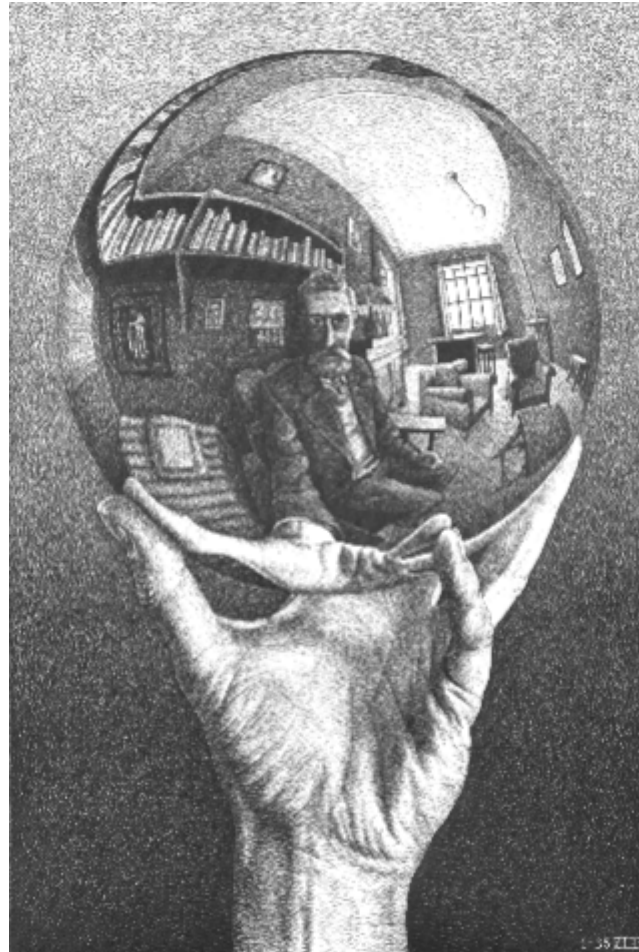


# Physique des particules

MASTER 1 de physique fondamentale  
Université Joseph Fourier – Grenoble I

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



# Detecteurs

(auprès des collisionneurs)

# La détection de particules

- sonder des gammes d'énergie de + en + élevées.
    - **nombre et énergie des particules produites.**
  - rechercher des processus rares
    - **fréquence des collisions.**
- détecteurs de + en + **gros**, et de + en + **rapides**.



Assemblage de  
CMS au LHC

# Collaborations internationales

Pour opérer ces détecteurs géants :

- de 500 à 2000 physiciens
- plusieurs dizaines de laboratoires...
- ... dans plusieurs dizaines de pays



La collaboration D0  
en 2004 (TeVatron)

**plusieurs dizaines d'années de la conception et la fin de l'exploitation.**

# Désintégration de particules

**Une particule lourde se désintègre toujours vers un état de plus basse masse (plus stable)**

**A** → **BC(D)** si :

- $m_A > m_B + m_C + (m_D)$
- il existe **une interaction (boson de jauge) couplée** aux particules.

**Temps caractéristique des désintégrations (couplage+masse bosons):**

- interaction forte :  $\sim 10^{-24} \text{ s}$
- interaction électromagnétique :  $\sim 10^{-20} - 10^{-16} \text{ s}$
- interaction faible (masse  $< m_W = 80 \text{ GeV}$ ) :  $\sim 10^{-12} - 10^{-8} \text{ s}$

**Si plusieurs voies de désintégration sont possibles, la plus rapide l'emporte (cf. désintégration faible des hadrons étranges)**

# La distance de vol

**Temps de vie  $t_0$  d'une particule** : si on a  $N_0$  particules au temps  $t = 0$ , au temps  $t$  il en reste :

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_0) \quad , \quad N(t) = N_0/2 \text{ pour } t = \tau_0 \ln(2).$$

$\tau_0$  est le **temps propre**, mesuré dans son référentiel de repos.

Pour une particule en mouvement avec une vitesse  $v$ , le **temps de vie apparent  $t$**  dans le référentiel du laboratoire est :

$$\tau = \gamma \tau_0 \quad \text{avec } \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \text{ (facteur de Lorentz)}$$

La **distance de vol moyenne  $L$**  dans le détecteur est :

$$L = v \tau = \beta c \tau = \beta \gamma c \tau_0 = p c \tau_0 / m$$

$L$  est la distance mesurable par l'observateur, elle dépend de l'énergie de la particule.

**Seules les particules ayant des distances de vol de plusieurs dizaines de centimètres peuvent atteindre le détecteur et être directement mesurés. Il s'agit uniquement des particules "finales" de la chaîne de désintégration.**

# Les particules détectables

Les particules qui sont susceptibles d'atteindre un détecteur sont les suivantes :

particule	$c\tau$ (ns)	principale désintégration	rapport de branchement
<b>bosons de jauges</b>			
$\gamma$	stable	----	----
<b>Leptons</b>			
$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	stable	----	----
$e^-$	stable	----	----
$\mu^-$	$6.59 \times 10^4$	$e \nu_e \nu_\mu$	100 %
<b>Mésons</b>			
$\pi^0$	$2.5 \times 10^{-6}$	$\gamma\gamma$	98.8 %
$\pi^\pm$	780.4	$\mu \nu_\mu$	100 %
$K^\pm$	370.9	$\mu \nu_\mu$	63.4 %
		$\pi^\pm \pi^0$	21.1 %
		$\pi^\pm \pi^+ \pi^-$	5.6 %

# Les particules détectables (2)

Les particules qui sont susceptibles d'atteindre un détecteur sont les suivantes :

particule	ct (ns)	principale désintégration	rapport de branchement
<b>mésons (suite)</b>			
$K^0_S$	2.675	$\pi^+ \pi^-$	68.6 %
$K^0_L$	1554	$\pi^0 \pi^0$	31.4 %
		$\pi e \nu_e$	38.7 %
		$\pi \mu \nu_\mu$	27.1 %
		$3 \pi^0$	21.5 %
		$\pi^+ \pi^- \pi^0$	12.4 %
<b>baryons</b>			
p	stable	----	----
n	2.7.1013	$p e^- \nu_e$	100%
$\Lambda$	7.89	$p \pi^-$	64.2 %



# Les particules détectables (3)

Les particules qui sont susceptibles d'atteindre un détecteur sont les suivantes :

particule	ct (ns)	principale désintégration	rapport de branchement
<b>Baryons (suite)</b>			
$\Sigma^+$	2.4	$p \pi^0$ $n \pi^+$	51.6 % 48.4
$\Sigma^-$	4.44	$n \pi^-$	100%
$\Xi^0$	8.69	$\Lambda \pi^0$	100%
$\Xi^-$	4.92	$\Lambda \pi^-$	100%
$\Omega^-$	2.46	$\Lambda K^-$ $\Xi^0 \pi^-$ $\Xi^- p^0$	68.6 % 23.4 8.0

Toutes les autres particules se désintègrent dans le tube à vide du faisceau, non instrumenté.

Il faut alors les reconstruire à partir des quadri-impulsions de leurs produits de désintégration qui sont stables et détectés.

# Que mesure-t-on ?

Les particules interagissent dans des **milieux instrumentés**

- par **interaction électromagnétique** : ionisation (création de paires e-/ion positif), création de paires e-/trous (semiconducteurs), bremsstrahlung et création de paires e+/e-, photons Čerenkov...
- par **interaction forte** : développement de gerbes hadroniques.

Les particules **déposent de l'énergie** dans la matière du détecteur, qui est transformée en courant électrique.

## 1) Identifier la trajectoire d'une particule

- interactions « ponctuelle » avec le détecteur
- faible perte d'énergie
- mesure de l'impulsion pour particule chargée (champ magnétique)
- mesure de la masse / identification des particules

## 2) Mesurer l'énergie totale de la particule (calorimétrie)

- dépôt total de l'énergie dans le détecteur -> destructif
- identification des particules électrons/hadrons
- ne marche pas pour les muons ni les neutrinos

# Mesure de l'impulsion

**Champ magnétique** créé par un solénoïde supraconducteur (2-4 T)

→ Importance de l'uniformité spatio-temporelle du champ.

La trajectoire d'une particule **chargée** dans le champ magnétique est une **hélice**, dont la projection transverse est un cercle de rayon  $r$ .

Dans le plan transverse :  $q v B = m v^2 / r$

$$\Rightarrow \mathbf{p}_{\perp} = p \cos\theta = q B r$$

et  $\theta$  = angle polaire par rapport à l'axe du faisceau

$$\Rightarrow \mathbf{p}_{\perp} \text{ (GeV/c)} = 0.3 B r$$

On mesure le **rayon de courbure**  $r$  de la trajectoire d'une particule chargée

On en déduit le **signe de la charge** de la particule et son **impulsion**.

Rem : toutes les particules détectables chargées ont  $q = \pm 1$

# Reconstruction des trajectoires

**Interaction électromagnétique** entre la particule chargée et les atomes de la matière traversée

→ **création de charges** qui permettent de localiser le passage de la particule.

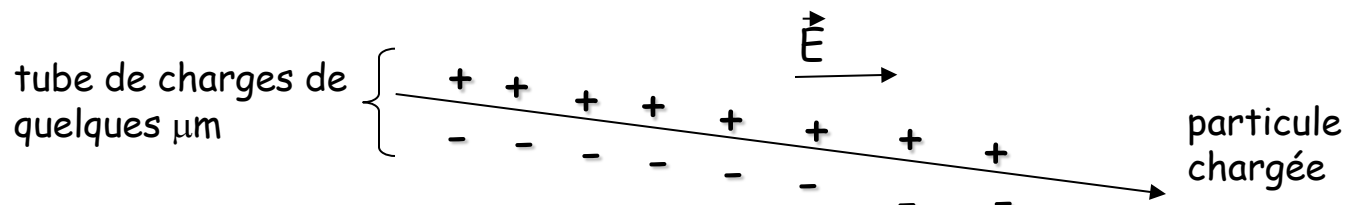
La perte d'énergie induite est faible et **ne diminue pas sensiblement l'énergie de la particule**, qui n'est pas détruite :

- **ionisation** (arrachage d'un électron du cortège électronique de l'atome) nécessite de l'ordre de 30 eV par  $e^-$  arraché,
- **création d'une paire e-trou** dans un semi-conducteur ne nécessite que quelques eV.

Le signal  $i(t)$  est généralement **induit par le mouvement des charges** :

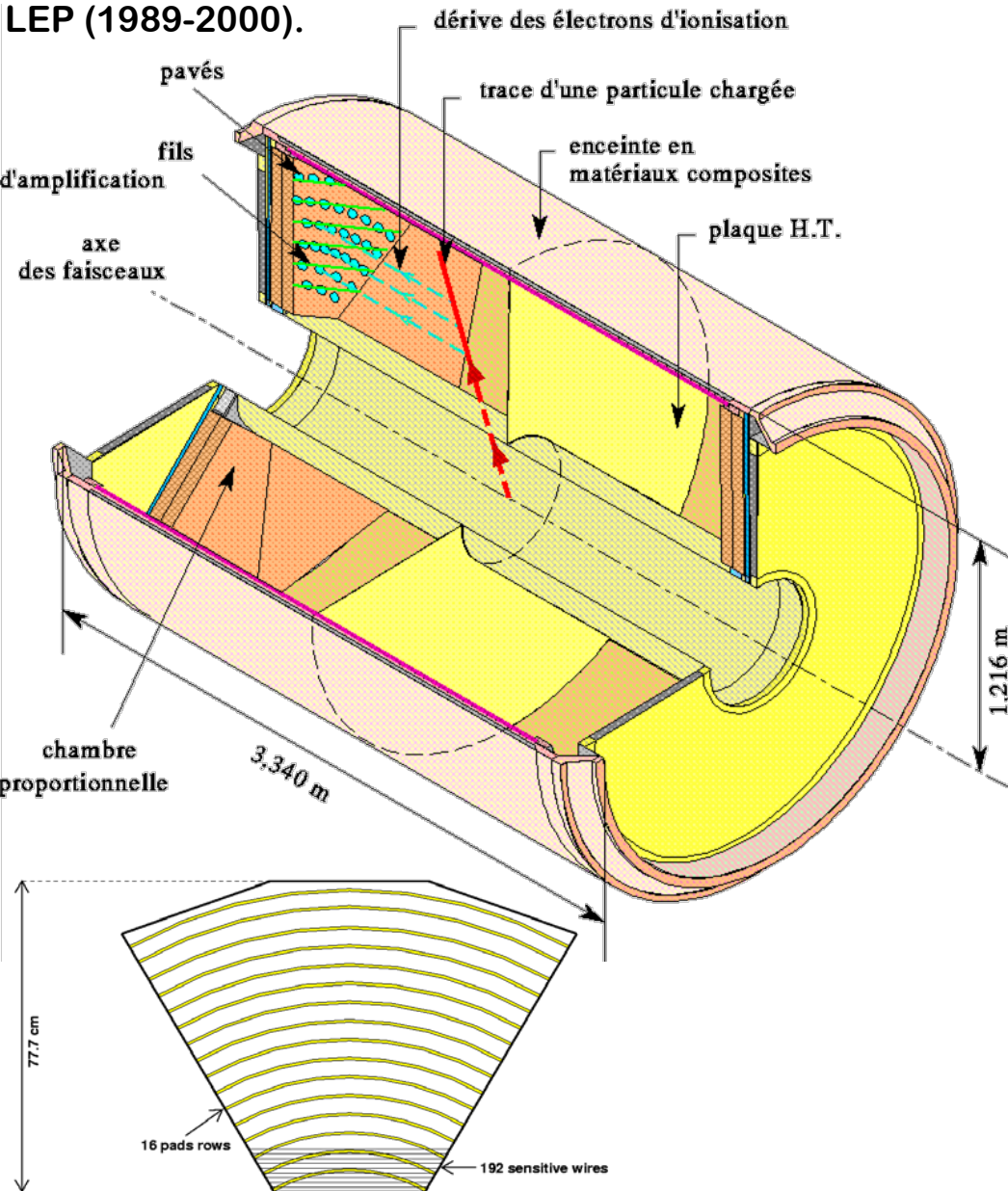
$$i(t) = q v(t) / d$$

les ions positifs sont plus lents (plus gros) et ce sont eux qui induisent la majeure partie du signal.



La chambre à projection temporelle de l'expérience DELPHI auprès du LEP (1989-2000).

# Les chambres à dérive



- Volume rempli d'un **gaz**.
- Une plaque centrale crée un **champ électrique** // axe du cylindre (HT, 25 kV).
- Disques bouchons, équipés de **plans de fils mis à la haute tension**  
→ avalanche des électrons (effet de pointe).
- Damier instrumenté à l'extérieur des disques pour mesurer la localisation en (x,y) (effet capacitif)
- Reconstruction de la position spatiale selon z par la mesure du temps de dérive des électrons dans le gaz (calibration régulière de la vitesse de dérive, par exemple par LASER)
- Résolutions typiques :  $s_{xy} = 200 \text{ mm}$ ,  $s_z = 1 \text{ mm}$ , **temps de dérive = 40 ms**.

