

La calorimétrie



La calorimétrie

- Pourquoi un calorimètre?
- Les **propriétés importantes** des calorimètres
- Le développement des **gerbes**
 - gerbes électromagnétiques
 - interlude: les muons
 - gerbes hadroniques
- Le principe de la mesure
 - mesure de l'énergie: principe de base
 - résolution
 - linéarité
 - position
- Les techniques expérimentales
 - calorimètres homogènes
 - calorimètres à échantillonnage
- Les calorimètres
 - électromagnétique
 - hadronique
- Les calorimètres à l'IN2P3
- Les systèmes de lecture
- Le déclenchement

Interactions avec
la matière

Organisation des trois cours de calorimétrie

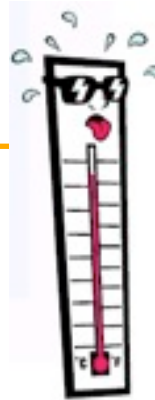
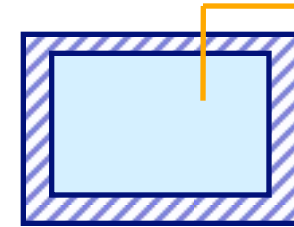
- Jeudi 18 juin
 - La calorimétrie: pourquoi?
 - Développements des gerbes
 - Électromagnétiques
 - Hadroniques
- Vendredi 19 juin
 - Principes des mesures
 - Comment fonctionne un calorimètre?
- Samedi 20 juin
 - Exemples: EM, HAD, calorimètres à l'IN2P3
 - Lecture des signaux
 - Déclenchement

Références – Crédits

- R. Wigmans Calorimetry, Energy Measurements in Particle Physics – Beaucoup de figures viennent de ce livre + de trois cours donnés à Pise.
- Beaucoup d'idées viennent de cours de collègues:
 - C. Roda Calorimetry at LHC – Italo-Hellenic School of Physics (juin 2005)
 - F. Gianotti Issues in calorimetry – NATO school, Virgin Islands (juin 2000)
 - Yves Zolnierowski Mesures d'énergie avec un calorimètre – Cette école en 2003
- Proceedings des conférences Calorimetry in Particle Physics
 - 1991 – Jim Virdee
 - 2000 – Guillaume Unal
 - 2004 – J. Fay, L. Serin, C. de la Taille, R. Wigmans
 - 2006 – Nombreuses présentations

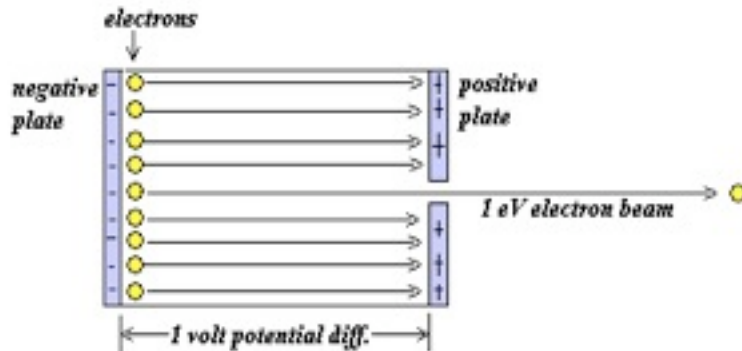
Qu'est qu'un calorimètre?

- Le concept de calorimètre vient de la thermodynamique:
 - Une boîte hermétique thermiquement, contenant une substance dont on veut mesurer la température
- Echelle de température:
 - 1 calorie (4.185J) est l'énergie nécessaire pour élever d'un degré un gramme d'eau à 15°C
- En physique des particules nous mesurons des GeV (0.1-1000)
 - 1 GeV = 10^9 eV $\approx 10^9 * 10^{-19}$ J = 10^{-10} J = $2.4 * 10^{-9}$ cal
 - 1 TeV = 1000 GeV : énergie cinétique d'un moustique en vol



**La sensibilité nécessaire pour nos calorimètres
est \sim mille millions de fois plus grande
que pour mesurer l'augmentation de température de 1 degré d'1 g d'eau**

Equivalence entre énergie, impulsion et masse



- 1 eV est l'énergie cinétique acquise par un électron dans un champ électrique de 1V:

- $1 \text{ eV} \leftrightarrow 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

1keV= 10^3 eV
1MeV= 10^6 eV
1GeV= 10^9 eV
1TeV= 10^{12} eV

$$E^2 = p^2 + m^2$$
$$\beta = p/E$$
$$\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{-1/2}$$

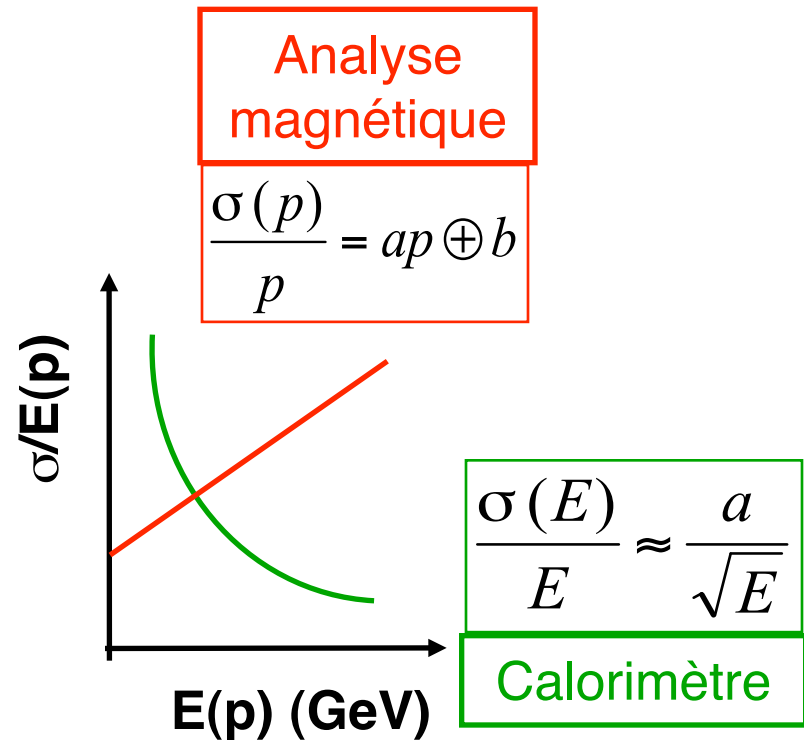
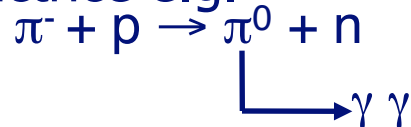
- $E=mc^2$
 - E l'énergie (Joule)
 - m la masse (des kg)
 - c la vitesse de la lumière ($c=299792458 \text{ m.s}^{-1}$)
- L'énergie a la dimension de $[\text{masse}].[\text{longueur}]^2. [\text{temps}]^{-2}$
- $E=pc$
 - p est l'impulsion en kg.m.s^{-1}
- Si E en eV (or keV, MeV,..)
 - p en eV/c
 - m en eV/c^2

Pourquoi faire des calorimètres?

- C'est dans les années 1970 que sont apparus les premiers calorimètres, par la nécessité de mesurer l'énergie de toutes les particules: **neutres** et chargées

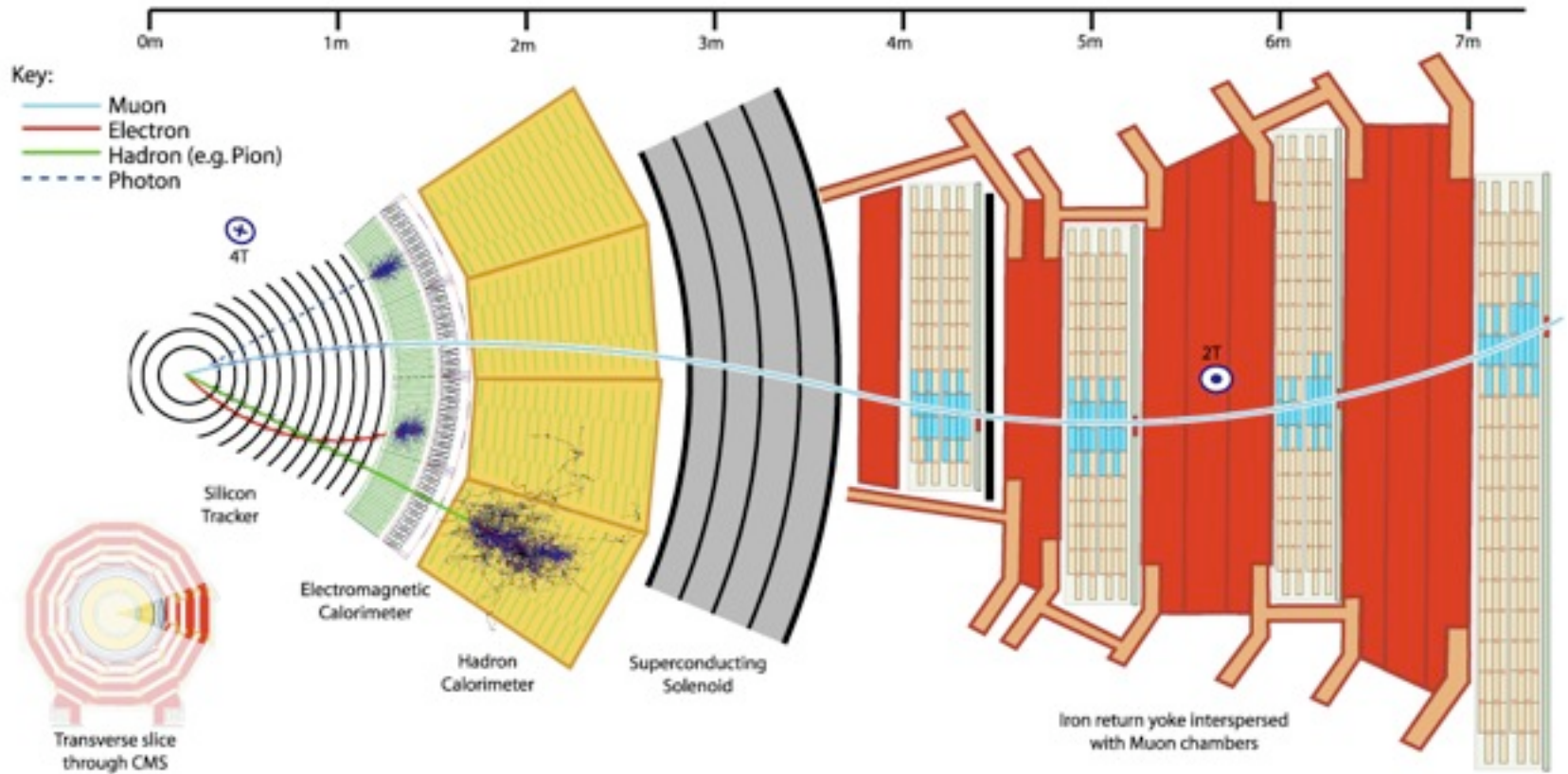
- Jusque là, seule l'impulsion des particules chargées était mesurée, par **analyse magnétique**.

- La mesure par calorimétrie est destructrice e.g.

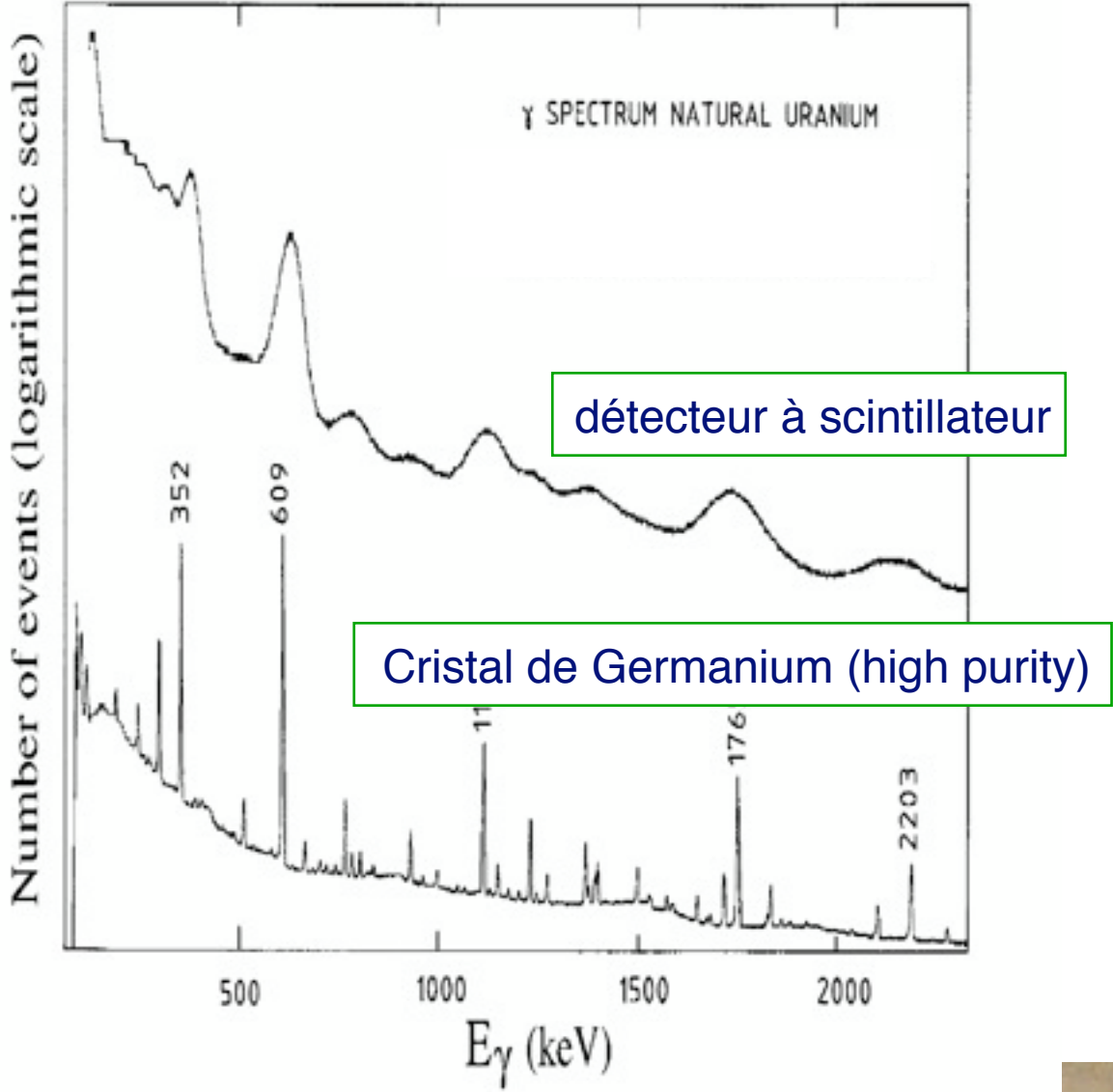


Les particules ne ressortent pas vivantes d'un calorimètre.

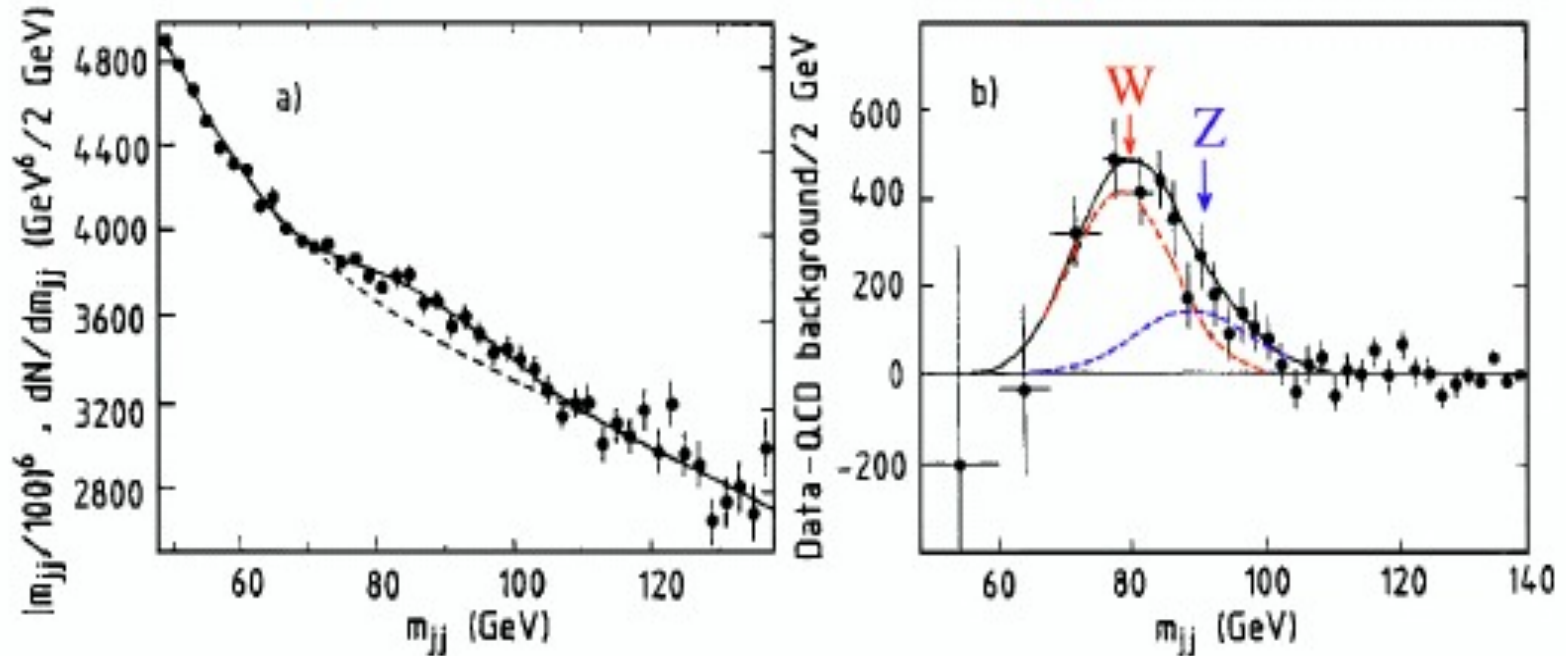
Structure générale d'un détecteur en Physique des Particules



Propriétés importantes: **Résolution en énergie**



Propriétés importantes: Résolution en énergie

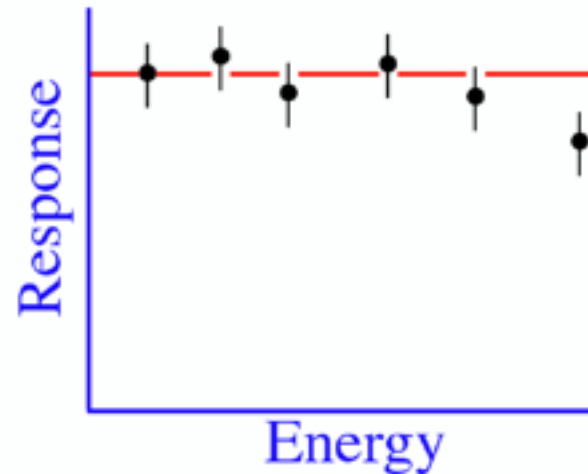
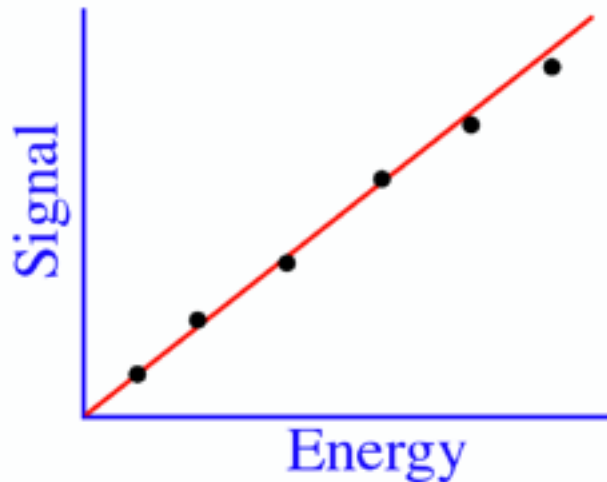


Reconstruction de la masse des W & Z⁰ dans UA2
(années 80-90)

Propriétés importantes: la linéarité

Réponse: signal moyen par unité d'énergie déposée
e.g. # de photons électrons/GeV, pC/MeV,

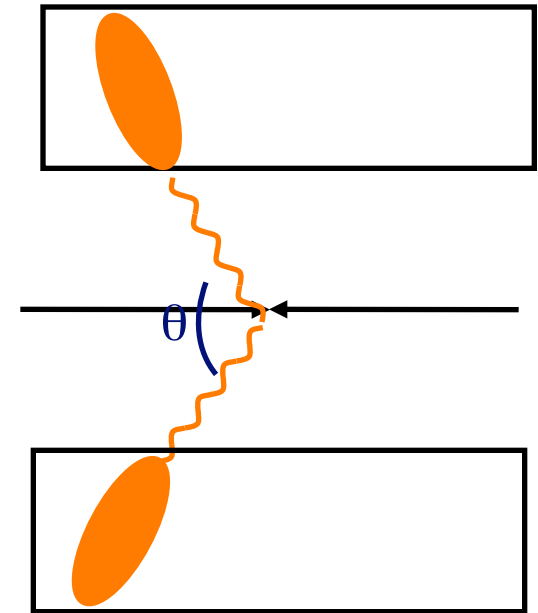
→ un calorimètre **linéaire** a une réponse constante



Les calorimètres **électromagnétiques** sont en général linéaires.
Toute les énergies sont déposées par ionisation/excitation de l'absorbeur

Propriétés importantes: **Résolution en position**

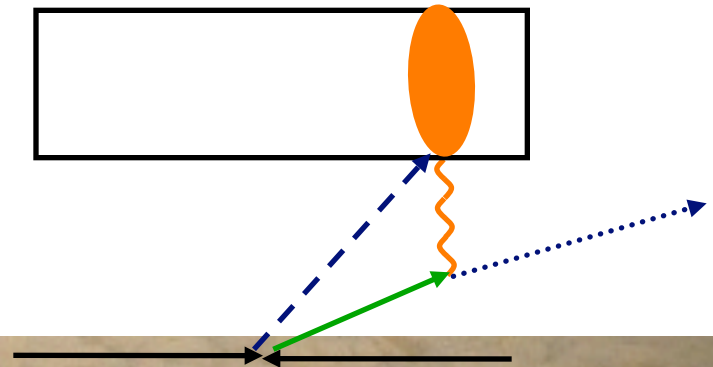
- Recherche du boson de Higgs dans ATLAS
 - si $M_H \sim 120$ GeV il sera cherché dans son mode de désintégration en deux photons: $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - $\sigma(M_H) / M_H = \frac{1}{2} [\sigma(E_{\gamma 1})/E_{\gamma 1} \oplus \sigma(E_{\gamma 2})/E_{\gamma 2} \oplus \cot(\theta/2) \sigma(\theta)]$



$$pp \rightarrow H + x \rightarrow \gamma\gamma + x$$

Propriétés importantes: **Résolution en temps**

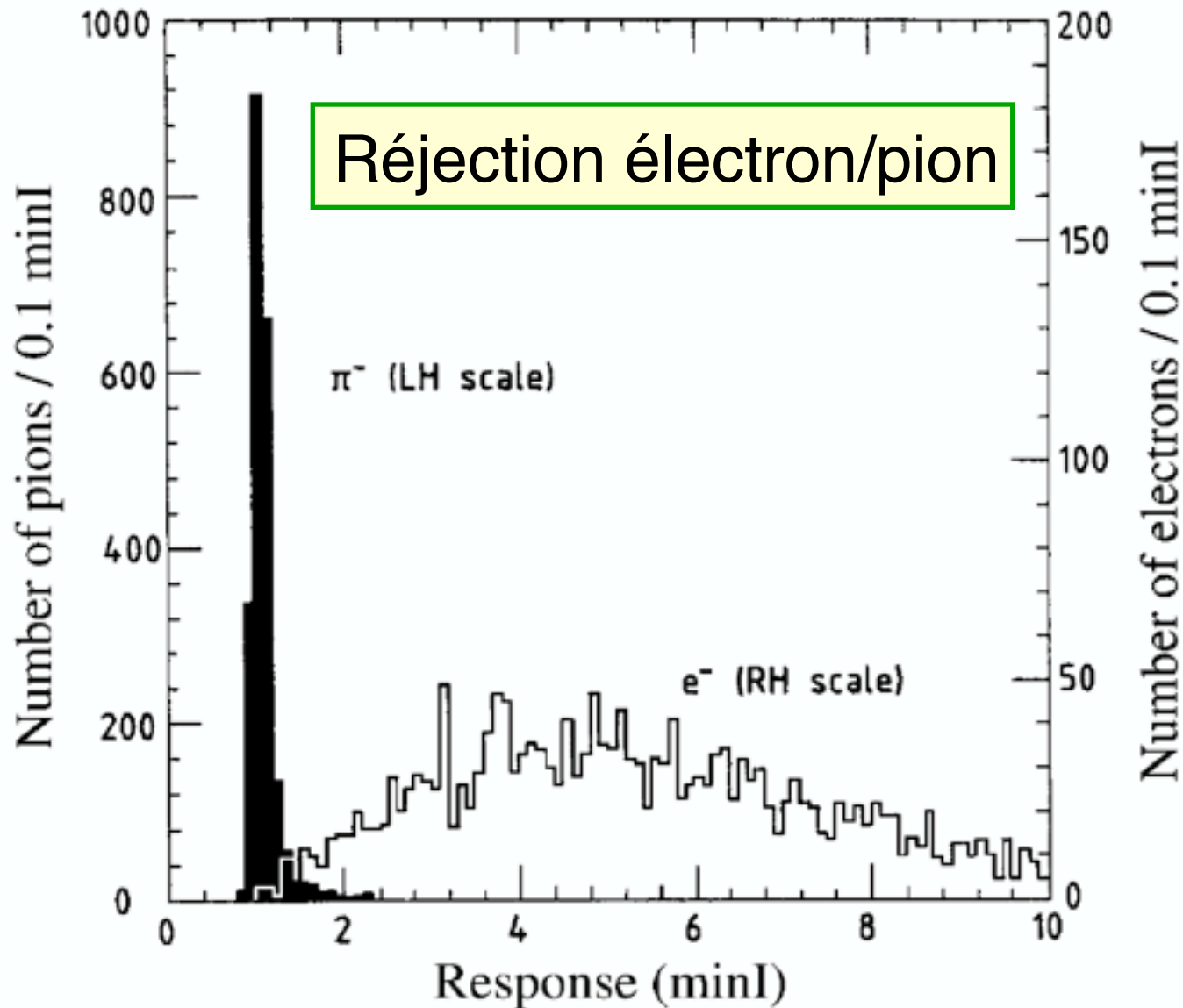
- Les collisions proton-proton au LHC ont une fréquence de 25ns
- Plusieurs interactions (~ 20) se superposent à chaque croisement de faisceaux (haute densité de protons dans les paquets pour obtenir une haute luminosité)
- Certains modèles théoriques prédisent l'existence de particules avec un long temps de vie
- La mesure du temps
 - permet de valider le synchronisme des sous détecteurs
 - d'identifier des événements avec des particules qui se désintègrent loin du vertex



Propriétés importantes: Identification des particules


- Pour mettre en évidence de nouveaux effets et de nouvelles particules, il faut réussir à séparer le signal du bruit de fond.
 - Pour cela, il faut être capable de séparer la nature des particules:
 - électrons, photons
 - muons
 - pions, protons, kaons,....
 - On utilise:
 - La forme de la gerbe (segmentation latérale et longitudinale)
 - L'association d'une trace chargée avec un dépôt d'énergie
 - Le temps d'arrivée du signal

Propriétés importantes: Identification des particules

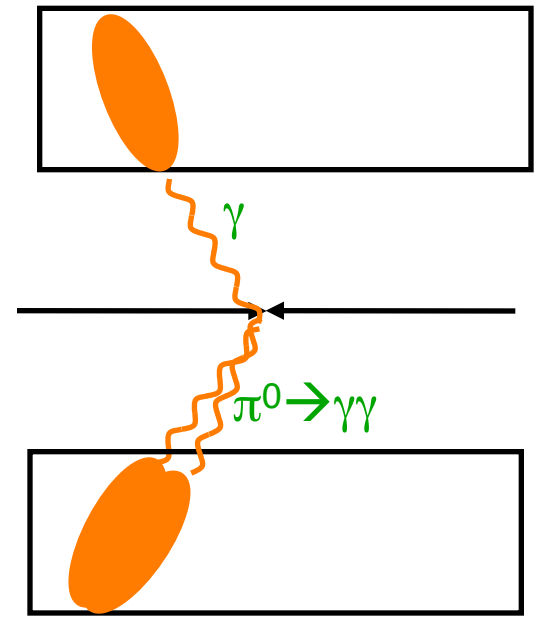


Propriétés importantes: Identification des particules

- Recherche du boson de Higgs dans ATLAS
 - si $M_H \sim 120$ GeV il sera cherché dans son mode de désintégration en deux photons: $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - Bruit de fond: π^0 qui ressemble à un photon

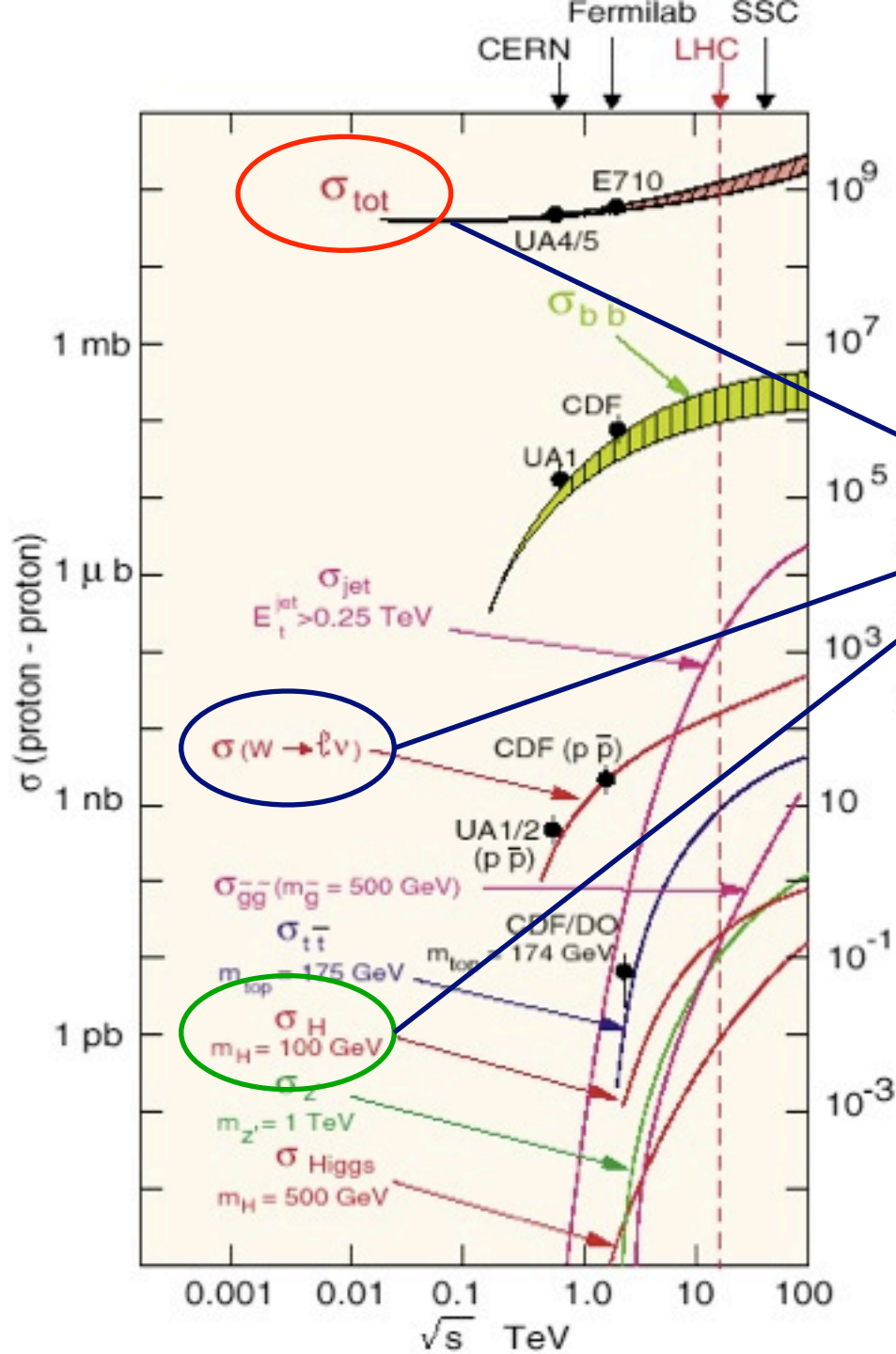


Réjection gamma/pizero



$pp \rightarrow \gamma\text{-jet} \rightarrow \gamma + \pi^0 + X$

Propriétés importantes: le déclenchement



Il faut être capable de sélectionner les bons evts

Caractéristiques générales



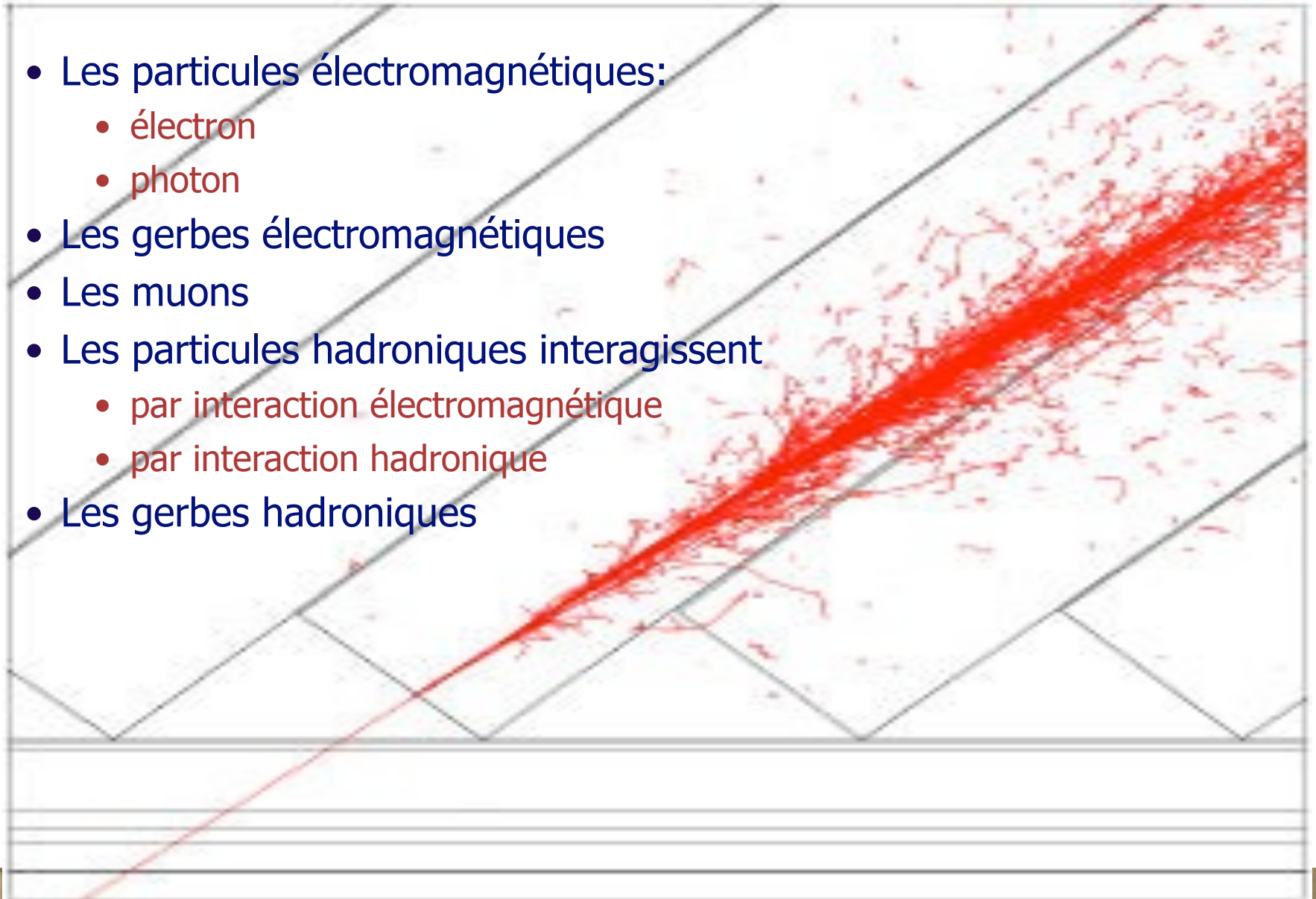
- Les calorimètres ont les propriétés suivantes:
 - Sensibles aux particules **neutres** et **chargées**
 - La **précision** sur la mesure de l'énergie **augmente avec l'énergie** (comportement opposé à celui de la mesure de l'impulsion par analyse magnétique)
 - Mesure **sans champ** magnétique
 - La réponse varie comme $\ln(E)$: compact (relatif!)
 - Possibilité de **segmenter** pour mesurer la **position**
 - Réponse rapide (\sim ns pour LHC)
 - Capacité de déclenchement

Développement des gerbes

A photograph of a sandy beach with waves in the background, framed by a dark blue border. The text 'Développement des gerbes' is overlaid in green.

Le développement des gerbes

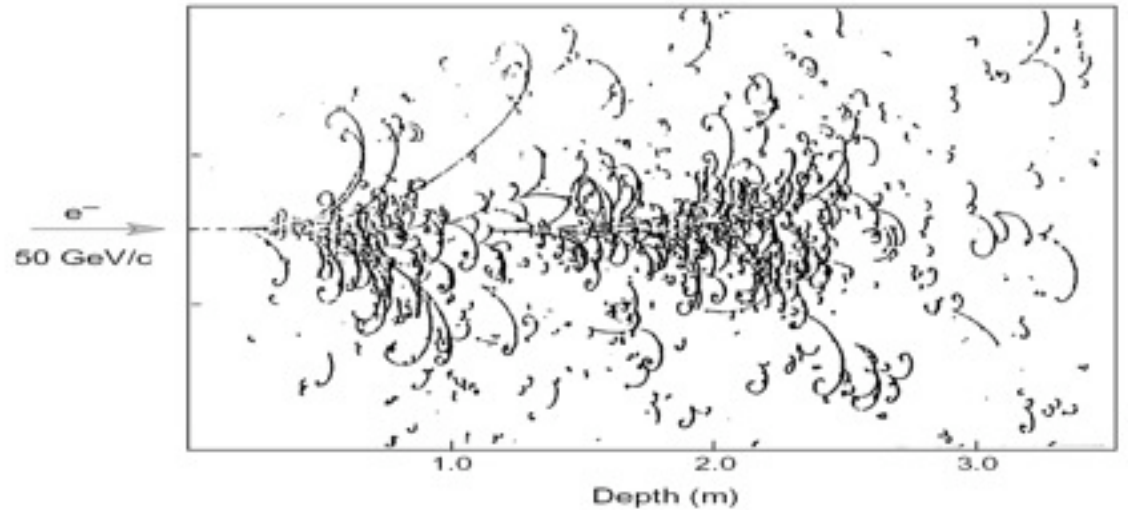
- Les particules électromagnétiques:
 - électron
 - photon
- Les gerbes électromagnétiques
- Les muons
- Les particules hadroniques interagissent
 - par interaction électromagnétique
 - par interaction hadronique
- Les gerbes hadroniques



Glossaire

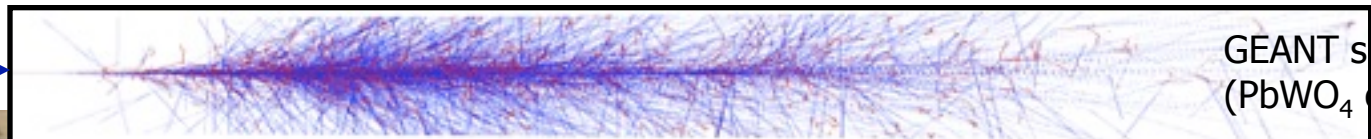
- em/EM: électromagnétique
- E: énergie
- p: impulsion
- m: masse
- λ_0 : longueur de radiation
- λ : longueur d'interaction
- Z: numéro atomique des atomes (nombre d'électrons=nombre de protons)
- Bremsstrahlung = radiation = freinage
- Č = Čerenkov (émission de lumière)

Big European Bubble Chamber filled with Ne:H₂ = 70%:30%,
3T Field, L=3.5 m, X₀=34 cm, 50 GeV incident electron



Les gerbes électromagnétique

e



GEANT shower
(PbWO₄ crystal)

Quels processus entrent en jeu?

