

La calorimétrie

cours n^o 2

La calorimétrie

- ◆ Pourquoi un calorimètre?
- ◆ Les propriétés importantes des calorimètres
- ◆ Le développement des gerbes
 - ◆ gerbes électromagnétiques
 - ◆ Interlude: les muons
 - ◆ gerbes hadroniques

Interactions avec
la matière

- ◆ Les paramètres essentiels
 - ◆ mesure de l'énergie: principe de base
 - ◆ résolution
 - ◆ linéarité
 - ◆ position
- ◆ Les techniques expérimentales
 - ◆ calorimètres homogènes
 - ◆ principe
 - ◆ exemples
 - ◆ calorimètres à échantillonnage
 - ◆ principe
 - ◆ exemples

- ◆ Les calorimètres à l'IN2P3
- ◆ Les systèmes de lecture
- ◆ Le déclenchement

Bilan: gerbes électromagnétiques et milieux absorbants

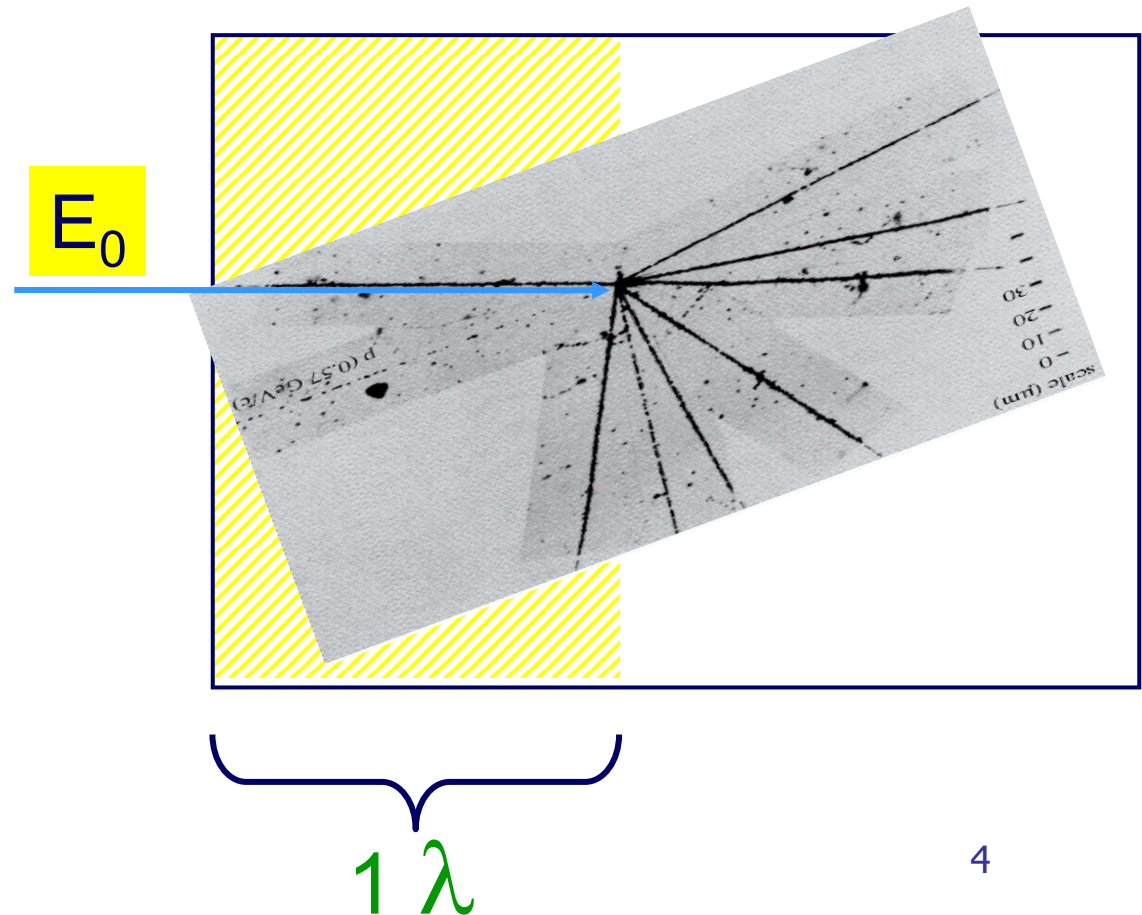
- ◆ Dans une **gerbe em**, l'énergie déposée est **proportionnelle** au **nombre de particules** d'énergie inférieure à l'énergie critique
- ◆ On définit la longueur de radiation X_0 qui permet de décrire de façon universelle le développement des gerbes **d'électrons et de photons** dans la matière.
- ◆ Les gerbes sont contenues (99%) dans une trentaine de X_0
- ◆ Les gerbes sont étroites et contenues à 95% dans $2R_M$
- ◆ Les gerbes s'étendent plus loin dans les matériaux denses

Longueur d'interaction nucléaire: λ_{int}

Définition: La longueur d'interaction nucléaire λ_{int} est définie comme la distance moyenne qu'un hadron de hte énergie parcourt dans un milieu donné avant de subir une interaction nucléaire.

La probabilité pour qu'une particule traverse la distance z dans ce milieu sans créer une interaction nucléaire est:

$$P = e^{-z/\lambda_{\text{int}}}$$

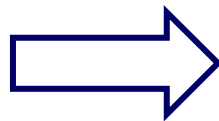


Longueur d'interaction nucléaire: λ_{int}

◆ Cette variable est très utilisée en calorimétrie car elle permet de décrire le comportement des gerbes hadroniques de façon générique (\sim) pour tous les matériaux

	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO ₄
Z	-	-	13	18	26	82	-
λ_{int} (cm) (g.cm ⁻² / ρ)	~ 70000	84	39	84	16.8	17	22.4
X_0 (cm) (g.cm ⁻² / ρ)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{A}{N_A \lambda_{\text{int}}}$$



$$\lambda_{\text{int}} \approx 35 A^{1/3} \text{ g.cm}^{-2}$$

Gerbes hadroniques: conclusions

En profondeur,
un π de 300 GeV est contenu à 95% dans $8 \lambda_{\text{int}}$ (85 cm d'U)
Un électron de 300 GeV, dans $30 X_0$ (9cm)

◇ plus larges

Radialement,
un π de 80 GeV est contenu à 95% dans $\approx 1.5 \lambda_{\text{int}} / 32 \text{ cm}$
Un électron de même énergie est contenu à 95% dans 3.5 cm
Un facteur 9 radialement et longitudinalement

◇ plus difficile et

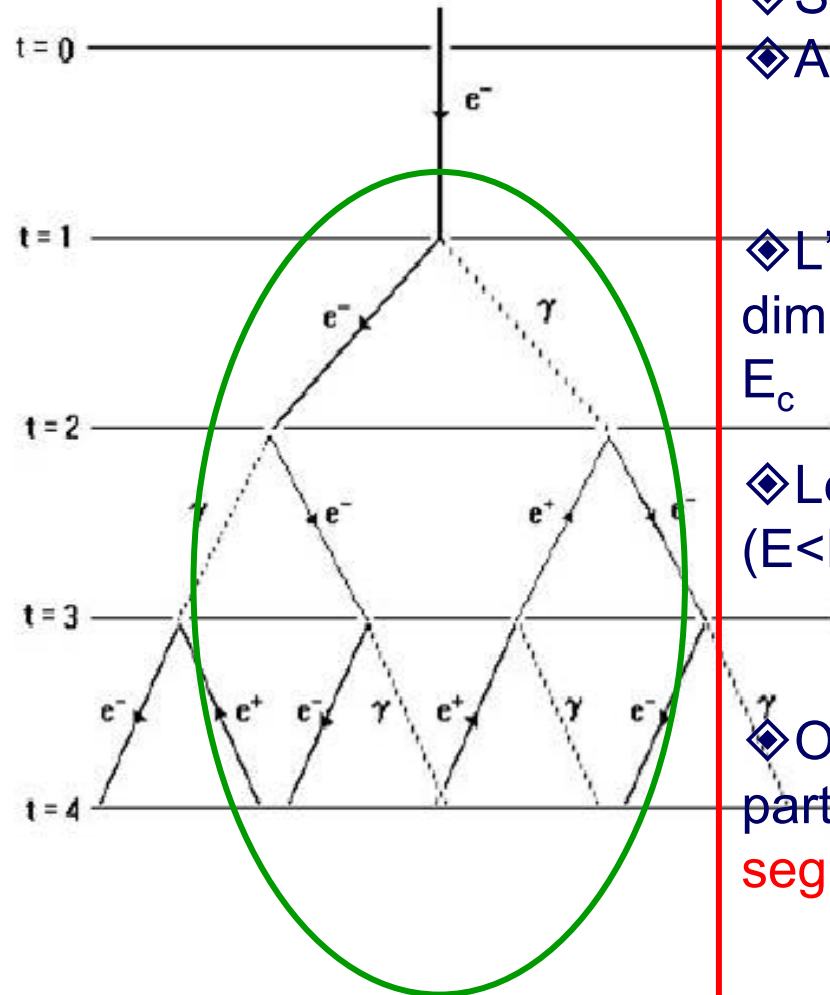
Un facteur 9 radialement et longitudinalement

◇ Les demandes sur les calorimètres hadroniques sont par conséquence, plus grossières

Nous sommes maintenant prêts à construire un calorimètre
ou
deux calorimètres: un électromagnétique et un hadronique.

Le principe de la mesure

La mesure de l'énergie: principe



◆ Soit un électron d'énergie incidente E_0
◆ A chaque X_0 , une multiplication se produit
($e^- \rightarrow e^- \gamma$ ou $\gamma \rightarrow e^+ e^-$)

◆ L'énergie des particules secondaires diminue à chaque cascade jusqu'à atteindre E_c

◆ Le nombre de particules détectables ($E < E_c$) atteint un maximum $N \sim E_0 / X_0$:
c'est la maximum de la gerbe

◆ On collecte l'ionisation produite par ces particules d'énergie $E < E_c$. On parle de segment détectable.

pas exact/correct

La mesure de l'énergie

◆ Une particule d'énergie E_0 produit N particules potentiellement détectables:

◆ $N \propto E_0/E_c$

◆ N est le nbre de paires e^+e^- qui libèrent de l'énergie par ionisation et excitation des atomes.

◆ Le signal collecté est proportionnel à la somme de tous les segments de traces T (longueur totale de trace):

◆ $T \propto X_0 N \propto X_0 E_0/E_c$ (~le parcours moyen $-X_0-$ fois le nbre de segments)

◆ **Energie mesurée** E_M est proportionnelle à l'énergie de la particule incidente par la relation: $E_M = k T = k X_0 E_0/E_c$

$$\frac{\sigma(E_M)}{E_M} = \frac{\sigma(kT)}{kT} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(k)}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(T)}{T}\right)^2} = \frac{\sigma(T)}{T} = \frac{\sqrt{T}}{T} = \frac{1}{\sqrt{T}} \approx \frac{a}{\sqrt{E_0}}$$

Relation bien connue

La mesure de l'énergie

$$\frac{\sigma(E_M)}{E_M} = \frac{\sigma(kT)}{kT} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(k)}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(T)}{T}\right)^2} = \frac{\sigma(T)}{T} = \frac{\sqrt{T}}{T} = \frac{1}{\sqrt{T}} \approx \frac{a}{\sqrt{E}}$$

Ne fluctue pas

Fluctuation du nombre de segments:
statistique poissonienne
Pour N grand: $\Delta N = \sqrt{N}$

$T \propto E$

Cette description simple est valable pour un détecteur infini (i.e. tte l'énergie est déposée dans le milieu) sans effet instrumental d'acceptance et de lecture, **et pour lequel ts les segments sont détectés.**

La mesure de l'énergie

- ◆ **Mais!** Pour chaque processus de détection, il y a un seuil en énergie E_s , en dessous duquel le segment n'est pas vu
- ◆ On définit donc la longueur totale de trace maximale $T_{\text{detectable}}$
 - ◆ $T_{\text{detectable}} = f_s T \propto f_s X_0 N \propto f_s X_0 E/E_c$
- ◆ L'énergie mesurée devient alors:
 - ◆ $E_M = k T_{\text{detectable}} = k f_s X_0 E/E_c$

$$\frac{\sigma(E_M)}{E_M} = \frac{\sigma(kT_{\text{detectable}})}{kT_{\text{detectable}}} = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{detectable}}}} \approx \frac{a}{\sqrt{E}} \frac{1}{\sqrt{f_s}}$$

f_s mesure la fraction d'énergie détectée:
plus E_s est petit, plus f_s est grand,
meilleure est la résolution.

Processus stochastique

- ◆ Même pour les calorimètres homogènes (milieu actif) l'énergie est échantillonnée:
 - ◆ La mesure compte le nombre n d'apparitions d'un processus donné
 - ◆ Il y a donc une erreur proportionnelle à \sqrt{n}
- ◆ Exemple:
 - ◆ Calorimètre en verre au Plomb: signal détecté est la radiation Cerenkov
 - ◆ Radiation Cerenkov produite par les e^\pm avec $\beta > 1/n$, i.e $E > 0.7\text{MeV}$
 - ◆ Pour un électron de 1GeV, au plus $1000/0.7 \approx 1400$ particules indépendantes vont produire de la lumière →
fluctuation = $\sqrt{1400}/1400 \approx 3\%$
 - ◆ Pour la réponse finale, il faut aussi prendre en compte les fluctuations dans la détection des photon Cerenkov dans le détecteur de photons ~ 1000 photoelectrons/GeV(photostatistics):
fluctuation supplémentaire: $\sqrt{1000}/1000 \approx 3\%$
 - ◆ Résolution totale pour le verre au Plomb:
 $\sigma/E \approx 5\%/\sqrt{E}$

La résolution en énergie

◆ La formule de référence:

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

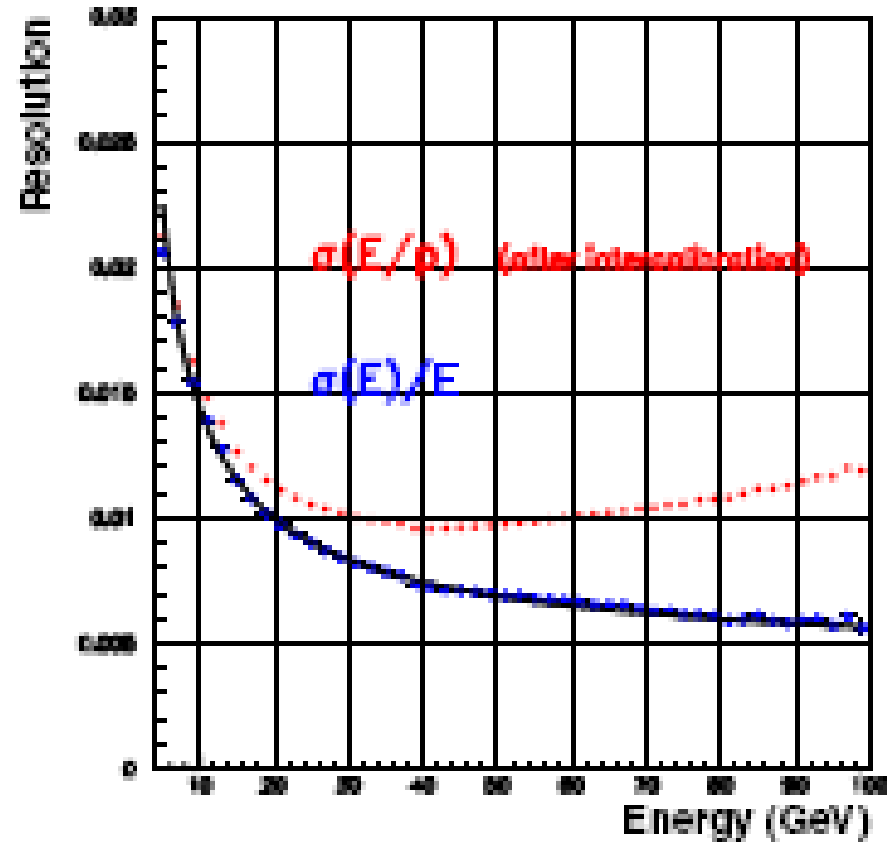
◆ **Terme stochastique a**: fluctuations dans la détection des particules de la gerbe $a \sim 0.05 - 0.1$ (3 -10%)

◆ **Terme de bruit b**: indépendant de l'énergie – fonction du nombre de cellules qui entrent dans la reconstruction de la gerbe $b \sim 0.1 \text{ GeV}$

◆ **Terme constant c**: prend en compte les effets qui induisent des variations de la réponse de détecteur en fonction de la position, du temps, de la température.

- ◆ géométrie, électronique imparfaites (non uniforme), composante périodique, ...
- ◆ dominant à haute énergie

La résolution en énergie



NA48

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(3.2 \pm 0.2)\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{(0.09 \pm 0.01)}{E} \oplus (0.42 \pm 0.05)\%$$

(E en GeV)

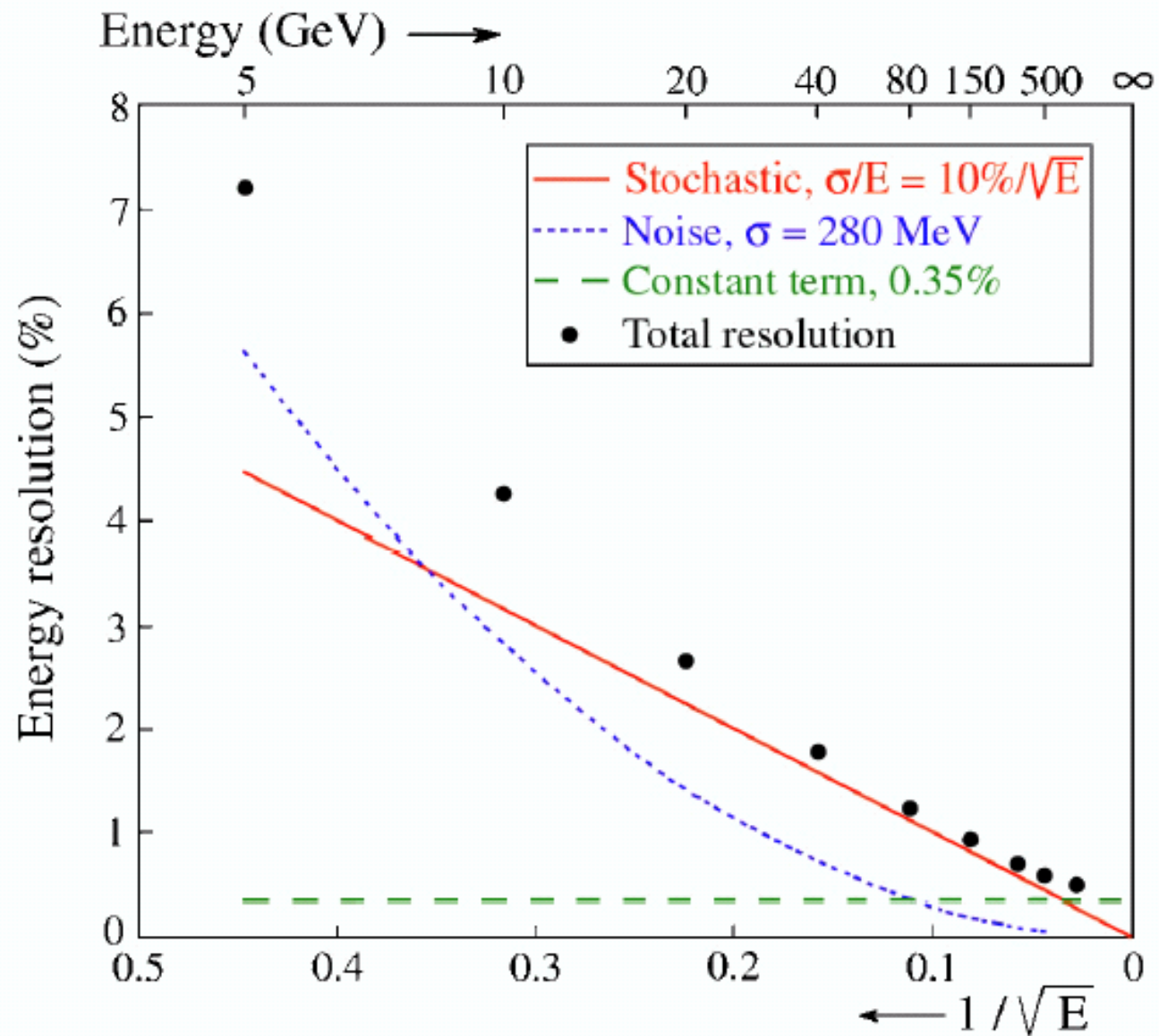
Résolution en énergie

CMS (PbWO ₄)		$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.03}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.005$		
	10 GeV	100 GeV	1000 GeV	
Stochastique (GeV)	0.095	0.3	0.949	
Bruit (GeV)	0.3	0.3	0.3	
Constant (GeV)	0.05	0.5	5	
$\sigma(E)$	0.30 GeV	0.65 GeV	5.1 GeV	
$\sigma(E)/E$	3%	0.65 %	0.51%	

Résolution en énergie

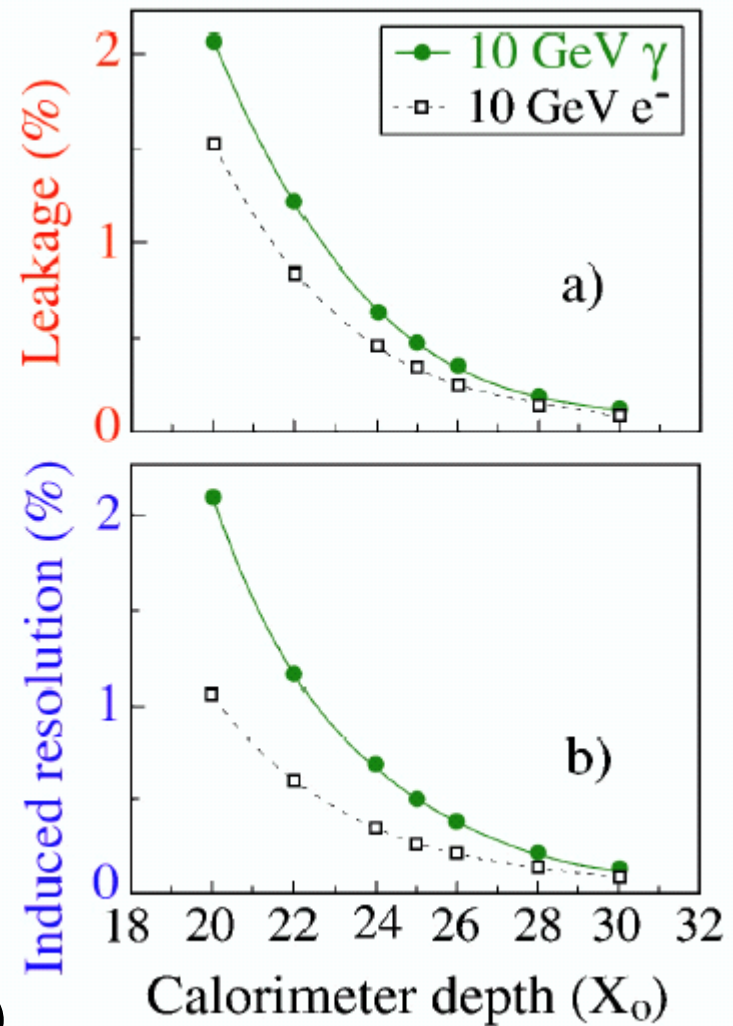
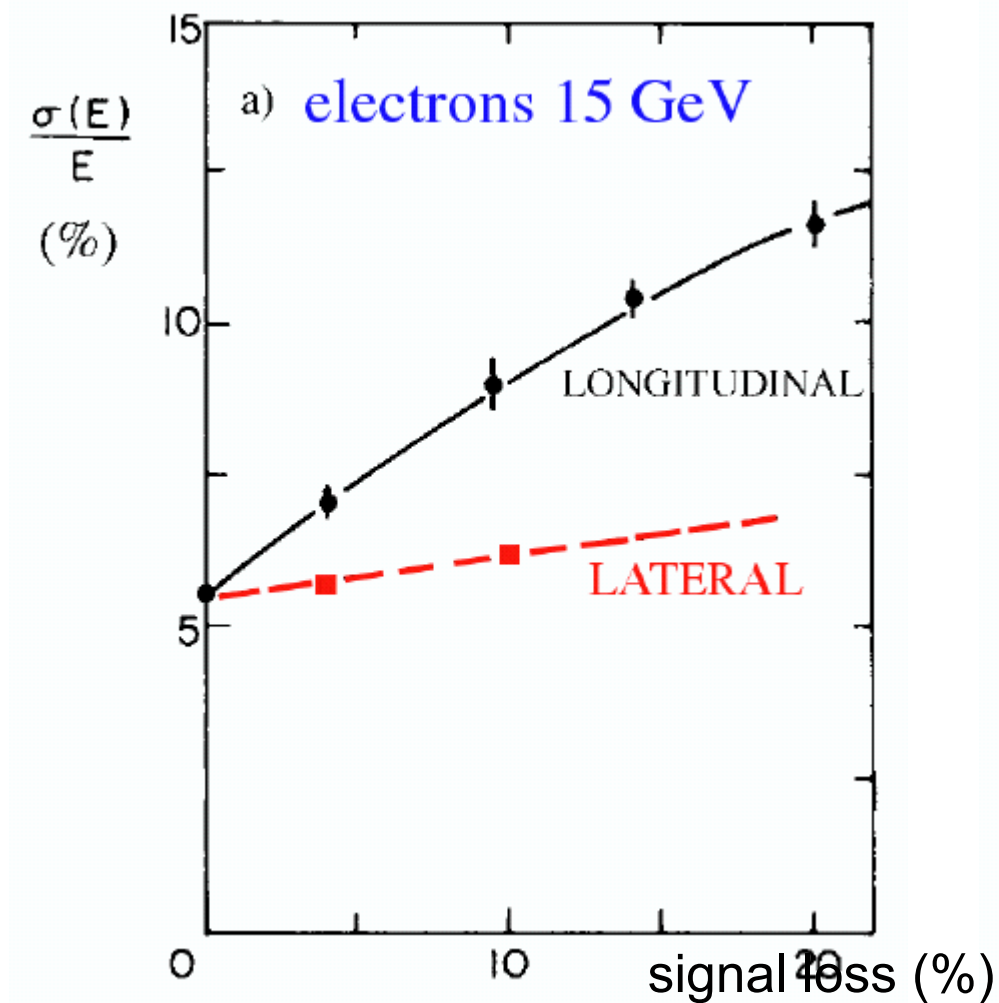
ATLAS (LARG)		$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.1}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.007$		
	10 GeV	100 GeV	1000 GeV	
Stochastique (GeV)	0.32	1	3.16	
Bruit (GeV)	0.3	0.3	0.3	
Constant (GeV)	0.07	0.7	7	
$\sigma(E)$	0.44 GeV	1.26 GeV	7.69 GeV	
$\sigma(E)/E$	4.4%	1.26 %	0.77%	

De quel terme faut-il se préoccuper?



