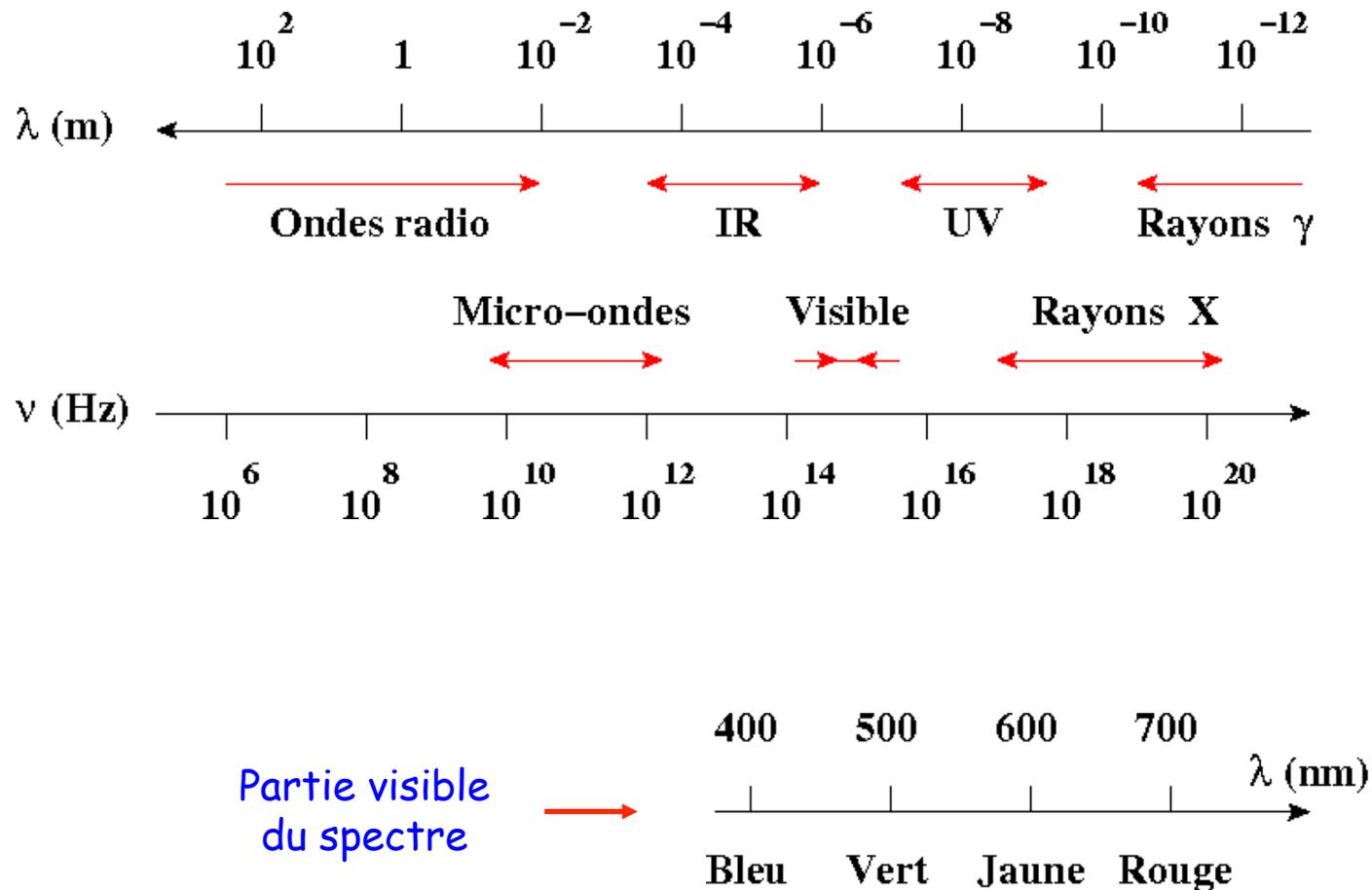

2^e partie : Détection des particules

I. Particules chargées

II. Photons

Rappel : spectre complet et sa partie visible



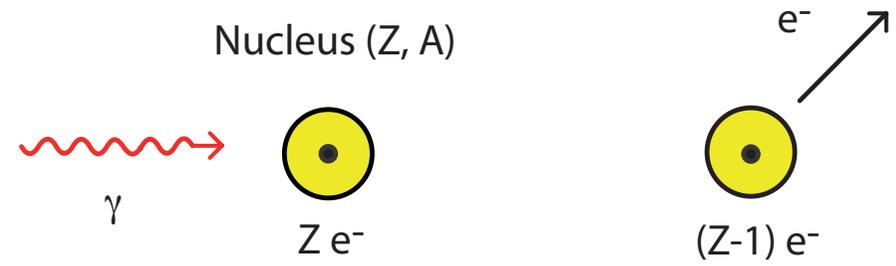
-
- On peut imaginer plusieurs méthodes pour détecter des photons :
 - Initier l'apparition d'une particule chargée qui serait détectable
 - En utilisant l'**effet photoélectrique**
 - En utilisant la diffusion Compton. Peu utilisé, à part pour de l'imagerie médicale et quelques expériences où on se sert de la directivité de l'électron pour remonter à la direction du photon reçu – non traité ici
 - En utilisant le mécanisme de la **création de paires** : on verra cela dans le chapitre sur la calorimétrie
 - Mesurer directement le flux thermique

2^e partie : Détection des particules

I. Particules chargées

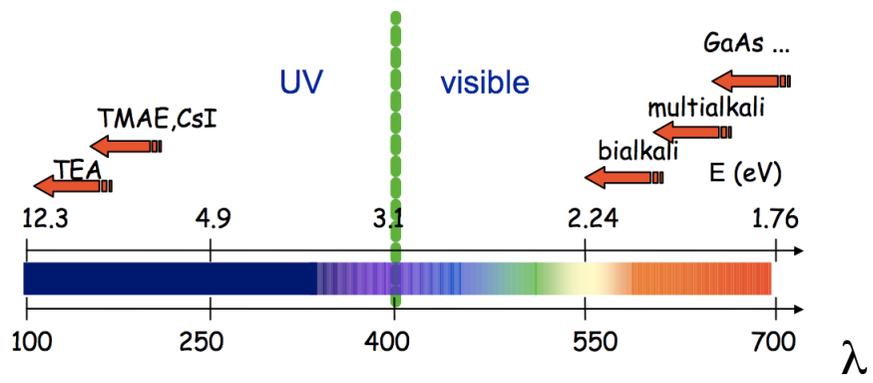
II. Photons

- 1) A travers la détection d'une particule chargée
- 2) Par effet thermique



- On utilise l'effet photoélectrique pour amener les photons à induire des photoélectrons
 - Mécanisme : $\gamma + \text{atome} \rightarrow \text{atome}^+ + e^-$
 - Photoélectron = électron issu d'un processus initié par un photon

Seuils des principaux matériaux photosensibles

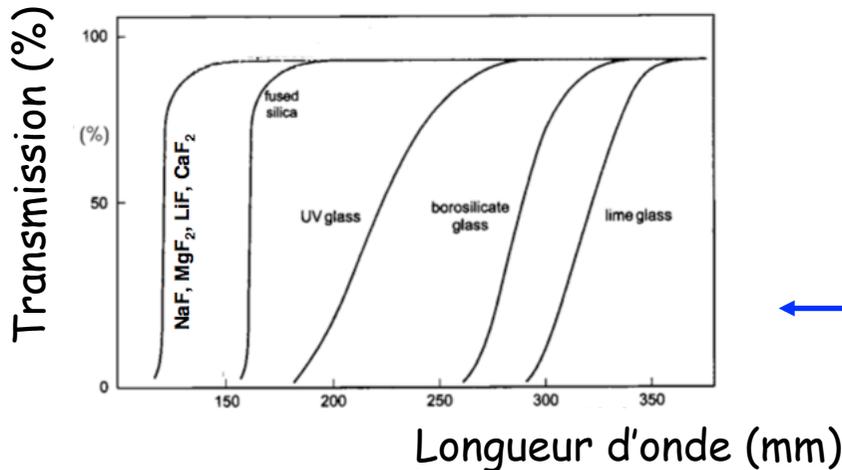
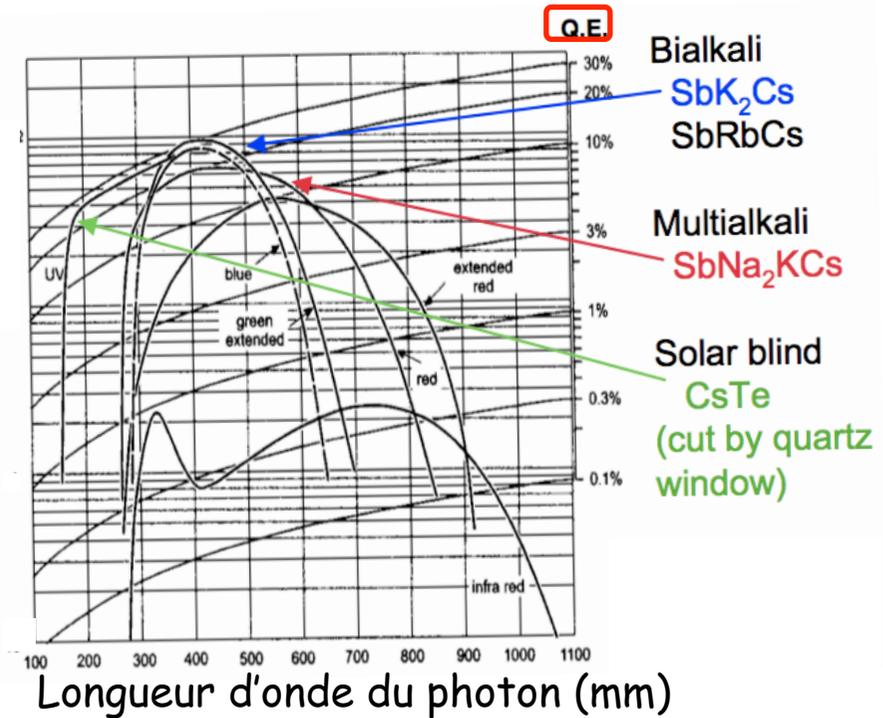


- On privilégie souvent les matériaux à forte efficacité quantique (Q.E.) :

$$Q.E. = \frac{N_{\text{Photoélectrons}}}{N_{\text{Photons}}}$$

Efficacités quantiques

- Généralement < 30% pour les photocathodes (sous vide)
- On a souvent besoin de verre pour isoler la photocathode du milieu extérieur



Facteur de transmission de certains verres

Tube photomultiplicateur

- **PMT** \equiv **P**hoto **M**ultiplier **T**ube
 - **Photoémission** sur la photocathode (couche mince d'un métal alcalin)
 - **Emission secondaire** sur les autres dynodes (souvent en CuBe) portées à des potentiels croissants
 - 2 à 5 e^- par e^- incident

- Gain élevé
 - Valeurs typiques : 10 dynodes de gain
 \Rightarrow gain total = $4^{10} \approx 10^6$ et même parfois 10^7
 - **Détection d'un photon unique (efficacité $\approx 10\%$) !**

- Inconvénients : grande taille et sensibilité au champ magnétique

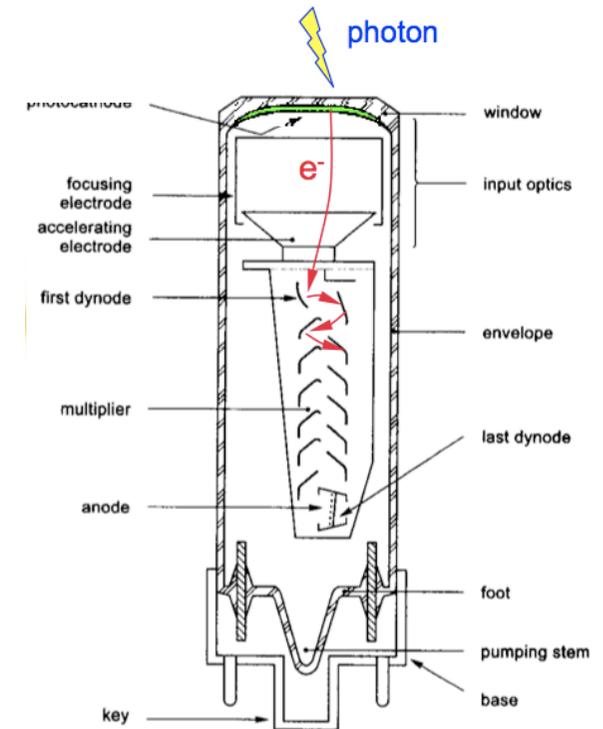


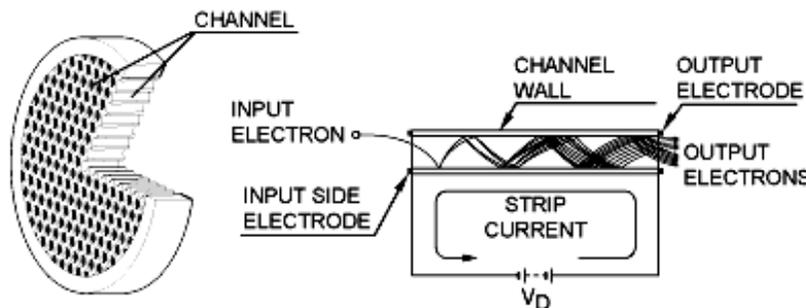
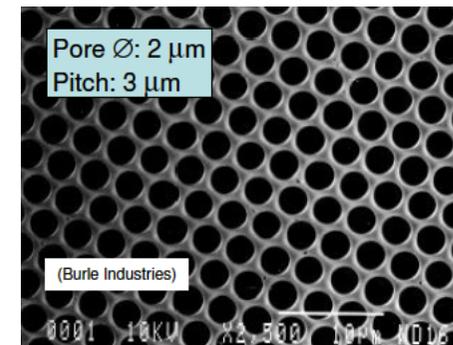
Schéma de principe d'un PMT à 13 dynodes

La forme et la taille des tubes dépendent des applications



Galettes de microcanaux

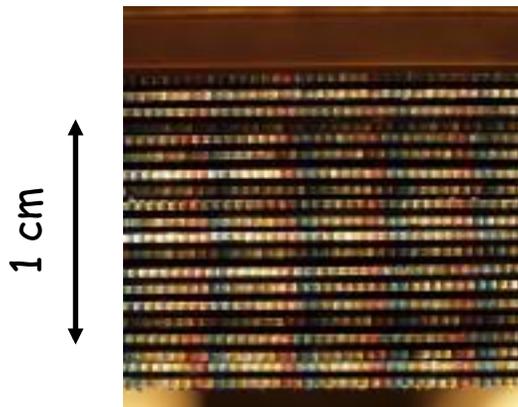
- **MCP** ≡ **M**icro **C**hannel **P**late : Alternative au PM pour détecter le photoélectron
 - Diamètre des canaux $\approx 2\text{-}10\ \mu\text{m}$
 - 0,5 mm d'épaisseur
 - Gain de quelques 10^3 par MCP
 - Gain de 10^7 en associant 2 MCP en série
 - Dispersion du temps de transit : 50 ps
 - Peu sensible à un champ magnétique



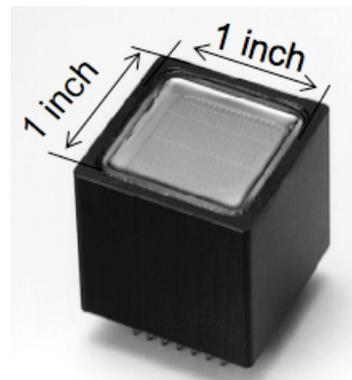
- Applications : vision nocturne, détection d'une charge unique

Tube multi-anode

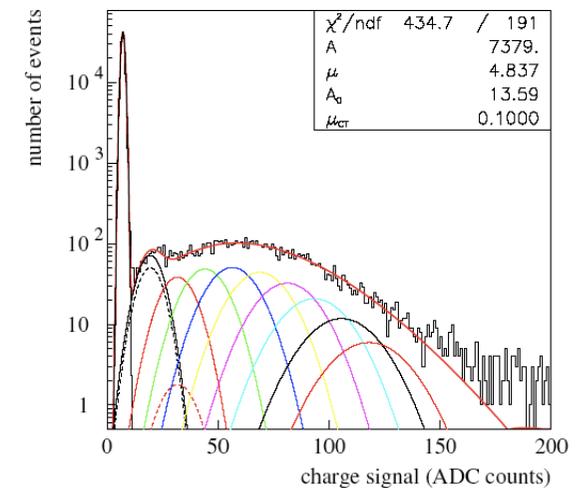
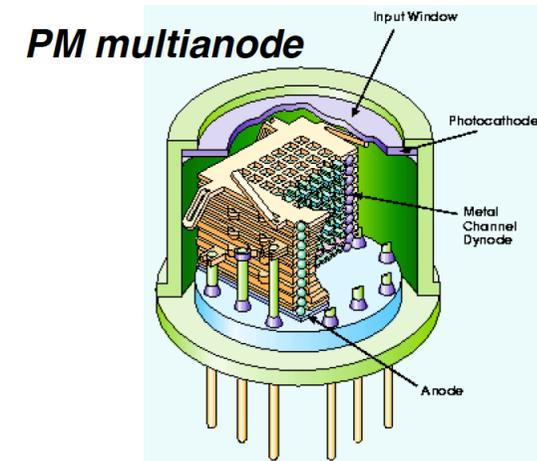
- **MAPMT** ≡ **M**ulti **A**node **P**hoto **M**ultiplier **T**ube
- Exemple : Pots Romains de ATLAS
 - Fibres scintillantes carrées de 0,5 mm



Extrémité des fibres



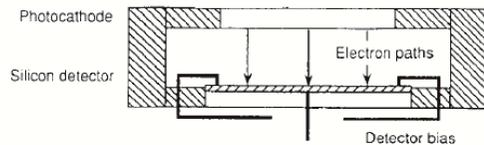
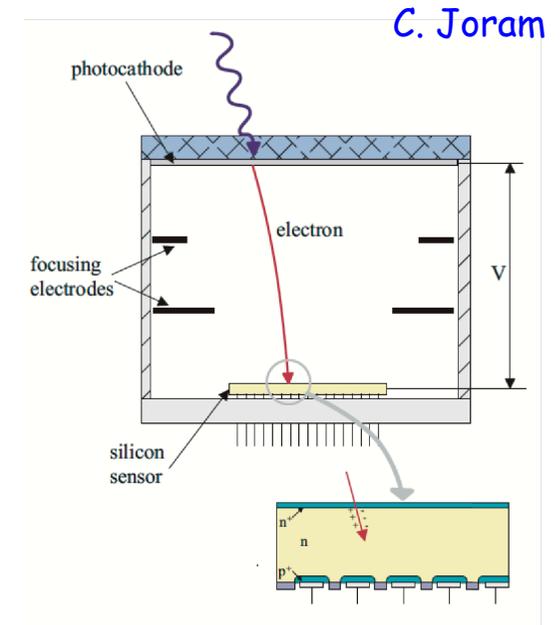
- Hamamatsu R7600
- 8x8 canaux
- $Q.E._{max} = 40\%$
- $Gain \approx 10^6$ à 900 V



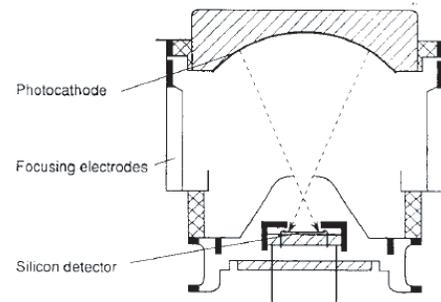
Spectre de photoélectrons à 950 V

Extension : HPD

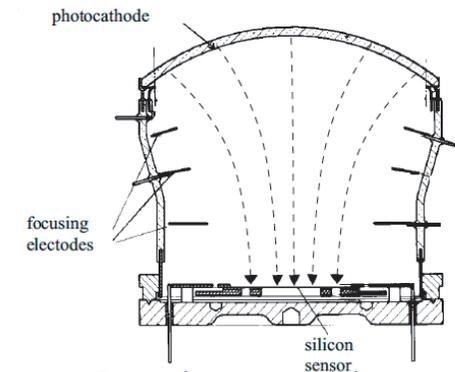
- **HPD** \equiv **H**ybrid **P**hoto **D**iodes
 - Photocathode + détecteur Si (pixel, strips ou pads)
- Electrodes de focalisation : réduction du nombre de pixels
- Plusieurs configurations



Focalisation droite

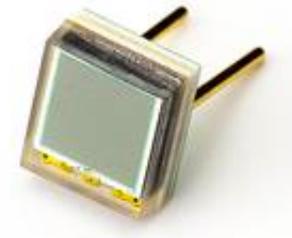


Focalisation croisée



Focalisation directe

SiPM ou MPPC



- **SiPM** \equiv **Silicon PhotoMultiplier** - **MPPC** \equiv **Multi-Pixel Photon Counter**
- Constitué de milliers de détecteurs semi-conducteurs solides (photodiodes) de 20 à 100 μm de côté
 - La réponse de chaque cellule est binaire : elle émet une quantité fixée d'électrons si elle est traversée par un photon
 - Le signal du SiPM est la somme des signaux de l'ensemble des cellules : **mesure analogique de la quantité de photons reçus** (allant du photon unique à plus de 10^4 photons)
- Avantages : $QE \approx 20\%$, insensible au champ magnétique, compact, alimentation $< 100\text{ V}$, moins cher que les PM : **alternative crédible aux PM**

2^e partie : Détection des particules

I. Particules chargées

II. Photons

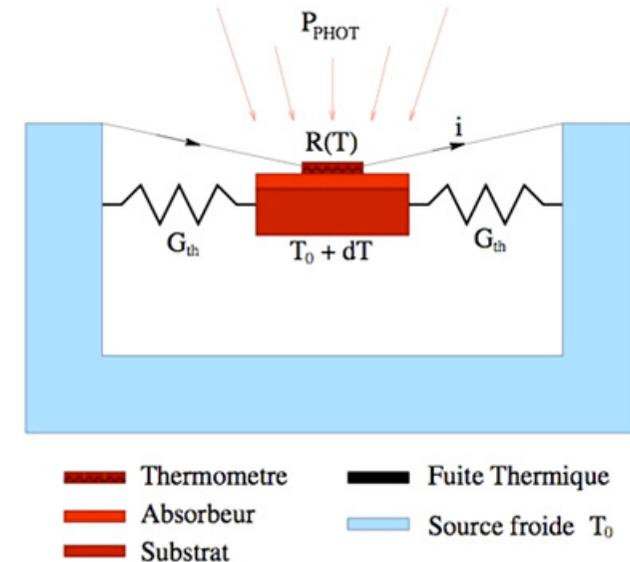
- 1) A travers la détection d'une particule chargée
- 2) Par effet thermique

Bolomètres

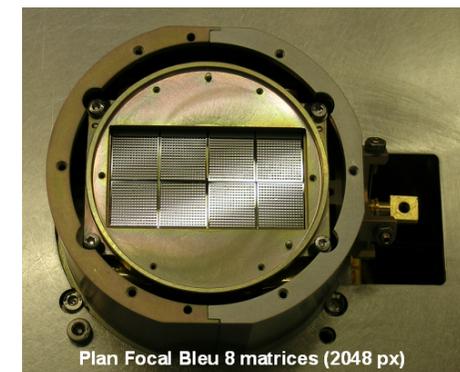
- Principe : convertir l'énergie du rayonnement incident en chaleur
 - La puissance incidente est absorbée par un matériau adéquat
 - On mesure l'élévation de température
- Les **bolomètres** peuvent couvrir l'intégralité du spectre EM mais sont spécialisés sur un domaine de longueur d'onde particulier (IR, ..)
- Afin d'accroître leur sensibilité et de réduire l'influence de leur bruit intrinsèque (ie le rayonnement qu'ils émettent eux-mêmes), les bolomètres opèrent souvent à des températures < 4 K (LHe) ou même < 0.1 K (LHe³-LHe⁴), même si certains fonctionnent avec des YBaCuO (≈ 90 K)

- Pour l'astronomie infrarouge ou submillimétrique :
 - Absorbeur sous forme d'une grille qui capture le rayonnement EM
 - Déposé sur un substrat de faible capacité calorifique

- Ordre de grandeur des sensibilités : couramment jusqu'à $1 \mu\text{K}$ ie 10^{-16} W
 - Détection d'une lampe de 100 W à $300\,000 \text{ km}$



