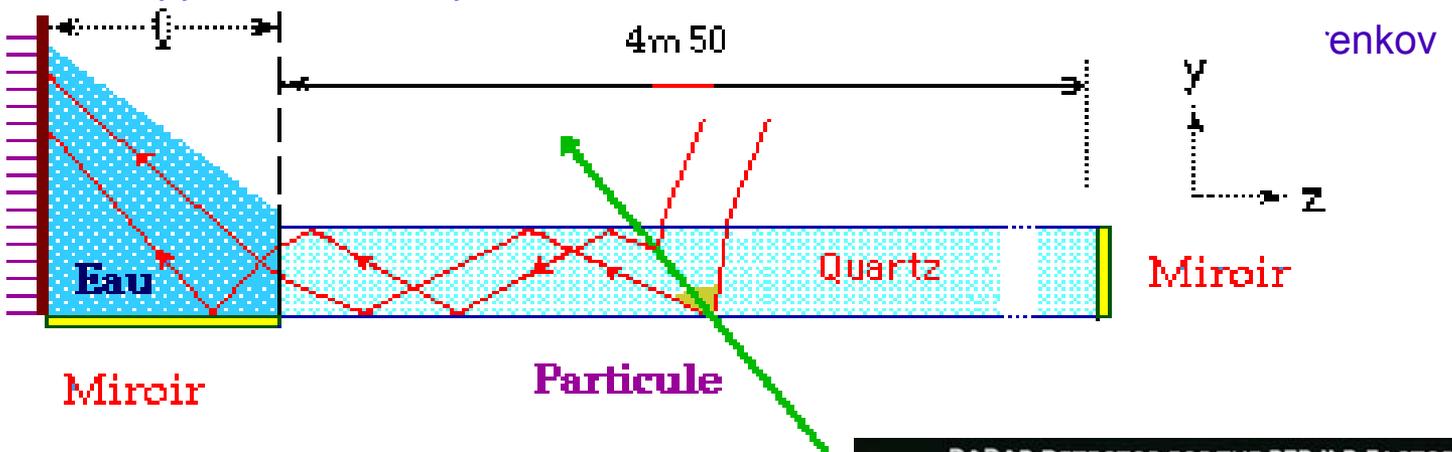
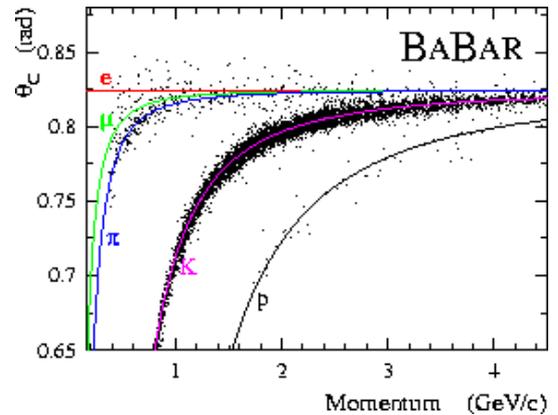
• Simulation d'un événement "Higgs" dans le spectromètre à muons d'Atlas: en gris les bobines du Toroïde, et en vert les chambres à muons

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Un détecteur Čerenkov : le DIRC

- Il est important de distinguer les  $\pi$  et les K jusqu'à 4 GeV dans l'expérience BaBar
- Solution originale du DIRC

- Lumière Čerenkov générée dans de minces barreaux de quartz
- Elle est récoltée, sur le côté, par réflexions multiples
- La lumière finit par pénétrer dans une « piscine » remplie d'eau et vient frapper une mosaïque de PMs



Aussi dans LHCb

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Acceptance d'un détecteur

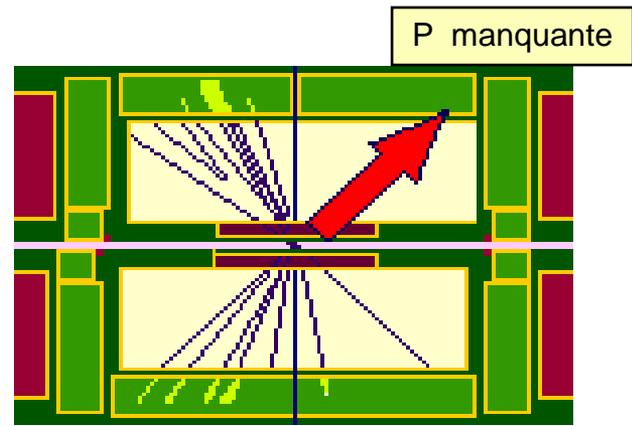
#### ■ Idéal de tout détecter : Bilan de collision

- ▶ On doit retrouver l'énergie totale  $E_{\text{tot}}$  et la quantité de mouvement  $P_{\text{tot}}$  ( $P_{\text{tot}} = 0$  dans un collisionneur)

$$E_{\text{manquante}} = E_{\text{tot}} - \sum E$$

$$P_{\text{manquante}} = - \sum P$$

(  $\sum$  signifie la somme sur les particules vues )