Volumes typiques de détection :  $10 \text{ m}^3$ .

Inutilisable au LHC, une collision toutes les 25 ns.

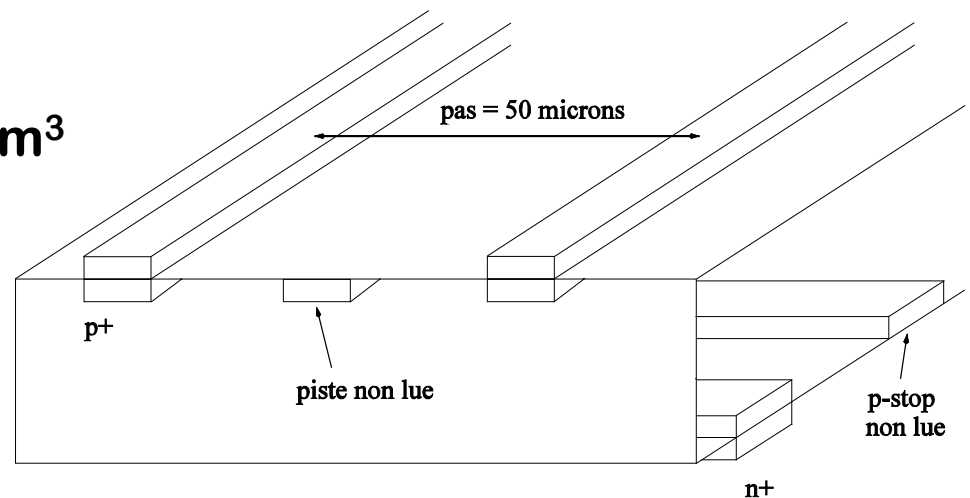
# Les détecteurs silicium

Jonction p-n déplétée -> création de paires e<sup>-</sup>-trou quand un particule chargée traverse la zone déplétée.

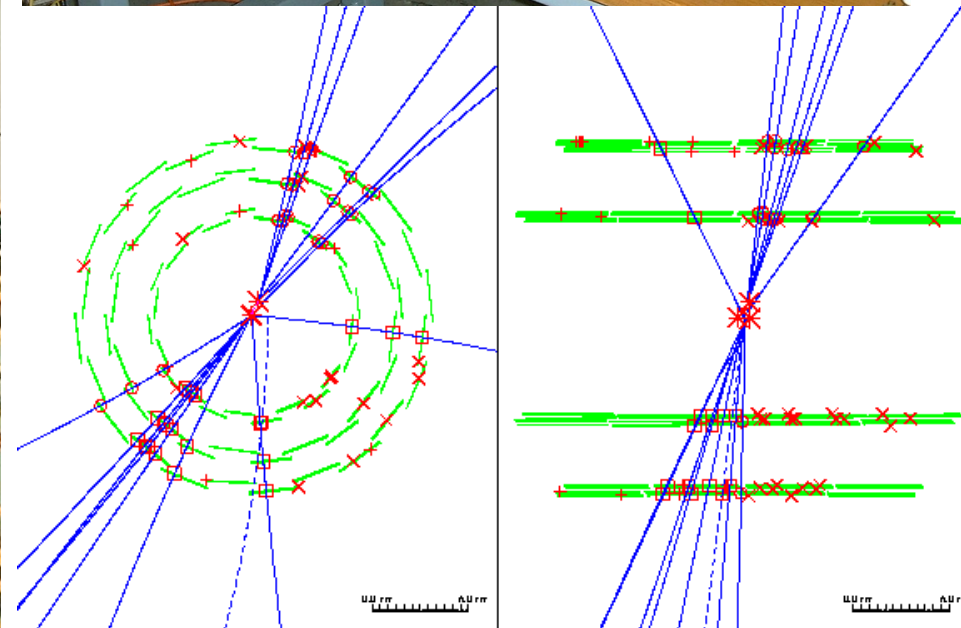
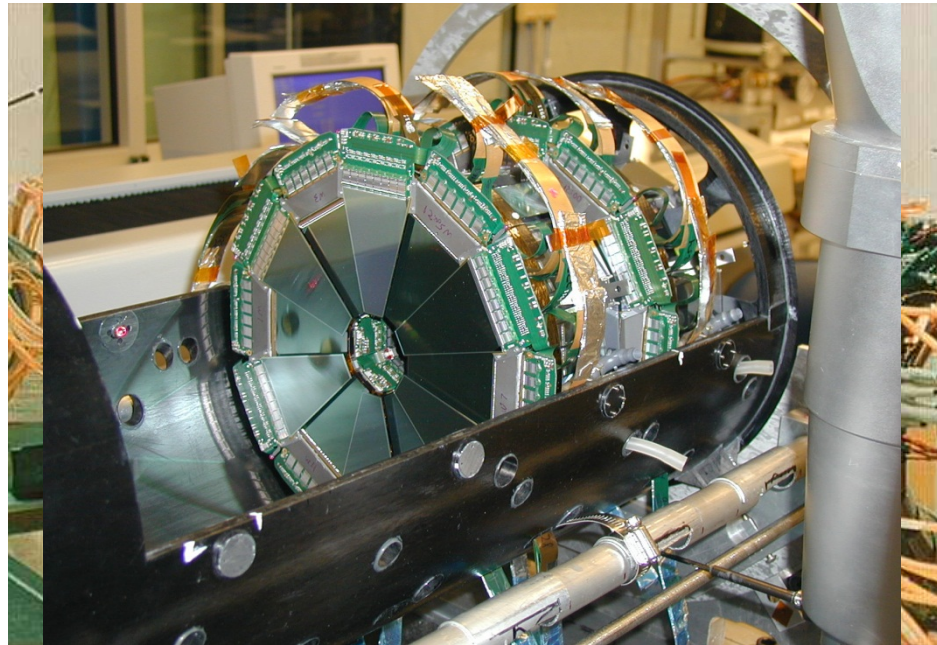
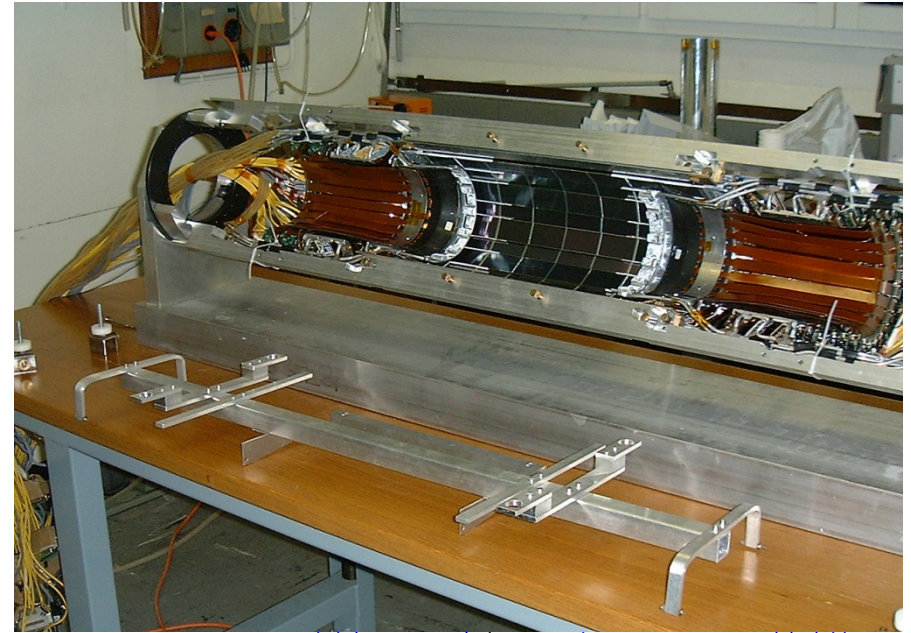
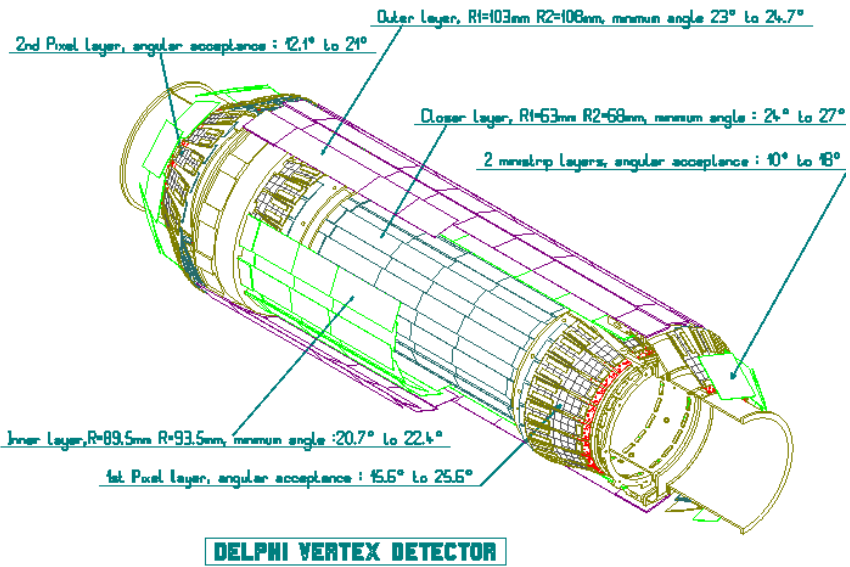
Sous l'action du champ électrique, ces paires dérivent vers les pistes de lecture (microbande dopées).

Ces détecteurs permettent de localiser le passage des particules chargées jusqu'à la région très proche du faisceau

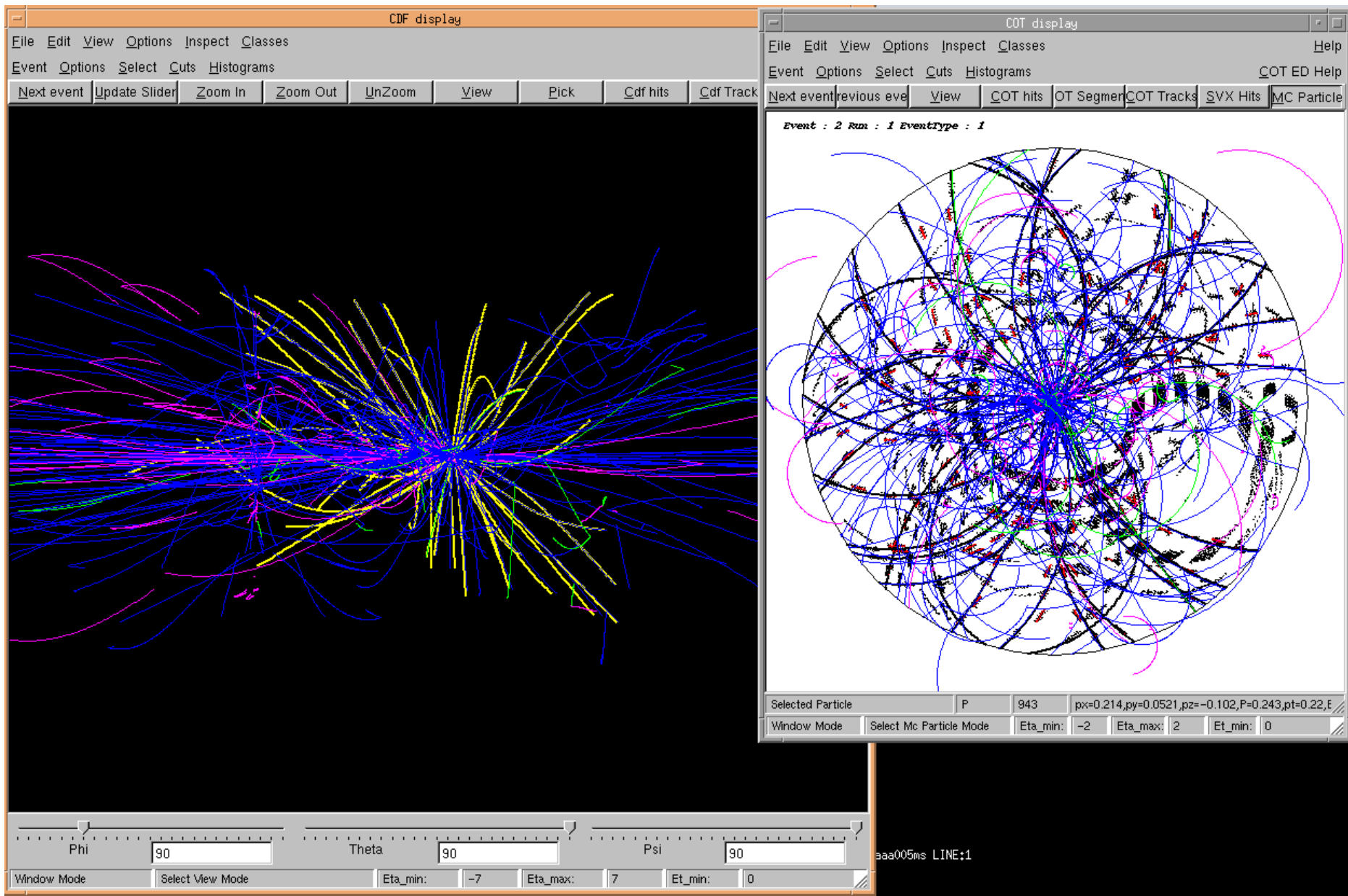
- très bonne résolution (qq mm)
- permet la reconstruction des **vertex secondaires** = point de désintégration des particules instables.
- Le volume de détection est généralement de l'ordre du m<sup>3</sup> (prix du silicium !).



# Les détecteurs silicium (suite)



# Trajectoires reconstruites





# La calorimétrie

La mesure de l'énergie des particules se fait dans des **milieux très denses et instrumentés** : les calorimètres. Les particules y déposent toute leur énergie (sauf les muons et les neutrinos) → **mesure destructive**.