Bolomètres de Herschel



Conclusion sur la 2^e partie

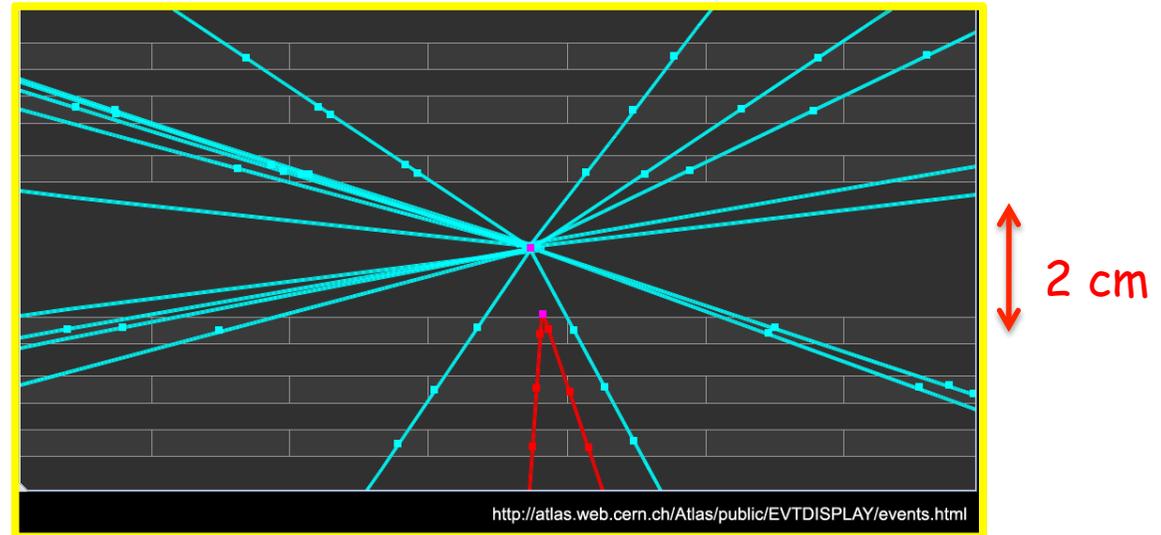
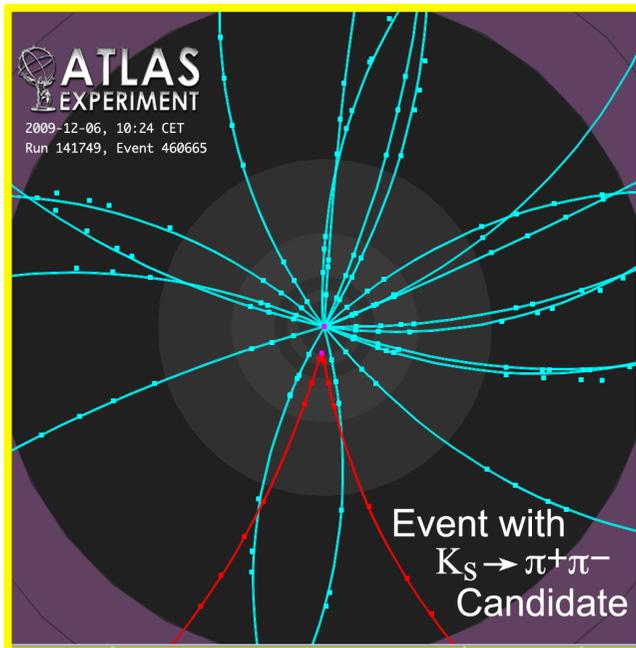
- La détection des particules chargées est basée sur les détecteurs à ionisation, à scintillation ou à semi-conducteurs
 - Les plus efficaces de ces détecteurs possèdent un mécanisme interne d'amplification de la charge détectée

- La détection des photons est basée la plupart du temps sur l'effet photoélectrique qui va éjecter un photoélectron
 - Le but ensuite est de détecter cet électron unique
 - A plus haute énergie, lorsque la création de paires sera l'effet dominant, on verra plus tard que les photons induiront des gerbes électromagnétiques

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

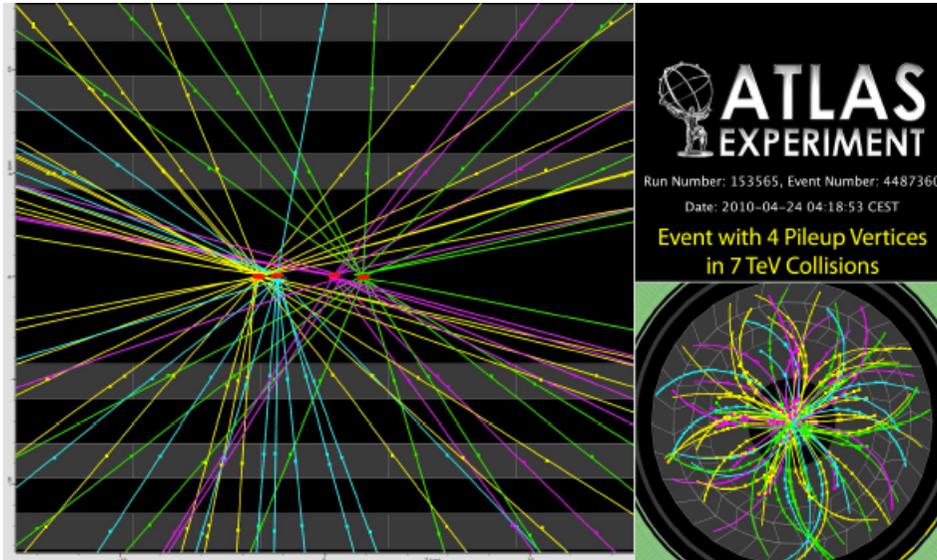
- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. Mesure de l'énergie
- IV. Identification des particules

Utilité d'une bonne résolution en position au plus près de la collision

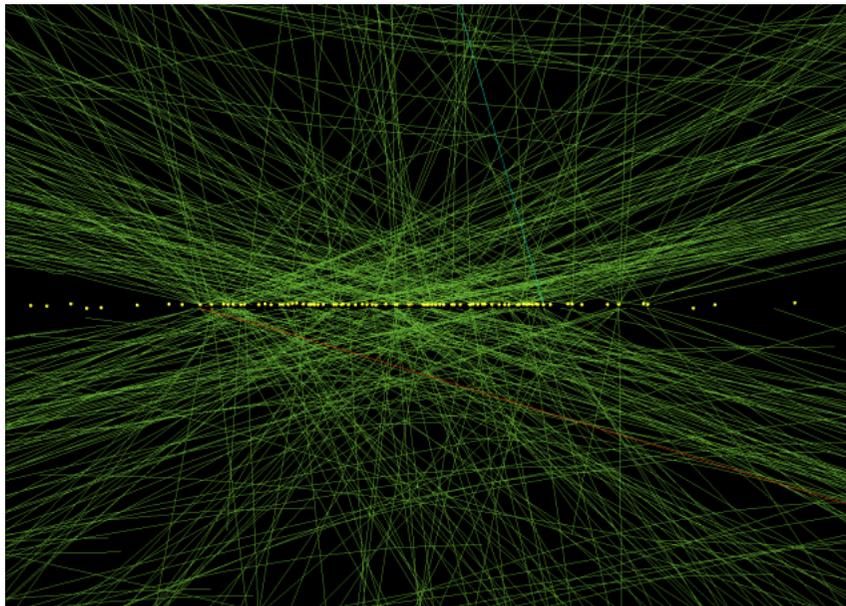


⇒ Une bonne extrapolation est nécessaire pour reconstruire les vertex secondaires

On utilise les détecteurs vu hier (principalement détecteurs à ionisation, à scintillation et à semi-conducteurs) pour reconstruire dans l'espace la trajectoire des particules (chargées)



4 événements dans
ATLAS répartis en
-32 et + 19 mm

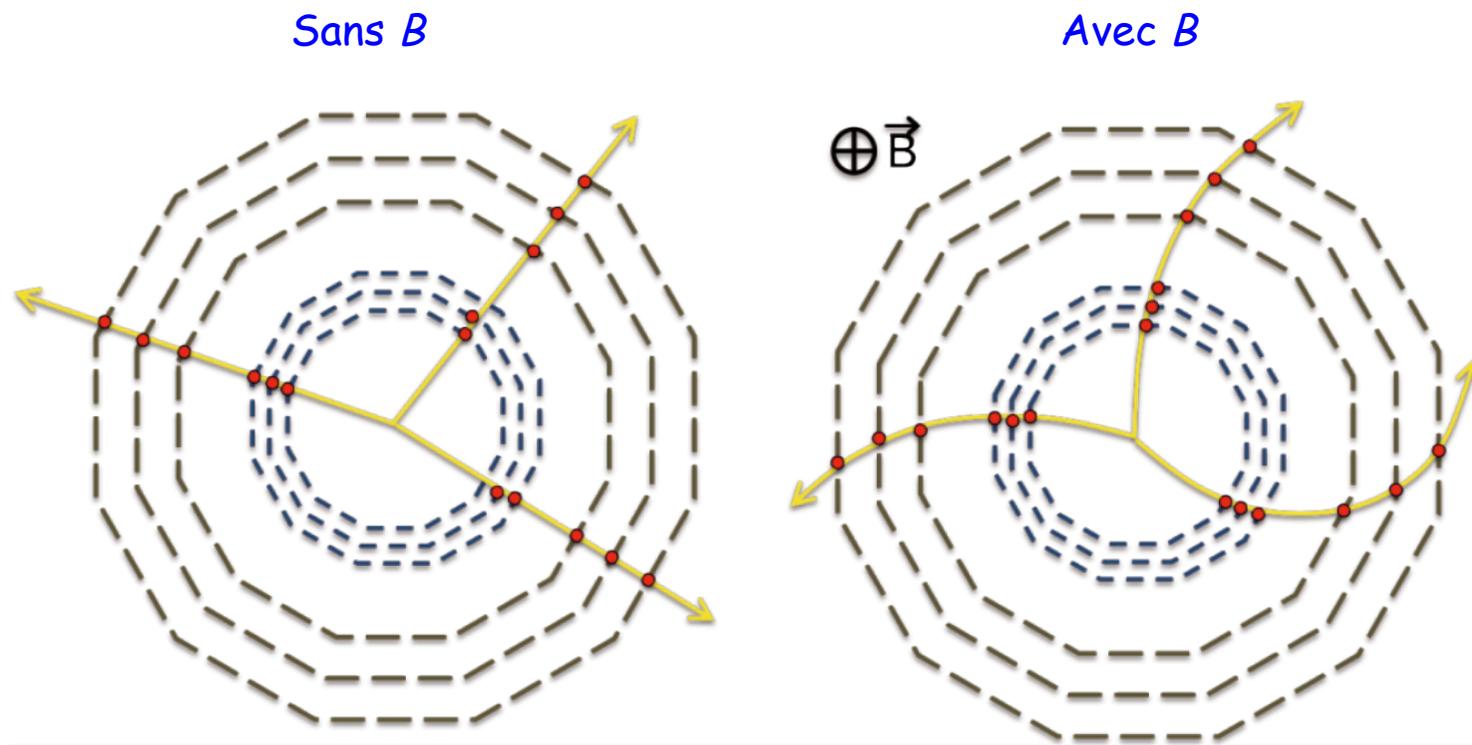


Un croisement de paquets
auprès de CMS avec 78
événements reconstruits

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

- I. Reconstruction des traces
- II. **Mesure de la charge et de la quantité de mouvement**
- III. Mesure de l'énergie
- IV. Identification des particules

- On a besoin d'un système de *tracking* et d'un champ magnétique



⇒ Le signe de la charge est donné par le sens de courbure dans le champ B

Rappel : Mouvement d'une particule chargée dans un champ B

- Pour une particule non relativiste :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} = \frac{q}{m}\vec{p} \times \vec{B}$$

- La particule tourne autour de B à la **fréquence cyclotron** ($\omega_c = qB/m$)

- Pour une particule relativiste :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} = \frac{q}{\gamma m}\vec{p} \times \vec{B}$$

- La particule tourne autour de B à la fréquence $\omega_c = qB/\gamma m$
- Dans le plan transverse au champ B , la trajectoire est circulaire (à énergie constante)

Mesure de l'impulsion dans un champ B

- La mesure de la trajectoire dans le champ permet de remonter à l'impulsion p_T :

Transverse à B ! $\longrightarrow p_{T[GeV/c]} = 0,3 B_{[T]} \rho_{[m]}$

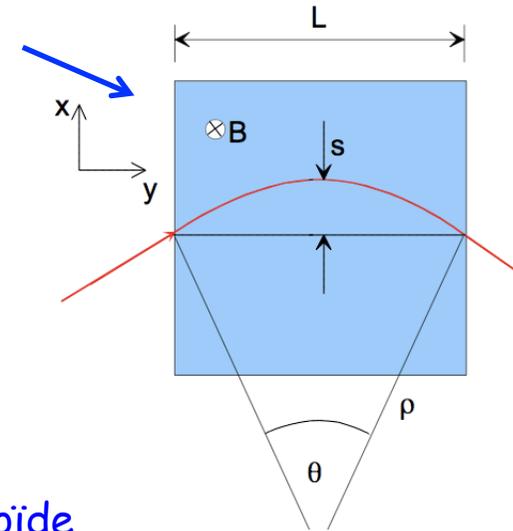
- Le sens de la courbure donne la charge

- Dans le cas d'un champ solénoïdal, on montre finalement que :

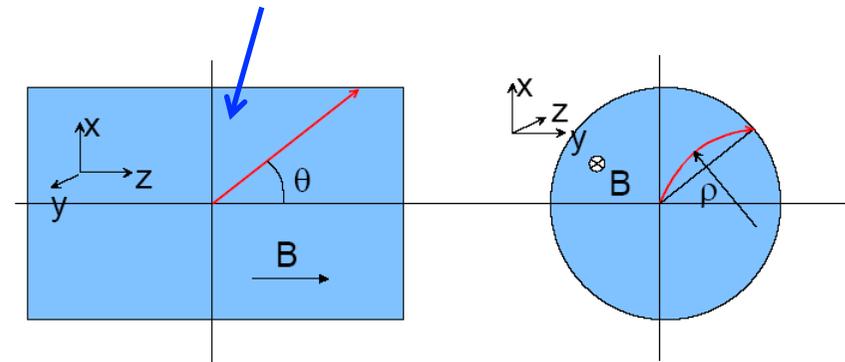
$$\left. \frac{\sigma(p)}{p} \right|_{Exp} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sigma(x) p}{B L^2}$$

\Rightarrow Augmenter N (nombre de points de mesure)
et diminuer $\sigma(x)$ (résolution en position)

Dipôle



Solénoïde



$$p_T = p \sin(\theta)$$

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

I. Reconstruction des traces

II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement

III. Mesure de l'énergie

1) Généralités

2) Calorimétrie électromagnétique

3) Calorimétrie hadronique

4) Deux types de calorimètres

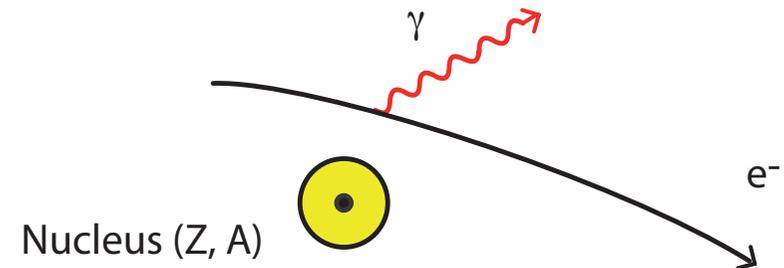
IV. Identification des particules

Rappels

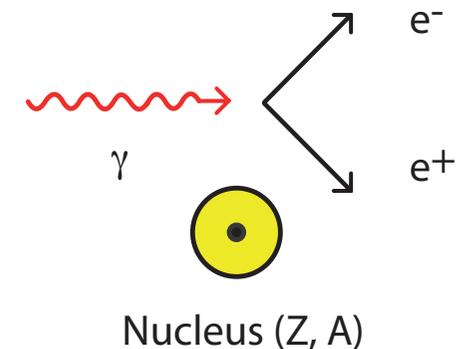
- Un électron/positron est courbé par le champ des noyaux : c'est le **rayonnement de freinage** (ou **bremsstrahlung**) qui domine à haute énergie
 - Définit la longueur de radiation X_0 (g/cm²) :
 - L'**énergie critique** est l'énergie à laquelle :

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Collision}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Rayonnement}}$$

- Conversion d'un photon : le mécanisme dominant à haute énergie est la **production de paires**
- En moyenne, un γ de haute énergie se convertira en une paire e^+e^- après $1 X_0$



$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0}$$



Qu'est-ce qu'un « calorimètre » ?

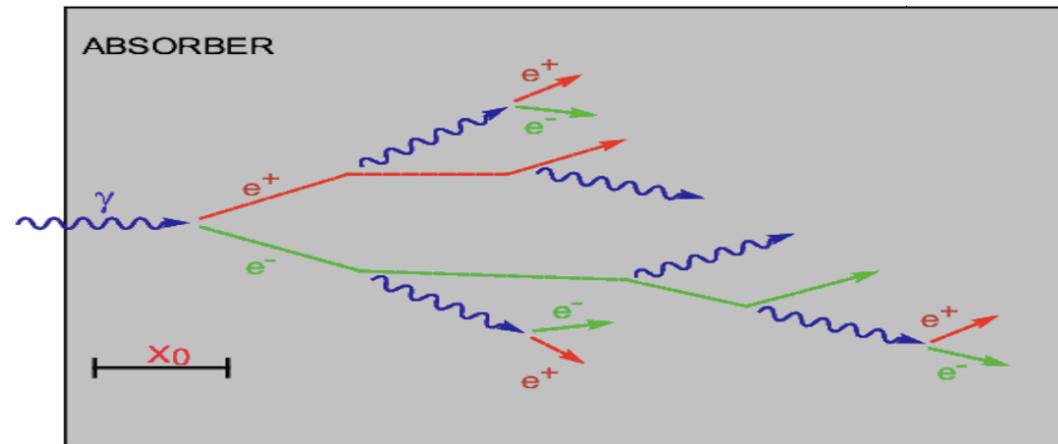
- « calor, caloris » : chaleur en latin
- Thermodynamique : 1 calorie (or 4,185 J) est l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un gramme d'eau de 15 à 16 °C
 - $1 \text{ GeV} = 10^9 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,8 \cdot 10^{-9} \text{ cal}$
 - L'augmentation de température du milieu est négligeable et non mesurable
- Dans la Physique de l'IN2P3, un **calorimètre** est un appareil pour détecter et mesurer les propriétés des particules par leur **absorption complète** dans la matière par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. **Mesure de l'énergie**
 - 1) Généralités
 - 2) **Calorimétrie électromagnétique**
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Deux types de calorimètres
- IV. Identification des particules

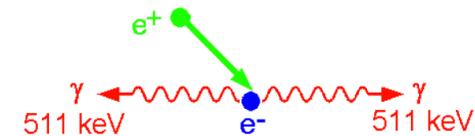
- Concerne les e^\pm et les γ

Conversion d'un γ au
bout d'environ $1 X_0$

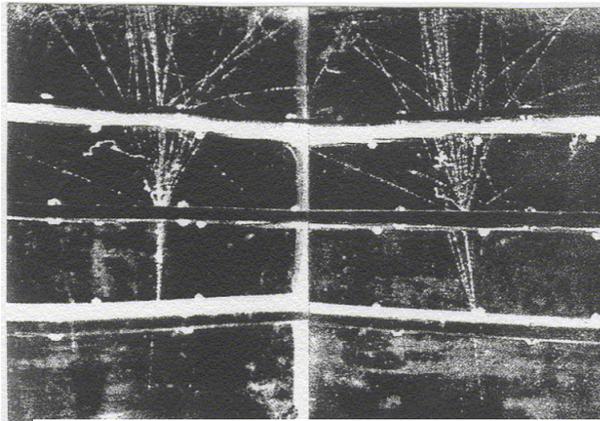


- Création d'une **gerbe électromagnétique**
 - Excitation ou ionisation
 - L'énergie est (partiellement) convertie en un signal proportionnel à l'énergie de la particule incidente
- On appellera **absorbeur** le milieu qui déclenche la gerbe

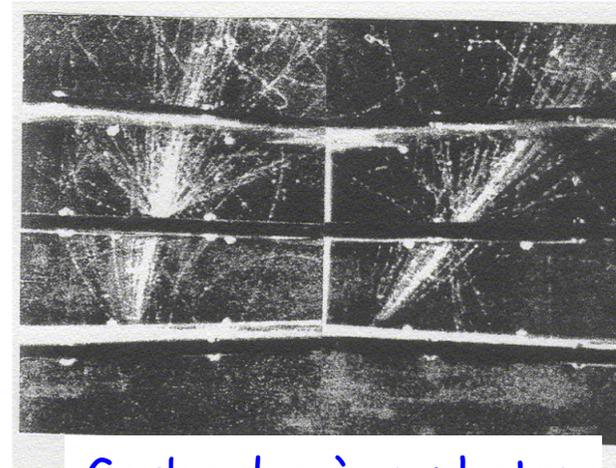
- Au delà du maximum de la gerbe, les mécanismes dominants sont l'ionisation, l'effet Compton et l'effet photoélectrique
 - Les électrons finissent par s'attacher autour d'un noyau
 - Les positrons finissent par s'annihiler avec un électron libre ou peu lié



- La forme des gerbes dues aux e^\pm et aux γ est différente



Gerbe due à un électron



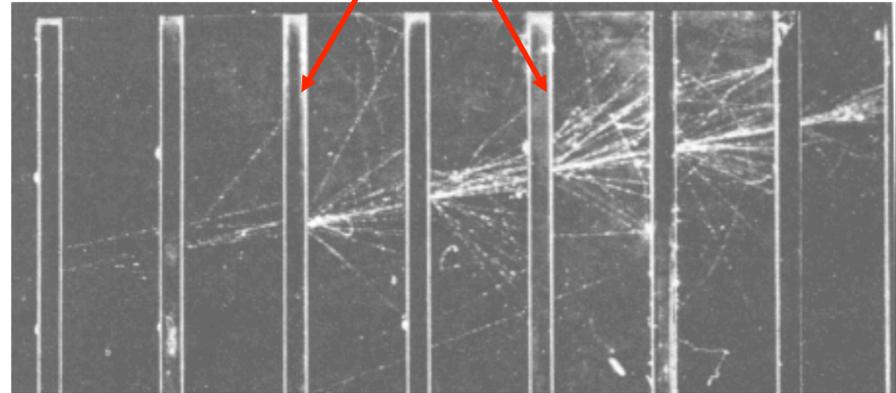
Gerbe due à un photon

L. Fussel
(1939)

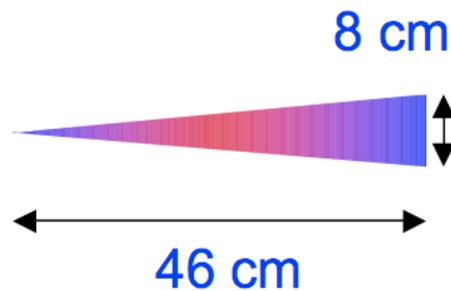
Exemple réel

Gerbe électromagnétique
créée par un électron
dans une chambre à
brouillard

Absorbeurs en plomb



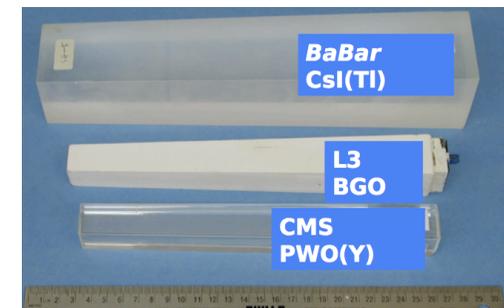
- Electron de 100 GeV dans un « verre au plomb » (PbWO_4)
 - $E_c = 11,8 \text{ MeV}$
 - $t_{95} \approx 23$
 - $t_{max} \approx 13$
 - $X_0 \approx 2 \text{ cm} - R_m \approx 3,6 \text{ cm}$



BaBar: CsI(Tl) : $16 X_0$

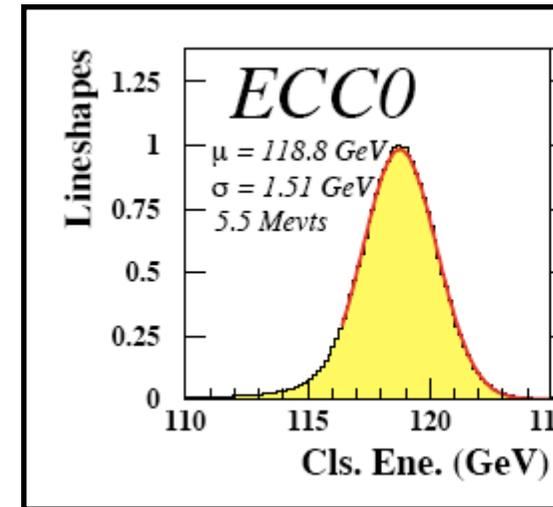
L3: BGO : $22 X_0$

CMS: PbWO_4 : $25 X_0$

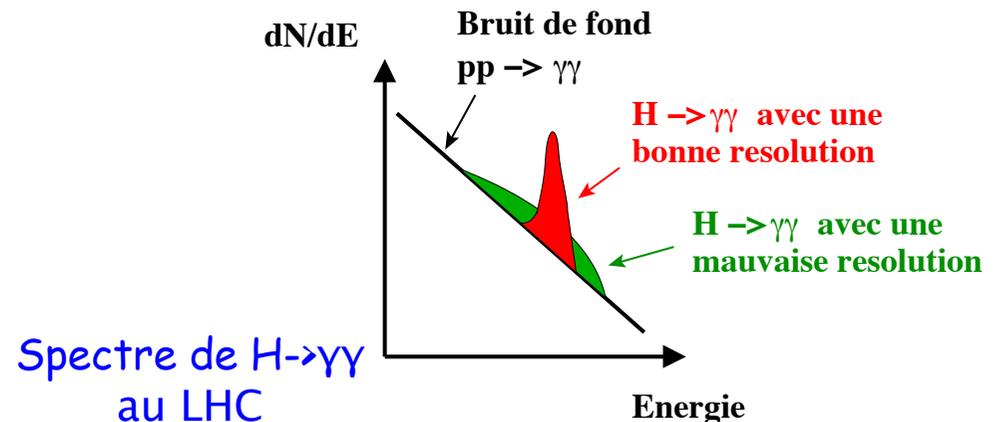


Remarque sur les résolutions

- Pour connaître la résolution en énergie d'un détecteur, on envoie sur le détecteur des particules d'énergie connues dont on essaye de recouvrir l'énergie
- Les distributions sont typiquement gaussiennes et sont caractérisées par leur largeur $\sigma(E)$
- On a besoin de la meilleure résolution possible



Exemple du calorimètre EndCap de ATLAS



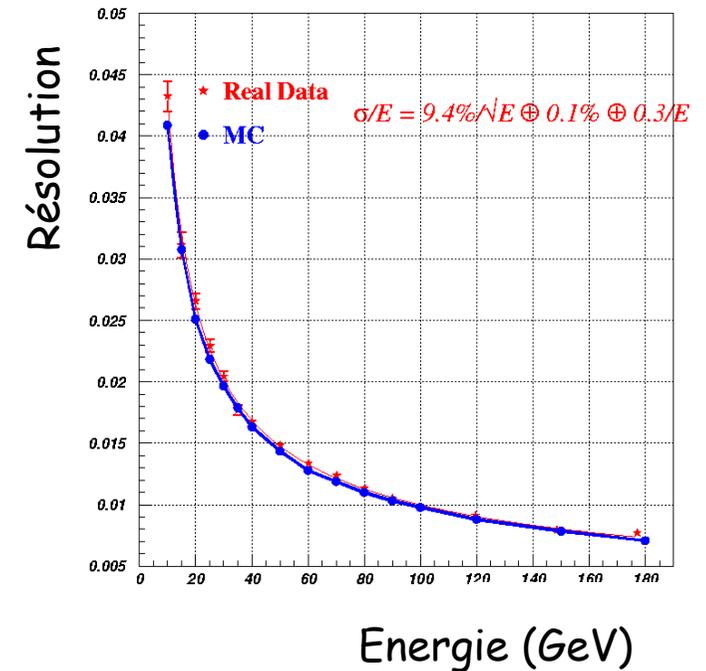
- On a typiquement pour la résolution en énergie :

2 façons d'écrire la même chose

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{c}{E} \oplus b$$

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2 + b^2$$

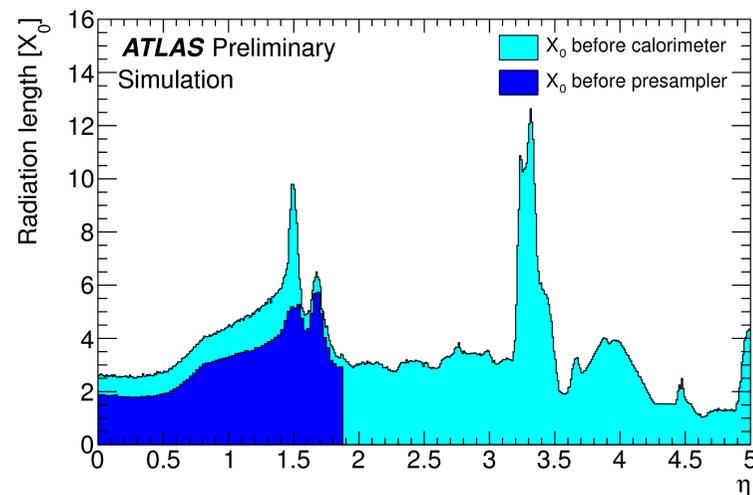
- 3 termes caractéristiques
 - a : terme d'échantillonnage
 - b : terme constant (Inhomogénéités - non linéarités - mauvaise calibration)
 - c : terme de bruit (Bruit électronique - empilement - radioactivité)



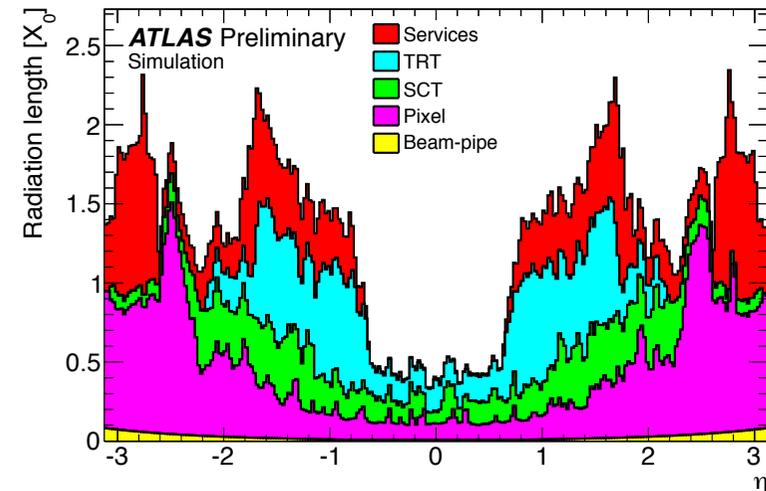
Résolution en énergie du calorimètre EM d'ATLAS

Un léger problème ...