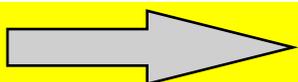
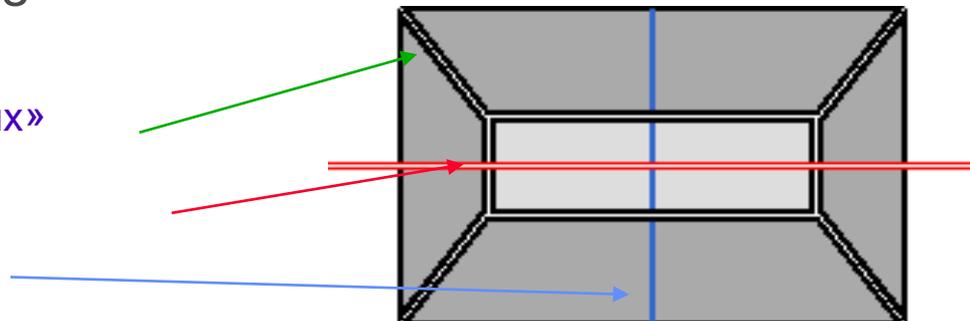


#### ■ Problèmes des trous

- ▶ Quand une E et P manquants sont observés, est-ce dû à :
  - Une particule passée dans un trou ? Non reconstruite ?
    - une particule qui n'a pas laissé de traces ? un neutrino ?
- ▶ Pour s'assurer du dernier cas, il faut éliminer les causes de pertes, réduire les zones mortes, boucher les trous

#### ■ Causes de pertes

- ▶ Chemins de câbles
- ▶ Les trous « faisceaux »
- ▶ Zones mortes



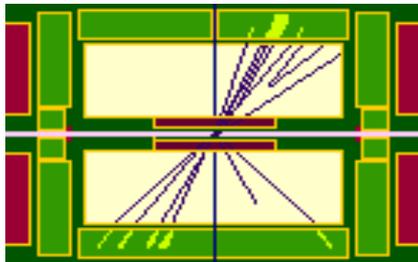
**Détecteurs hermétiques**

## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

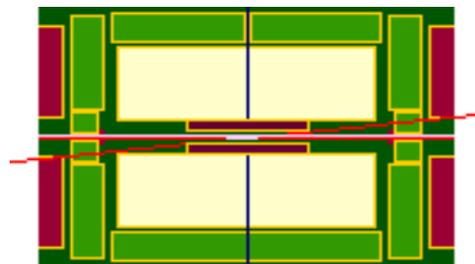
### Déclenchements (triggers) LEP

- La mentalité du chercheur d'or : ex. du LEP
  - ▶ Pépite : Evénements  $Z^0$  avec une fréquence  $\approx 1$  Hz
  - ▶ Cailloux à éliminer : 500 fois plus fréquents
  - ▶ Aiguille dans une botte de foin
- Déclencher l'électronique et remplir les bandes magnétiques avec des événements utiles
- Niveaux de déclenchement
  - ▶ Décider très rapidement du déclenchement de la lecture de milliers de voies
  - ▶ Plusieurs niveaux de décision

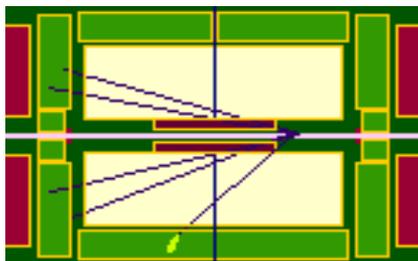
**Collision des faisceaux**  
**LEP:** toutes les 5.6  $\mu$ s  
**Tevatron:** 396 ns  
**LHC:** toutes les 25 ns  
(événements empilés)



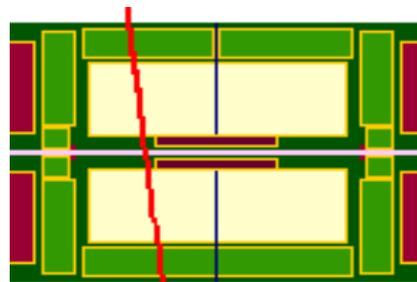
**Evt  $Z^0$ :** beaucoup de particules et région centrale