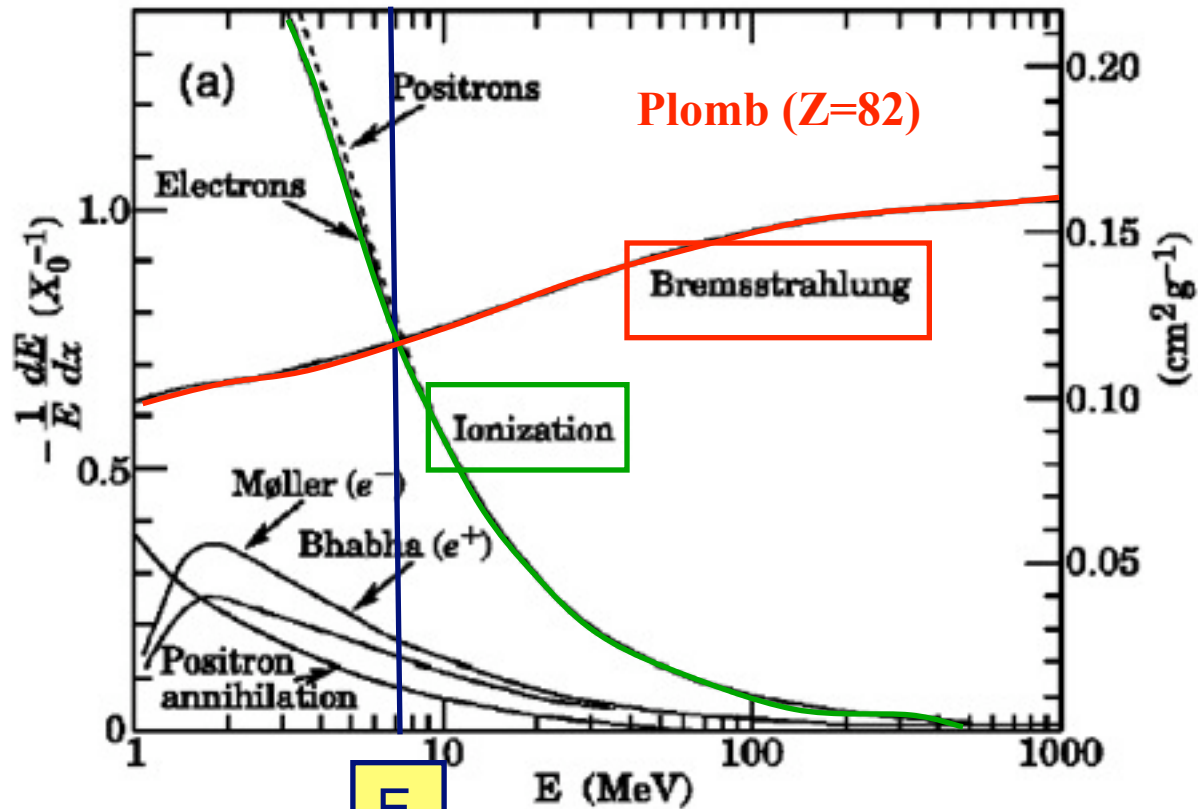
- Les gerbes électromagnétiques sont composées d'électrons et de photons.
 - les électrons interagissent en perdant de l'énergie (dE) en route (dx)
 - les photons (qui sont neutres) se transforment (section efficace) en produisant ou en déplaçant des électrons du cortège électronique des atomes
- On parle donc de
 - perte d'énergie dE/dx pour les électrons
 - section efficace $\sigma(E)$ pour les photons
- Nos calorimètres mesurent l'énergie de particules typiquement $E \sim \text{GeV}-\text{TeV}$; cependant, les processus élémentaires présents dans les gerbes mettent en jeu des énergies de l'ordre du keV ou du MeV.

Quels processus entrent en jeu?

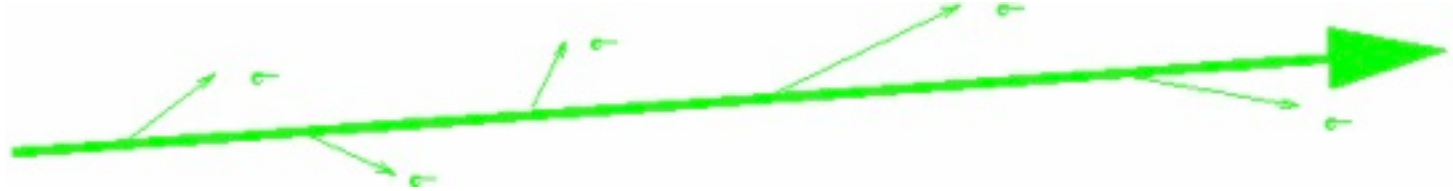
Electrons

Les électrons perdent leur énergie principalement par **ionisation** et **rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)**

L'importance de ces processus varient avec l'énergie



Electrons et Positons: ionisation



- **l'ionisation** : interaction des particules chargées avec les électrons du cortège électronique de l'atome
- Ce processus est dominant à basse énergie $E < E_c$ ($E_c(\text{Pb}) = 7.4 \text{ MeV}$)
- Toute l'énergie de la gerbe électromagnétique est ultimement perdue par ionisation (et aussi excitation du milieu)
- (cf cours de Philippe Schwemling en 2008)

Processus détectable: ionisation

Energie critique E_c

$$\left. \frac{dE}{dx} (E_c) \right|_{Brem} = \left. \frac{dE}{dx} (E_c) \right|_{ioniz} \Rightarrow E_c$$

Solide

$$E_c = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24}$$

Liquide

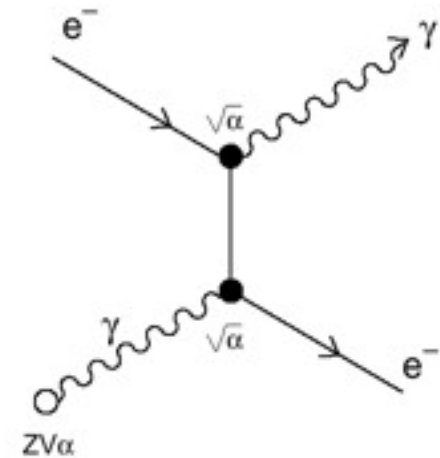
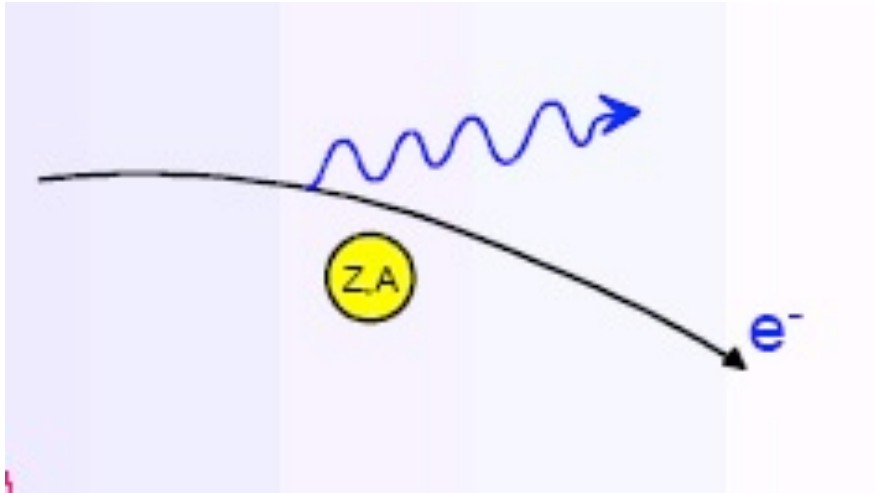
$$E_c = \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92}$$

Materiaux	Z	X_0 (cm)	E_c (MeV)
Argon liquide	18	14	37
Fe	26	1.8	22
Plomb	82	0.56	7.4
Uranium	92	0.32	6.2

Incidence: Il y a plus de particules ionisantes dans un milieu dense (grand Z)

Electrons et positons: rayonnement de freinage

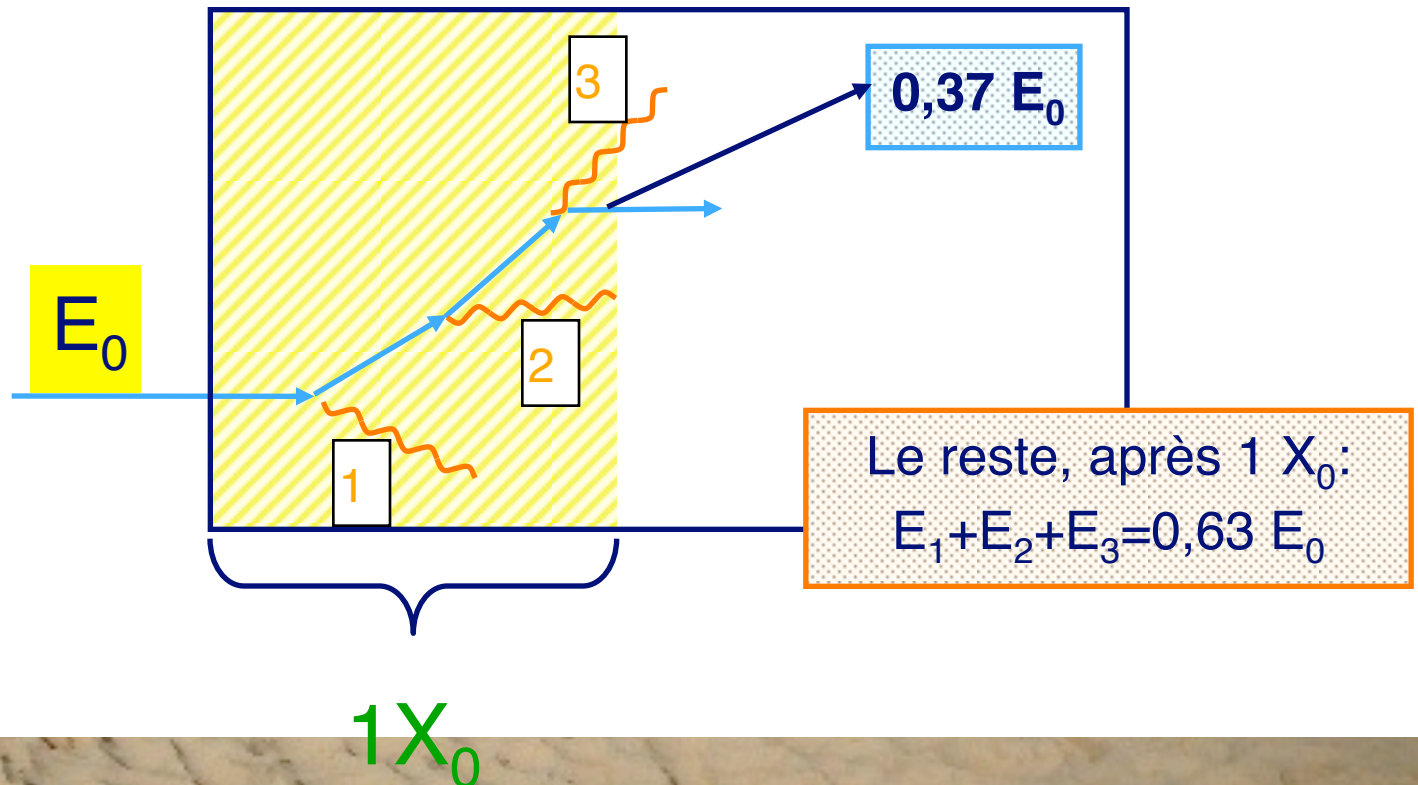
- Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung): émission de photons réels dans le champ coulombien du noyau atomique



$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{Brem} = \frac{E}{X_0}$$

Longueur de radiation: X_0

- **Définition:** La **longueur de radiation** X_0 est définie comme la distance pendant laquelle l'électron ou le positon **perd**, en moyenne, **63,2%** de son énergie par **radiation**
- $(0,632=1-1/e)$



Longueur de radiation: X_0

- Cette variable est très utilisée en calorimétrie car elle permet de décrire le comportement des gerbes em de façon générique (\sim) pour tous les matériaux
- Les électrons de haute énergie perdent la même fraction de leur énergie dans 18cm d'eau ($0.5X_0$) et dans 2.8mm de plomb ($0.5X_0$)

	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO ₄
Z	-	-	13	18	26	82	-
X_0 (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89

Longueur de radiation: X_0

Approximation

$$X_0 \approx \frac{(716 \text{ g cm}^{-2}) A}{Z(Z+1) \ln(287\sqrt{Z})}$$

Perte d'énergie des e^\pm par radiation $\langle E(x) \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$

Absorption des γ par production de paires $e^+ e^-$

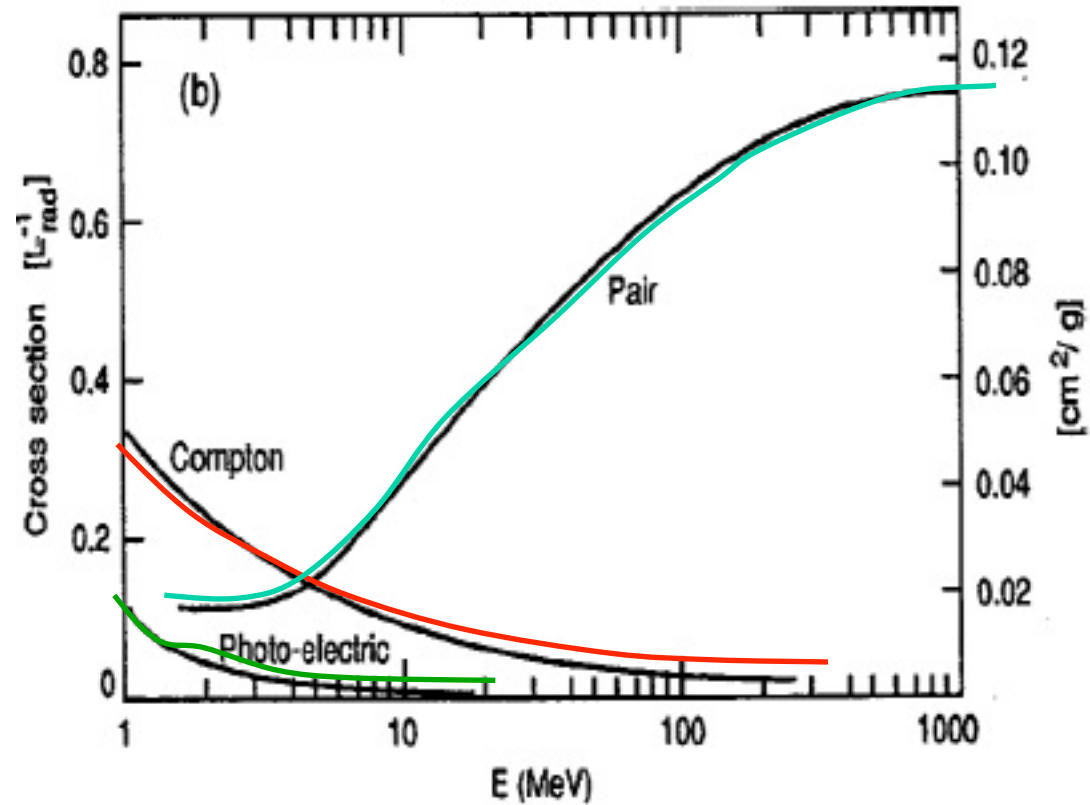
$$\langle I(x) \rangle = I_0 e^{-\frac{7}{9} \frac{x}{X_0}}$$

Même échelle d'énergie pour les e^\pm et les γ :

description universelle des gerbes em

Quels processus entrent en jeu?

- Les photons interagissent principalement selon trois processus élémentaires:
 - Effet photo-électrique
 - Compton
 - Production de paires



- Ces processus dépendent de l'énergie du photon

Photons: production de paires/conversion

- Interaction du photon avec le **champ électrique du noyau** ou **les électrons du cortège**

- Seuil: $E_\gamma \gg 2m_e$

$$\sigma_{conv} \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A X_0} = \frac{A}{N_A \lambda_{conv}}$$

- Longueur de conversion

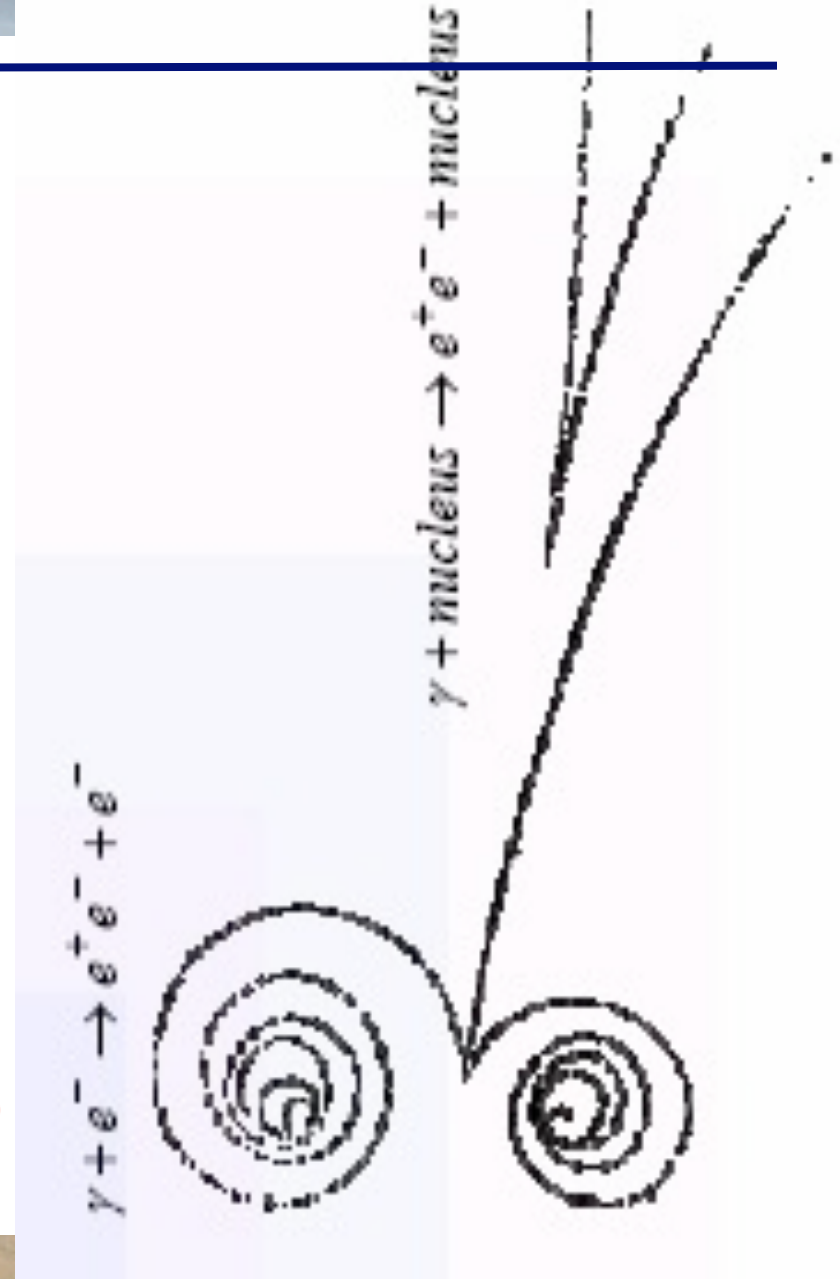
$$\lambda_{conv} = 9/7 X_0$$

- S.E. **indépendante de l'énergie** ($E_\gamma > 1\text{GeV}$)

- Après λ_{conv} , 1/e (63%) des photons ne sont pas convertis

- Pouvoir de pénétration des photons > celui des électrons (9/7)

- Paire émise dans la direction du photon: $\theta \sim m_e/E_\gamma$



Photons: effet photoélectrique

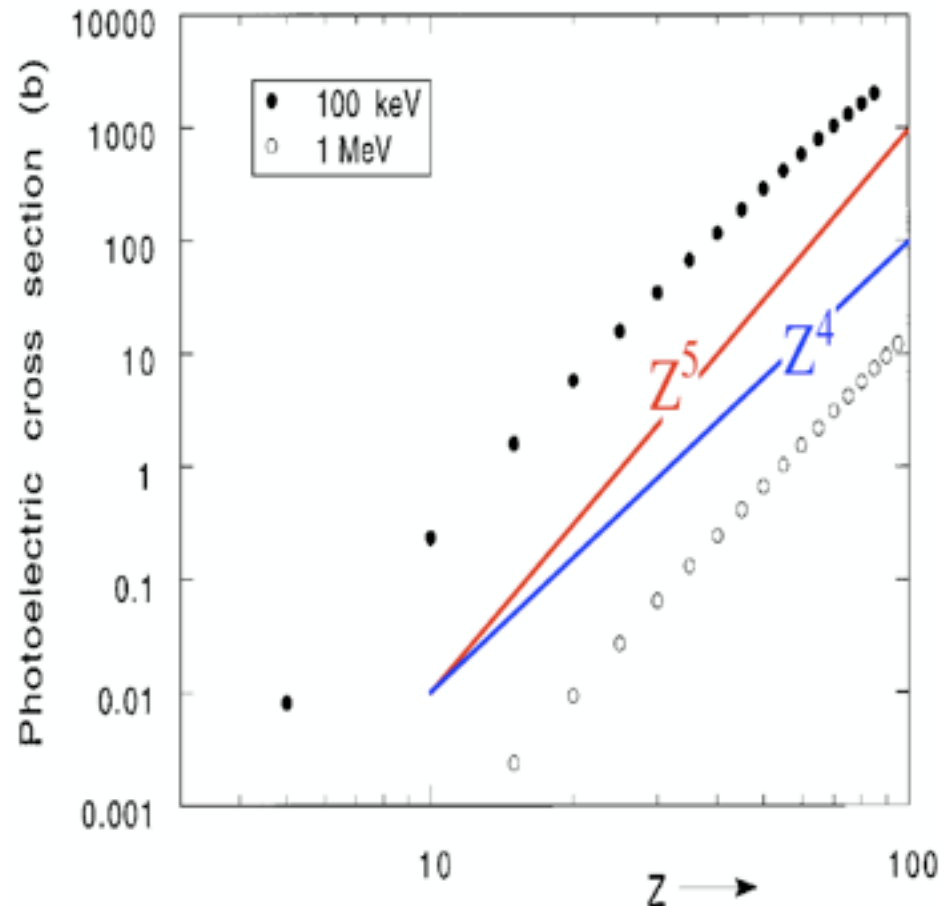
- Le photon arrache un électron de la couche atomique de l'atome:



- L'atome émet ensuite un photon de désexcitation.
- La section efficace de ce processus dépend fortement du nombre d'électrons disponibles donc du Z

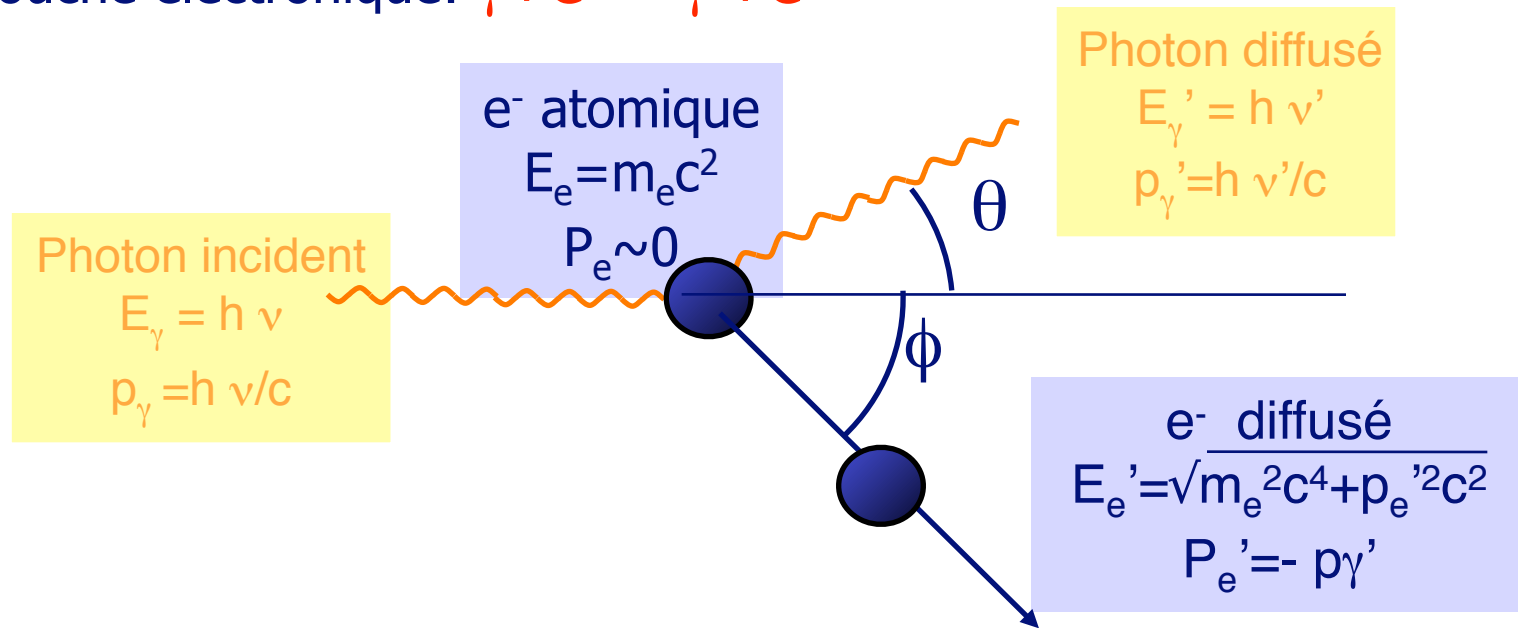
$$\sigma \propto \frac{Z^5}{E^3}$$

- Processus important à basse E
- Les e^- sont émis de façon isotrope



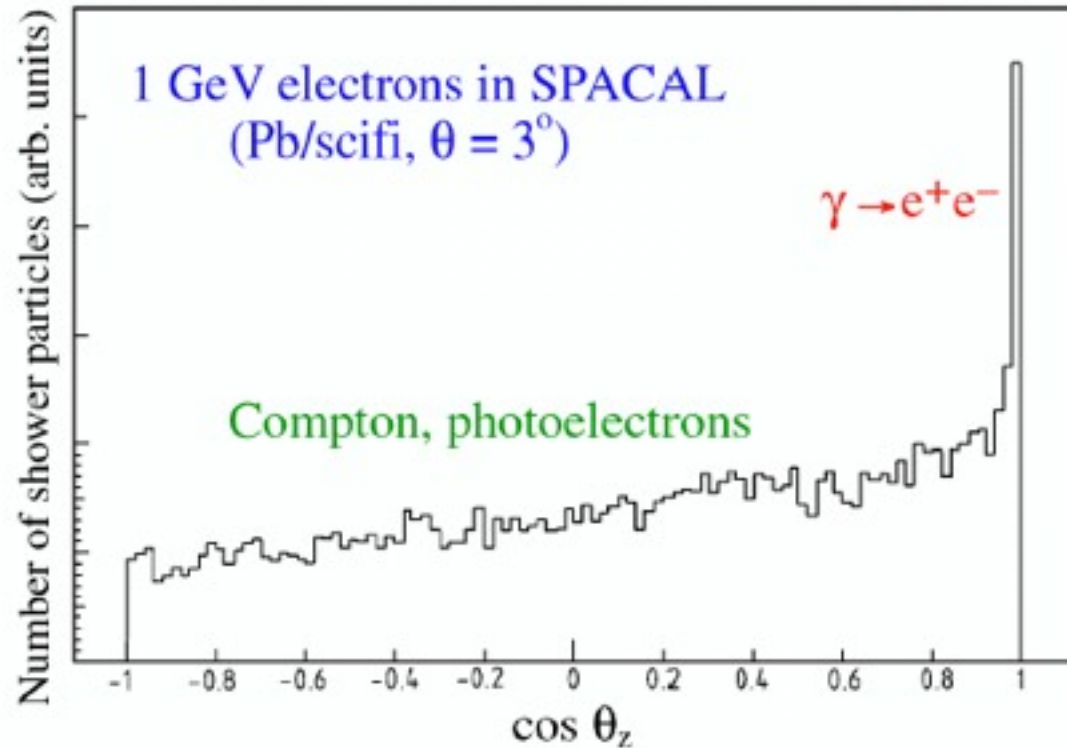
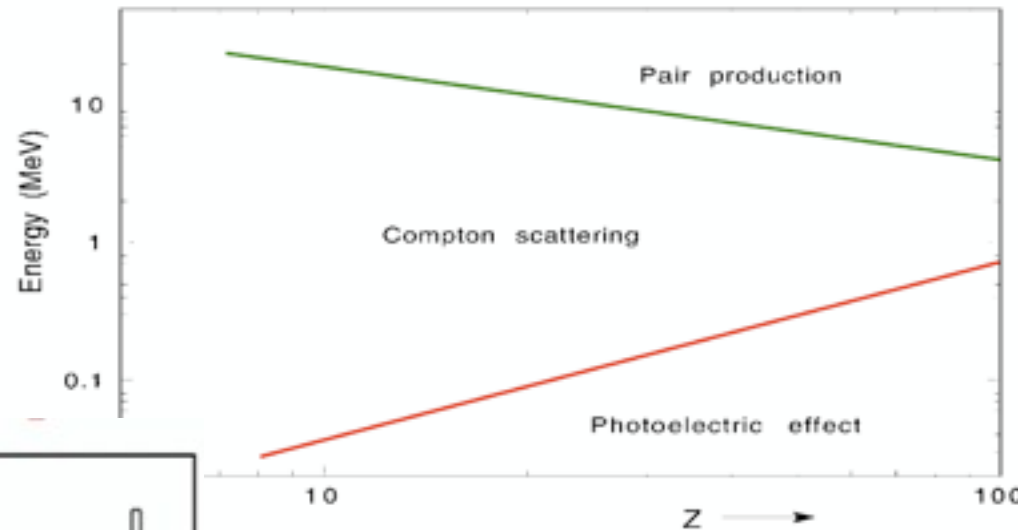
Photons: diffusion Compton

- Le photon est diffusé par un électron atomique; le photon transfère suffisamment d'impulsion et d'énergie à l'électron pour l'arracher de sa couche électronique: $\gamma + e^- \rightarrow \gamma' + e^-$



- La diffusion Compton est de loin le processus dominant pour les énergies de photons entre $\sim 100 \text{keV}$ et $\sim 5 \text{MeV}$.

Bilan: interactions des photons



Contributions to Photon Cross Section in Carbon and Lead

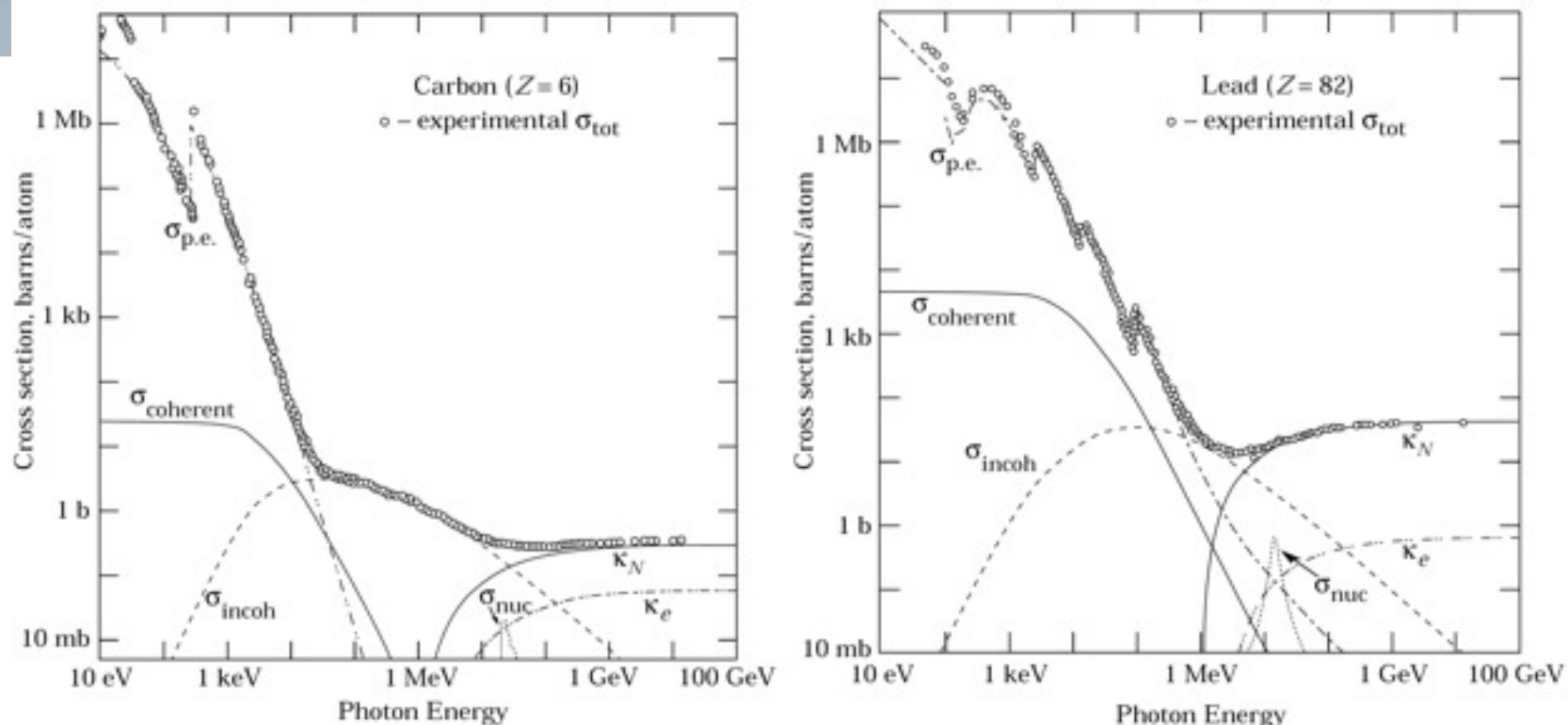


Figure 24.3: Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes:

- $\sigma_{p.e.}$ = Atomic photo-effect (electron ejection, photon absorption)
- $\sigma_{coherent}$ = Coherent scattering (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited)
- $\sigma_{incoherent}$ = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- κ_n = Pair production, nuclear field
- κ_e = Pair production, electron field
- σ_{nuc} = Photonuclear absorption (nuclear absorption, usually followed by emission of a neutron or other particle)

From Hubbell, Gimm, and Øverbø, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **9**, 1023 (80). Data for these and other elements, compounds, and mixtures may be obtained from <http://physics.nist.gov/PhysRefData>. The photon total cross section is assumed approximately flat for at least two decades beyond the energy range shown. Figures courtesy J.H. Hubbell (NIST).

Bilan: électrons vs photon



Reminder: basic electromagnetic interactions

4. Calorimetry

e^+ / e^-

■ Ionisation



■ Bremsstrahlung

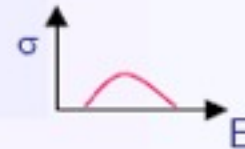


γ

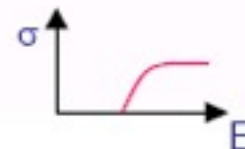
■ Photoelectric effect



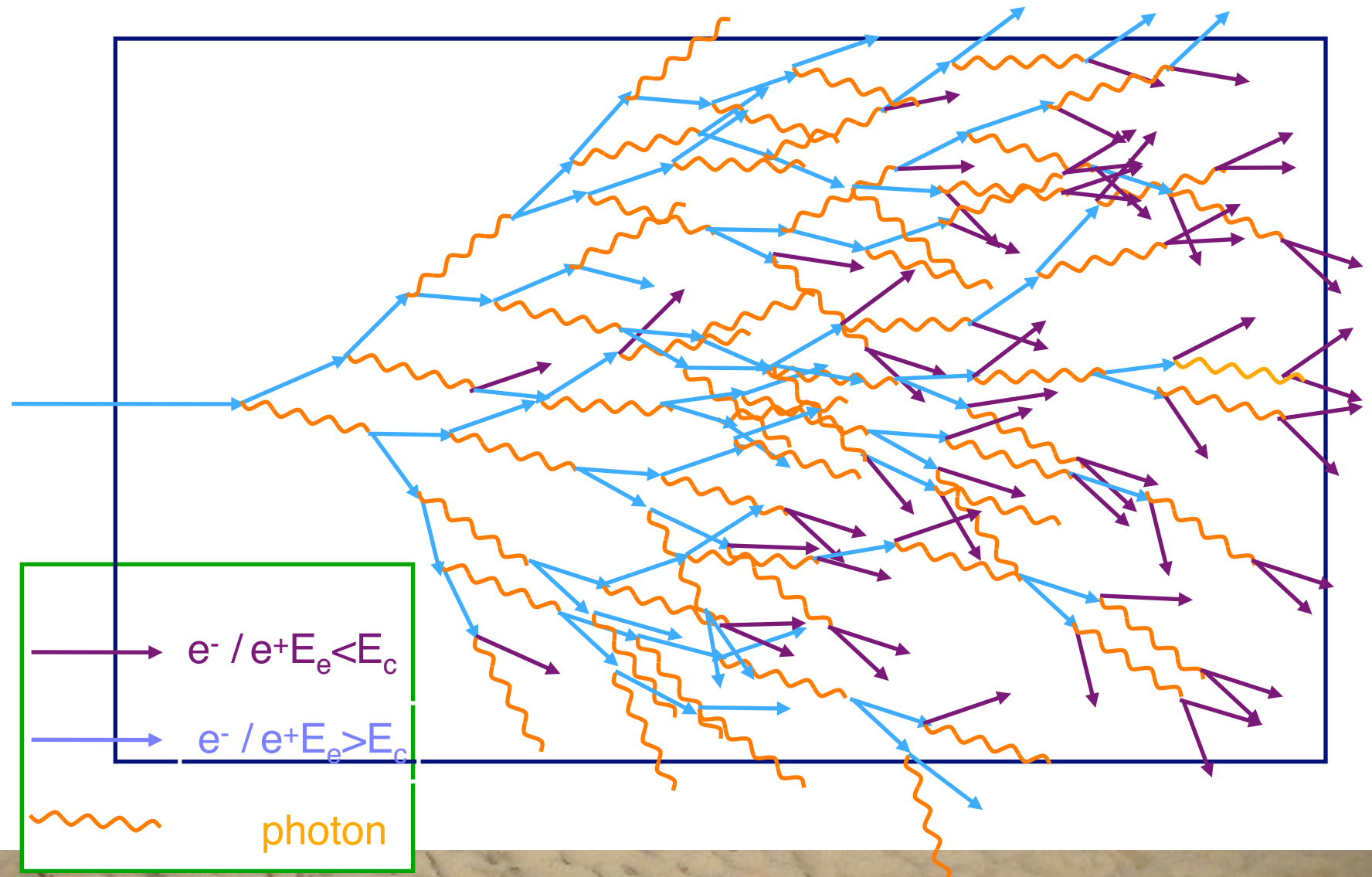
■ Compton effect



■ Pair production



Comment se forment les gerbes électromagnétiques?