- Lorsqu'on construit un détecteur, il faut penser à la matière "morte" avant le calorimètre



Matière « morte » devant le calorimètre EM d'ATLAS



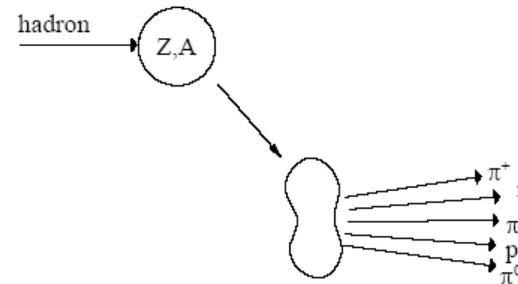
- Il ne sert à rien de faire un superbe calorimètre s'il y a trop de matière devant

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. **Mesure de l'énergie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) **Calorimétrie hadronique**
 - 4) Deux types de calorimètres
- IV. Identification des particules

Interaction des hadrons neutres et chargés avec la matière

- Déterminée par des processus nucléaires inélastiques
 - Excitation puis création de fragments puis production de particules secondaires



multiplicity $\propto \ln(E)$

$p_t \approx 0.35 \text{ GeV}/c$

- A haute énergie ($> 1 \text{ GeV}$), la section efficace dépend peu de l'énergie et du type de la particule incidente (p, K, π , ..) :

$$\sigma_{Inel} \approx \sigma_0 A^{0,7} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 \approx 35 \text{ mb}$$

- Par analogie avec X_0 , on définit la **longueur d'interaction hadronique** λ_I par :

$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{Inel}} \propto A^{1/3}$$

Gerbes hadroniques

M. Nessi

- Composante hadronique

- $\pi^\pm, p, K^\pm, n, \nu, \mu, \dots$

- Composante électromagnétique

- Photons, π^0

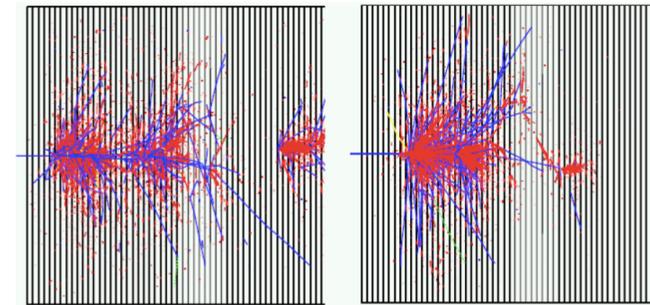
$$n(\pi^0) \approx \ln(E_{[GeV]}) - 4,6$$

soit $\approx 18 \pi^0$ à 100 GeV

- Bien plus complexe à modéliser que les gerbes électromagnétiques

- Grandes fluctuations

- \Rightarrow Résolution en énergie moins bonne que pour les électrons
- \Rightarrow **Moindre exigence sur les performances du calorimètre que pour un calorimètre électromagnétique**



Bleu : composante
hadronique

Rouge : composante
électromagnétique

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

I. Reconstruction des traces

II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement

III. **Mesure de l'énergie**

1) Généralités

2) Calorimétrie électromagnétique

3) Calorimétrie hadronique

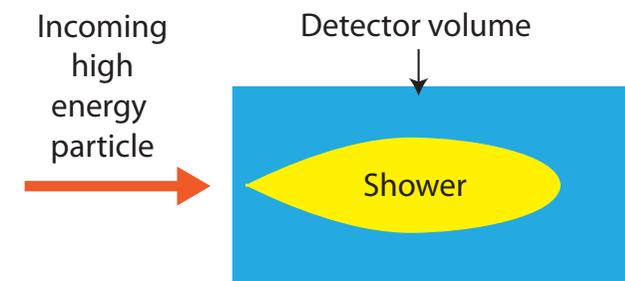
4) **Deux types de calorimètres**

IV. Identification des particules

Deux types de calorimètres

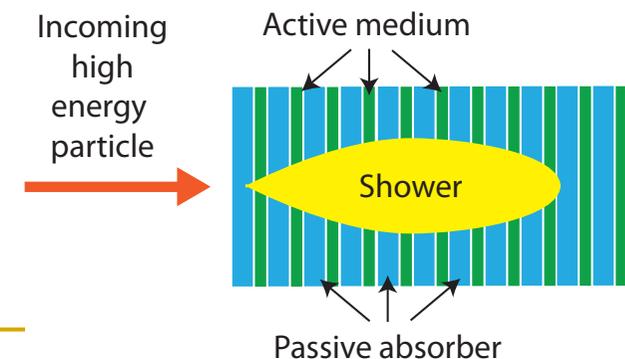
- Les **calorimètres homogènes** pour lesquels l'absorbeur est également le milieu de détection

- Bonne résolution en énergie
- Résolution spatiale moyenne
- Pas de segmentation en profondeur
- Uniquement calorimétrie EM



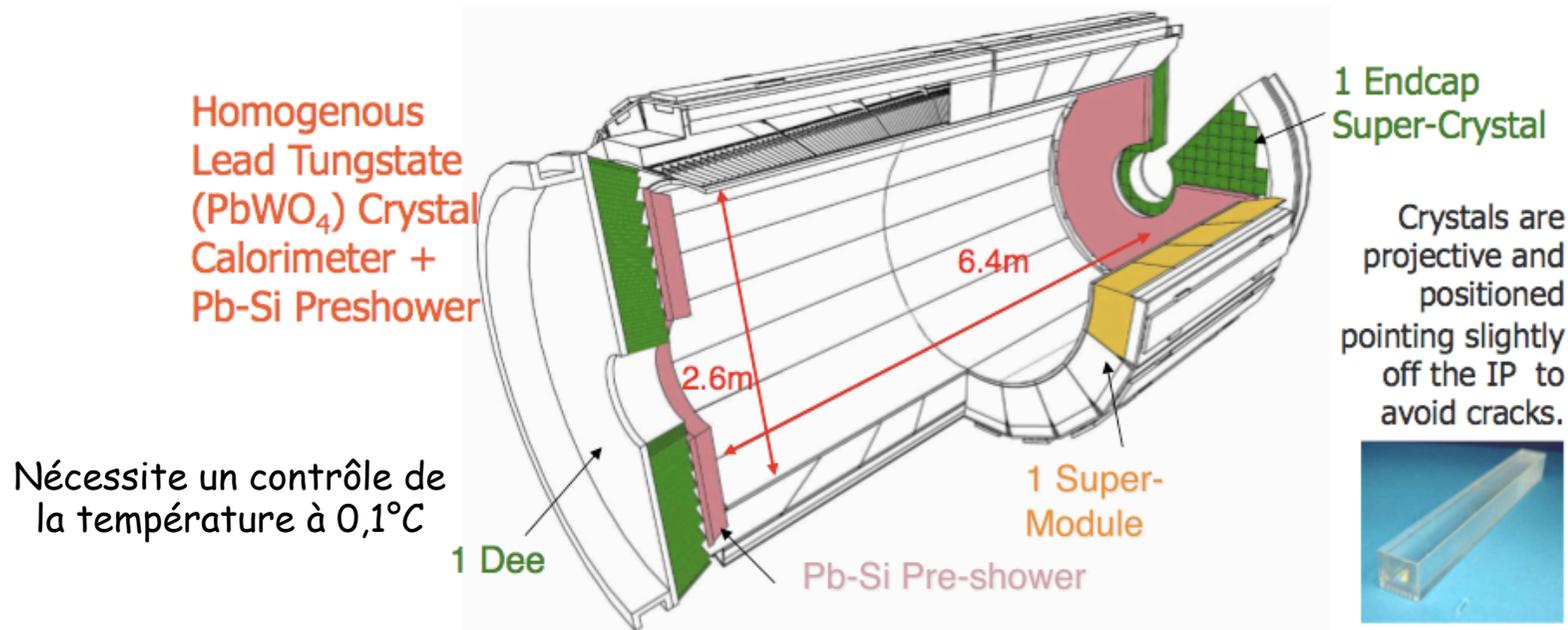
- Les **calorimètres à échantillonnage** (« **sampling calorimeters** ») pour lesquels l'absorbeur est différent du milieu de détection

- Résolution en énergie moyenne
- Bonne résolution spatiale
- Segmentation en profondeur possible
- Calorimétrie EM et hadronique



Calorimètres homogènes

Calorimètre électromagnétique de CMS



Nécessite un contrôle de la température à 0,1°C

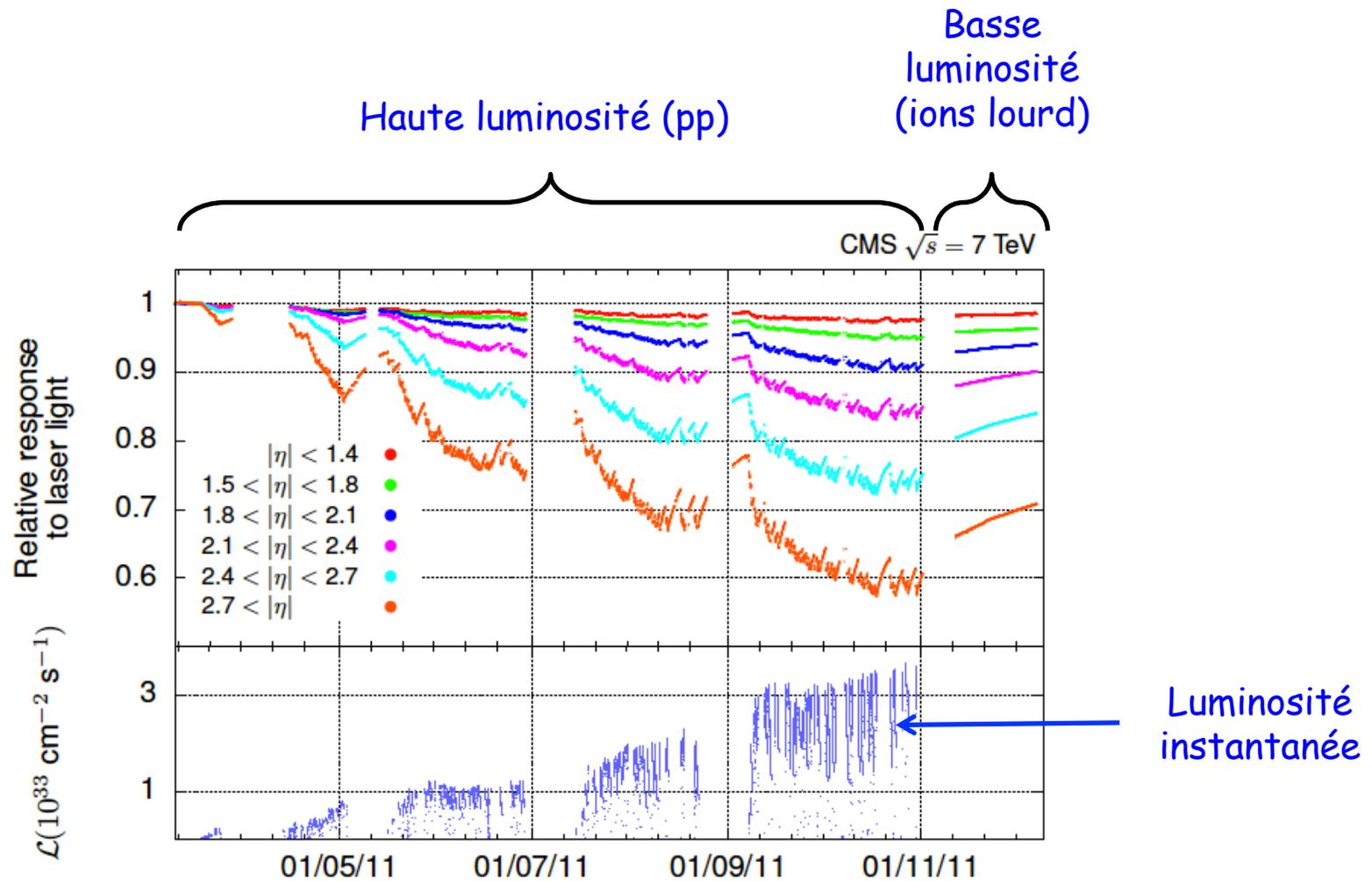
- Barrel (EB):**
- 61200 crystals
 - 36 Supermodules (SM), each 1700 crystals
 - $|\eta| < 1.48$

- Endcap (EE):**
- 14648 crystals
 - 4 Dees, SuperCrystals of 5x5 xtals
 - $1.48 < |\eta| < 3.0$

- Preshower (ES):**
- Pb-Si
 - 4 Dees
 - 4300 Si strips
 - $1.65 < |\eta| < 2.6$

M. Nessi

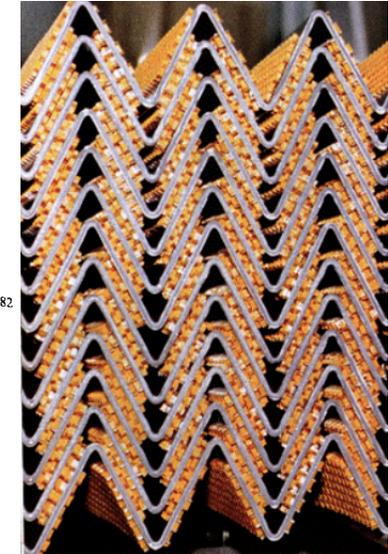
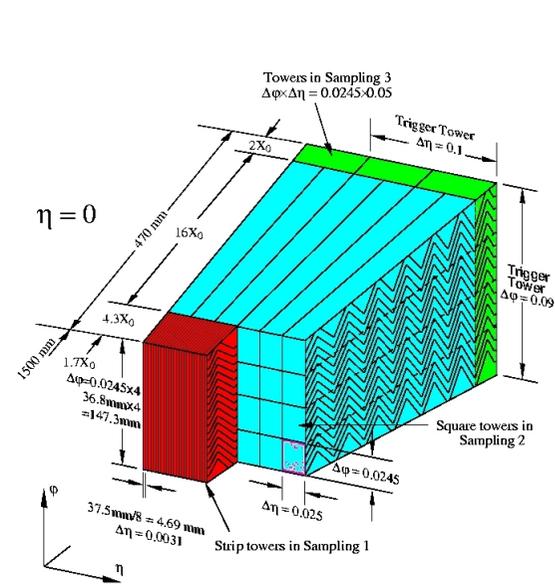
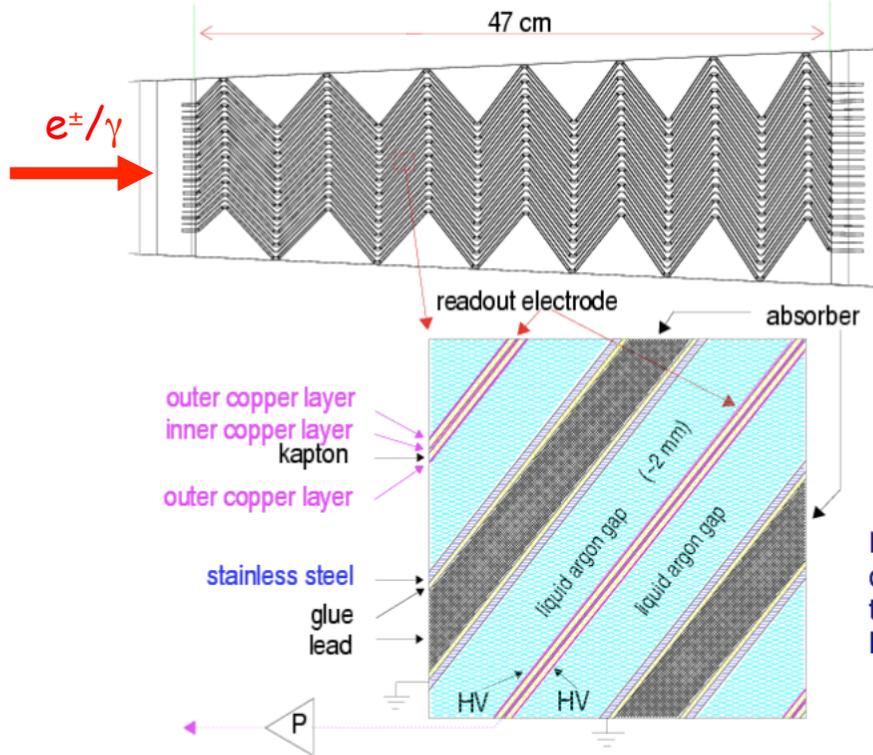
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{3,37\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,25\% \oplus \frac{0,108}{E_{[GeV]}}$$



Réponse du calorimètre EM de CMS en 2011, normalisée au début de l'année

Calorimètres à échantillonnage

Calorimètre électromagnétique d'ATLAS



D
d
t
r
l
a

- LAr (90 K)
- Absorbeurs en Pb (1-2 mm)
- $1 \text{ GeV} \Rightarrow 5 \cdot 10^6 e^-$ dans LAr
- Géométrie en accordéon
- Insensible aux radiations

Résolution en énergie

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{9,4\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,1\% \oplus \frac{0,3}{E_{[GeV]}}$$

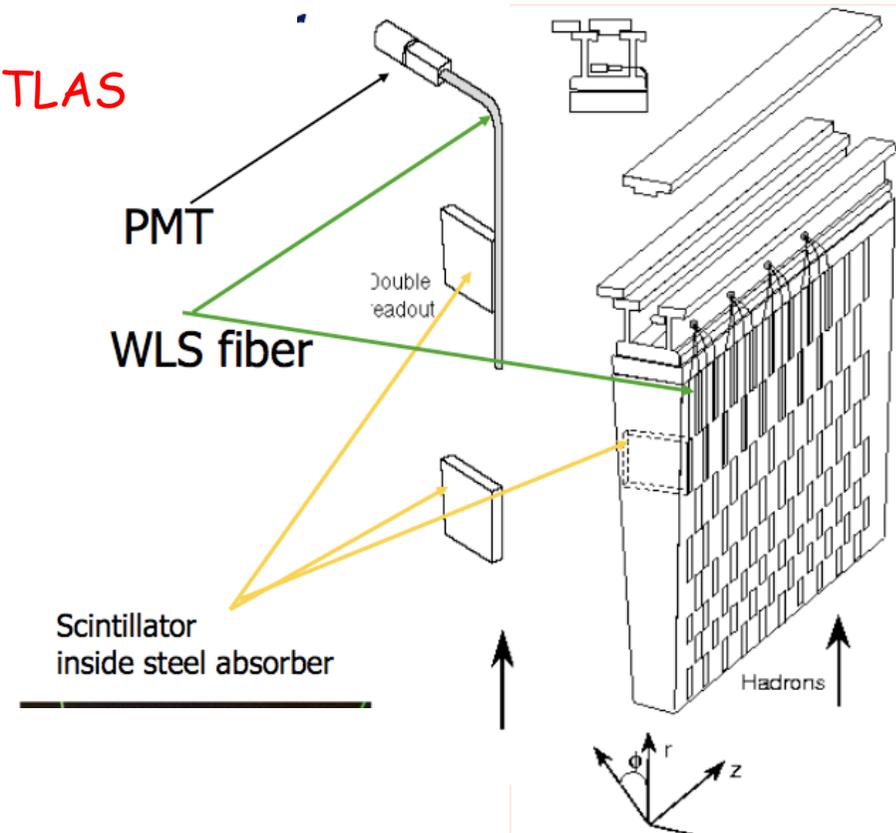
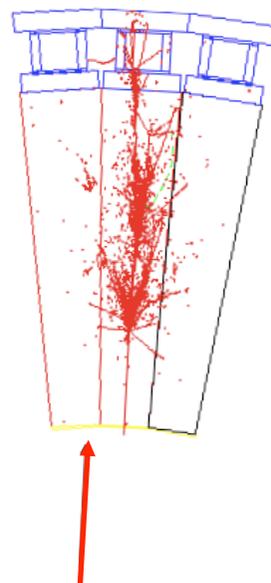
Calorimètres hadroniques

CMS



Absorbeurs en cuivre (1500 t) + scintillateurs

ATLAS



Résolution en énergie :
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 5\%$$

Absorbeurs acier + plaques scintillantes

3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

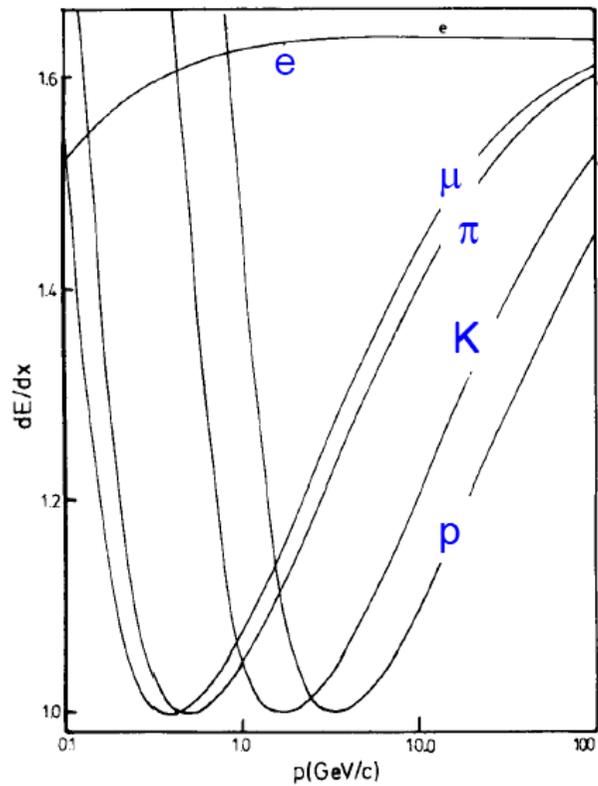
- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. Mesure de l'énergie

- IV. Identification des particules
 - 1) Mesure de l'ionisation
 - 2) Mesure du temps de vol
 - 3) Effet Cherenkov
 - 4) Rayonnement de transition
 - 5) Toute mesure discriminante

- On a vu que :

$$\left. \begin{array}{l} p = m \gamma \beta c \\ \frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2) \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Une mesure simultanée de } p \text{ et de } dE/dx \text{ défini la masse } m$$

- Cette méthode est valable pour des « basses » impulsions ($< 10 \text{ GeV}/c$)