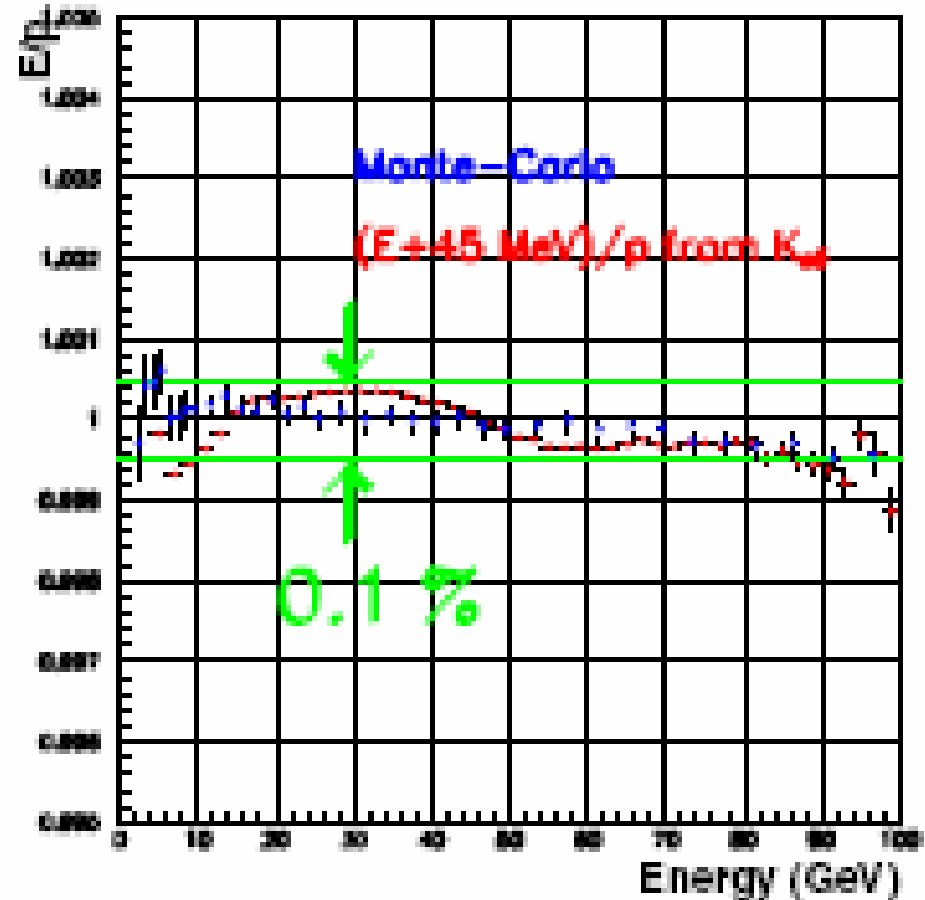
Pertes d'énergie: contribuent à la résolution

- ◆ Pertes d'énergie: latérales & longitudinales



La linéarité

- ◆ La linéarité est la capacité du détecteur à mesurer la bonne énergie.
- ◆ On aime que $E_{\text{rec}} = K E_0$ avec K une constante **indépendante** de l'énergie
- ◆ On peut définir la linéarité (ou non-linéarité) par
- ◆ $E_{\text{rec}}/E_0, E_{\text{rec}} - E_0/E_{\text{rec}}, \dots$
- ◆ Comment obtenir E_0 in situ???



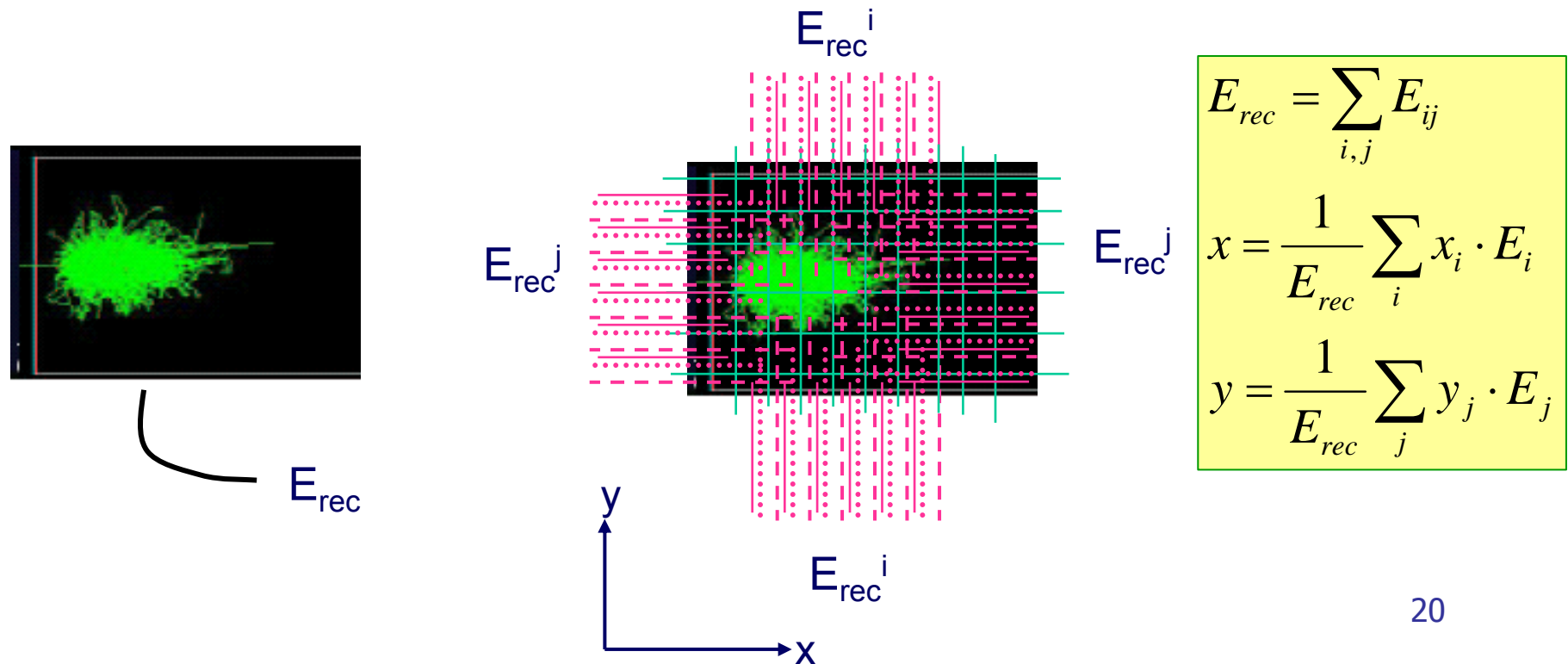
NA48: E_0 est ici donnée par l'impulsion mesurée dans le détecteur de traces¹⁹

Résolution en position et séparation spatiale

◆ Il est nécessaire

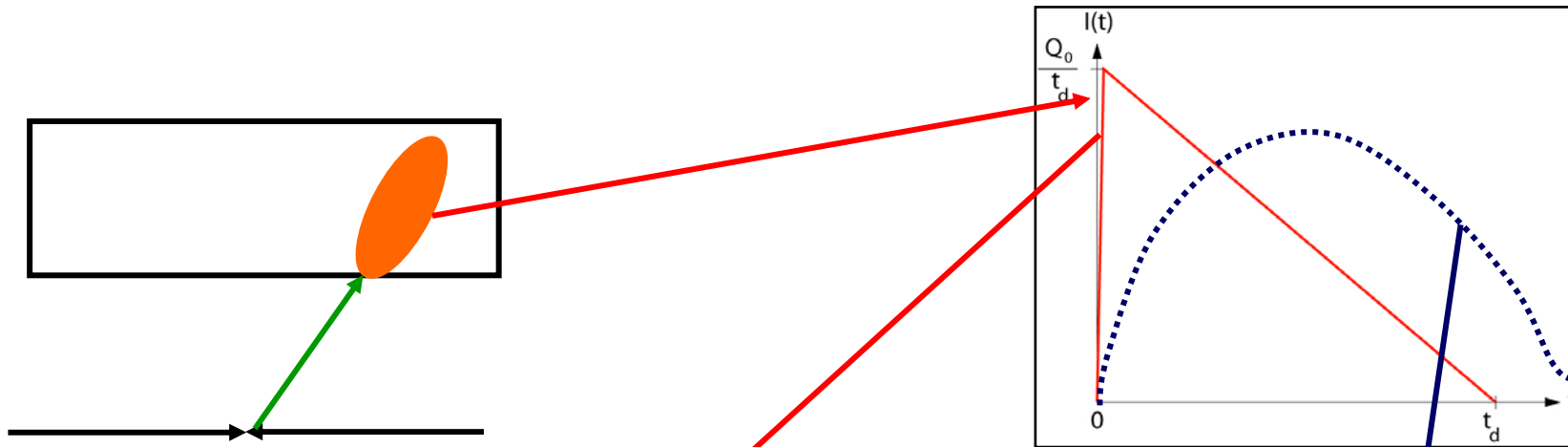
- ◆ de reconstruire la position de la gerbe
- ◆ de pouvoir séparer deux gerbes proches

◆ On segmente donc le détecteur pour ne pas tout mesurer d'un coup



Résolution en temps

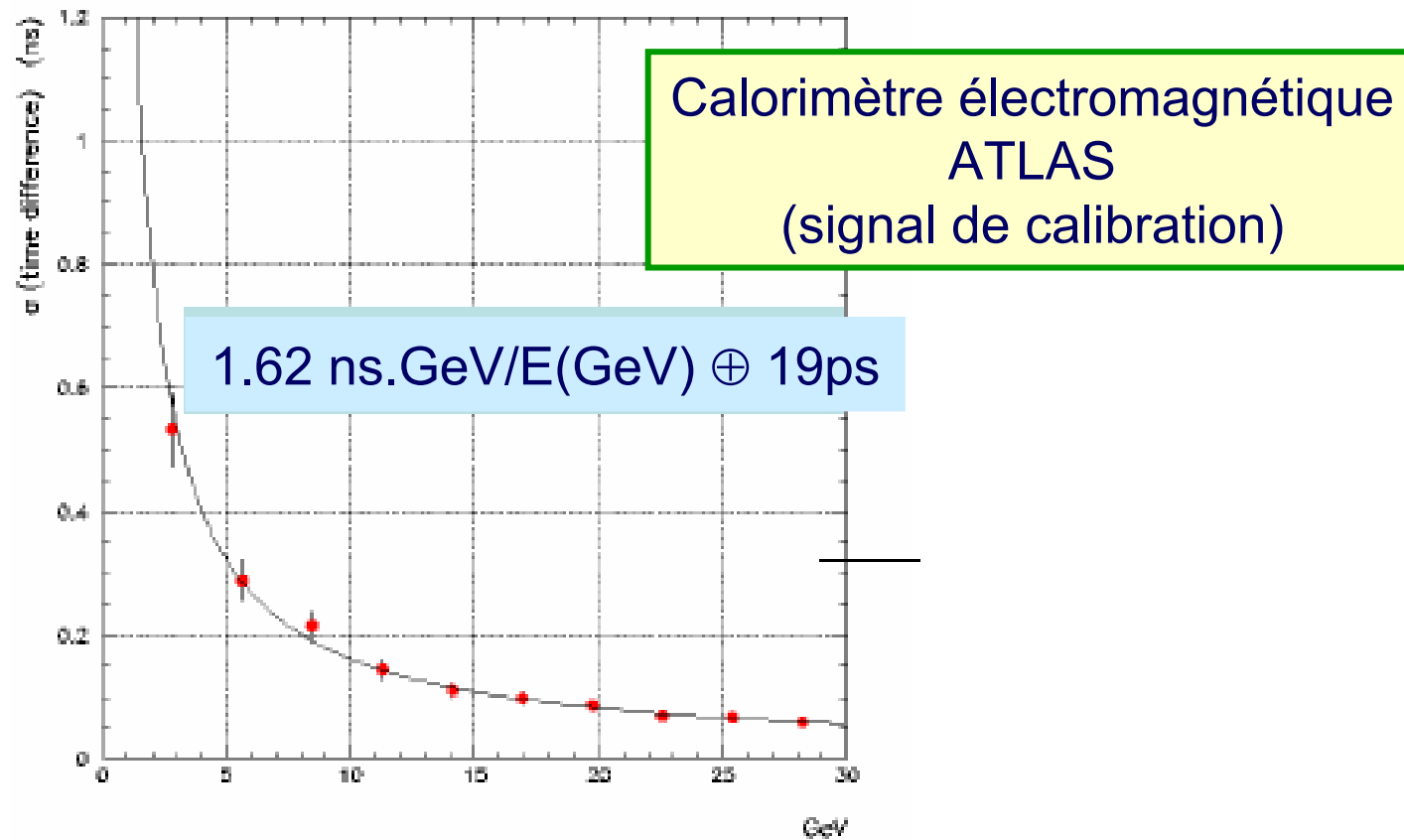
- ◆ La forme du signal détecté, en fonction du temps, permet de reconstruire le temps d'arrivée de la particule incidente



Temps de montée di signal très rapide ($\sim 1\text{ns}$)
→ Bonne détermination du temps de passage de la particule

Temps de montée di signal lent
→ temps de passage de la particule mal défini

Résolution en temps



La résolution en temps s'améliore avec l'énergie

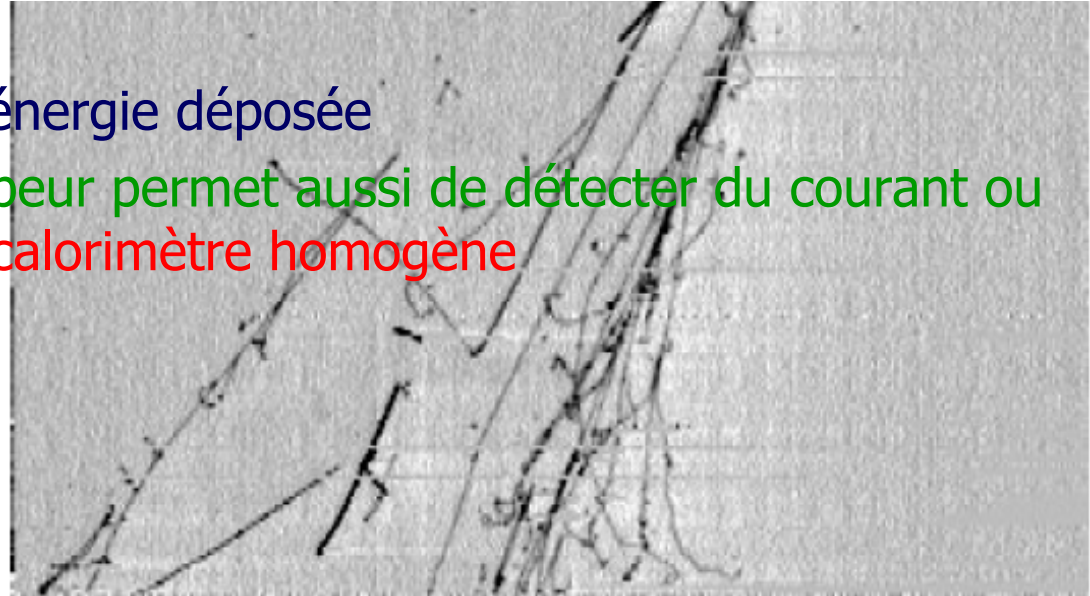
Les calorimètres

Calorimétrie: les paramètres importants

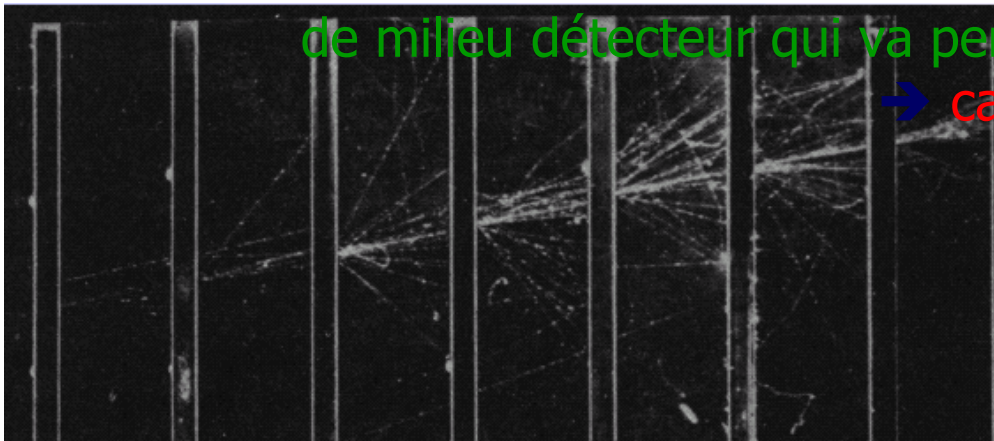
- ◆ Lors de la conception de calorimètre, il faut prendre en compte tous ces paramètres importants pour reconstruire les événements de physique.
- ◆ Les techniques de détection ont chacune des avantages et des inconvénients qui déterminent les performances
- ◆ Ont été oubliés:
 - ◆ Les effets dus aux radiations
 - ◆
- ◆ Dans les transparents suivants, plusieurs techniques sont décrites ainsi que les performances associées.
 - ◆ Les performances ne dépendent pas que du calorimètre lui-même mais aussi de l'électronique associée et des procédures de reconstruction du signal

Mesure du signal: calorimètres homogènes et à échantillonnage

- ◇ Il faut extraire cette énergie déposée
 - ◇ si le milieu absorbeur permet aussi de détecter du courant ou de la lumière → calorimètre homogène



- ◇ si le milieu absorbeur est aveugle, il faut intercaler des bandes de milieu détecteur qui va permettre d'échantillonner le signal → calorimètre à échantillonnage

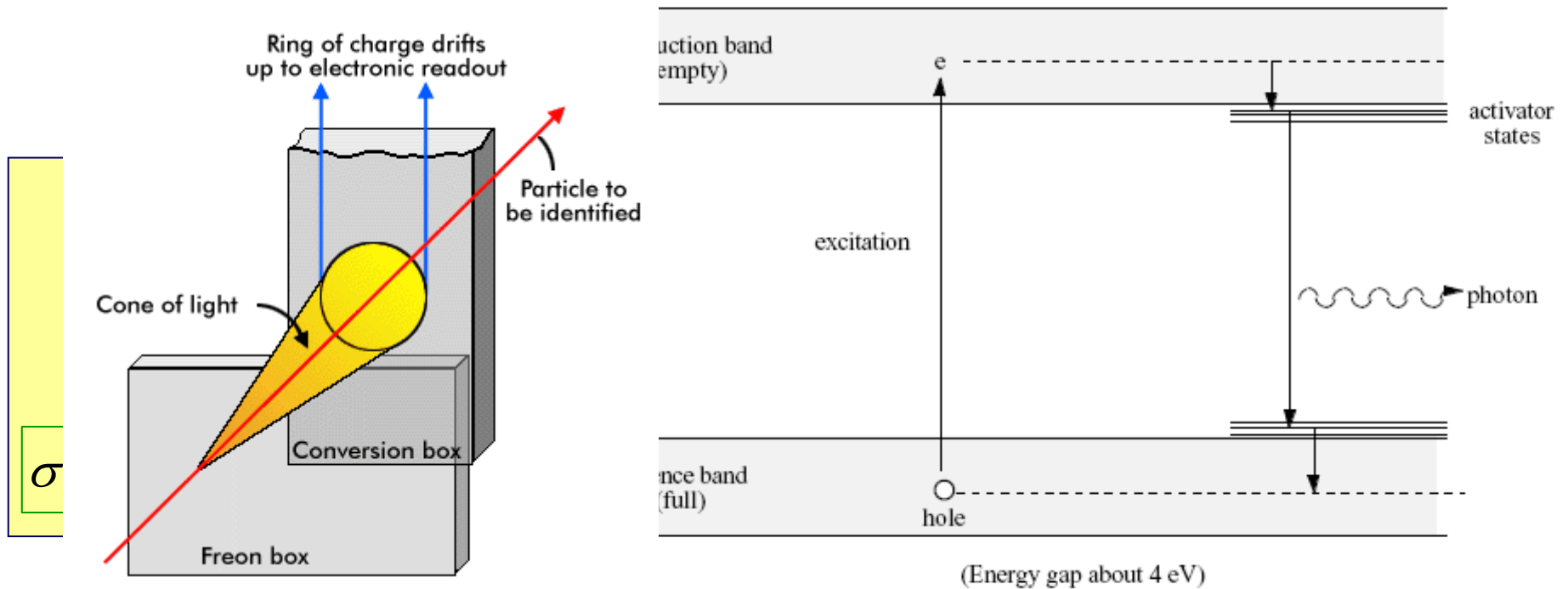


Les calorimètres homogènes

Calorimètres homogènes

- ◇ Il existe plusieurs familles de calorimètres homogènes:
 - ◇ les cristaux (OPAL, CMS, kTeV, Babar)
 - ◇ les liquides nobles (NA48, ICARUS)
 - ◇ l'eau (Super-Kamiokande)
- ◇ Il existe des calorimètres homogènes naturels
 - ◇ l'atmosphère (HESS, EUSO)
- ◇ Les processus de détection varient:
 - ◇ semi-conducteurs → cours de Laurence
 - ◇ scintillation (désexcitation des atomes) pour les cristaux
 - ◇ lumière Čerenkov pour les cristaux
 - ◇ collection du courant (des charges) d'ionisation pour les calorimètres à liquide noble

Calorimètres à cristaux: bonne résolution intrinsèque



Résolution finale avec toutes les contributions

$$\sigma / E \sim (1 \div 3)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

$$\sigma / E \sim (10 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Cristaux inorganiques à lumière scintillante

- ◆ Les cristaux *inorganiques* sont utilisés pour les calorimètres homogènes:

	NaI (TI)	CsI (TI)	CsI	BGO	PBW0 ₄
Density (g/cm ³)	3.67	4.51	4.51	7.13	8.28
X ₀ (cm)	2.59	1.85	1.85	1.12	0.89
R _M (cm)	4.8	3.5	3.5	2.33	2.2
Emission peak (nm)	410	560	420 310	480	440
Decay time (ns)	230	940	6	60	5
fast and slow			35	300	15
Light yield γ / MeV	4 10 ⁴	5 10 ⁴	4 10 ⁴	8 10 ³	1.5 10 ²
Yield in pe (relative to NaI)	100	45	5.6 2.3	9	1.3
Rad. hardness (Gy)	1	10	10 ³	1	10 ⁵