**Collision à distance  $e^+e^-$**   
avant / arrière



**Collision avec un noyau**  
Toutes les particules d'un côté



**Muon cosmique**  
Collision hors temps et non centrale

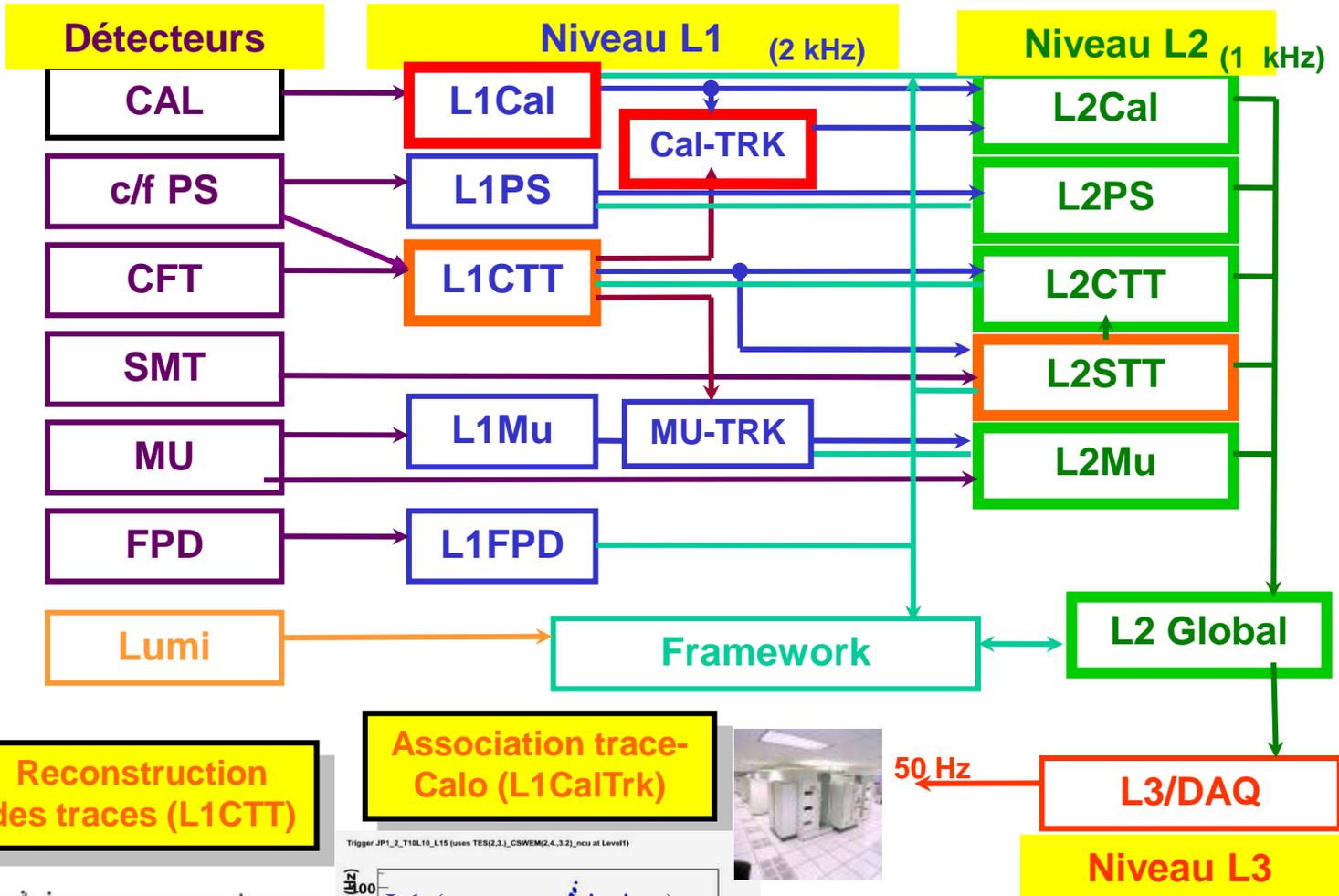
# 3.4 - Les fonctions des détecteurs

## Déclenchements (triggers) Tevatron

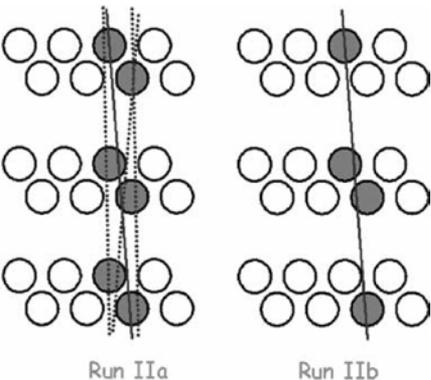
- A D0, les triggers ont été améliorés pour la phase à haute luminosité (supérieure à  $L=300E30 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

en rouge: ce qui a changé

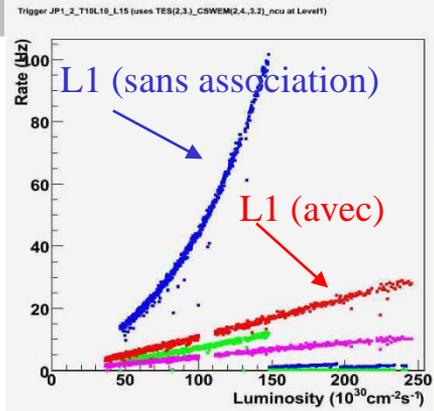
en orange: amélioré



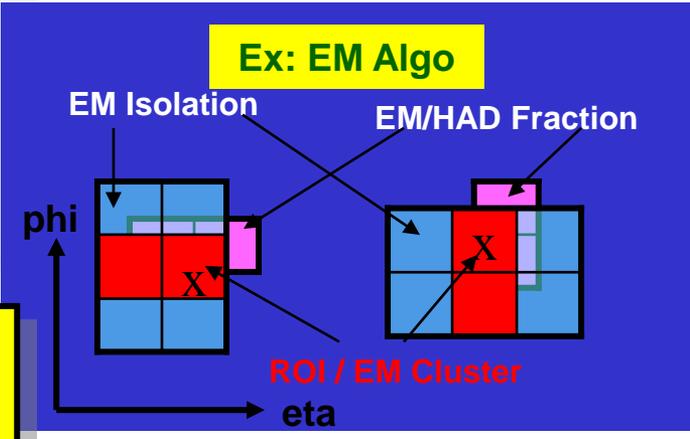
Reconstruction des traces (L1CTT)