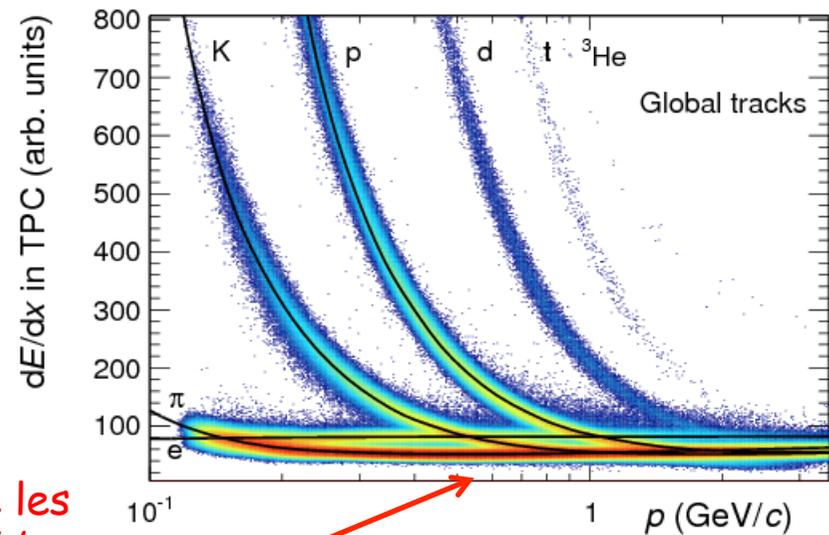


π /K separation (2σ) requires a dE/dx resolution of $< 5\%$

Average energy loss for e, μ , π , K, p in 80/20 Ar/CH₄ (NTP)
(J.N. Marx, Physics today, Oct 78)

On remarque que les courbes de dE/dx des π et des K se superposent autour de 1 GeV/c

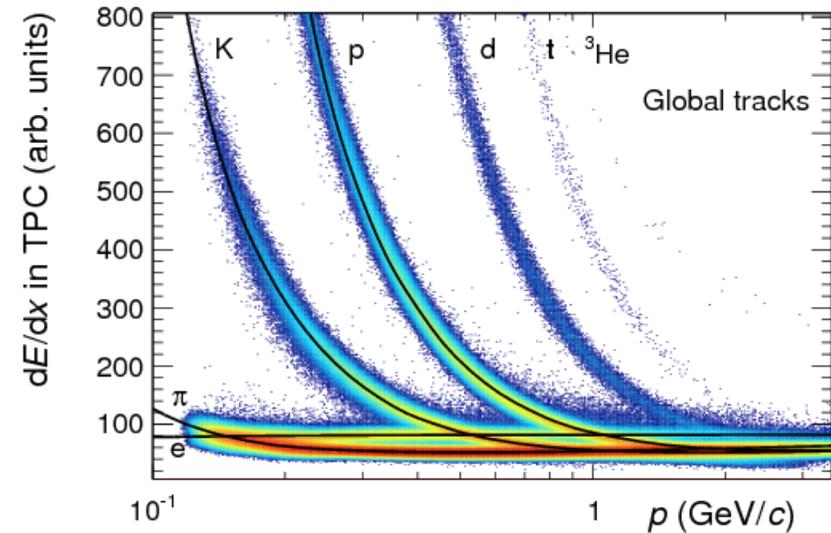
Theorie



TPC de ALICE

Pratique

- La séparation muon/pion semble très délicate (en pratique impossible) à cause de la faible différence de masse ($106 \text{ MeV}/c^2$ vs $140 \text{ MeV}/c^2$)



TPC de ALICE

- Une séparation pion (ou muon)/kaon/proton semble faisable
- L'identification par des mesures de dE/dx est faisable pour des énergies entre $\gamma = 100$ et $\gamma = 1000$

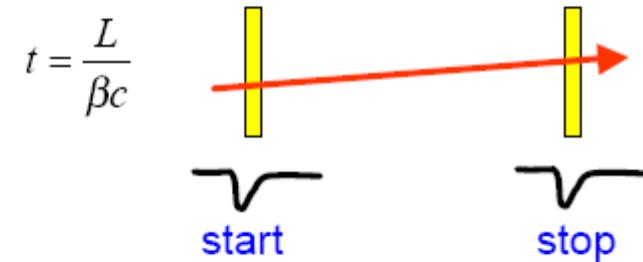
3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. Mesure de l'énergie

- IV. Identification des particules
 - 1) Mesure de l'ionisation
 - 2) Mesure du temps de vol
 - 3) Effet Cherenkov
 - 4) Rayonnement de transition
 - 5) Toute mesure discriminante

- On a cette fois :

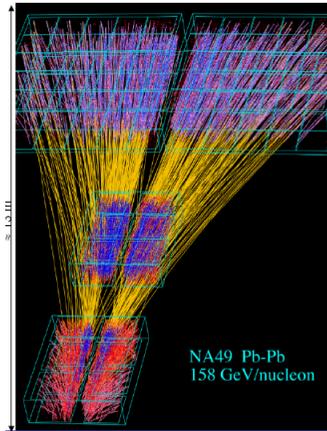
$$\left. \begin{array}{l} p = m \gamma \beta c \\ \Delta t = \frac{L}{\beta c} \end{array} \right\} \Rightarrow m = \frac{p}{c} \sqrt{\frac{c^2 \Delta t^2}{L^2} - 1} \quad \text{et} \quad \frac{dm}{m} = \frac{dp}{p} + \gamma^2 \left(\frac{dt}{t} + \frac{dL}{L} \right)$$



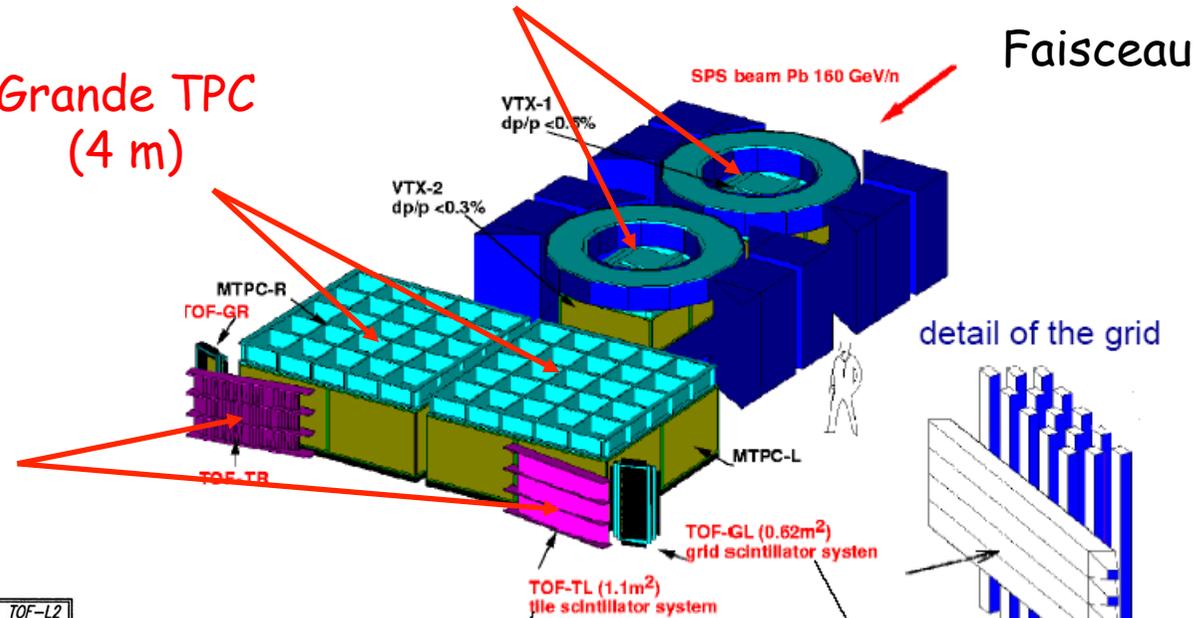
- La mesure de l'impulsion et du temps Δt est une mesure de la masse m
- Cette mesure n'est valable que pour des particules qui ne sont pas « trop proches » de c (puisque alors $\Delta t = L / c$)

Exemple : NA49 (1/2)

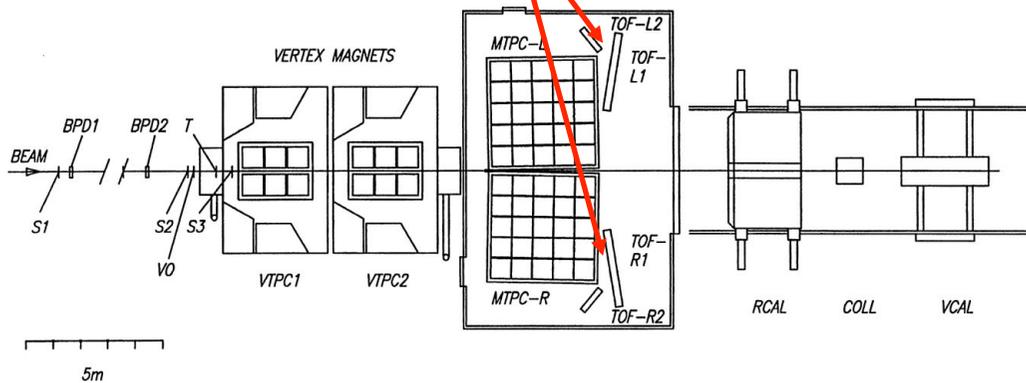
Aimant supraconducteur (1,5 T - 1 m d'ouverture verticale et 2 m de rayon) contenant une TPC pour mesurer les vertex d'interaction



Grande TPC (4 m)

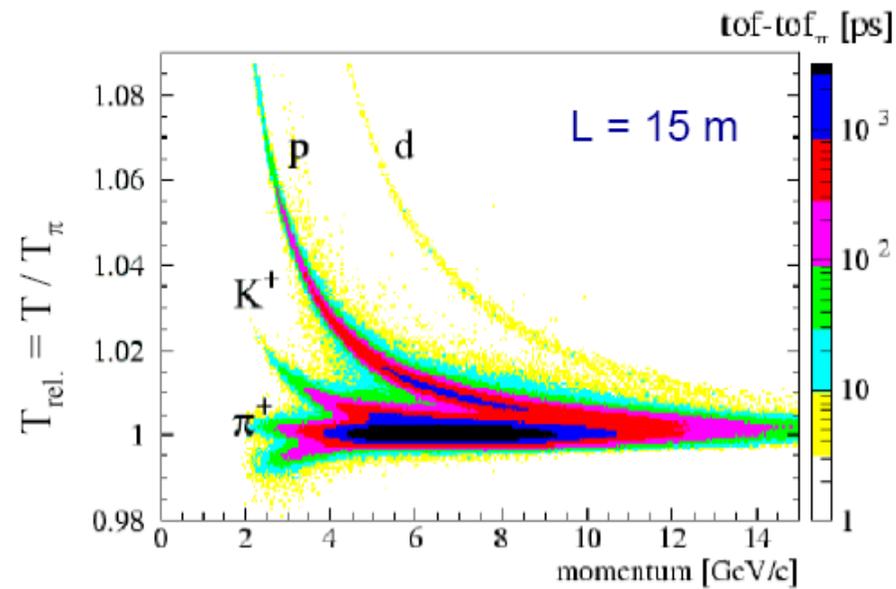
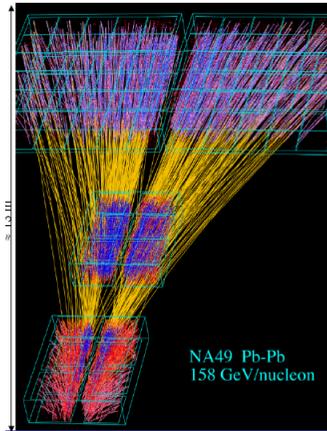


Détecteur de temps de vol

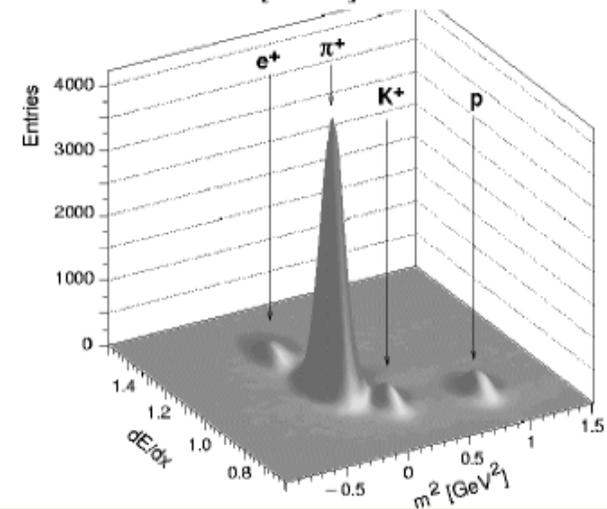


Exemple : NA49 (2/2)

C. Joram



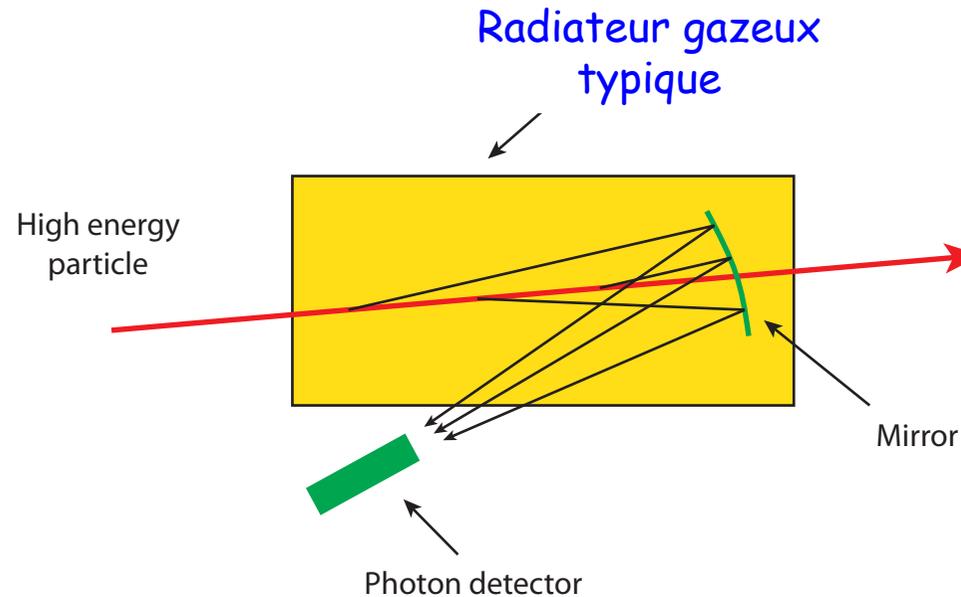
NA49 combined
particle ID: TOF +
dE/dx (TPC)



3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. Mesure de l'énergie

- IV. Identification des particules
 - 1) Mesure de l'ionisation
 - 2) Mesure du temps de vol
 - 3) Effet Cherenkov
 - 4) Rayonnement de transition
 - 5) Toute mesure discriminante



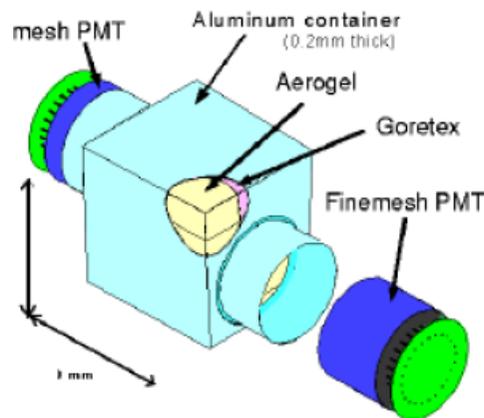
- Un détecteur basé sur l'effet Cherenkov peut mesurer :
 - Le nombre de photons émis (**détecteur à seuil**)
 - L'angle d'ouverture du cône (**détecteur RICH**)

Détecteur à seuil

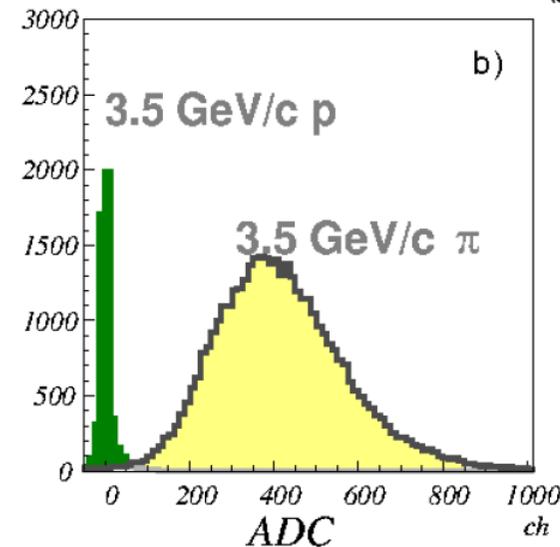
- On peut utiliser divers matériaux, sous diverses phases :

Material	Phase	$n - 1$	β_{th}	γ_{th}
He	Gas	$3.3 \cdot 10^{-5}$	0.99997	123
H ₂	Gas	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.99986	59.8
Air	Gas	$2.9 \cdot 10^{-4}$	0.9997	41.2
CO ₂	Gas	$4.3 \cdot 10^{-4}$	0.9996	34.1
Pentane	Gas	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0.9983	17.2
Silica aerogel	Solid	0.025 - 0.075	0.93 - 0.98	2.7 - 4.5
Water	Liquid	0.33	0.75	1.52
Scintillator	Solid	0.58	0.63	1.29
Lead glass	Solid	0.67	0.60	1.25
Lead Fluorine	Solid	0.80	0.55	1.20
Diamond	Solid	1.42	0.41	1.10

- Exemple : en faisceau test, on utilise par exemple souvent un Cherenkov à gaz pour séparer les e^- et les π^\pm (l'indice de réfraction est alors réglé par la pression du gaz)
- Exemple : Détecteur à seuil pour BELLE pour la séparation π/p



Les π^\pm donnent un signal, les p n'en laissent pas



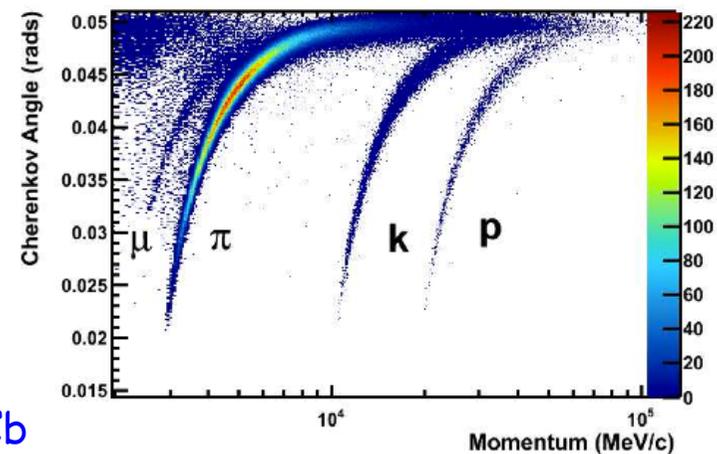
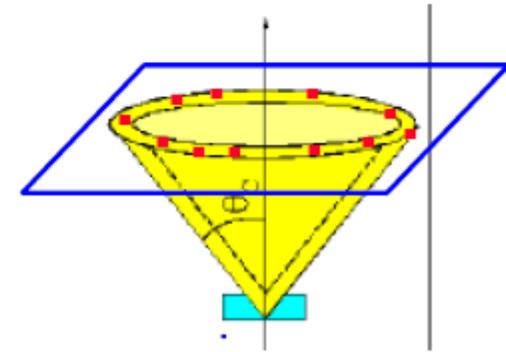
Détecteur RICH

- Les **RICH** (**R**ing **I**maging **C**herenkov) déterminent θ_c en interceptant le cône de lumière avec un plan photosensible :

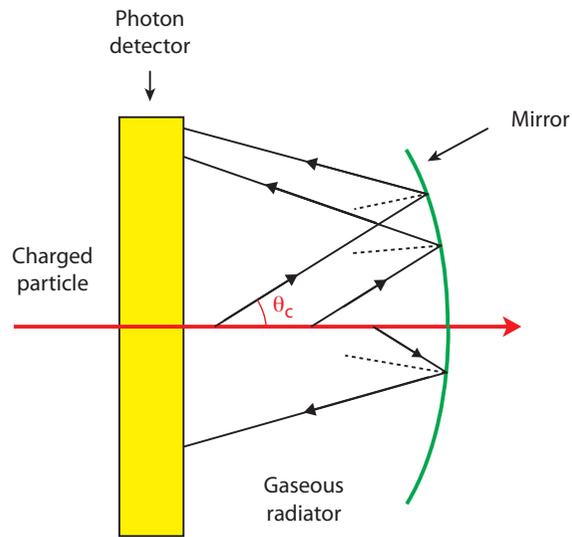
$$\theta_c = \arccos\left(\frac{1}{n\beta}\right) = \arccos\left(\frac{1}{n} \frac{E}{pc}\right) = \arccos\left(\frac{1}{n} \sqrt{1 + \frac{m^2 c^4}{p^2 c^2}}\right)$$

- Un des inconvénients est qu'il faut une grande surface de détection pour les photons
- Un autre est la chasse aux impuretés !

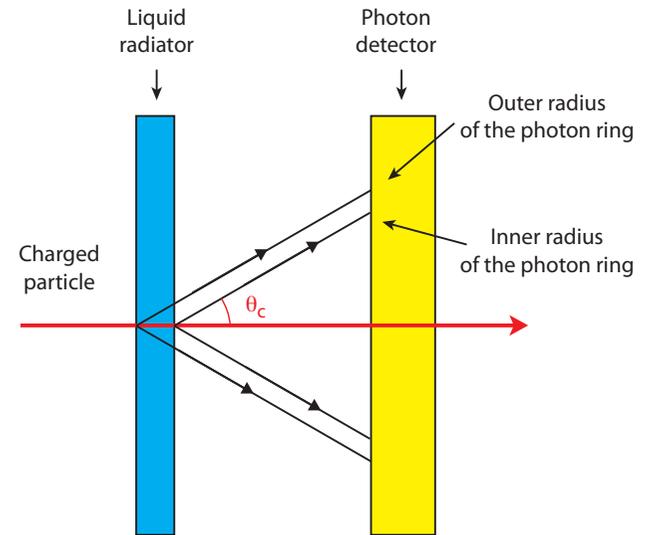
Angle Cerenkov du radiateur C_4F_{10} de LHCb



■ Deux types de radiateurs :



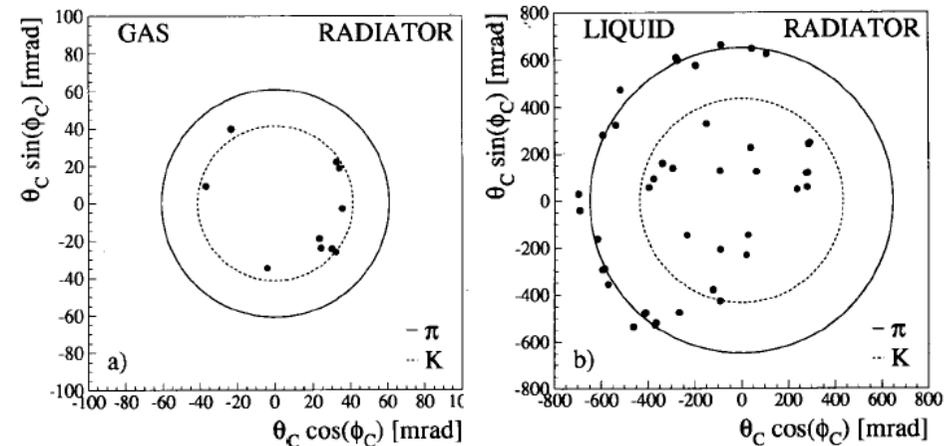
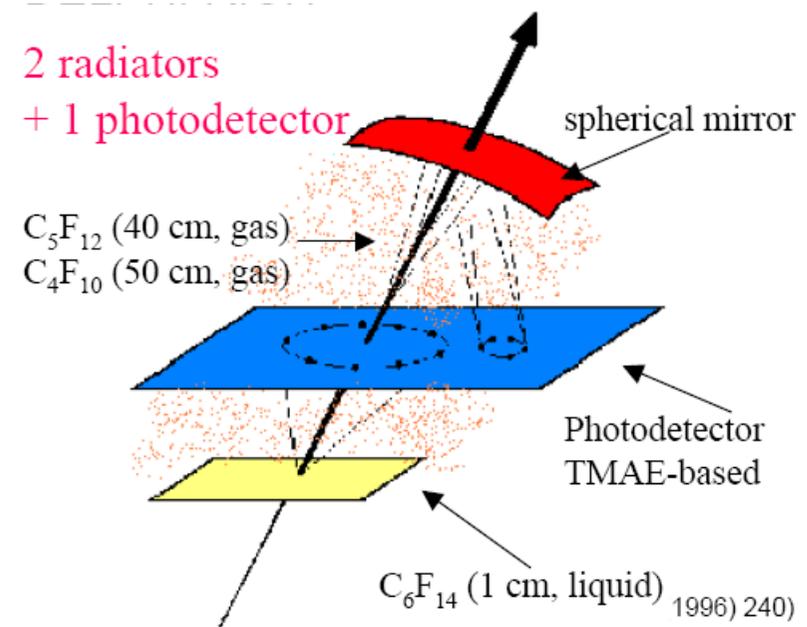
Radiateur gazeux typique