Cristaux inorganiques à lumière scintillante

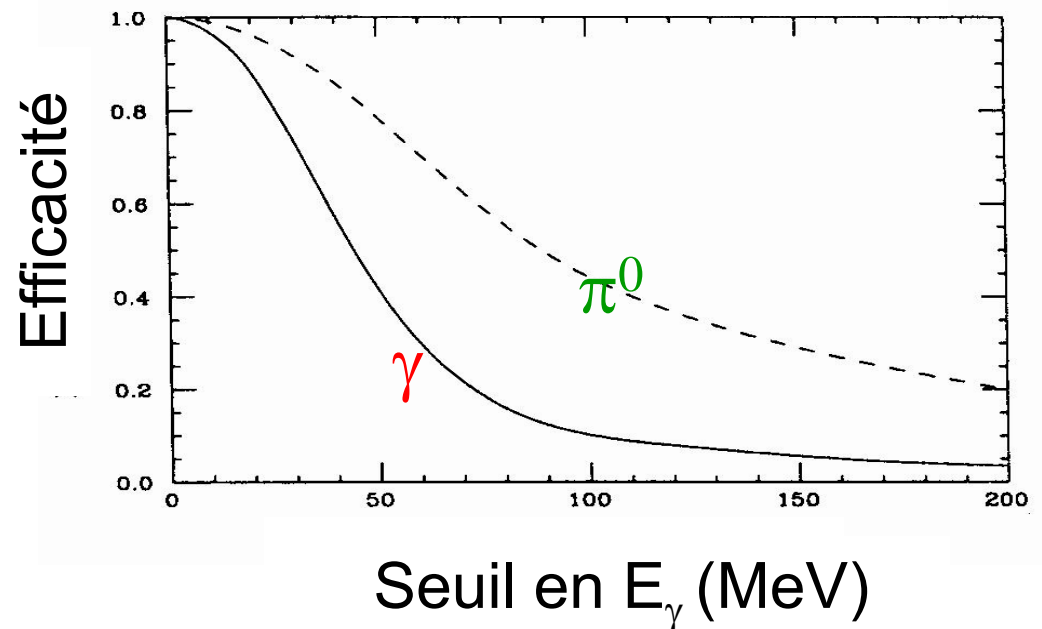
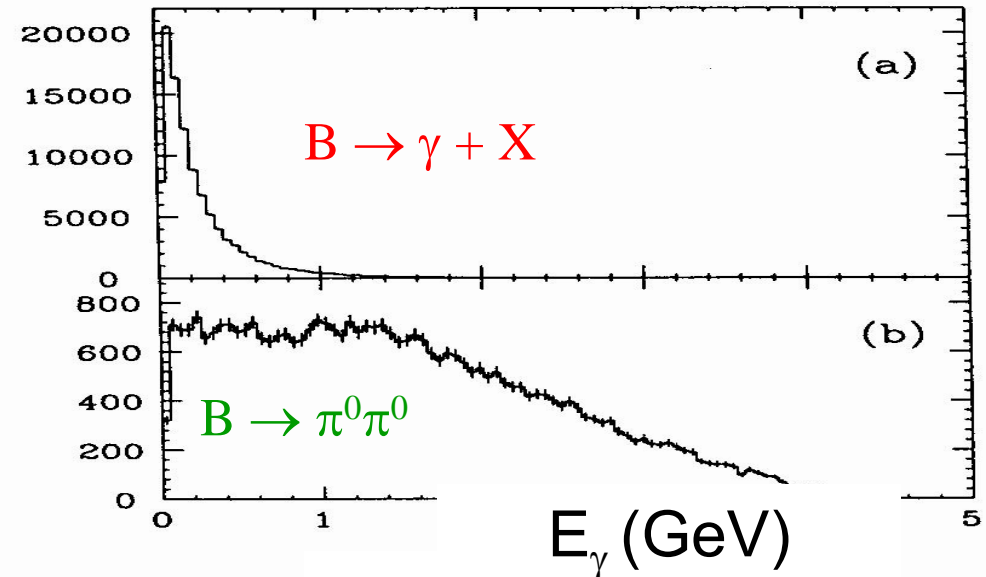
- ◆ Les performances recherchées diffèrent selon la physique étudiée:
 - ◆ **NaI** a longtemps été utilisé (bon marché, bcp de lumière émise, longueur d'onde bien adaptée aux photocathodes des photomultiplicateurs classiques); mais
 - ◆ faible densité, hygroscopique
 - ◆ **CsI** utilisé par Belle, Babar, KTeV
 - ◆ dense, bcp de lumière émise, ne supporte pas les radiations
 - ◆ **BGO** utilisé par L3
 - ◆ dense, lent, ne supporte pas les radiations
 - ◆ **PBWO₄** utilisé par CMS
 - ◆ Dense, rapide, tenue aux radiations, pas bcp de lumière
- ◆ Chaque expérience a ses contraintes: il faut choisir le bon matériau

L'expérience Babar

◆ Reconstruire les photons et π^0 de basse énergie avec une très bonne efficacité et résolution

◆ Le choix: CsI(Tl)

- ◆ excellente résolution
- ◆ gde production de lumière
- ◆ bas bruit
- ◆ gde efficacité

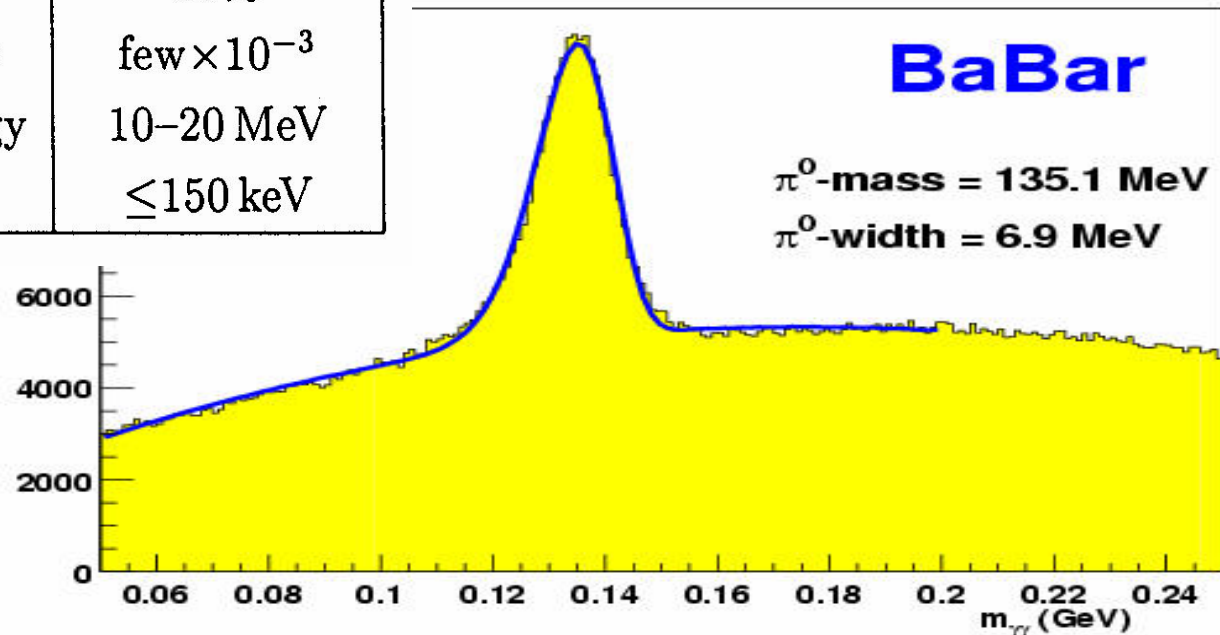


L'expérience Babar

Parameter	BABAR Design Performance
$\frac{\sigma_E}{E}$ (Stochastic Term) at 90°	1% / $\sqrt[4]{E}$
$\frac{\sigma_E}{E}$ (Constant Term) at 90°	1.2%
σ_θ at 1 GeV at 90°	5 mr
Efficiency at 20 MeV at 90°	85%
Efficiency at 100 MeV at 90°	95%
π/e Rejection at 500 MeV/c	$\text{few} \times 10^{-3}$
Minimum Detectable Energy	10–20 MeV
Electronic Noise/Crystal	≤ 150 keV

Seuil en E_γ de 30 MeV

$$m(\pi^0) E_{\gamma\gamma} > 300 \text{ MeV}$$



Les cristaux de CMS

- ◆ Motivations:
 - ◆ Résolution en énergie excellente
 - ◆ $X_0 = 0.89\text{cm} \rightarrow$ Calorimètre compact (longueur du cristal 23cm pour $26 X_0$)
 - ◆ $R_M = 2.2\text{ cm} \rightarrow$ gerbe très compacte
 - ◆ Emission de lumière très rapide (80% de la lumière en moins de 15ns)
 - ◆ Résistant aux radiations (10^5Gy)
- ◆ Emission de lumière faible:
 - ◆ $150\ \gamma/\text{MeV}$

26 X₀ - plus dense que le plomb



Tonneau: 230x22x22 mm³ (quasi-projective)
80% de la gerbe est contenue dans un cristal

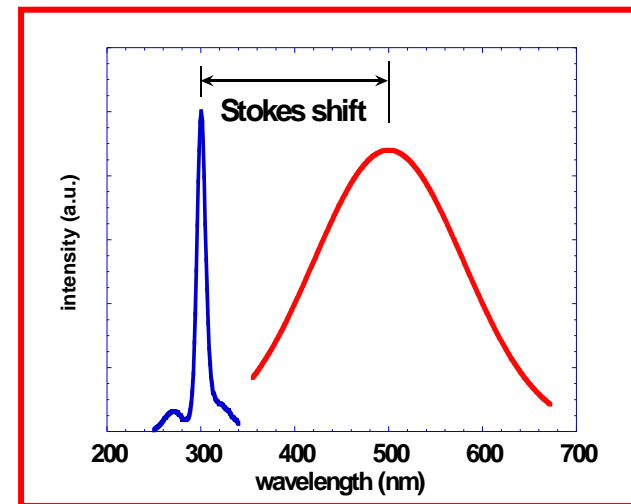
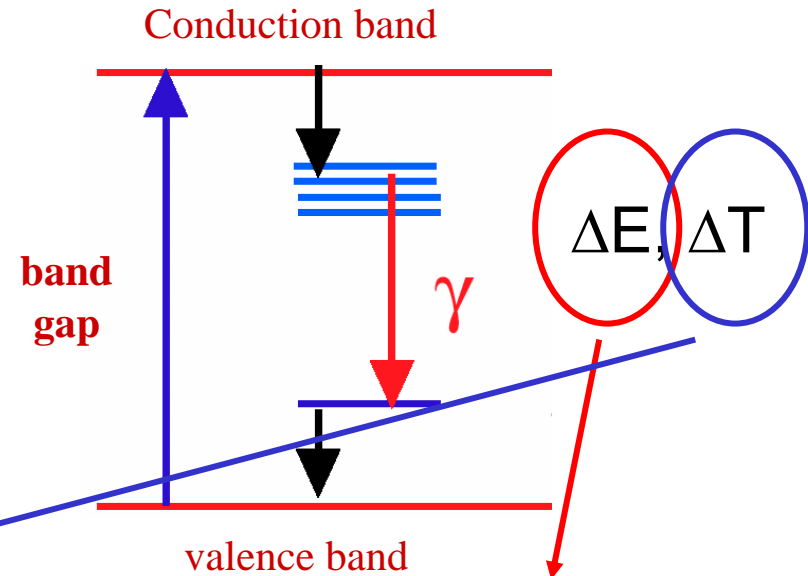
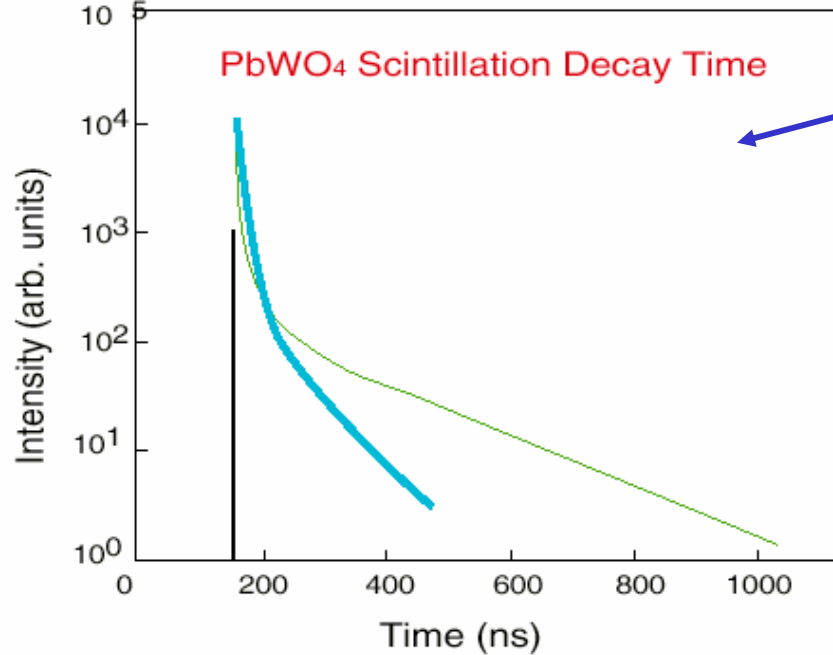
CMS electromagnetic calorimeter: fast

Composante lente vient des défauts et des impuretés

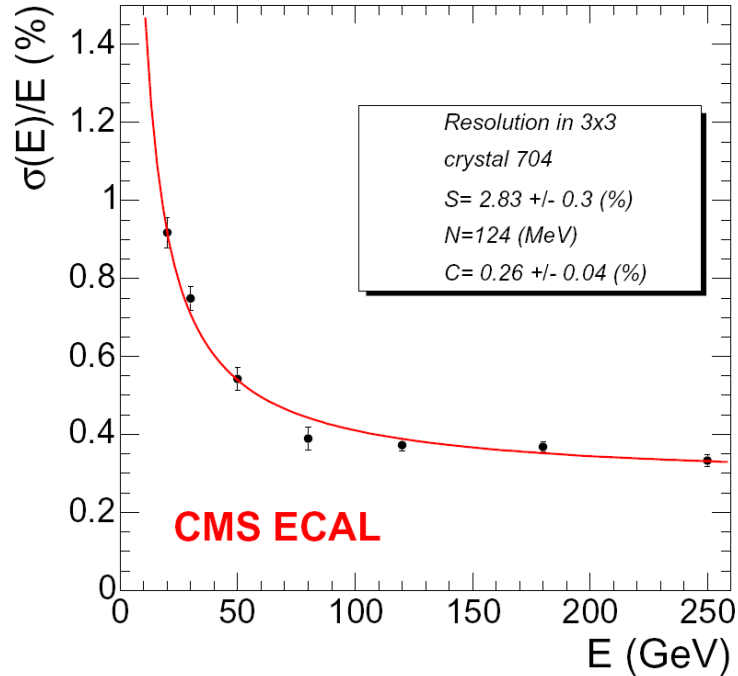
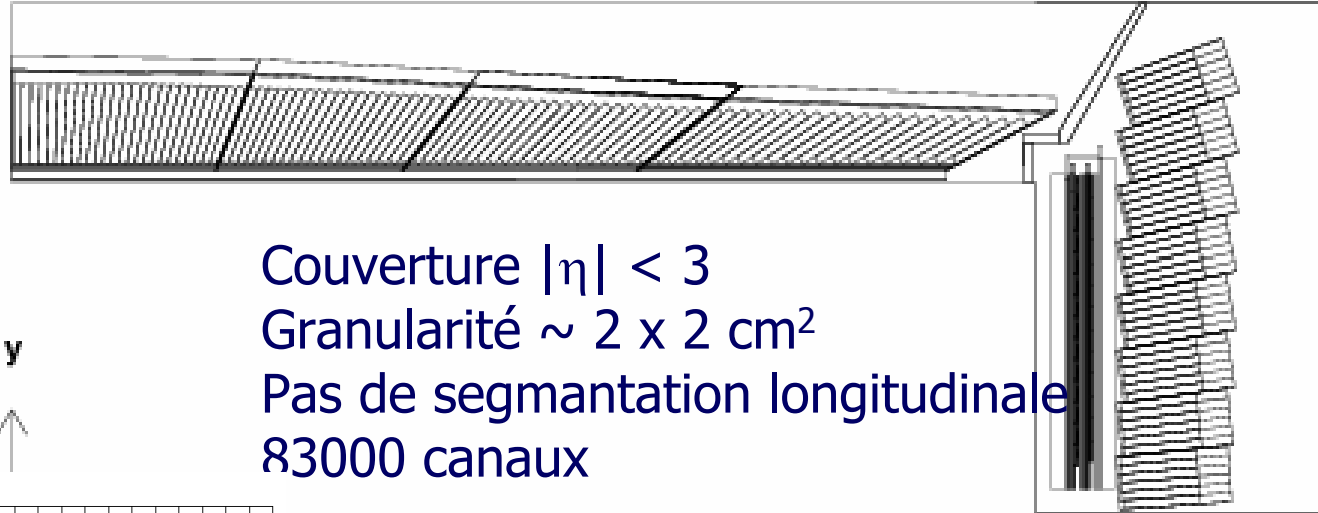
Photoelectrons

Pour les cristaux de bonne qualité, 80% de la lumière est émise en 25 ns.

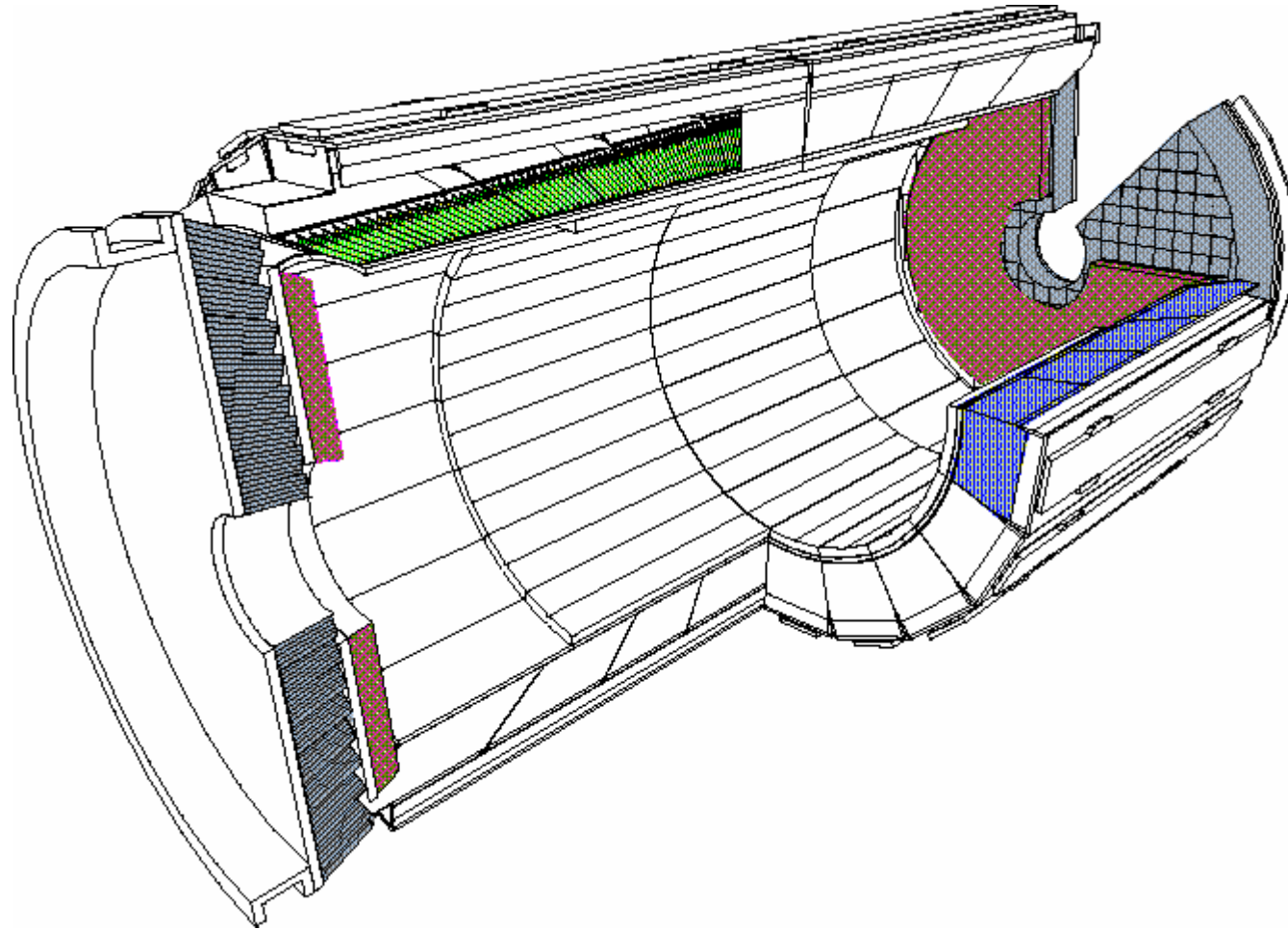
Scintillation light



Le calorimètre de CMS

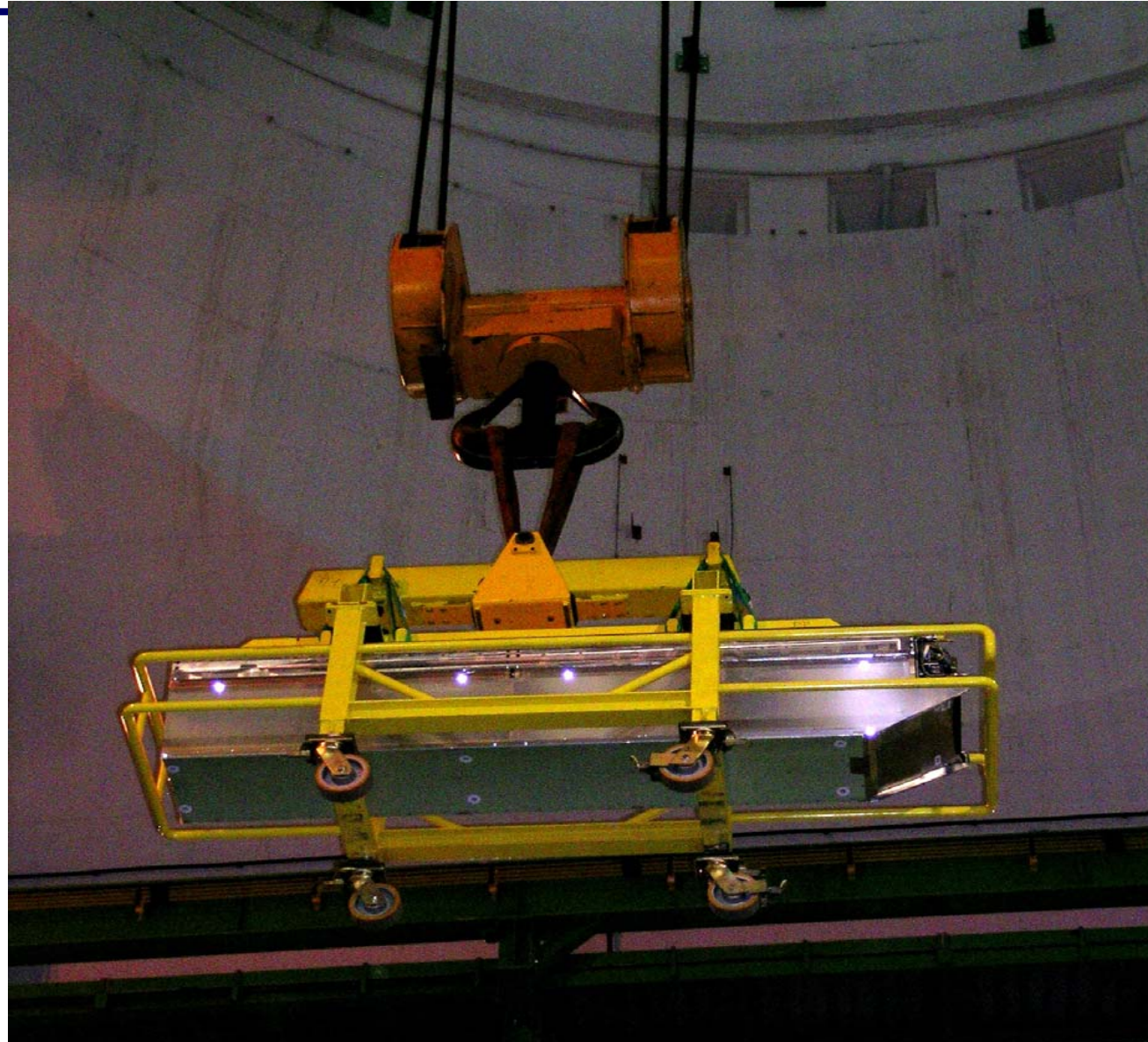


Le détecteur CMS





Lowering into UX5:



04/06/2007

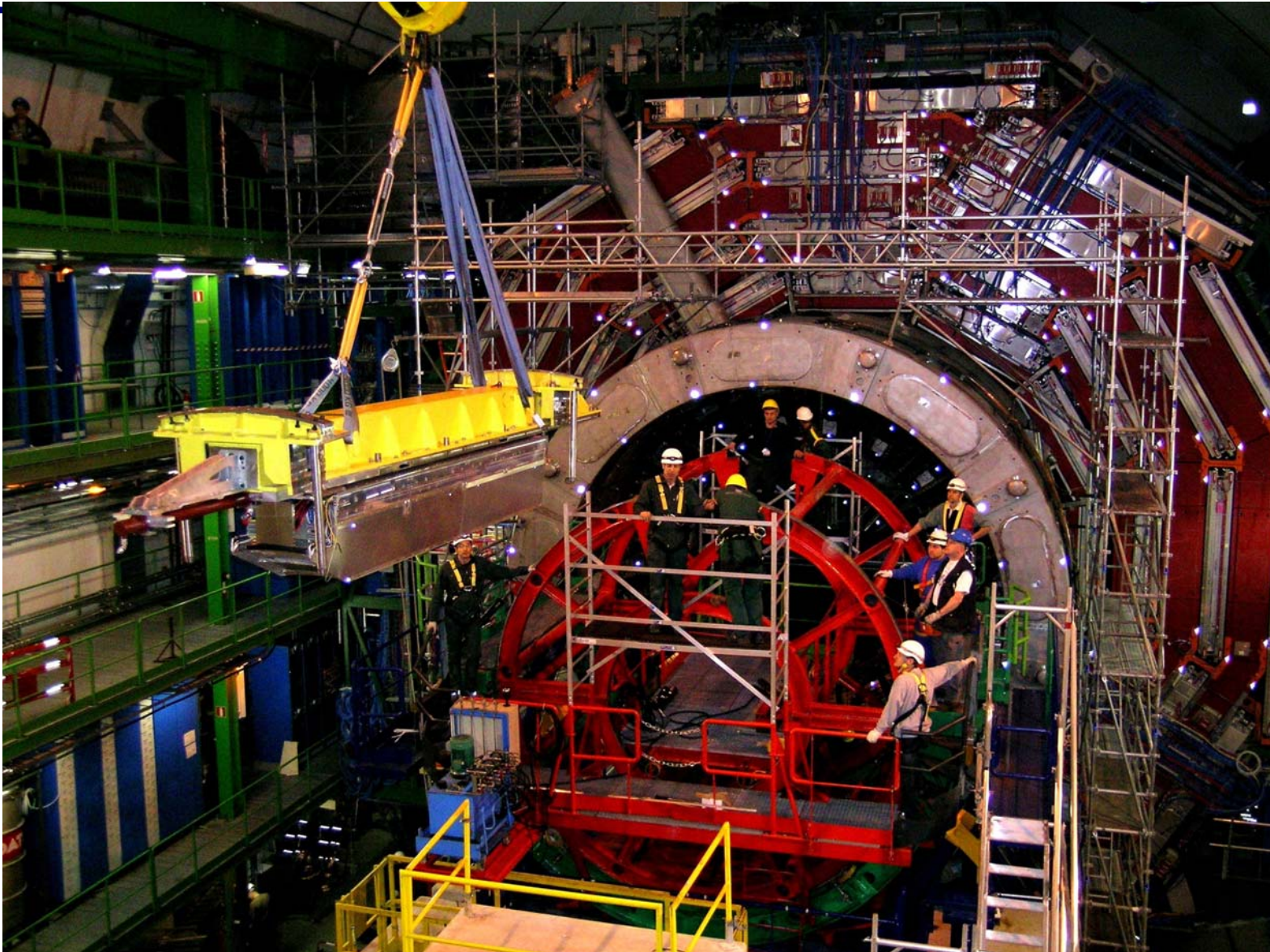
Wolfgang Funk - CERN CMS

38

3



Approaching Enfourneur:

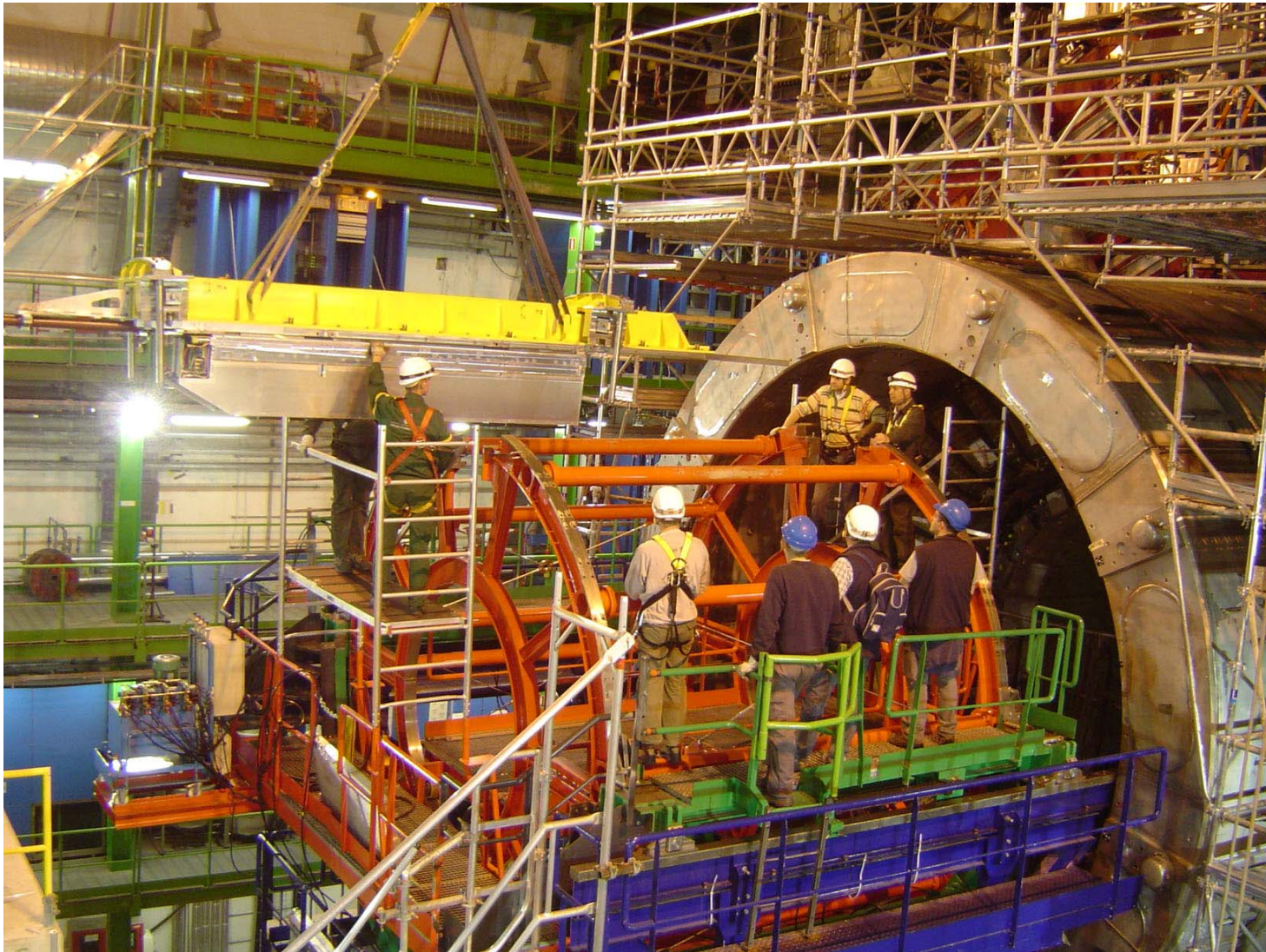


04/06/2007

Wolfgang Funk - CERN CMS



Approaching Enfourneur (2):



40



First SM inserted:



41



Second SM inserted:

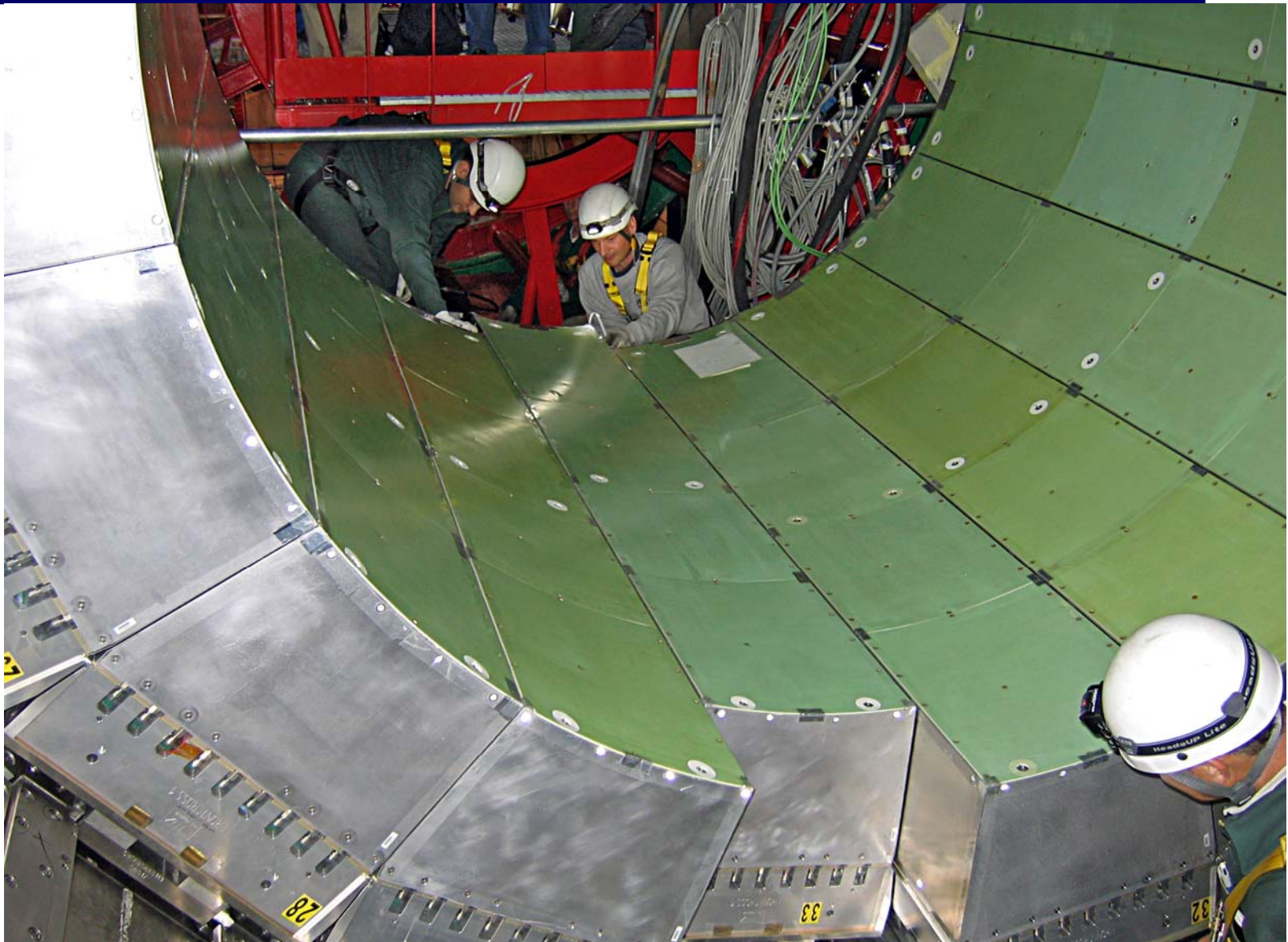


04/06/2007

Wolfgang Funk - CERN CMS



Last SM inserted:



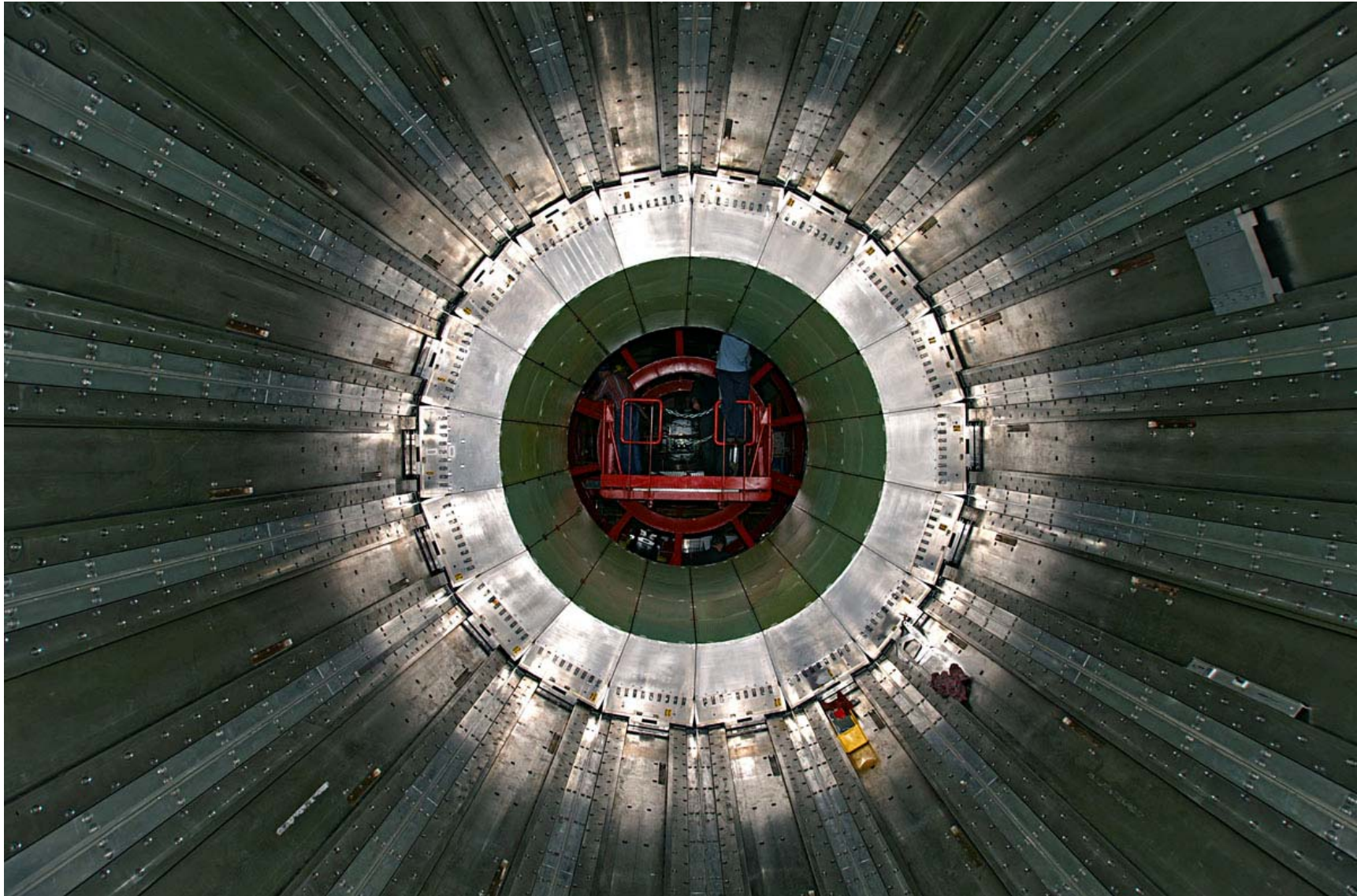
04/06/2007

Wolfgang Funk - CERN CMS

8

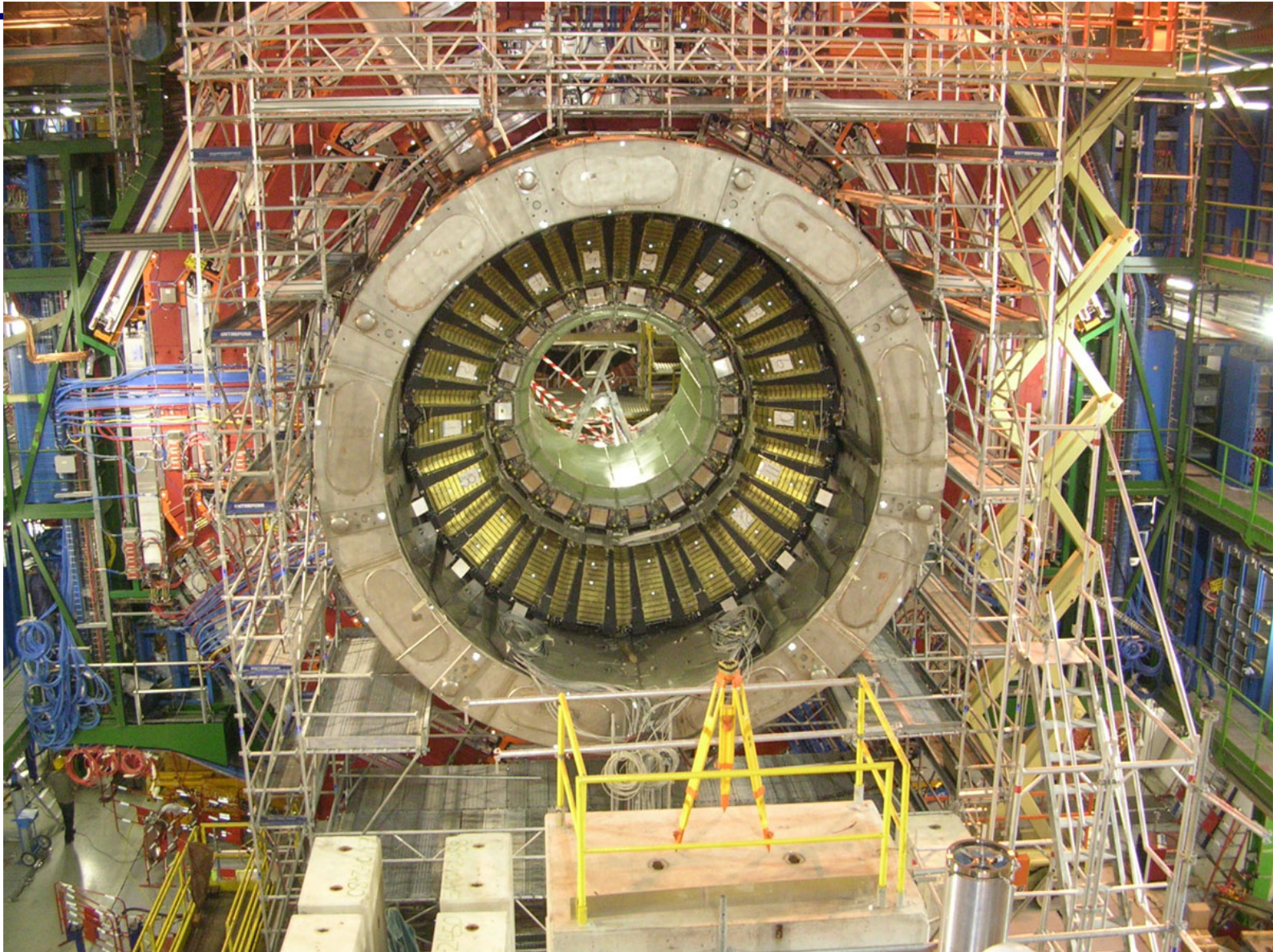


The full Beauty (1):





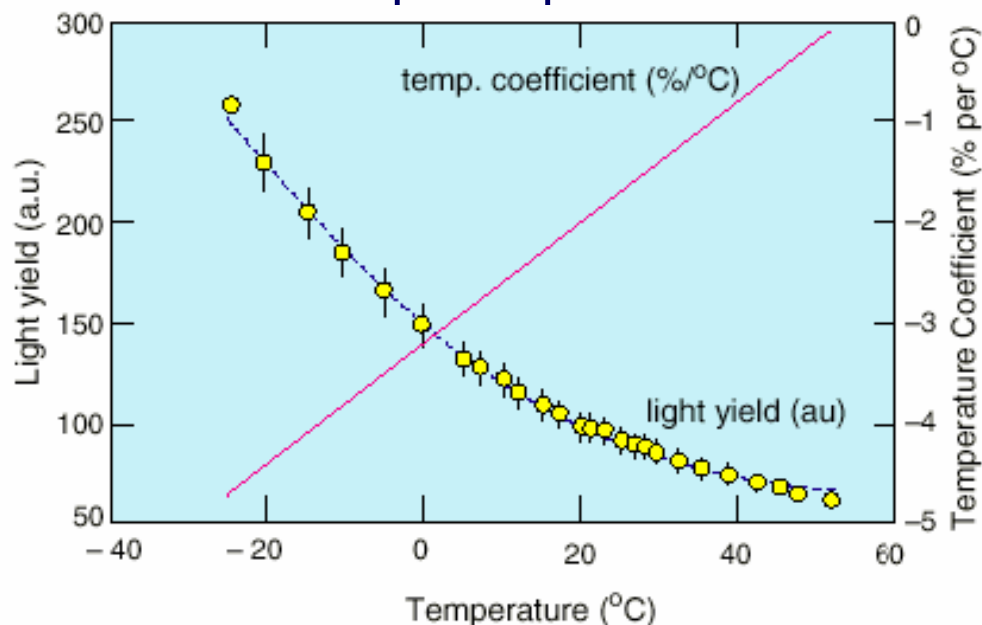
The full Beauty (2):



Cristaux de CMS: les difficultés

- ◆ Obtenir des cristaux **uniformes** → terme constant dans la résolution
- ◆ Collection de lumière le long du cristal: doit être **uniforme**
- ◆ Effets des radiations affectent la **transparence** des cristaux (=f(profondeur)) → doit être surveillée pdt la prise de données (laser)

◆ **Température**: doit être surveillée à mieux que 0.1°



Laser system is, above all, for tracking changes in crystal transparency.

This is needed ***in addition*** to physics calibration.

Essentially, you must correct for the changes in crystal transparency before doing anything else. Laser system also used to measure ratio of gains in the different MGPA gain ranges.

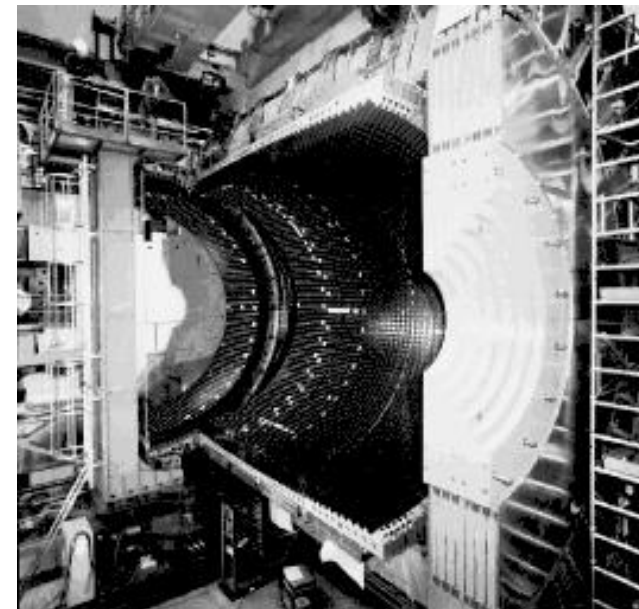
This can also be done with test-pulse system. Main purpose of test pulse system is as a check and monitor.

Also red laser (red is little affected by radiation damage and thus can be used to verify stability of electronics gain).