## Calorimètre homogène :

- le milieu absorbeur et le milieu actif sont identiques : cristaux scintillateurs lourds (verre au plomb : Delphi,  $\text{PbWO}_4$  : CMS)
- pas de pertes

## Calorimètre à échantillonnage :

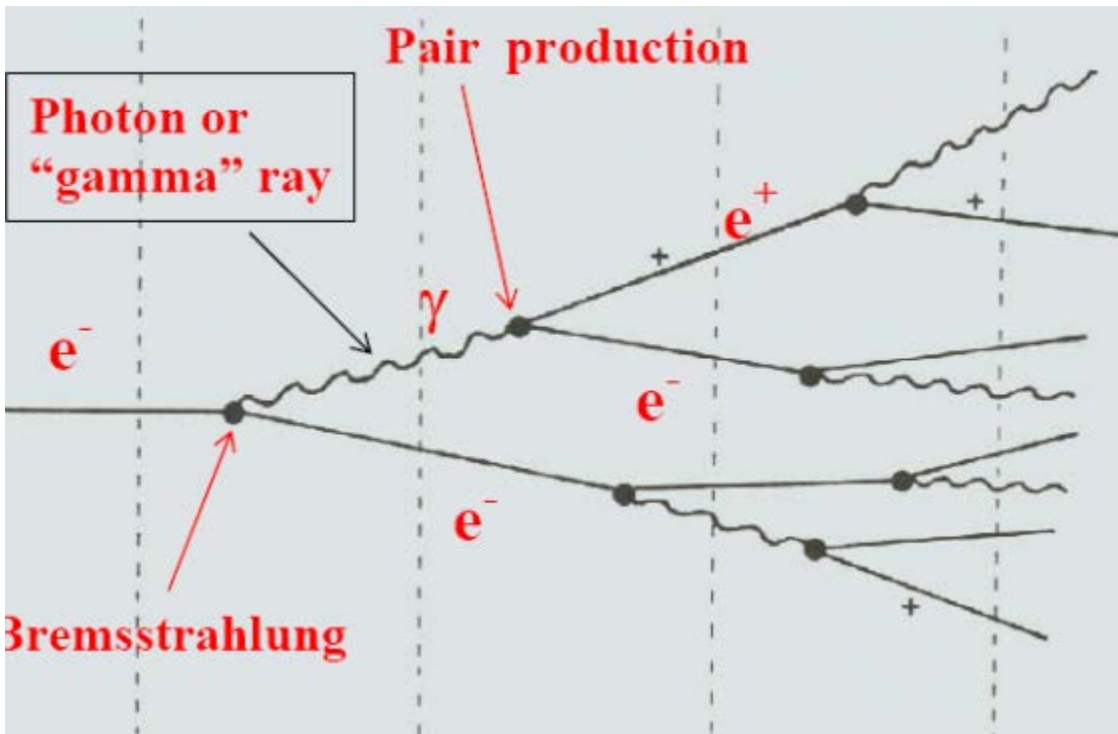
- milieu absorbeur passif (dense : Pb: ATLAS, U : D0...)
- milieu actif : détection par interaction électromagnétique des particules chargées produites dans l'absorbeur.
- seule une partie de l'énergie est mesurée → calibration

# Calorimétrie électromagnétique

Interactions des électrons et des photons à haute énergie (>qq MeV)  
dans la matière :

**création de paire** :  $\gamma \rightarrow e^+ e^-$   
**bremsstrahlung** :  $e \rightarrow \gamma e$  } Développement d'une **gerbe électromagnétique**

Déstintégration des pions neutres :  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



Développement de la gerbe  
jusqu'à :

$E_{\text{particules}} \sim \text{qq MeV}$

L'ionisation devient alors  
dominante  
(Compton+Photoélectrique)

# Calorimétrie hadronique

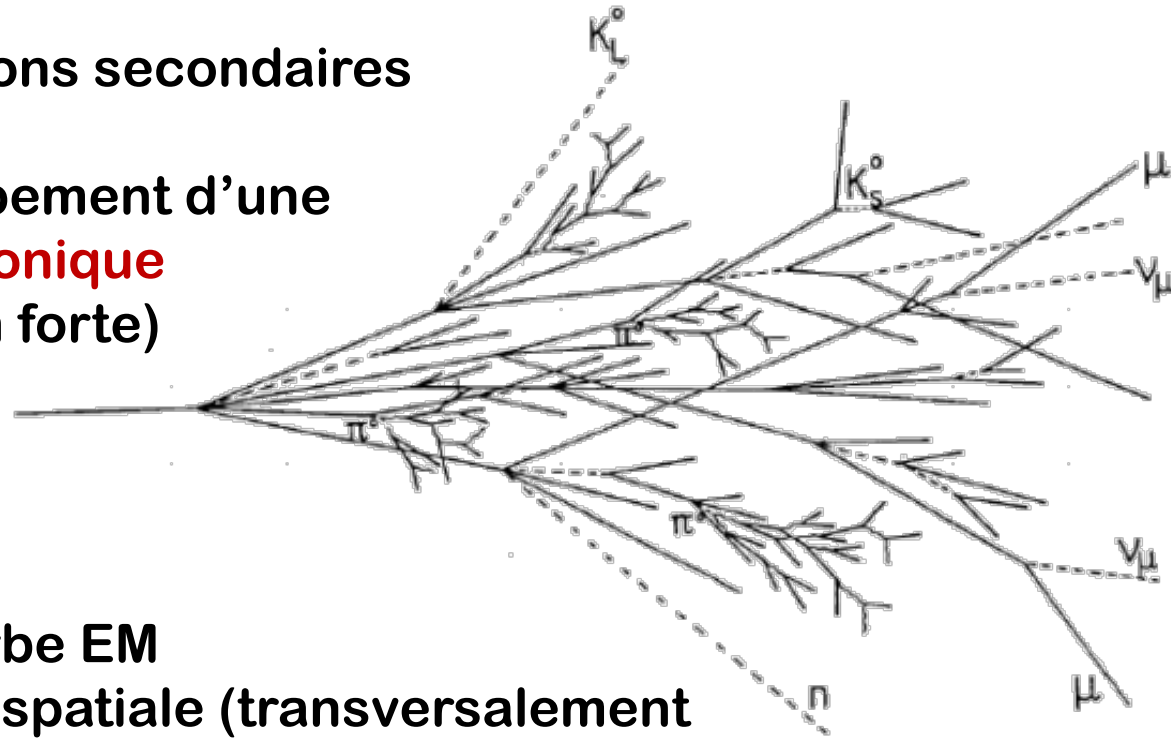
Collisions inélastiques des **hadrons** ( $n, p, \pi^\pm$ ) sur un **noyau** de la matière composant le calorimètre (matériau dense : Pb, U, W...)

→ casse le noyau (nécessite  $\sim 30\%$  de l'énergie de la particule incidente)

→ production de hadrons secondaires

→ etc...

→ développement d'une **gerbe hadronique** (interaction forte)



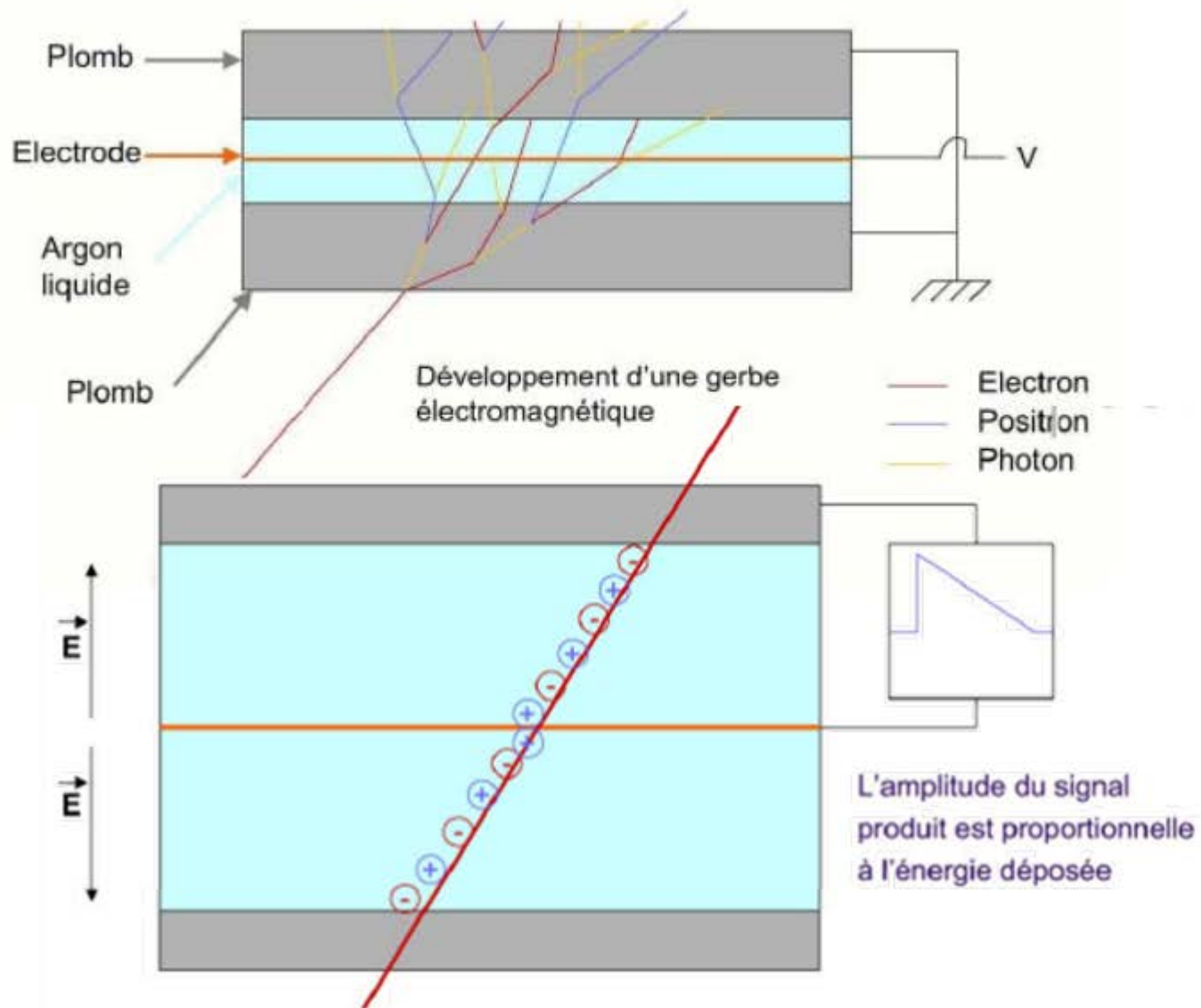
En comparaison d'une gerbe EM

- plus grande extension spatiale (transversalement et longitudinalement)

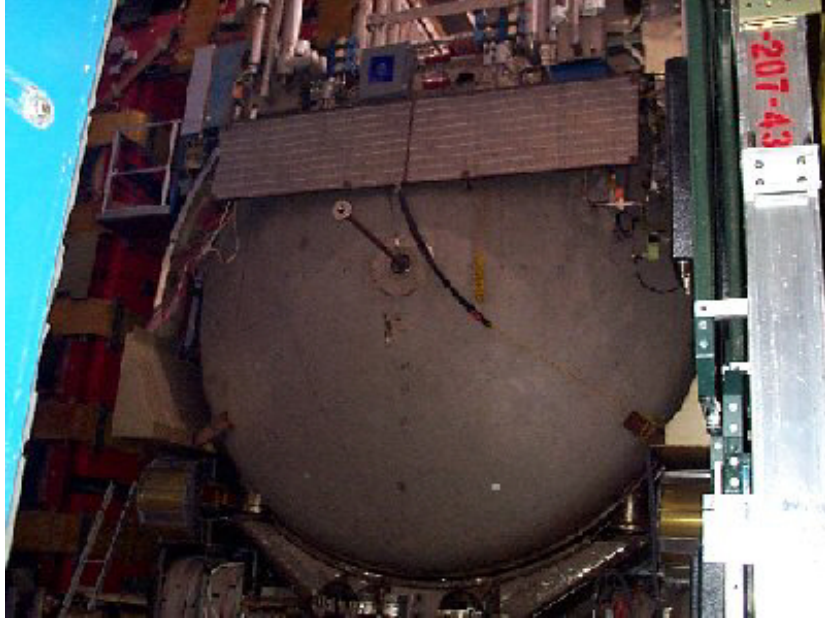
- développement plus tardif

→ Le calorimètre hadronique est placé après le calorimètre EM.

# Calorimètre à échantillonnage



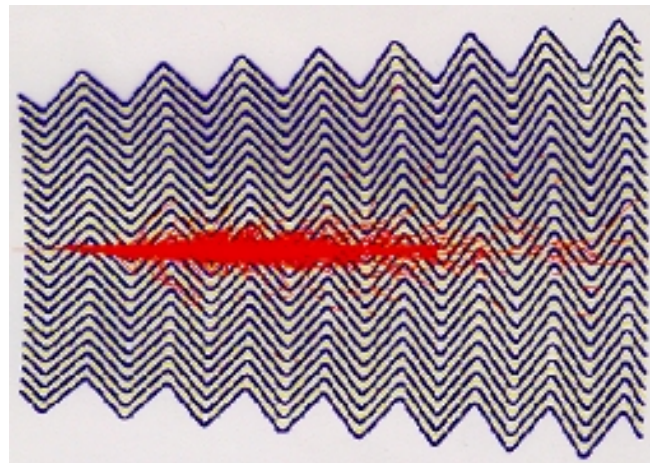
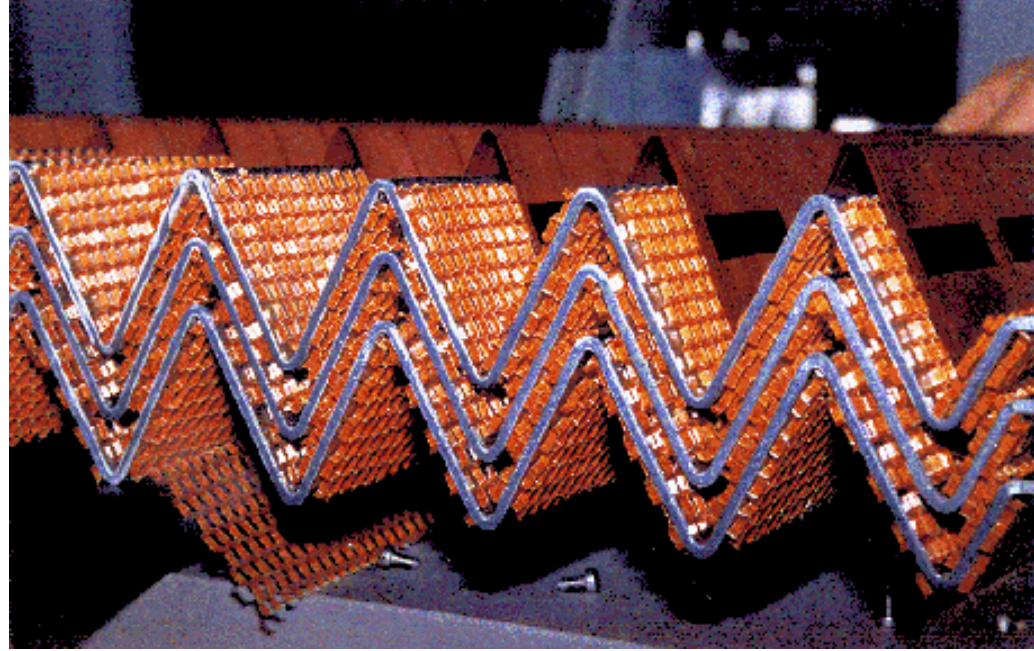
# La calorimétrie (fin)