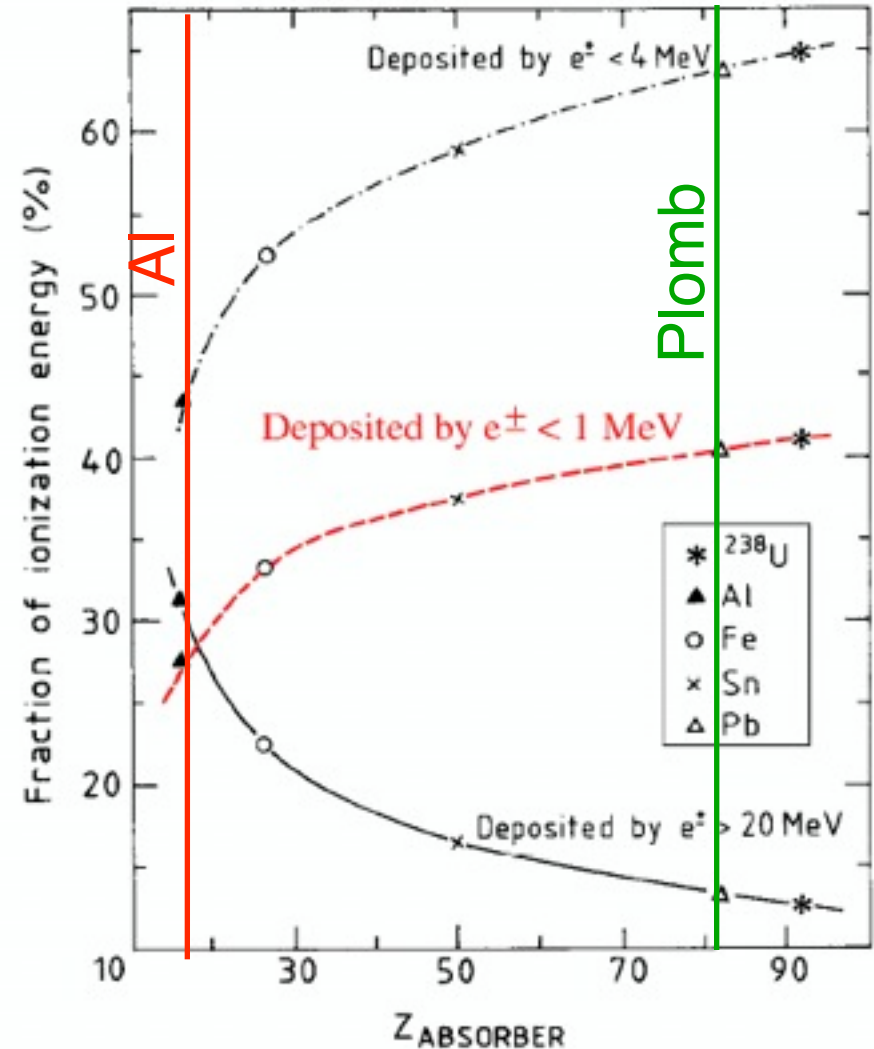
Résumé: formation des gerbes électromagnétiques

- La gerbe se forme par **transfert de l'énergie** de la particule incidente à une **multitudes des particules** (e^\pm et γ), par **cascade**.
- Le **nombre des particules** est **proportionnel** à **l'énergie déposée** par la particule incidente
- Le rôle du calorimètre est de **compter** ces particules
- Le poids relatif des différents processus décrits dépend de la nature du matériau (Z)
- La longueur de radiation permet de décrire les gerbes de façon universelle

La composition des gerbes électromagnétiques

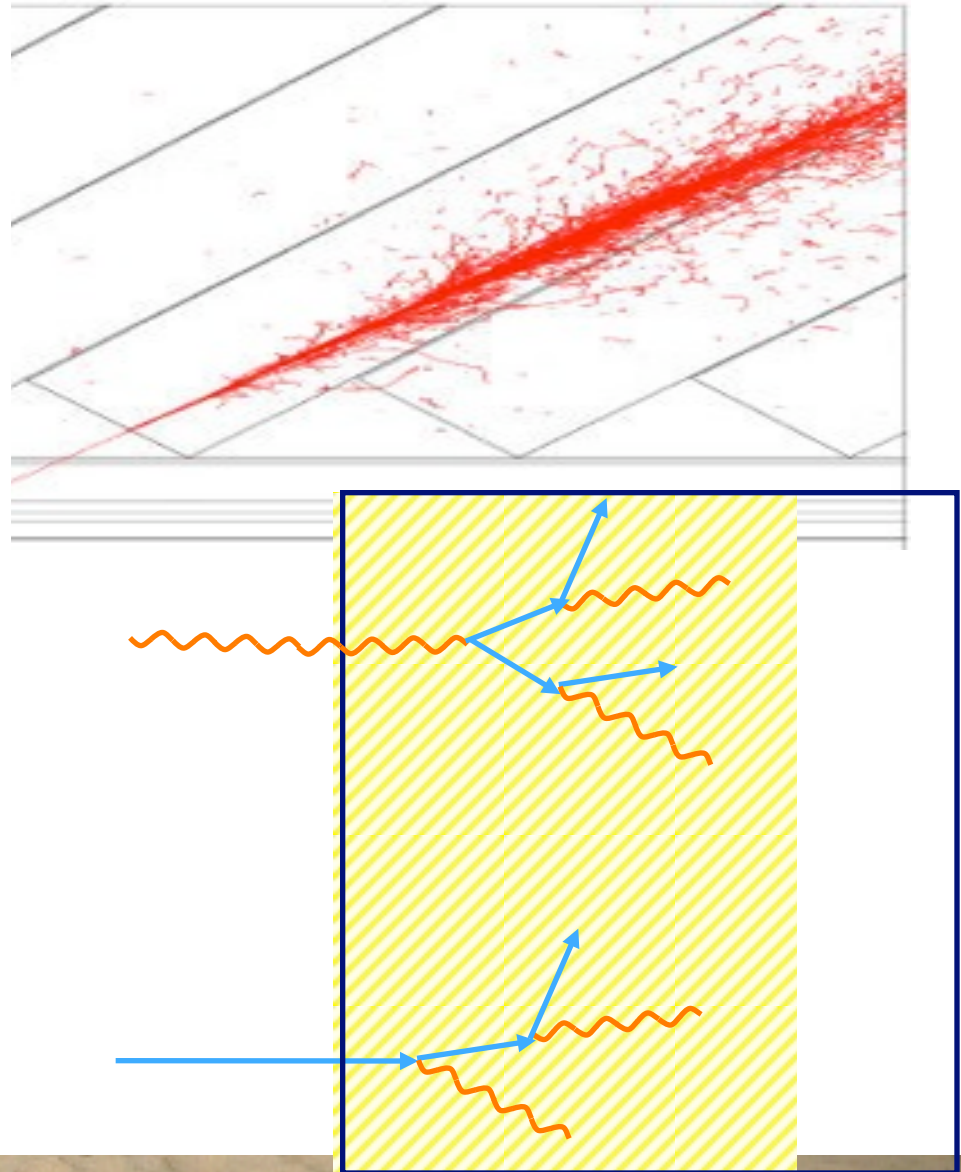
La contribution des particules de **basse énergie (MeV) domine:**

- 60% $E < 4$ MeV
- 15% $E > 20$ MeV

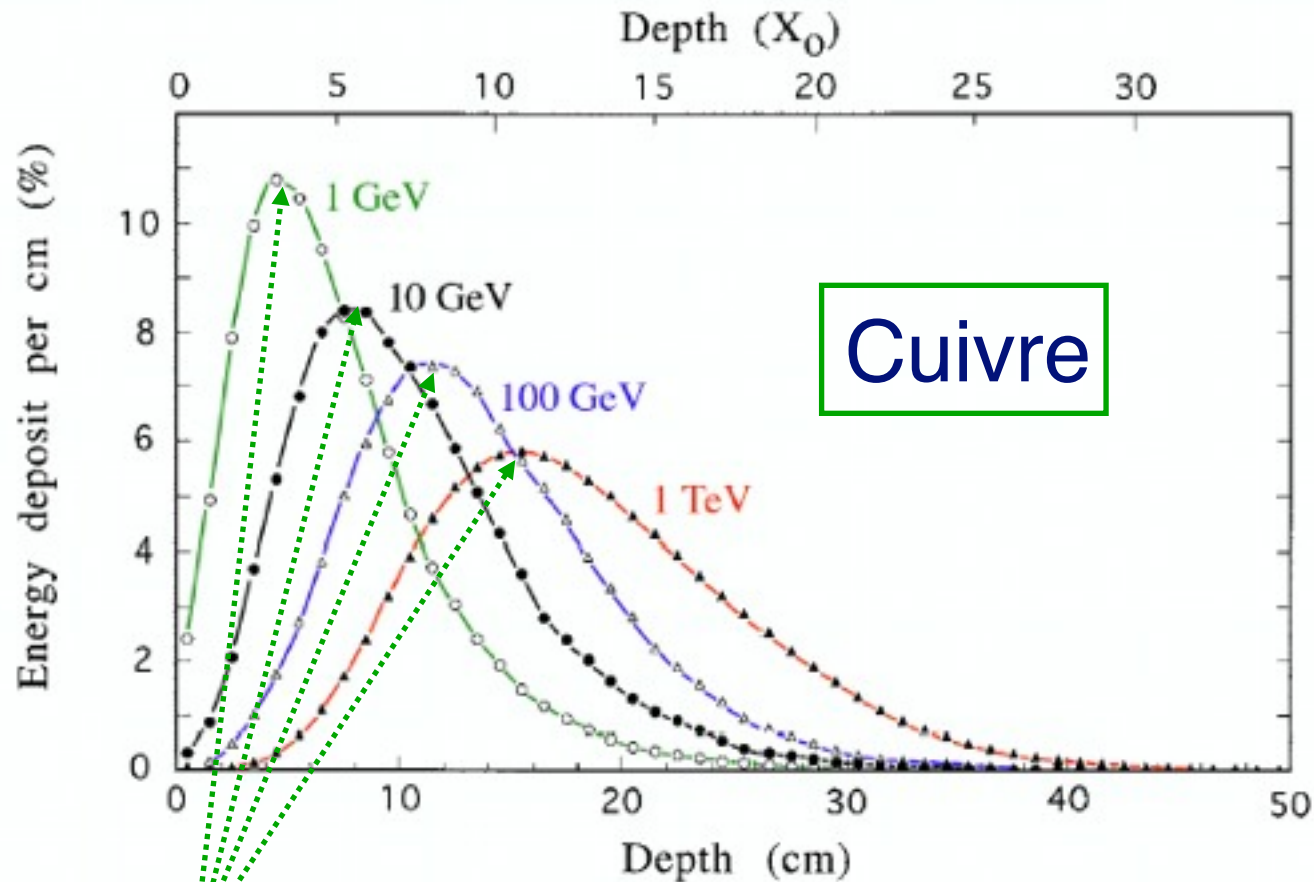


Le comportement des gerbes électromagnétiques

- Développement en profondeur
- Développement latéral
- Différence électron-photon



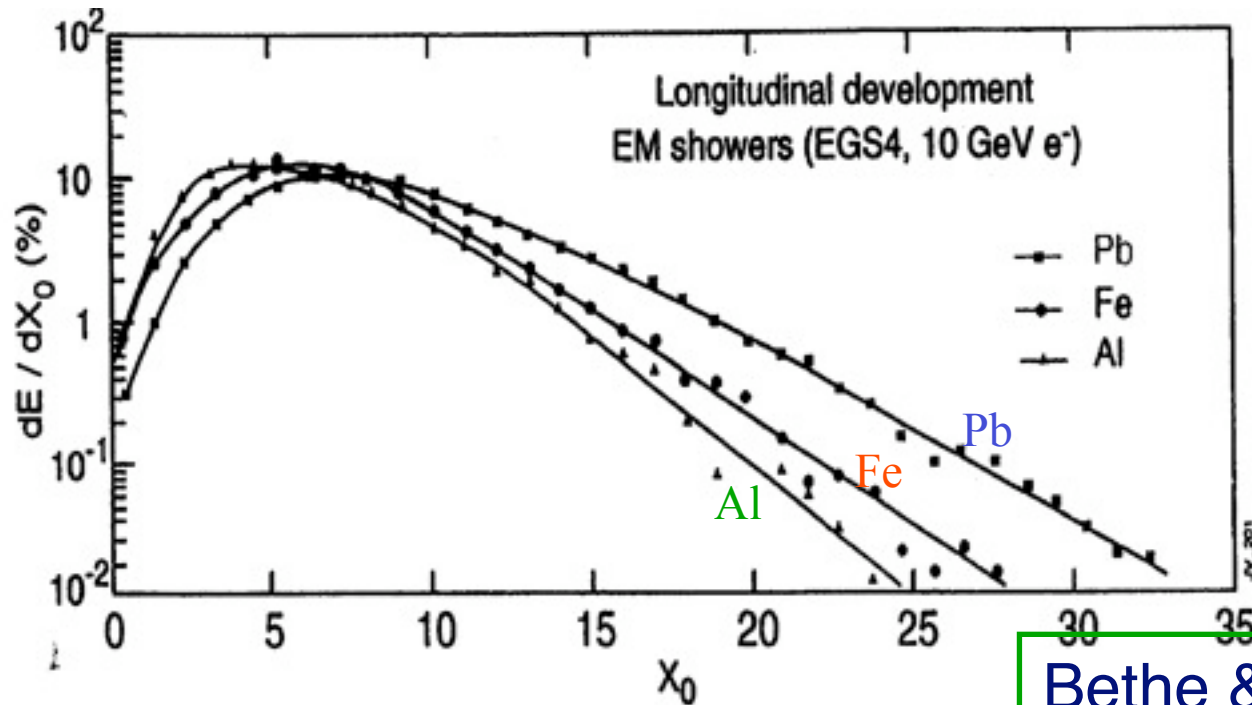
Développement longitudinal des gerbes



$$X_{\max} = X_0 \ln\left(\frac{E}{E_c} + t_0\right)$$

$$t_0 = -0.5 \text{ électrons} \\ + 0.5 \text{ photons}$$

Développement longitudinal des gerbes



Energie perdue pour $1X_0$

Bethe & Bloch

$$\frac{dE}{dx} X_0 \sim Z \frac{1}{Z^2} \sim \frac{1}{Z}$$

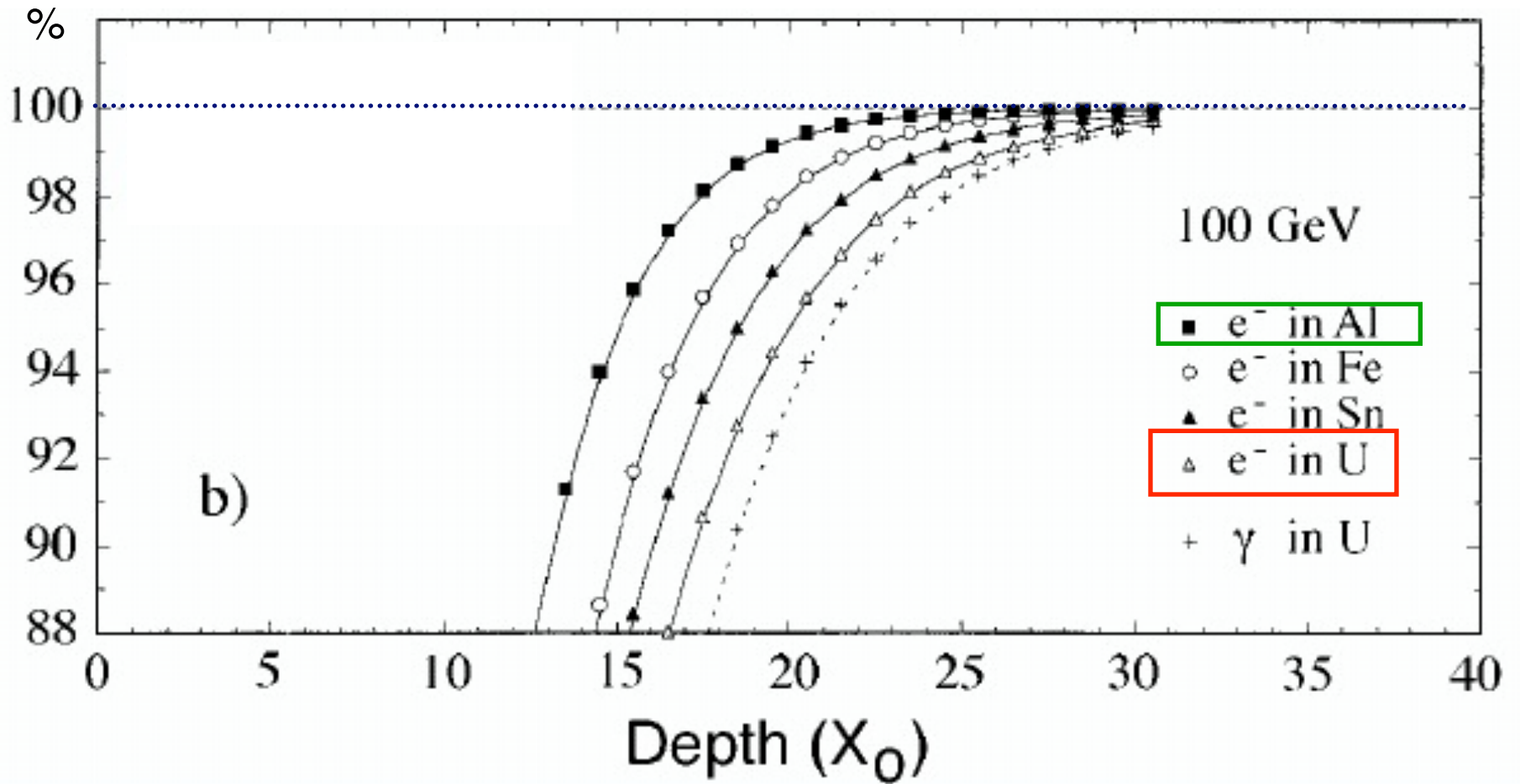
p30

Tout n'est pas si simple: loi en X_0 est une approximation...

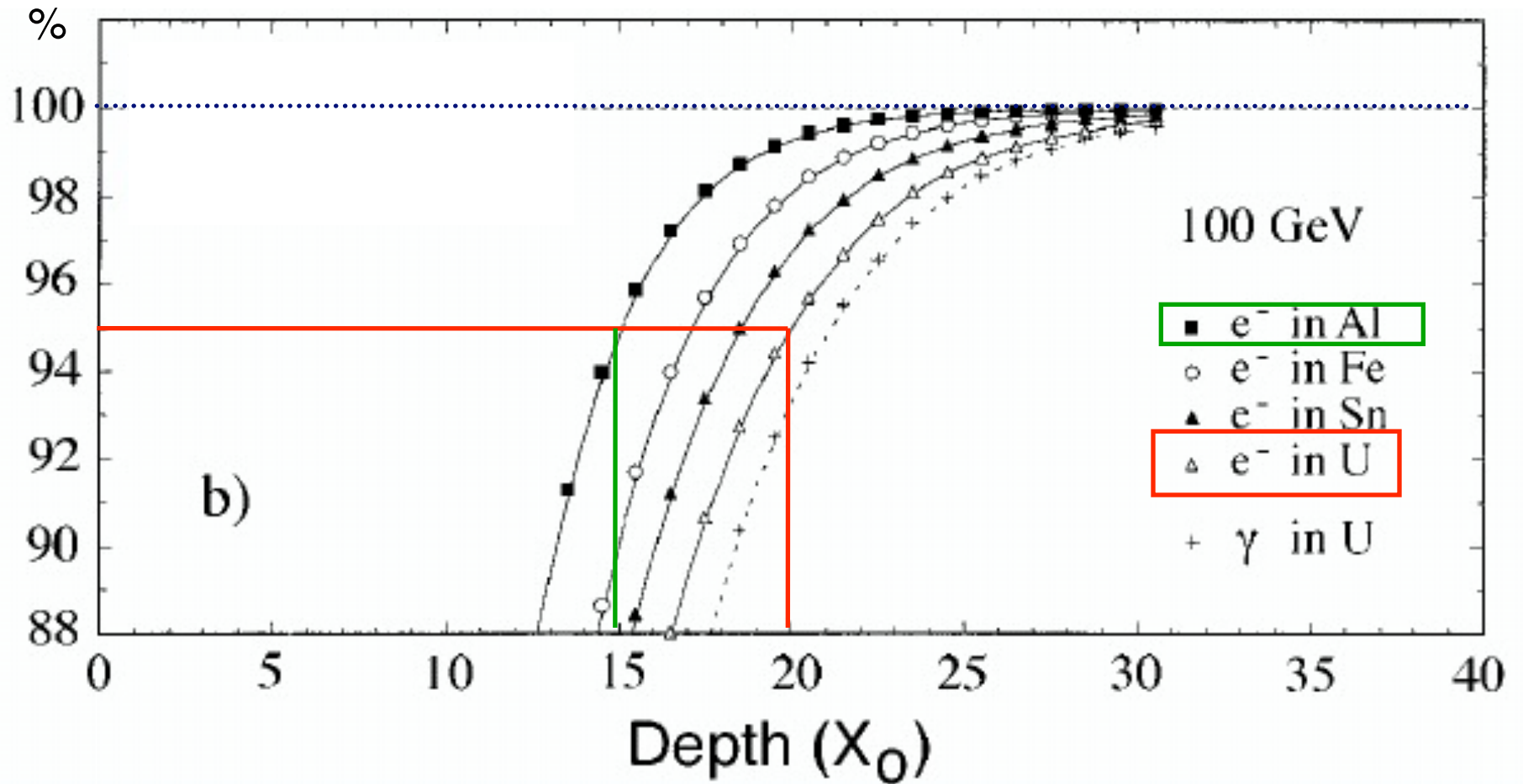
Développement longitudinal des gerbes

- **Explication:** La multiplication des particules continue plus pour les matériaux denses car l'énergie critique E_c est d'autant plus petite que Z est grand (page 26)
- **Incidence:** Pour contenir 99% de la gerbe il faut plus de X_0 d'Uranium ($Z=92$) que d'Aluminium ($Z=13$) (mais en cm, moins d'Uranium que d'Aluminium)

Contenir une gerbe

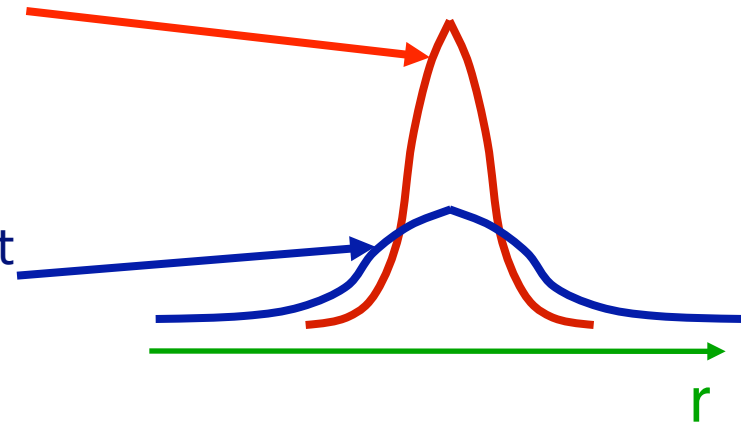


Contenir une gerbe



Profil transverse

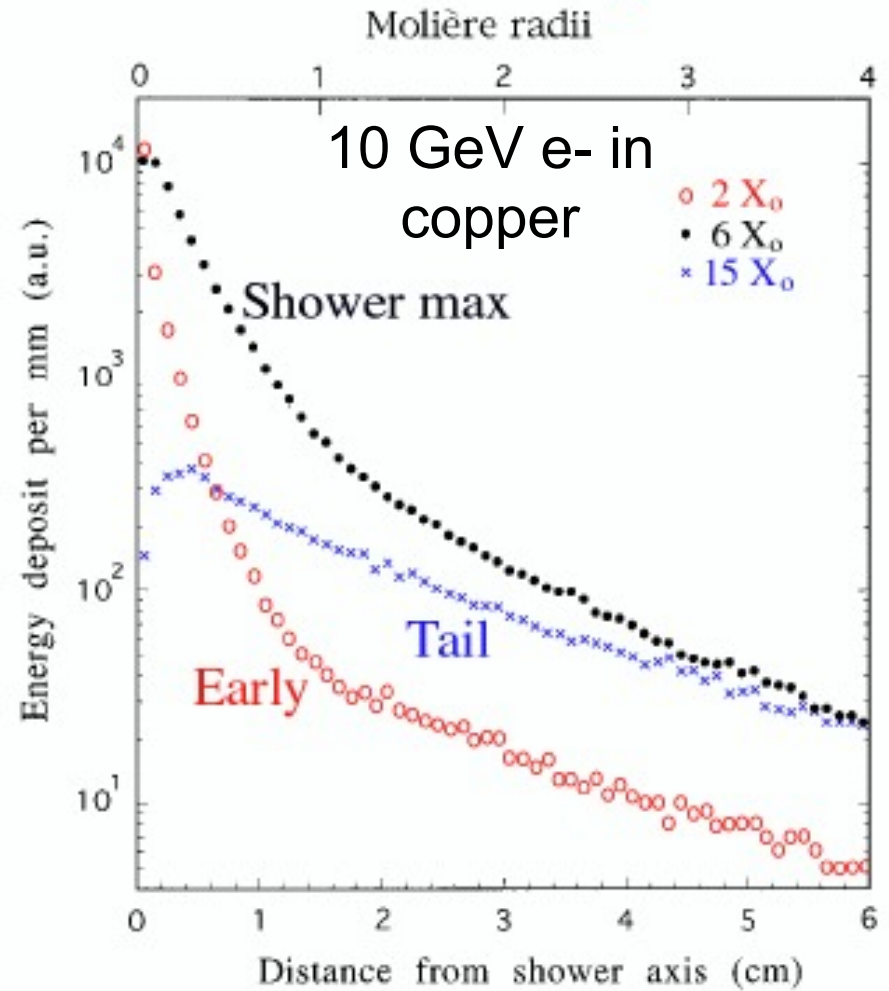
- Le développement transverse est dominé par deux effets:
 - création de paires + diffusion multiple des électrons et positons au démarrage de la gerbe.
 - photons et électrons produits par des processus isotropes (diffusion Compton, effet photo-électrique) vers la fin de la gerbe
- On définit le **rayon de Molière** R_M



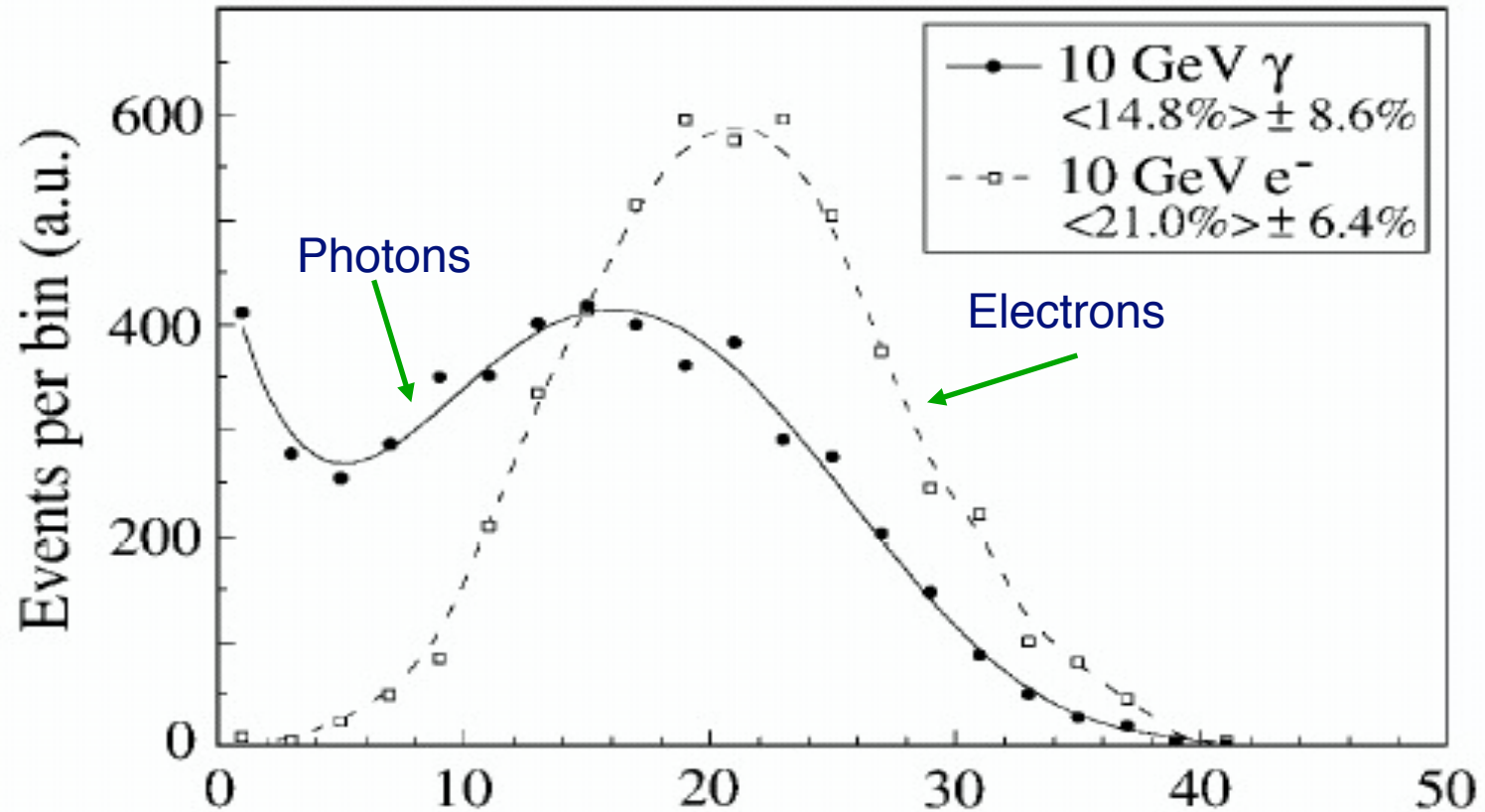
$$R_M \text{ (g/cm}^2\text{)} \sim 21 \text{ MeV} \frac{X_0}{E_c}$$

Profil transverse

Material	Z	X_0/cm	E_c/MeV	R_M/cm
LAr	18	14	37	8
Fe	26	1.8	22	1.7
PbWO ₄	-	0,89	-	2.2
Lead	82	0.56	7.4	1.6



Différence électron-photon



Fraction d'énergie déposée dans les 5 premiers X0 (%)

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
- 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

Forts de notre connaissance des gerbes électromagnétiques nous pourrions construire un calorimètre mais avant il faut comprendre les gerbes hadroniques

Fin du 1^{er} cours 18 juin 2009



La calorimétrie

cours n⁰ 2

La calorimétrie

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

Interactions avec
la matière

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



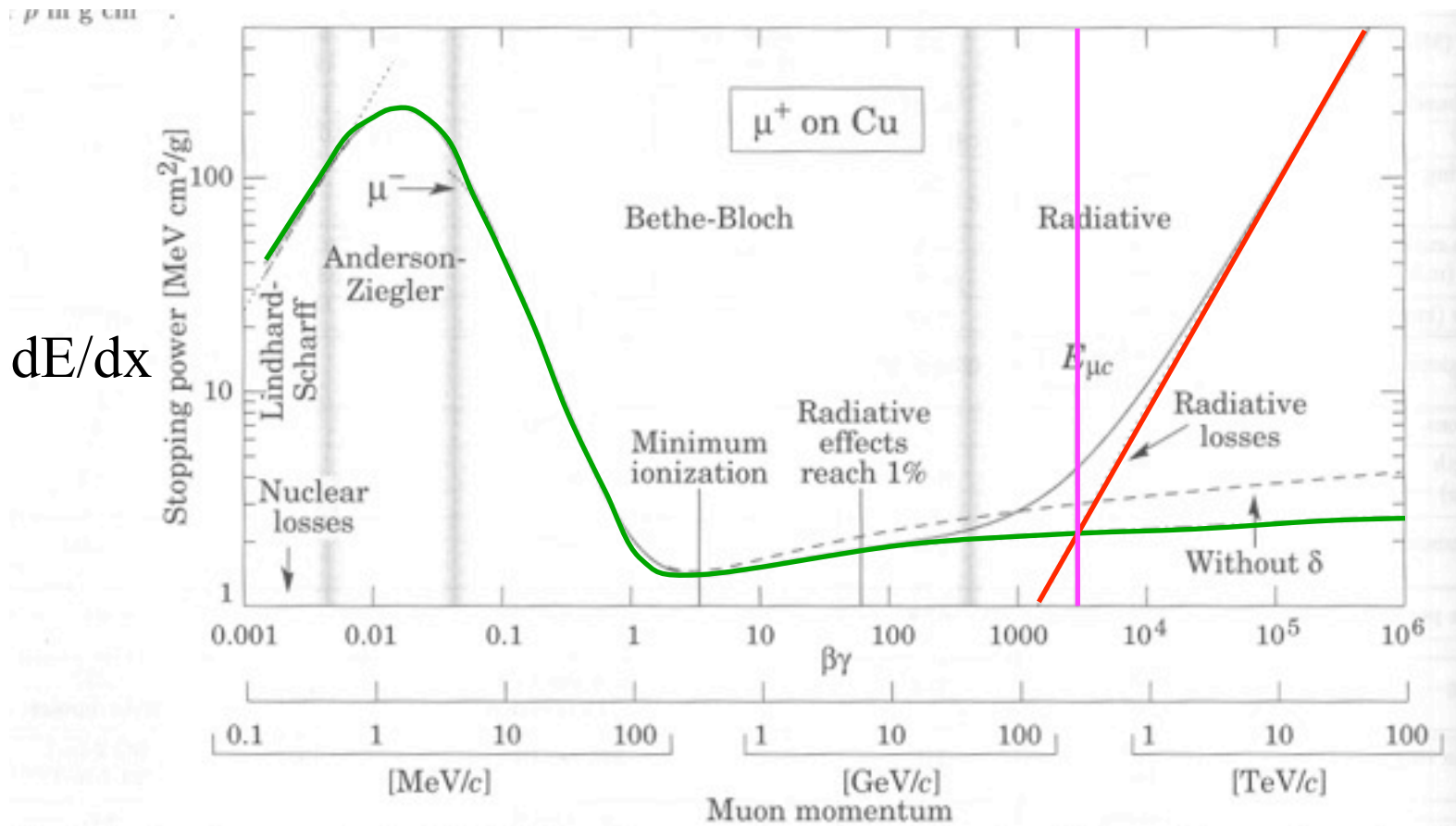
Interlude: les muons

Les muons dans la matière

- Les muons, qui sont des particules qui ressemblent aux électrons (leptons), n'interagissent pas dans la matière de la même façon que les électrons.
- En effet, le processus de Bremsstrahlung a une dépendance en $1/m^2$
 - $m_e = 0.519 \text{ MeV}/c^2$
 - $m_\mu = 105,66 \text{ MeV}/c^2$

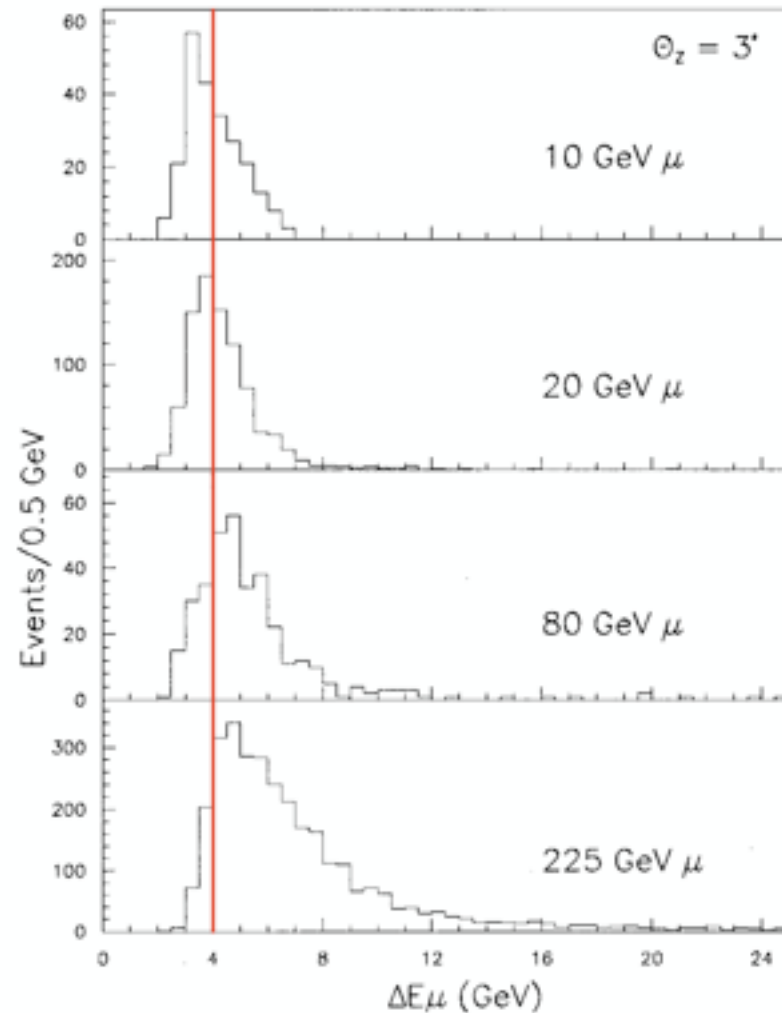
} $m_\mu / m_e \sim 200 \rightarrow (m_\mu / m_e)^2 \sim 40000$
- A la différence des électrons, les muons ($E < 100 \text{ GeV}$) perdent de l'énergie principalement par ionisation avec
 - $E_c(\mu) = (m_\mu/m_e)^2 \times E_c(e)$
 - $E_c(\mu) \approx 200 \text{ GeV}$ dans le Pb

Les muons dans la matière



Les muons dans la matière

- Le dépôt d'énergie des muons dans la matière n'est pas simplement proportionnel à leur énergie





Fin de l'interlude

Les gerbes hadroniques

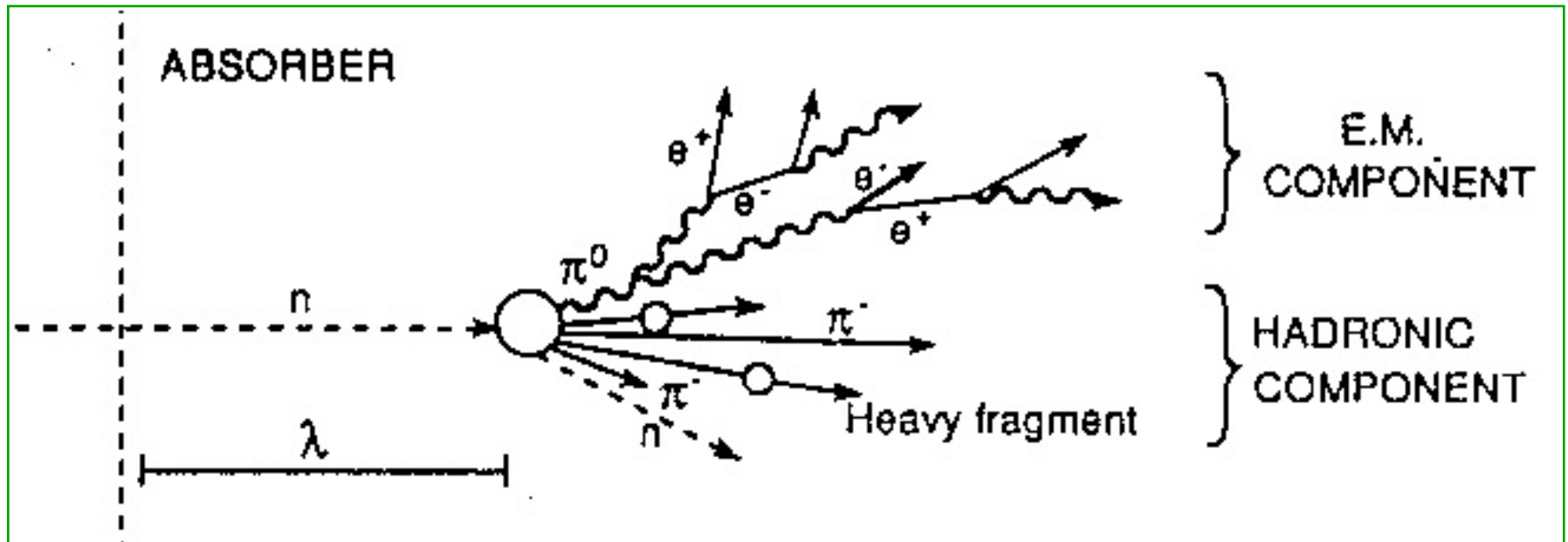


Les gerbes hadroniques

- La nature est faite de leptons et de quarks
 - Les leptons interagissent par interactions électromagnétique et faible (en fait les deux sont unifiées: interaction électrofaible)
 - Les quarks interagissent par interactions forte, électromagnétique et faible
- Les quarks se combinent pour former les hadrons qui interagissent avec la matière en développant des gerbes hadroniques régies par les interactions fortes et électromagnétiques

Gerbes hadroniques

- Le hadron incident (ici un neutron n) produit une cascade de particules secondaires par interactions **forte** et em.