Cristaux à lumière Čerenkov: PbO de OPAL

- ◆ La lumière Č est produite si une particule voyage à une vitesse $v > c/n$ (c : vitesse de la lumière; n : indice de réfraction)
 - ◆ cf mur du son
 - ◆ lumière Č est émise dans un cône: $\cos \theta \sim c/vn$

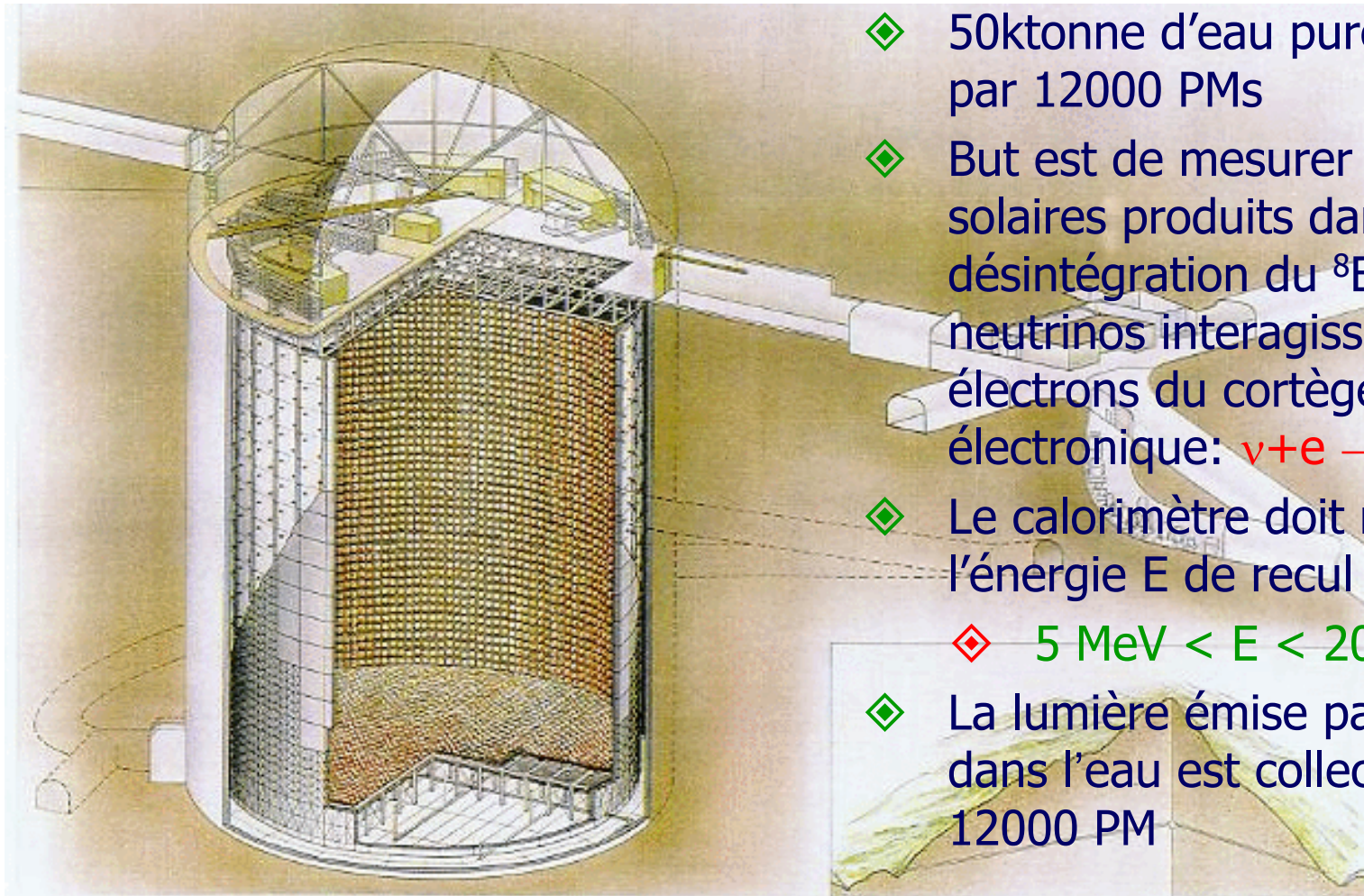
Calorimètre em de OPAL(LEP – 1989-2000):
Résolution est dominée par la photo statistique
 $\sigma(E)/E = 5\%/\sqrt{E}$



Les calorimètres à cristaux: bilan

- ◆ Très utilisés pour les mesures de précision
- ◆ Terme stochastique $\sim 1-5\%/\sqrt{E}$
- ◆ Pas de matière devant le détecteur
- ◆ Ne permettent de découper la gerbe en profondeur (**pas de segmentation longitudinale**)
- ◆ Il faut obtenir une bonne uniformité entre les cristaux pour garantir une réponse a priori uniforme du calorimètre: il est aussi possible de calibrer avec les données.

Super-Kamiokande: Čerenkov dans l'eau



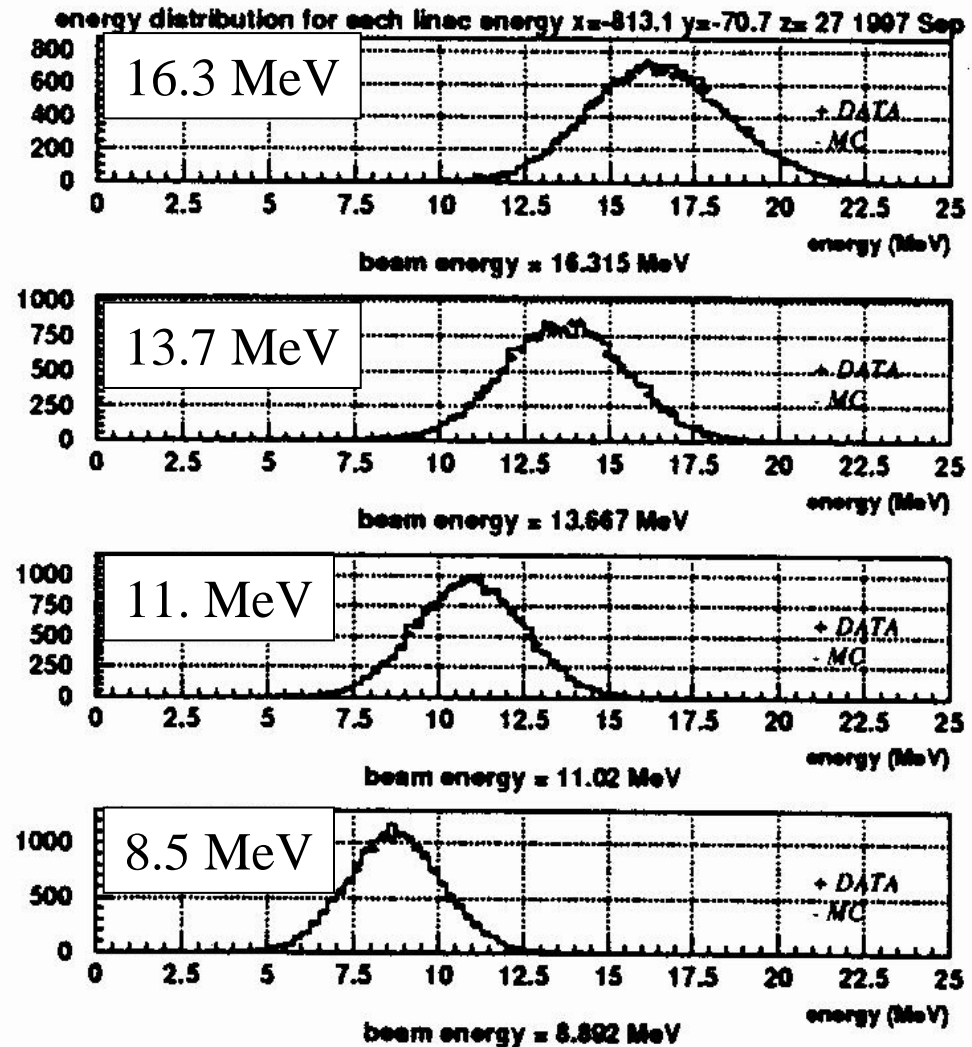
- ◆ 50ktonne d'eau pure – lecture par 12000 PMs
- ◆ But est de mesurer les neutrinos solaires produits dans la désintégration du ${}^8\text{B}$; les neutrinos interagissent avec les électrons du cortège électronique: $\nu + e \rightarrow \nu + e$
- ◆ Le calorimètre doit mesurer l'énergie E de recul de l'électron:
 - ◆ $5 \text{ MeV} < E < 20 \text{ MeV}$
- ◆ La lumière émise par effet Č dans l'eau est collectée sur les 12000 PM

Performances Super-Samiokande

◆ Mesures faites auprès d'un accélérateur à diverses énergies

◆ Uniformité de réponse en position et en temps à mieux que 0.5%

◆ 10% à 10MeV



Calorimètres à liquides nobles

◆ L'énergie libérée par les particules chargées, dans les liquides nobles (Ar, Kr, Xe) est sous forme:

- ◆ de charge : courant collecté
- ◆ de scintillation venant de la recombinaison des paires électron-ion

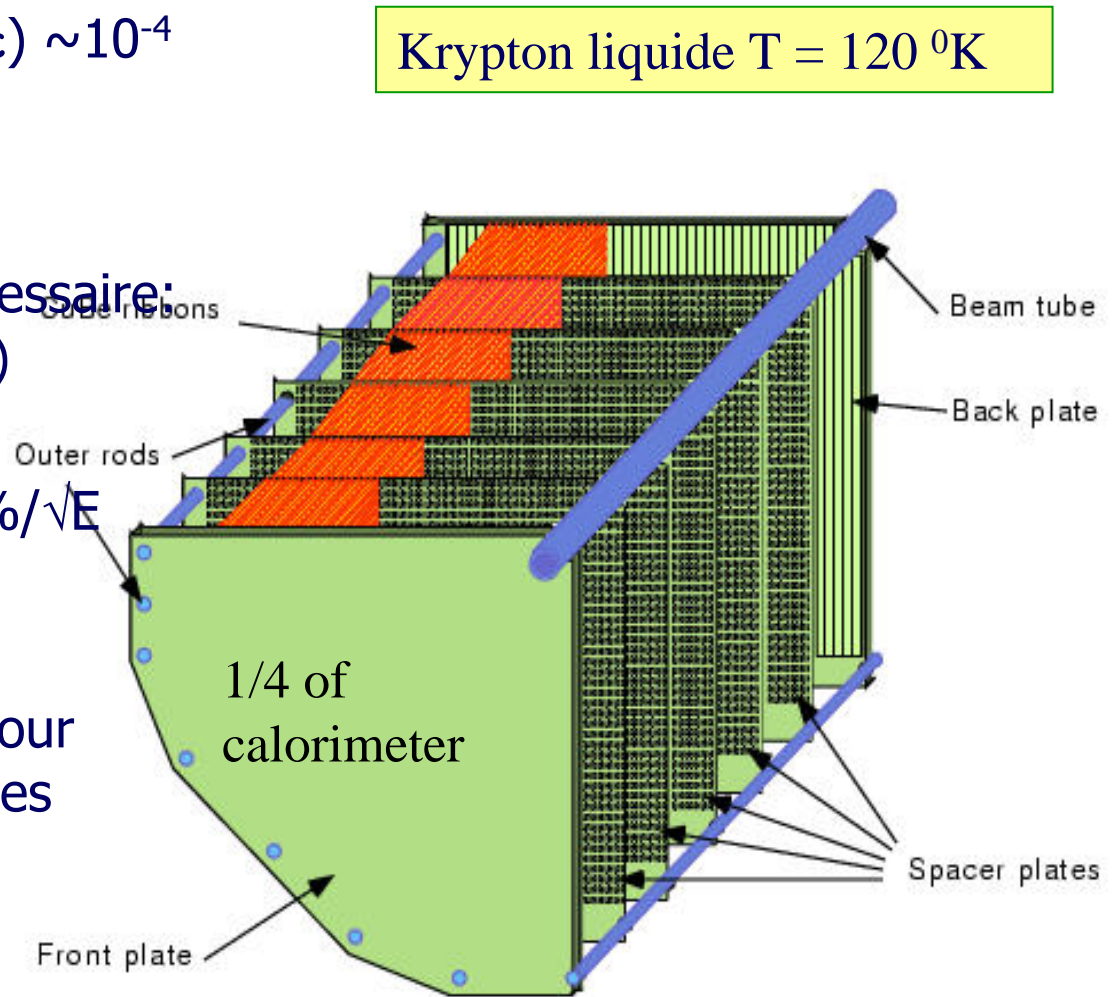
◆ La plupart des calorimètres homogènes utilisent le Krypton qui est un bon compromis entre densité et coût.

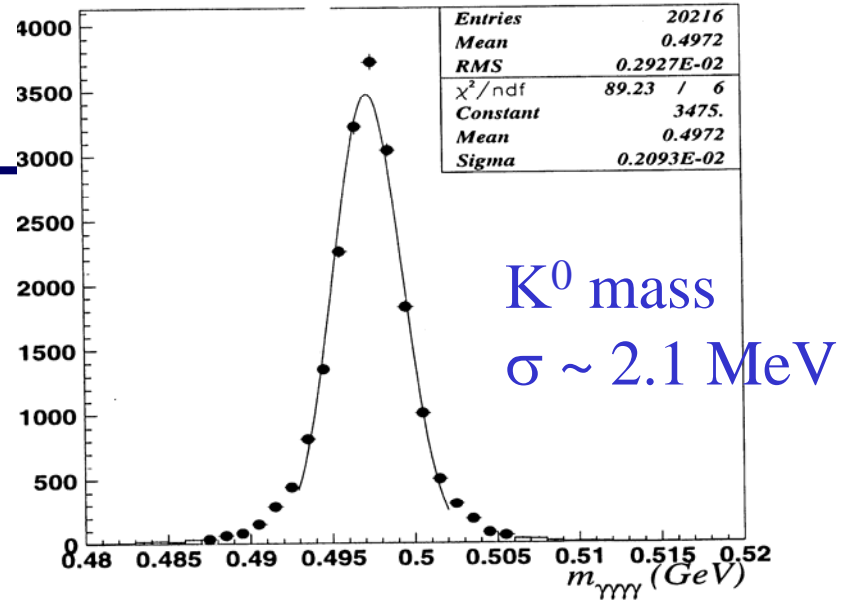
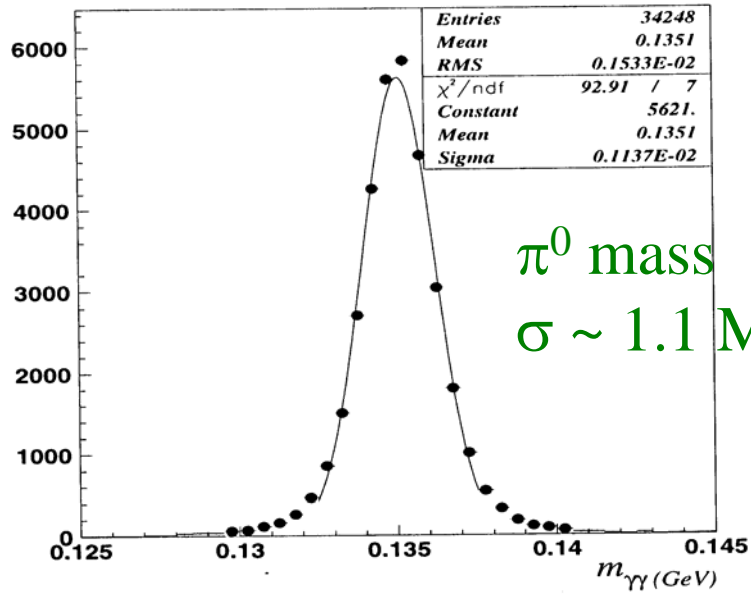
◆ Il faut un système cryogénique pour tenir l'élément liquide

	Ar	Kr	Xe
Z	18	36	58
A	40	84	131
X ₀ (cm)	14	4.7	2.77
E _C (MeV)	41.7	21.5	14.5
R _M (cm)	7.2	4.7	4.2
W (eV/pair)	23.3	20.5	15.6
v drift (mm/μs)	10	5	3

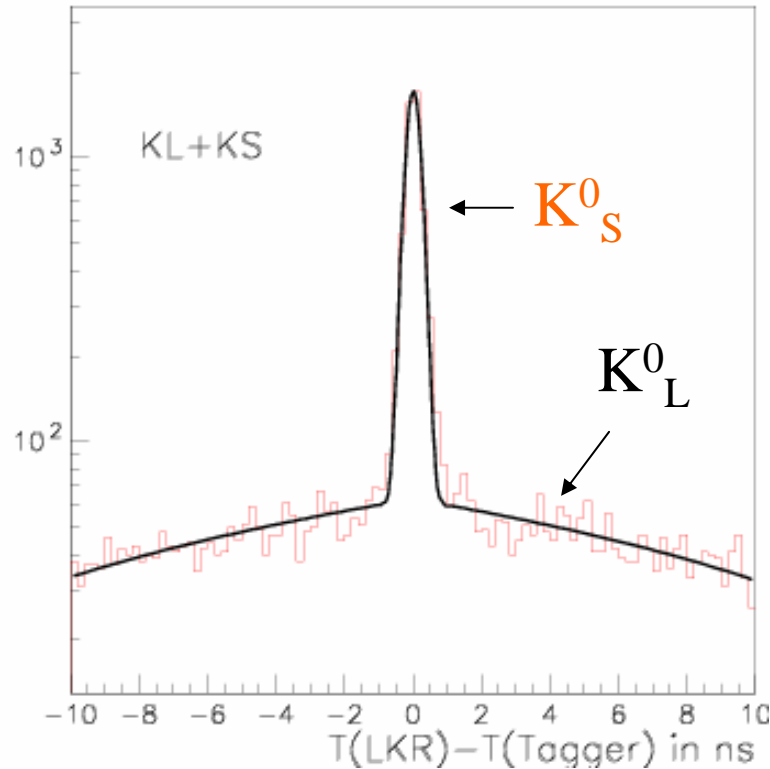
Le calorimètre à Krypton liquide de NA48

- ◆ NA48 a mesuré le $\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) \sim 10^{-4}$ en identifiant les modes $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$ et $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$
- ◆ Résolution sur $m(\pi^0)$ nécessaire: 1MeV ($m(\pi^0) = 135\text{MeV}$)
- ◆ Résolution en énergie $5\%/\sqrt{E}$
- ◆ Bain de LKr instrumenté d'électrodes en zig-zag pour collecter toutes les charges





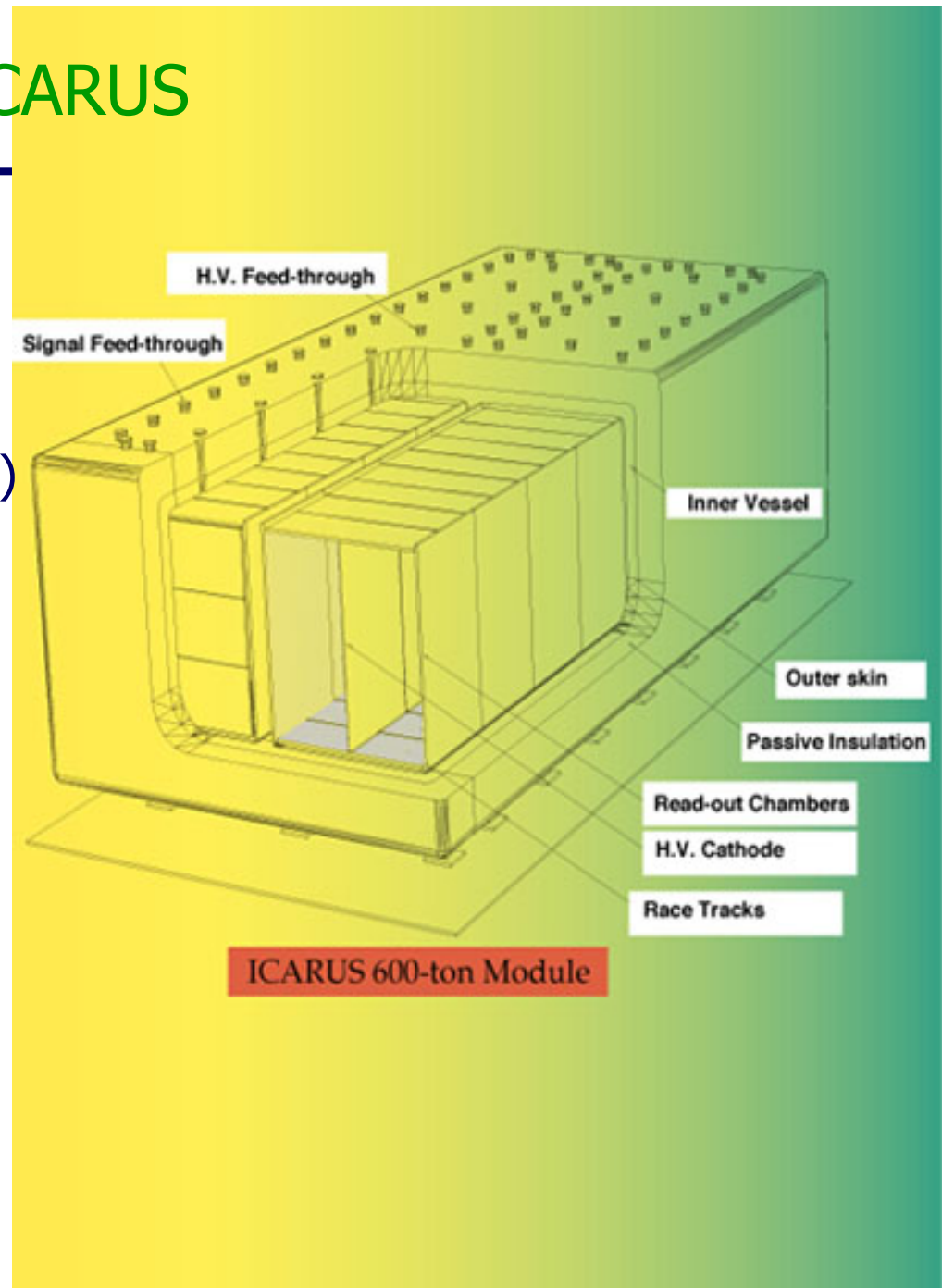
NA48



Calorimeter
 time resolution
 $\sigma \sim 220$ ps

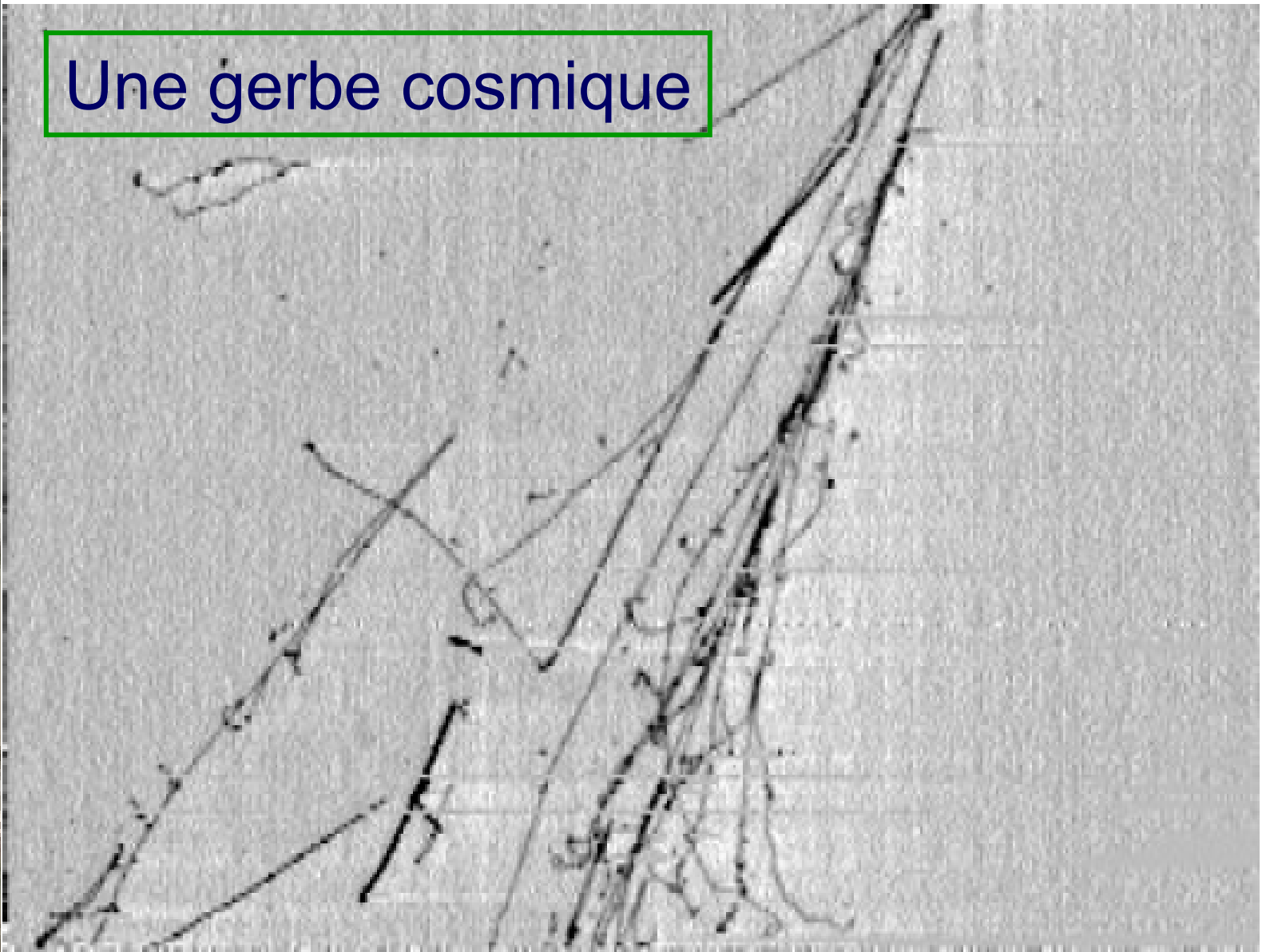
ICARUS

- ◆ Cette expérience a été conçue pour détecter les interactions de neutrinos (atmosphériques et solaires) et mesurer la durée de vie du proton ($>10^{32}$ années)
- ◆ Bain d'Argon liquide + électrodes (1kV/cm)
- ◆ Dans le tunnel du Gran Sasso (Italie)