**Cryostat du calorimètre de D0 au Tevatron.**

**Absorbeur = plaques d'uranium appauvri,**

**Milieu actif = argon liquide.**

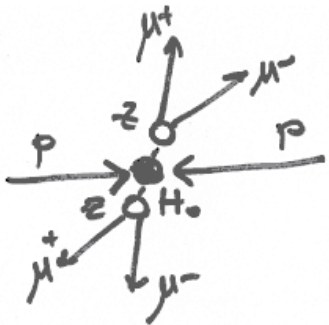
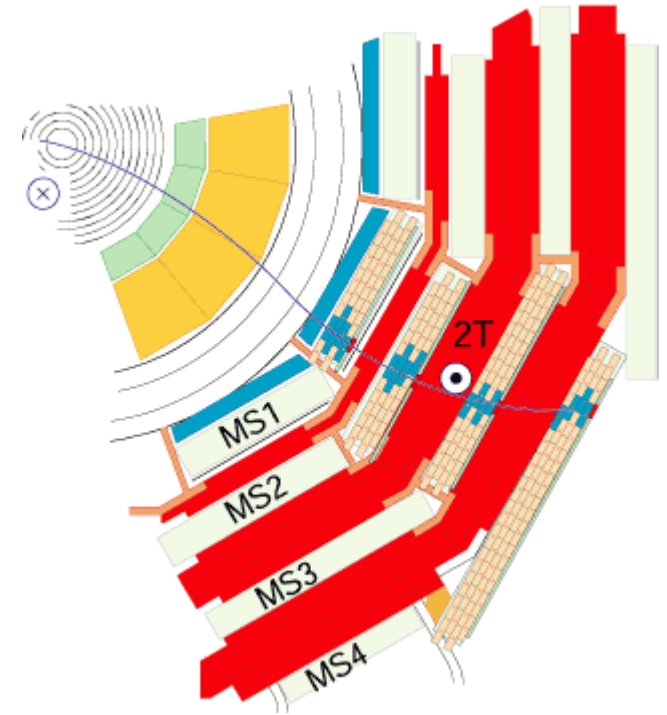


**Calorimètre à Argon liquide (absorbeur en plomb) d'ATLAS au LHC, électrodes en accordéon.**

# Identification des muons

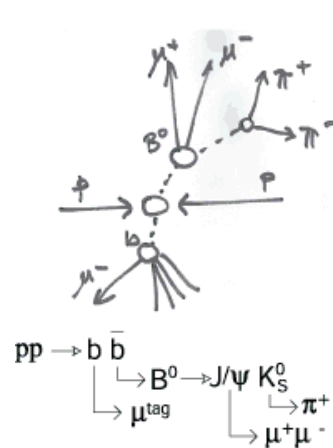
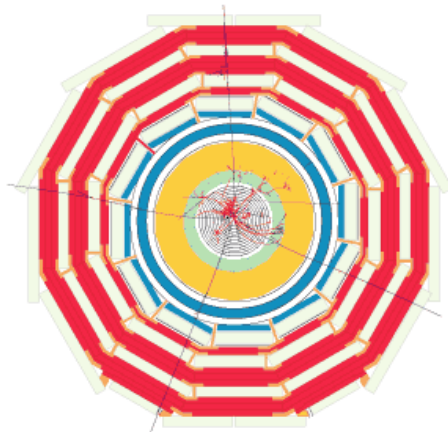
Les muons et les neutrinos déposent peu d'énergie -> traversent le calorimètre

Dispositif de trajectographie (chambres à fil) + aimant (toroïde) permet de détecter les muons.



$$pp \rightarrow H^0 \rightarrow ZZ$$

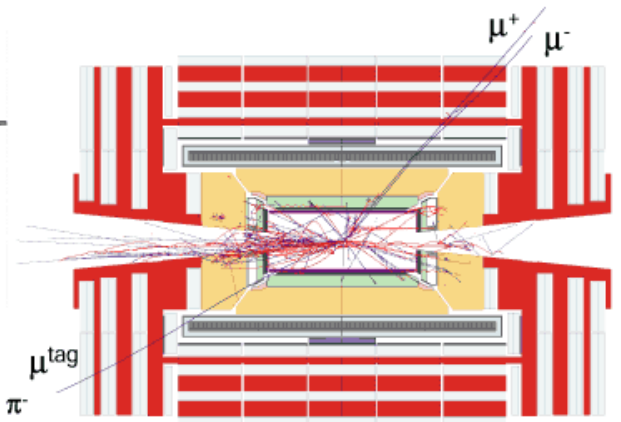
$$\begin{cases} \rightarrow \mu^+ \mu^- \\ \rightarrow \mu^+ \mu^- \end{cases}$$



$$pp \rightarrow b \bar{b}$$

$$\begin{cases} \rightarrow B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0 \\ \rightarrow \mu^{\text{tag}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rightarrow \pi^+ \pi^- \\ \rightarrow \mu^+ \mu^- \end{cases}$$



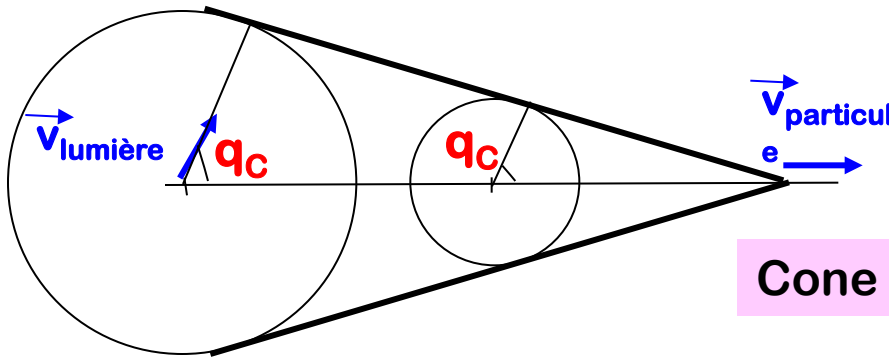
# Identification des particules (chargées)

Pour identifier différents types de particule chargée (pion, proton, électrons...), il faut mesurer la **masse**

- **mesure de l'impulsion** : trajectographe + champ magnétique

- **mesure de la vitesse** :

- effet **Cerenkov** : particule chargée dans un milieu transparent rayonne si  $b > 1/n$  ( $n$ =indice optique)



$$v_{\text{particule}}/c = b$$

$$v_{\text{lumière}} = c/n$$

vitesse des  $\gamma$  dans le milieu d'indice  $n$

Cone de lumière d'ouverture  $\cos \theta_c = 1/\beta n$

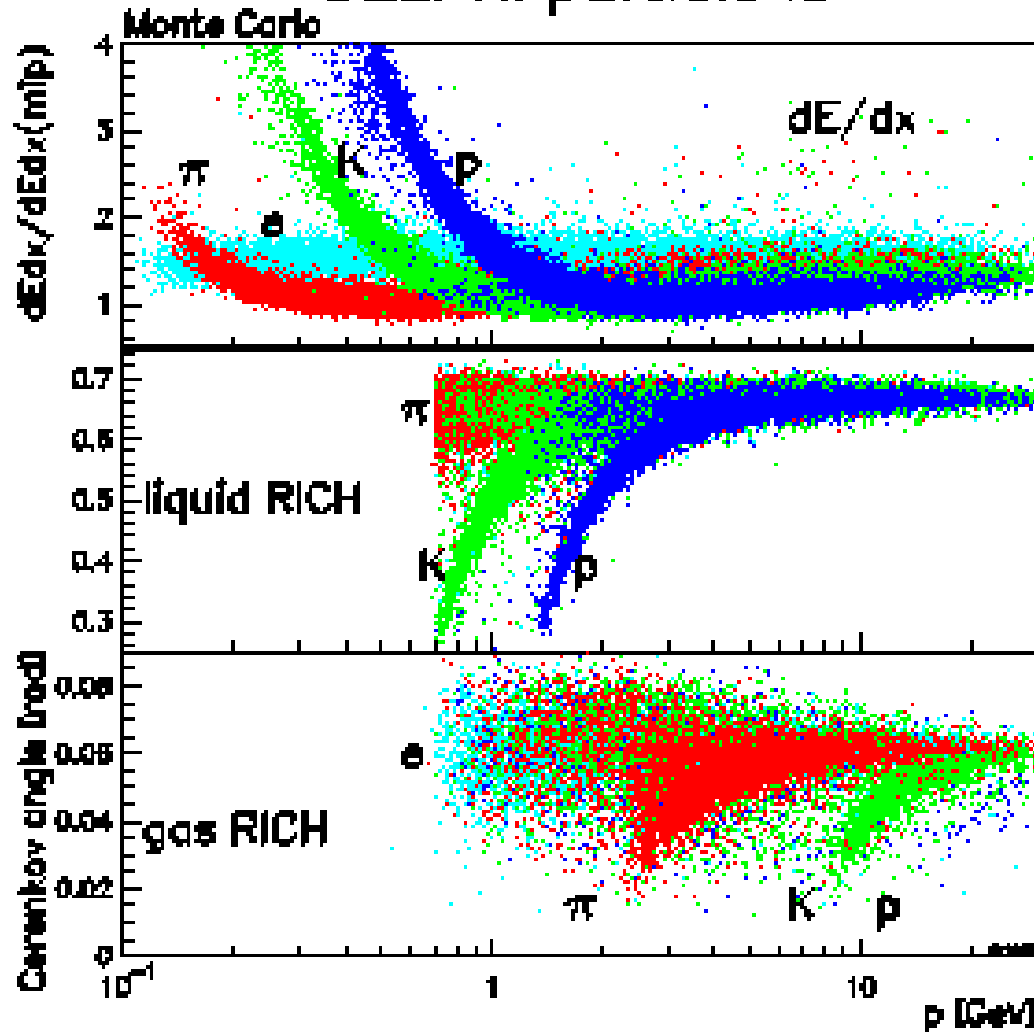
- mesure de **perte d'énergie** ( $dE/dx$ ), formule de Bethe-Bloch (particules lourdes)

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N r_e^2 m_e q^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left( \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 T_e^{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C_e}{Z} \right)$$

- mesure de **temps de vol** : temps pour parcourir un distance connue.

# Identification des particules (chargées)

## DELPHI particle ID



Bandes caractéristique pour chaque type de particules dans le plan  $p$  vs.  $f(v)$

Il y a souvent des ambiguïtés





# Détection des neutrinos (collisionneurs)

Les neutrinos produits n'interagissent pas dans le volume de détection.

Ils sont mis en évidence par **leur absence dans le bilan énergétique.**

Par exemple :

- collisionneur symétrique  $e^+ e^-$  : l'état initial est parfaitement connu.

$$\mathbf{p}_{e^-} + \mathbf{p}_{e^+} = \mathbf{0} = \sum \mathbf{p}_{\text{final}} = \sum \mathbf{p}_{\text{détectés}} + \mathbf{p}_n \quad (+ \mathbf{p}_{\text{non détectés}})$$

$$\mathbf{E}_{e^-} + \mathbf{E}_{e^+} = \sqrt{s} = \sum \mathbf{E}_{\text{final}} = \sum \mathbf{E}_{\text{détectés}} + \mathbf{p}_n \quad (+ \mathbf{E}_{\text{non détectés}})$$

- collisionneur hadronique : on ne connaît l'énergie et l'impulsion totales de la collision que **dans le plan transverse au faisceau**. En effet, on connaît la quadri-impulsion du (anti-)proton du faisceau mais pas **la fraction d'impulsion du parton participant effectivement à la collision**. Toutefois ce parton (quark de valence u ou d, gluon ou quark de la mer) **porte une impulsion transverse nulle**, et le bilan en impulsion ci-dessus peut s'écrire dans le plan transverse pour les collisions hadroniques.

# Détection des neutrinos


**DELPHI Interactive Analysis**  
 Beams 88.1 GeV    Run: 84458    DAS: 17-Nov-1995  
 Proc: 4-Dec-1995    Evt: 10143    12:08:28  
                               Scarc 8-Dec-1995

	TO	TE	TS	TK	TV	ST	PA
Act	00	00	00	00	00	00	00
Deact	00	00	00	00	00	00	00

**Evénement enregistré par l'expérience DELPHI durant un run du LEP à  $\sqrt{s} = 136.2$  GeV.**

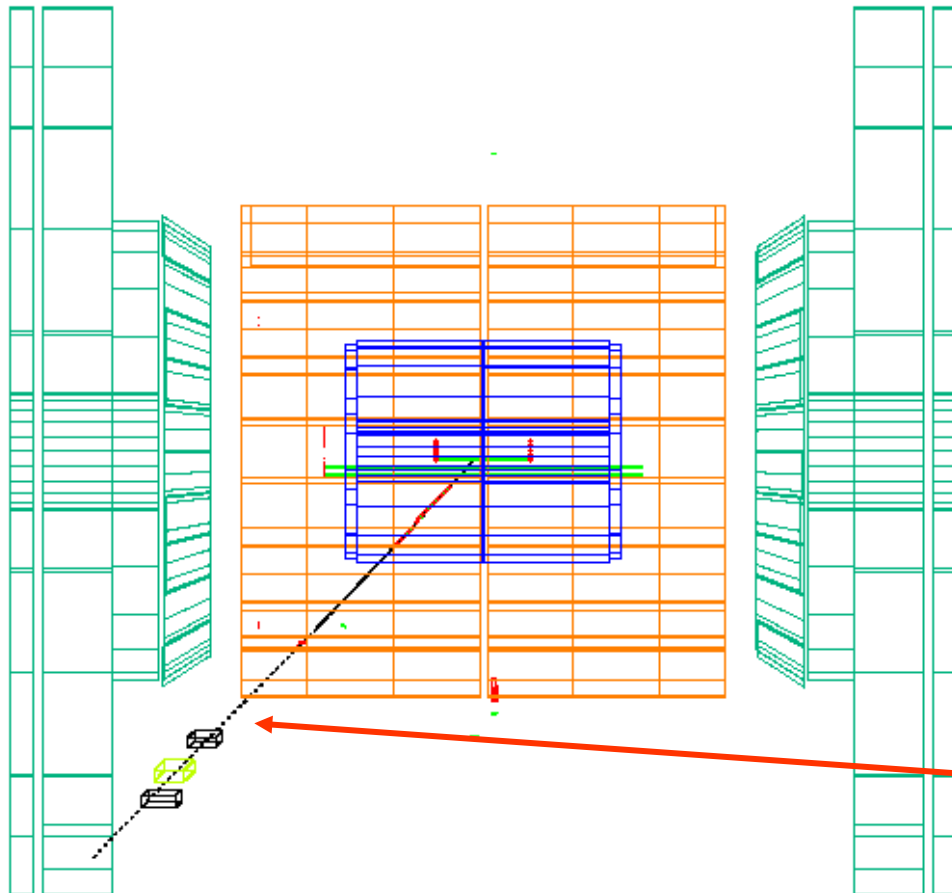
**Une unique trace chargée est observée avec un angle polaire d'environ  $50^\circ$ . Elle est identifiée comme un muon (au minimum d'ionisation dans les calorimètres).**