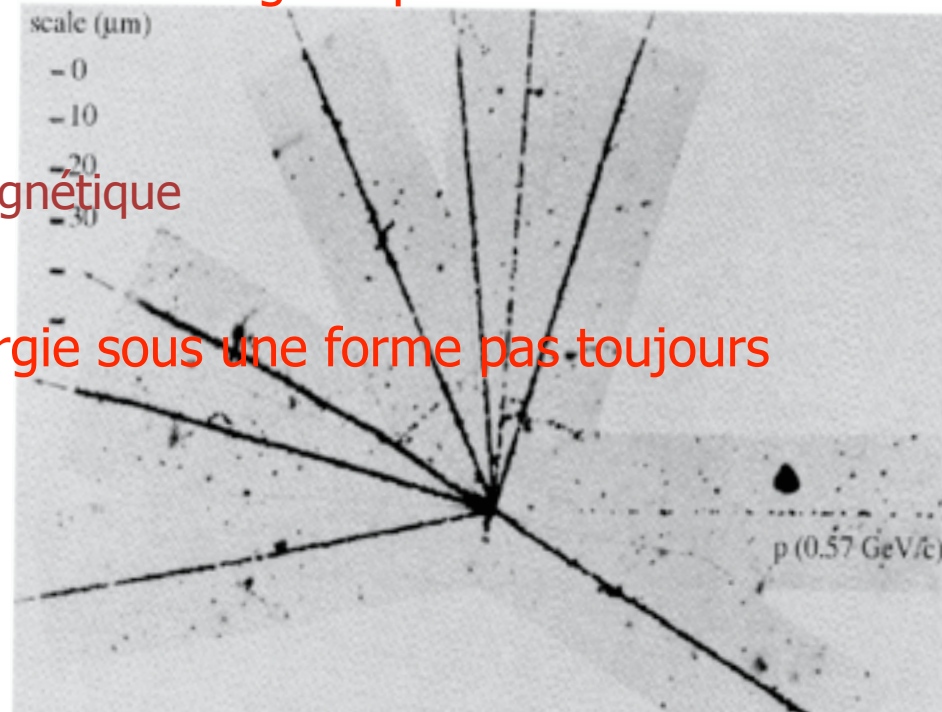
- Gerbes hadroniques sont plus compliquées que les gerbes em:
 - Composante électromagnétique: 30%
 - Composante hadronique: gde variété de processus compliqués

Les hadrons: hadroniques et électromagnétiques

- Il existe une multitude de hadrons de deux familles: mésons et baryons
- Les plus abondants sont les plus légers, les pions: π^+ , π^- , π^0
 $\Rightarrow \sim 30\%$ de l'énergie dans les π^0
- Le π^0 joue le rôle d'une particule électromagnétique car il se désintègre immédiatement en $\gamma\gamma$

\Rightarrow mesure de l'énergie électromagnétique

- Les hadrons produisent de l'énergie sous une forme pas toujours détectable



Gerbes hadroniques: interaction forte

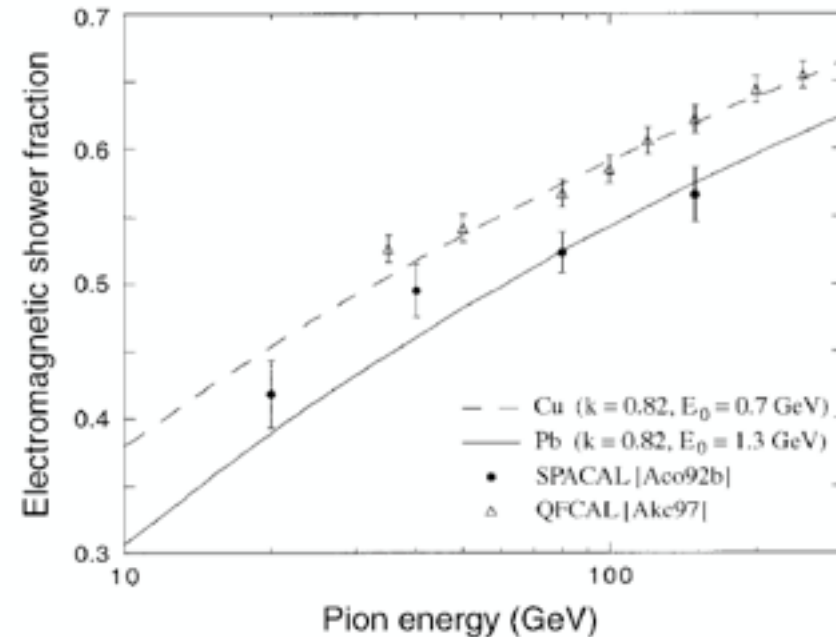
- Les phénomènes nucléaires (interactions entre les noyaux des atomes) sont multiples:
 - excitation nucléaire
 - fission
 -
- Plusieurs types de particules sont alors produites
 - ionisantes (p , α , frag. nucléaires): détectées
 - neutrons: souvent invisibles et peuvent voyager $\sim 1\mu\text{s}$
 - énergie invisible (énergie de liaison utilisée pour casser les noyaux)
- Seulement une fraction de l'énergie libérée est détectable puis détectée

Gerbes hadroniques: où va l'énergie?

	Plomb	Fer
Ionization by pions	19%	21%
Ionization by protons	37%	53%
<i>Total ionization</i>	56%	74%
Nuclear binding energy loss	32%	16%
Target recoil	2%	5%
<i>Total invisible energy</i>	34%	21%
Kinetic energy evaporation neutrons	10%	5%
Number of charged pions	0.77	1.4
Number of protons	3.5	8
Number of cascade neutrons	5.4	5
Number of evaporation neutrons	31.5	5
Total number of neutrons	36.9	10
Neutrons/protons	10.5/1	1.3/1

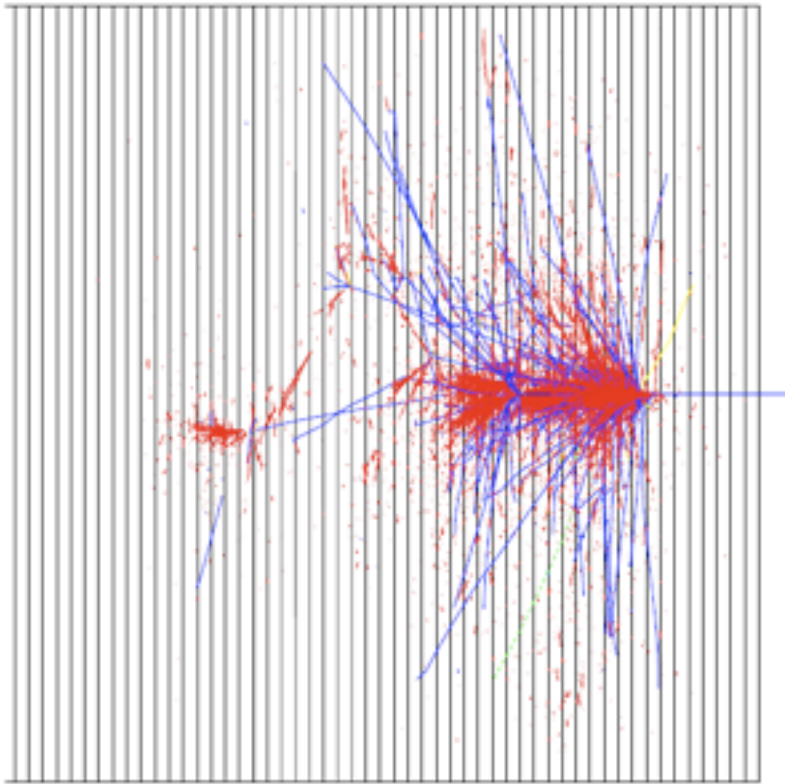
Gerbes hadroniques: composante électromagnétique

- En moyenne, pour chaque interaction, 1/3 des mésons produits sont des π^0 s (π^+ , π^0 et π^- sont produits démocratiquement)
 - Et ainsi de suite pour chaque génération.....
- Hypothèse: une fraction, f_0 , d'énergie e.m. est produite à chaque interaction:
 - 1^{ère} génération: f_0
 - 2nd génération: $f_0 + f_0(1 - f_0)$
 - $F_0 = f_0 \sum (1 - f_0)^{n-1}$
après n générations
 - $F_0 = 1 - (1 - f_0)^n$
- Ainsi:
 - à basse énergie $F_0 \approx f_0$
 - à très haute énergie $F_0 \rightarrow 1$

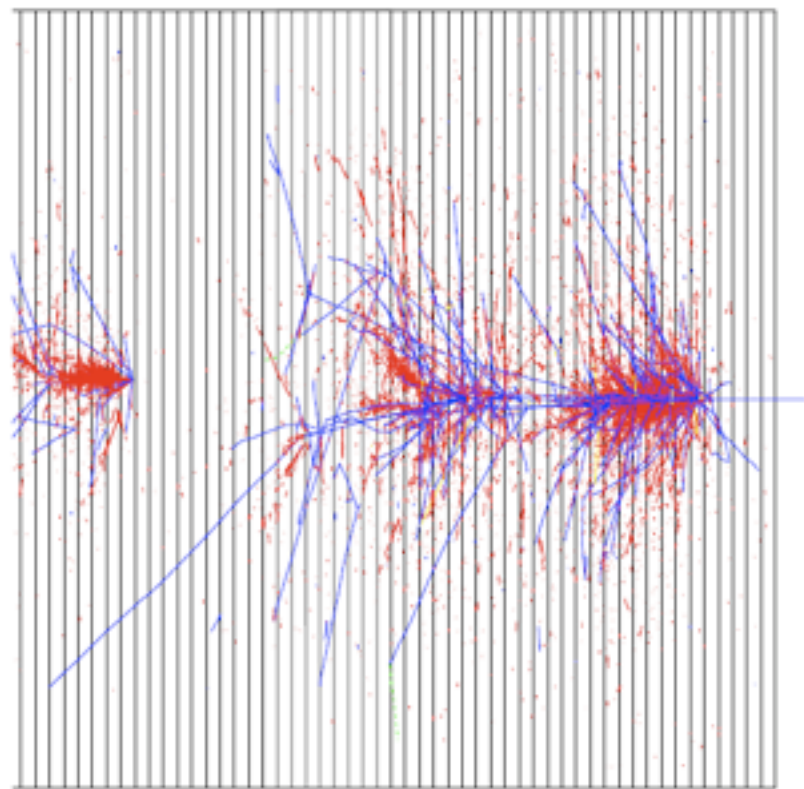


Two hadronic events in a calorimeter

1.

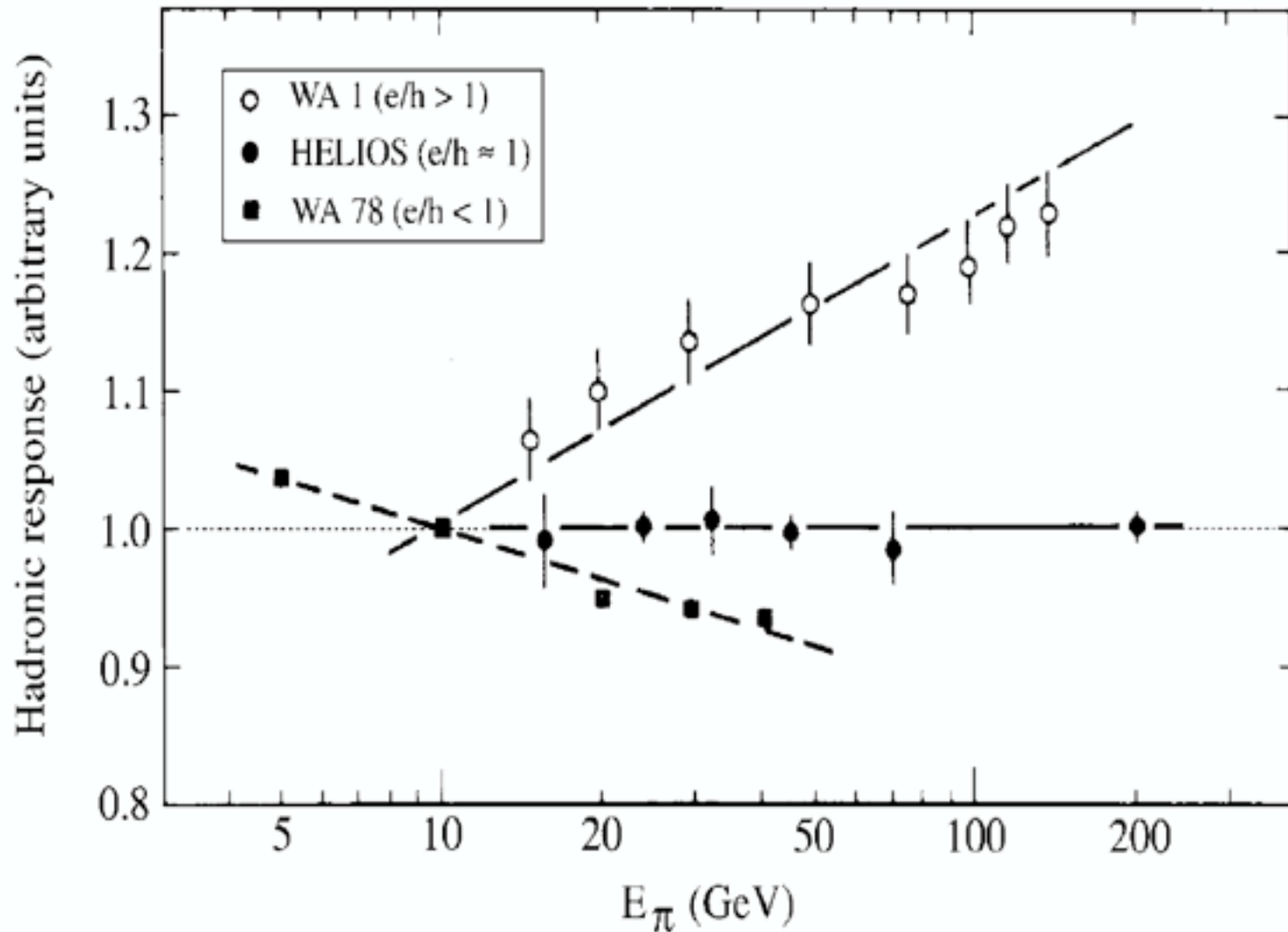


2.

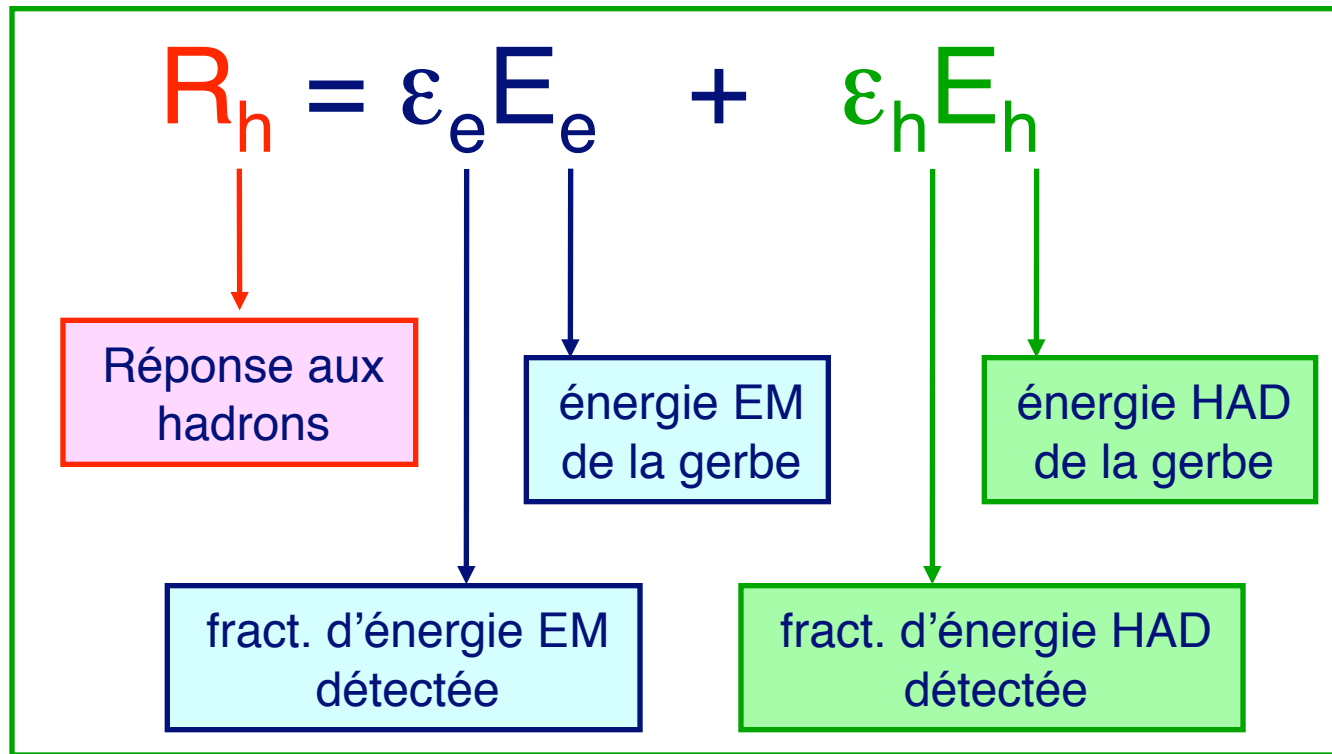


red - e.m. component
blue - charged hadrons

Gerbes hadroniques: non-linéarité



Gerbes hadroniques: non compensation



$$\frac{e}{h} = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_h}$$

≈ 1 : calorimètre compensant

> 1 : calorimètre non-compensant

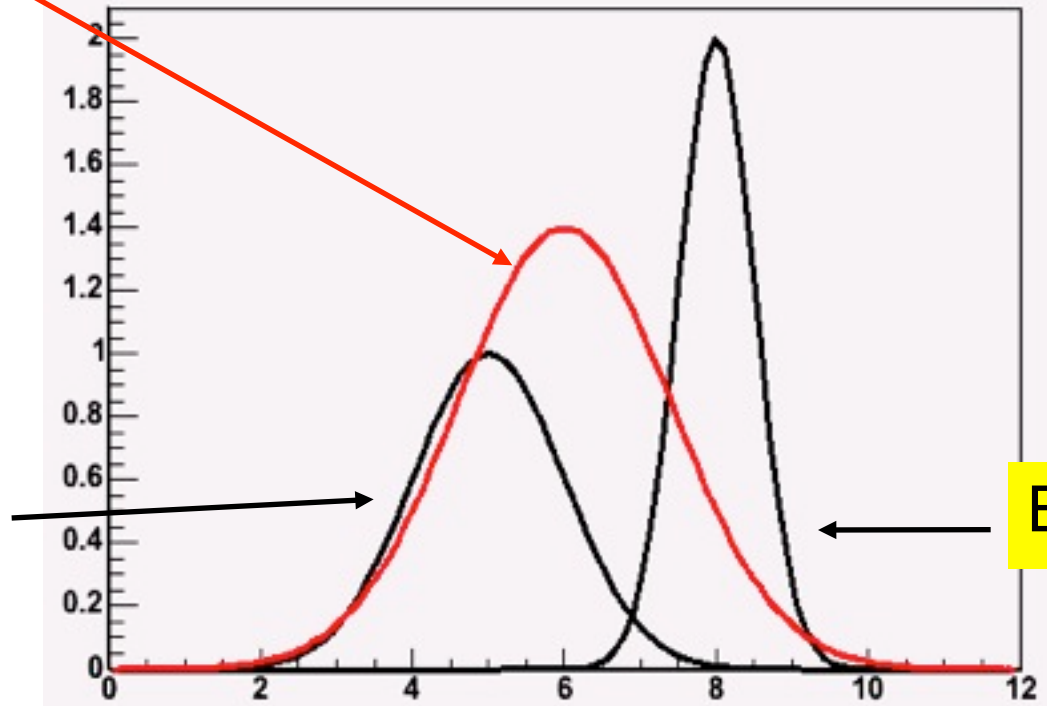
Gerbes hadroniques: non compensation

$$R_h = \varepsilon_e E_e + \varepsilon_h E_h$$

$$\varepsilon_e > \varepsilon_h$$

$$E_e \ll E_h$$

$$E_e \gg E_h$$



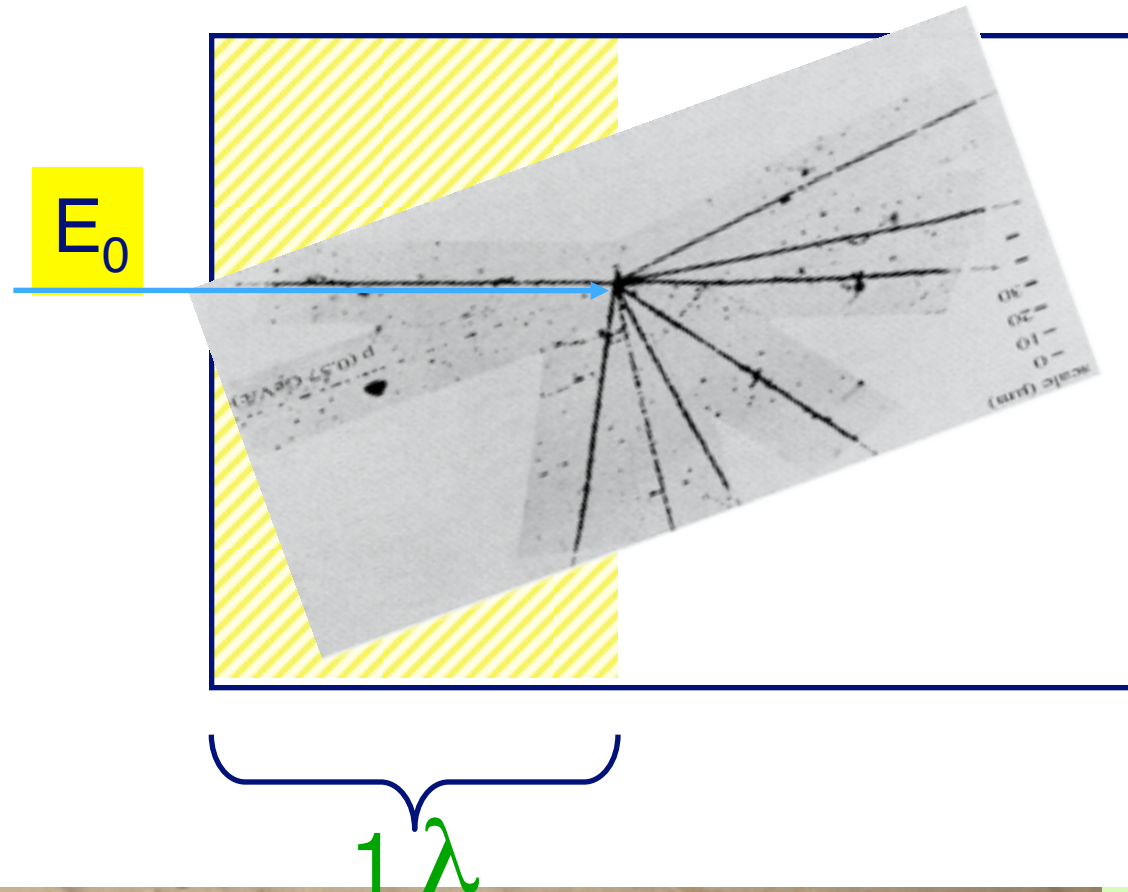
Longueur d'interaction nucléaire: λ_{int}

- **Définition:** La **longueur** d'interaction nucléaire λ_{int} est définie comme la distance moyenne qu'un hadron de haute 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:

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

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



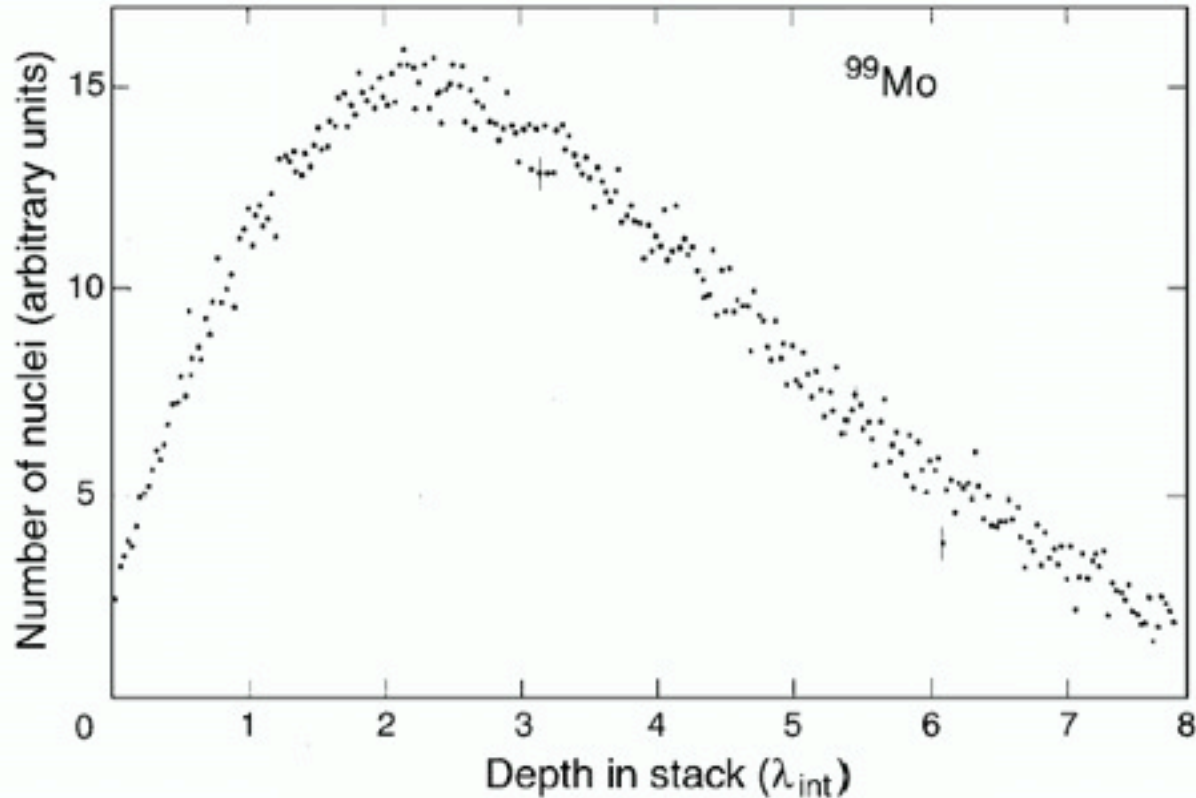
Longueur d'interaction nucléaire: λ_{int}

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

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

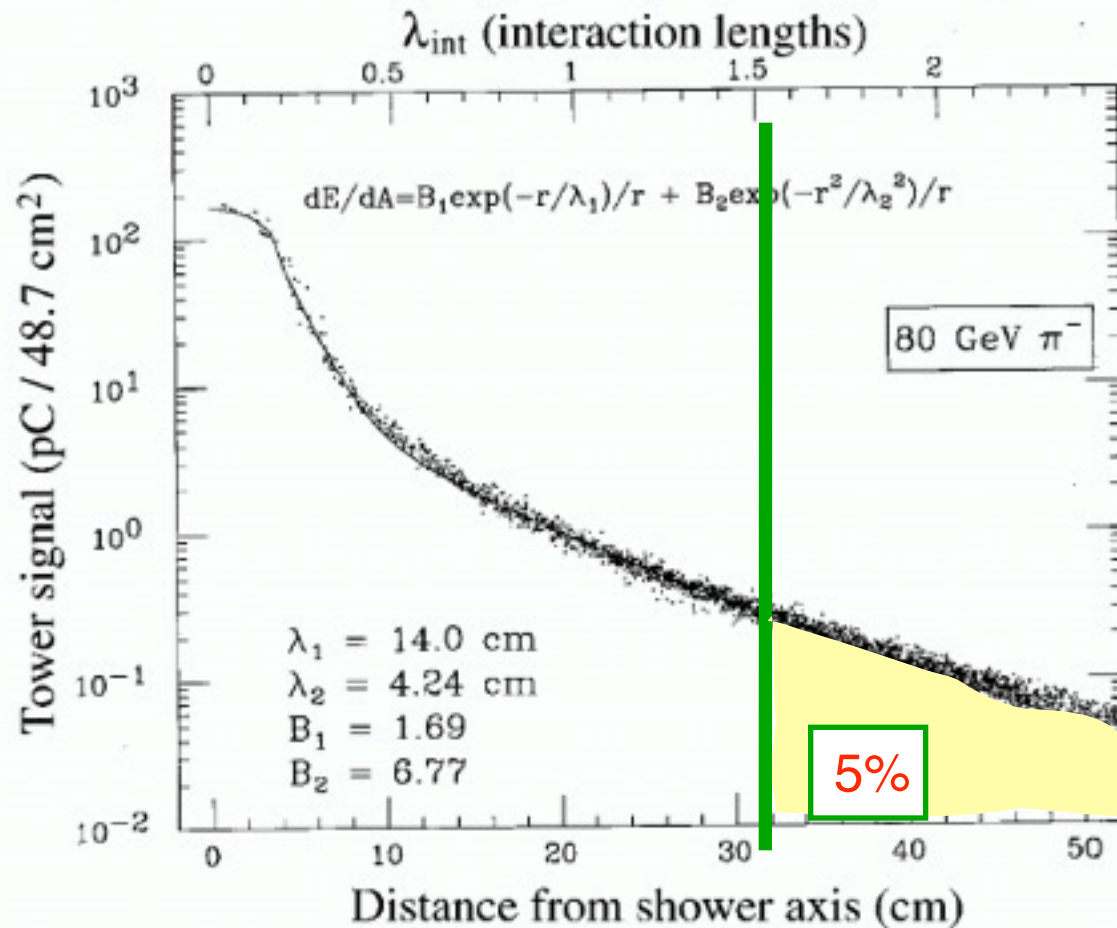
	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO ₄
Z	-	-	13	18	26	82	-
λ_{int} (g/cm ²)	~ 70000	84	85	66	16.8	17	22.4
X_0 (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89

Gerbes hadroniques: développement longitudinal



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

Gerbes hadroniques: développement transverse



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

Gerbes hadroniques

complication: les jets & QCD

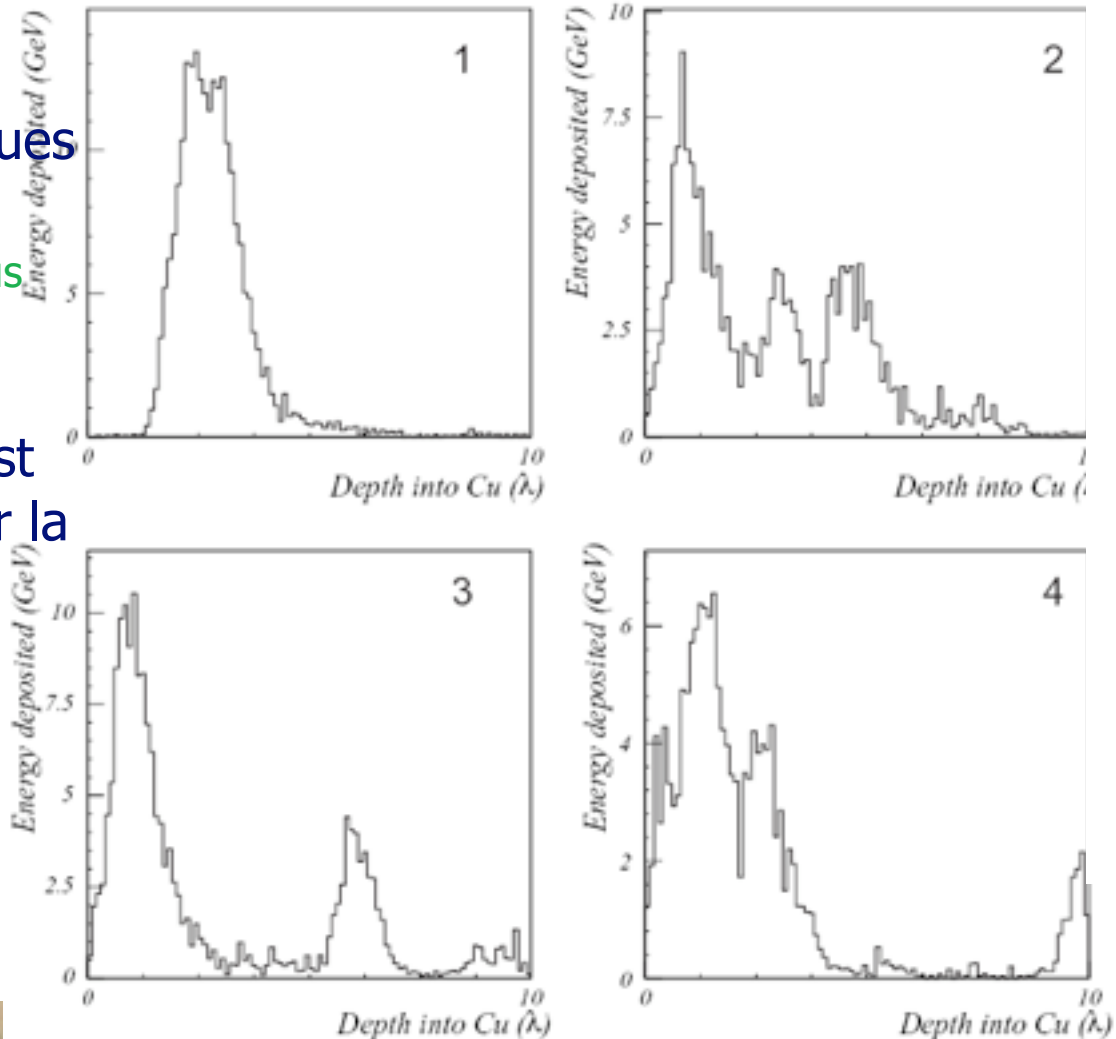
- Dans les expériences de haute énergie (depuis les années 1970), on ne produit pas des hadrons mais des quarks qui s'hadronisent en formant des jets.
- Lors de tests en faisceau, on dispose de **single particles** et non de **jets**
- La théorie des interactions fortes à hte énergie, **QCD** (**Q**uantum **C**hromo**D**ynamique) ne peut pas décrire précisément le développement des jets car les énergies échangées sont trop faibles
- Il y a de grandes fluctuations dans la composition des jets
- La simulation aide à passer de l'un à l'autre mais la description des processus hadroniques est compliquée.