Radiateur liquide typique

Exemple : Le RICH de DELPHI

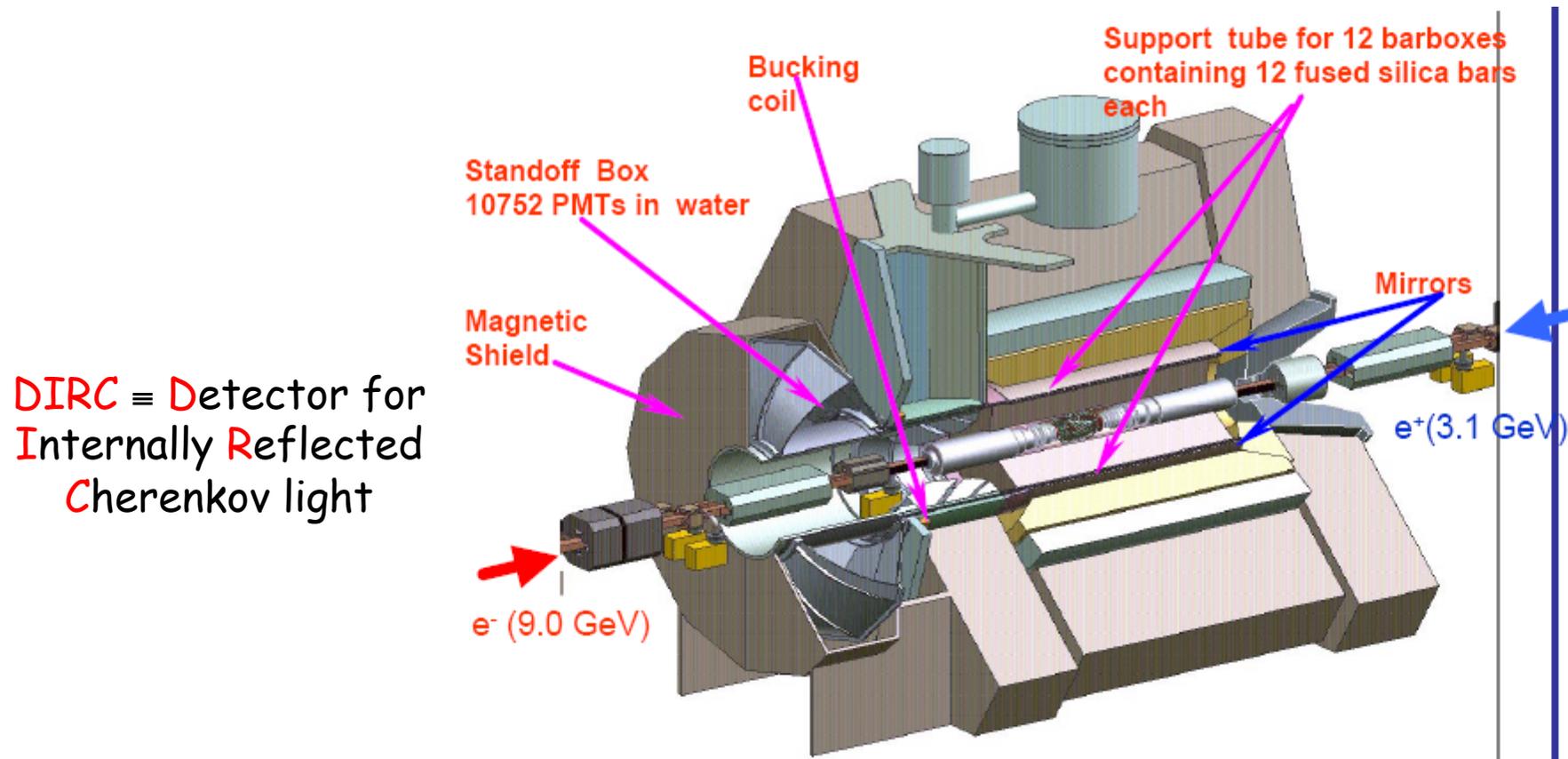
- Ce détecteur comprenait deux radiateurs et un photodétecteur
- Permettait la séparation $\pi/K/p$ entre 0,7 et 45 GeV/c
⇒ Enorme gamme dynamique !!
- Signal très propre



Exemple : Le DIRC de BaBar (1/2)



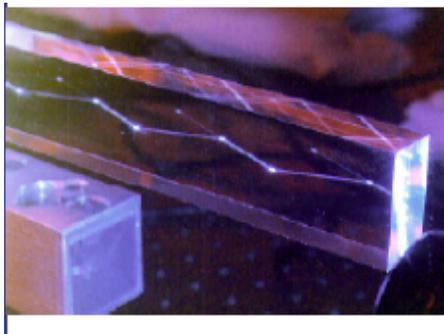
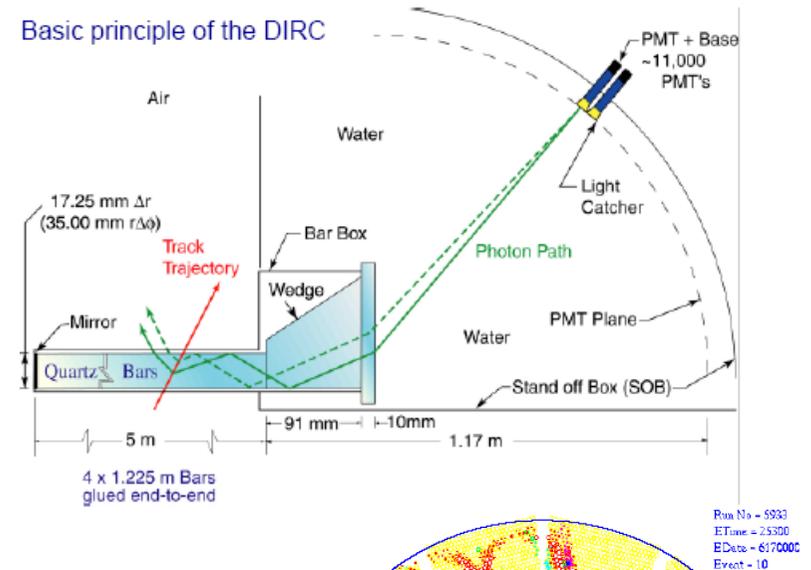
« Usine à B » asymétrique



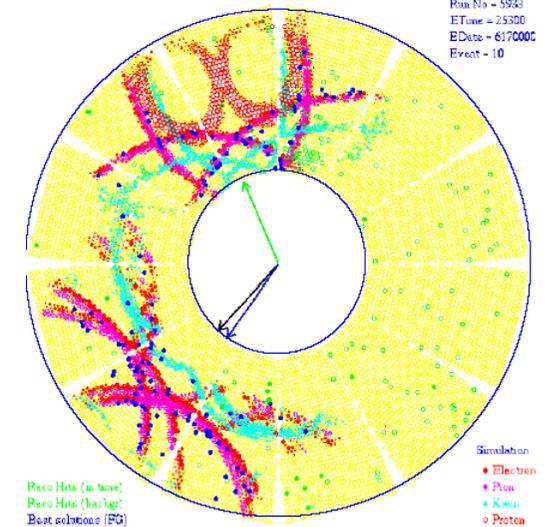
Exemple : Le DIRC de BaBar (2/2)



- Transport de la lumière par réflexion à l'intérieur d'un barreau de quartz
- Réservoir d'eau à l'extérieur pour transmettre les photons
- Environ 300 réflexions de lumière dans chaque barreau



Plus complexe à interpréter que DELPHI !!

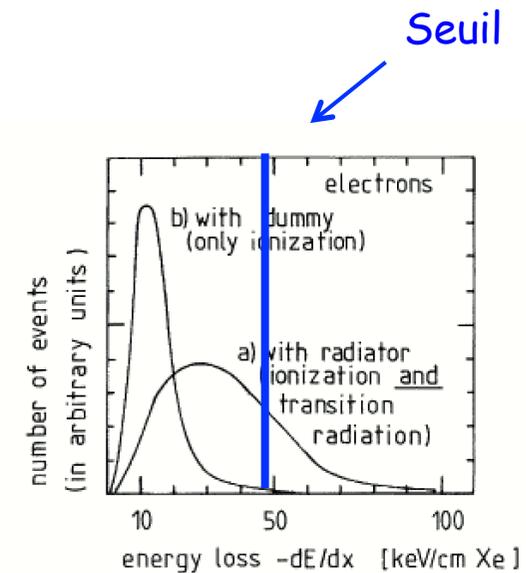
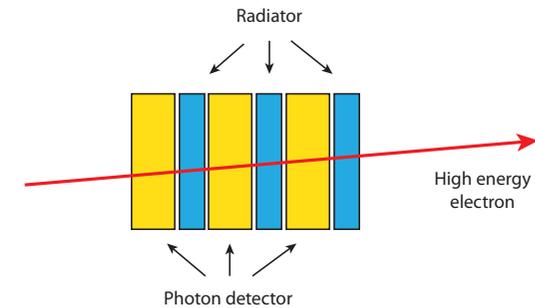


3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. Mesure de l'énergie

- IV. Identification des particules
 - 1) Mesure de l'ionisation
 - 2) Mesure du temps de vol
 - 3) Effet Cherenkov
 - 4) Rayonnement de transition
 - 5) Toute mesure discriminante

- Sandwich de radiateurs et de détecteurs alternés
- Les radiateurs sont souvent des feuilles de CH_2 (faible Z car la réabsorption est $\propto Z^5$) de faible épaisseur
- Les détecteurs sont généralement gazeux (MWPC, straw tubes, ..) et utilisent des gaz lourds (Z élevé car le nombre de photo-électrons est $\propto Z^5$)
- Problème intrinsèque au détecteur
 ⇒ Mettre un seuil élevé
- Utilisé dans le Transition Radiation Tracker (TRT) de ATLAS

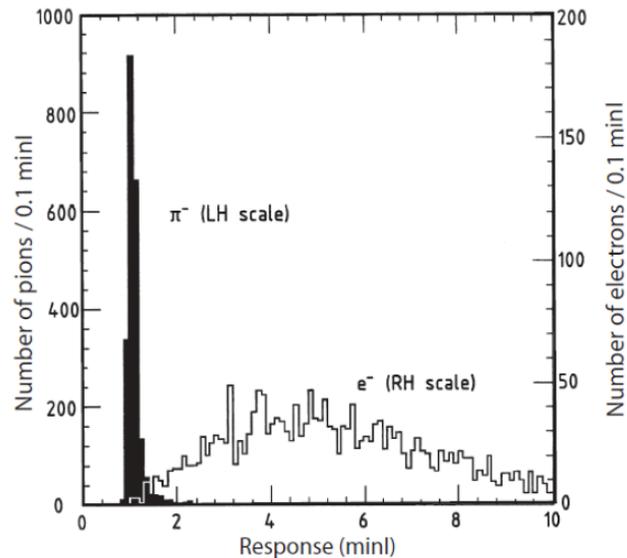


3^e partie : Mesure de quelques propriétés des particules

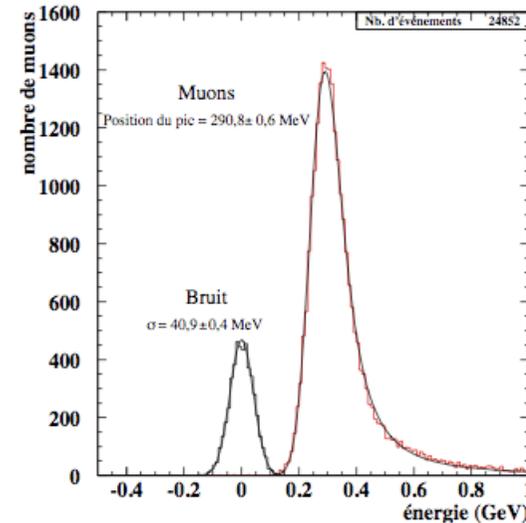
- I. Reconstruction des traces
- II. Mesure de la charge et de la quantité de mouvement
- III. Mesure de l'énergie

- IV. Identification des particules
 - 1) Mesure de l'ionisation
 - 2) Mesure du temps de vol
 - 3) Effet Cherenkov
 - 4) Rayonnement de transition
 - 5) Toute mesure discriminante

- Toute mesure qui donne une réponse différente pour deux types de particules peut être utilisée pour leur identification



Signal d'électrons et de π dans un scintillateur situé après 1 cm de Pb



Signal déposé dans le calorimètre EM d'ATLAS par des muons

Conclusion sur la 3^e partie (1/2)

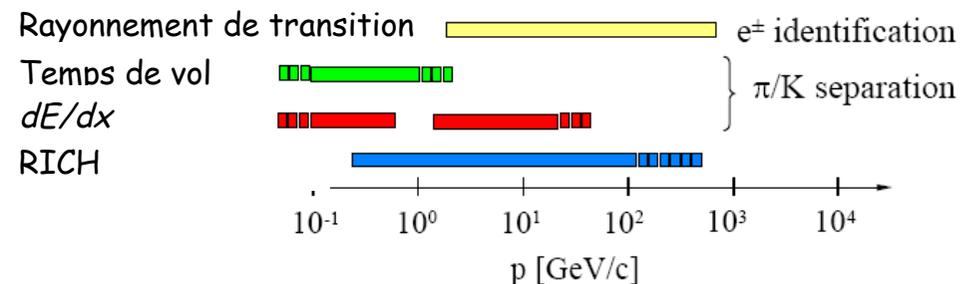
- La reconstruction des traces des particules chargées se fait dans des détecteurs qui prennent peu d'énergie à la particule incidente
 - Elle permet une mesure de l'impulsion

- Un **calorimètre** permet d'apporter de l'information pour toutes les particules qui le traversent :
 - Electrons, photons, hadrons : mesure directe de l'énergie
 - Muons : détection du passage de la particule
 - Neutrinos (par la « mesure » de l'énergie manquante)

Conclusion sur la 3^e partie (2/2)

- Les calorimètres sont des détecteurs « multi tâches » :
 - Mesure de l'énergie
 - Mesure de direction de la trace de la particule incidente
 - Identification des particules : la réponse d'un électron, d'un photon ou d'un muon ne sera pas la même

- Il existe de nombreuses méthodes différentes pour identifier les particules



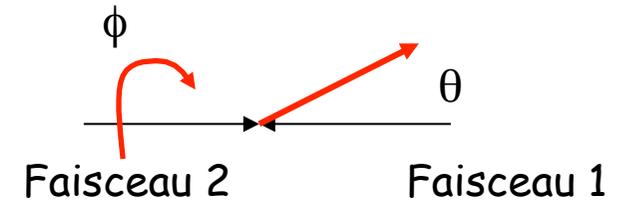
- Plus l'environnement est « hostile », plus on cherchera la redondance des informations

4^e partie : Exemples de détecteurs intégrés

- I. **Détecteurs sur collisionneurs**
 - 1) **Comment construire un détecteur global ?**
 - 2) **Le cas des détecteurs du LHC**

- II. Détecteurs de neutrinos
- III. Autres types de détecteurs

Que mesure-t-on ?



- Événement par événement, on utilise l'énergie transverse et l'impulsion transverse :

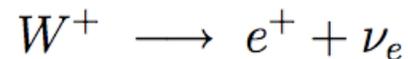
$$E_T = \sum E_i \sin(\theta_i) \quad P_T = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

$$P_x = \sum E_i \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) \quad P_y = \sum E_i \sin(\theta_i) \sin(\phi_i)$$

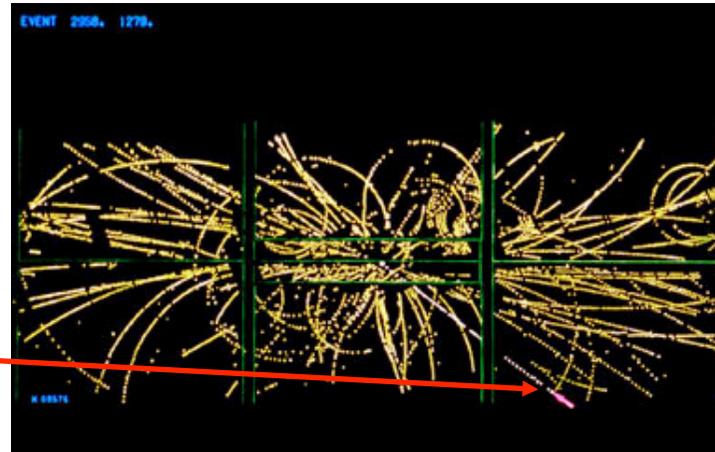
- Ces quantités sont contraintes par les conditions initiales ($E_T = 0$ et $P_T = 0$)
- On est également intéressé par l'énergie transverse manquante (ou l'impulsion transverse manquante P_T)
- NB : une façon très efficace de créer de l'énergie transverse est une mauvaise calibration ..

Exemple historique : UA1

- Dans les expériences sur collisionneurs, on attribue l'énergie et l'impulsion transverse manquantes au(x) neutrino(s)
- Cette méthode a permis dans UA1 de reconstruire le neutrino de :



Le positron !



- Il faut une confiance énorme dans la théorie (et dans les détecteurs !) pour tenir ce genre de raisonnement ...

- Ce qui compte pour un physicien est la probabilité d'interaction σ ou **section efficace** :

Taux d'événements dans le détecteur $\rightarrow \frac{dN}{dt} = \sigma \mathcal{L} A \epsilon$

A: **Acceptance**
 ϵ : **Efficacité**

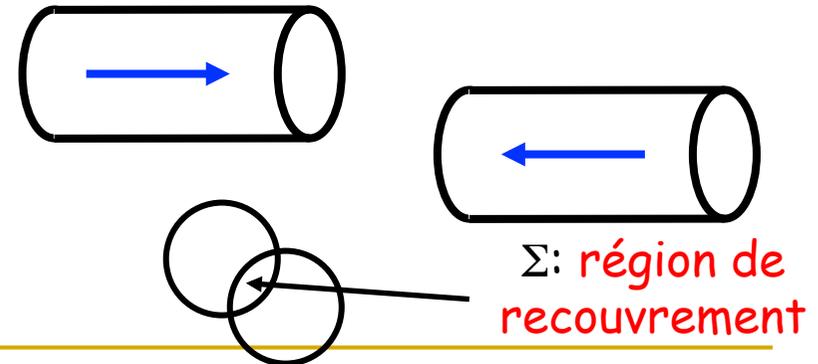
\nwarrow
Luminosité instantanée

- Les sections efficaces se mesurent en barn (1 barn = 10^{-28} m^2 = 10^{-24} cm^2)

- La luminosité est un facteur de qualité de la collision

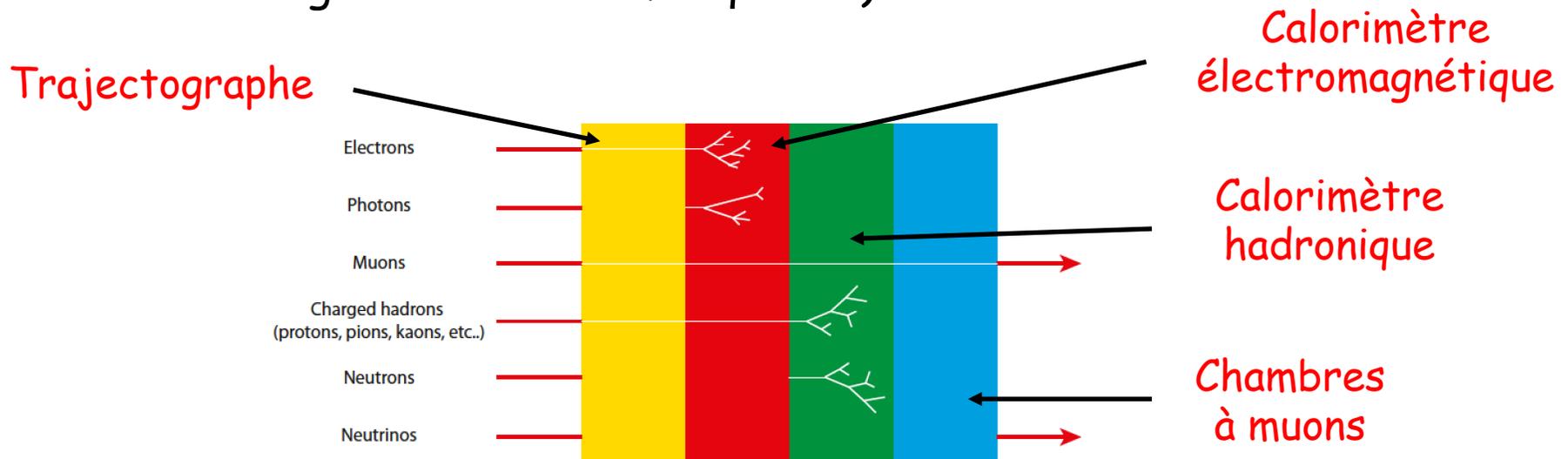
$$\mathcal{L} = f \frac{N_1 N_2}{\Sigma}$$

f: **Fréquence**
 N_1, N_2 : **Nombre de particules par paquet**



Rappels

- Certaines mesures sont destructives, d'autres pas
- Toutes les particules ne laissent pas de trace dans les couches internes (les neutrinos n'en laissent aucune et sont détectés par leur énergie transverse manquante)



Comment faire un détecteur sur un collisionneur ?

- On a vu précédemment comment remplir chaque fonction (identification des particules, mesure de l'énergie, de la masse, de la charge)
- Il reste à intégrer l'ensemble des « sous-détecteurs » dans un **détecteur global**
- Principales options :
 - Position du solénoïde wrt les calorimètres
 - Forme (octogonale, cylindrique, ...)

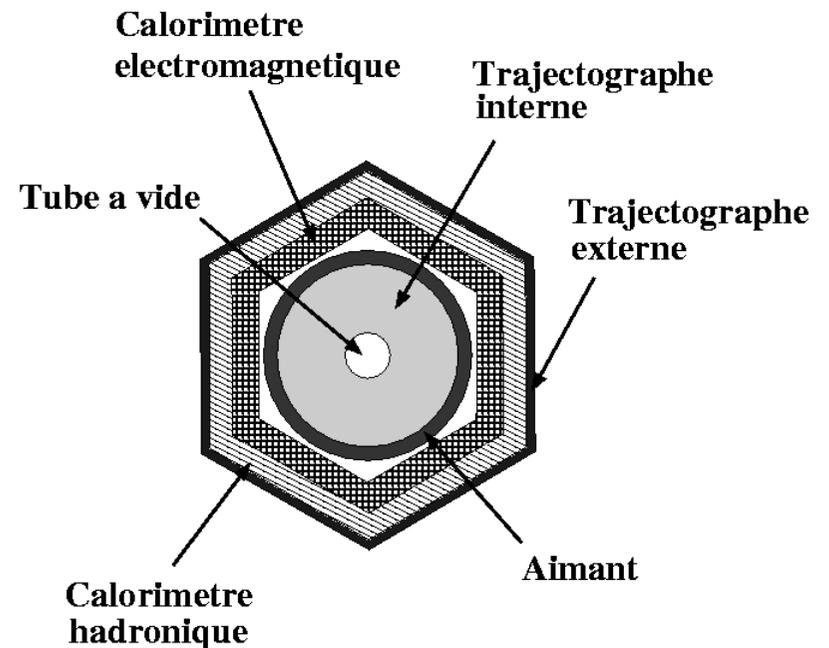
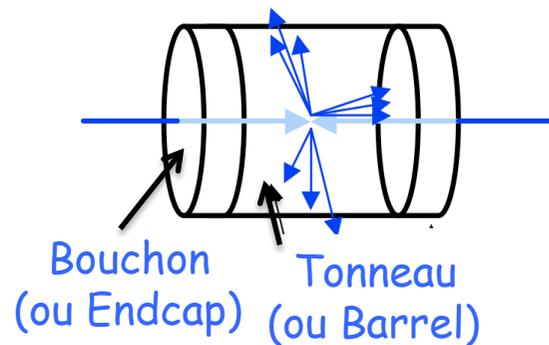


Schéma type de détecteur sur collisionneur (vue transverse)

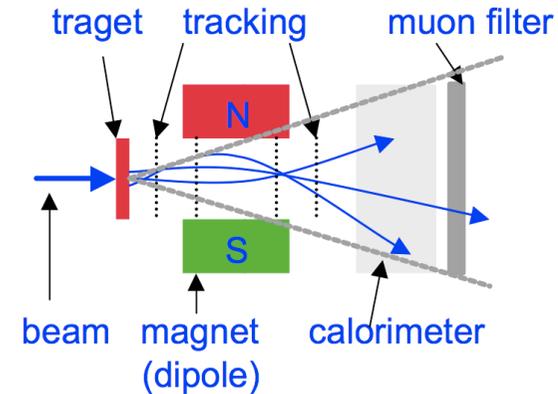
Les deux types de détecteurs

- Détecteur sur collisionneur
(4π multi purpose detector)



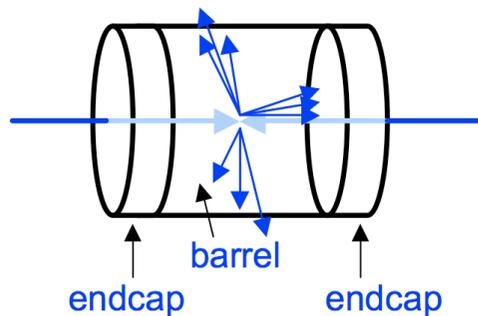
- Couverture maximale de l'acceptance
- Difficultés d'accès (maintenance)
- Exemples :
 - Expériences LEP, LHC, Tevatron, H1, Babar, ...