**Evénement identifié comme étant :**

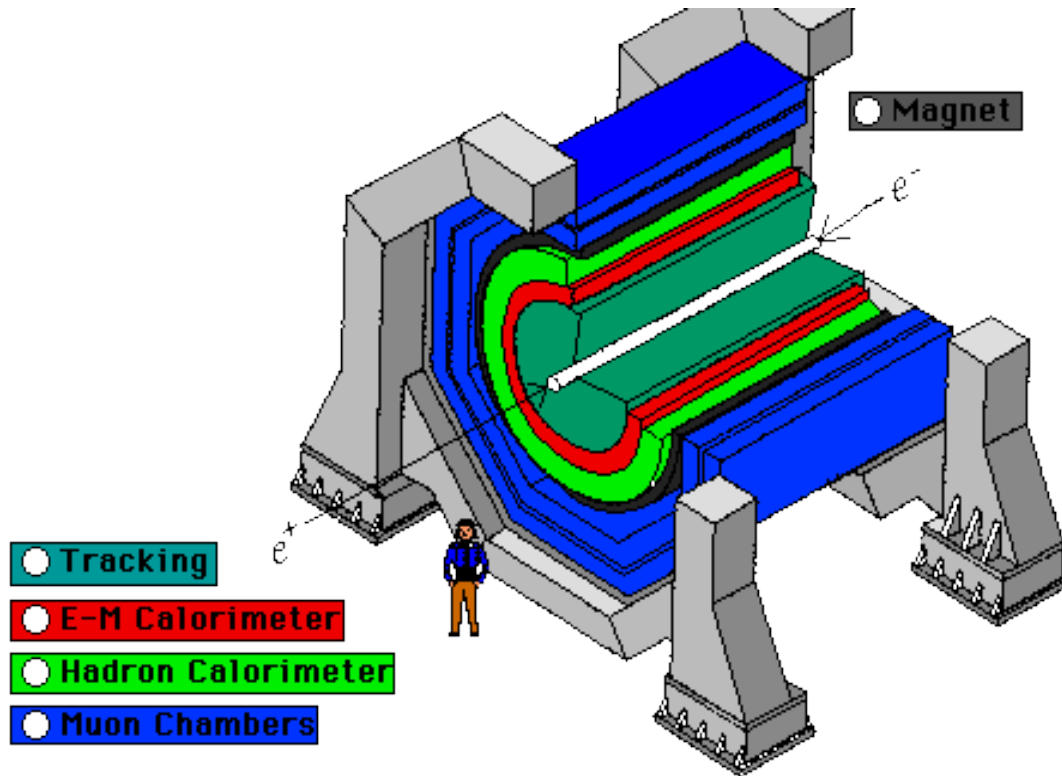


perdu dans le tube à vide

non détectés



# Résumé des étapes de détection



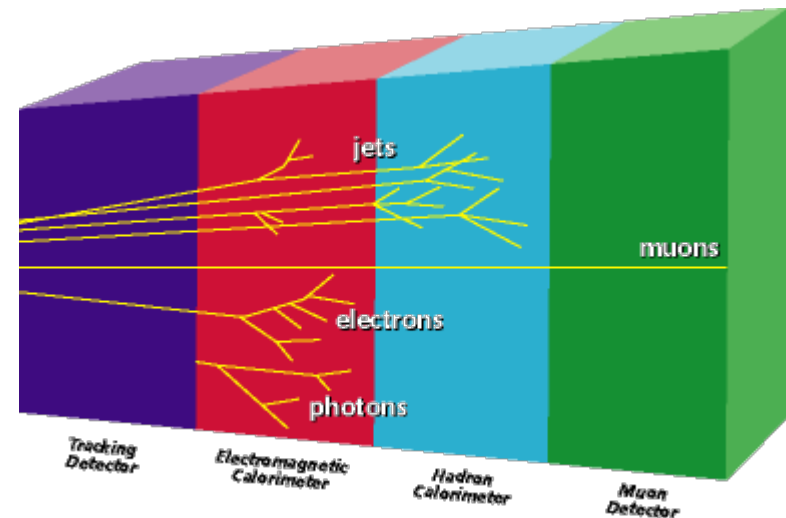
**Détecteur :**

**Trajectographe :** particules chargées

**Calorimètre EM :** électrons, photons, jets

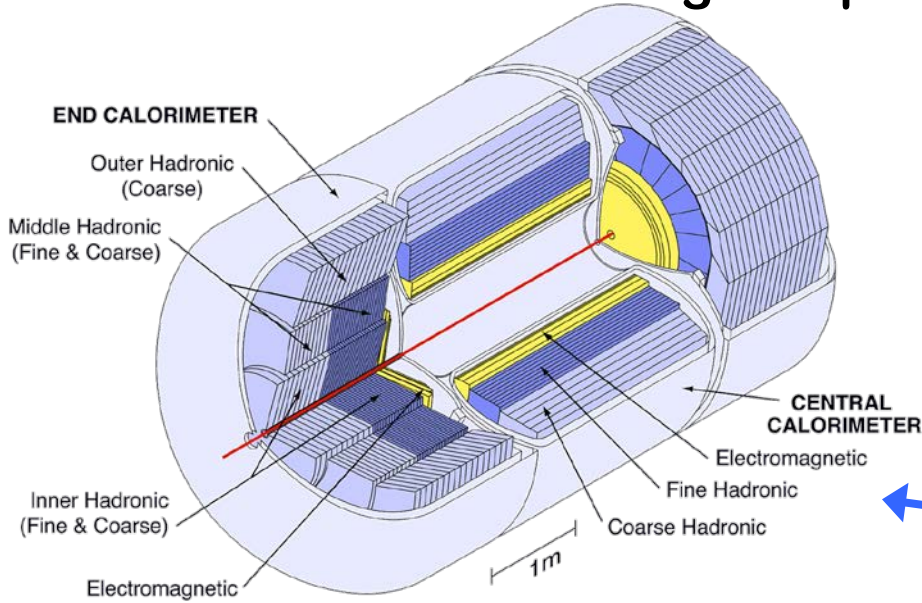
**Calorimètre HAD :** jets

**Système à muons :** muons



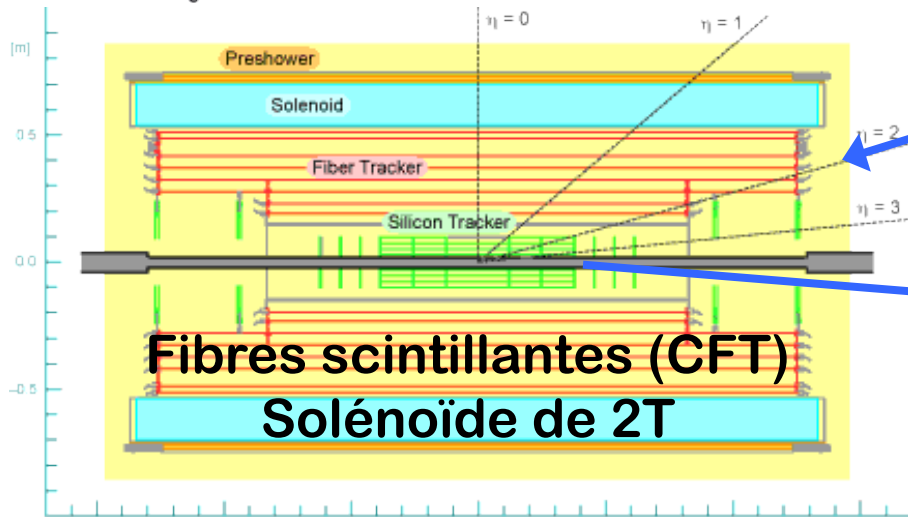
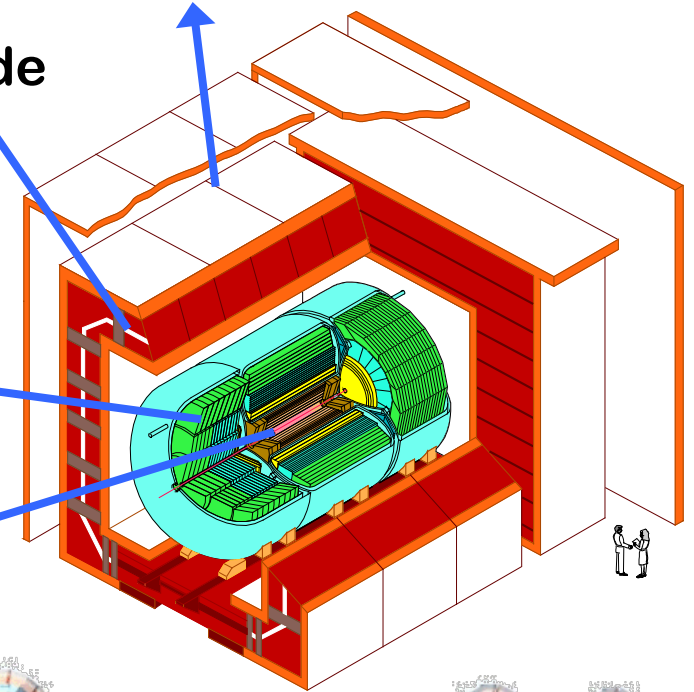
# Le détecteur DØ (Fermilab, TeVatron)

## Calorimètre : Fe / U – Argon liquide

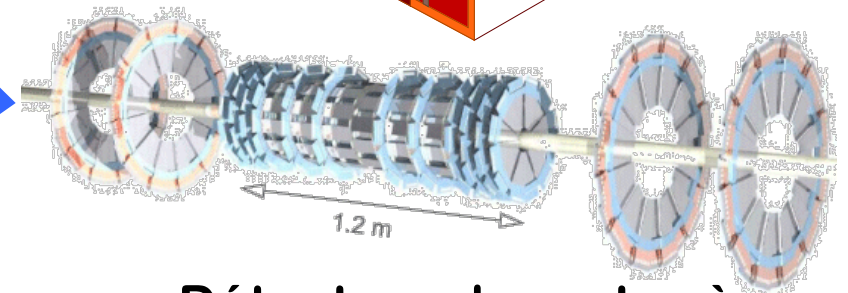


## Détecteur de muons : Chambres à dérivation et scintillateurs

Toroïde

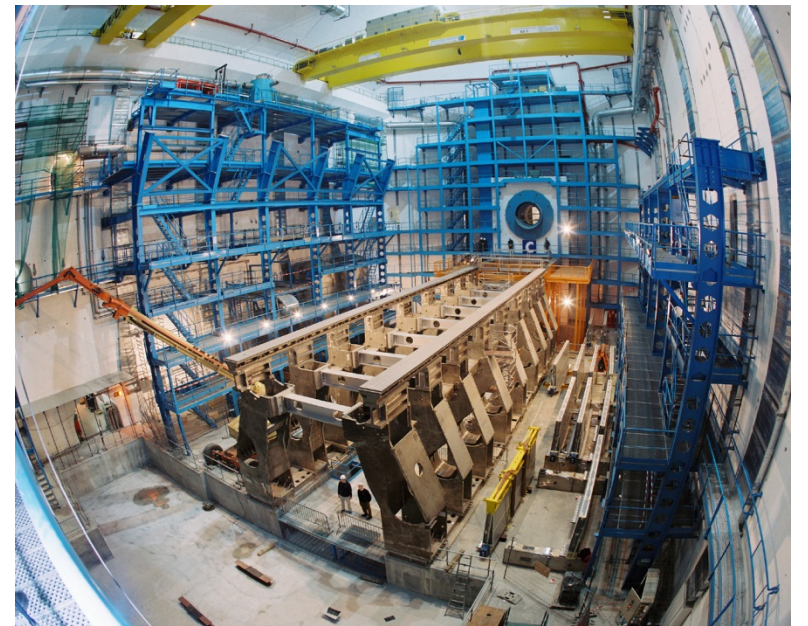
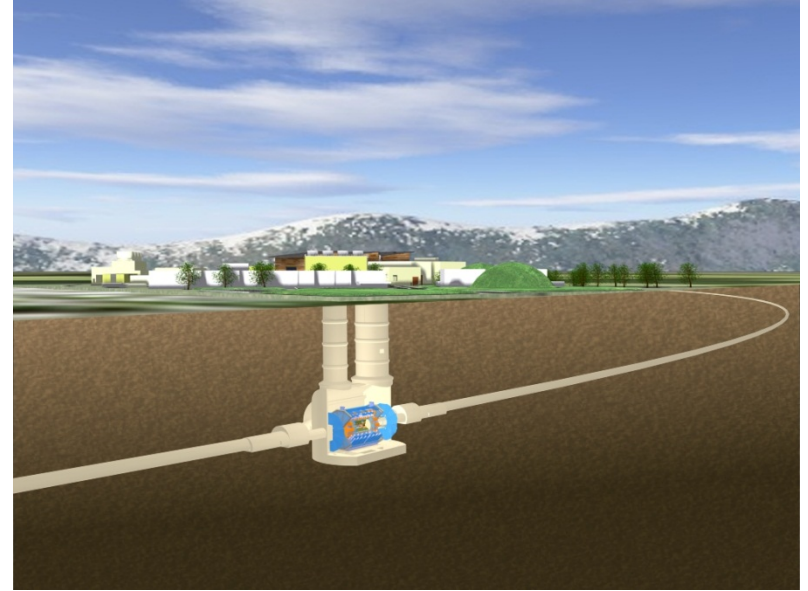
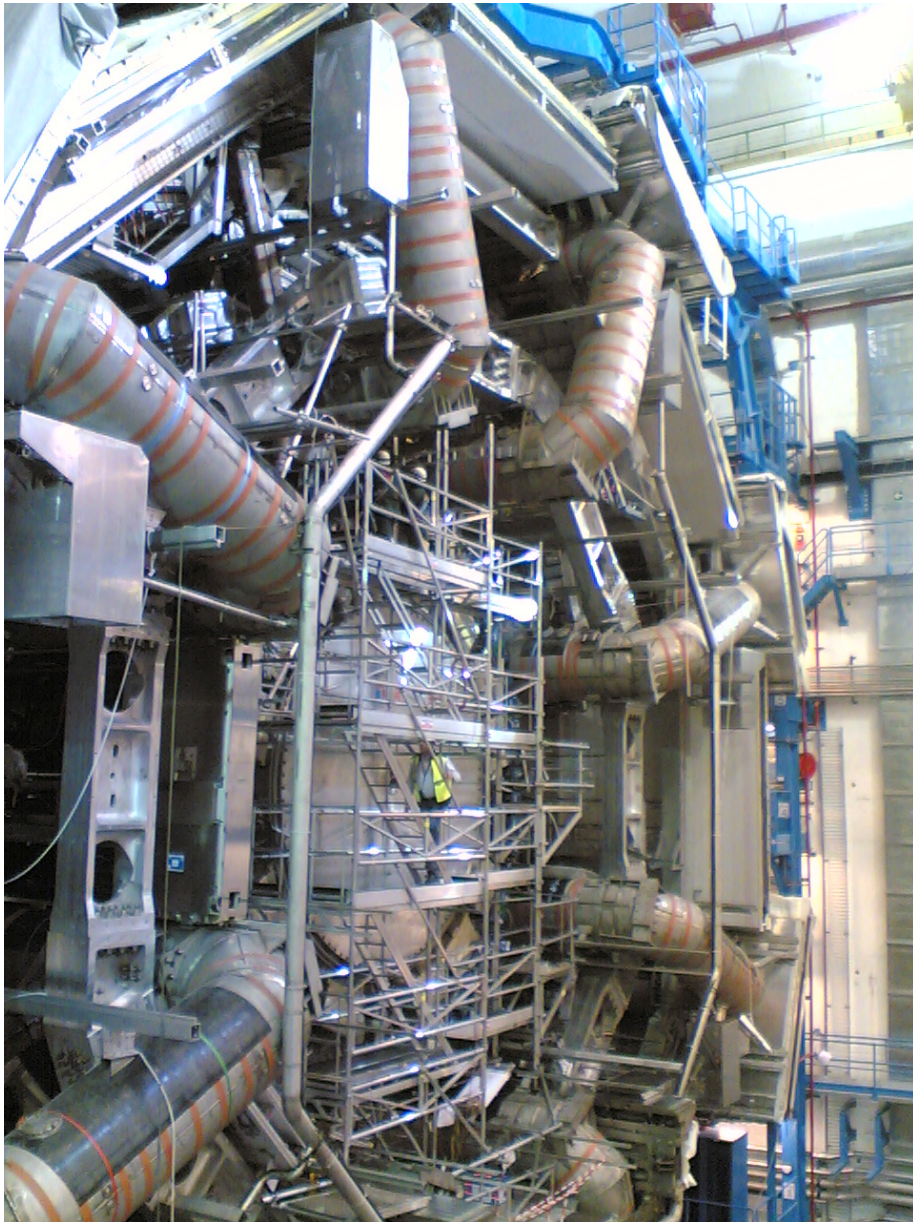