Grandes variations d'un evt à l'autre

4 événements différents:

270 GeV Incident Pions in Copper

- Fluctuations entre les composantes électromagnétiques et hadroniques
 - et aussi entre les processus hadroniques
- Fraction électromagnétique est déterminée principalement par la première interaction



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

- moins précise

Un facteur 9 radialement et longitudinalement

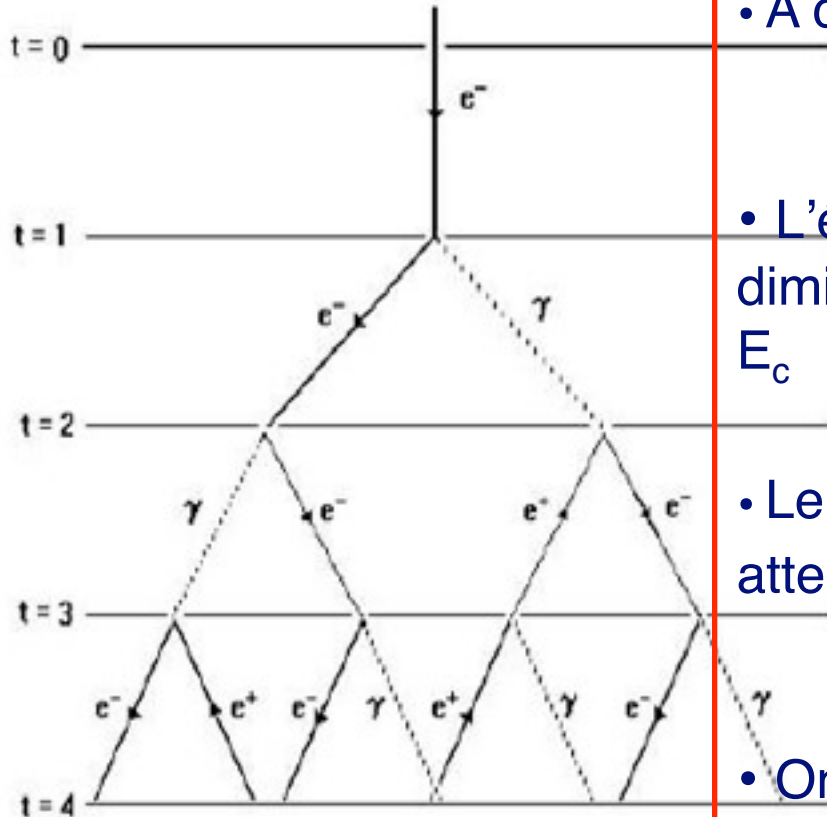
conséquence, plus grossières

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



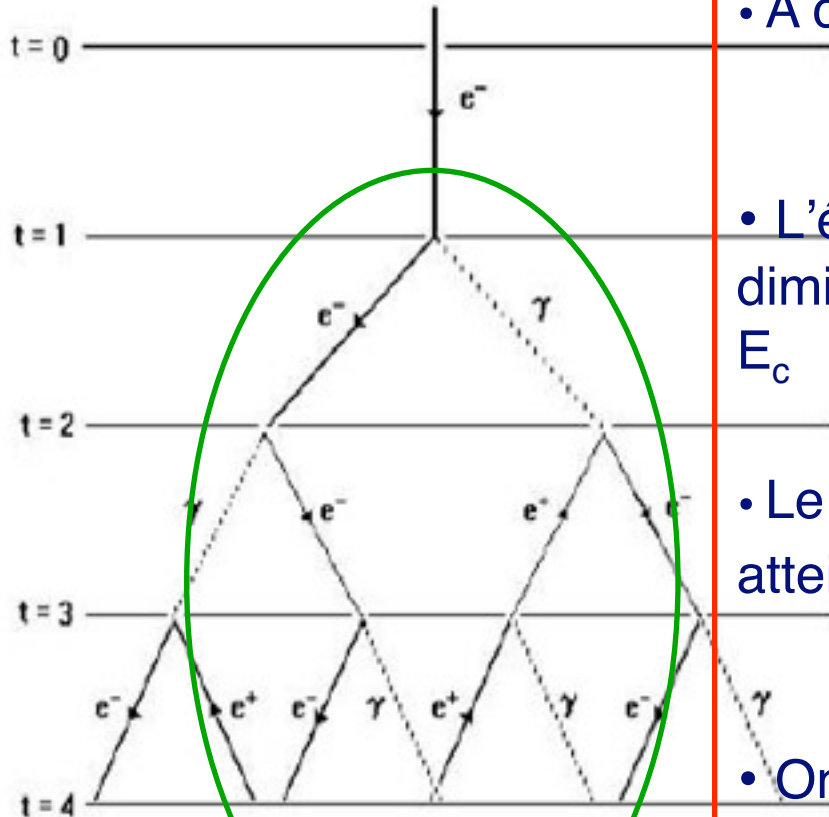
Le principe de la mesure

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 $N \sim E_0 / E_c$:
c'est la maximum de la gerbe
- On collecte l'ionisation produite par ces particules d'énergie $E < E_c$.
- La précision de la mesure est due aux fluctuations sur le nombre de particules détectables: \sqrt{N}

La mesure de l'énergie: principe



pas exact/correct

- 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 $N \sim E_0 / E_c$:
c'est la maximum de la gerbe
- On collecte l'ionisation produite par ces particules d'énergie $E < E_c$.
- La précision de la mesure est due aux fluctuations sur le nombre de particules détectables: \sqrt{N}

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 Čerenkov
 - Radiation Čerenkov 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 Čerenkov dans le détecteur de photons ~ 1000 photoelectrons/GeV(photostatistics):
fluctuation supplémentaire: $\sqrt{1000/1000} \approx 3\%$
 - Résolution totale pour le verre au Plomb: $\sigma/E \approx 5\%/\sqrt{E}$

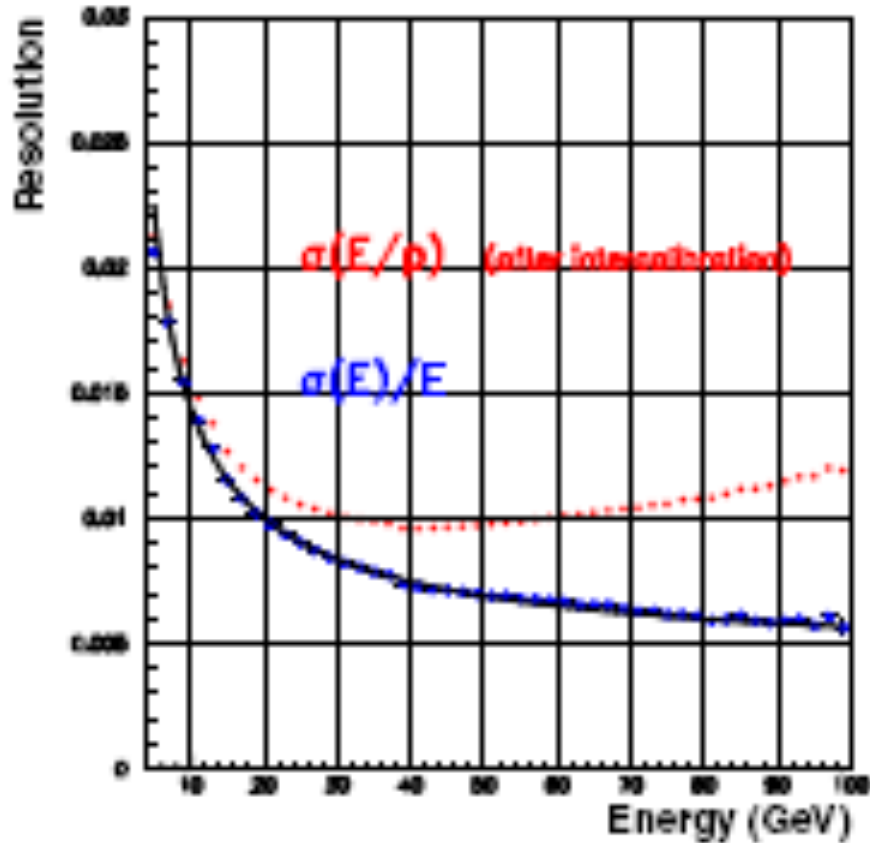
La résolution en énergie

- 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)

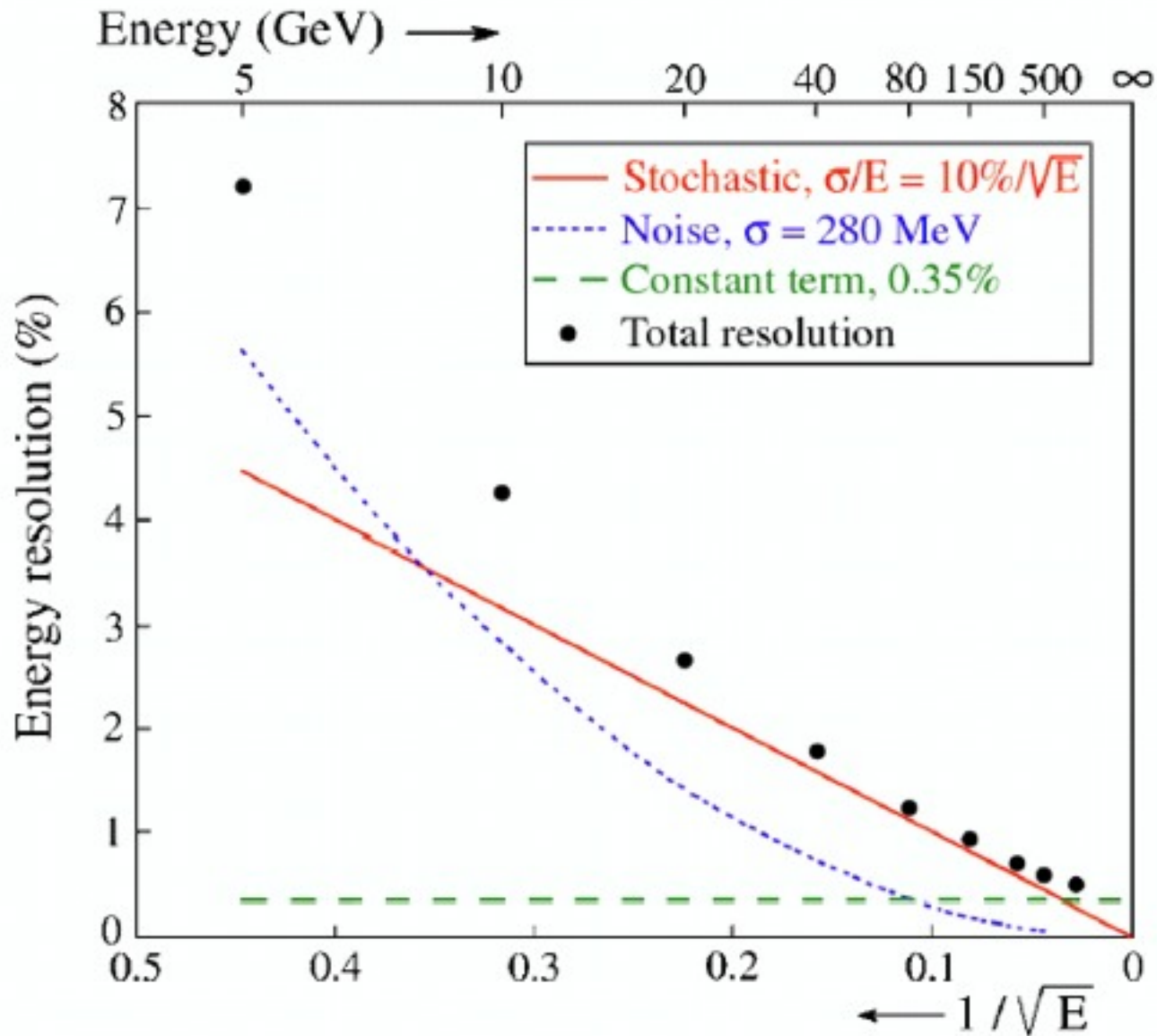
Résolution en énergie

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

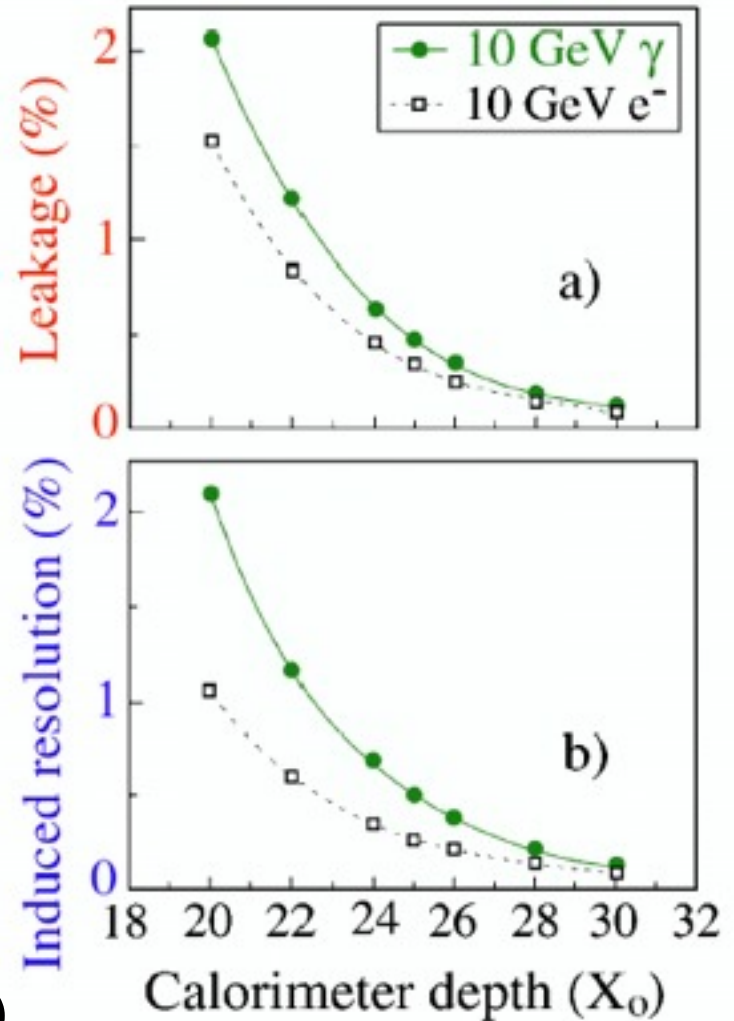
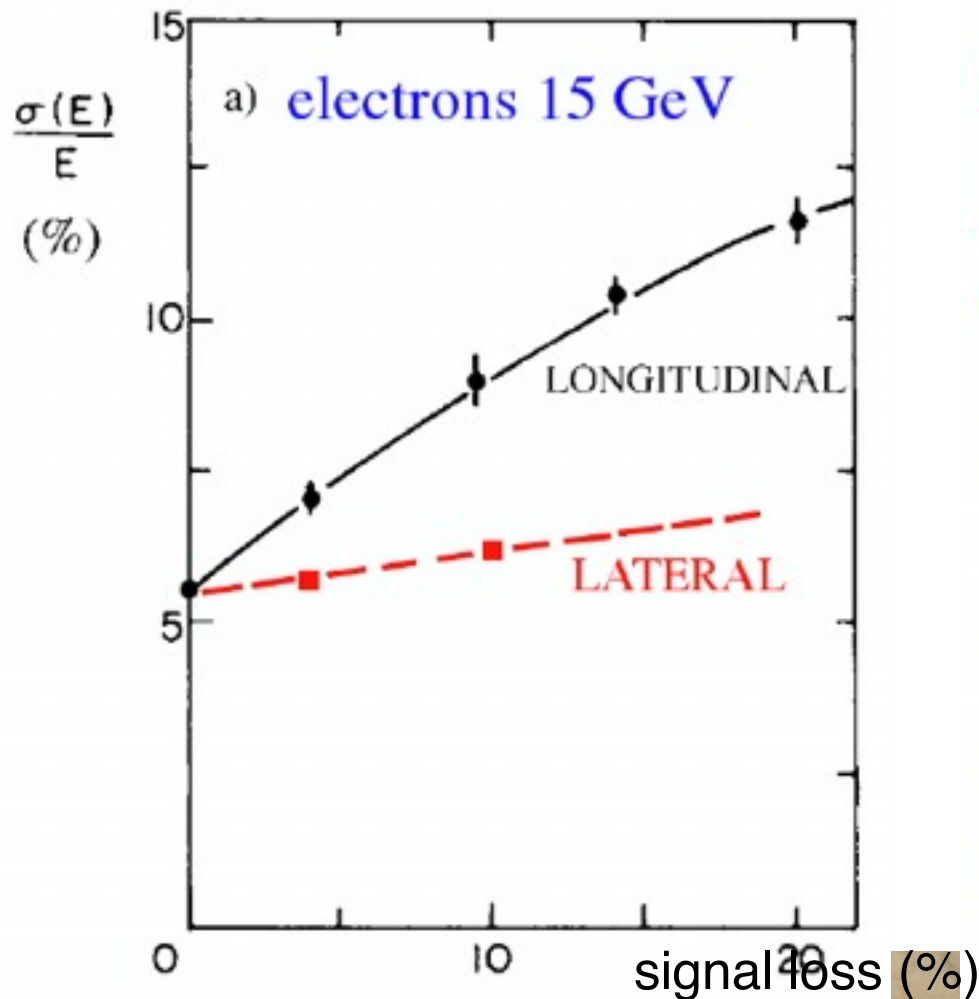
ATLAS (LARG)		$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.1}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.007$		
	10 GeV	100 GeV	1000 GeV	
Stochastique (GeV)	0.32	1	3.16	
Bruit (GeV)	0.3	0.3	0.3	
Constant (GeV)	0.07	0.7	7	
$\sigma(E)$	0.44 GeV	1.26 GeV	7.69 GeV	
$\sigma(E)/E$	4.4%	1.26%	0.77%	

De quel terme faut-il se préoccuper?



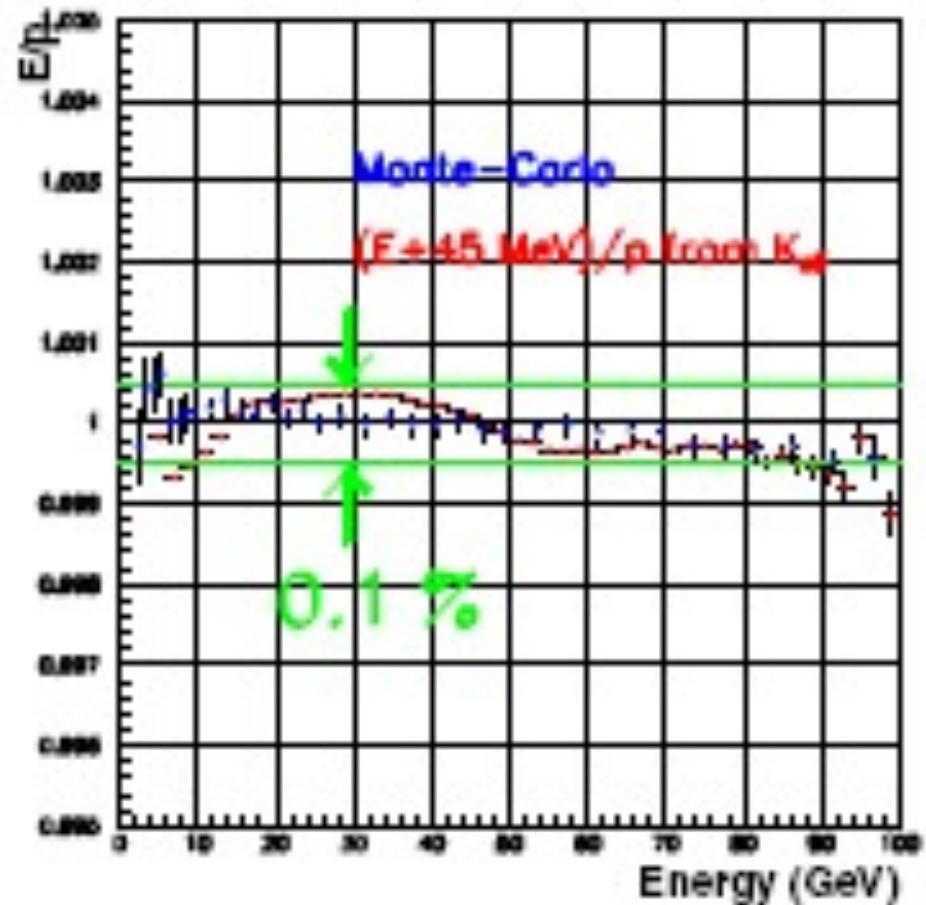
Pertes d'énergie: contribuent à la résolution

- Pertes d'énergie: latérales & longitudinales



La linéarité

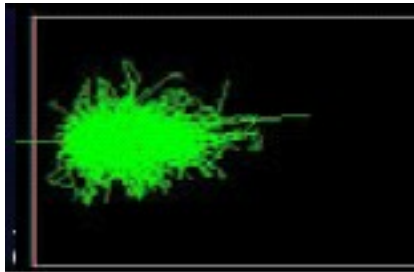
- La linéarité est la capacité du détecteur à mesurer la bonne énergie.
- On aime que $E_{\text{rec}} = K E_0$ avec K une constante **indépendante** de l'énergie
- On peut définir la linéarité (ou non-linéarité) par E_{rec}/E_0 , $E_{\text{rec}} - E_0/E_{\text{rec}}$
- Comment obtenir E_0 in situ???



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

Résolution en position et séparation spatiale

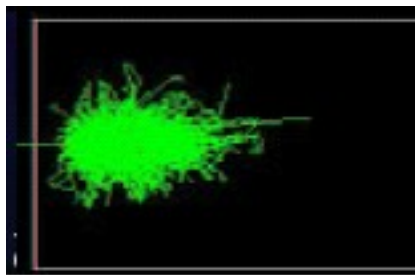
- Il est nécessaire
 - de reconstruire la position de la gerbe
 - de pouvoir séparer deux gerbes proches
- On segmente donc le détecteur pour ne pas tout mesurer d'un coup



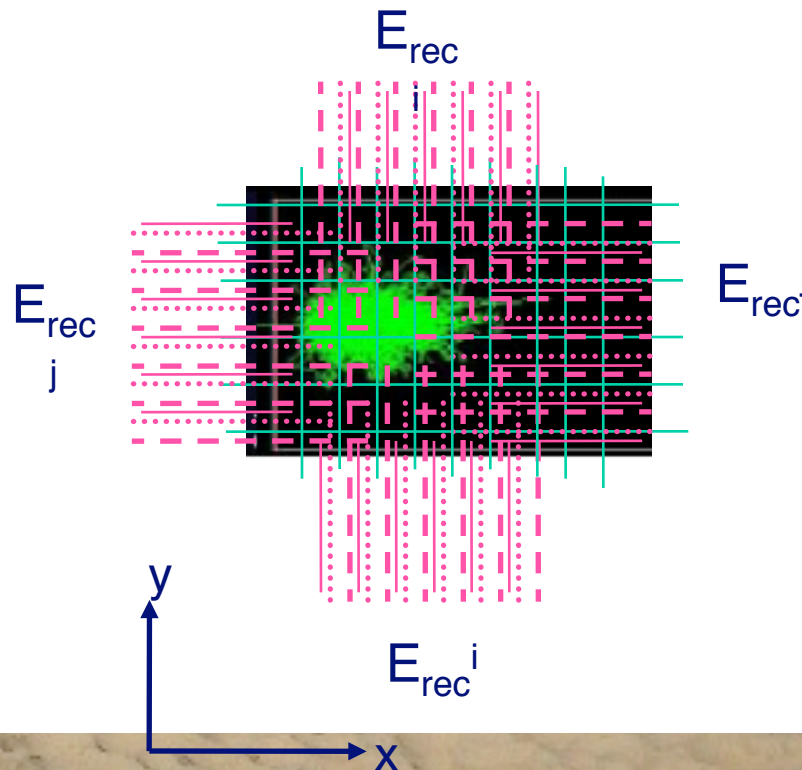
E_{rec}

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



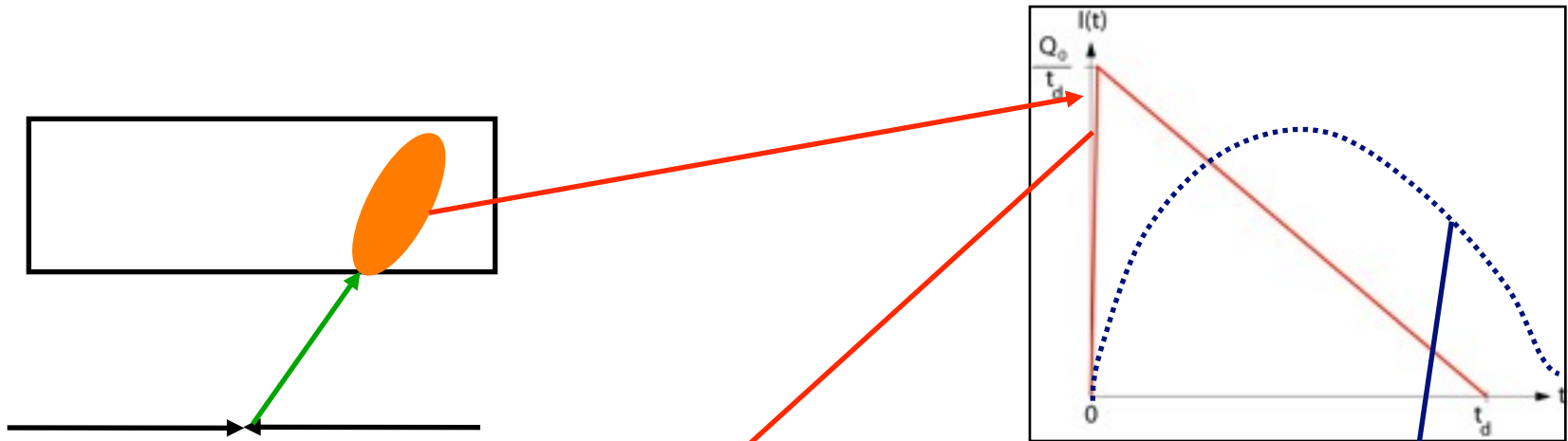
E_{rec}



$$E_{rec} = \sum_{i,j} E_{ij}$$
$$x = \frac{1}{E_{rec}} \sum_i x_i \times E_i$$
$$y = \frac{1}{E_{rec}} \sum_j y_j \times E_j$$

Résolution en temps

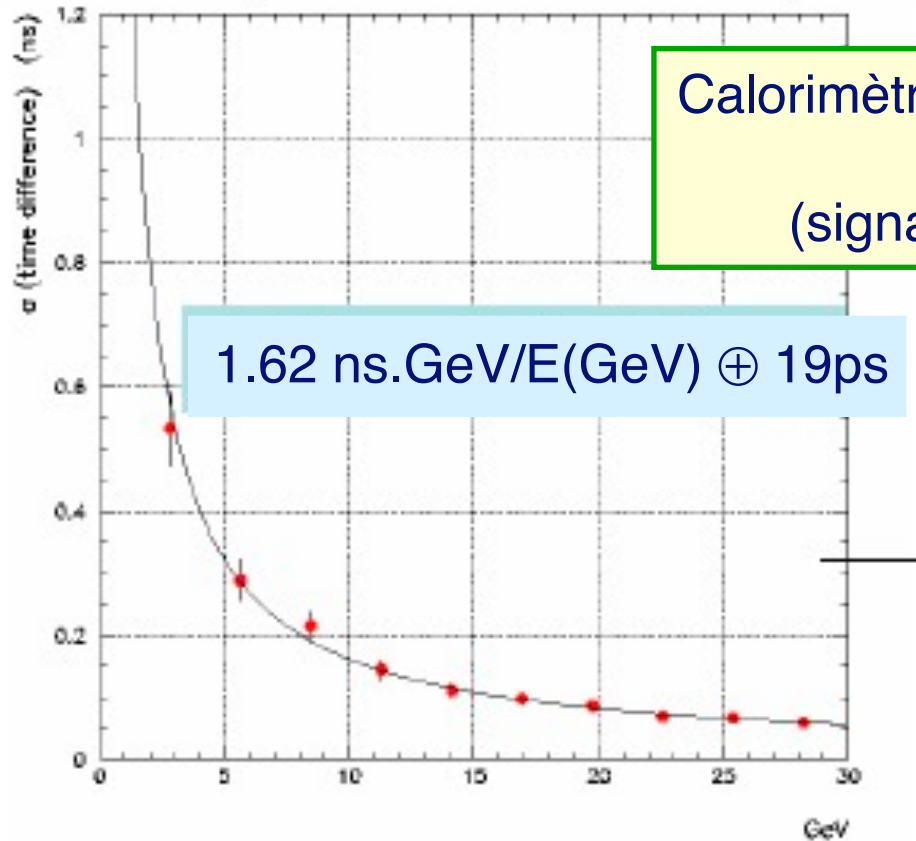
- ◆ La forme du signal détecté, en fonction du temps, permet de reconstruire le temps d'arrivée de la particule incidente



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

Calorimétrie: les paramètres importants

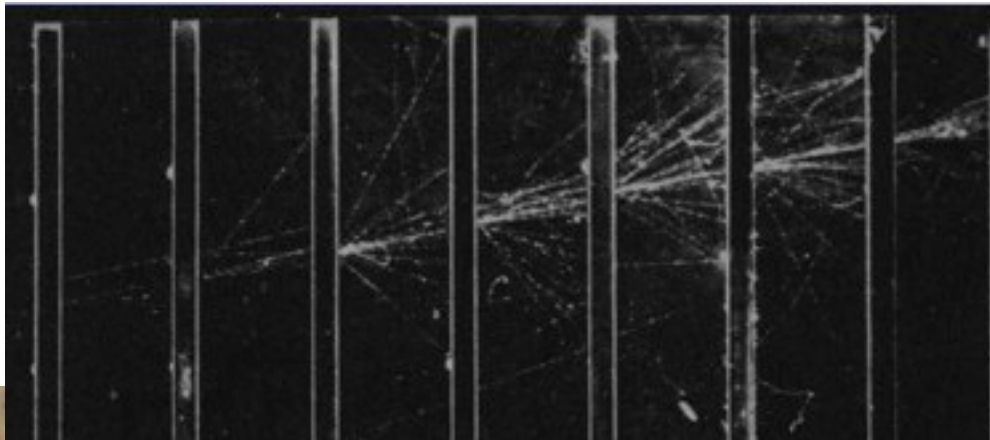
- Lors de la conception de calorimètre, il faut prendre en compte tous ces paramètres importants pour reconstruire les événements de physique.
- Les techniques de détection ont chacune des avantages et des inconvénients qui déterminent les performances
- Ne sont pas traités:
 - Les effets dus aux radiations
 -
- 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**

cristaux scintillants

$$E_s \cong \beta E_{\text{gap}} \sim \text{eV}$$
$$\approx 10^2 \div 10^4 \gamma / \text{MeV}$$

$$\sigma / E \sim (0.03 \div 0.3)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Emetteurs Čerenkov

$$\beta > \frac{1}{n} \text{ ® } E_s \sim 0.7 \text{MeV}$$

$$\approx 600 \div 2000 \gamma / \text{GeV}$$

$$\sigma / E \sim (2 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Résolution finale avec toutes les contributions

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

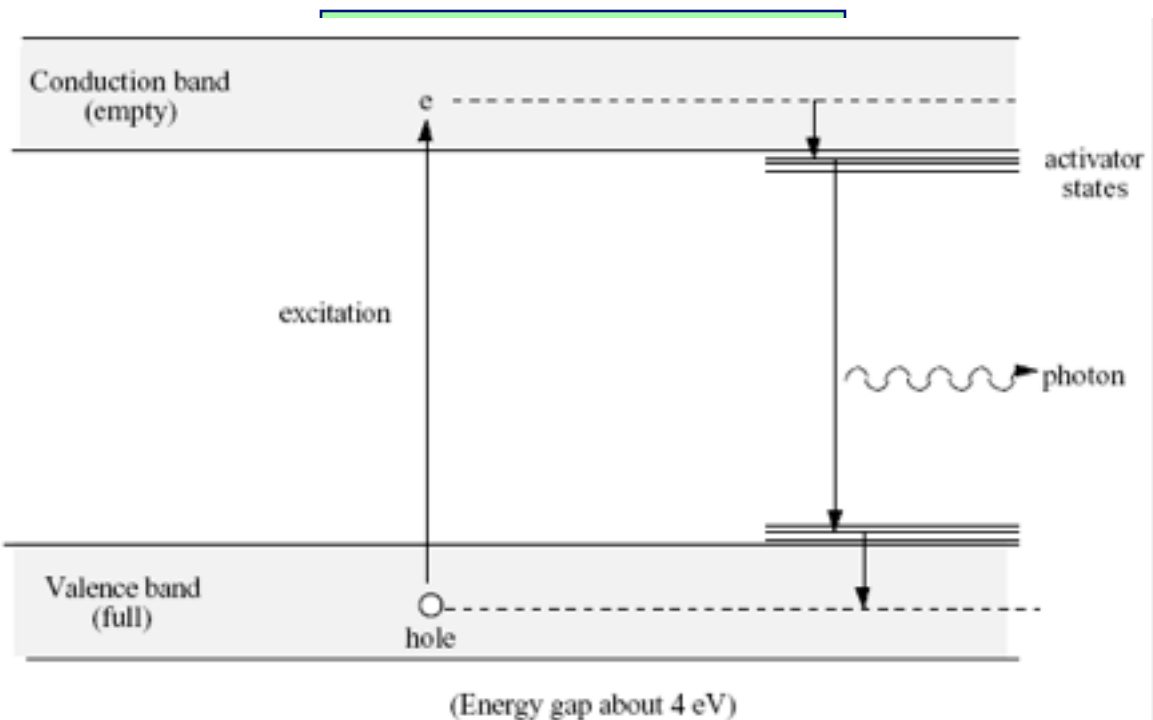
$$\sigma / E \sim (10 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Calorimètres à cristaux: bonne résolution intrinsèque

cristaux scintillants

$$E_s \cong \beta E_{\text{gap}} \sim \text{eV}$$
$$\approx 10^2 \div 10^4 \gamma / \text{MeV}$$

$$\sigma / E \sim (0.03 \div 0.3)\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$$

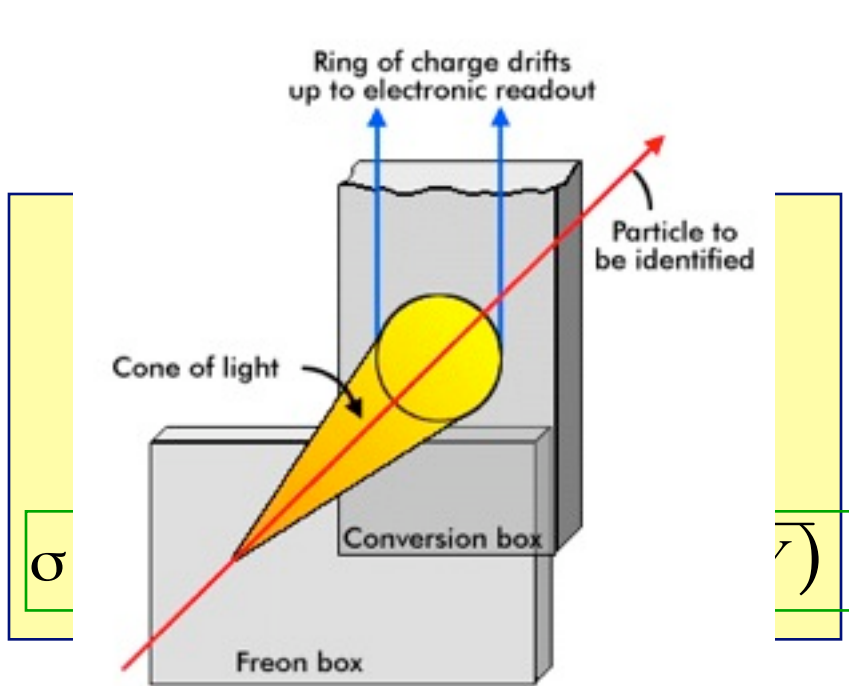


Résolution finale avec toutes les contributions

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

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

Calorimètres à cristaux: bonne résolution intrinsèque



Emetteurs Čerenkov

$$\beta > \frac{1}{n} \text{ @ } E_s \sim 0.7 \text{ MeV}$$

$$\approx 600 \div 2000 \gamma / \text{GeV}$$

$$\sigma / E \sim (2 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Résolution finale avec toutes les contributions

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

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

Calorimètres à cristaux: **bonne résolution intrinsèque**

cristaux scintillants

$$E_s \cong \beta E_{\text{gap}} \sim \text{eV}$$
$$\approx 10^2 \div 10^4 \gamma / \text{MeV}$$

$$\sigma / E \sim (0.03 \div 0.3)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Emetteurs Čerenkov

$$\beta > \frac{1}{n} \text{ ® } E_s \sim 0.7 \text{MeV}$$

$$\approx 600 \div 2000 \gamma / \text{GeV}$$

$$\sigma / E \sim (2 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Résolution finale avec toutes les contributions

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

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

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:

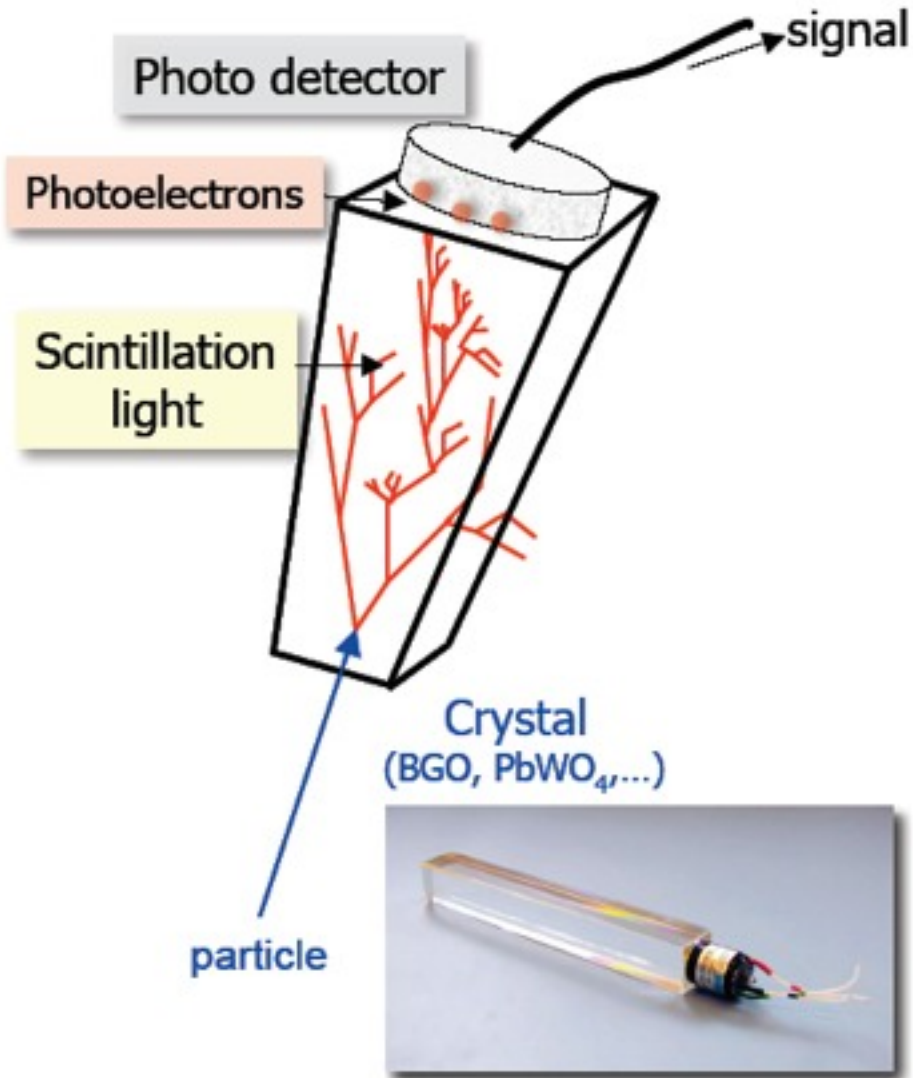
- 150 γ/MeV

26 X_0 - plus dense que le plomb

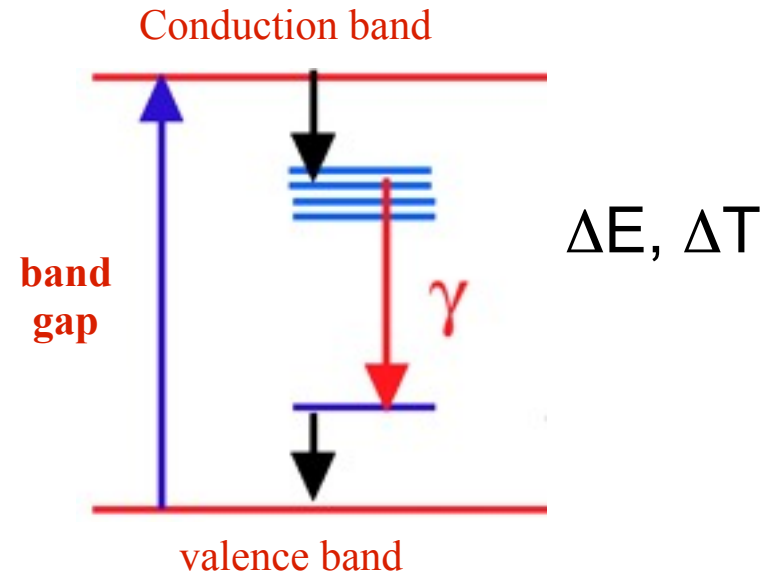
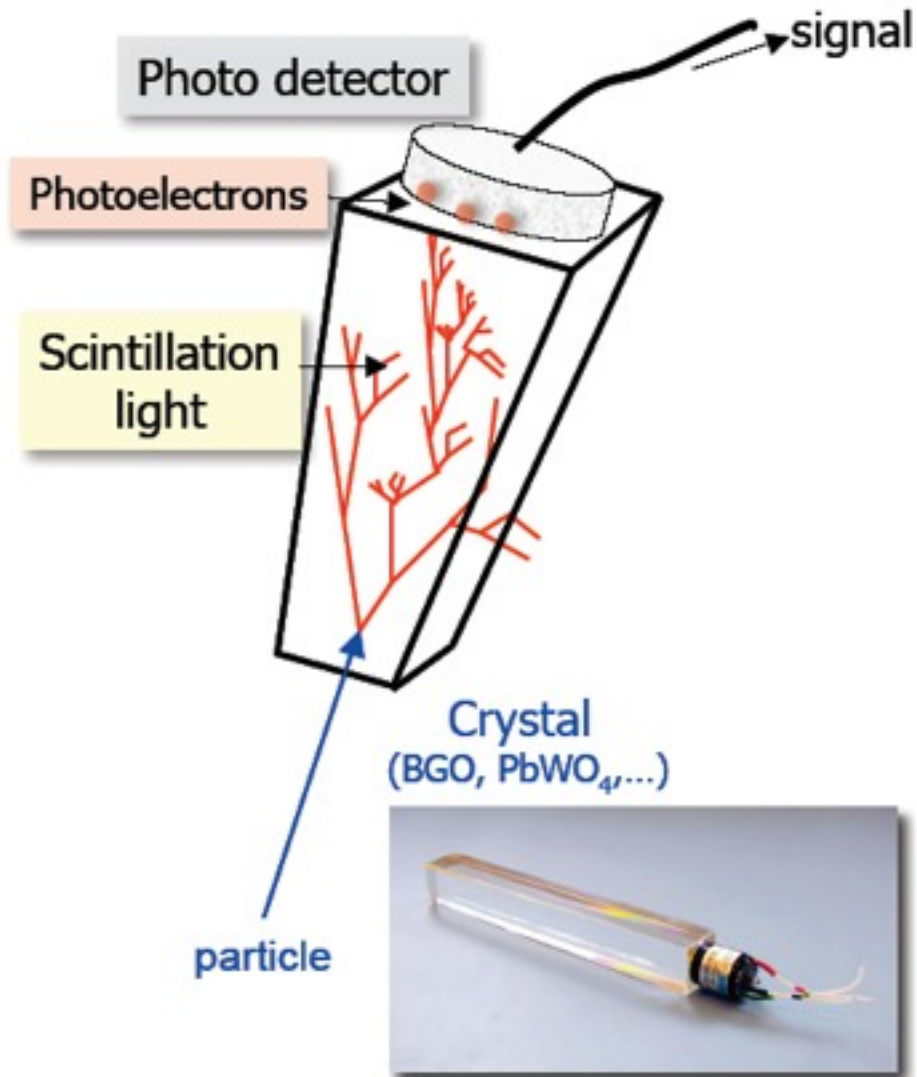


Tonneau: 230x22x22 mm³ (quasi-projective)
80% de la gerbe est contenue dans un cristal