Le 600t ICARUS

Une gerbe cosmique

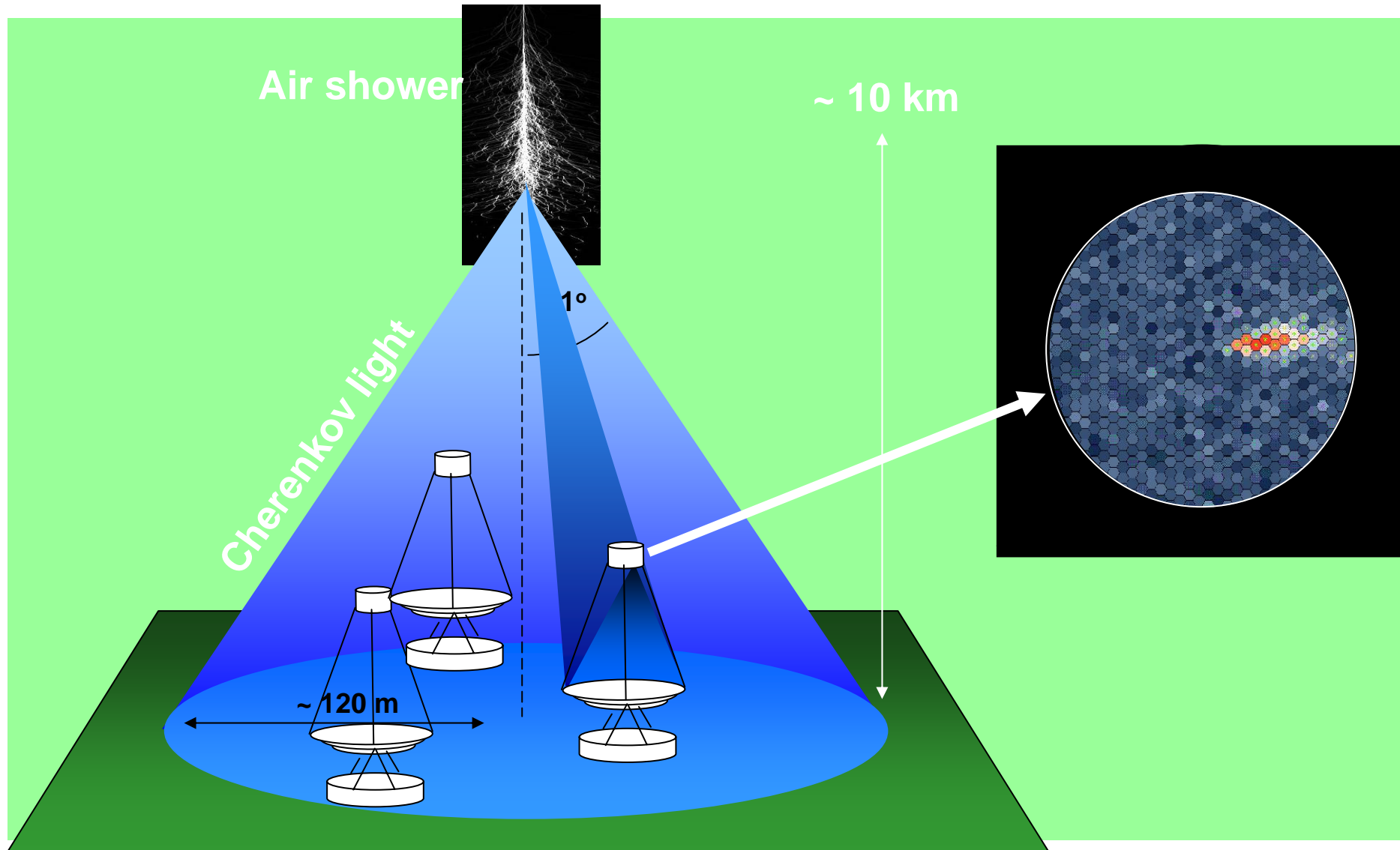


Calorimètre naturel

- ◆ Les détecteurs pour l'étude de phénomènes cosmologiques et atmosphériques utilisent l'atmosphère comme calorimètre
- ◆ Détecteurs au sol: Auger, HESS, Cangaroo,...
- ◆ Effort récent pour mesurer la direction de la gerbe et ainsi reconstruire la position de la source émettrice.

Calorimètre homogène à air: H_{igh} E_{nergy} $S_{tereoscopic}$ S_{ystem} : le principe

Gamma
ray



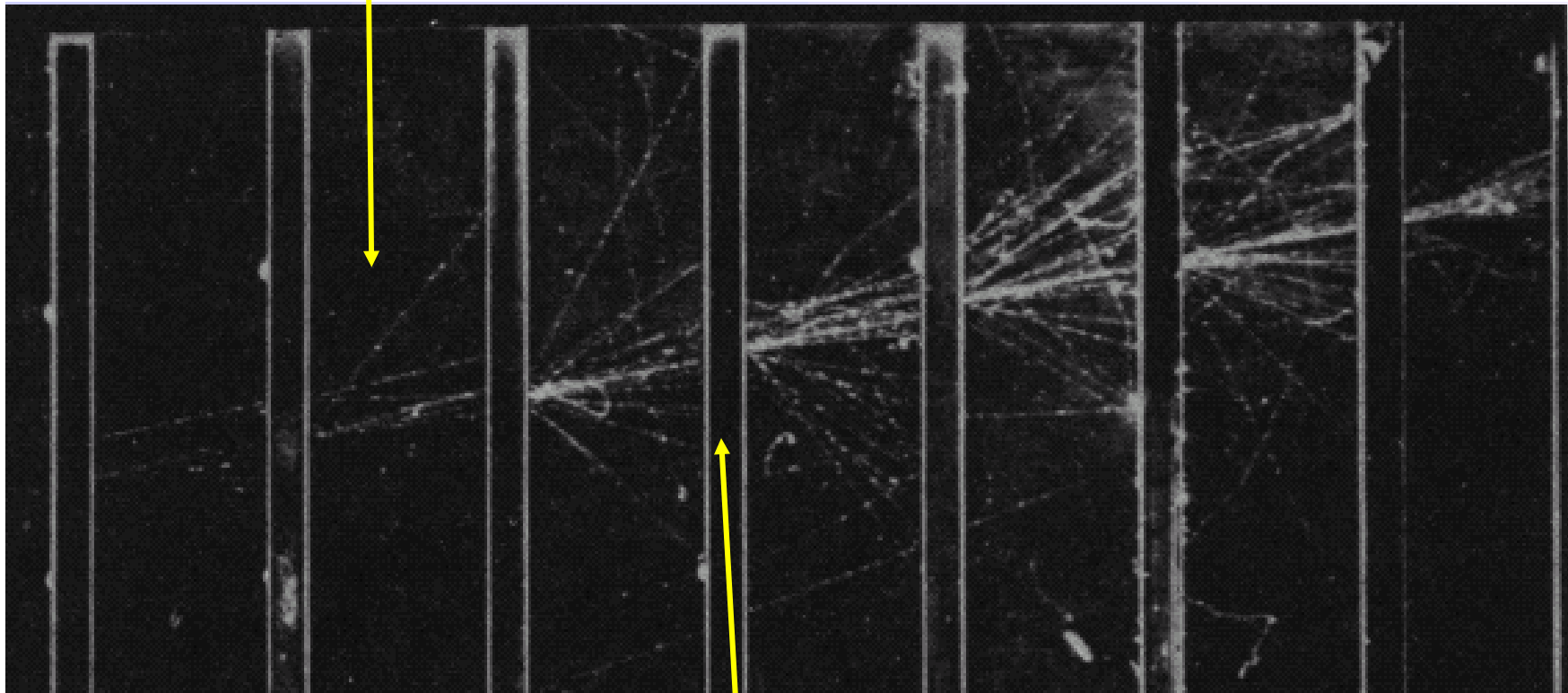
Calorimètre homogène à air: H_{igh} E_{nergy} $S_{\text{tereoscopic}}$ S_{ystem}
En Namibie



Les calorimètres à échantillonnage

Les calorimètres à échantillonnage

Milieu détecteur



Milieu absorbeur

Les calorimètres à échantillonnage: fluctuations

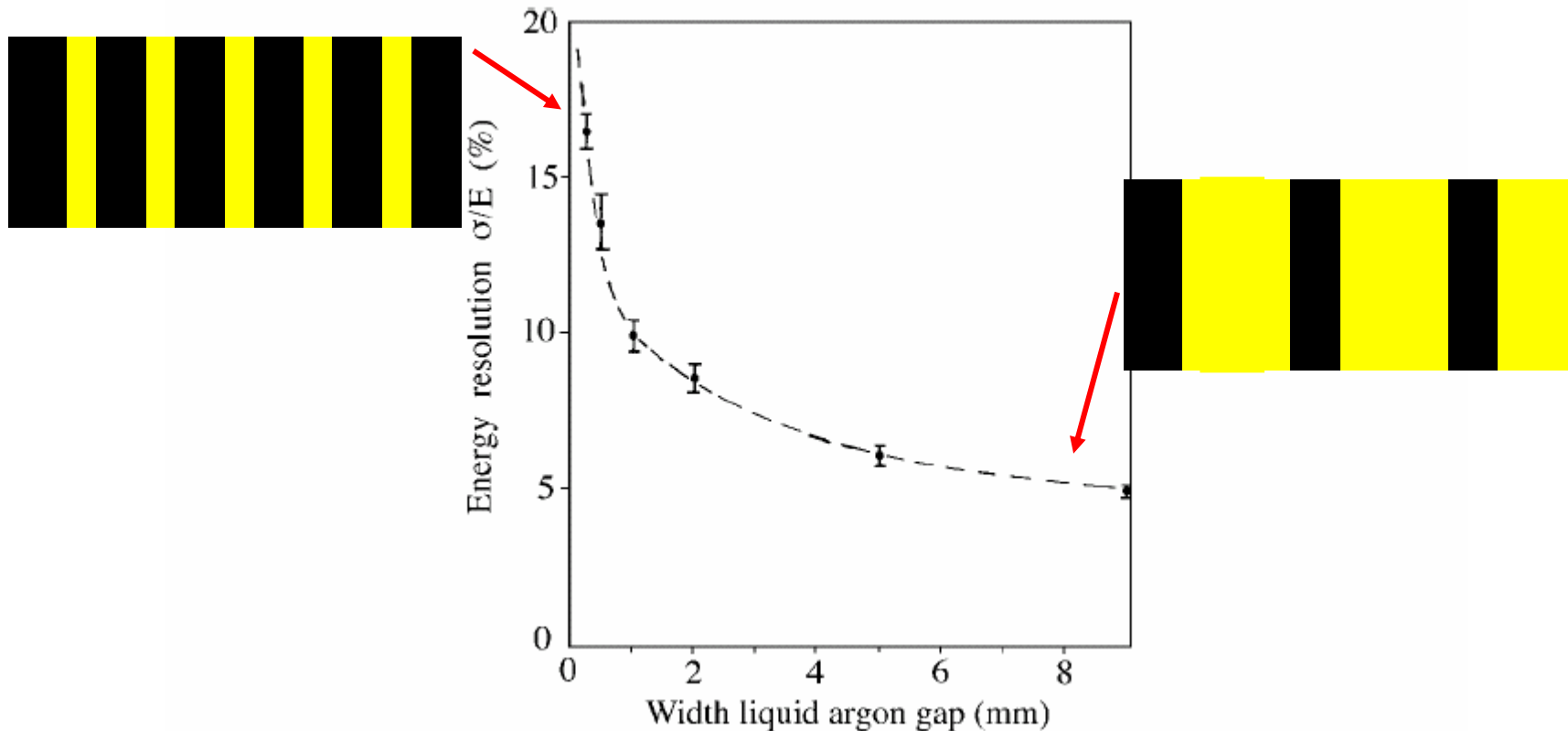
- ◆ Contribution supplémentaire aux fluctuations: procédure d'échantillonnage.
- ◆ Une fraction des segments n'est pas visible par le milieu détecteur
- ◆ ∃ une expression semi-empirique (Rossi) pour décrire les fluctuations d'échantillonnage:
 - ◆ nombre de particules N traversant un élément de détection:
 $N \propto E/\Delta E_{mip}$ avec
 - ◆ ΔE_{mip} l'énergie perdue par a mip dans un élément de détection (détecteur + absorbeur)
- ◆ Résolution estimée par

$$\frac{\sigma(E_M)}{E_M} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \propto \sqrt{\Delta E_{mip}} \times \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Plus le nombre de plans est élevé, plus ΔE_{mip} est petit, meilleure est la résolution

Calorimètres à échantillonnage: fluctuations

La formule précédente ne marche pas: elle ne permet pas de décrire la dépendance de la résolution avec l'épaisseur de milieu actif



Les mesures montrent un effet inverse.

Calorimètres à échantillonnage: fraction d'échantillonnage

◆ Le signal vient des nombreuses particules (e^+ et e^-) de basse énergie (\sim MeV):

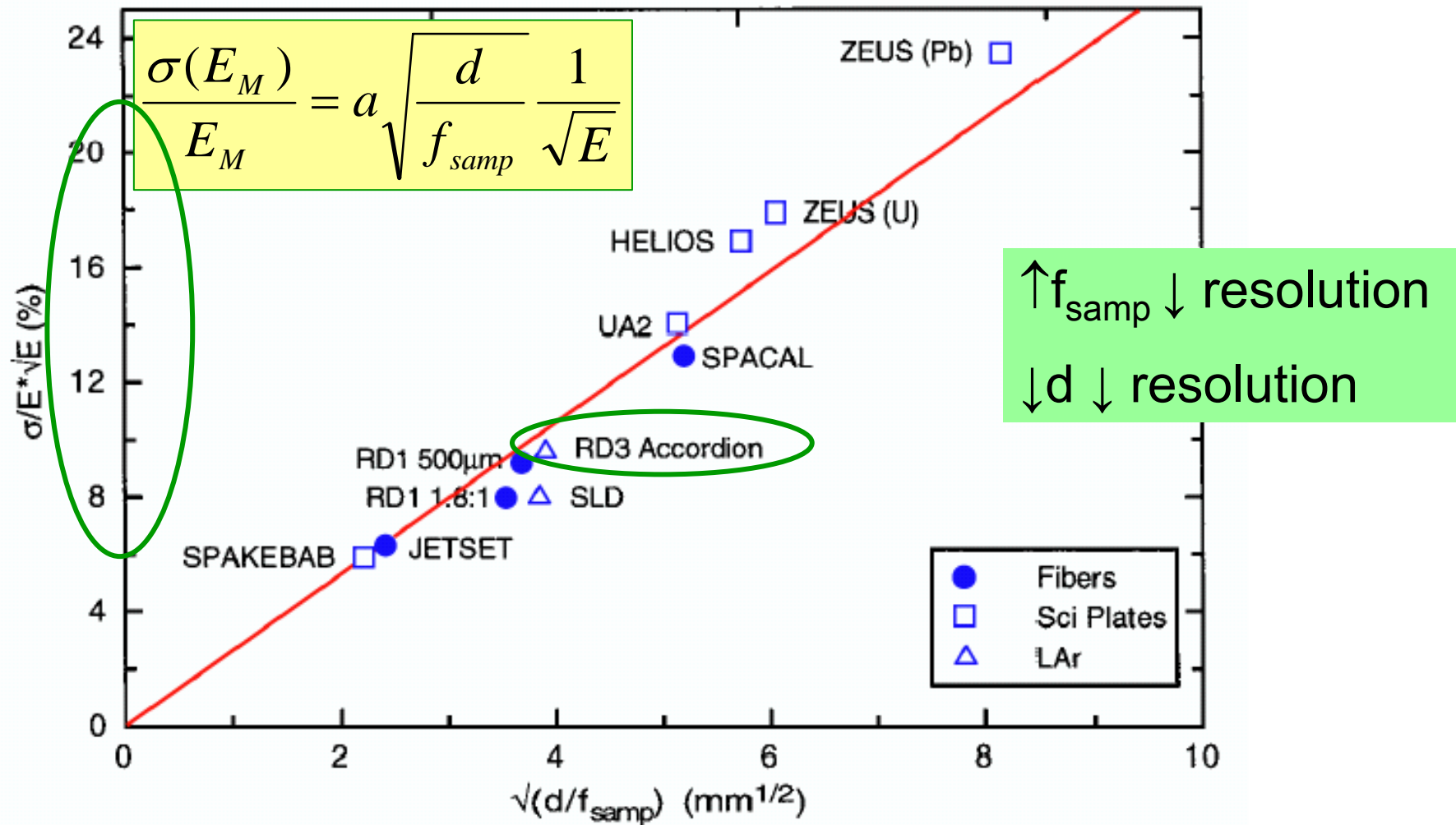
- ◆ Les paires $e^+ e^-$ qui sont créées dans le milieu actif
- ◆ Les paires $e^+ e^-$ qui sont créées dans le milieu absorbeur et qui atteignent le milieu détecteur
- ◆ La chemin moyen d'une particule de 1 MeV est une fraction de la distance entre les couches actives: plus on augmente le nombre de transitions entre couches plus on augmente le signal.



◆ Les fluctuations dépendent de la fraction d'échantillonnage f_{samp}

$$f_{\text{samp}} = \frac{E_{\text{mip}}(\text{actif})}{E_{\text{mip}}(\text{actif}) + E_{\text{mip}}(\text{absorbeur})}$$

Calorimètres à échantillonnage: résolution $\sim 10\%/\sqrt{E}$



Calorimètres à échantillonnage: plusieurs techniques

- ◆ Technique bien rodée pour les grands détecteurs: la plus utilisée
- ◆ Plus facile pour segmenter la lecture du signal en profondeur et transversalement:
 - ◆ meilleure résolution spatiale et angulaire que les calorimètres homogènes
 - ◆ meilleure identification de particules (différence entre les gerbes em et had)
- ◆ Technique utilisée pour la plupart des calorimètres hadroniques:
 - ◆ les fluctuations dues aux interactions nucléaires sont supérieures aux fluctuations d'échantillonnage
 - ◆ la segmentation en profondeur permet de compenser par software la réponse de la composante hadronique des gerbes de hadrons
- ◆ Techniques de détection:
 - ◆ mesure de la charge: gaz, liquide (chaud ou froid), solide (Si)
 - ◆ mesure de la lumière: scintillateur

Calorimètre à échantillonnage: liquide et scintillateur

- ◆ Les détecteurs LEP ont utilisé le gaz comme milieu détecteur mais pas adapté au LHC (uniformité, terme constant difficiles à contrôler, lenteur de collection du signal)
- ◆ Les deux techniques de détection les plus utilisées sont:
 - ◆ l'argon liquide
 - ◆ les scintillateurs
- ◆ Pour la génération *après LHC* les calorimètres étudiés utilisent le Si comme milieu détecteur, le tungstène comme milieu absorbeur.

Calorimètres à argon liquide

- ◆ Assez longue histoire
 - ◆ 1974: ISR-CERN (Willis et Radeka)
 - ◆ 1980: Mark II (SLAC), Cello (Hambourg), NA31 (CERN)
 - ◆ 1990: SLD (SLAC), Helios (CERN),
 - ◆ 2000: D0 (FNAL), H1 (Hambourg)
 - ◆ 2007: ATLAS – électromagnétique et hadronique

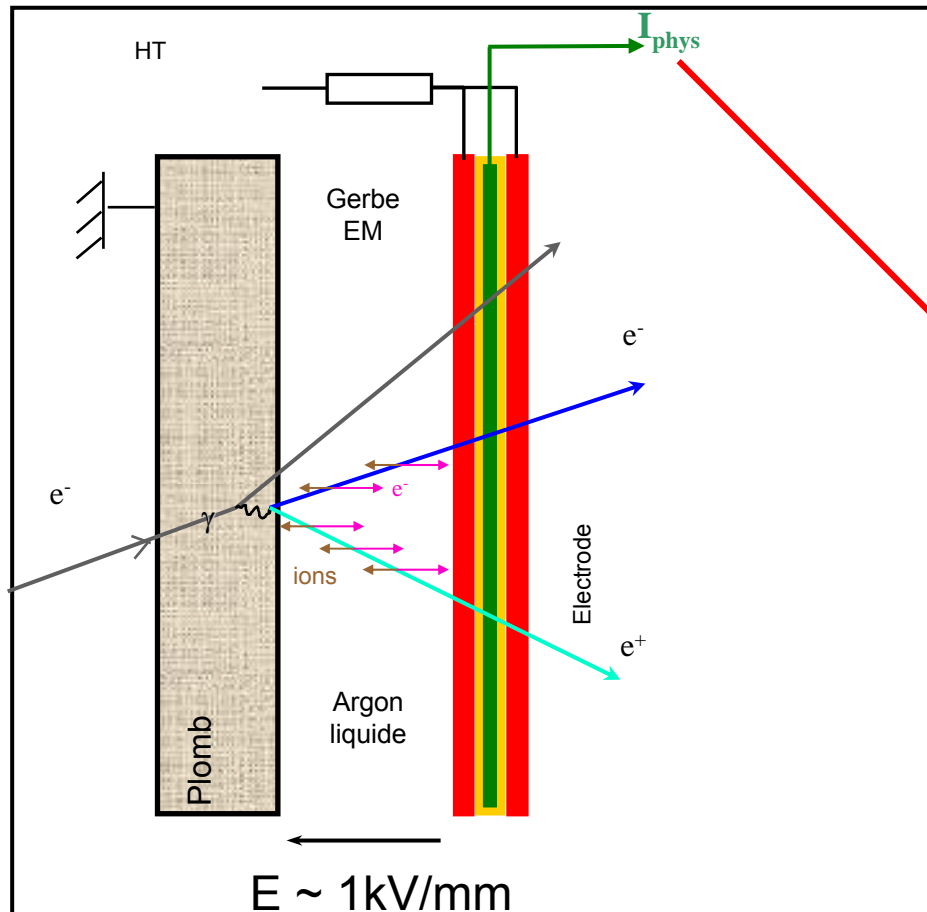
Avantages:

Dense
pas d'amplification d'électrons
uniforme
Facile à calibrer (!)
Résolution en énergie raisonnable
Stable dans le temps
Tient les radiations
Bien connu

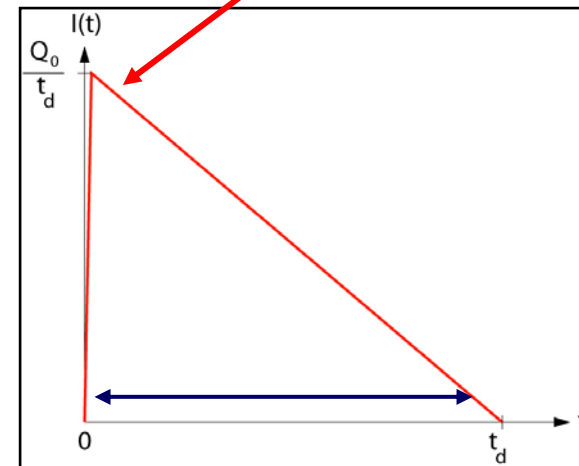
Inconvénients

Système cryogénique
Pureté
Lent (si on intègre tt le signal)

Principe de fonctionnement d'une chambre à ionisation dans un liquide



$\text{Pic} \propto \int \text{signal déposé}$

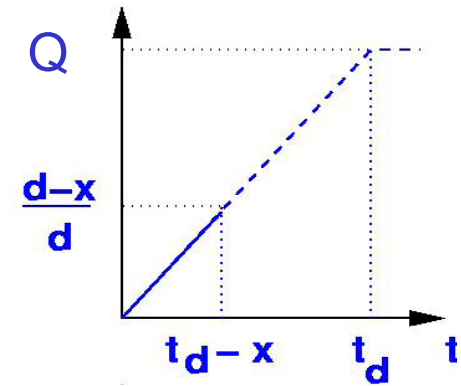
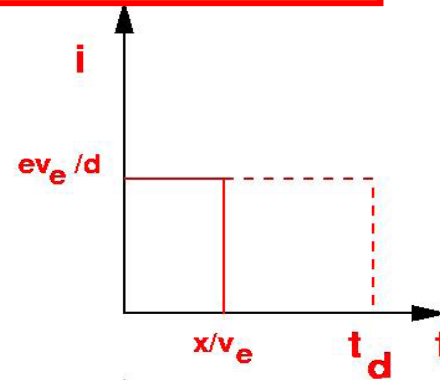
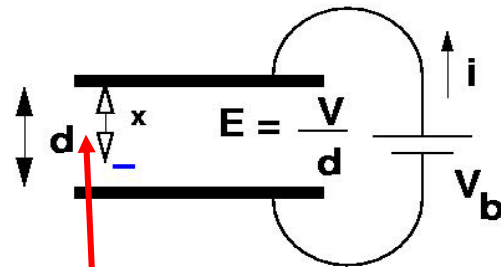