Association trace-Calo (L1CalTrk)



L1 CAL: Formation d'objets (jets, e,  $\tau$ , MET)  
+ critères topologiques



## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### Déclenchements (triggers) LHC

- Au LHC, les triggers engendrent des défis pour électronique
  - ▶ Exemple: le trigger à muons de LHCb reçoit l'équivalent de 150 CDROM par seconde qu'il doit traiter en temps réel
  - ▶ Les informations proviennent d'un volume de 800 m<sup>3</sup> et sont acheminées via 1200 fibres optiques à 1.6 Gb/s
  - ▶ Carte: 18 couches, 11000 traversées et 2000 composants
  - ▶ 4 crates de 13 cartes



## § 3.5 - Expériences hors accélérateurs

**Ces expériences, héritières de l'étude des rayons cosmiques, sont en plein développement**

### ■ Expériences d'astroparticules

- ▶ Elles visent à détecter et étudier les flux de particules en provenance du ciel

### ■ Exemple des expériences neutrinos

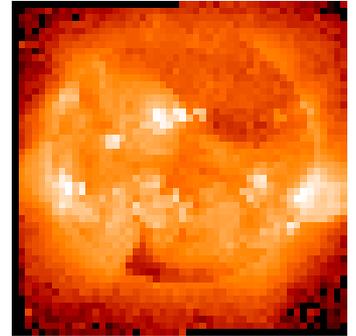
- ▶ Interactions très rares (signal très faible)
- ▶ Bruit de fond important provenant principalement du rayonnement cosmique
- ▶ Il faut se débarrasser des particules les plus pénétrantes (les muons)
- ▶ Pour cela, on enterre les expériences et on blinde les détecteurs



## 3.5 - Expériences hors accélérateurs

### Cas particulier des neutrinos

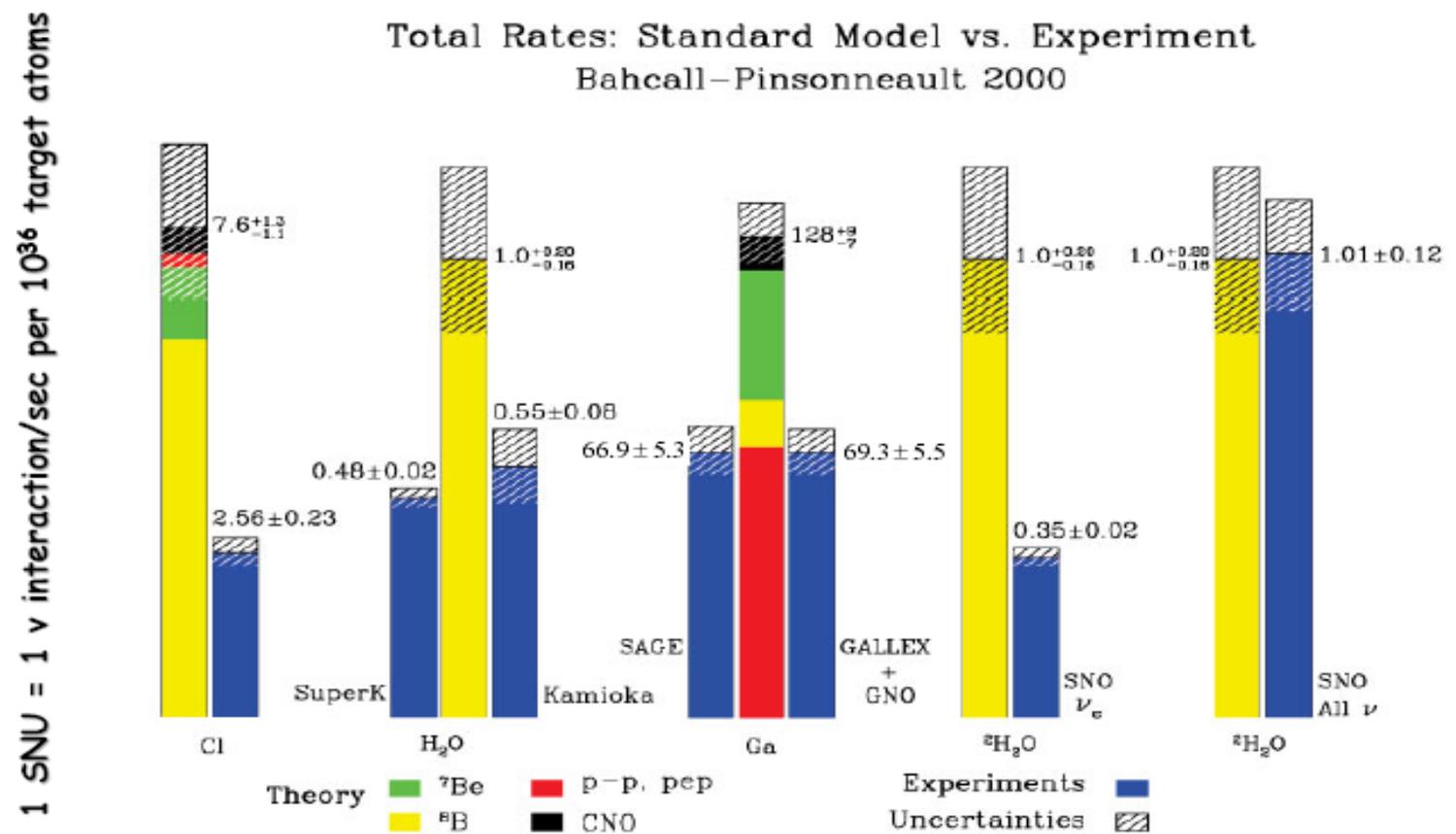
- Neutrinos atmosphériques :  $\nu_\mu$  et  $\nu_e$ 
    - ▶ Ce sont des sous-produits des gerbes cosmiques
    - ▶ ex. : expérience (Super-)Kamiokande (Japon)
  - Neutrinos solaires :  $\nu_e$ 
    - ▶ Le soleil est une usine à neutrinos (neutrinos mous)
    - ▶ Ces neutrinos, en interagissant, ne produisent que des électrons
    - ▶ ex. : expériences Sage (1990-2001, Russie), Gallex, (1991-1997, Grand Sasso Italie), SNO (1999-2006, Ontario Canada), Borexino (mai 2007, Grand Sasso)
  - Neutrinos galactiques et extragalactiques :  $\nu_\mu$  et  $\nu_e$ 
    - ▶ Ils sont issus de l'explosion d'étoiles (supernovæ), et d'éventuelles autres sources (noyaux actifs de galaxie, pulsars) (exemple de la supernovæ 1987-A).
    - ▶ ex.: Amanda au pôle sud (1996-2005, Antarctique)  $\Rightarrow$  IceCube (2005-2011) PM's entre 1,450 et 2,450 meters dans la glace
    - ▶ ex: Antarès au large de Toulon (2008-?)  $\Rightarrow$  KM3NeT (2015?, en mer Méditerranée à une profondeur de 2500 à 4000 mètres).
- $\Rightarrow$  Une expérience observe plusieurs types de neutrinos
- ▶ Elle n'a pas le choix (signal + bruit de fond)
  - ▶ Ex. : (Super-)Kamiokande
    - au départ étude des neutrinos solaires
    - puis neutrinos atmosphériques,
    - et maintenant neutrinos de faisceaux d'accélérateurs...