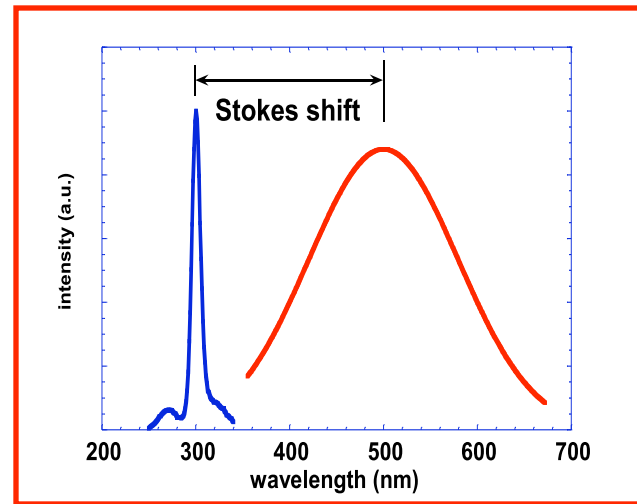
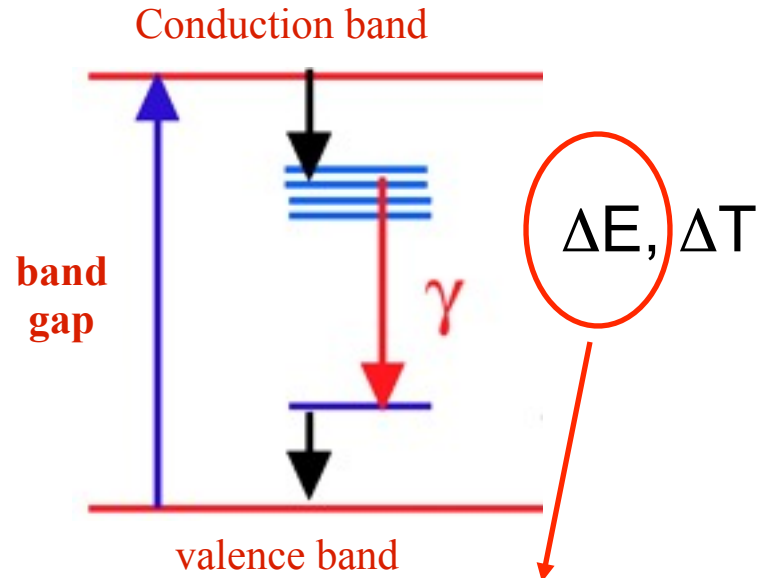
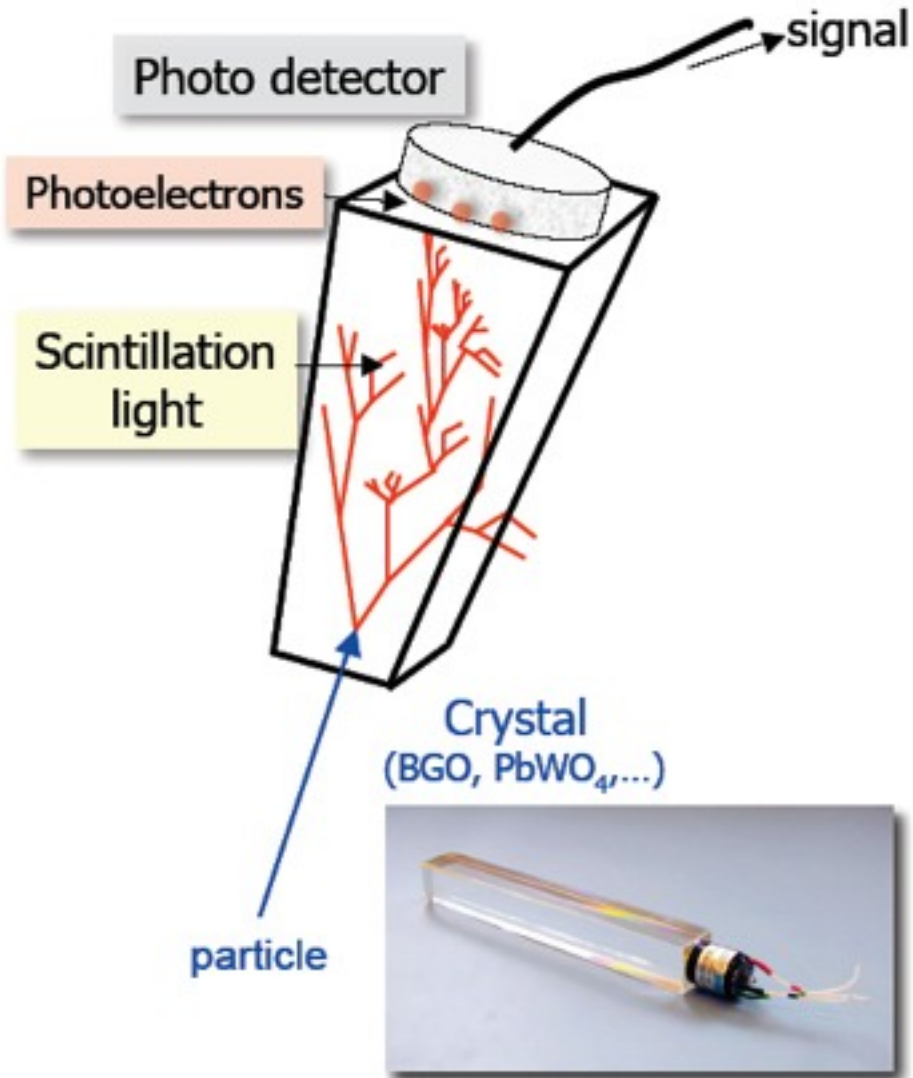
CMS electromagnetic calorimeter: fast



CMS electromagnetic calorimeter: fast



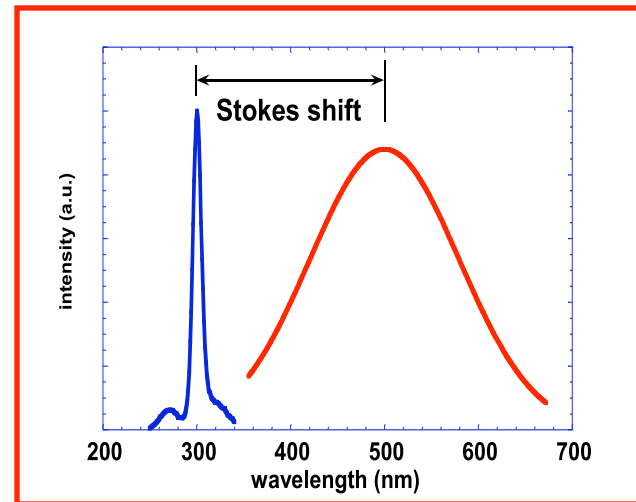
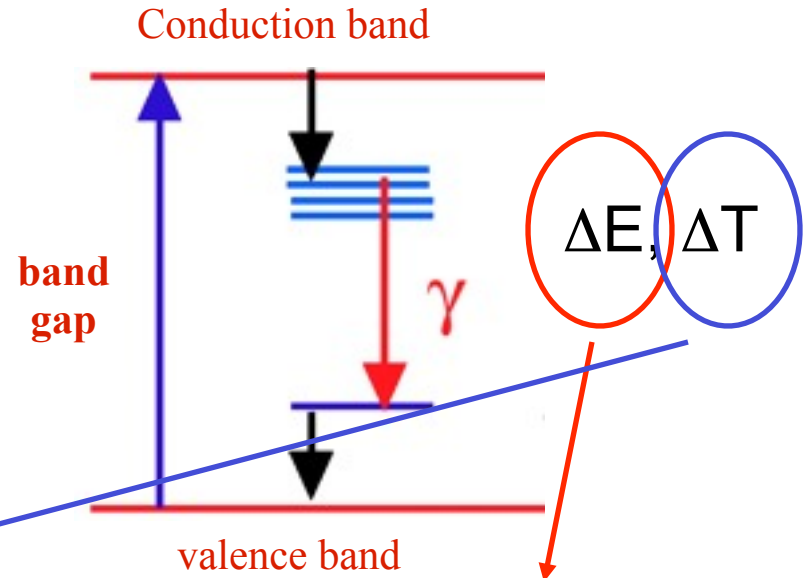
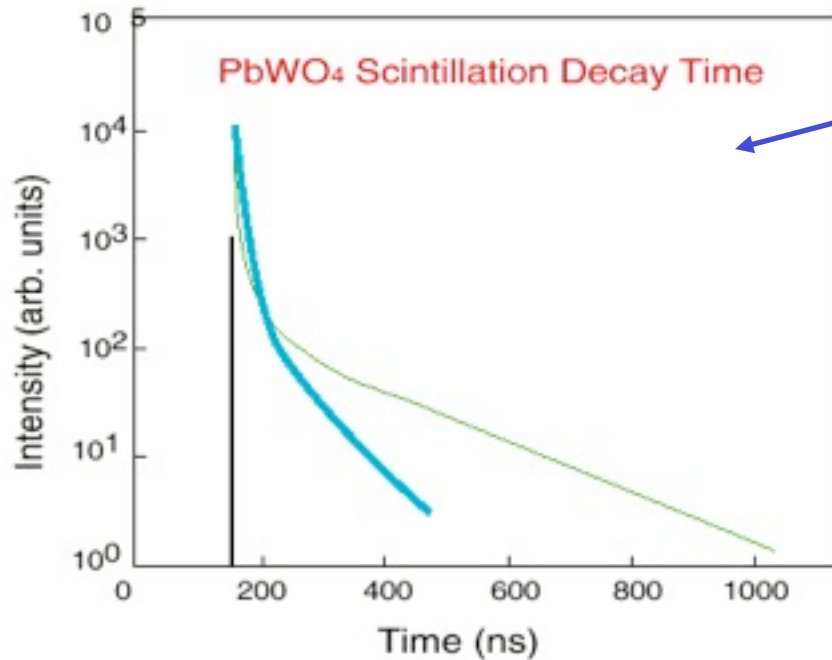
CMS electromagnetic calorimeter: fast



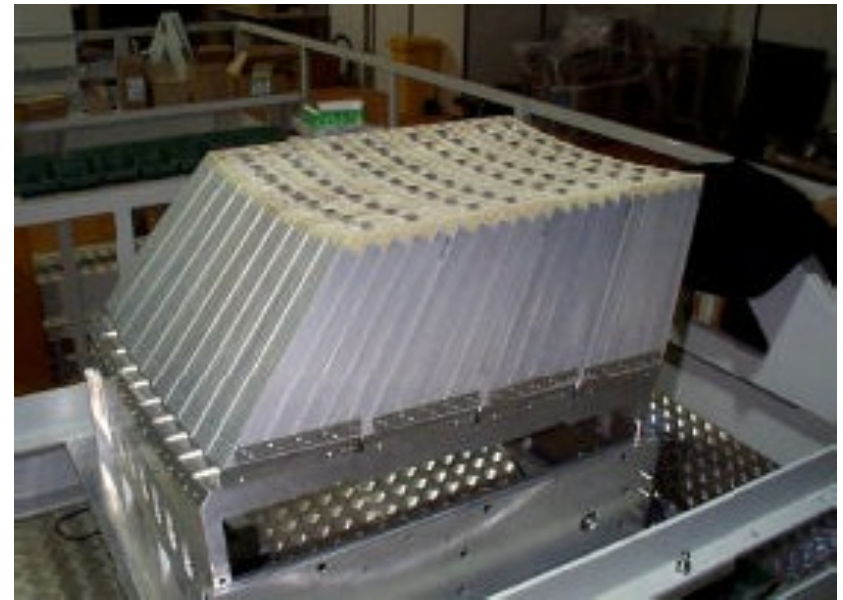
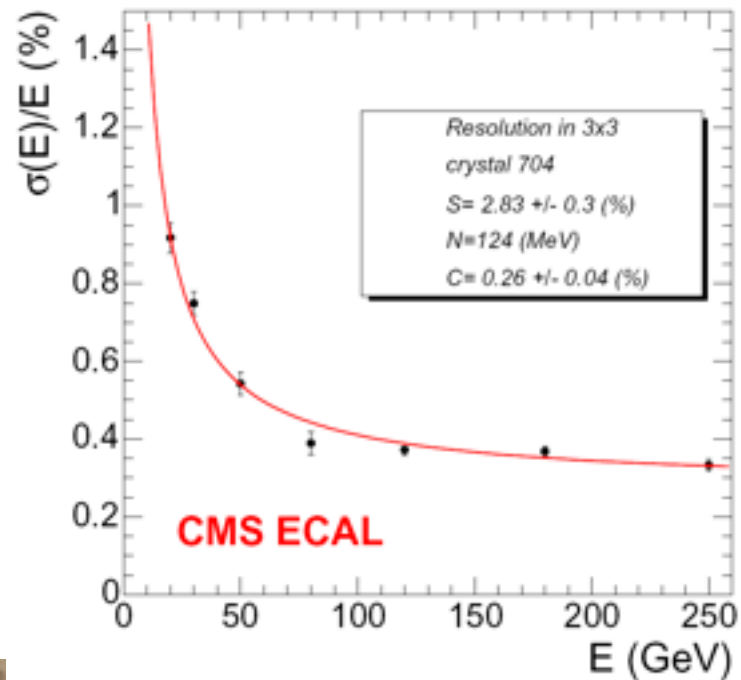
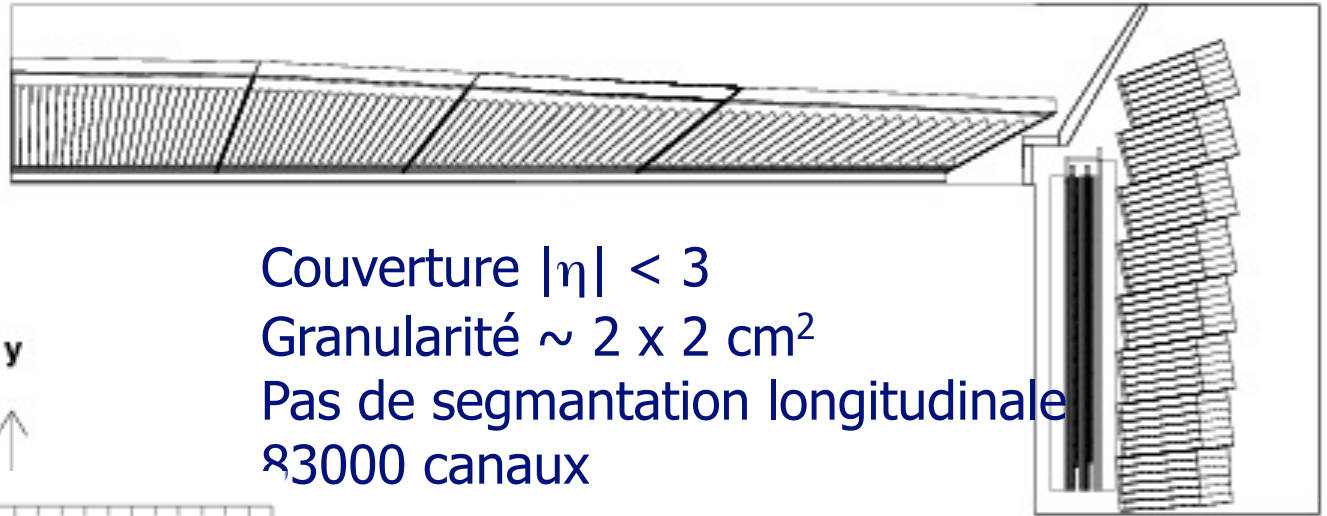
CMS electromagnetic calorimeter: fast

Composante lente vient des défauts et des impuretés

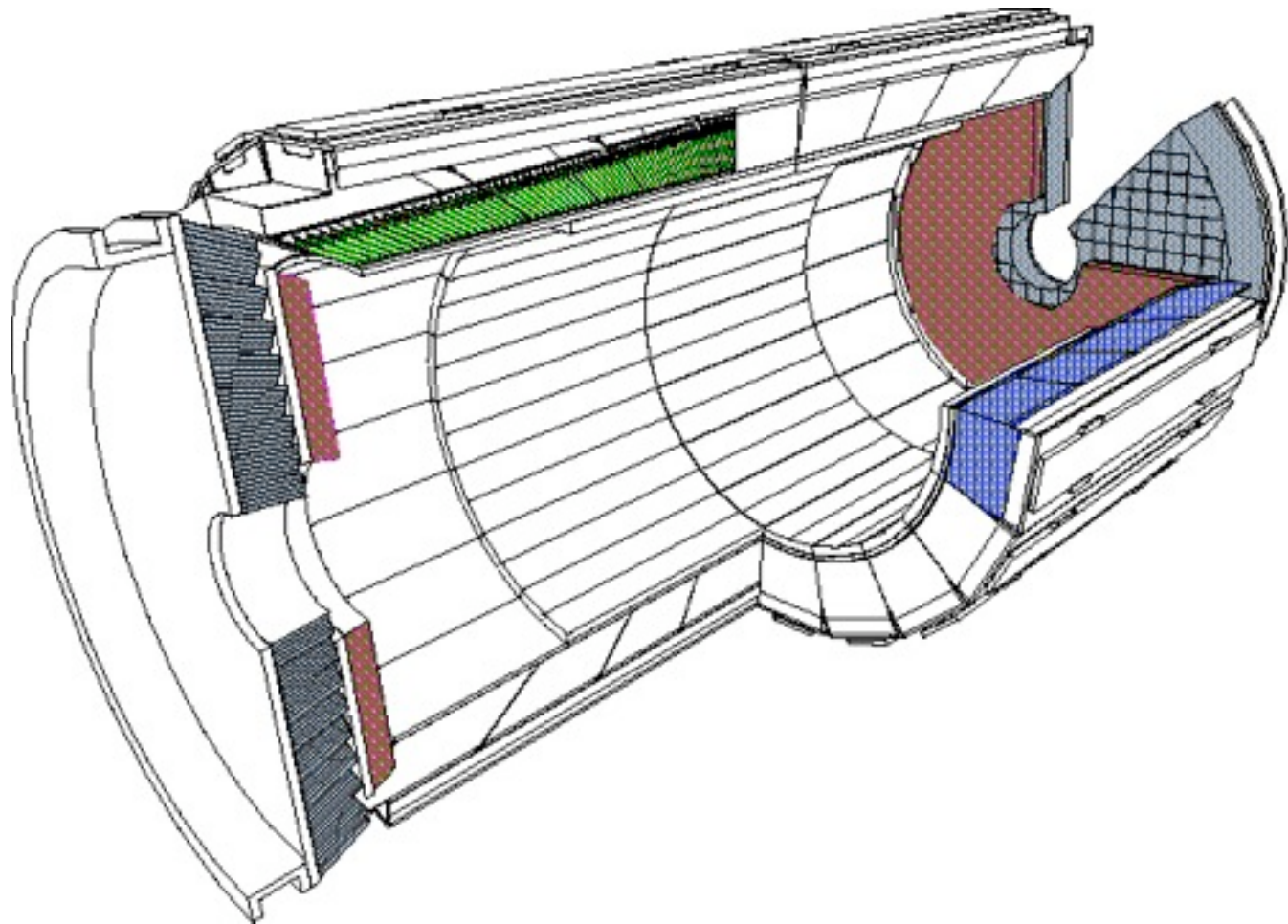
Pour les cristaux de bonne qualité, 80% de la lumière est émise en 25 ns.



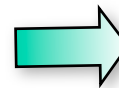
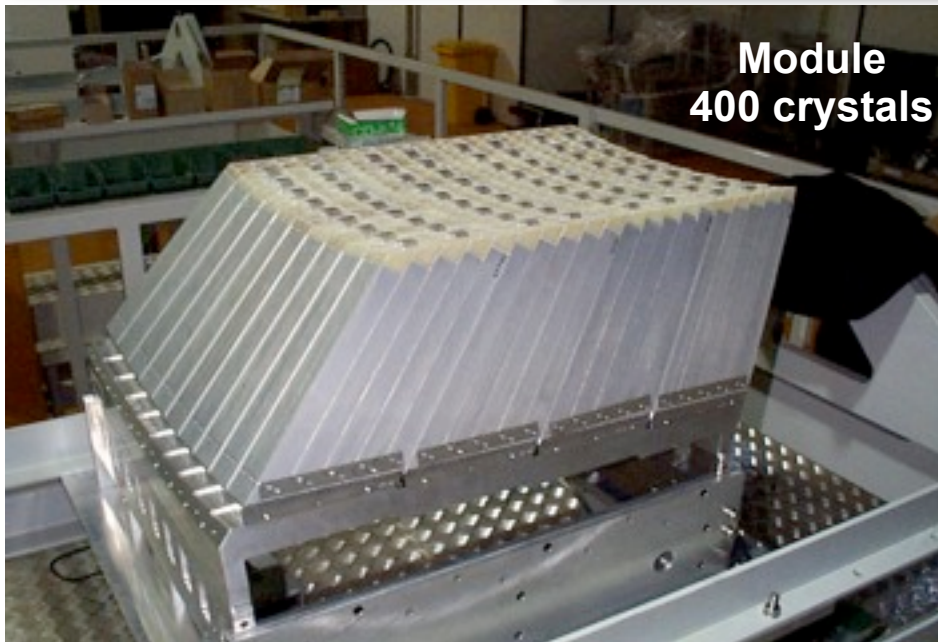
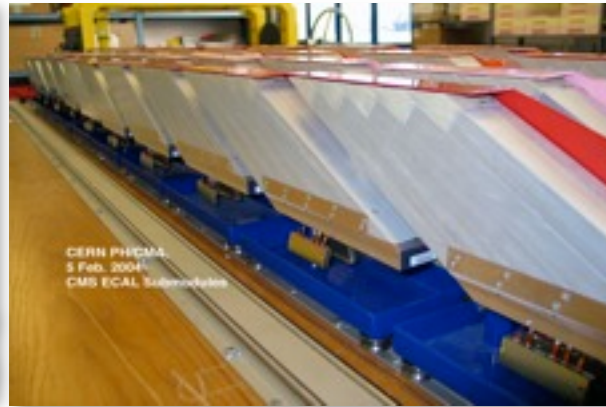
Le calorimètre de CMS



Le détecteur CMS

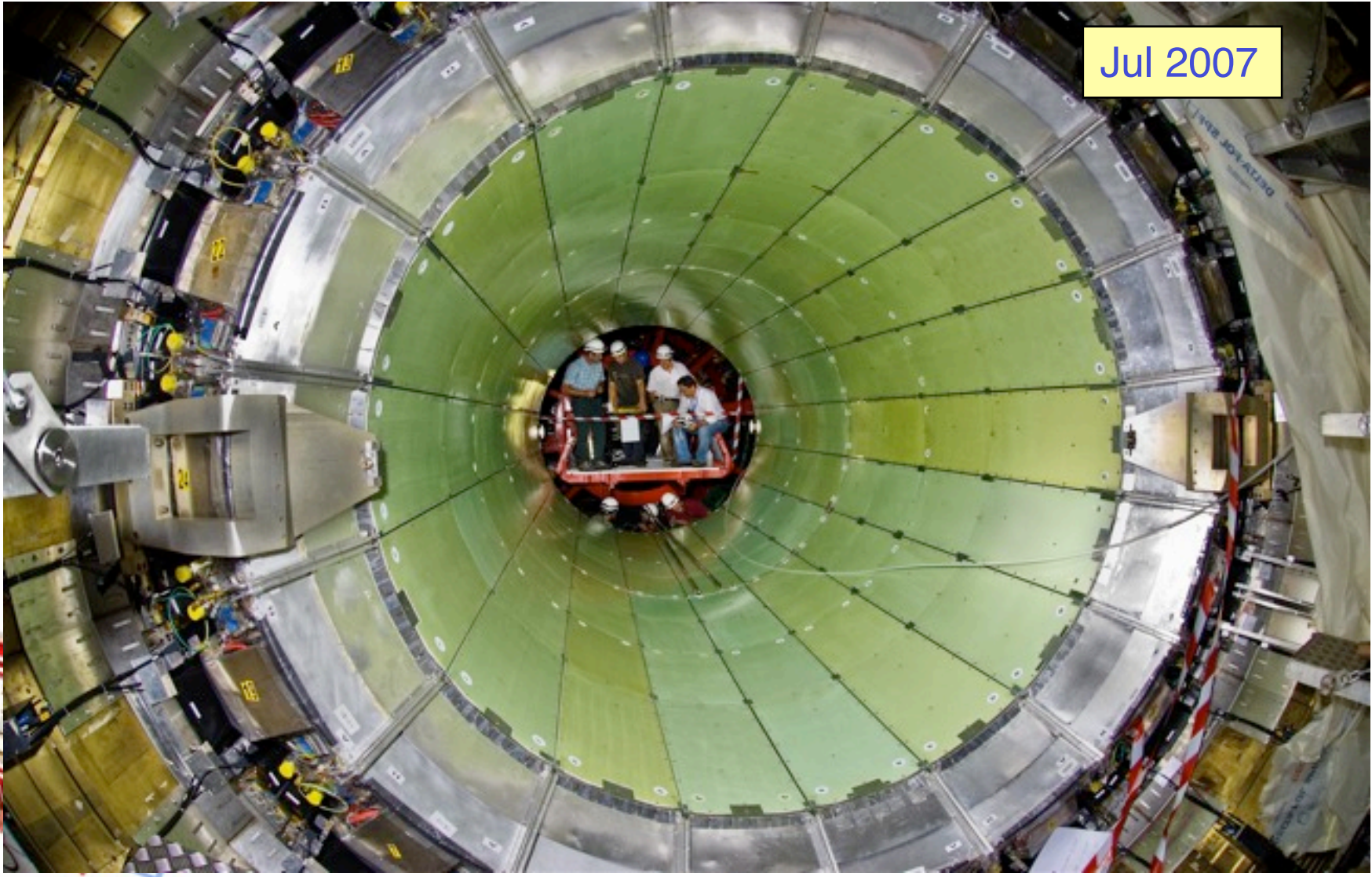


La construction du ECAL de CMS



Total 36 Supermodules

CMS ECAL tonneau

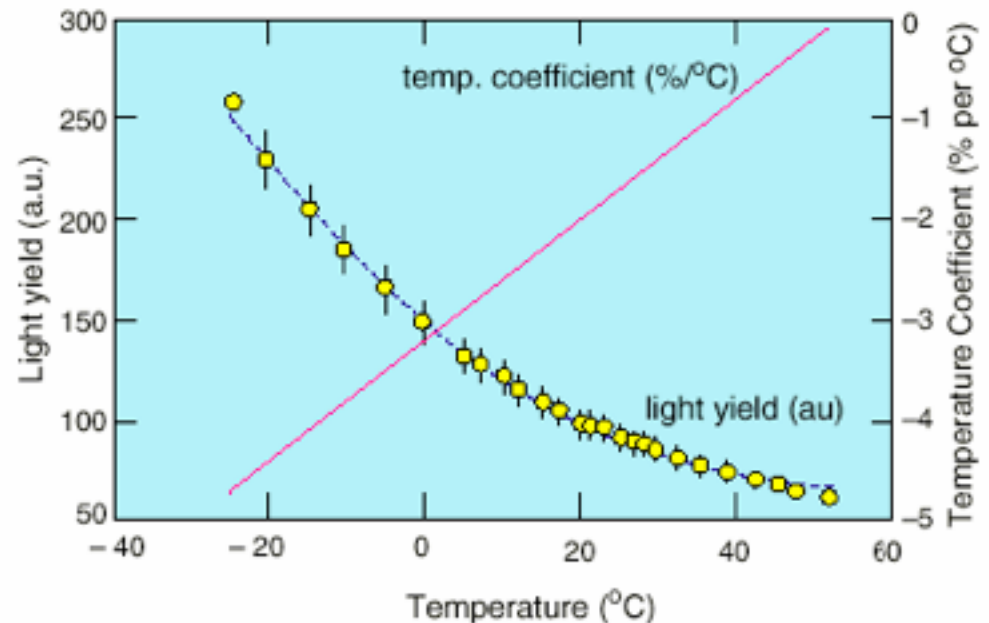


Jul 2007

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)

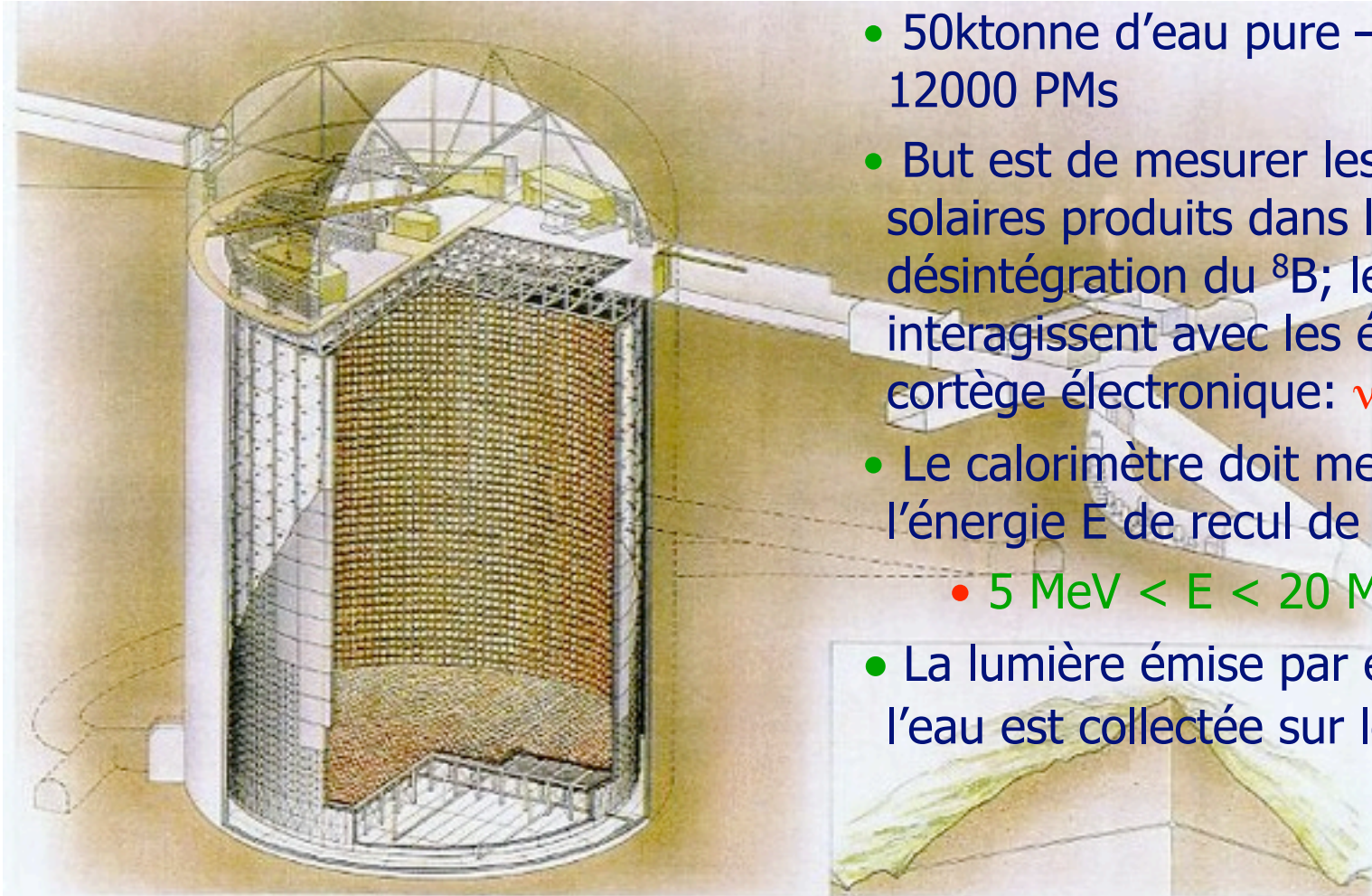
Température: doit être surveillée à mieux que 0.1°



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

Calorimètres à liquides nobles

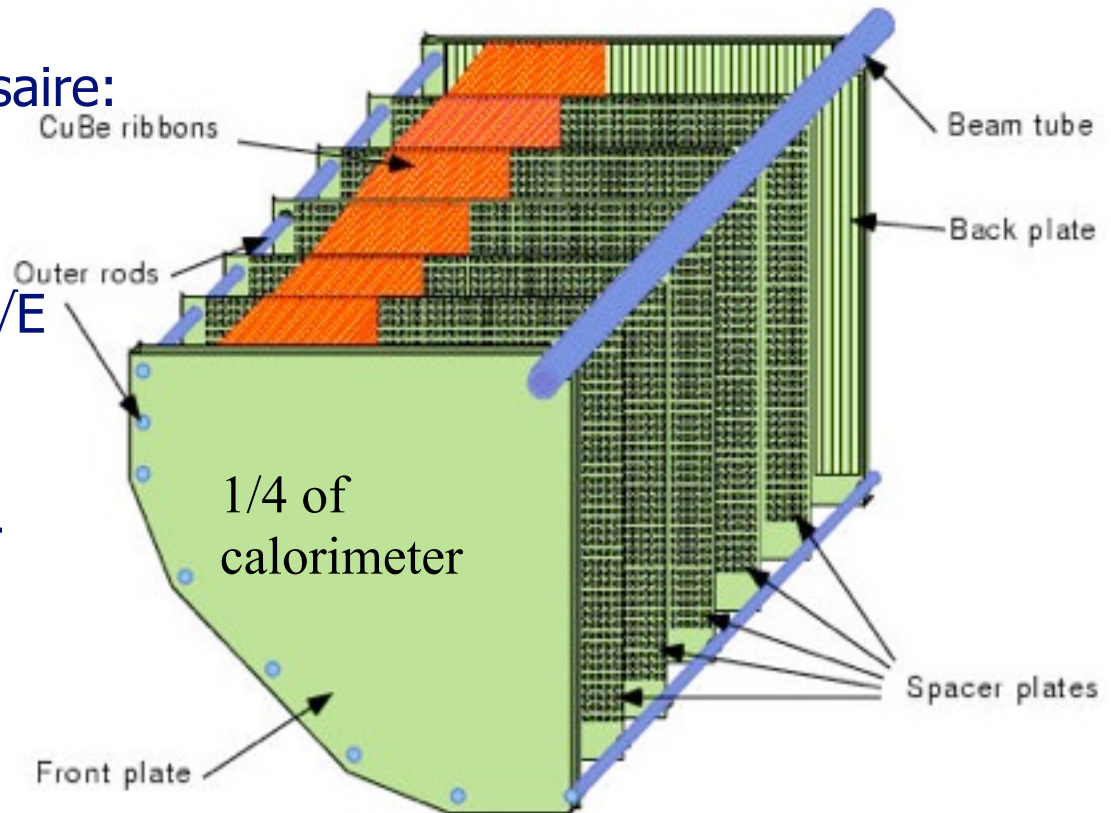
- L'énergie libérée par les particules chargées, dans les liquide nobles (Ar, Kr, Xe) est sous forme:
 - de charge : courant collecté
 - de scintillation venant de la recombinaison des paires électron-ion
- La plupart des calorimètres homogènes utilisent le Krypton qui est un bon compromis entre densité et coût.
- Il faut un système cryogénique pour tenir l'élément liquide

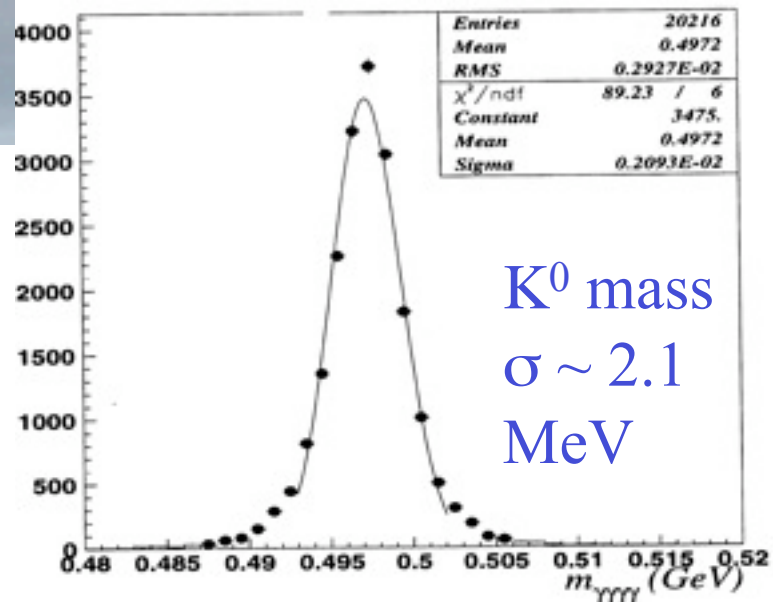
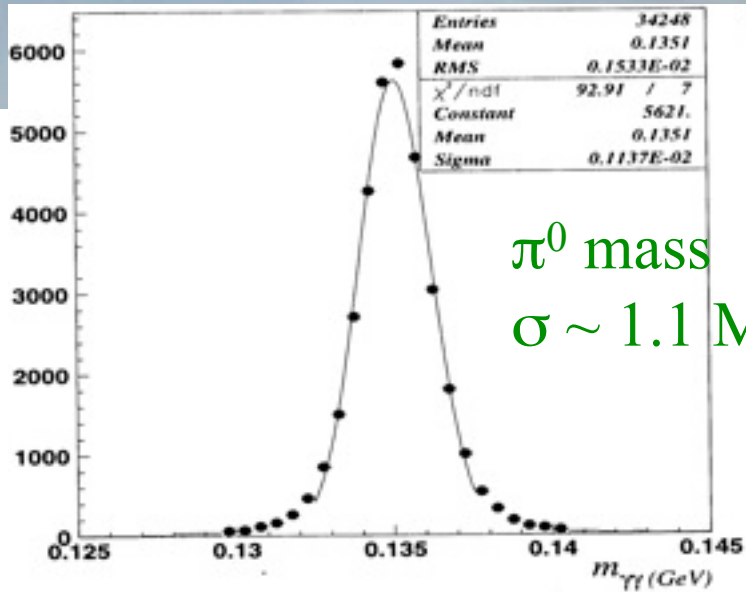
	Ar	Kr	Xe
Z	18	36	58
A	40	84	131
X ₀ (cm)	14	4.7	2.77
E _C (Mev)	41.7	21.5	14.5
R _M (cm)	7.2	4.7	4.2
W (eV/pair)	23.3	20.5	15.6
v drift (mm/ μ s)	10	5	3

Le calorimètre à Krypton liquide de NA48

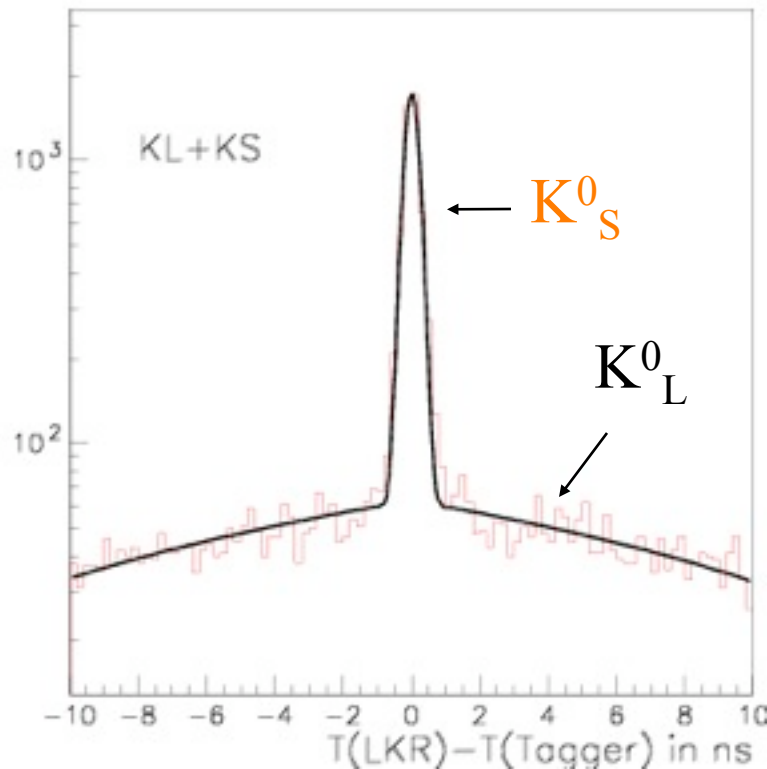
- NA48 a mesuré le $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) \sim 10^{-4}$ en identifiant les modes $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$ et $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$
- Résolution sur $m(\pi^0)$ nécessaire: 1MeV ($m(\pi^0) = 135\text{MeV}$)
- Résolution en énergie $5\%/\sqrt{E}$
- Bain de LKr instrumenté d'électrodes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