- Détecteur sur cible fixe
(spectromètre magnétique)



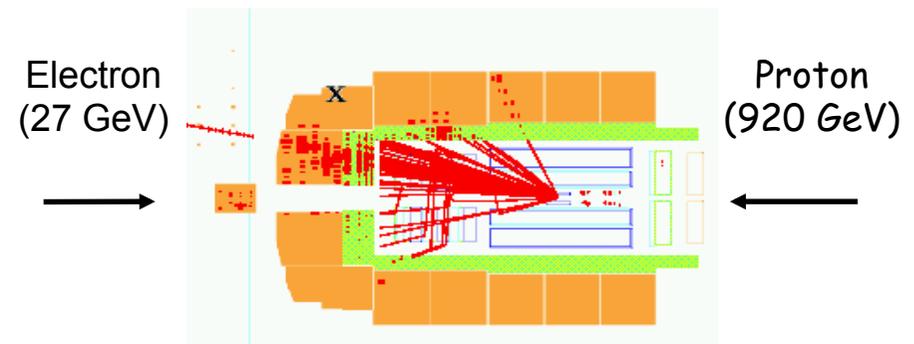
- Couverture partielle de l'angle solide
- Accès beaucoup plus simple
- Exemples :
 - LHCb, NA49

- **Détecteurs symétriques** : le référentiel du centre de masse est au repos dans le laboratoire



- Exemples :
 - Particules identiques (à la charge près) d'énergie identique : LEP, LHC, Tevatron

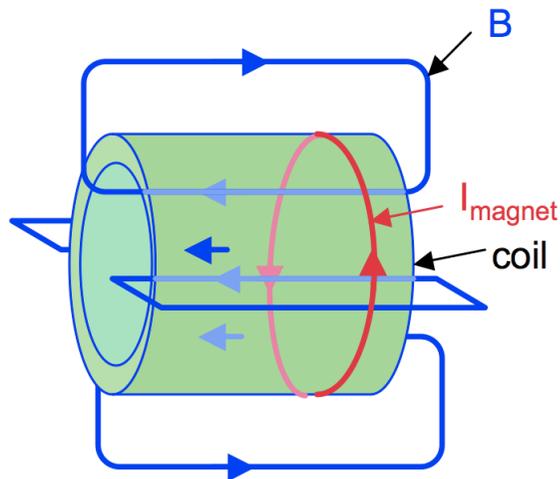
- **Détecteurs asymétriques** : le référentiel du centre de masse est en mouvement dans le laboratoire



- Exemples :
 - Particules identiques d'énergie différentes : Babar
 - Particules différentes : H1

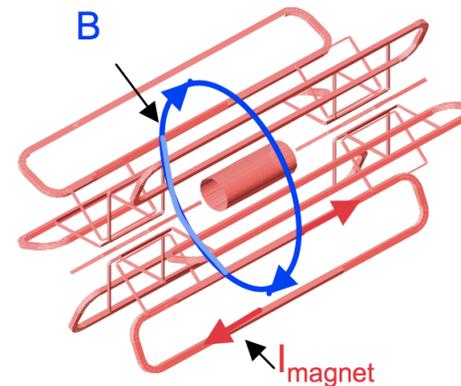
Les diverses configurations de systèmes magnétiques sur collisionneur

- **Champ solénoïdal**



- B élevé à l'intérieur
- Exemples :
 - L3 & ALICE (NC - 0,5 T)
 - DELPHI (SC - 1,2 T)
 - CMS (SC - 4 T)

- Combinaison d'un **champ solénoïdal** et d'un **champ toroïdal**

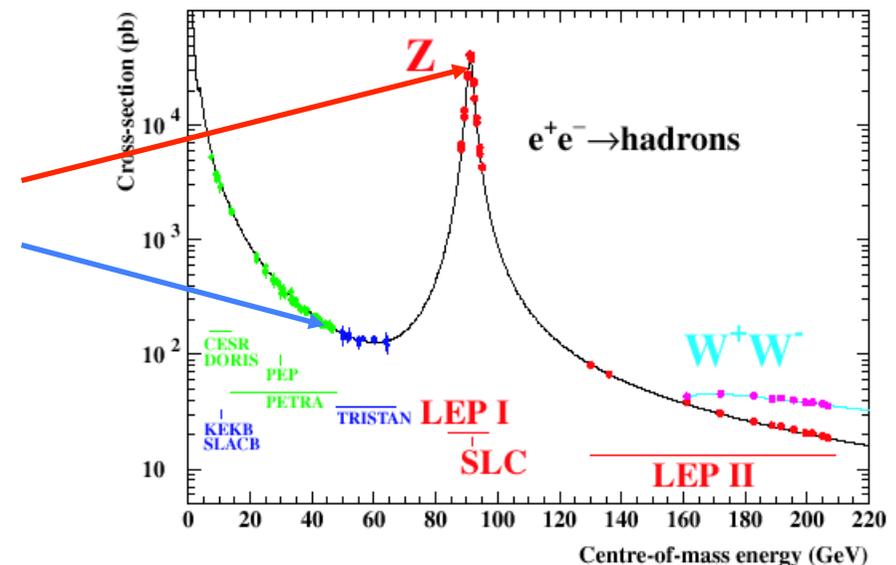
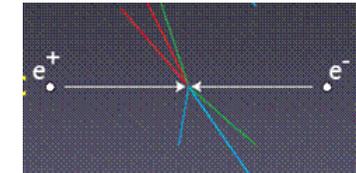


- Le champ peut être plus faible à l'intérieur car un champ extérieur courbe les muons
- Exemple :
 - D0 (SC - 2 T \oplus 2 T)
 - ATLAS (SC - 2 T \oplus 0,6 T)

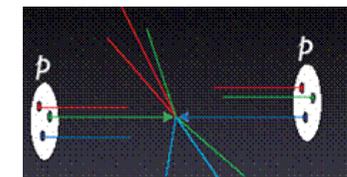
NC : Normal Conducting - SC : Super Conducting

Collisionneurs lepton vs hadrons

- Leptons (e^- , e^+ , μ^\pm ?) : particules élémentaires
 - Energie du centre de masse bien définie
 - Etat final « propre »
 - Très petite gamme dynamique
 - LEP I/SLC ajusté sur le Z
 - TRISTAN décalé wrt le Z
 - **Adapté pour les mesures de précision** à l'énergie nominale



- Hadrons: particules composites
 - Energie du centre de masse inconnue
 - Très grande gamme dynamique
 - **Machines de découverte**

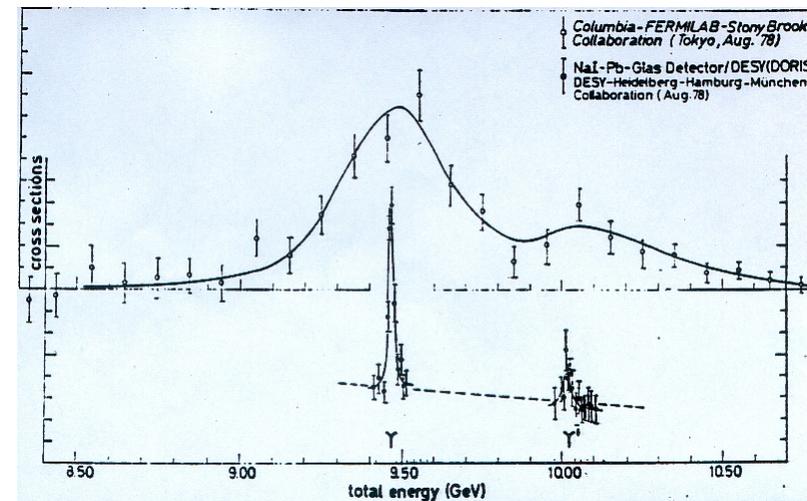


- Collisionneurs :
 - Leptons : la résolution vient de la précision de la mesure de l'énergie du faisceau
 - Hadrons : la résolution vient de la précision du détecteur

Exemple de la découverte de la particule Υ

Hadrons

Leptons



- Le type de détecteur va évidemment dépendre de la précision requise

4^e partie : Exemples de détecteurs intégrés

I. Détecteurs sur collisionneurs

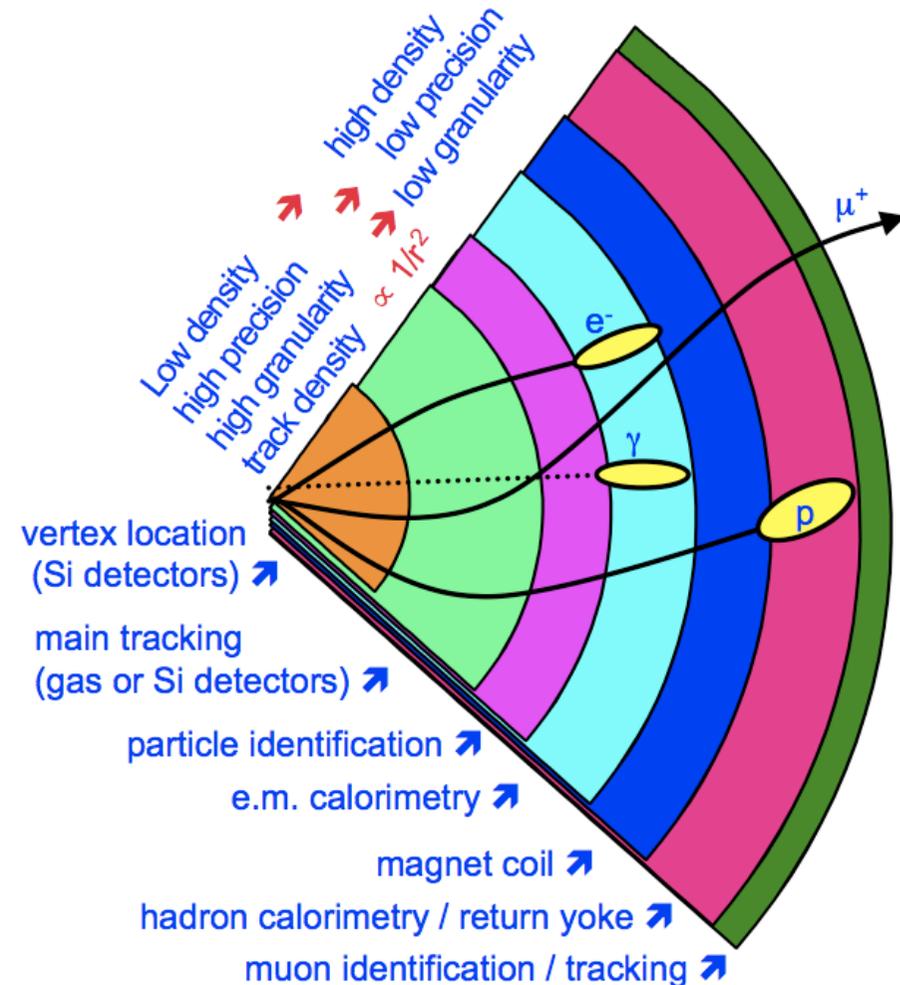
- 1) Comment construire un détecteur global ?
- 2) Le cas des détecteurs du LHC

II. Détecteurs de neutrinos

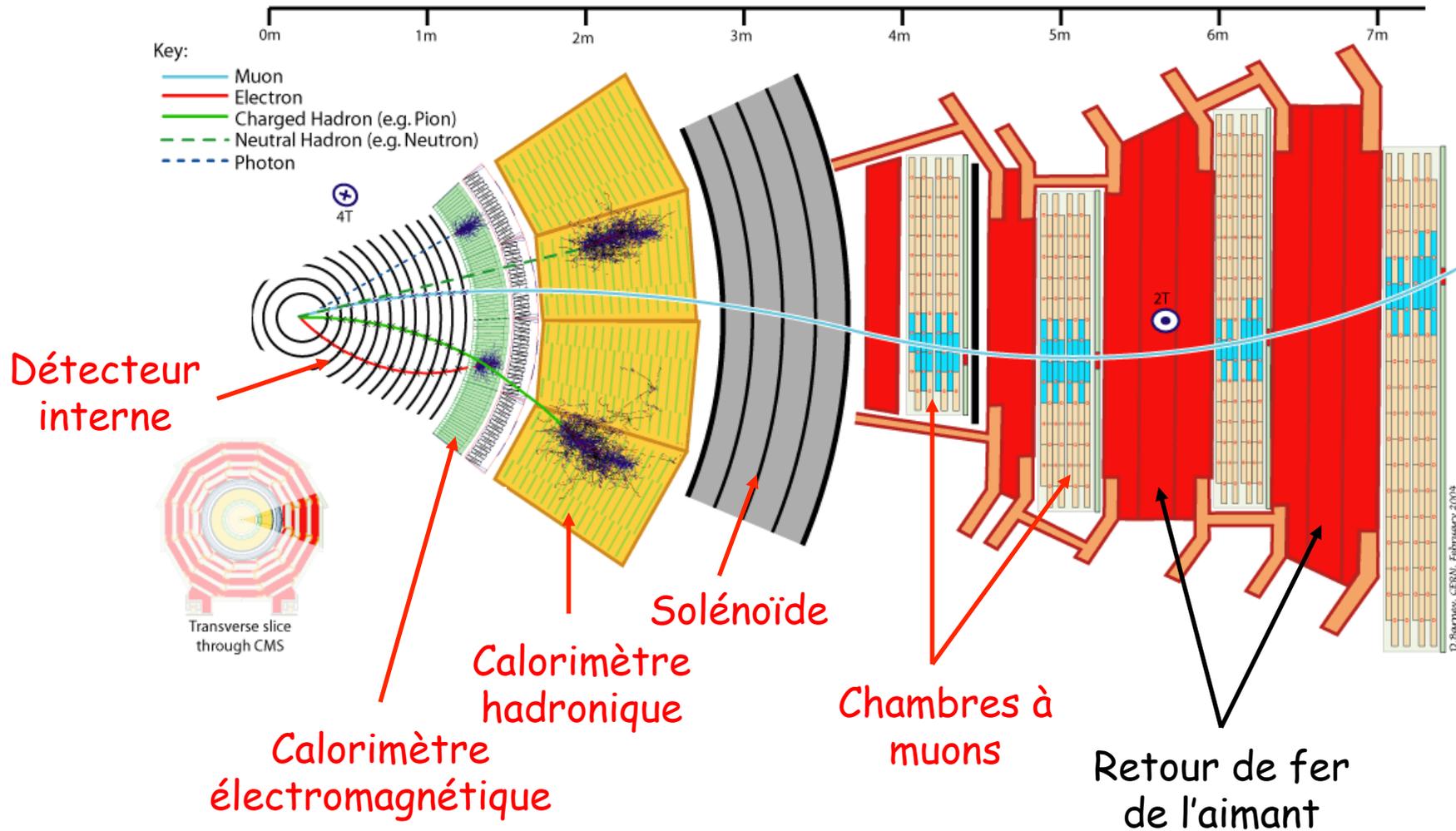
III. Autres types de détecteurs

Les détecteurs LHC

- Les détecteurs généralistes du LHC (ATLAS et CMS) nécessitent un tracking performant pour les muons
 - Les spectromètres à muons sont de dimensions inégales
 - Très bonne résolution spatiale



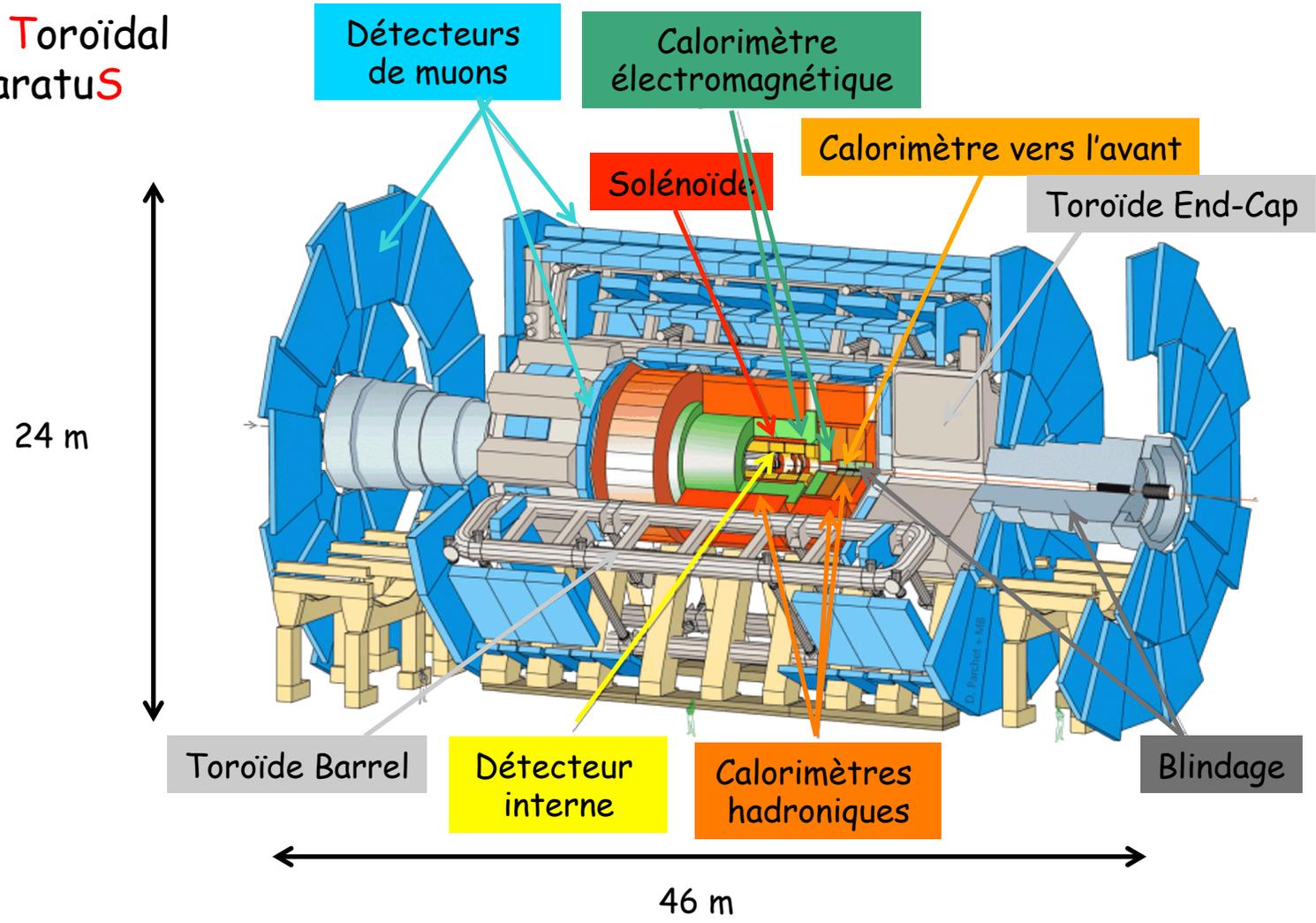
Une série d'évènements dans CMS



ATLAS

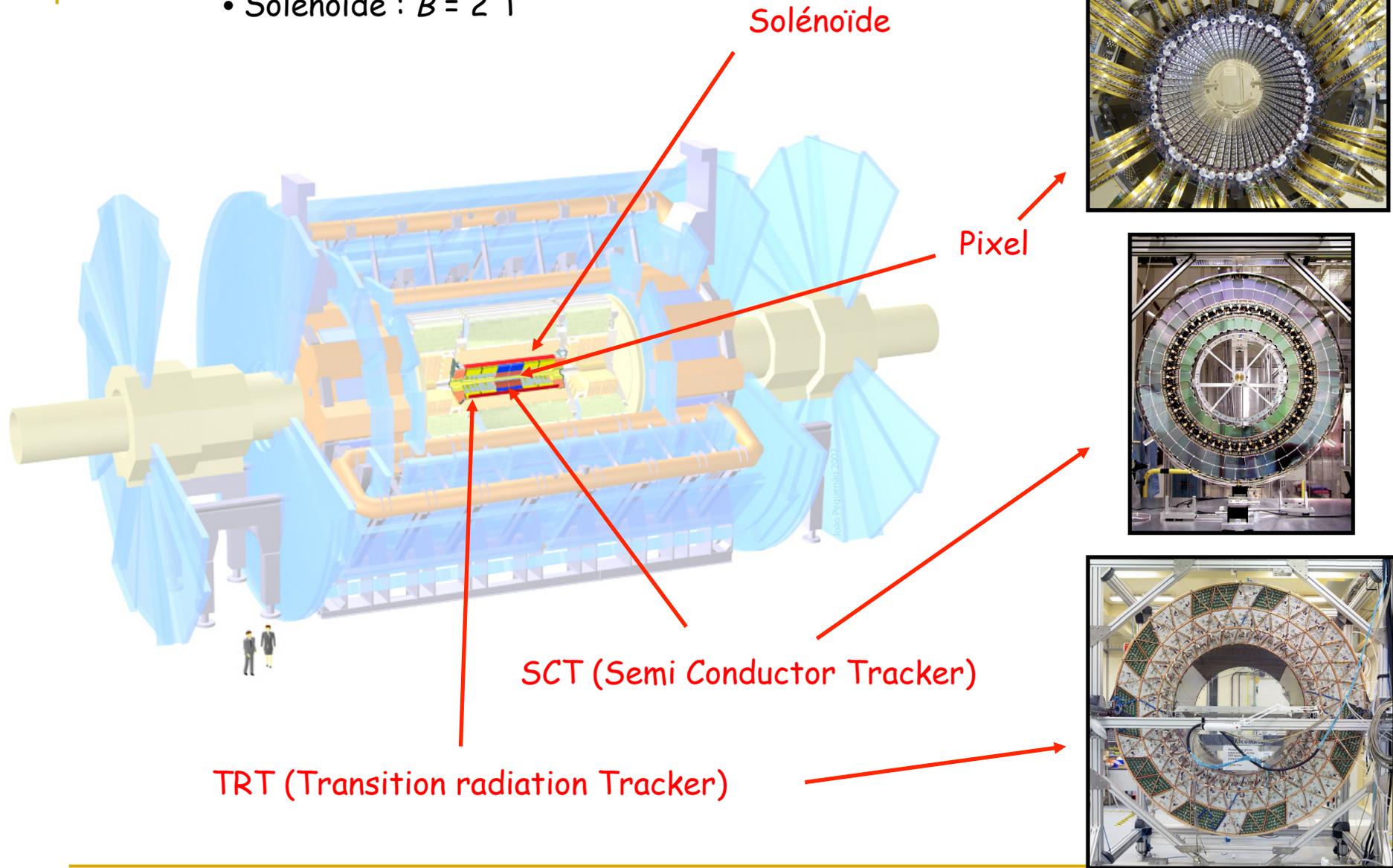
- Détecteur : $L \times l = 44 \text{ m} \times 22 \text{ m} - 7000 \text{ t}$
- Caverne : $L \times l \times h = 53 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 35 \text{ m}$

ATLAS = A Toroidal
LHC Apparatus

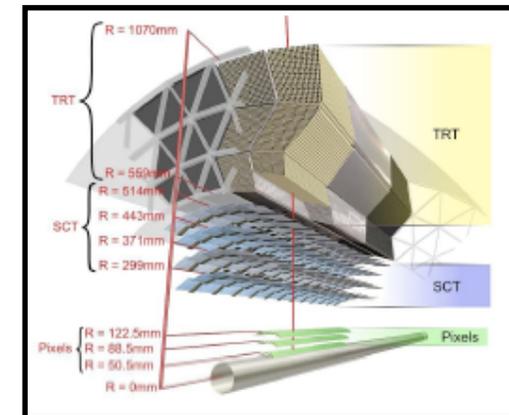
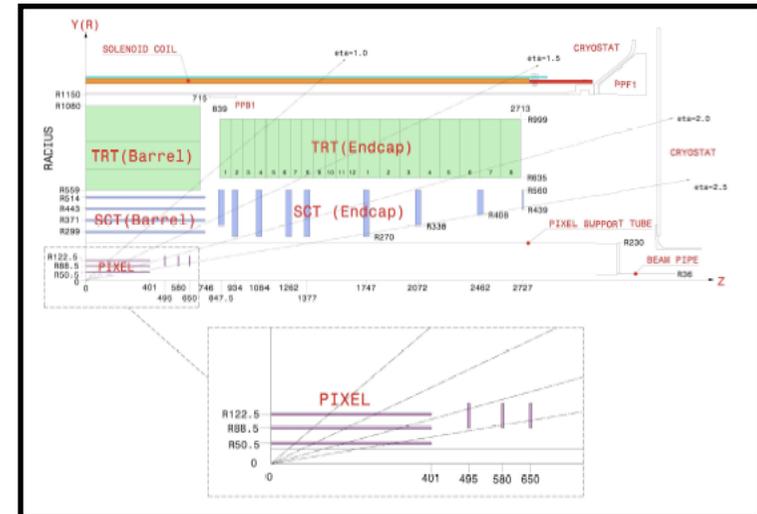
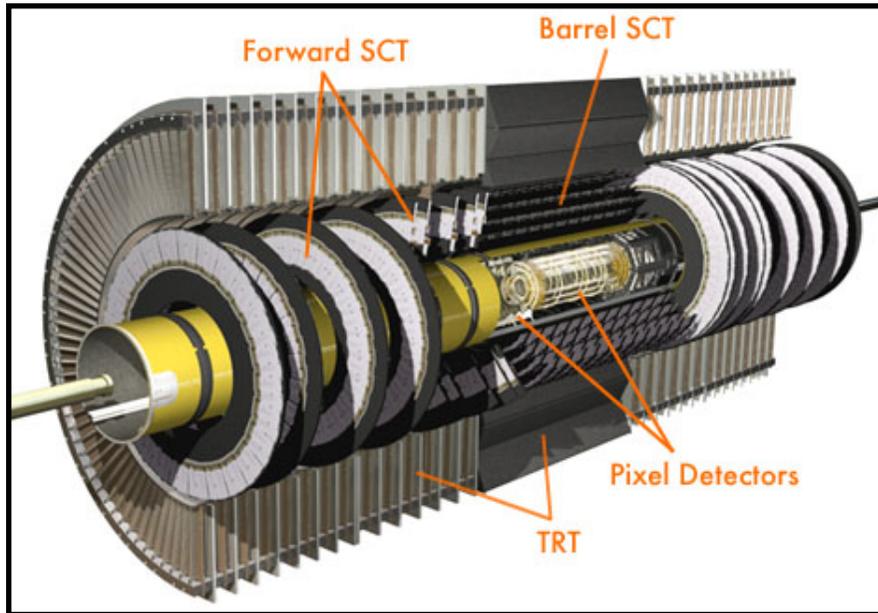