## 3.5 - Expériences hors accélérateurs

### Exemple : flux de neutrino solaire

- Les neutrinos- $e$  en provenance du soleil semblent moins nombreux que prévus = déficit des neutrinos solaires



~facteur 2 par rapport à ce qui est attendu

# 3.5 - Expériences hors accélérateurs

## Exemple : Super Kamiokande

### History

Coming soon:

SK-IV (2008- ... )

Replace DAQ electronics



SK-I (1996-2001)

11,146 ID PMTs  
(40% coverage)  
1,885 OD PMTs

SK-II (2003-2005)

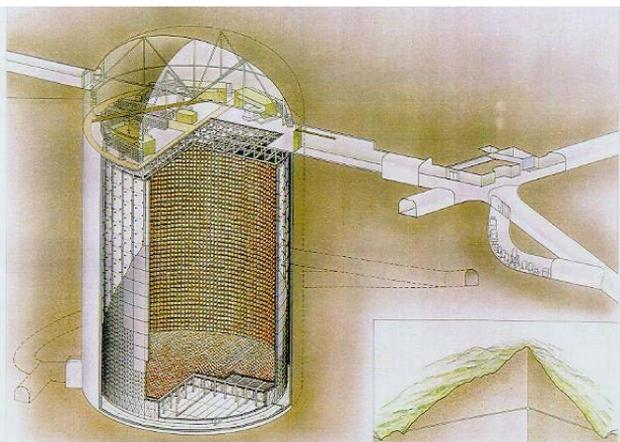
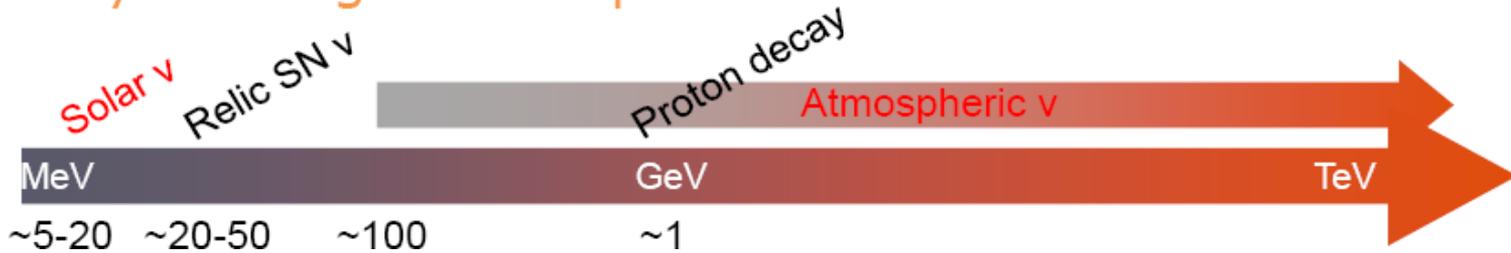
5182 ID PMTs  
(19% coverage)  
Acrylic shields added

SK-III (2006-2008)

11,129 ID PMTs (40% cov.)  
OD segmentation  
(top/barrel/bottom)



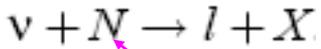
### Physics targets of Super-Kamiokande



- Čerenkov a eau:  $\nu_{e,\mu,\tau} e^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} e^-$
- Seuil en energie:  
5.5 MeV  $\rightarrow$   $^8\text{B}$ , hep.
- 50 Ktonnes d'eau  $\rightarrow$   
22.5 Ktonnes fiducielles.