Krypton liquide $T = 120 \text{ }^\circ\text{K}$





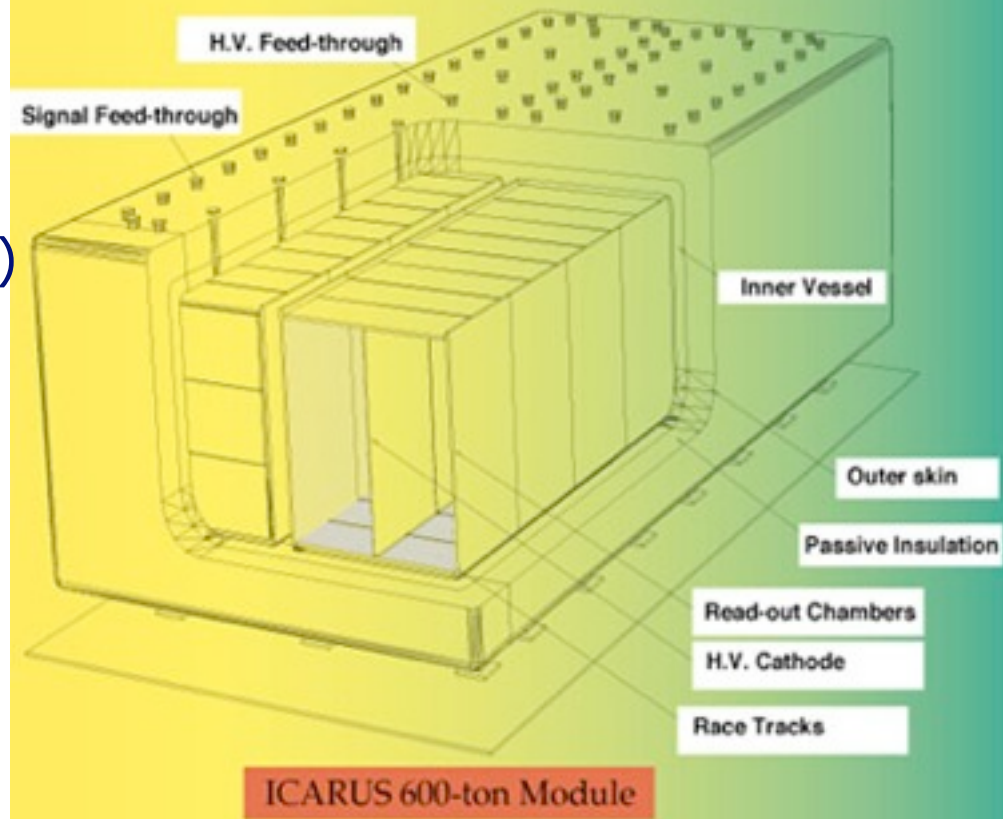
NA48



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)

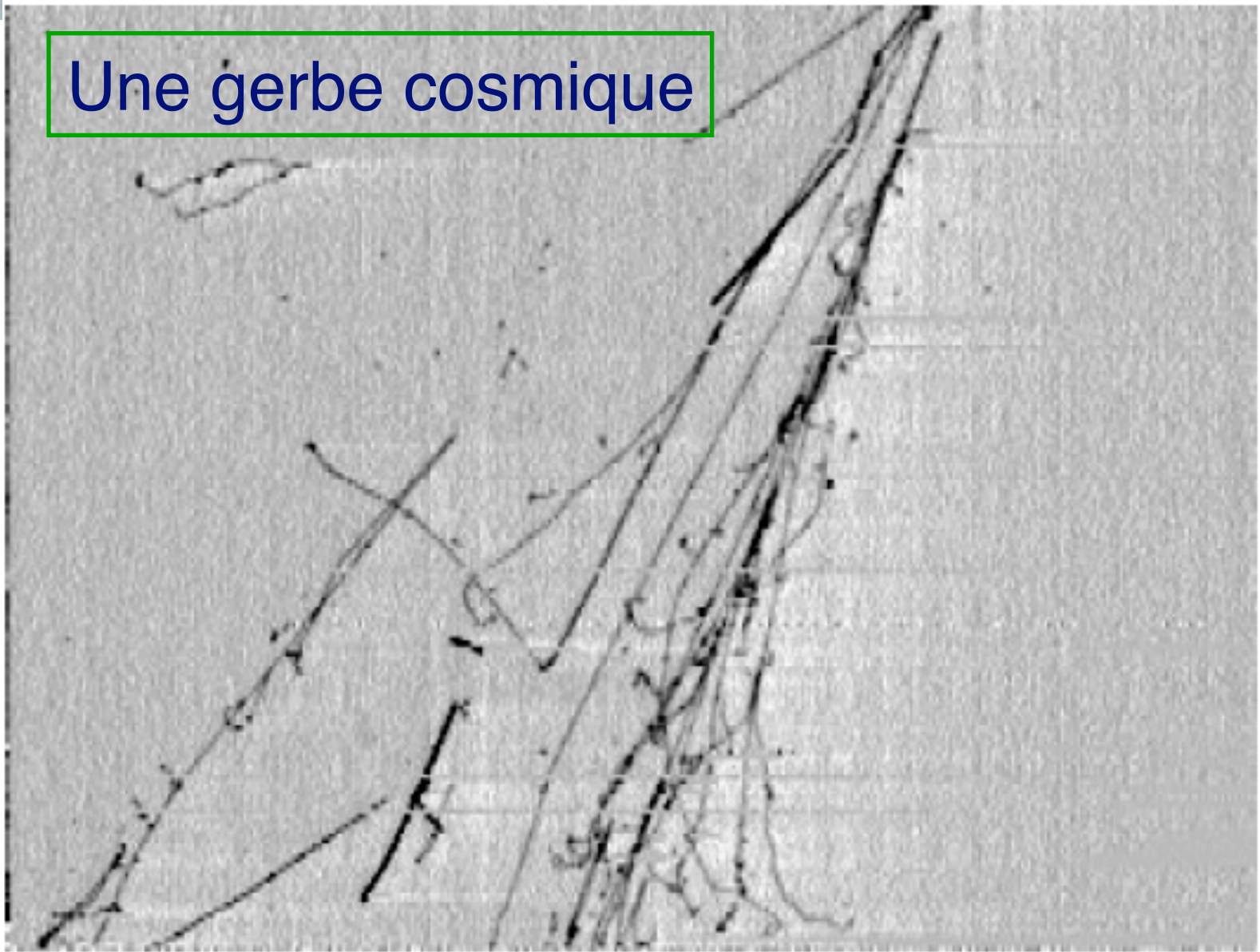




Le 600t ICARUS



Une gerbe cosmique

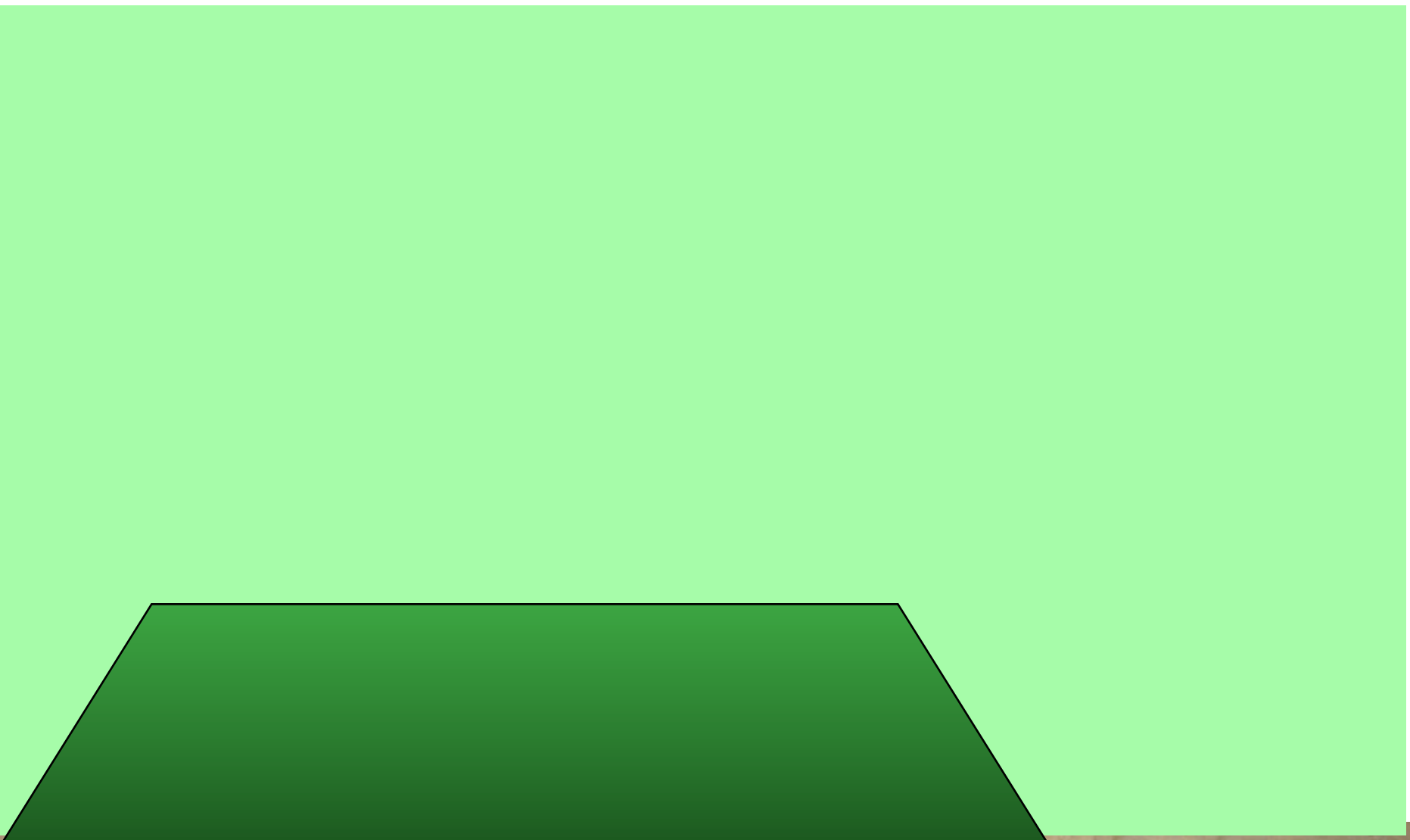


Calorimètre naturel

- ◆ 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.

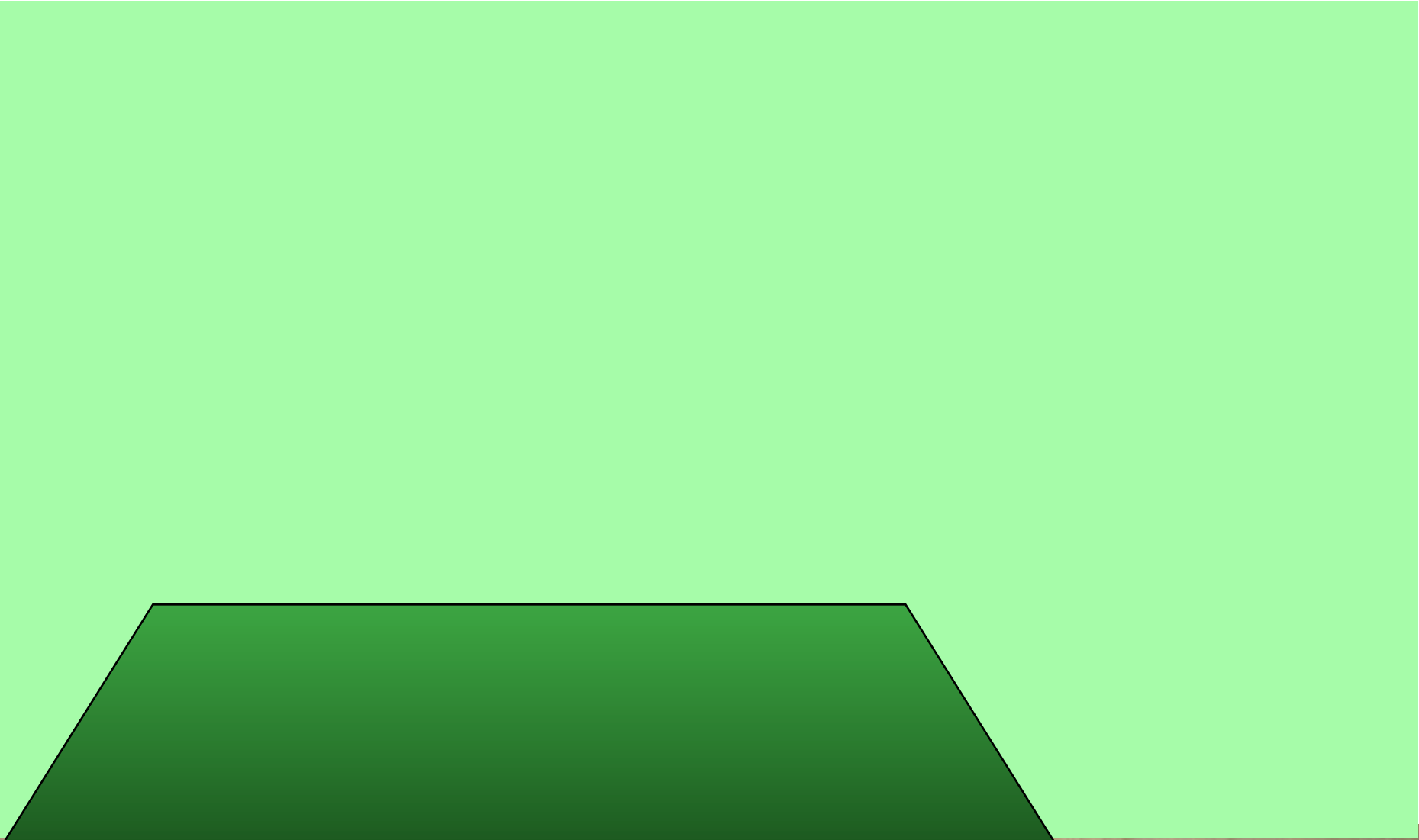
Calorimètre homogène à air: H_{igh} E_{nergy} $S_{\text{tereoscopic}}$ S_{ystem} :

le principe



Calorimètre homogène à air: High Energy Stereoscopic System: le principe

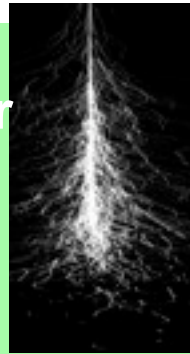
Gamma
ray



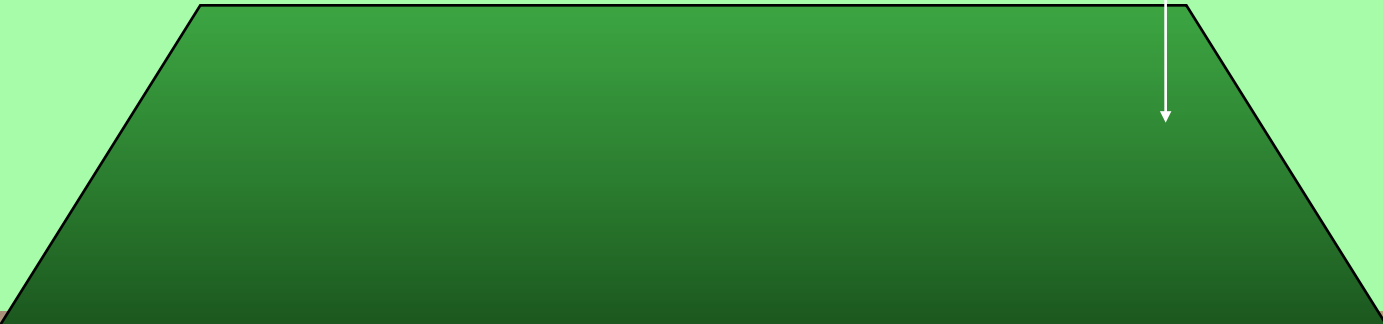
Calorimètre homogène à air: High Energy Stereoscopic System: le principe

Gamma ray

Air shower



~ 10 km



Calorimètre homogène à air: High Energy Stereoscopic System: le principe

Gamma ray

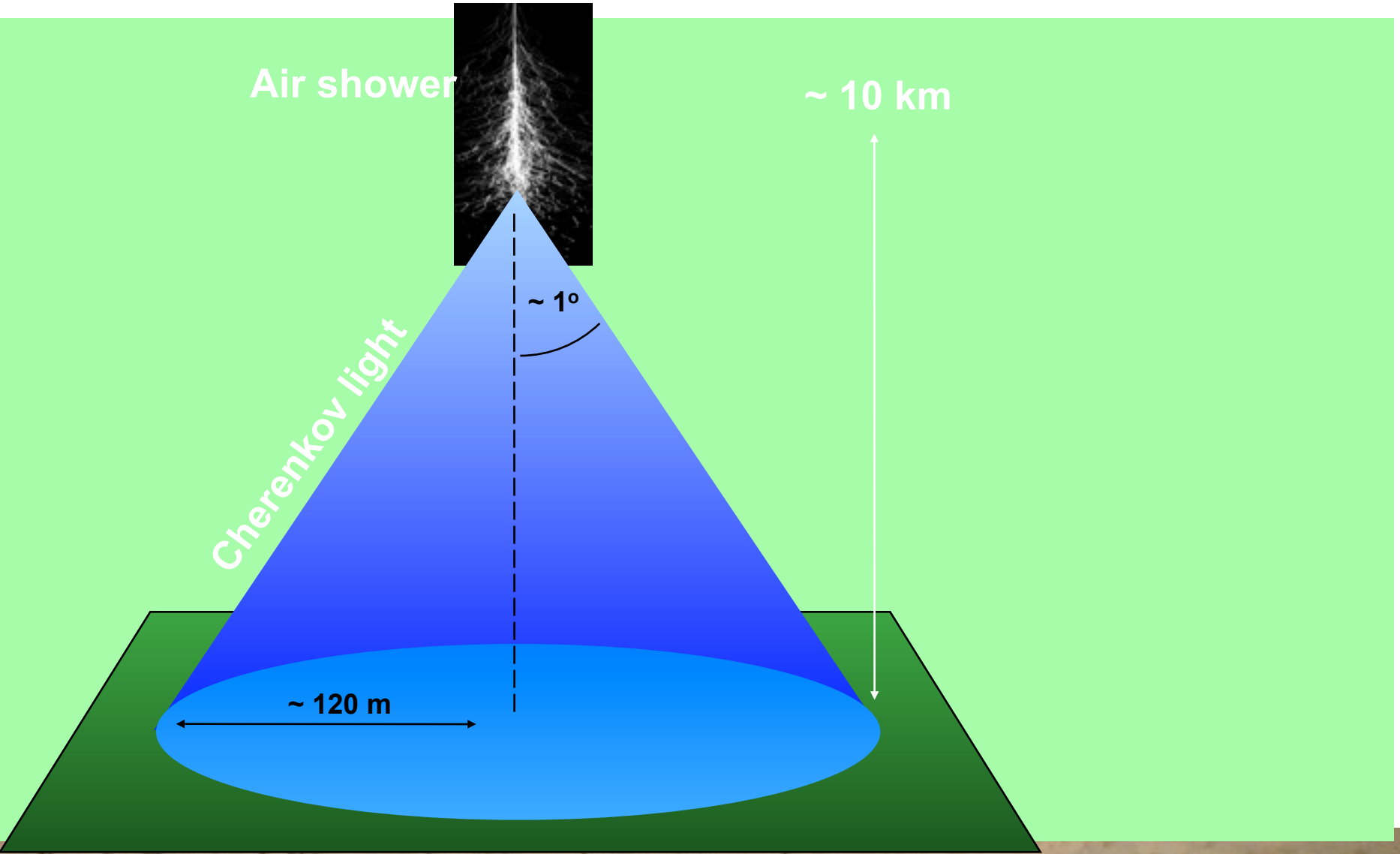
Air shower

~ 10 km

Cherenkov light

~ 1°

~ 120 m



Calorimètre homogène à air: High Energy Stereoscopic System: le principe

Gamma ray

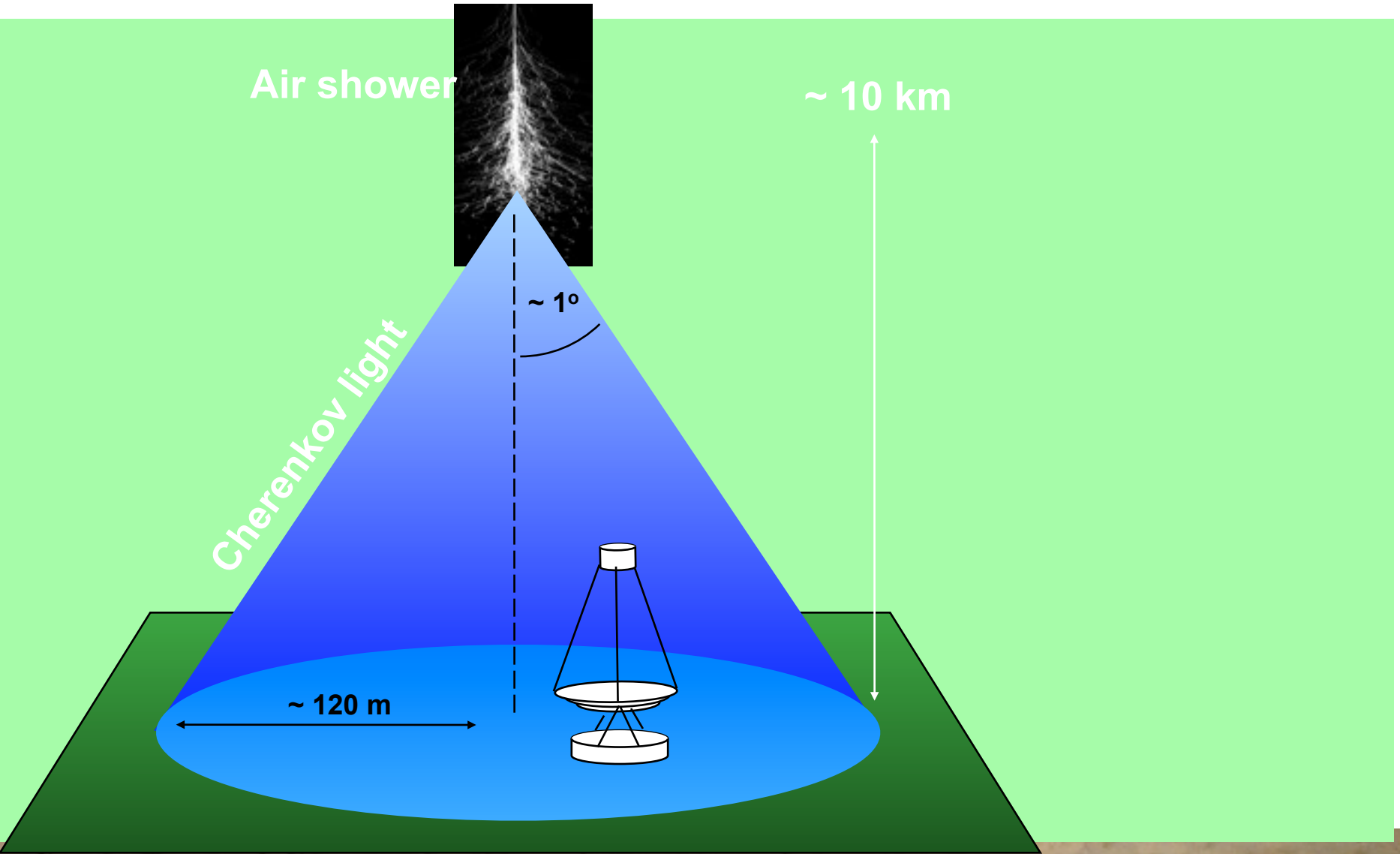
Air shower

~ 10 km

Cherenkov light

~ 1°

~ 120 m



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

Gamma ray

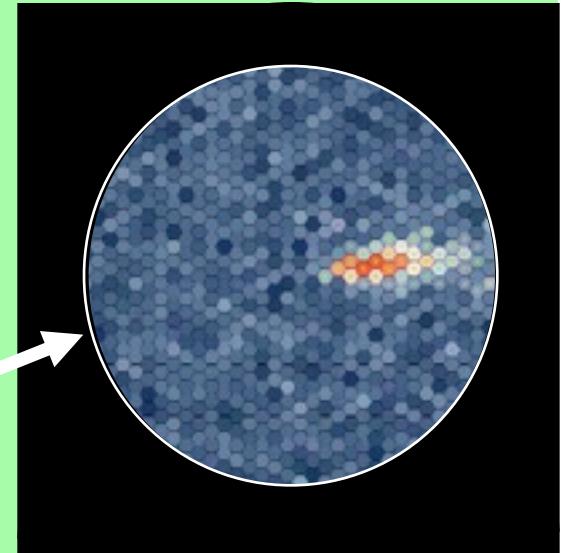
Air shower

~ 10 km

Cherenkov light

1°

~ 120 m



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

Gamma ray

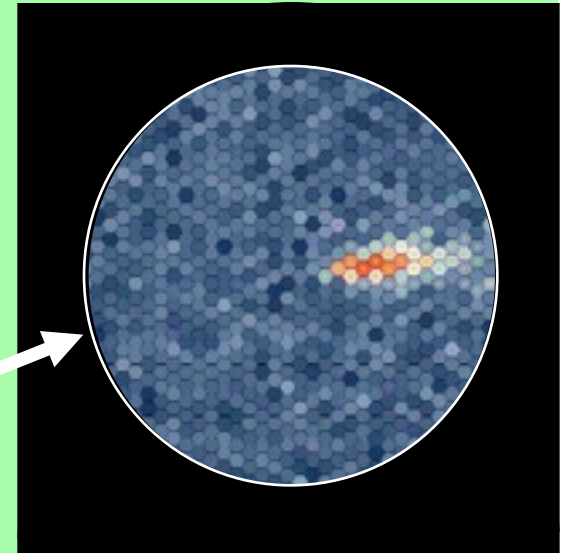
Air shower

~ 10 km

Cherenkov light

1°

~ 120 m



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

Gamma ray

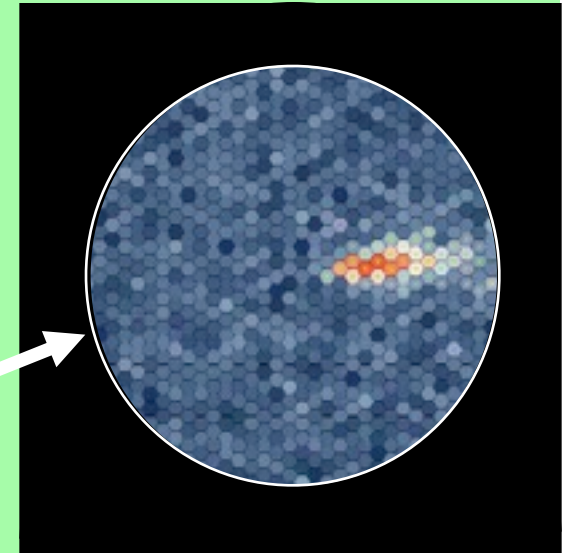
Air shower

~ 10 km

Cherenkov light

1°

~ 120 m



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



H.E.S.S.

Fin du 2^{ème} cours

La calorimétrie

cours n⁰³

La calorimétrie

- Pourquoi un calorimètre?
- Les **propriétés importantes** des calorimètres
- Le développement des **gerbes**
 - gerbes électromagnétiques
 - Interlude: les muons
 - gerbes hadroniques
- 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
- Des calorimètres à l'IN2P3
- Les systèmes de lecture
- Le déclenchement

Interactions avec
la matière

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)

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

Un facteur 9 radialement et longitudinalement

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

Les calorimètres à cristaux: bilan

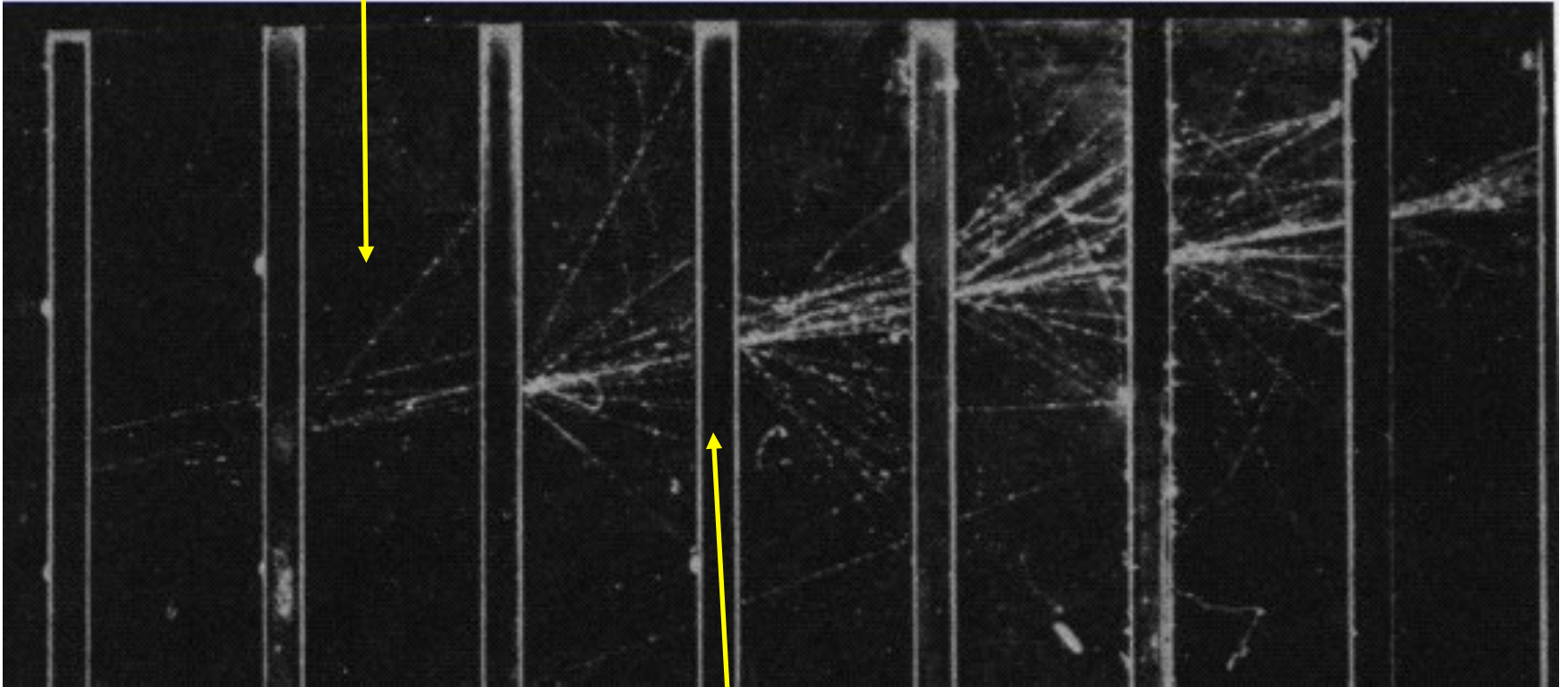
- Très utilisés pour les mesures de précision
- Terme stochastique $\sim 1-5\%/\sqrt{E}$
- Pas de matière devant le détecteur
- Ne permettent de découper la gerbe en profondeur (pas de segmentation longitudinale)
- Il faut obtenir une bonne uniformité entre les cristaux pour garantir une réponse a priori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

Les calorimètres à échantillonnage



Les calorimètres à échantillonnage

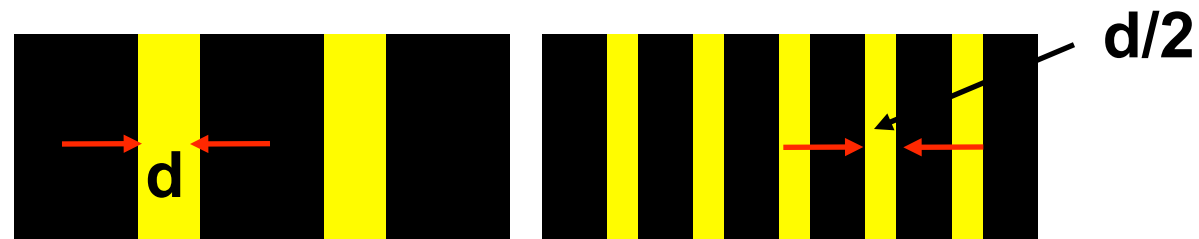
Milieu détecteur



Milieu absorbeur

Calorimètres à échantillonnage: fraction d'échantillonnage

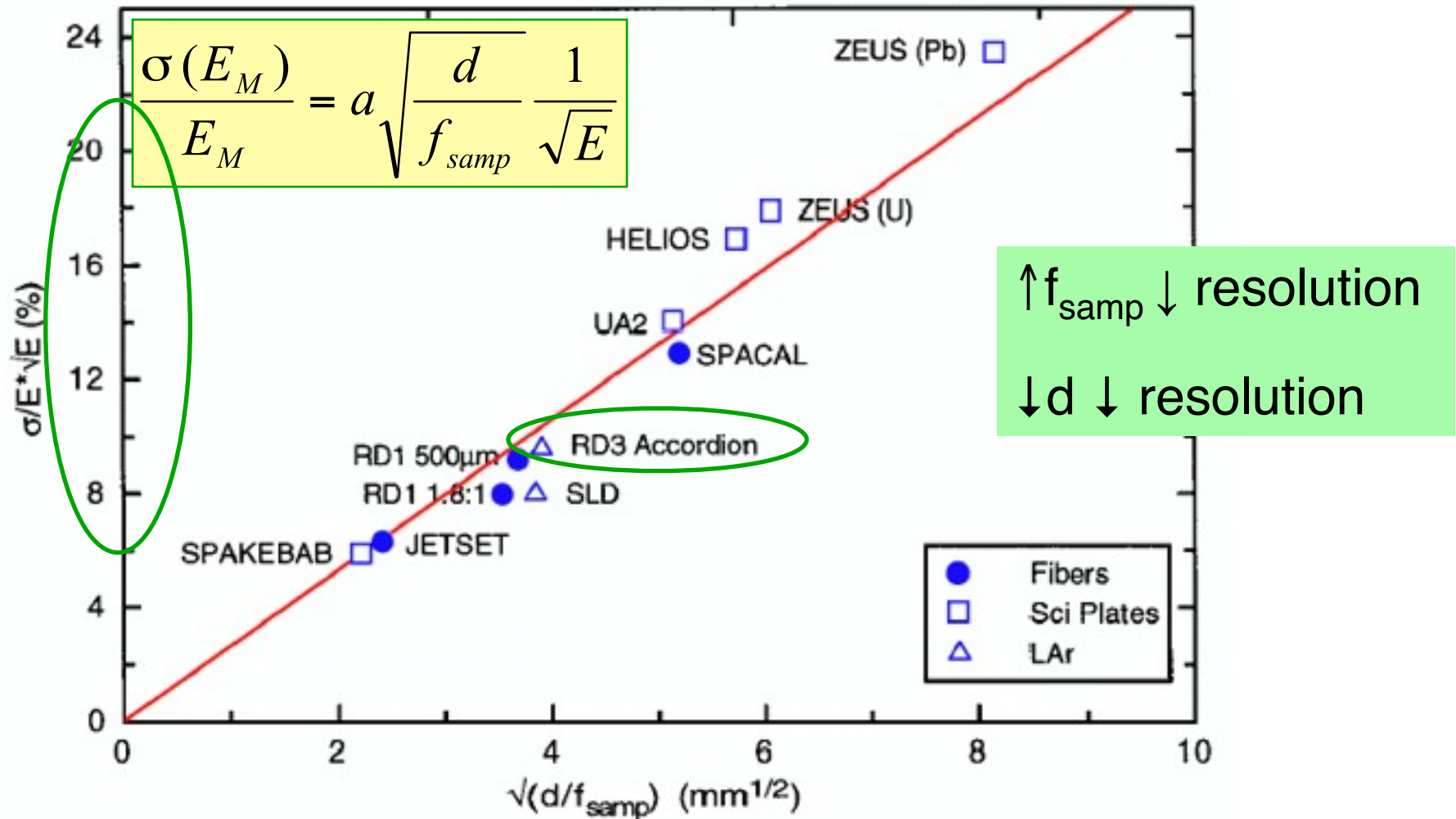
- Le signal vient des nombreuses particules (e^+ et e^-) de basse énergie (\sim MeV):
 - Les paires $e^+ e^-$ qui sont créées dans le milieu actif
 - Les paires $e^+ e^-$ qui sont créées dans le milieu absorbeur et qui atteignent le milieu détecteur
 - La chemin moyen d'une particule de 1 MeV est une 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}

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

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

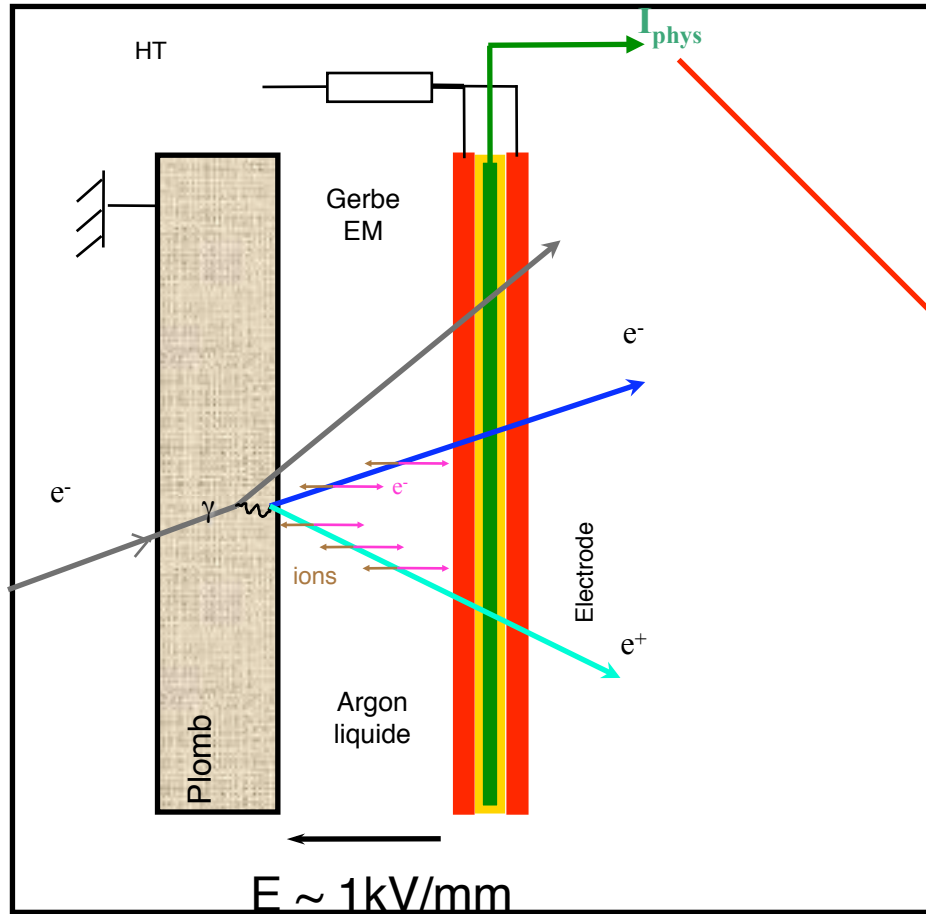
Avantages:

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

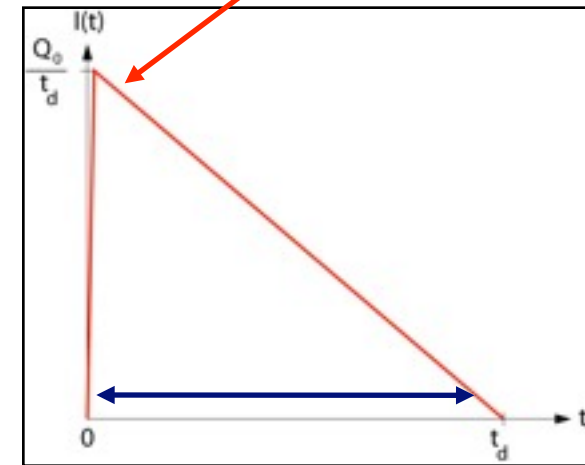
Inconvénients

Système cryogénique
Pureté
A priori lent (si on intègre
tt le signal)