$400\text{ ns} \approx 16\text{ LHC BC}$

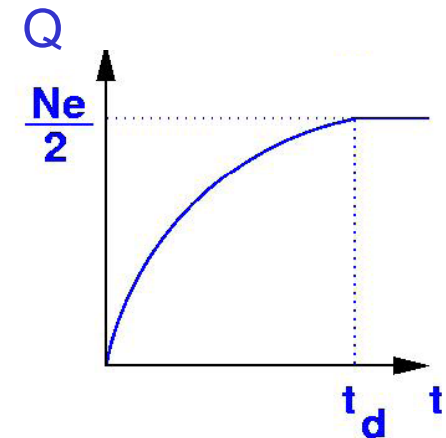
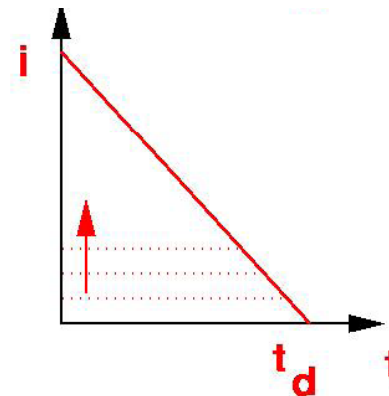
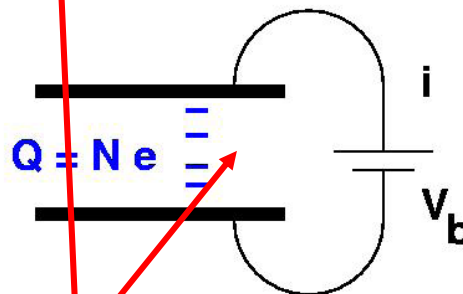
Collection du signal dans l'argon liquide

Collection des électrons induits par l'ionisation des atomes due au passage des particules chargées de la gerbe dans le liquide noble

Une charge



N charges uniformément réparties

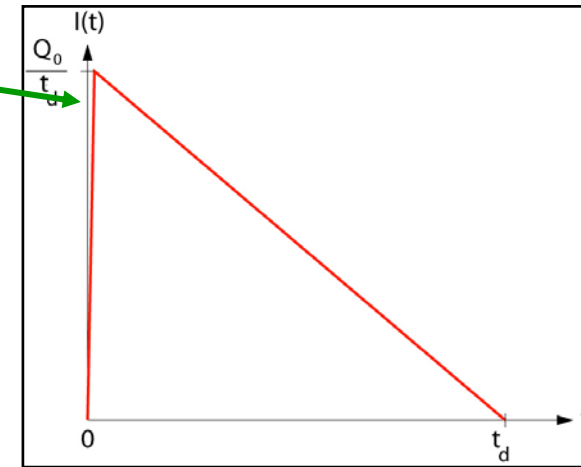


Le gap

Signal long mais lu rapidement

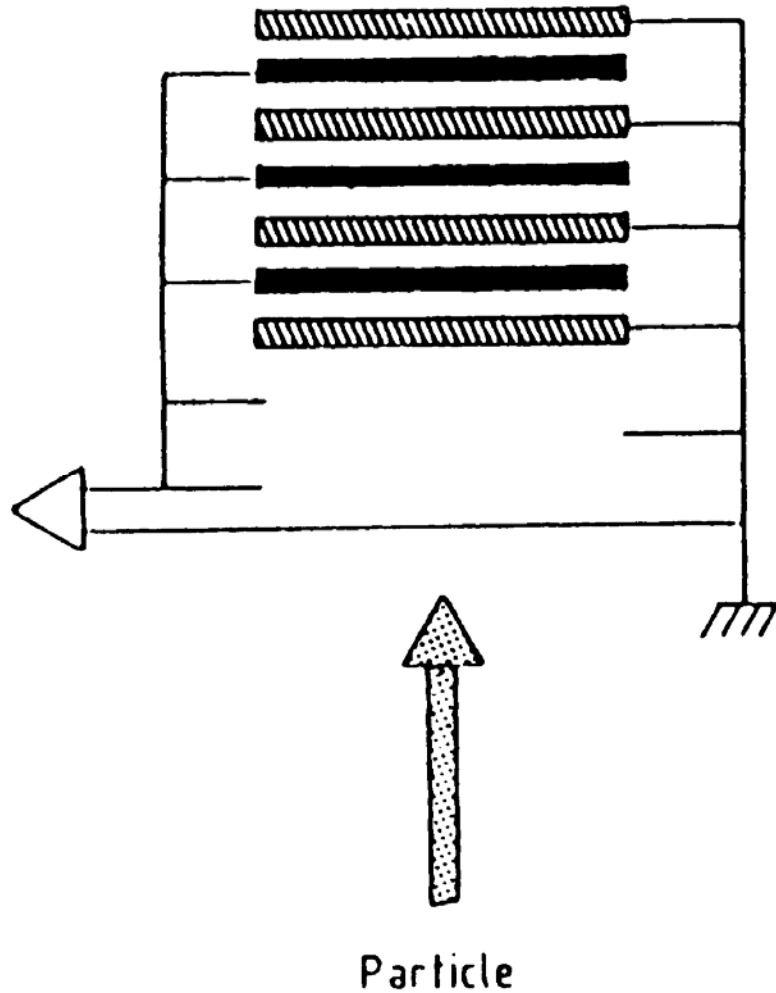
- ◆ Au LHC, les interactions ont lieu ttes les 25ns: on ne peut pas intégrer le signal total (450ns)
- ◆ La collaboration RD3 a développé la technique pour mesurer le courant initial

- ◆ Amplification bas bruit pour (~0.1 mA-10mA)
- ◆ Mise en forme CR-RC2
 - ◆ pour minimiser le bruit total
 - ◆ limiter la bande passante autour de 40MHz



- ◆ Performances démontrées dans les années 1991-1995

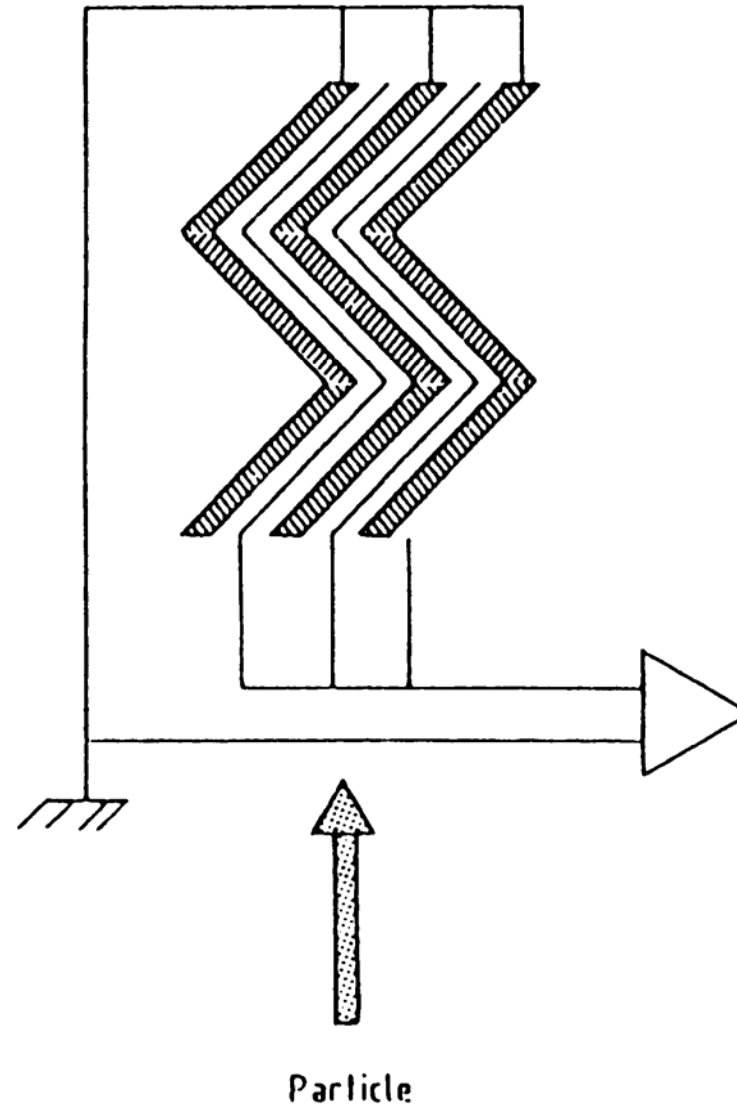
L'accordéon: pourquoi ?



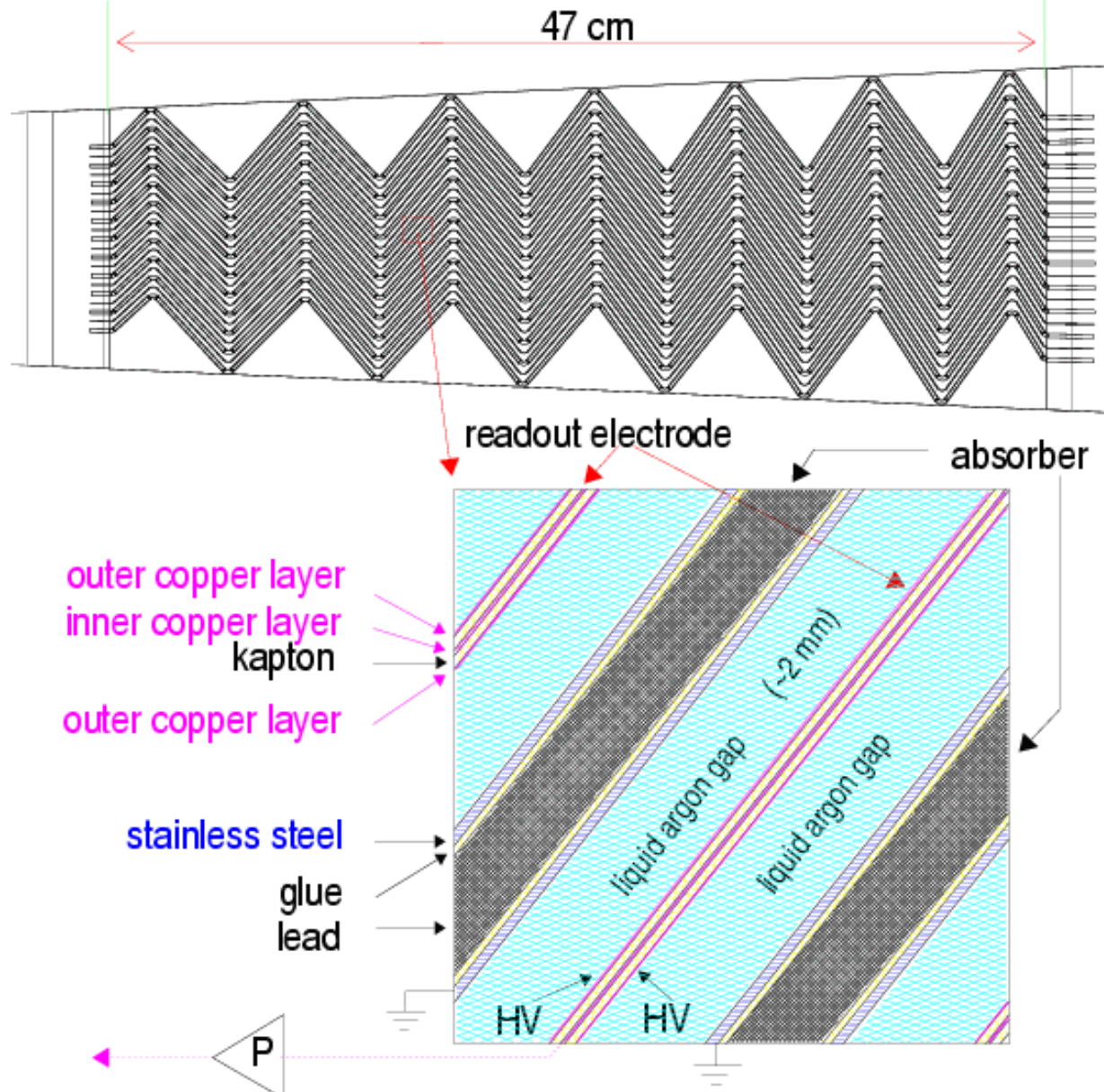
- ◆ Les anciens calorimètres à argon liquide avaient un temps de réponse lent (intégration du signal).
- ◆ Electrodes perpendiculaires aux particules
- ◆ Longs câbles
 - ◆ pour emmener les signaux vers les preamplis (transfert \sim qqes ns)
 - ◆ regrouper ensemble des gaps
- ◆ Zones mortes dues aux câbles

L'accordéon

- ◆ Géométrie à accordéon:
rapide
- ◆ Les électrodes sont parallèles aux particules incidentes
 - ◆ lectures des signaux à l'avant et à l'arrière
 - ◆ pas de longues connexions
- ◆ Le découpage en profondeur est dessiné sur les électrodes
- ◆ **Pas d'espace sans détection**

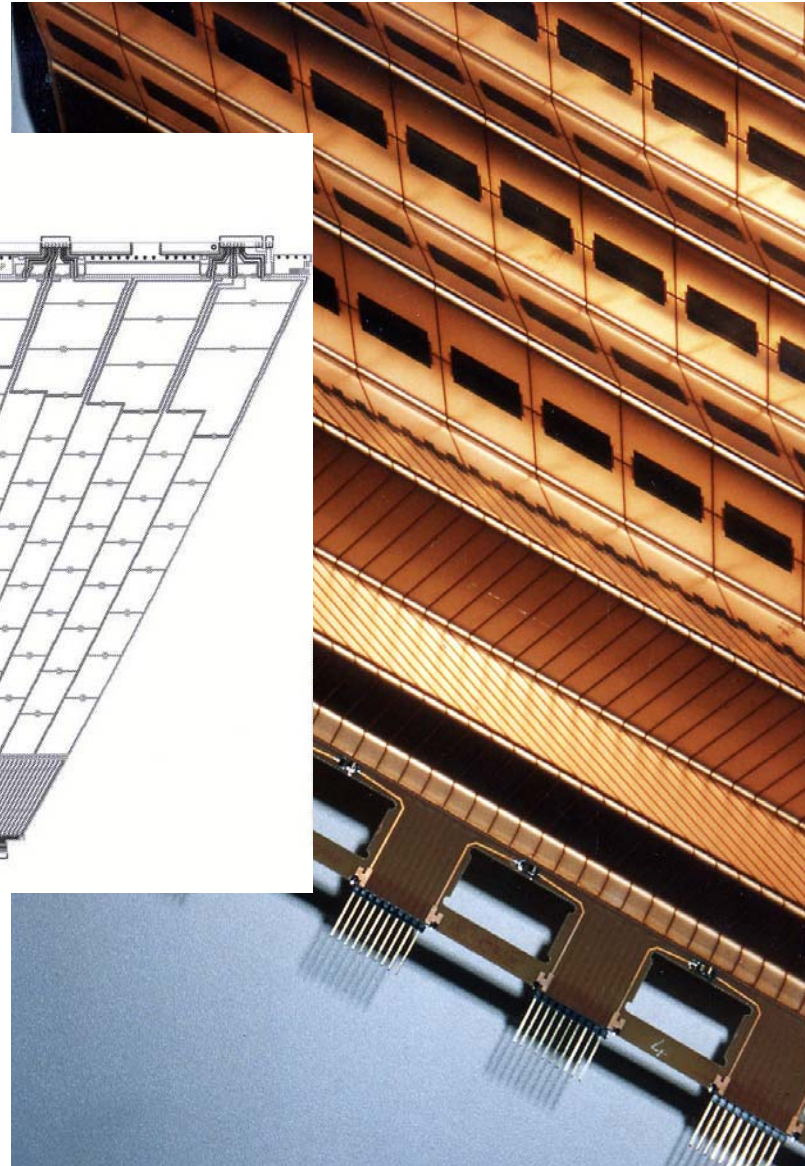
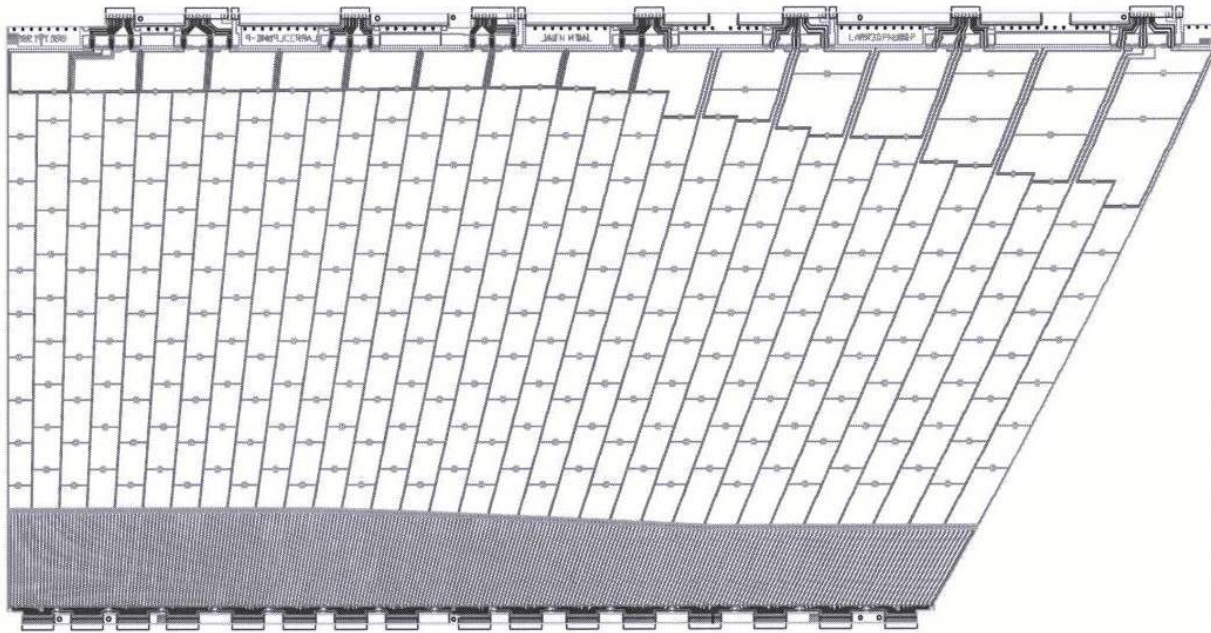


L'échantillonnage

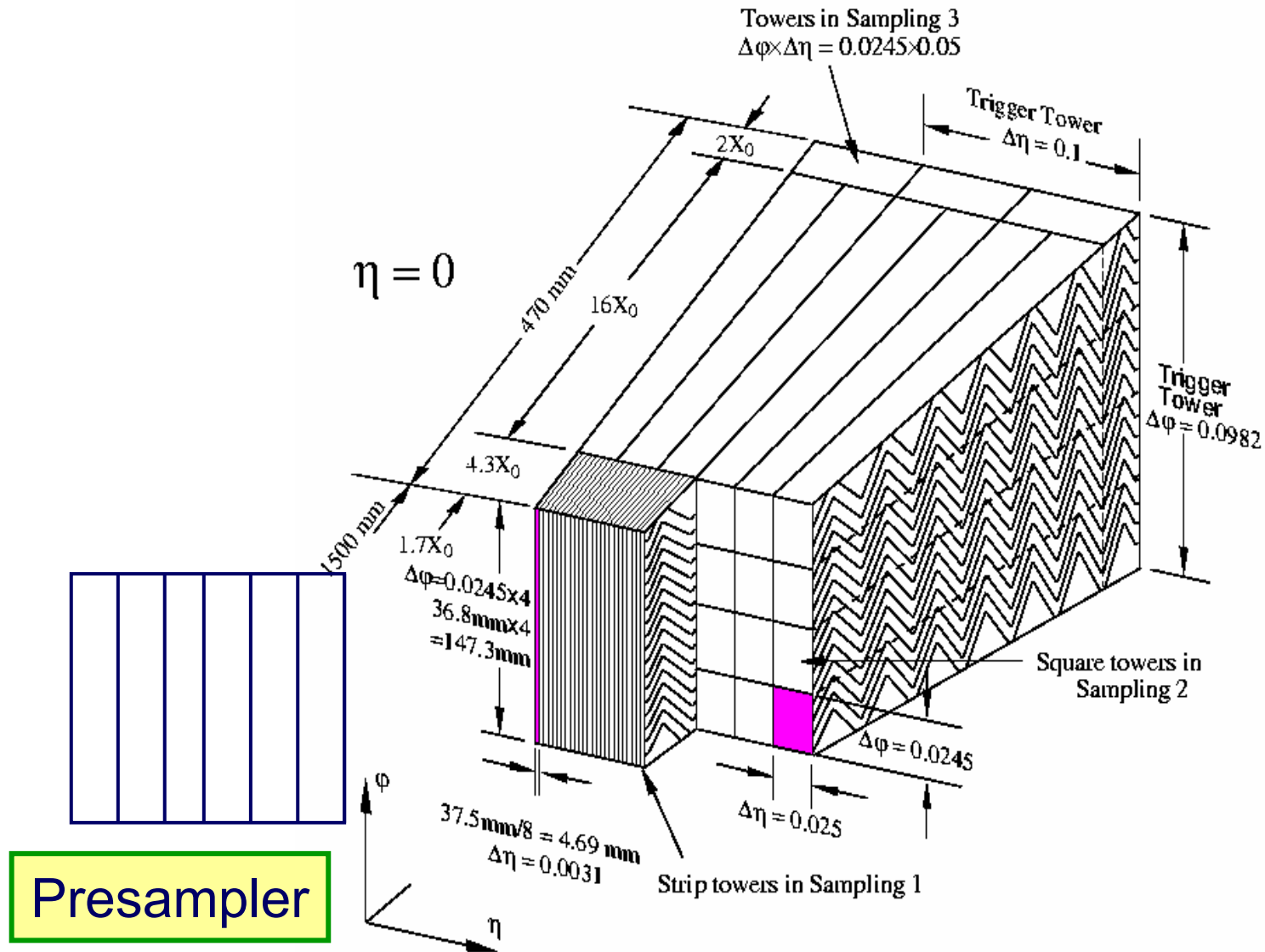


La segmentation

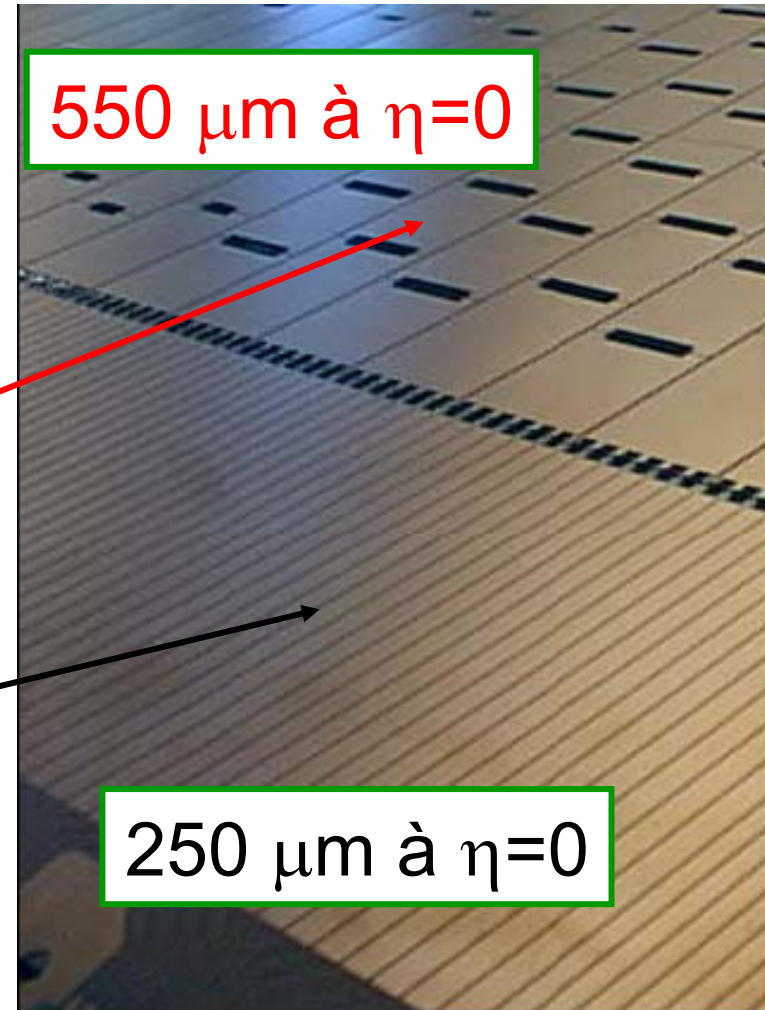
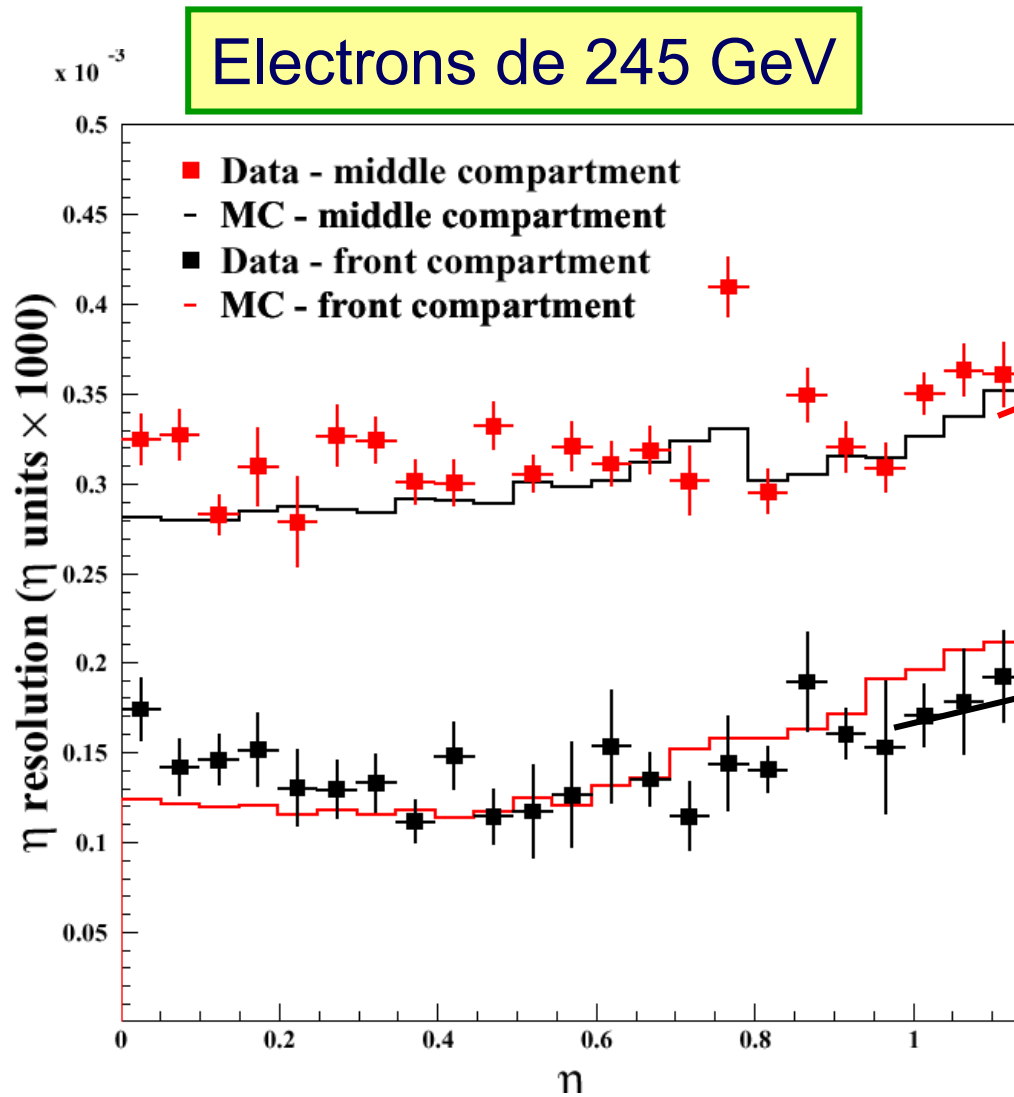
origine27.dwg du 02/07/1999