Trajectographe



Détecteur de vertex à  
micropistes de silicium (SMT)

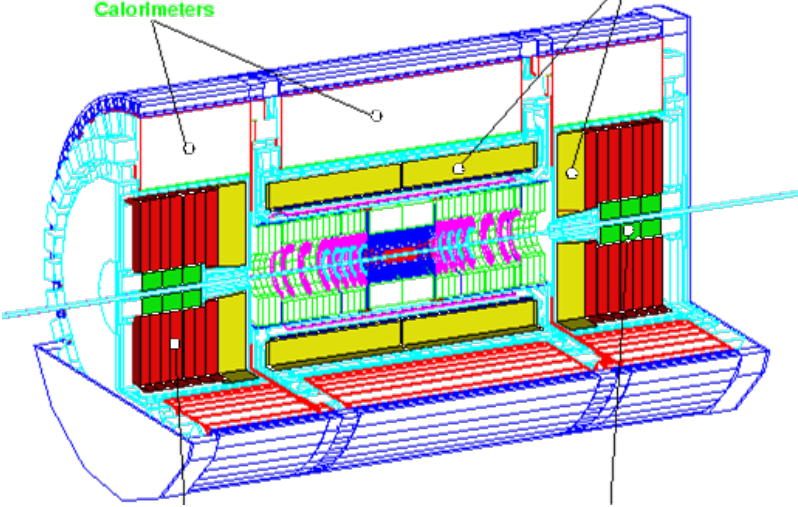
# Le détecteur ATLAS au LHC



# Le détecteur ATLAS au LHC

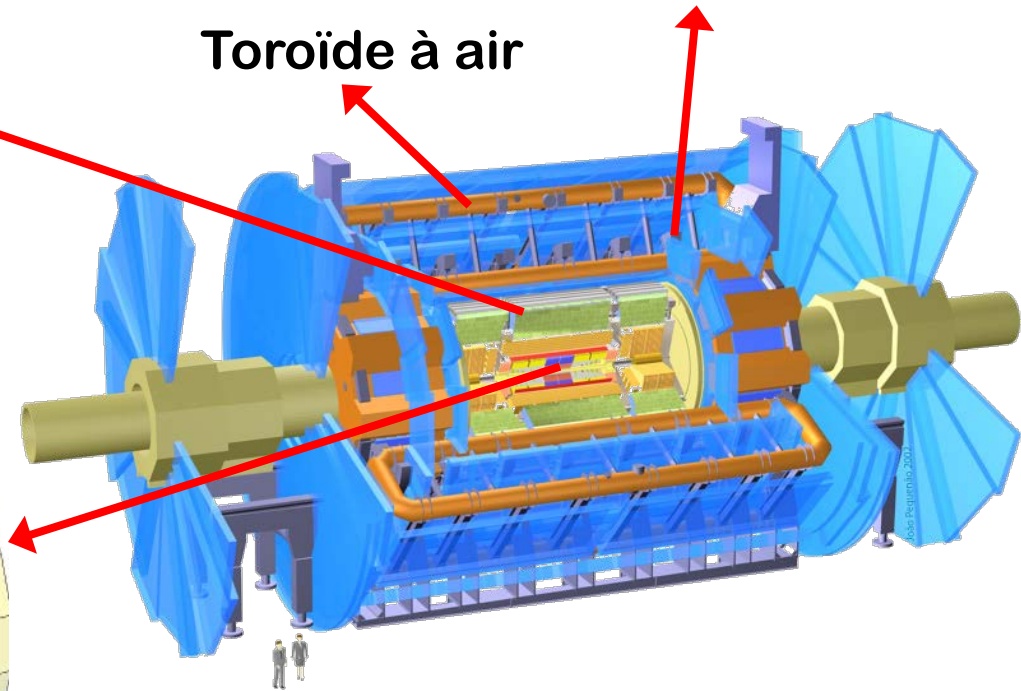
**Calorimètres : EM : Pb/Araon liquide – Hadronique : tuiles**

Hadronic Tile Calorimeters  
EM Accordion Calorimeters



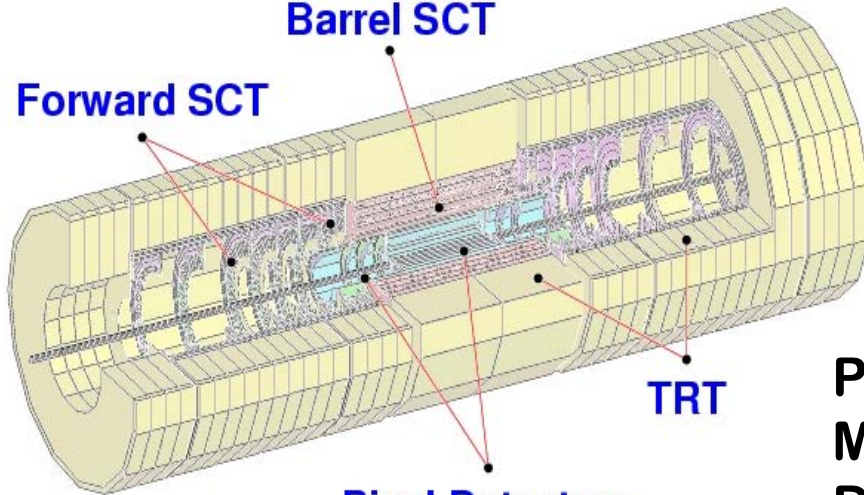
## Détecteur de muons

Toroïde à air



Barrel SCT

Forward SCT



Pixel Detectors

TRT

## Trajectographe

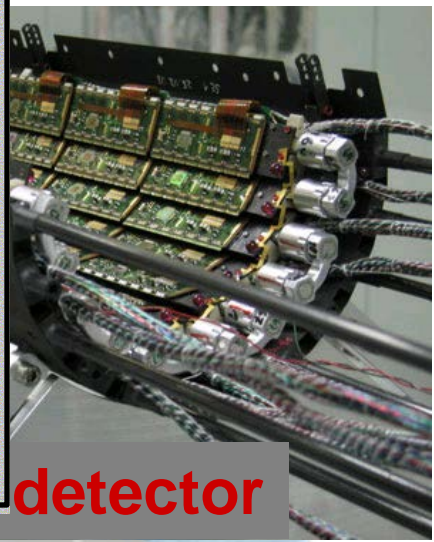
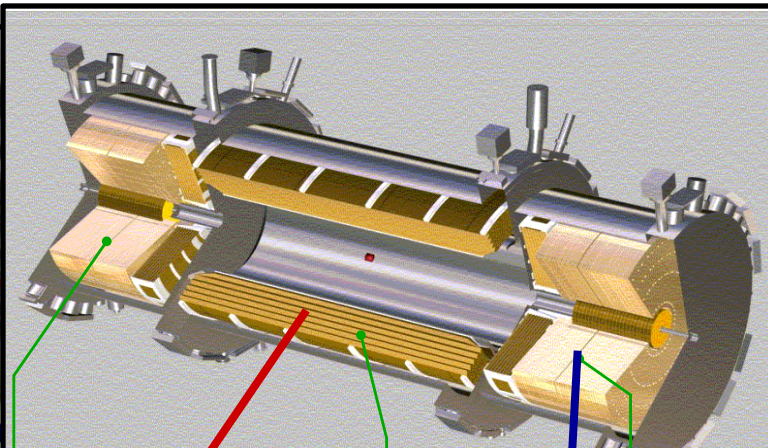
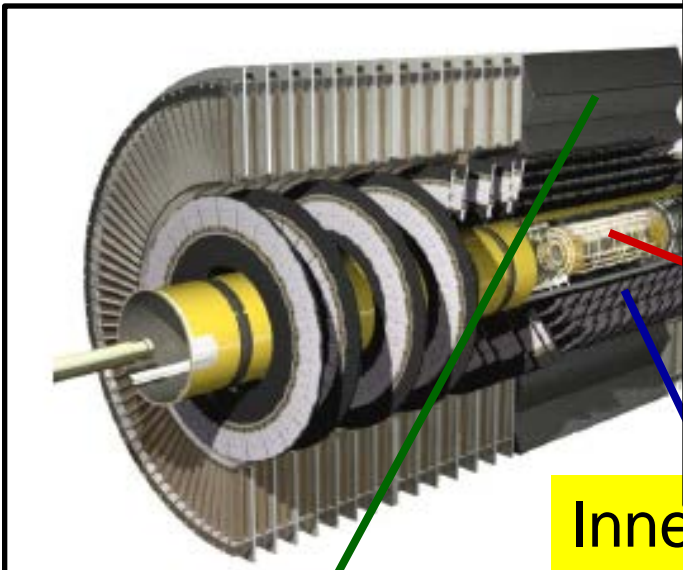
Pixels

Micropistes de silicium : SCT

Détecteur à radiation de transition : TRT

# Le détecteur ATLAS au LHC

(Diapo : P.H. Beauchemin)



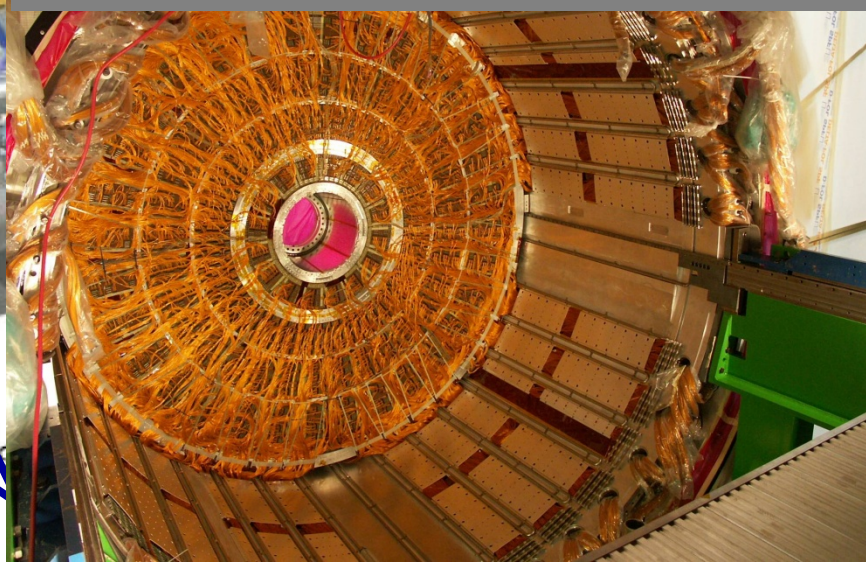
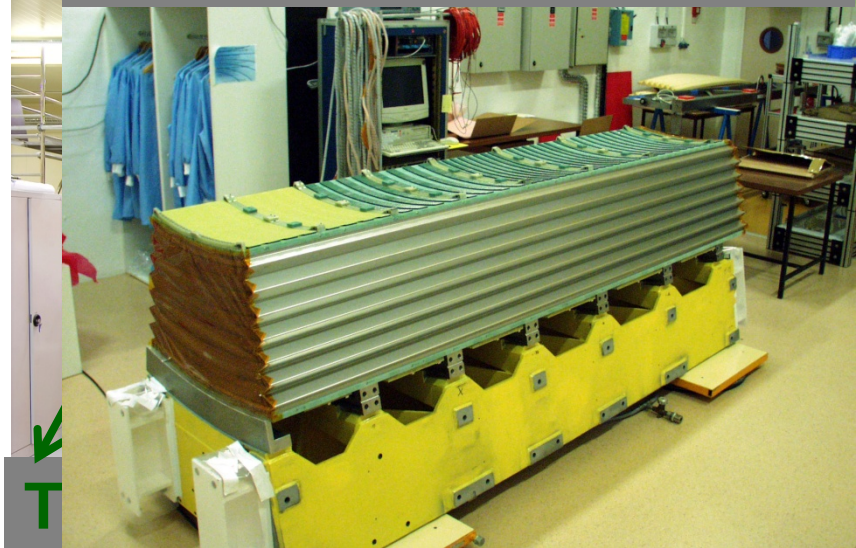
Electromagnetic calorimeter