Exemple d'ATLAS : détecteur interne

- Tracking ($|\eta| < 2.5$)
- Solénoïde : $B = 2\text{ T}$



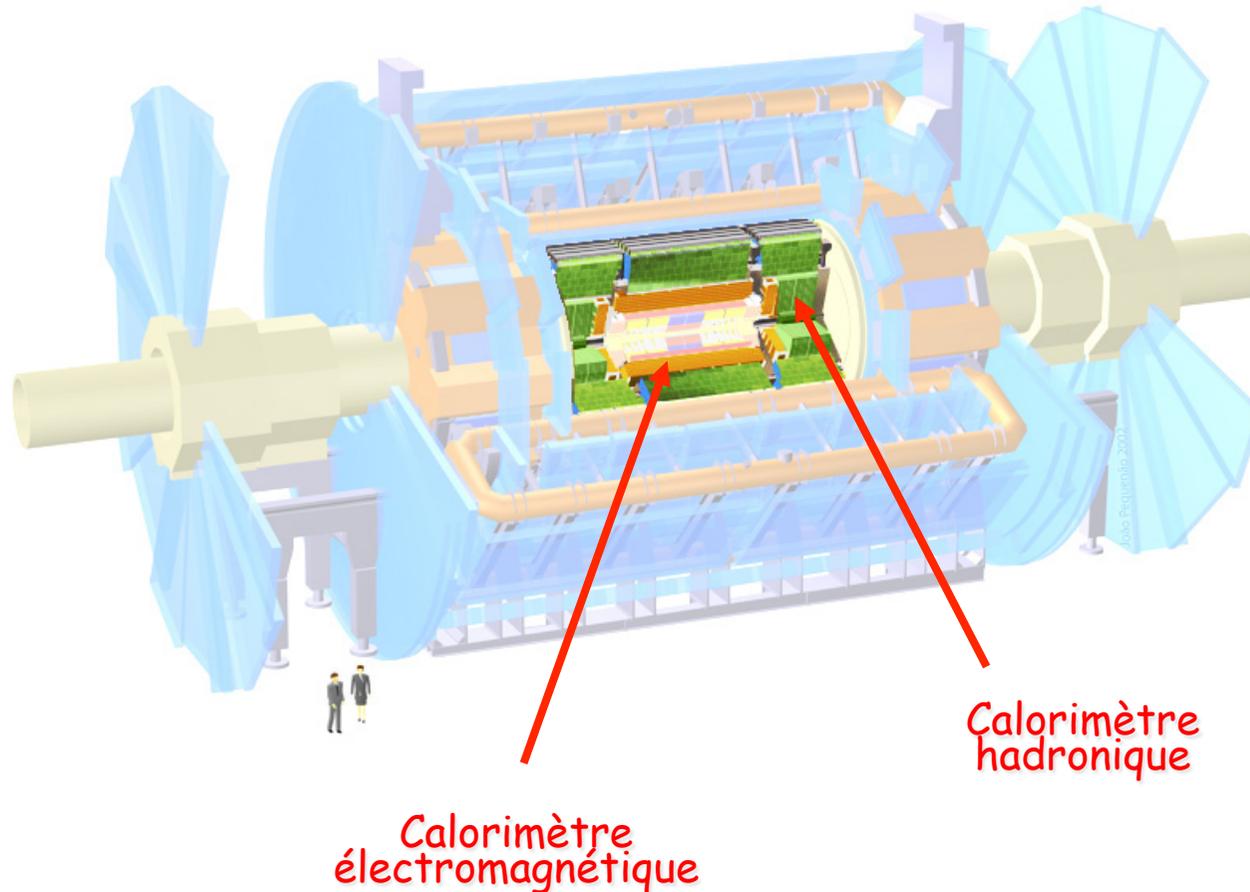
Exemple d'ATLAS : détecteur interne



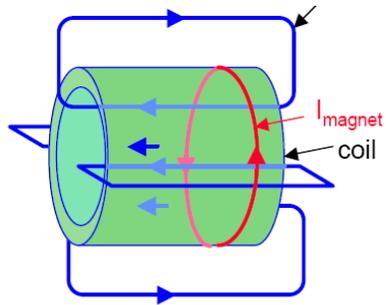
- Pixels
- Silicon Tracker (SCT)
- Transition Radiation Tracker (TRT)

7 10^7 canaux
 6 10^6 canaux
 4 10^5 canaux

- Grande couverture ($|\eta| < 4.9$)
 - ✓ EM: Pb-LAr \oplus Cu-LAr
 - ✓ Hadronique: Fibres scintillantes + Cu/W-LAr

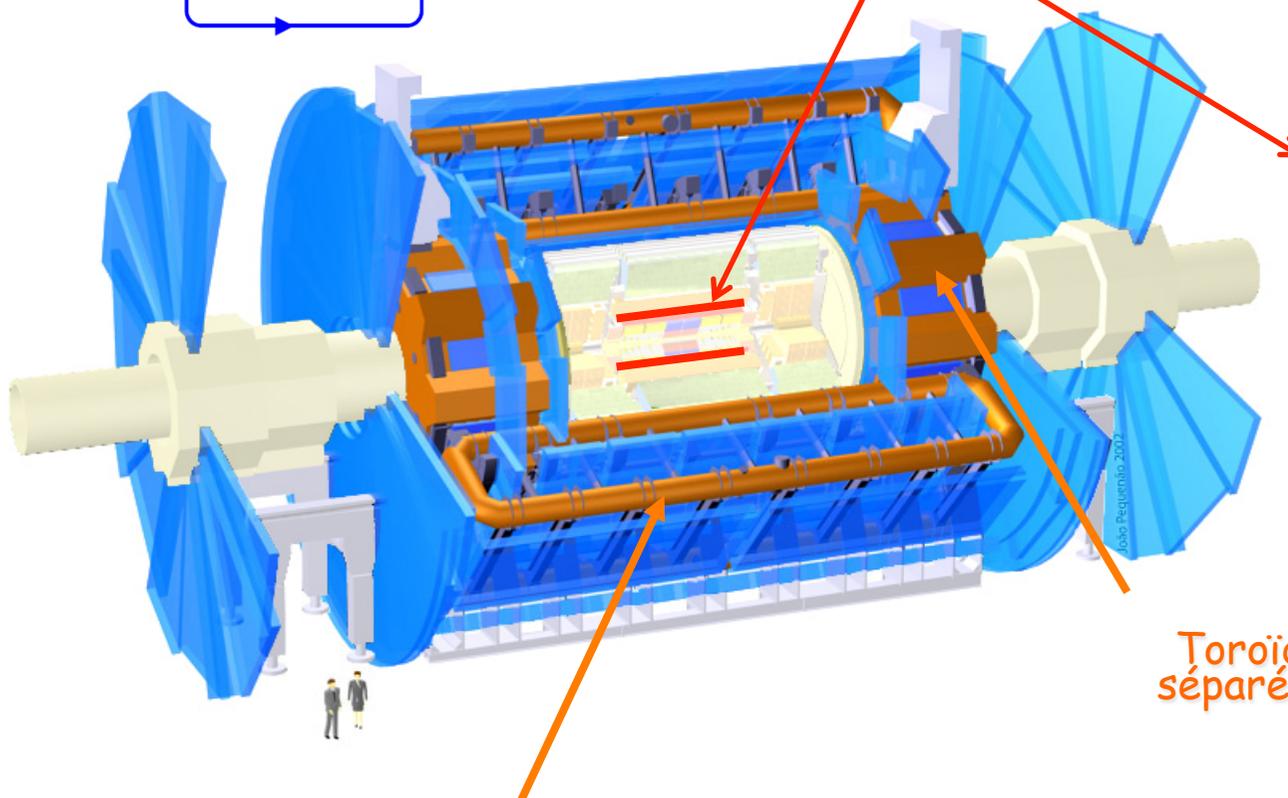


Plusieurs calorimètres à échantillonnage sont disposés autour de l'axe du faisceau



Solénoïde

- 2T avec 38 MJ d'énergie stockée
- Intégré dans l'enveloppe du calorimètre EM



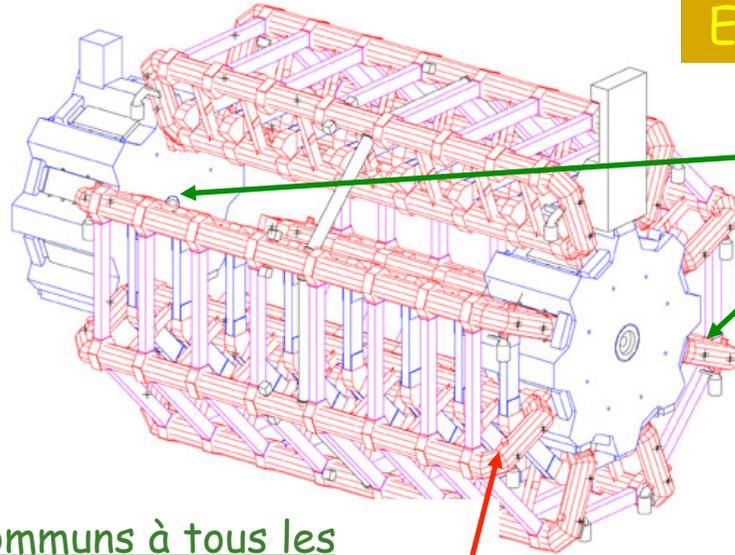
Toroïde End-Cap (2 x 8 bobines séparées dans un même cryostat)

Toroïde Barrel (8 bobines séparées)

Contraintes sur la résolution du p_T des muons

- $\sigma(p_T)/p_T < 3\%$ pour $10 < p_T < 250 \text{ GeV}/c$ et pour $|\eta| < 2.7$
- $\sigma(p_T)/p_T = 10\%$ pour $p_T \approx 1 \text{ TeV}/c$

Exemple d'ATLAS : système magnétique



Paramètres du toroïde End-Cap

Longueur : 5.0 m

Diamètre externe : 10.7 m

2 x 8 bobines

Energie stockée : 2 x 0.25 GJ

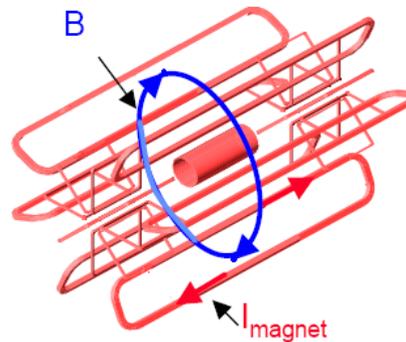
Paramètres communs à tous les toroïdes

Supraconducteur à 4 T

Champ vu par les particules : 0.6-1.5 T

Courant nominal : 20.5 kA

Point de fonctionnement : 4.7 K



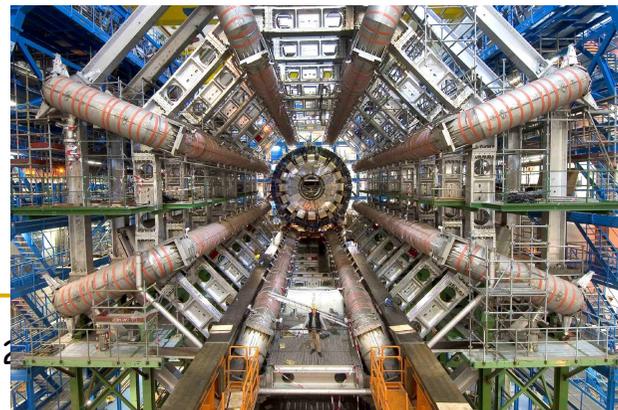
Paramètres du toroïde Barrel

Longueur : 25.3 m

Diamètre externe : 20.1 m

8 bobines

Energie stockée : 1.08 GJ

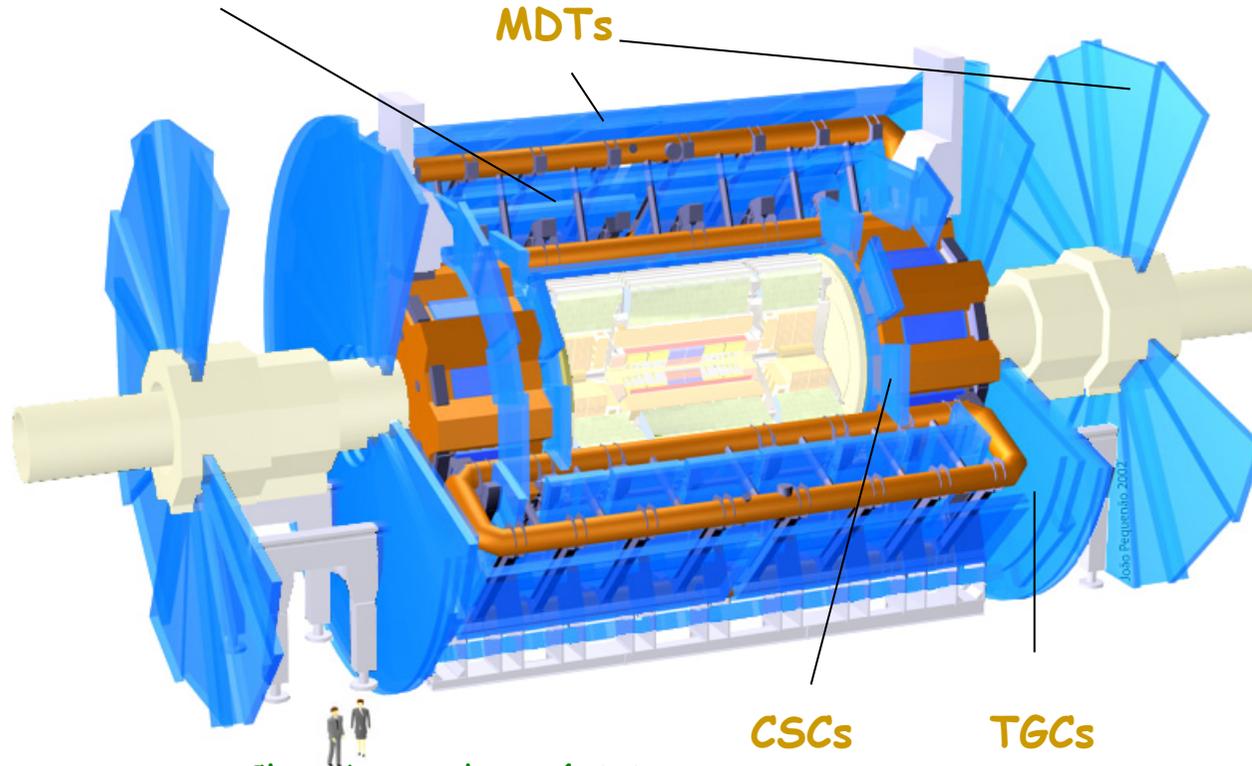


Chambres de déclenchement

- Resistive Plate Chambers (RPC) dans le Barrel
 - ✓ $|\eta| < 1.05$, 556 chambres, 374000 canaux
- Thin Gap Chambers (TGC) dans les End-Caps
 - ✓ $1.05 < |\eta| < 2.4$, 3588 chambres, 318000 canaux

RPCs

MDTs

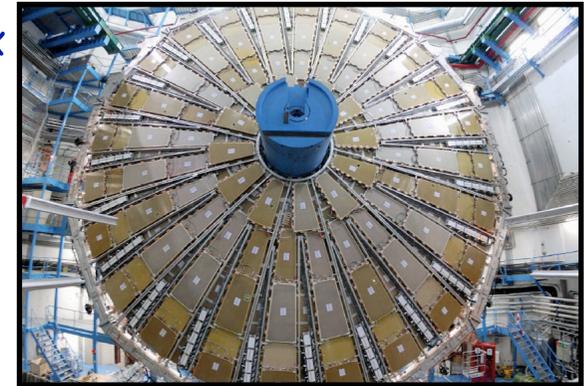


CSCs

TGCs

Chambres de précision

- Monitored Drift Tubes (MDT) dans le Barrel et les End-Caps
 - ✓ $|\eta| < 2.0$, 1172 chambres, 354000 channels
- Cathode Strip Chambers (CSC) à grande rapidité pour les End-Caps
 - ✓ $2.0 < |\eta| < 2.7$, 32 chambres, 31000 canaux

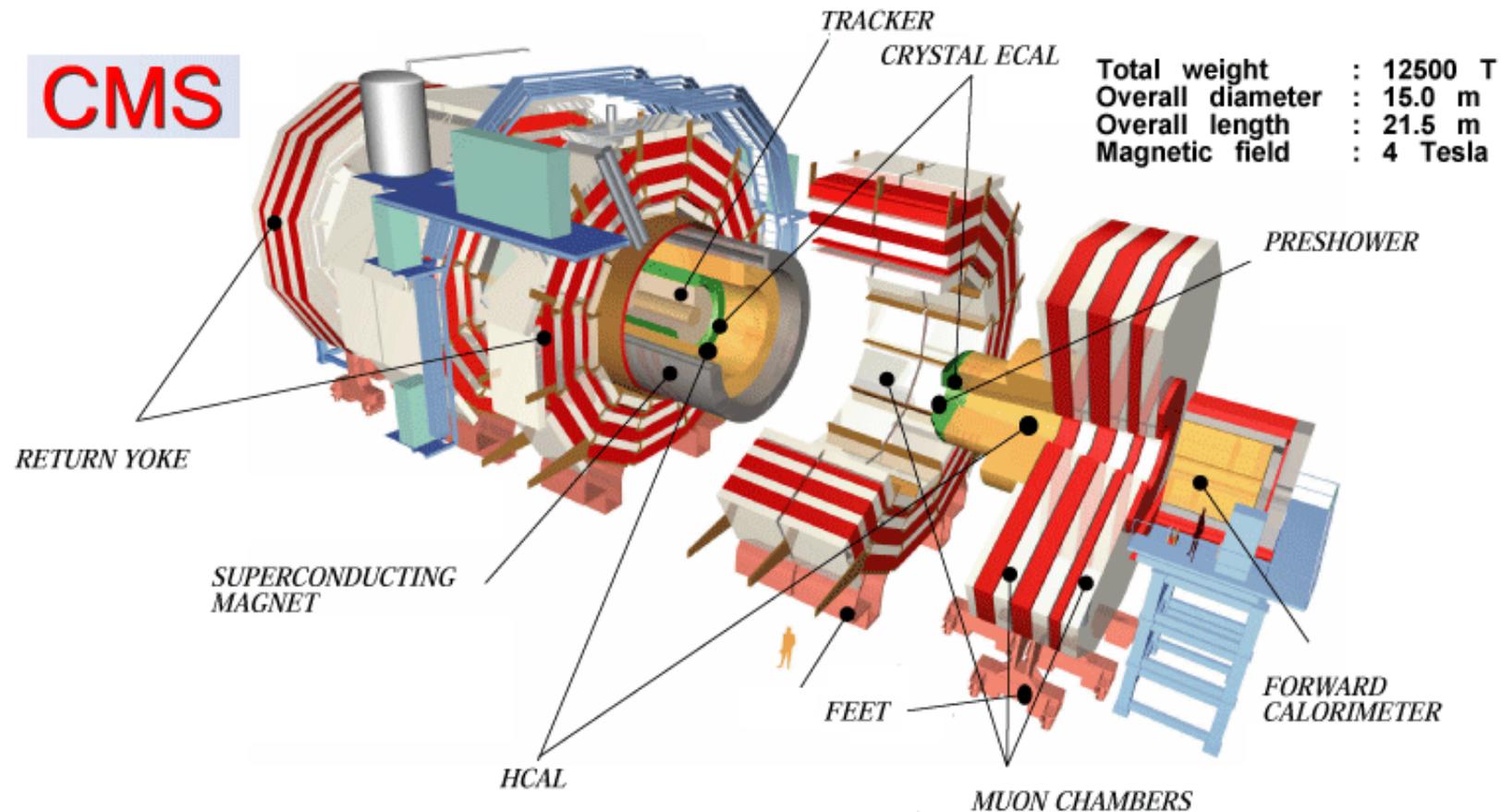


Grande roue TGC

CMS

CMS ≡ Compact
Muon Solenoid

« Compact » car $L \times l = 22 \text{ m} \times 15 \text{ m}$
wrt ATLAS ($44 \text{ m} \times 22 \text{ m}$) - 14500 t

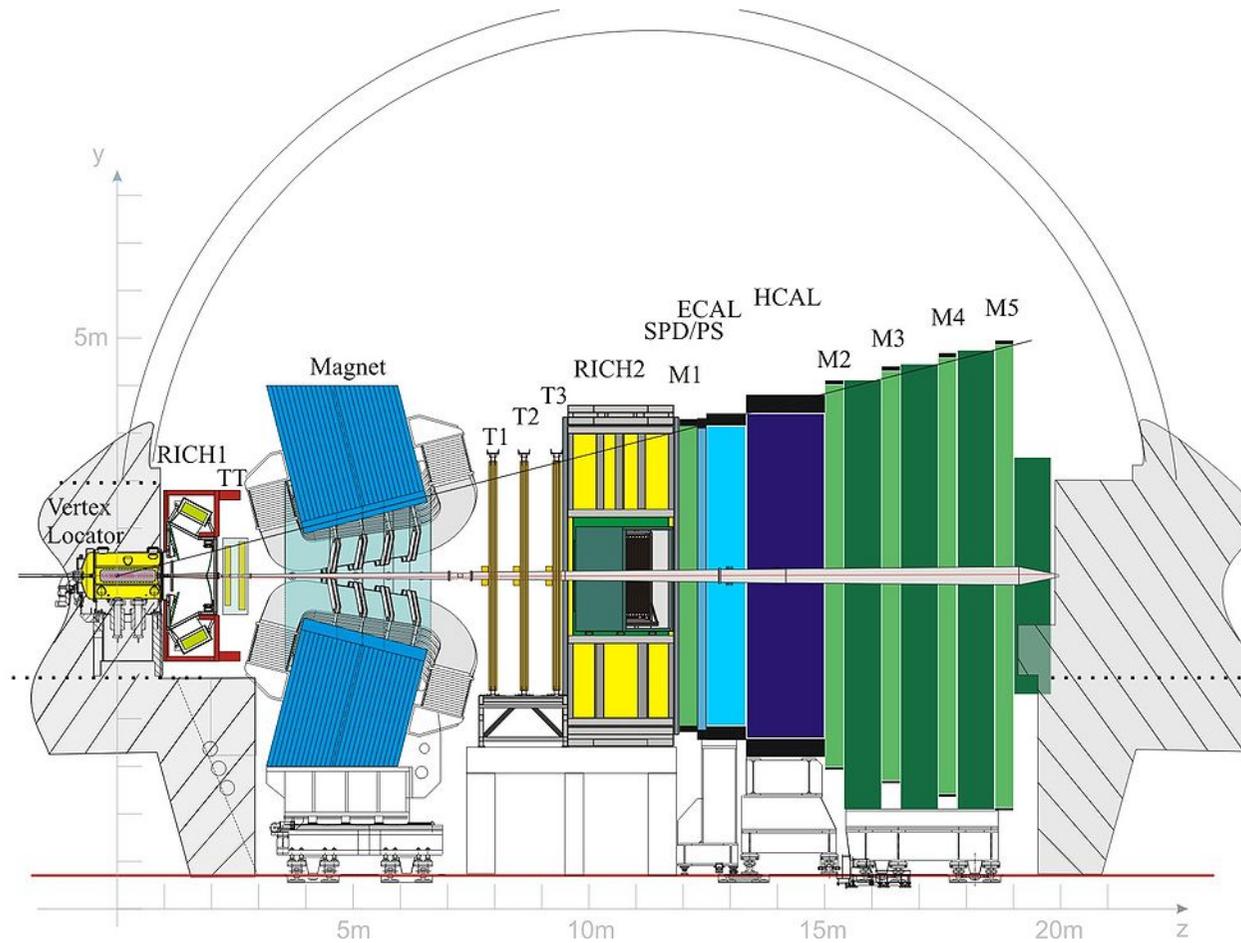


ATLAS**CMS**

Détecteur Interne	Silicium (pixels+strips) et rayonnement de transition (TRT)	Silicium (pixels+strips)
Calorimètre électromagnétique	Calorimètre à échantillonnage (Pb + LAr)	Calorimètre homogène (PbWO ₄)
Calorimètre hadronique	Calorimètres à échantillonnage (fer + tuiles scintillantes dans la partie centrale, Cu et W + LAr vers l'avant)	Calorimètres à échantillonnage (acier et Cu + tuiles scintillantes)
Détecteur à muons	Chambres à muons à l'extérieur du calorimètre hadronique	Chambres à muons dans le retour de flux du solénoïde
Système magnétique	Solénoïde de 2 T, toroïde à air d'environ 2 T	Solénoïde de 4 T

LHCb

$L \times l \times h = 20 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 12 - 2000 \text{ t}$