# 3.5 - Expériences hors accélérateurs

## Exemple : Super Kamiokande



22 ktonnes d'eau

Super-Kamiokande

1000 m sous terre (mine de Kamioka au Japon)

41 m

$\nu_\mu$  descendants

$\nu_\mu$  montants

39 m

50000 tonnes d'eau pure et 11000 photomultiplicateurs

$\nu_\mu$  produit un  $\mu$  qui donne un anneau bien défini

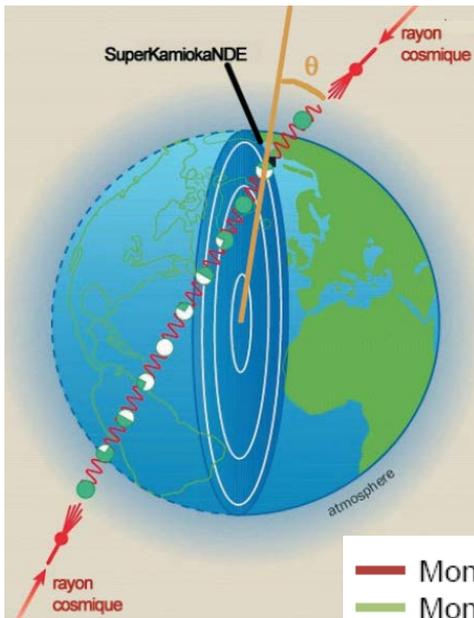
cela permet de mesurer les flux ascendants et descendants de neutrinos (muoniques et électroniques)

$\nu_e$  produit un e qui donne un anneau plus flou

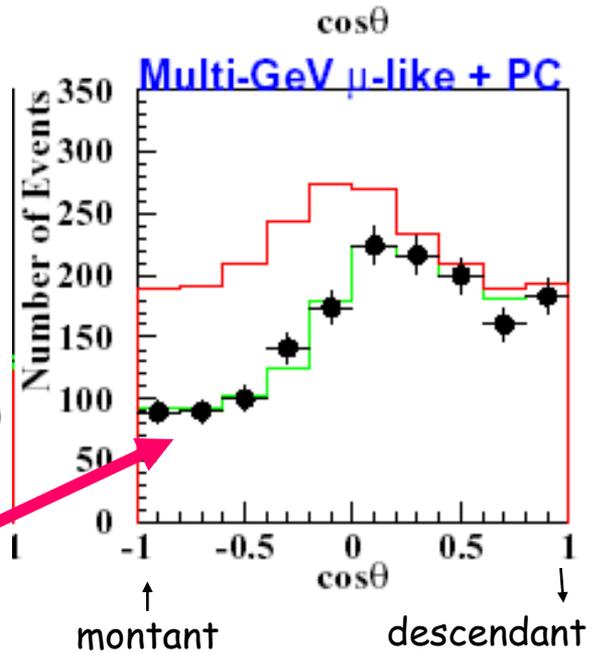
$\mu$

e

## 3.5 - Expériences hors accélérateurs



### Oscillations de neutrinos atmosphériques



■ **Résultat (1998) :** On observe un déficit en neutrinos-mu qui augmente avec la quantité de matière traversée (tandis que le nombre de neutrinos-e est conforme aux attentes).

■ Interprétation : les neutrinos muoniques se transforment en traversant la terre en d'autres neutrinos :  
ils « oscillent »

➤ C'est un des résultats les plus importants de ces dix dernières années

■ Confirmation par SNO (Canada) en 2001

■ Confirmation par KamLAND en décembre 2002, avec des neutrinos provenant de réacteurs nucléaires

$$\Delta m^2 = 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \text{ et } \tan^2 \theta = 0.47 \text{ (KamLand 2008)}$$