Inner detector

detector

One EM barrel module

EM calorimeter end-cap

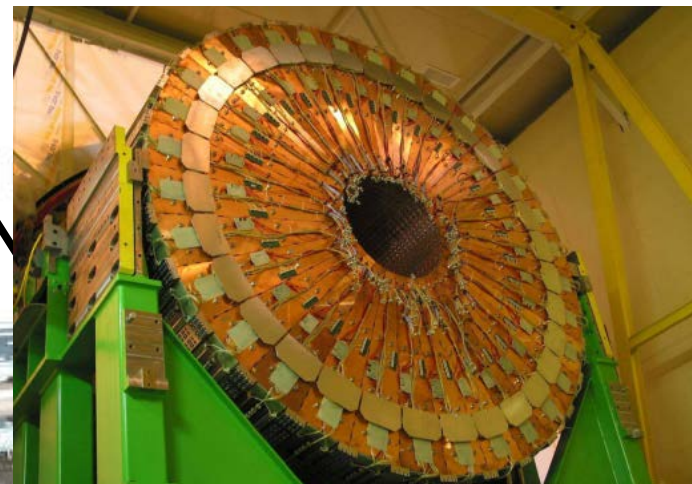
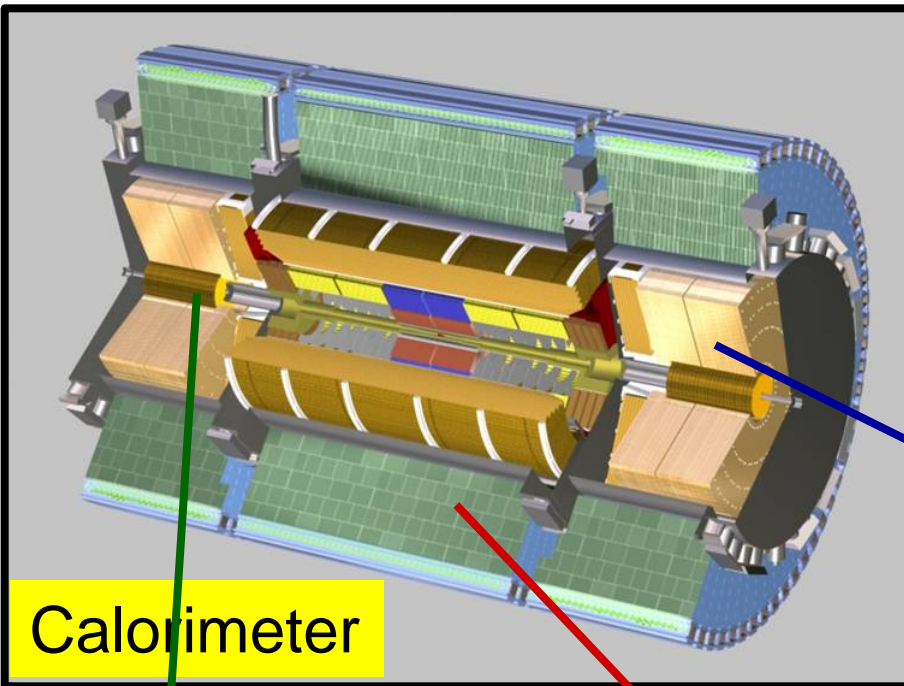


olenoid Mo

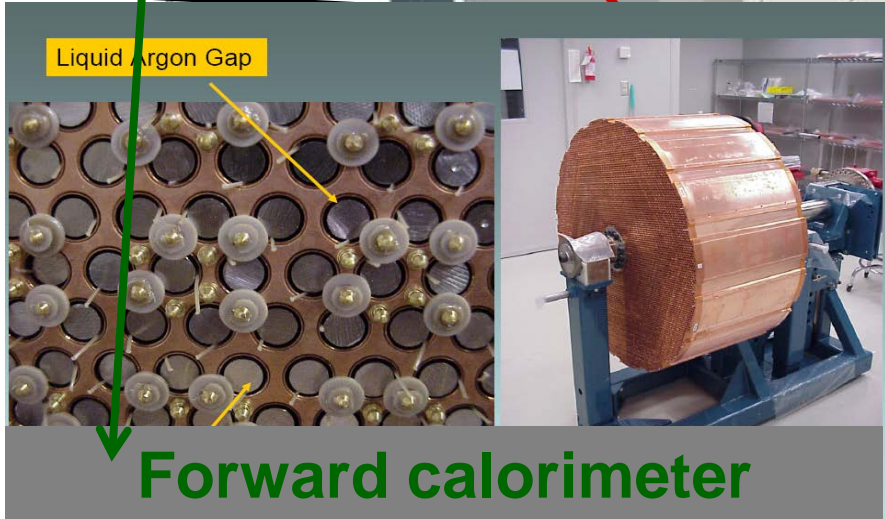
T

# Le détecteur ATLAS au LHC

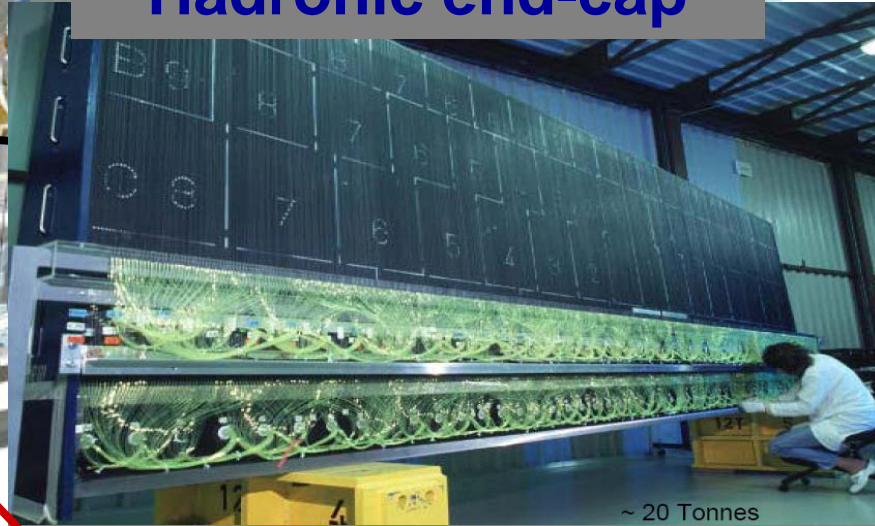
(Diapo : P.H. Beauchemin)



**Hadronic end-cap**



**Forward calorimeter**



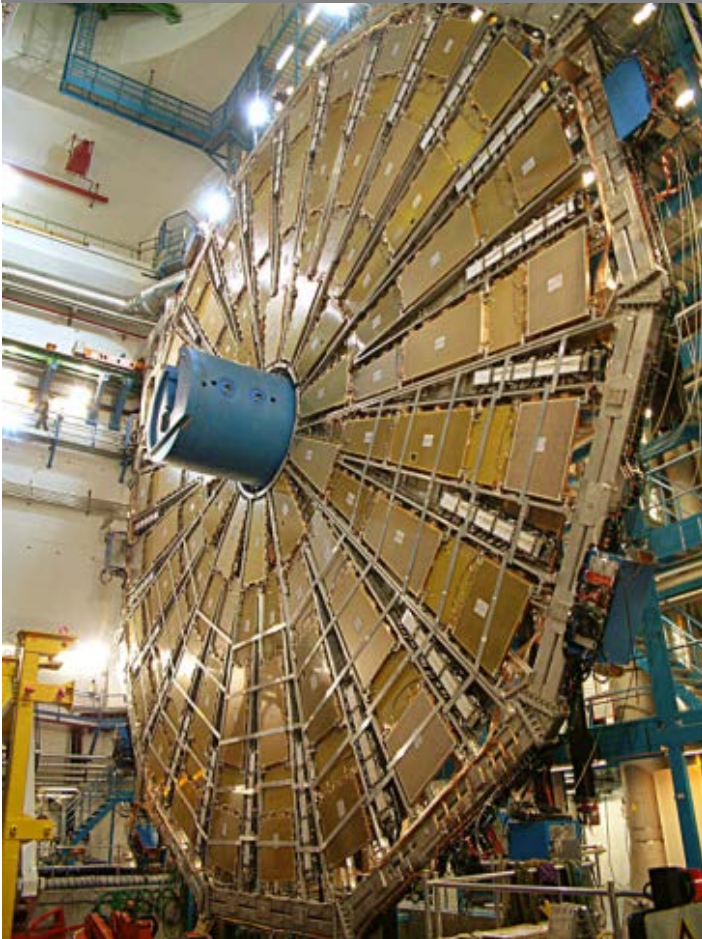
**Tile calorimeter module**



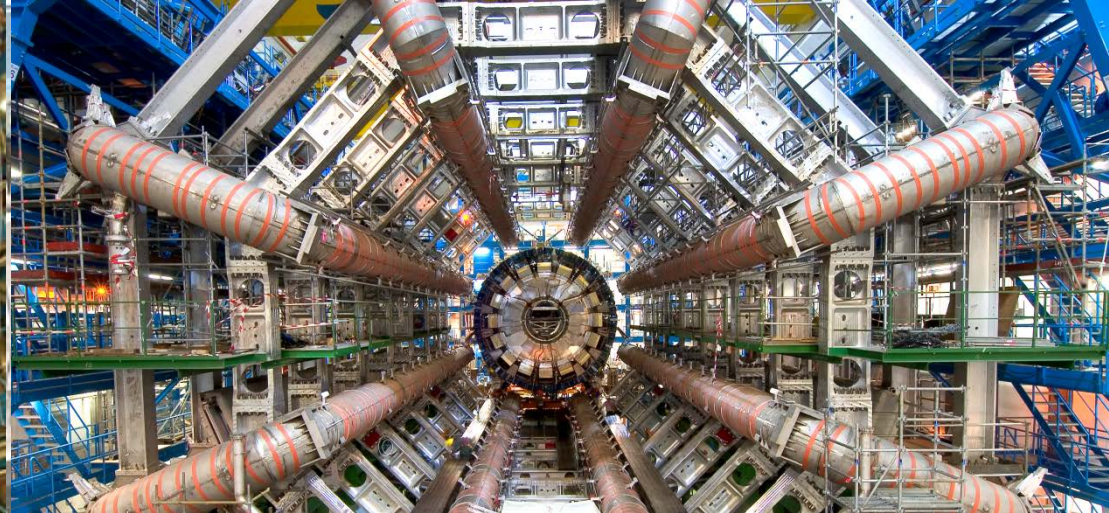
# Le détecteur ATLAS au LHC

(Diapo : P.H. Beauchemin)

## Muon spectrometer



Calorimeter      Liquid Argon Calorimeter



## Toroid magnet system

Solenoid Magnet      SCT Tracker      Pixel Detector      TRT Tracker



# CMS Collaboration



36 Nations, 160 Institutions, 2008 Scientists and Engineers (November 2003)

### TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

### TRACKER

Austria, Belgium, CERN, Finland, France, New Zealand, Germany, Italy, Japan\*, Switzerland, UK, USA

### CRYSTAL ECAL

Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Ireland, Italy, Japan\*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

### PRESHOWER

Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

### RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia  
Endcap: Japan\*, USA, Brazil

### SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular:  
Finland, France, Italy, Japan\*, Korea, Switzerland, USA

### HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain\*, USA  
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine  
HO: India

### FEET

Pakistan  
China

### FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

### MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain, Korea, Pakistan, Russia, USA  
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

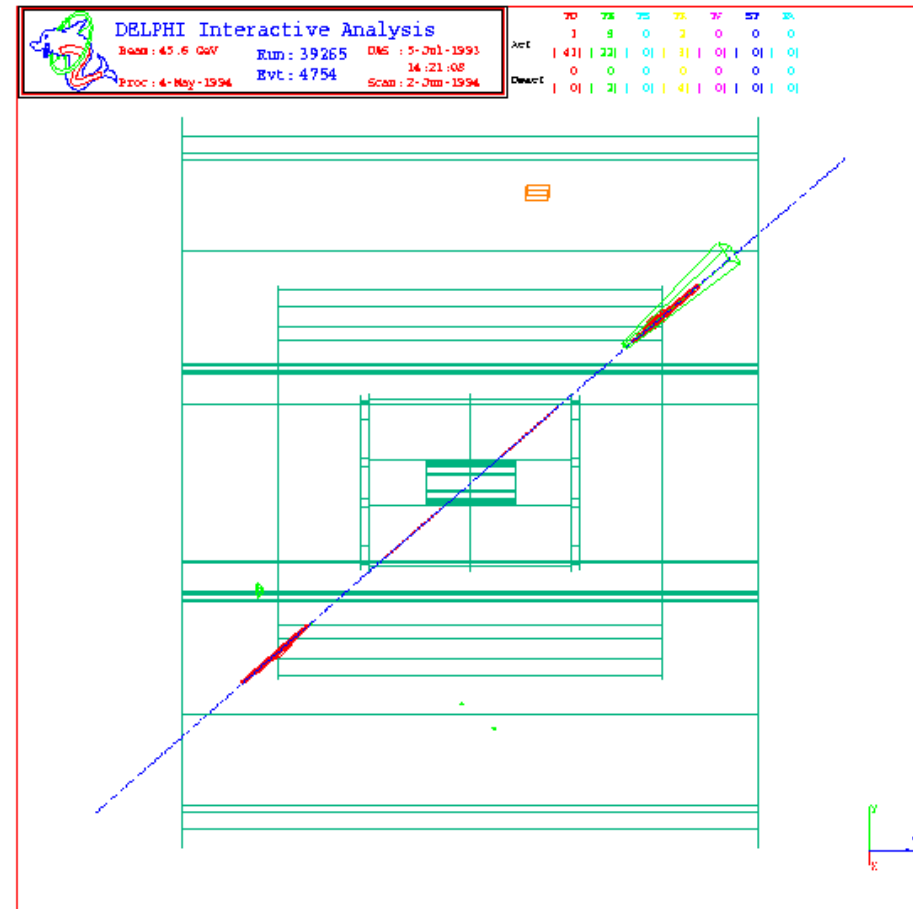
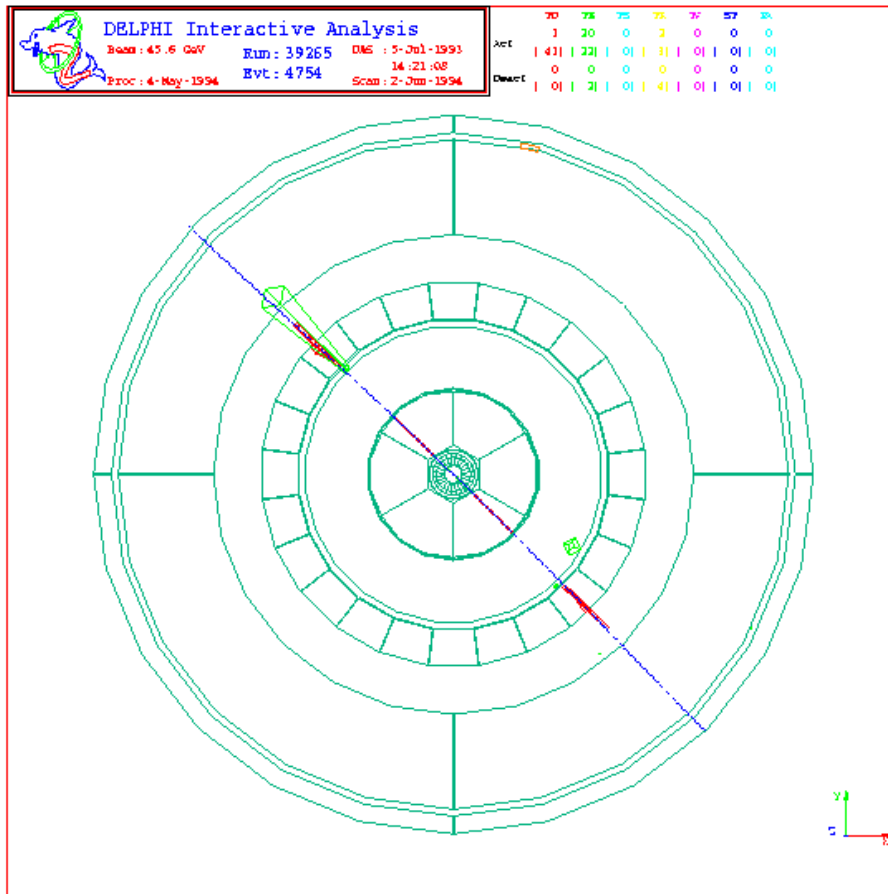
Total weight : 12500 T  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 21.5 m  
Magnetic field : 4 Tesla