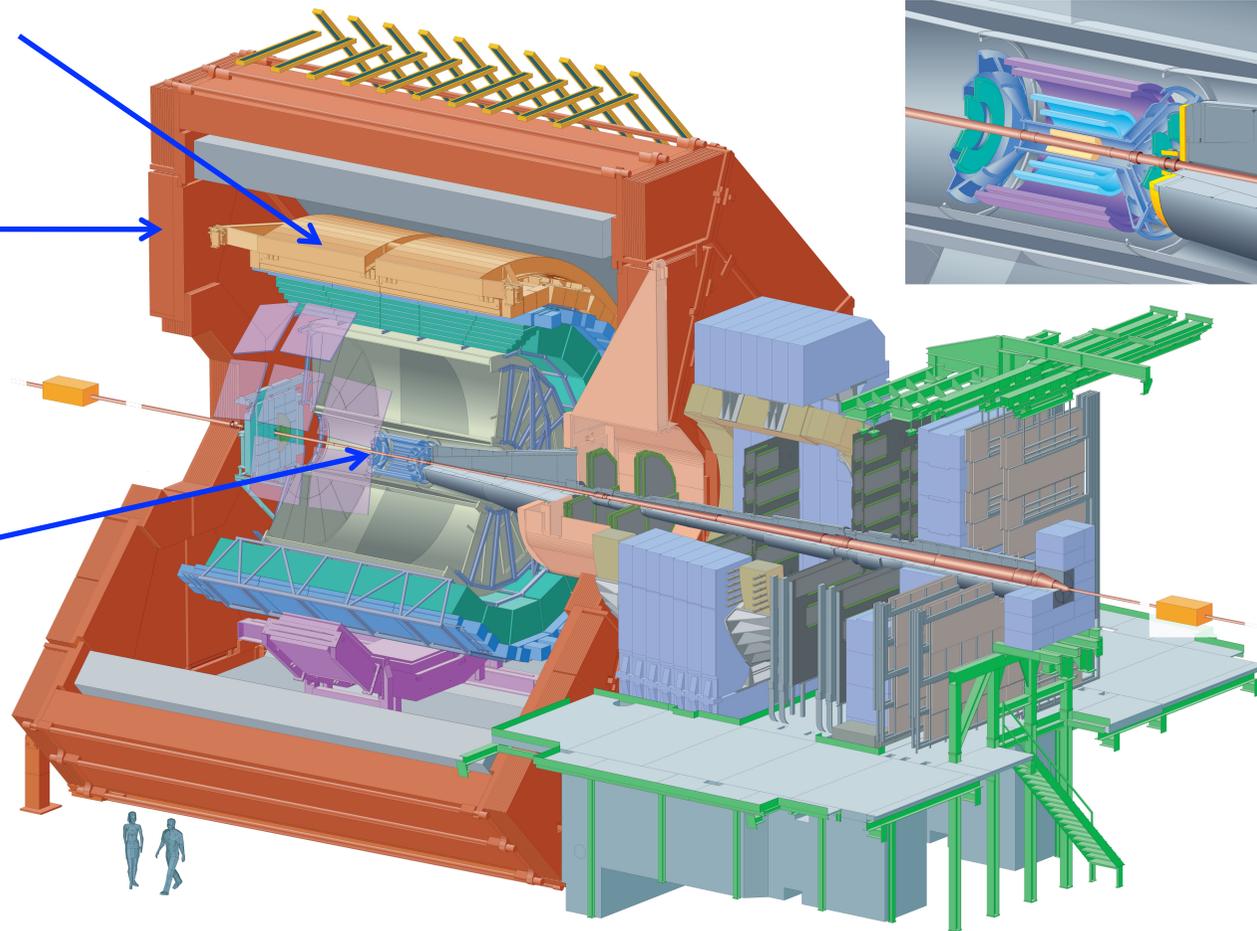
ALICE

$L \times l = 25 \text{ m} \times 15 \text{ m} - 10000 \text{ t}$

Identification des
particules

Aimant

Détecteur
interne

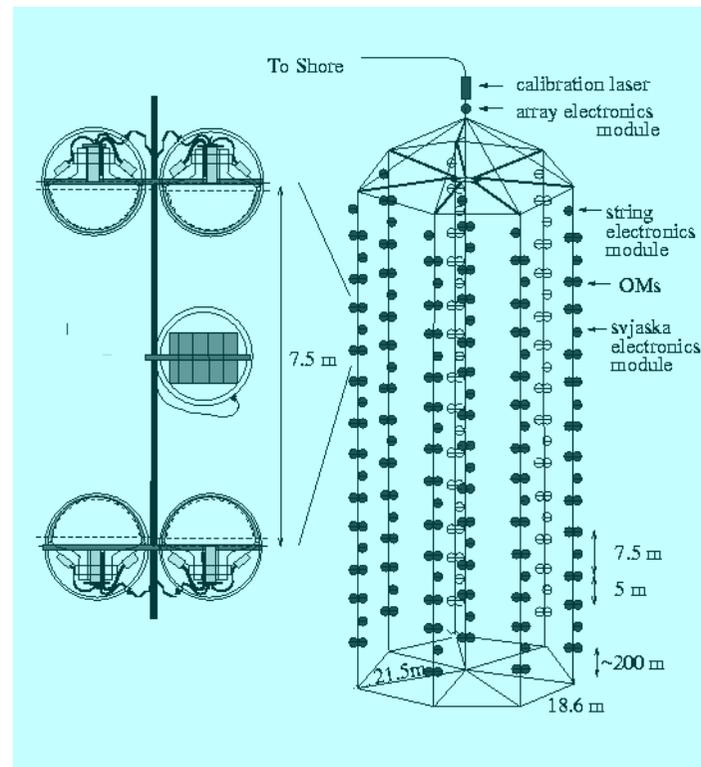
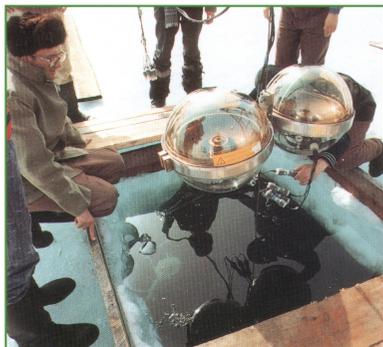


4^e partie : Exemples de détecteurs intégrés

- I. Détecteurs sur collisionneurs
- II. **Détecteurs de neutrinos**
- III. Autres types de détecteurs

- Pour détecter les neutrinos (d'origine cosmique ou d'un accélérateur), de grands volumes de détection sont nécessaires à cause du faible taux d'interaction
- Points communs entre ces détecteurs : centaines (milliers) de PM pour enregistrer la lumière créée par des particules chargées issues de l'interaction d'un neutrino
- 3 types of collisions:
 - Neutrinos d'origine cosmique
 - Neutrinos issus de l'interaction d'un faisceau de protons et d'une cible
 - Neutrinos issus de la décroissance radioactive d'une source

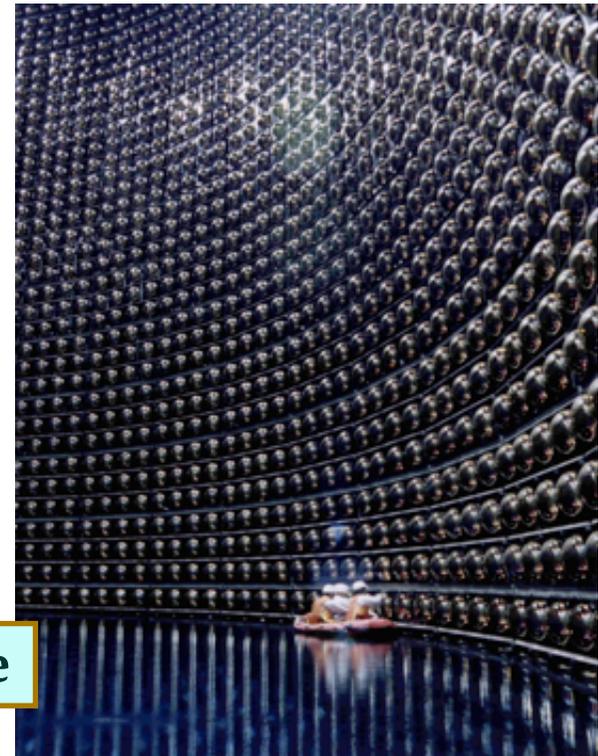
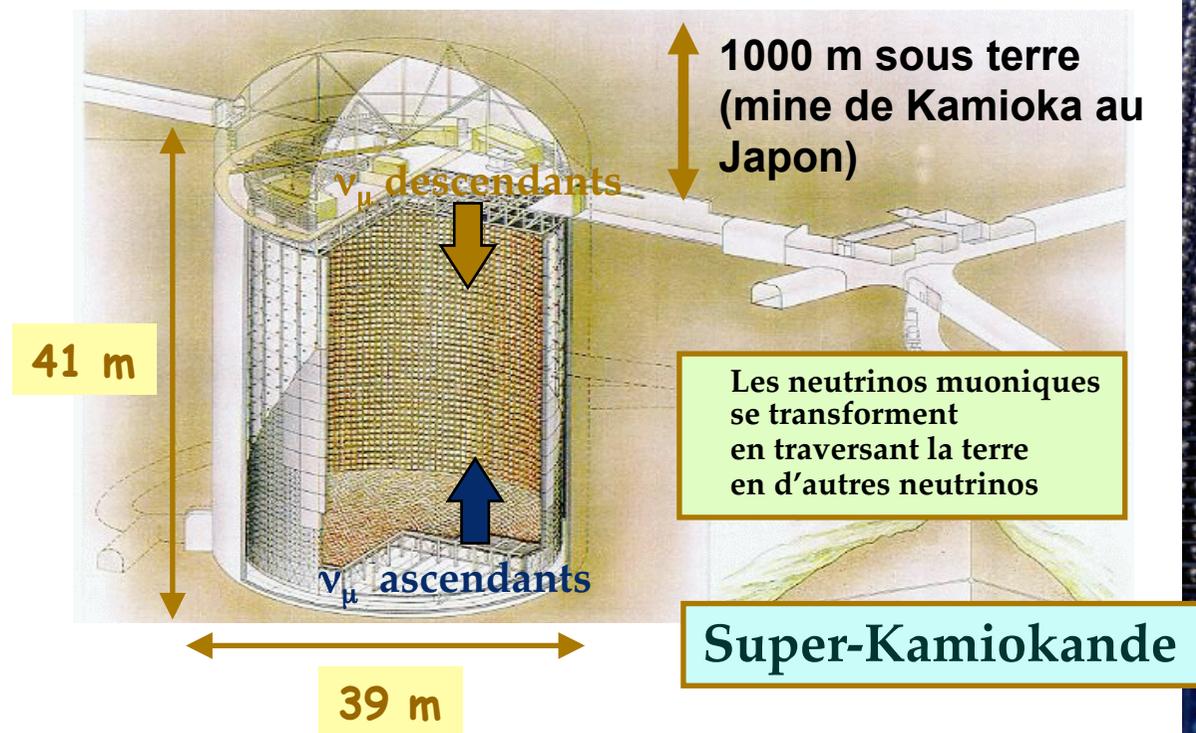
Mesure de neutrinos dans le lac Baïkal



- 1^{ère} expérience à laisser ses détecteurs un an en fonctionnement (depuis 1993). Installation pendant l'hiver, sur la glace
- 8 lignes de 200 m - Volume utile : 70 t d'eau

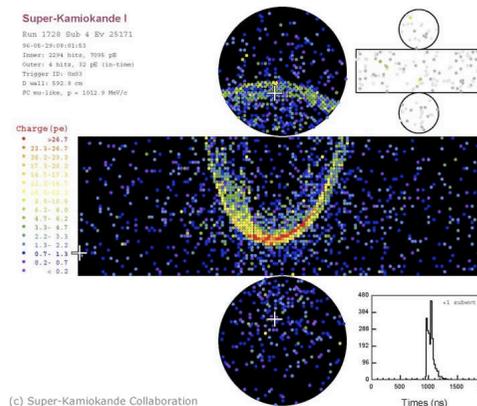
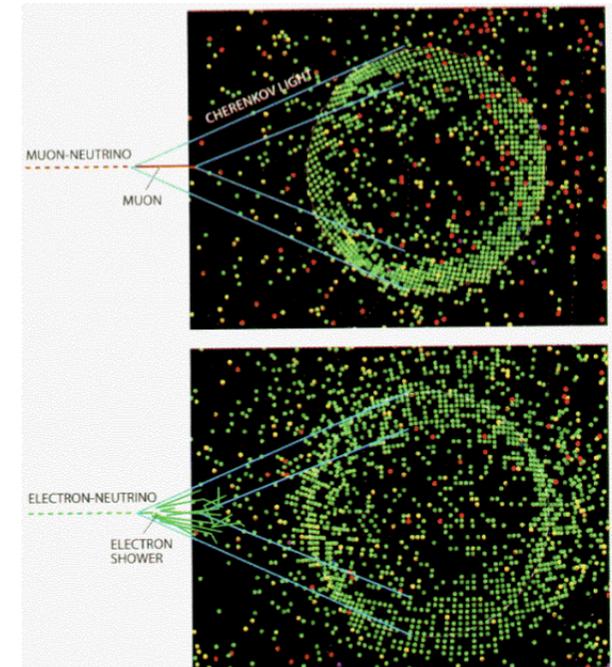
SuperKamiokande

- Détecteur de neutrinos
 - Neutrinos solaires et neutrinos initiés par un accélérateur
 - Volume utile : 50 000 t d'eau



M. Nessi

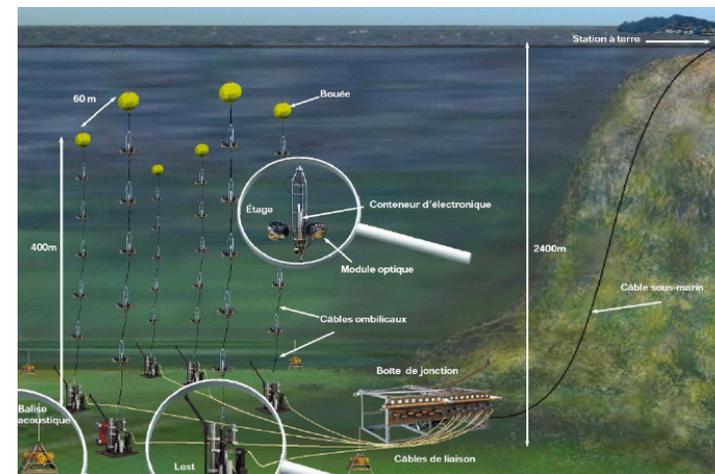
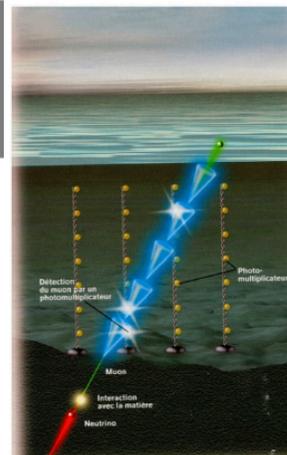
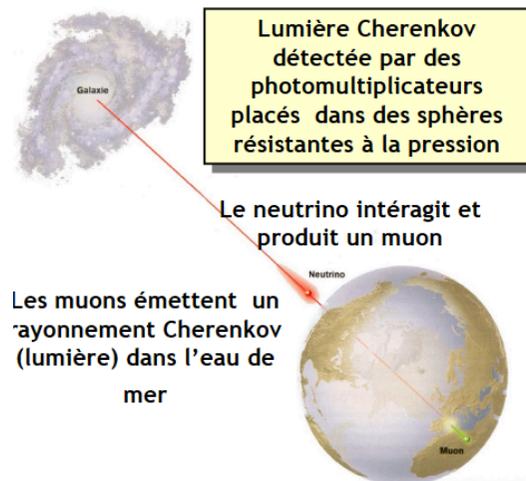
- Le neutrino va interagir avec le noyau d'oxygène
- Le lepton (e^- ou μ) dépend du type de neutrino incident
 - On mesure ses propriétés par son émission Cherenkov
 - 11000 photomultiplicateurs



ANTARES

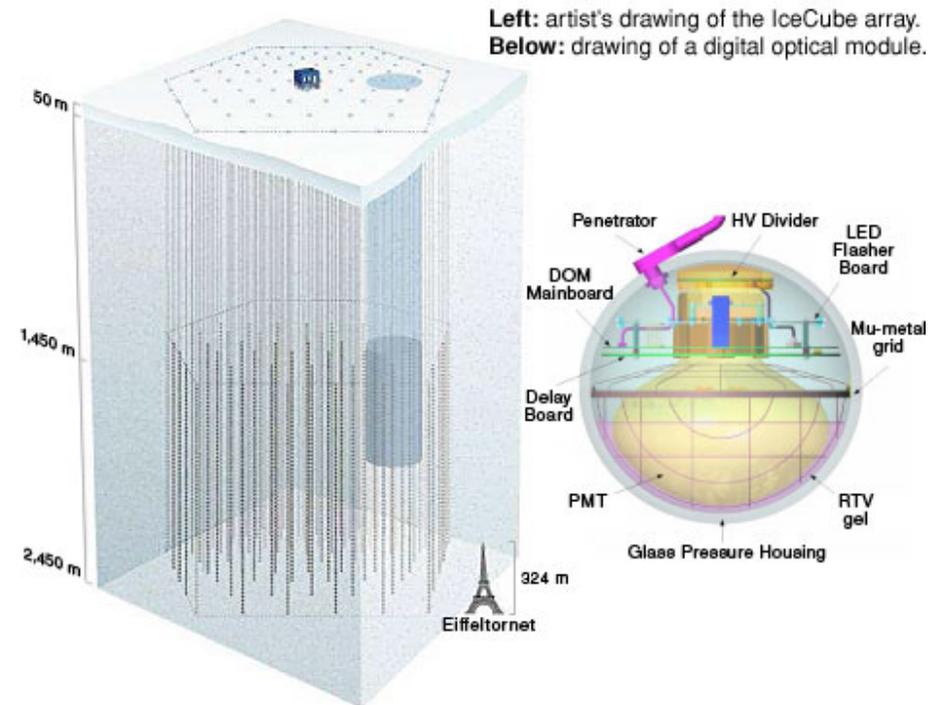
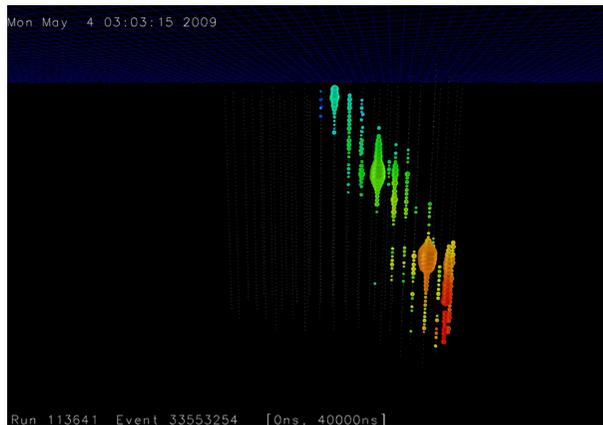
C. Racca, IReS

- **ANTARES** ≡ **A**stronomy with a **N**eutrino **T**elescope and **A**byss environmental **RE**search au large de La Seyne sur Mer
- 12 lignes de 350 m à 2500 m sous le niveau de la mer (200 x 200 m²) - Volume utile : 35 10⁶ t d'eau



IceCube

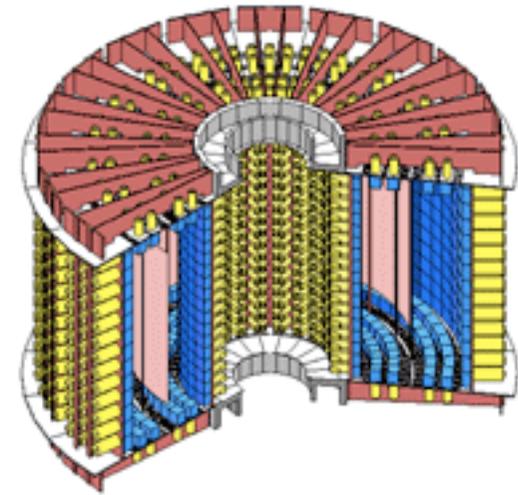
- En Antarctique, depuis 2010, 5000 PM sur 86 lignes entre 1450 and 2450 m sous la surface - Volume utile : $420 \cdot 10^6$ t d'eau



Left: artist's drawing of the IceCube array.
Below: drawing of a digital optical module.

NEMO

- Neutrino Experiment with Molybdène
- Recherche une nouvelle forme de radioactivité : l'émission spontanée de 2 électrons par un noyau (double- β)
- Feuilles minces de Mo entourées de 6000 scintillateurs et 2000 compteurs Geiger pour mesurer les propriétés des électrons
- Seul détecteur à avoir un système de tracking des électrons si précis

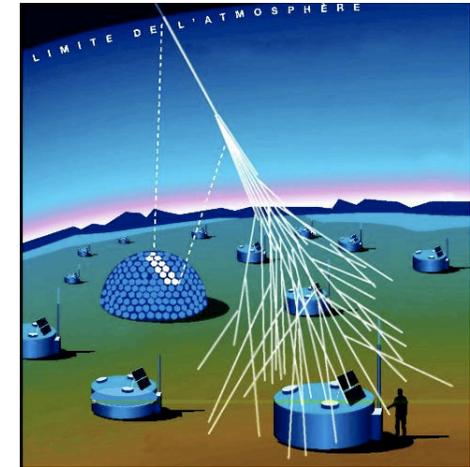


4^e partie : Exemples de détecteurs intégrés

- I. Détecteurs sur collisionneurs
- II. Détecteurs de neutrinos
- III. **Autres types de détecteurs**

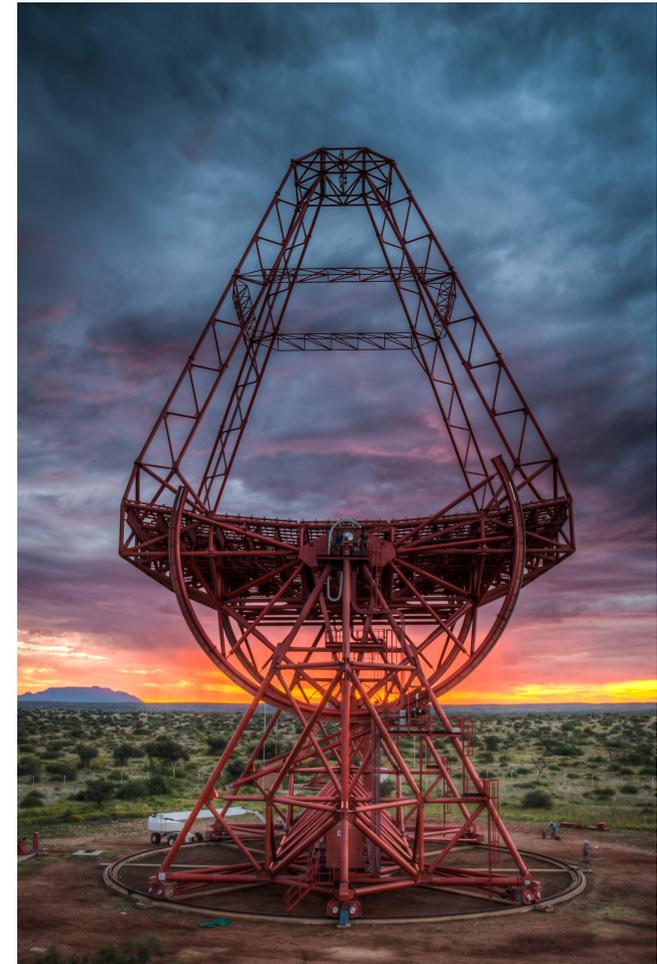
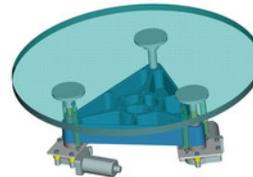
Observatoire Pierre Auger

- Détection et étude des rayons cosmiques dont les énergies sont voisines de 10^{19} eV (coupure GZK)
- L'impact au sol de ces gerbes atmosphériques est réparti sur ≈ 10 km²
- Trois **détecteurs Cherenkov** autour de chacune des 1600 cuves à eau réparties sur 3500 km²
- 4 télescopes pour mesurer la **fluorescence** des molécules de l'air (la nuit uniquement)



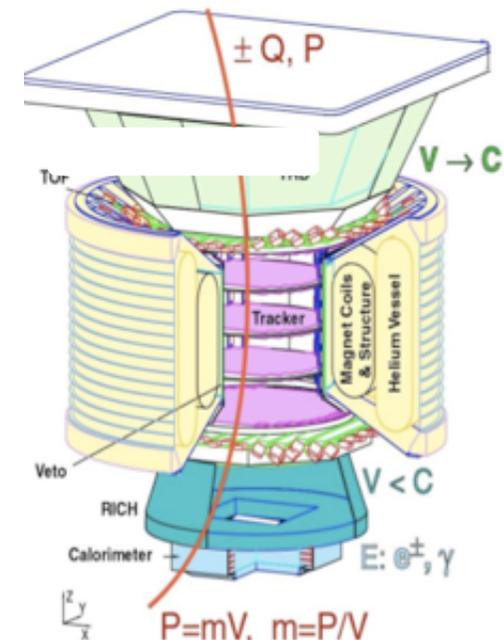
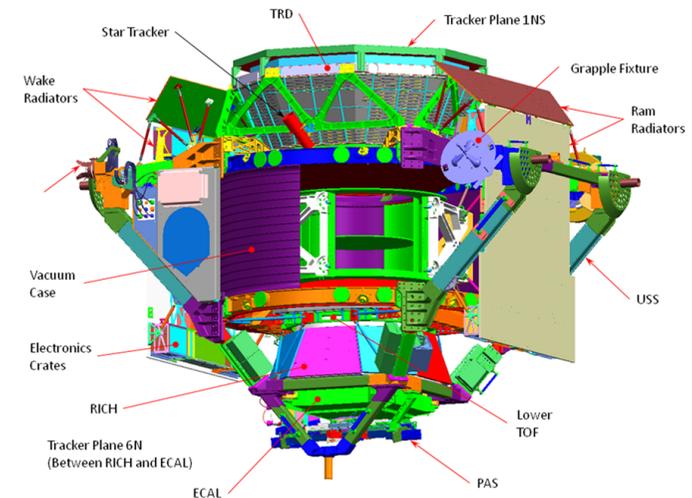
HESS

- **HESS** \equiv **H**igh **E**nergy **S**tereoscopic **S**ystem (et Victor Hess - Nobel en 1936 pour les rayons cosmiques)
- Télescope Cherenkov pour l'étude des rayons γ cosmiques (de la dizaine de GeV à la dizaine de TeV) en Namibie
- Le miroir de 12 m est segmenté en 382 miroirs de 60 cm



AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)
- Mesure du flux de cosmiques chargés en dehors de l'atmosphère
- Combine des détecteurs de toute sorte dans l'ISS (TOF, tracker, RICH, calorimètre EM, TRT)
- Lancement au printemps 2011 et prise de données depuis



Conclusion sur la 4^e partie

- Tous les détecteurs globaux sont basés sur le même principe : toutes les mesures et identifications doivent être faites avant la calorimétrie, à l'exception de l'identification des muons qui se fait parfois au delà

Conclusion générale

- La plupart du temps, on mesure dE/dx
 - Simplicité de certains détecteurs
 - Complexité et ingéniosité d'autres
- Dans tous les cas, les détecteurs sont optimisés globalement (mécanique + électronique + système d'acquisition)
- Leur taille augmente généralement avec l'énergie
 - Le prix également ..
- Désolé si j'ai été partial. Il a fallu faire des choix..