R. Davis et M. Koshiba  
Prix Nobel 2002

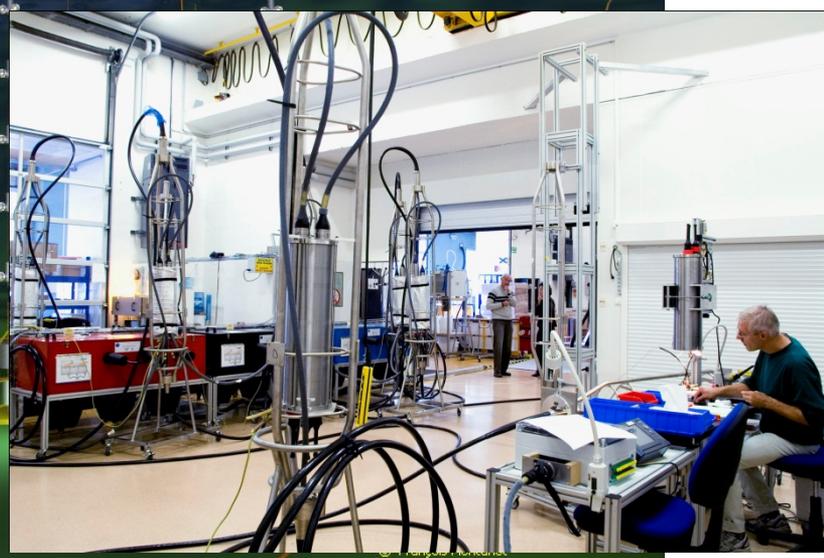
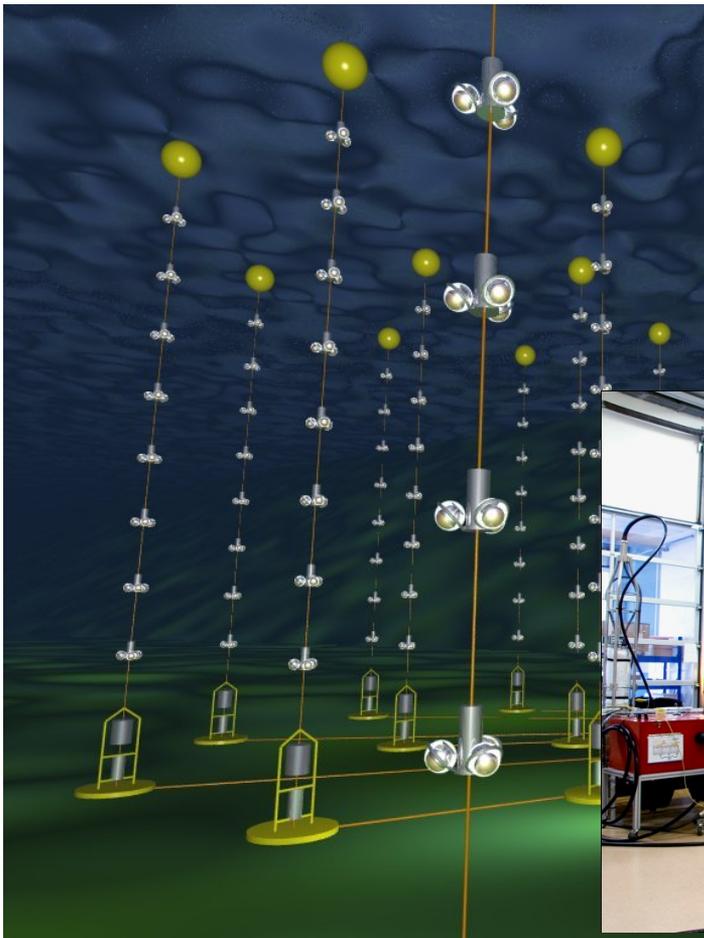


## 3.5 - Expériences hors accélérateurs

### Expérience Antarès



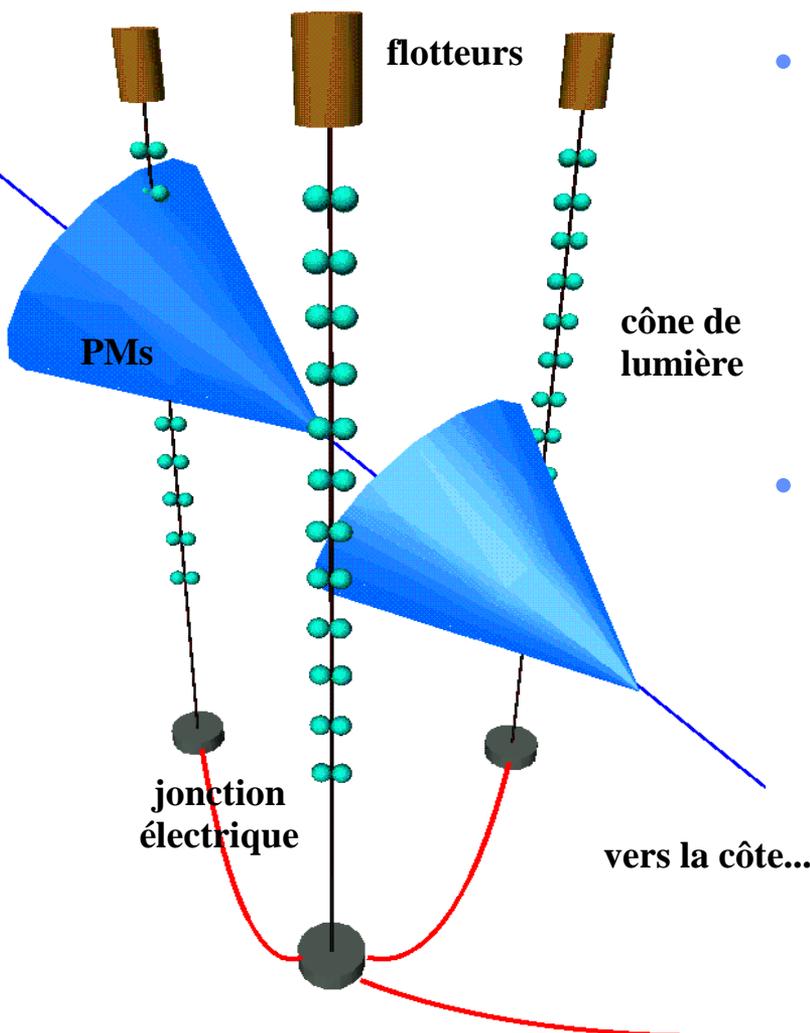
- La terre sert de **cible** pour les neutrinos et de **filtre** pour bloquer les autres particules,
- La mer (ou la glace dans le cas d'AMANDA) sert de **milieu détecteur** du rayonnement Čerenkov et de **filtre** pour réduire le flux de muons atmosphériques (produits par interaction du rayonnement cosmique primaire avec l'atmosphère)
- Dans le cas d'Antarès, les lignes de détecteurs sont immergées au large de Toulon