\* Only through industrial contracts

## La construction de CMS au LHC

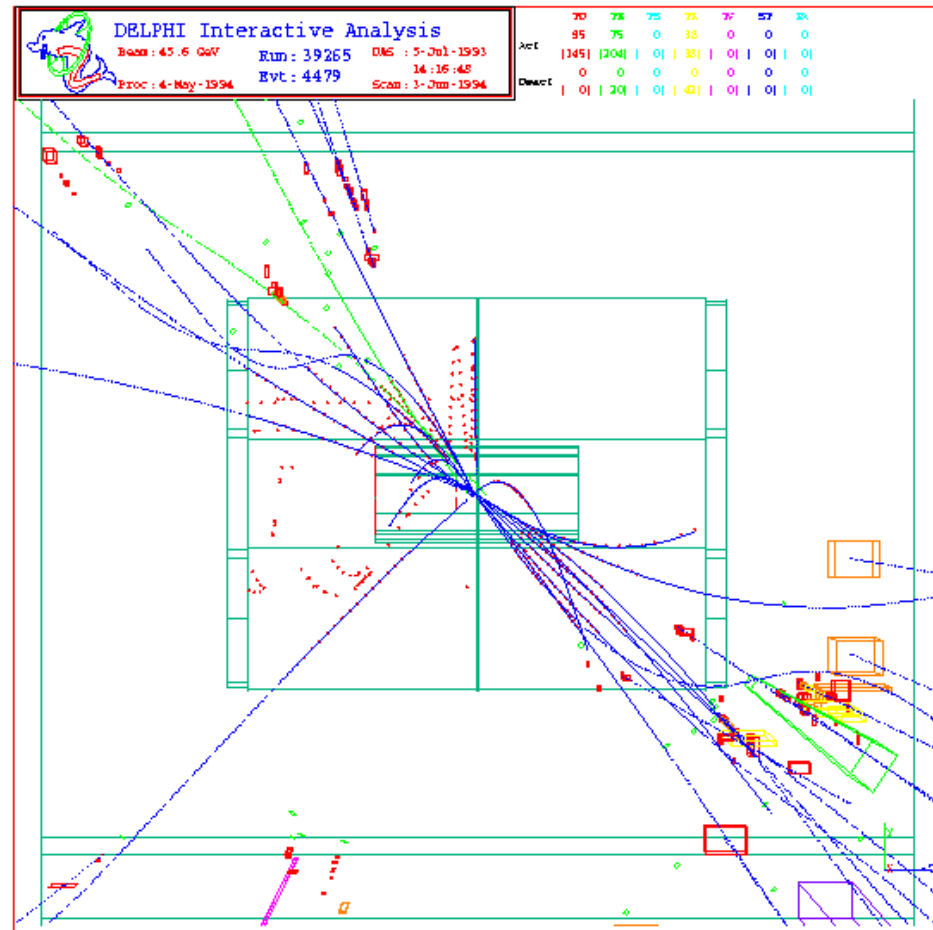
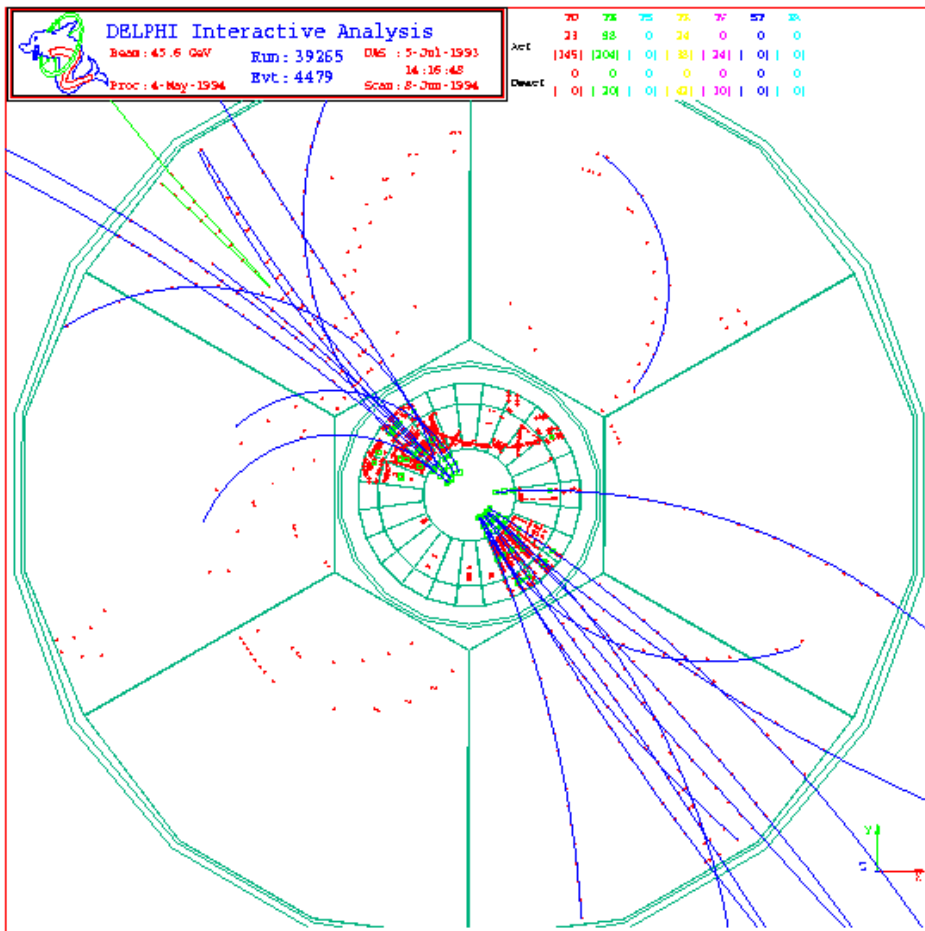


$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow e^+ e^-$$



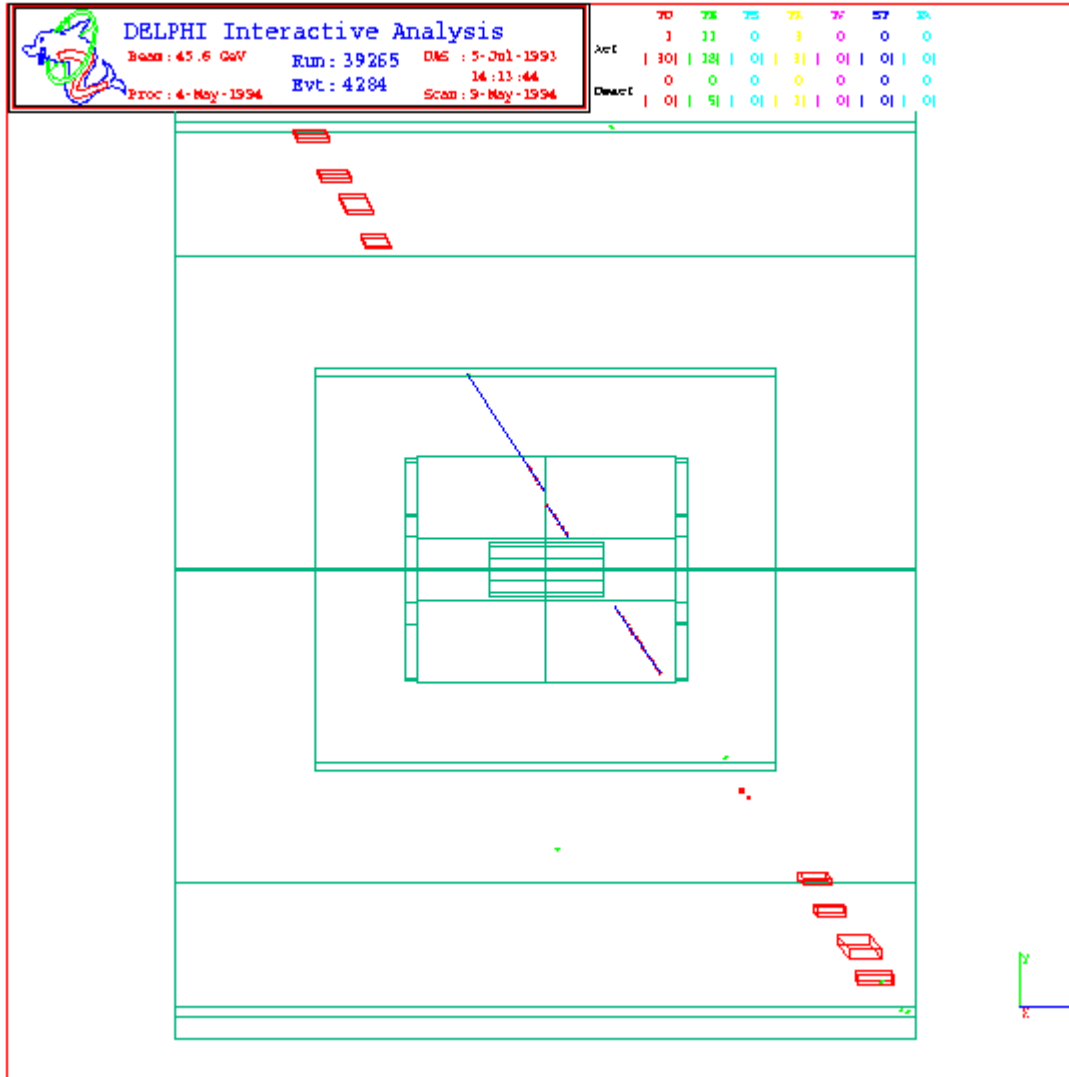
**Événement Bhabha. L'électron et le positron ont fait une gerbe dans la HPC, et sont reconstruits dans le VD, l'ID et la TPC. L'e<sup>-</sup> (côté gauche en vue x,y) a une impulsion reconstruite de 45.9 GeV, et une gerbe électromagnétique reconstruite de 48.1 GeV. L'e<sup>+</sup> a une impulsion reconstruite de 37.4 GeV et une gerbe reconstruite de 44 GeV.**

$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow q \bar{q}$$



En haut à gauche (traces vertes) :  $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

# Muon cosmique



**Muon cosmique**  
reconstruit comme deux muons dos-à-dos dans la TPC. Sa trace est clairement décalée par rapport à  $z = 0$ , ce qui l'identifie comme cosmique.

La partie haute de la trace est splittée en deux de part et d'autre du milieu de la TPC, car cet événement n'est pas synchrone avec le déclenchement de l'acquisition (donné par le croisement des faisceaux) → le  $t_0$  de la TPC est incorrect.

# $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow 4 \text{ jets}$

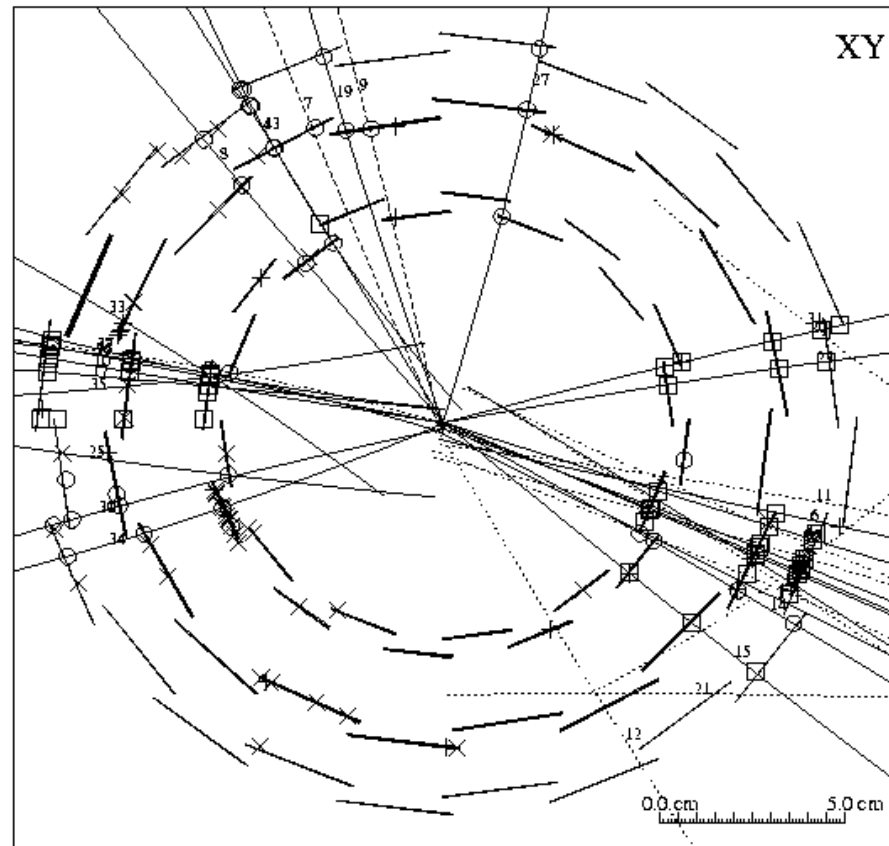
Delphi Vertex Detector

Run 67777 event 16923

10/Jul/96 19:04

A

XY



ItL	R	RPhi	Z	The	phiP	DO	P	Code	ItL	R	RPhi	Z	The	phiP	DO	P	Code
1	11.0	23.3	20.9	0.46	2.10	735	16.3	41	12	11.0	57.2	-28.6	2.76	5.26	1547	2.5	6
2	11.0	64.5	-1.2	1.62	5.86	-1239	-10.2	41	13	11.0	63.9	-37.7	2.66	5.68	-13281	-2.2	41
3	11.0	63.5	0.4	1.46	5.80	1850	-7.2	41	14	11.0	63.1	14.1	0.65	5.72	-811	-1.6	41
4	11.0	65.6	-0.2	1.51	5.97	-1109	5.4	41	15	11.0	61.3	-2.8	1.74	5.60	-1037	1.6	41
5	11.0	32.3	-2.5	1.73	2.94	930	5.3	41	16	11.0	64.6	-2.7	1.18	5.86	-500	-1.4	65
6	11.0	66.2	-0.4	1.45	6.06	2807	4.1	41	17	11.0	33.0	-1.9	1.65	3.05	4692	1.4	41
7	11.0	21.9	27.0	0.37	1.94	-848	-19	41	18	11.0	64.8	-0.4	1.67	5.88	437	-1.3	65
8	11.0	24.9	21.1	0.46	2.23	739	-3.6	42	19	11.0	20.9	10.4	0.77	1.85	430	-1.2	65
9	11.0	20.2	28.5	0.35	1.82	669	3.1	41	20	11.0	3.0	-7.6	2.11	0.23	-944	-1.1	41
10	11.0	32.6	-5.1	1.41	2.96	1066	-2.7	65	21	11.0	60.7	3.0	1.97	6.27	76564	-1.1	41
11	11.0	66.8	33.2	2.85	6.09	5192	-2.5	41	22	11.0	64.0	0.9	1.87	5.69	-13188	-1.0	65

DELPHI Run: 67777 Evt: 16923  
 Beam: 50.7 Gev Proc: 9-Jul-1996  
 OAS: 9-Jul-1996 Scan: 10-Jul-1996  
 12:13:57 DST

	TD	TE	TS	TV	TY	ST	PA
Act	0	24	0	87	0	0	0
	(26)	(27)	(1)	(1)	(2)	(2)	(1)
Deact	0	0	0	0	0	0	0