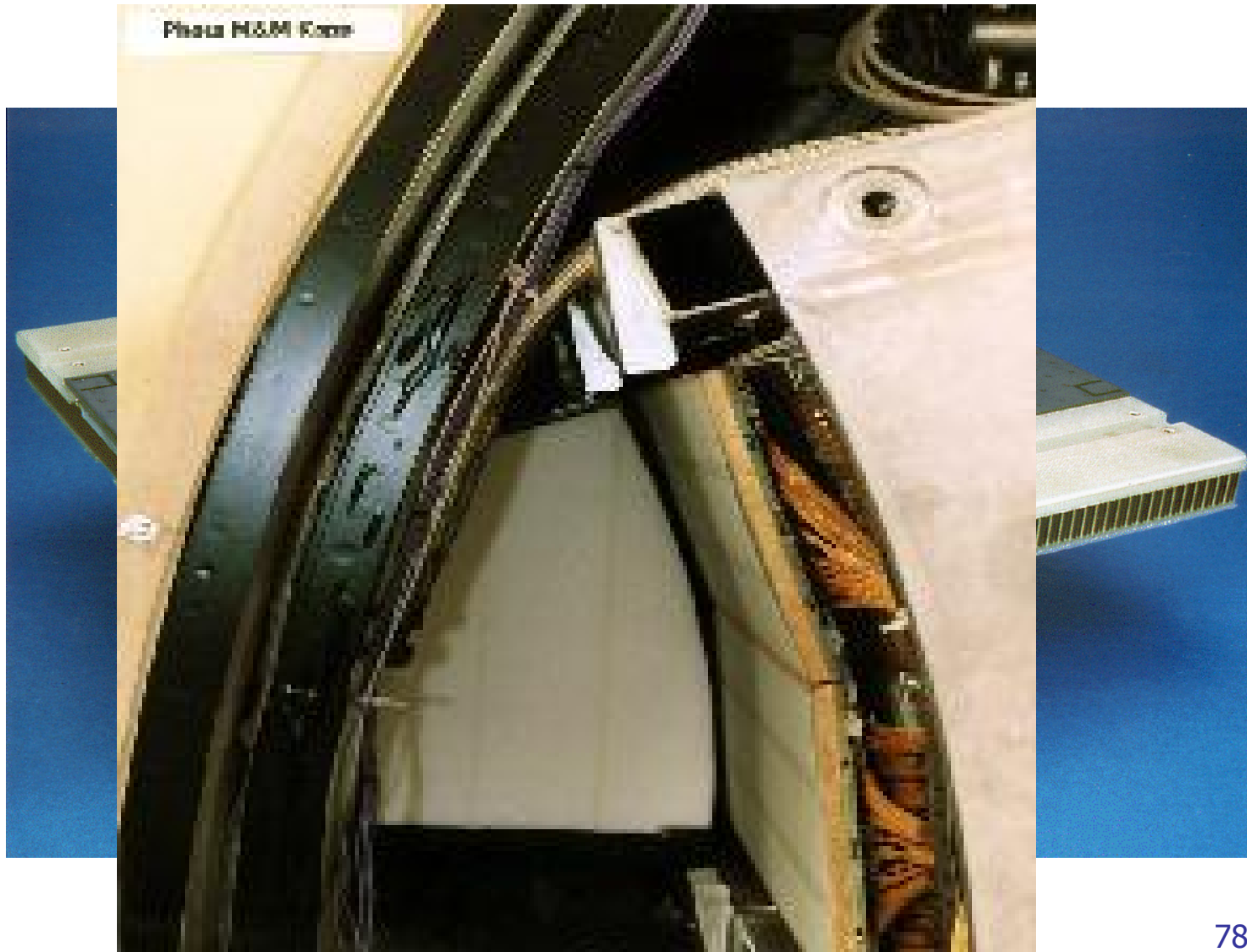
La segmentation

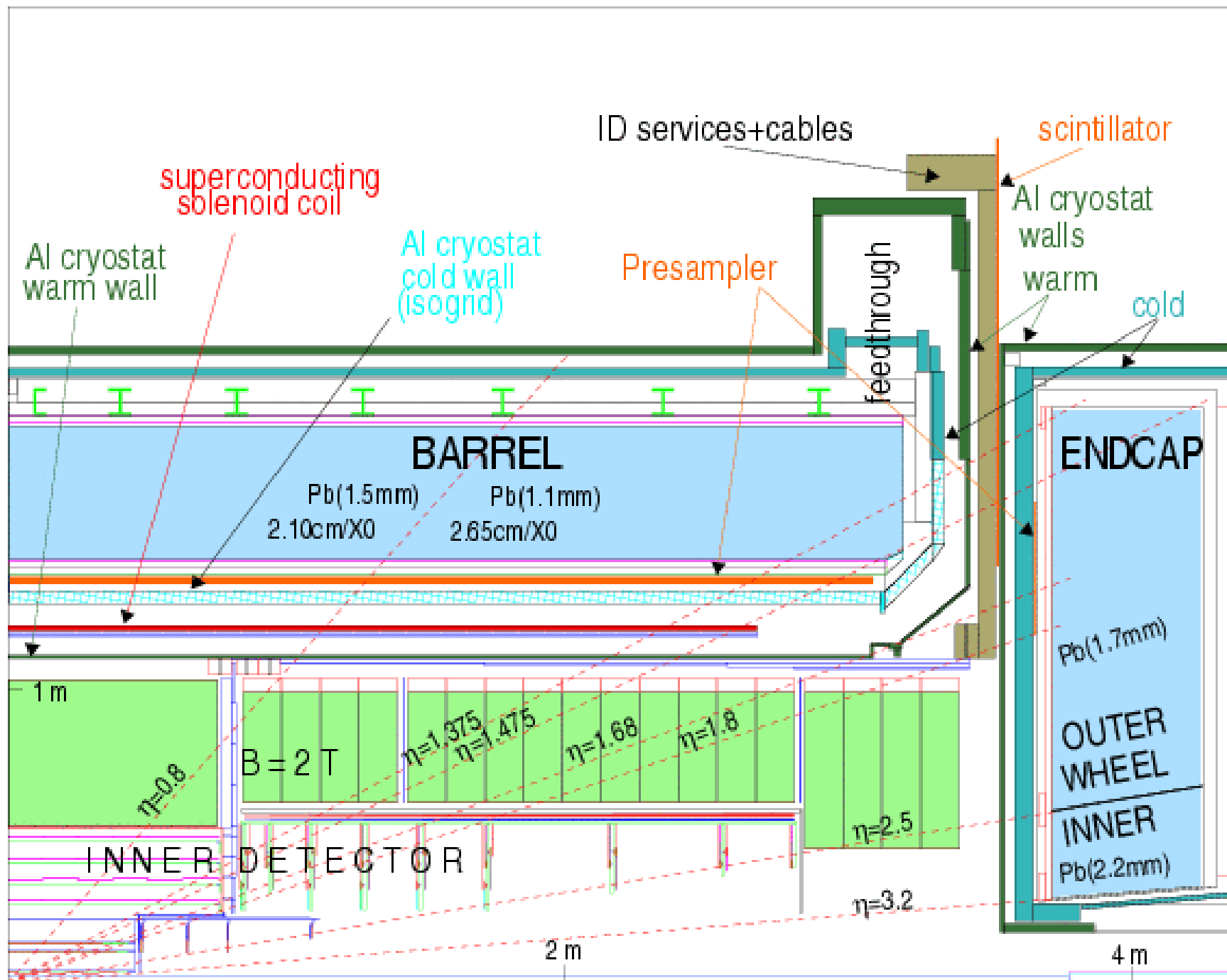


Résolution spatiale (ATLAS)



Le presampler





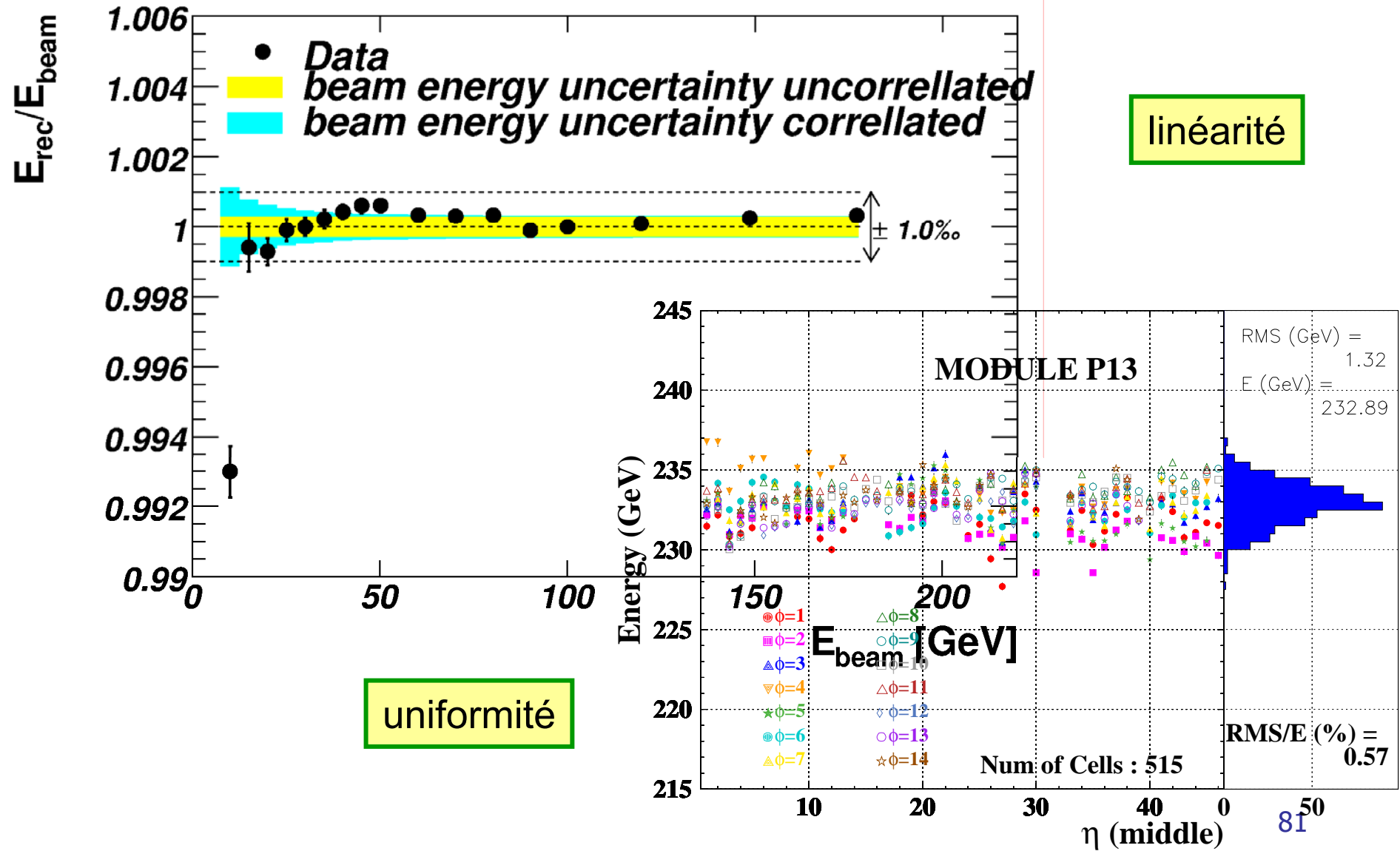
Le pour et le contre des calorimètre à argon liquide

- ◆ Beaucoup de charges dérivent (gd nombre de paires e⁻-ion produites): courant naturel élevé ($E_s(\text{LAr}) = 23.6 \text{ eV}$)
- ◆ Liquide: uniforme (purification aisée)
- ◆ Stable dans le temps
- ◆ Fluctuation d'échantillonnage dominant
- ◆ Supporte naturellement les radiations (noble)
- ◆ Pas trop cher

- ◆ RD3/ATLAS a montré que la détection du signal de LAr pouvait être rapide

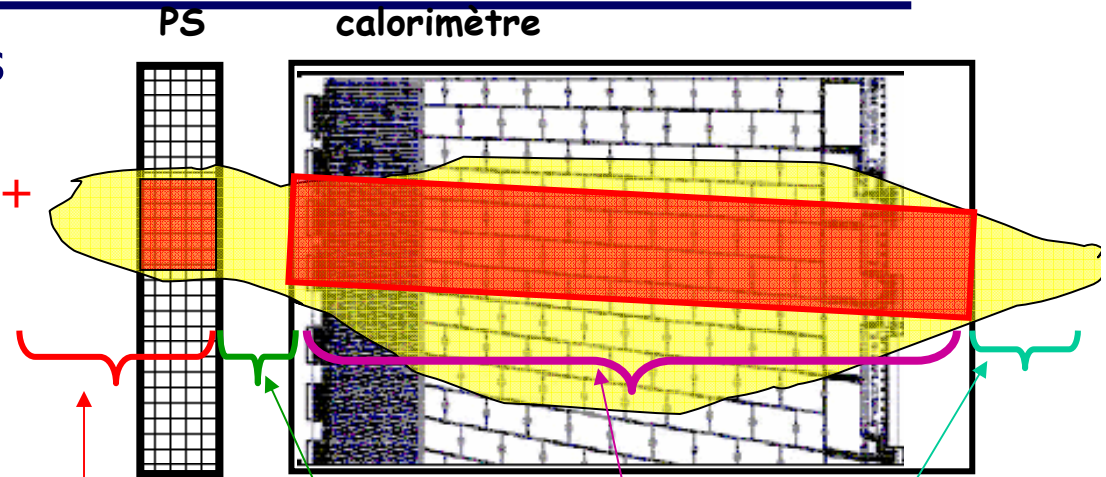
- ◆ Cryogénie nécessaire (87°K)
- ◆ Signal sensible aux variations de température (-2%/°)

Les performances de l'accordéon

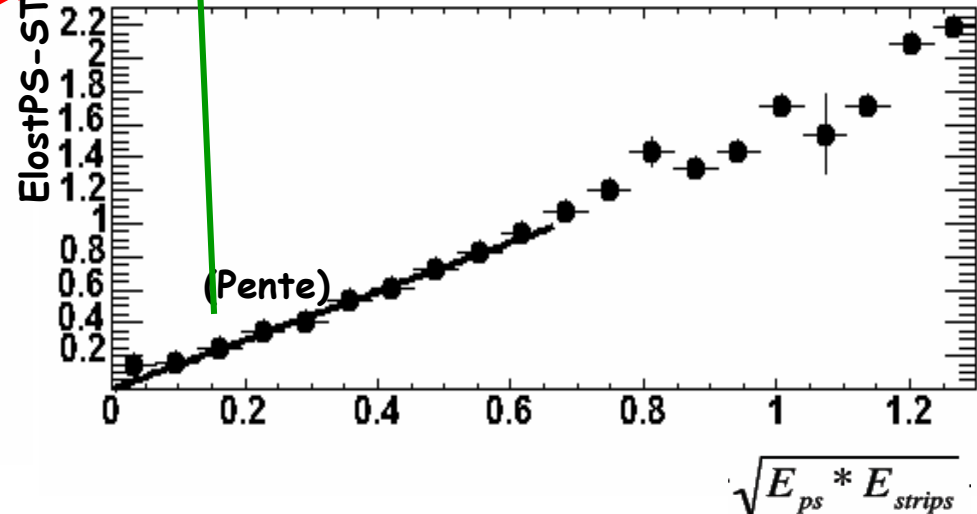
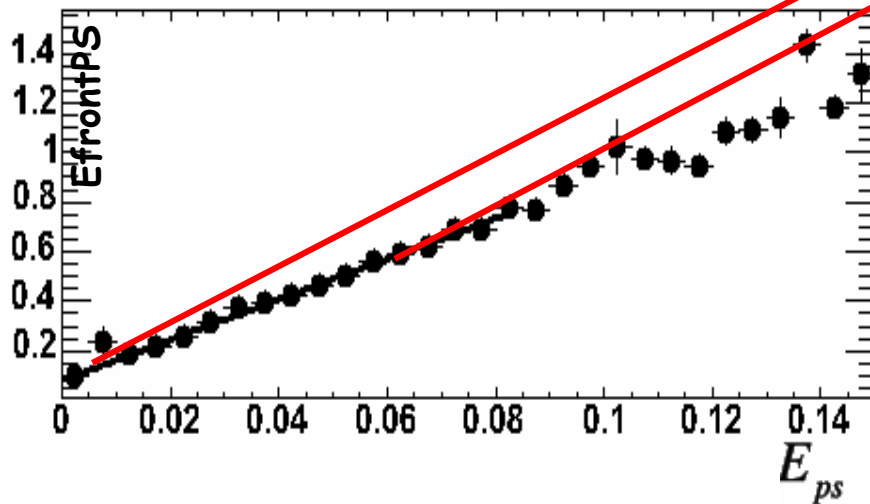


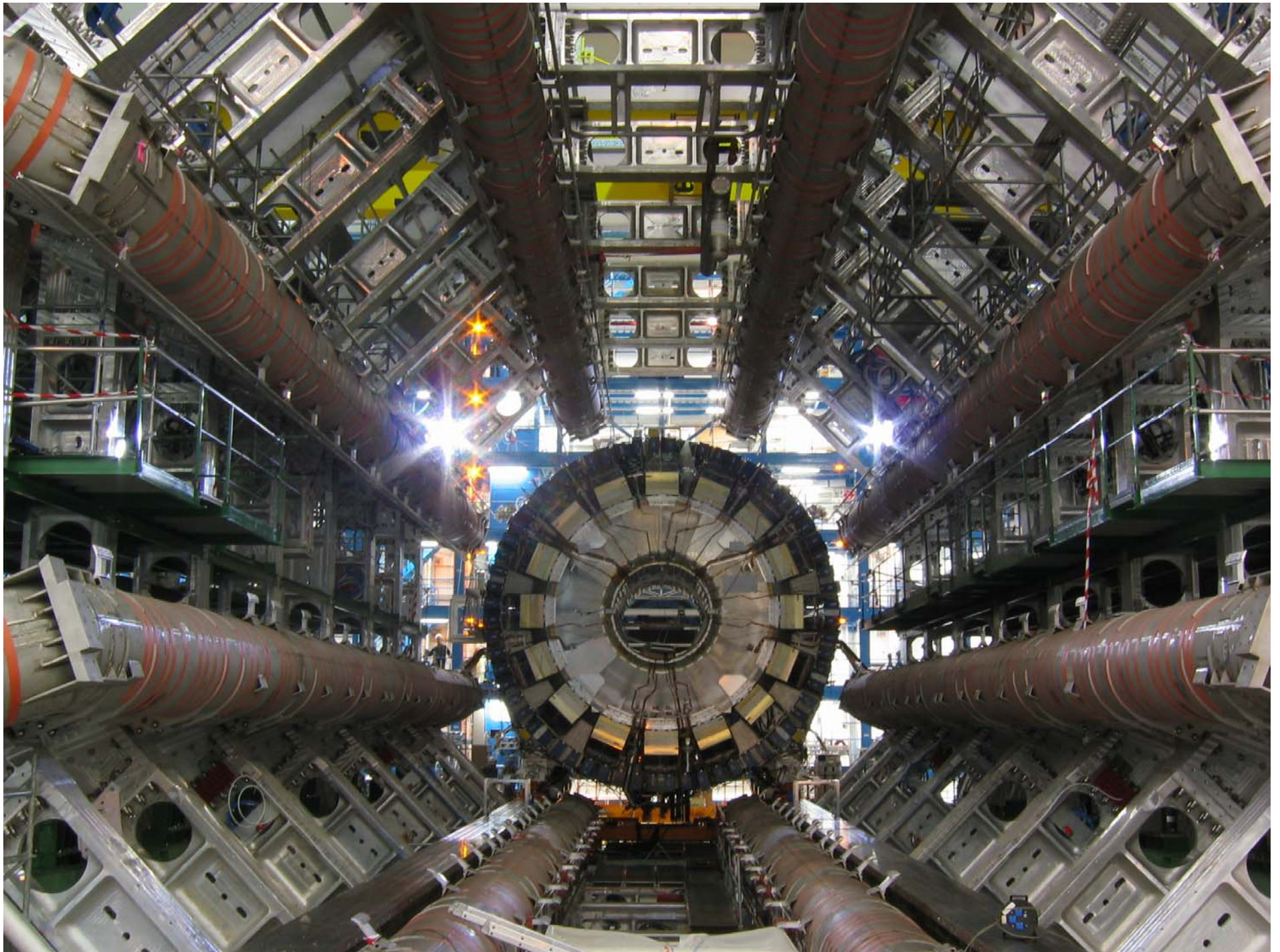
Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

- ◆ E_{rec} : corriger E_{acc} pour les pertes
 - ◆ dans la matière avant le détecteur (détecteur central + cryostat)
 - ◆ entre le presamplere et l'accordéon
 - ◆ sur les côtés de la gerbe reconstruite $E_{outcluster}$
 - ◆ à l'arrière de l'accordéon E_{leak}



$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$





Les calorimètres à échantillonnage: bilan

- ◆ Malgré une résolution moins bonne que les calorimètres homogènes, les calorimètres électromagnétiques à échantillonnage sont très utilisés en physique des particules car:
 - ◆ Ils permettent d'allier densité et performances
 - ◆ La possibilité de segmentation en profondeur
 - ◆ Le coût est a priori plus modeste