## 3.5 - Expériences hors accélérateurs

### Expérience Antarès (principe)

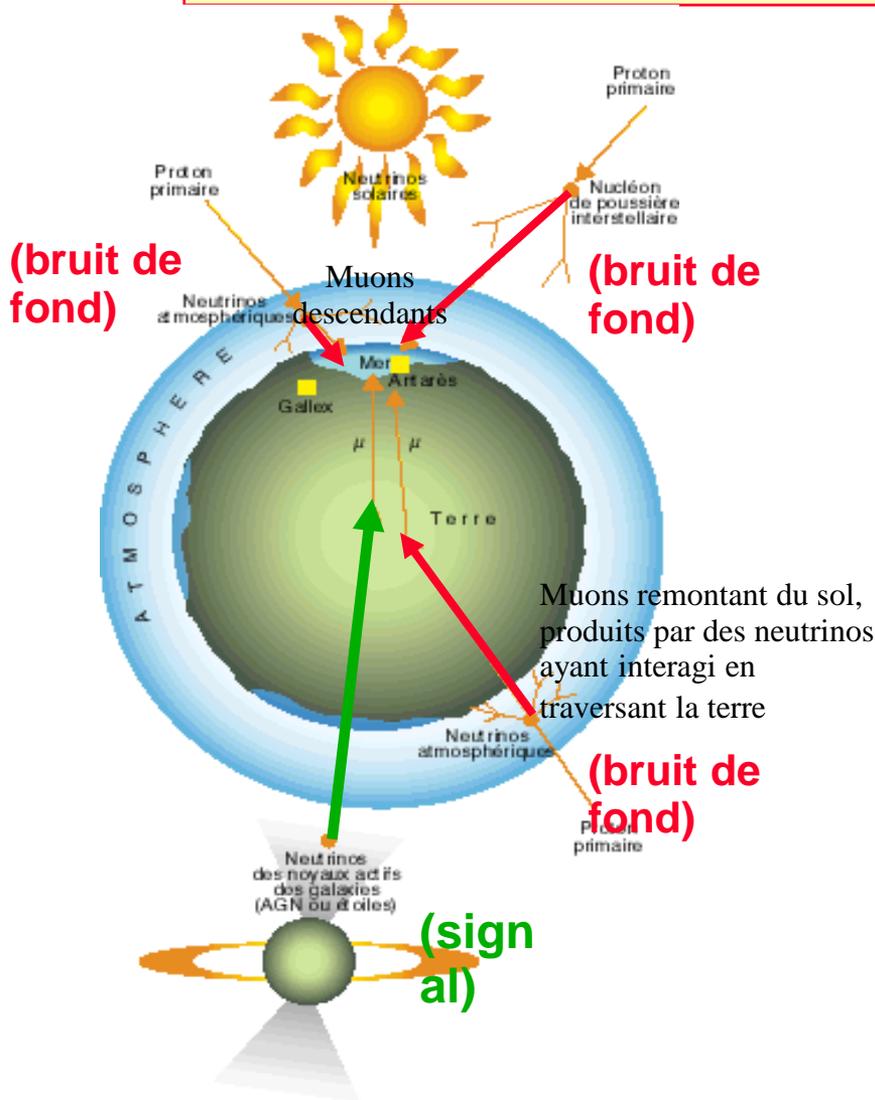
- Composé de 900 photomultiplicateurs répartis en 12 lignes sur une surface de 0,1 km<sup>2</sup> et sur environ 450 mètres de hauteur.
- Les neutrinos détectés sont en fait les rares qui interagissent avec la matière au voisinage du détecteur donnant alors un **muon** qui sera détecté par effet Tcherenkov
- On recueille alors la *lumière Čerenkov* produite par le muon



- La quantité de lumière recueillie donne l'énergie du muon **et celle du neutrino**
- Le développement dans le temps du sillage lumineux donne la direction du muon **et du neutrino**

## 3.5 - Expériences hors accélérateurs

### Expérience Antarès (Programme scientifique)



#### ■ Astrophysique galactique

- ▶ Recherche de sources ponctuelles (microquasar, pulsar)
- ▶ Recherche de sources diffuses (plan galactique, mystérieux excès Egret)

#### ■ Astrophysique extra-galactique

- ▶ sources ponctuelles (blazars, quasar)
- ▶ phénomènes violents (sursaut gamma)

#### ■ Physique des particules

- ▶ Recherche indirecte de matière noire non baryonique (WIMP)

#### ■ Océanologie

- ▶ Étude de la bioluminescence
- ▶ Étude des courants dans la Méditerranée