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



Pic $\propto \int$ signal déposé

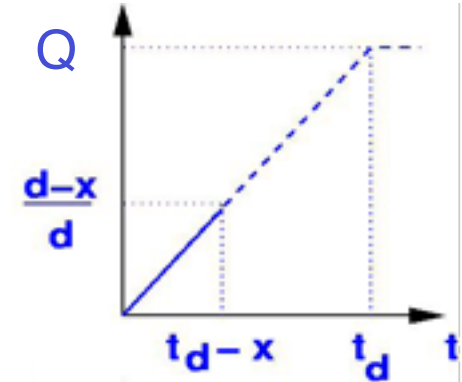
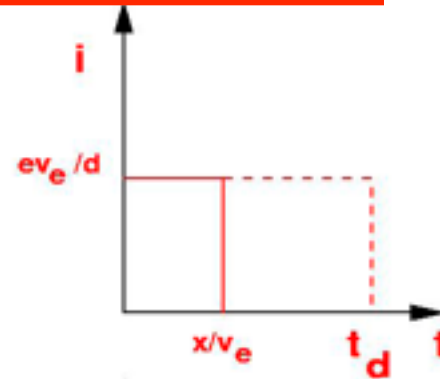
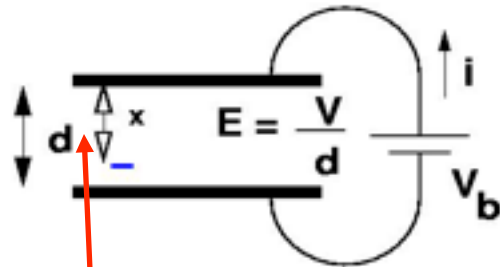


400 ns \approx 16 LHC BC

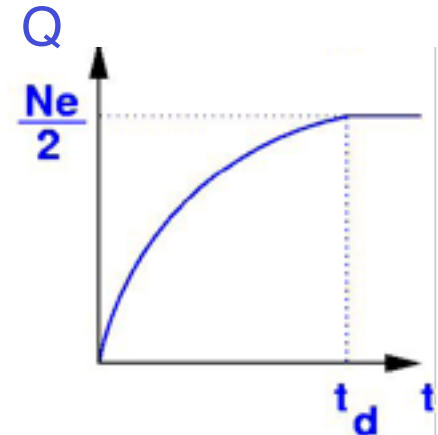
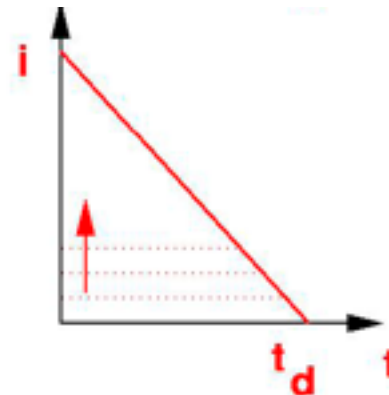
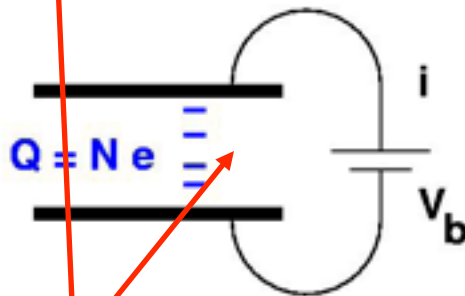
Collection du signal dans l'argon liquide

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

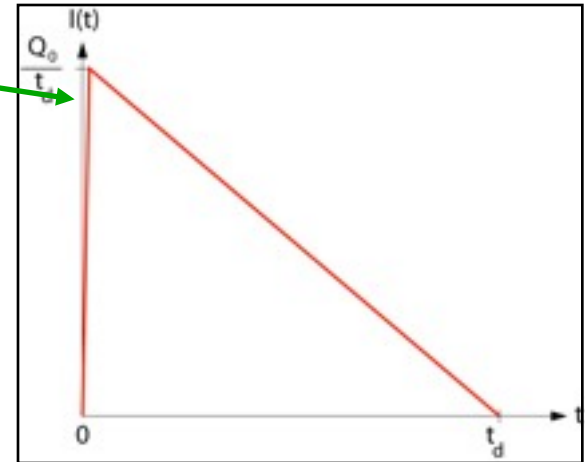


Le gap

Signal long mais lu rapidement

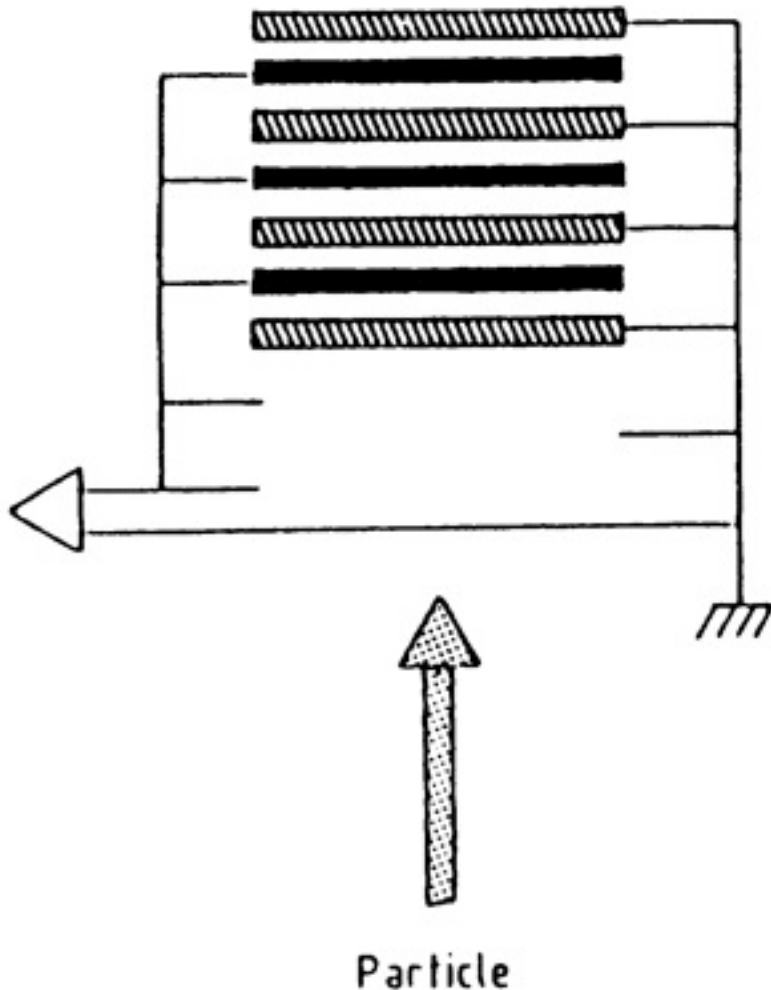
- Au LHC, les interactions ont lieu ttes les 25ns: on ne peut pas intégrer le signal total (450ns)
- La collaboration RD3 a développé la technique pour mesurer le courant initial

- Amplification bas bruit pour ($\sim 0.1 \text{ mA} - 10 \text{ mA}$)
- Mise en forme CR-RC2
 - pour minimiser le bruit total
 - limiter la bande passante autour de 40MHz



- Performances démontrées dans les années 1991-1995

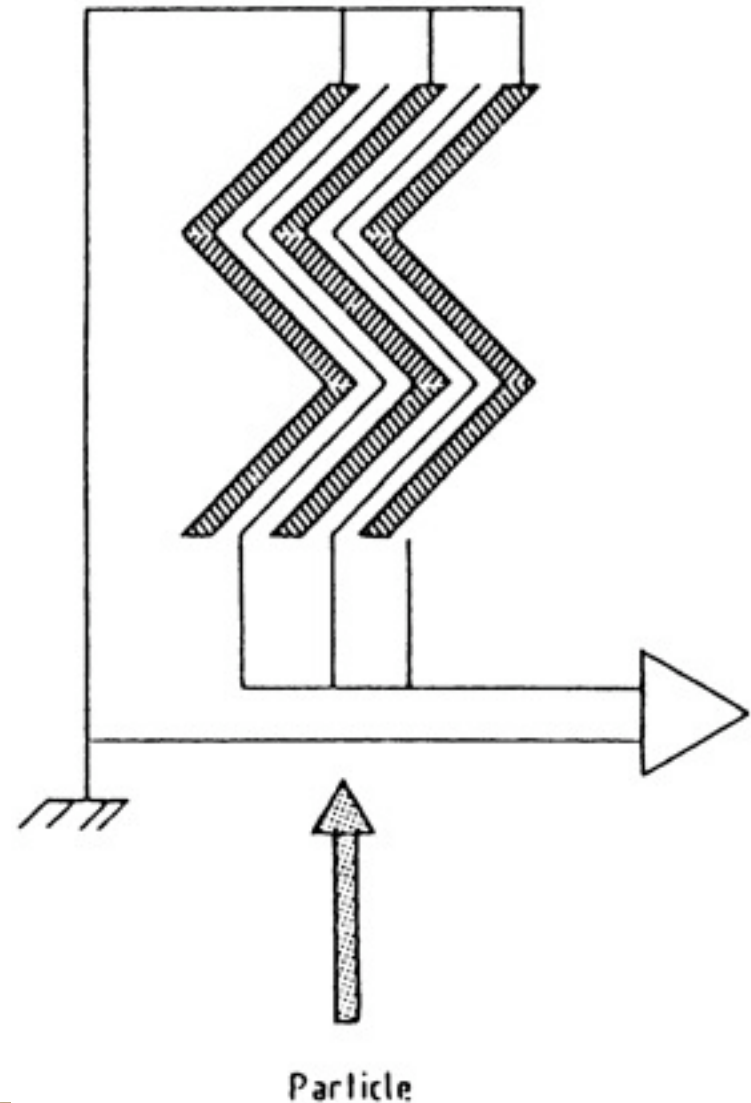
L'accordéon: pourquoi ?



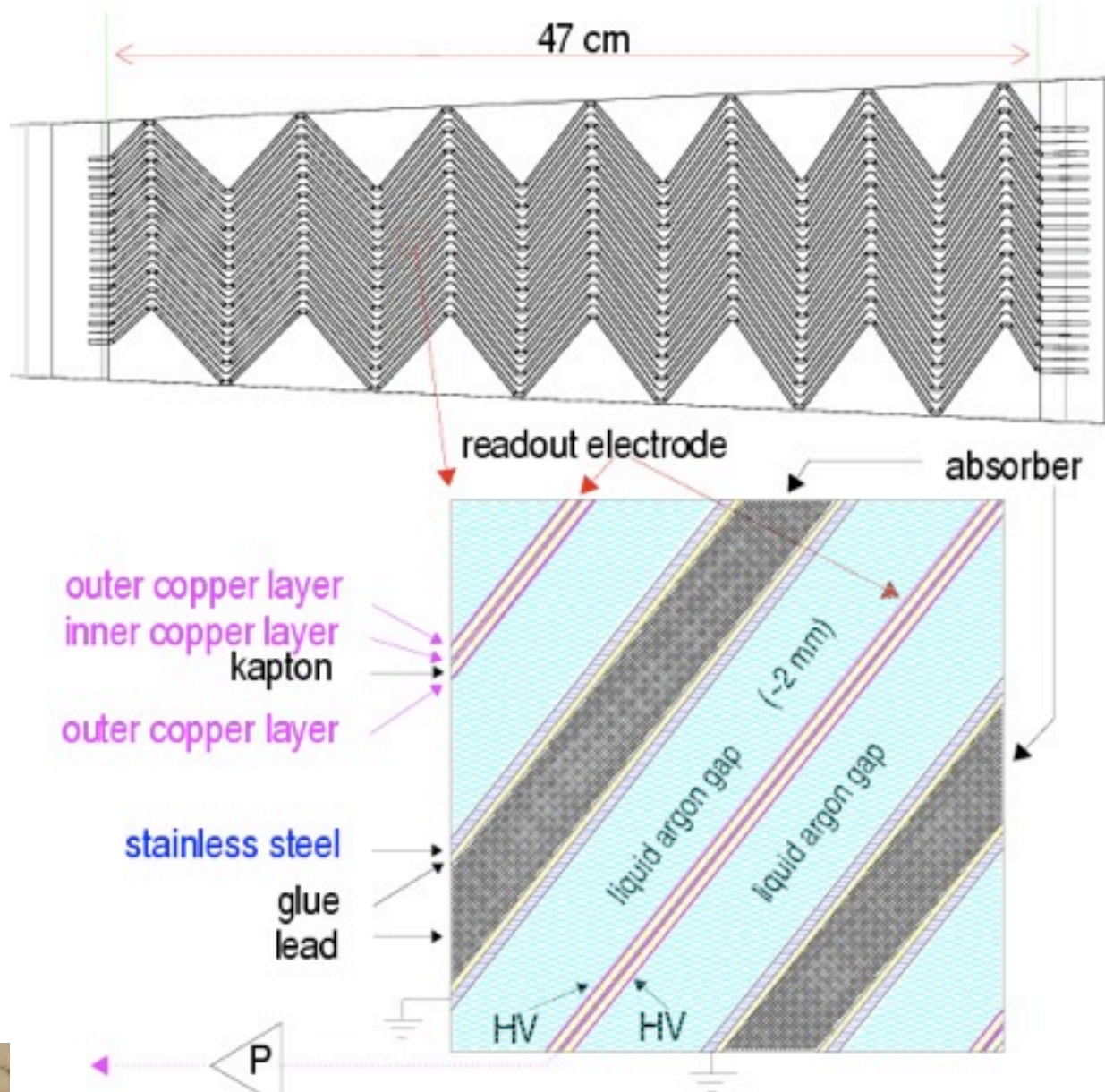
- Les anciens calorimètres à argon liquide avaient un temps de réponse lent (intégration du signal).
- Electrodes perpendiculaires aux particules
- Longs câbles
 - pour emmener les signaux vers les preamplis (transfert \sim qques ns)
 - regrouper ensemble des gaps
- Zones mortes dues aux câbles

L'accordéon

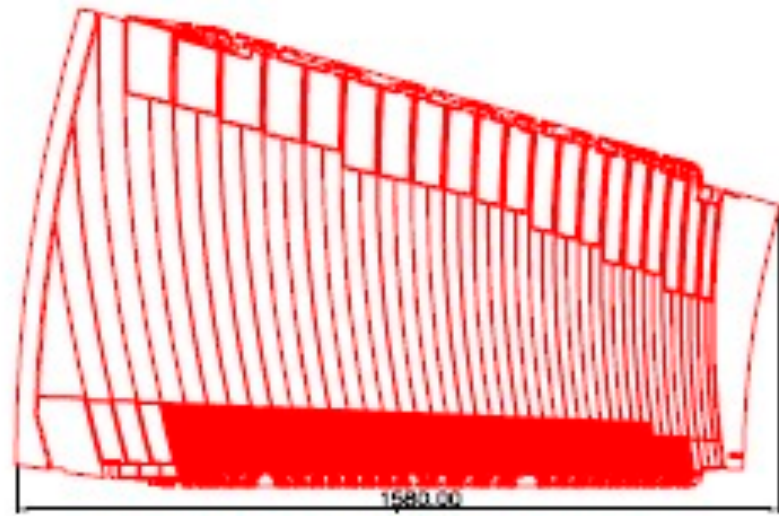
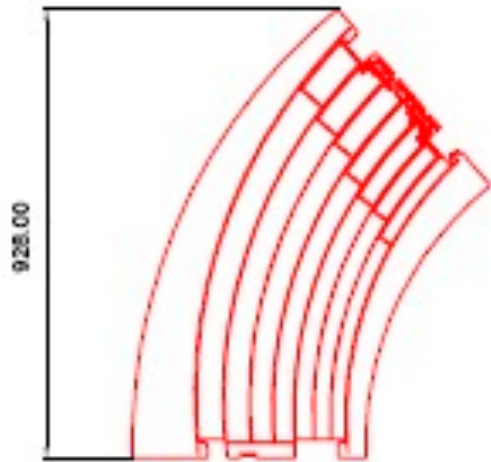
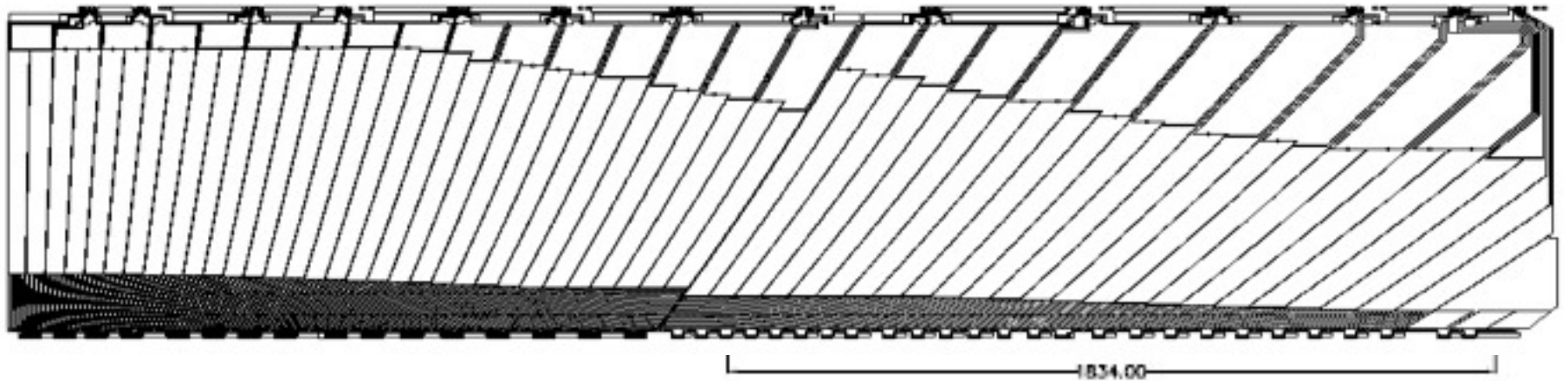
- Géométrie à accordéon:
rapide
- Les électrodes sont parallèles aux particules incidentes
 - lectures des signaux à l'avant et à l'arrière
 - pas de longues connexions
- Le découpage en profondeur est dessiné sur les électrodes
- **Pas d'espace sans détection**



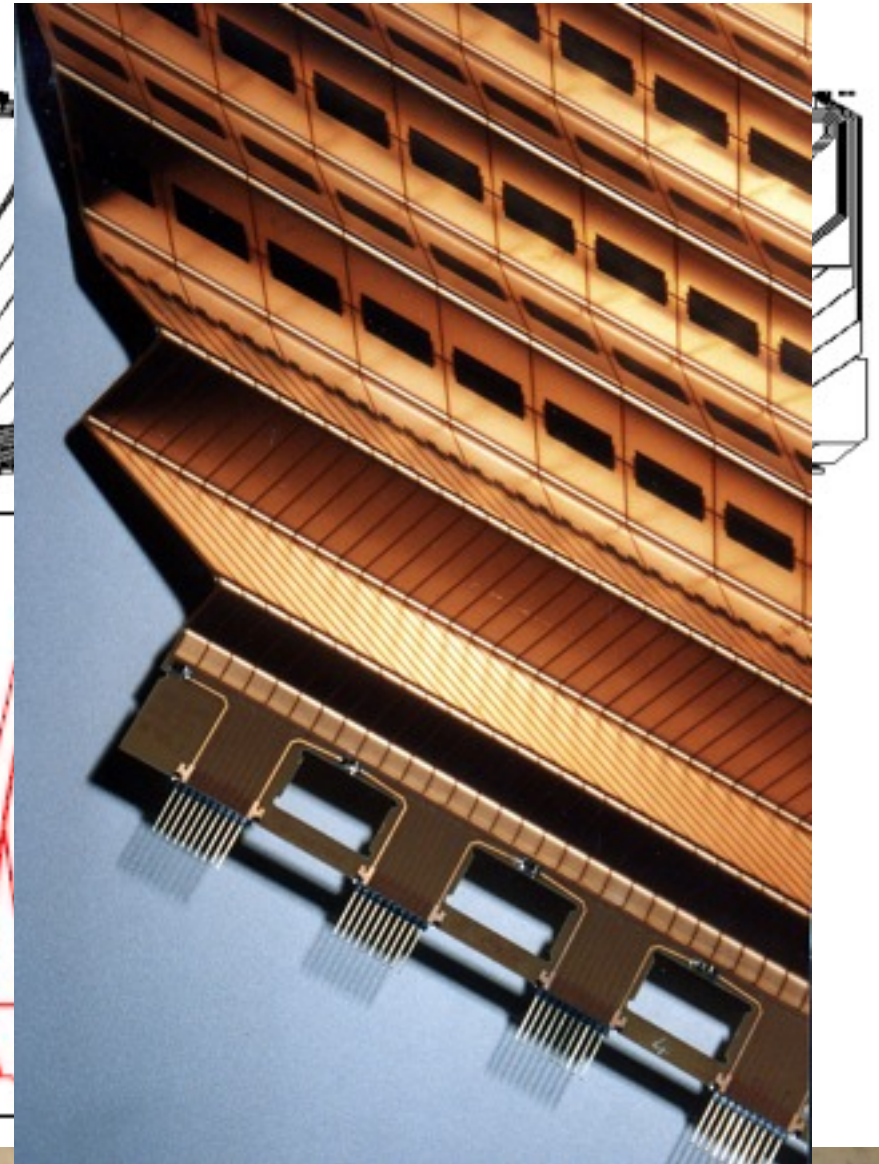
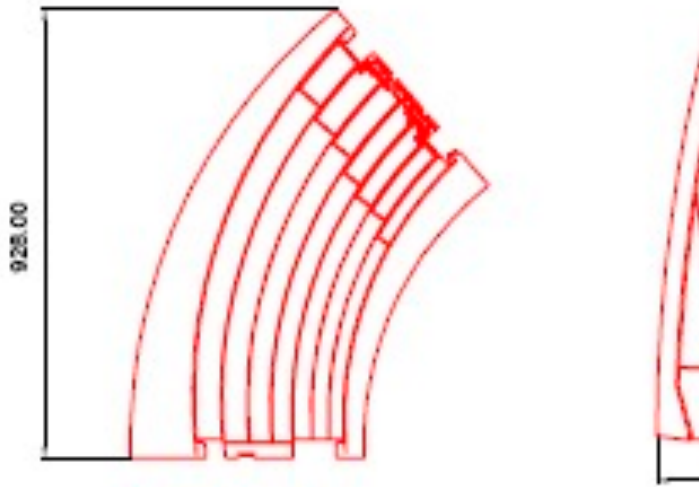
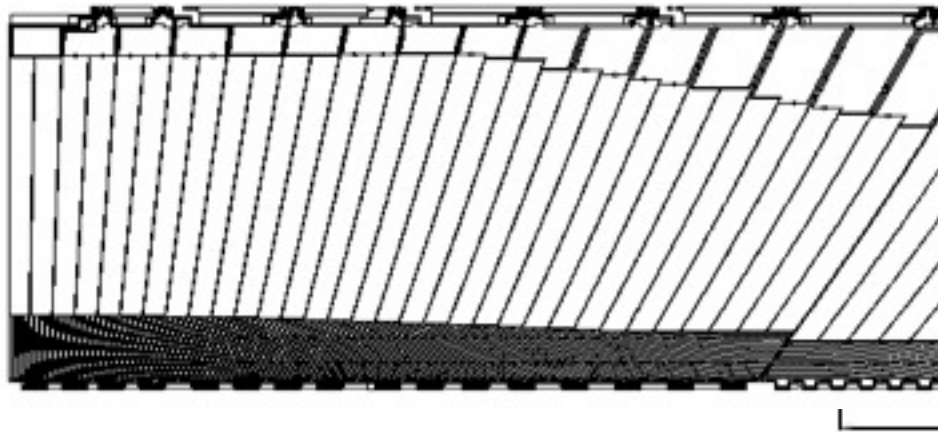
L'accordéon



La segmentation

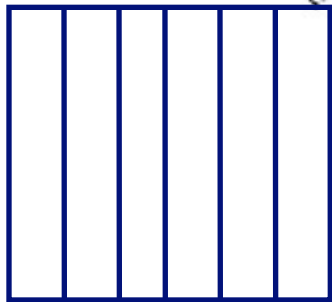
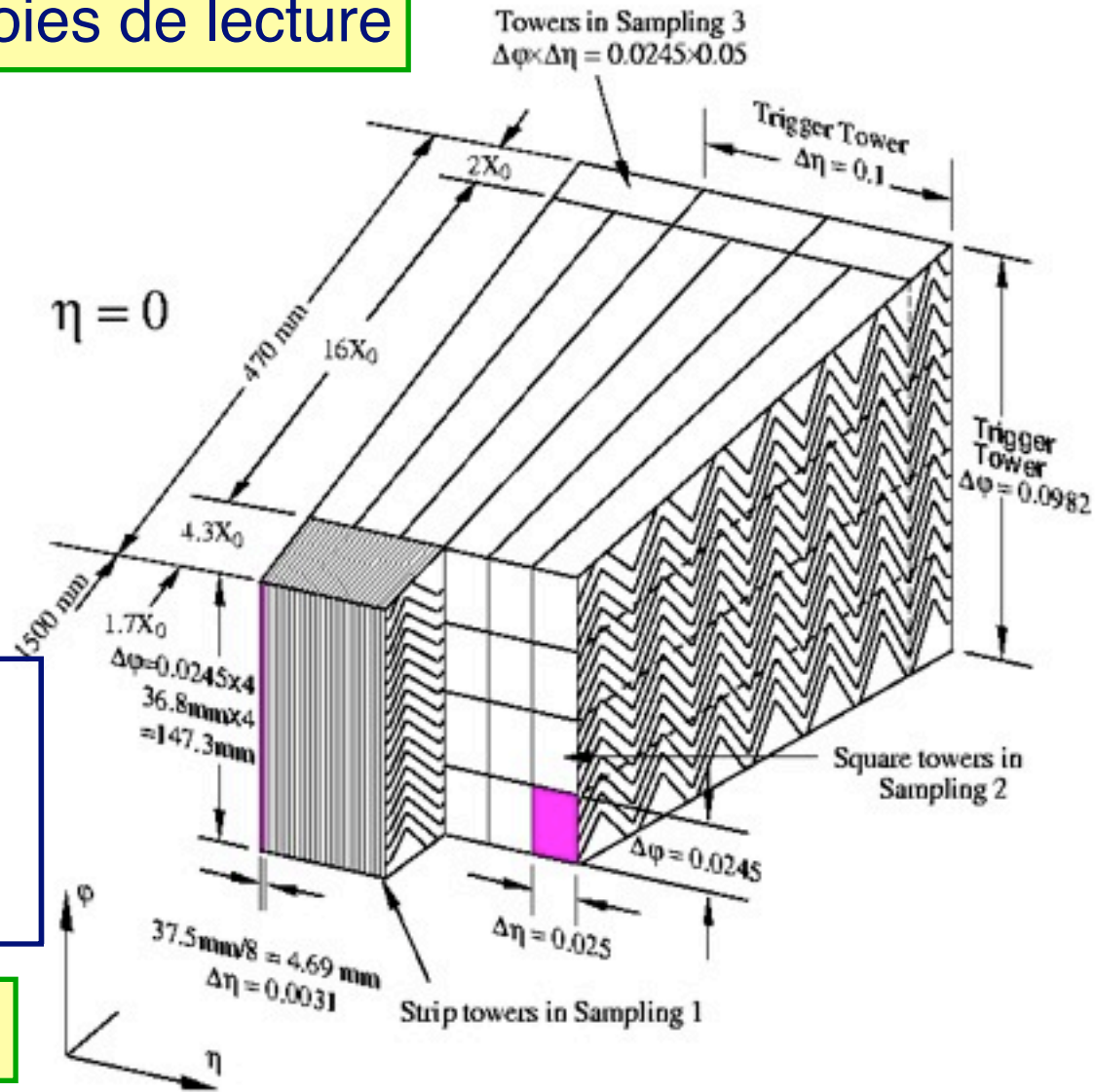


La segmentation

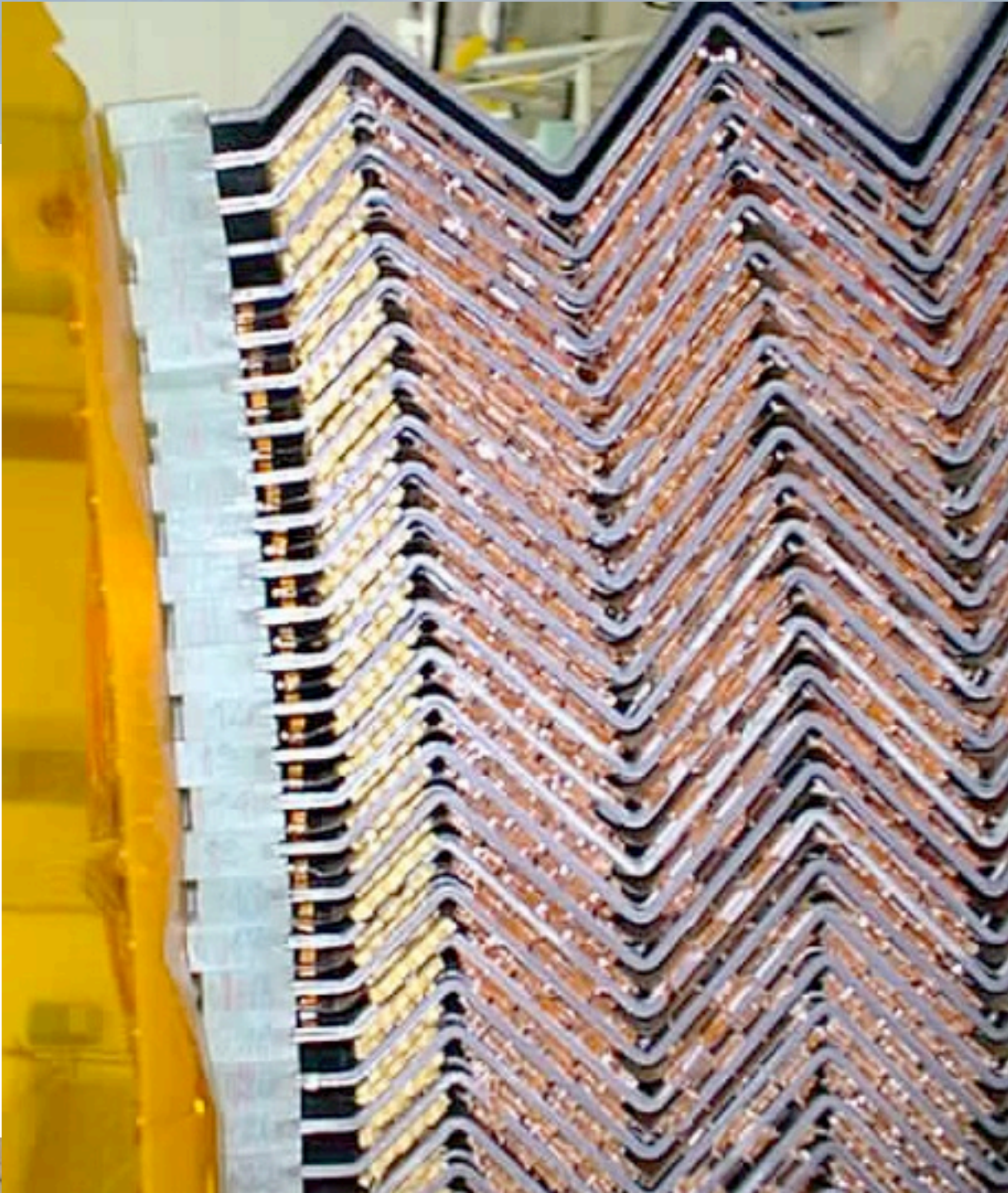


La segmentation

~200000 voies de lecture



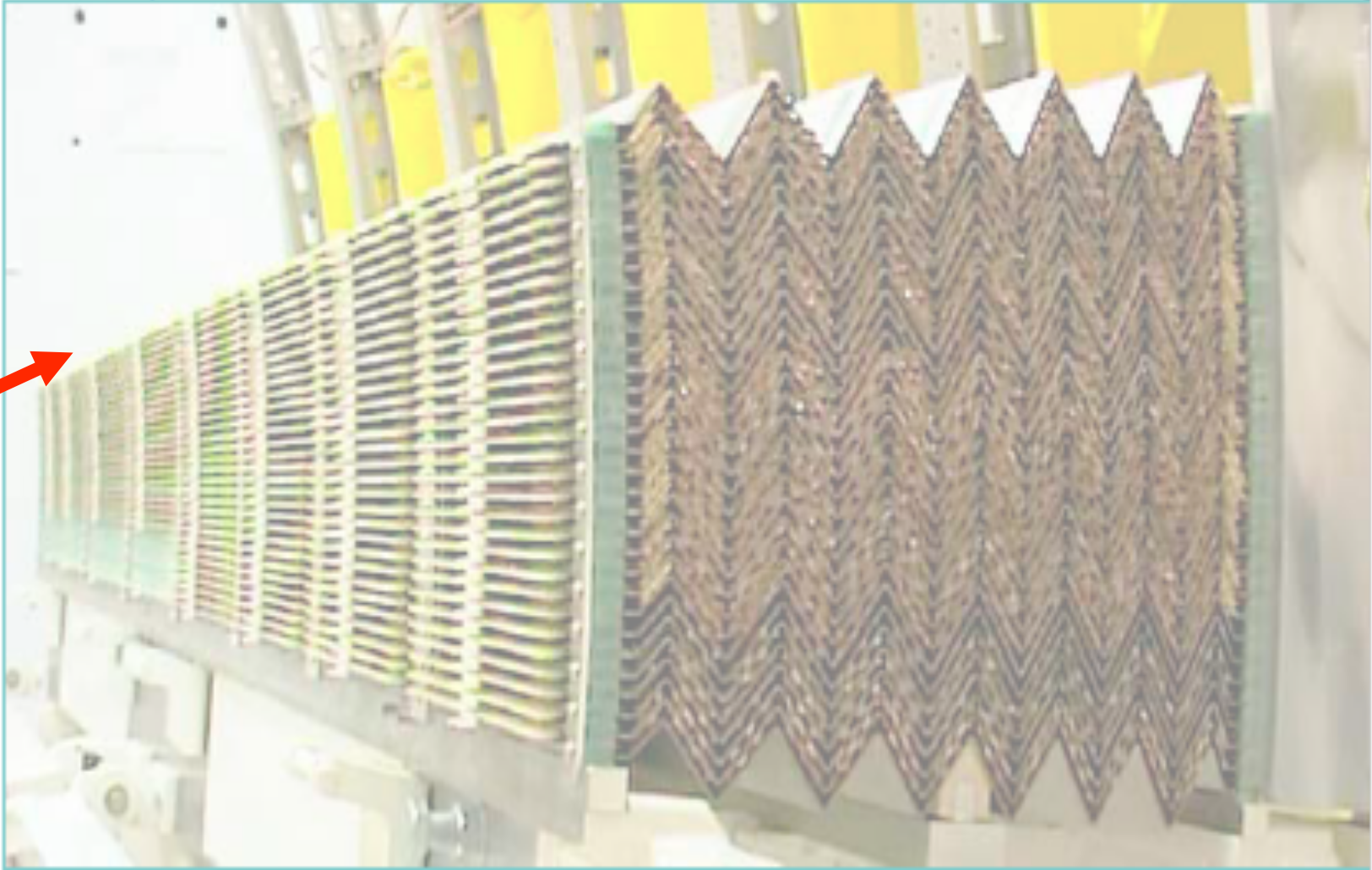
Presampler



$\mu\text{A}/\text{GeV}$: étalonnage

- Accordion sampling fraction: $\sim 18\%$
- For one GeV deposited in the calorimeter: 180 MeV are in the LAr
- Ultimately, the energy from the shower (electrons), is deposited as ionisation energy
- Ionization potential of LAr is 23.6 eV
- $180 \text{ MeV}/23.6 \text{ eV} = 8.5 \cdot 10^6$ electrons
- The initial current is therefore:
$$I = (8.5 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})/450 \text{ ns} = 3 \mu\text{A}$$
- Here we are for the absolute calibration of the LAr calorimeter:
 - $3 \mu\text{A}/\text{GeV}$
 - Today in Database there is: $2.6 \mu\text{A}/\text{GeV}$

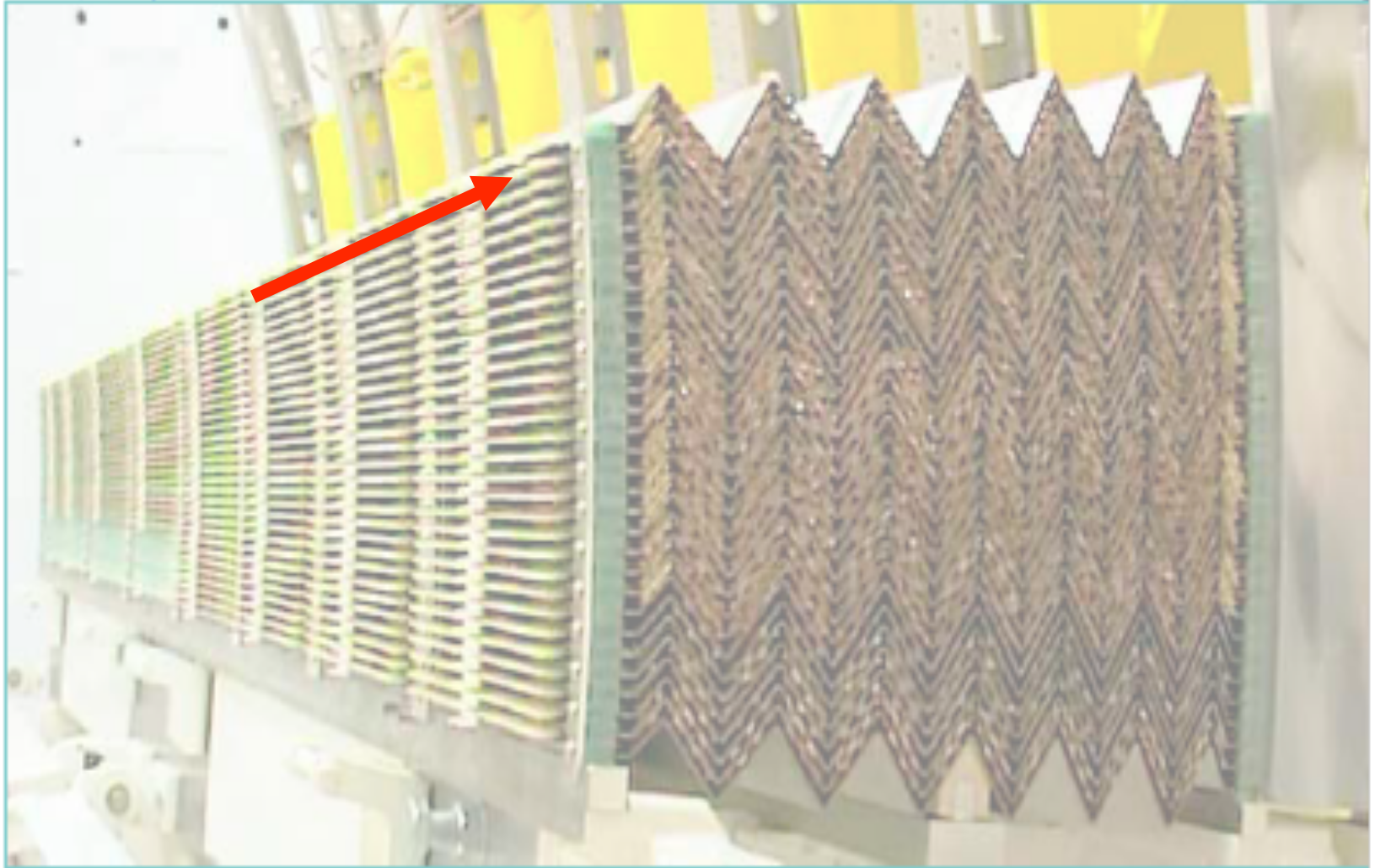
Les performances de l'accordéon: **uniformité**



Middle η index

middle η index

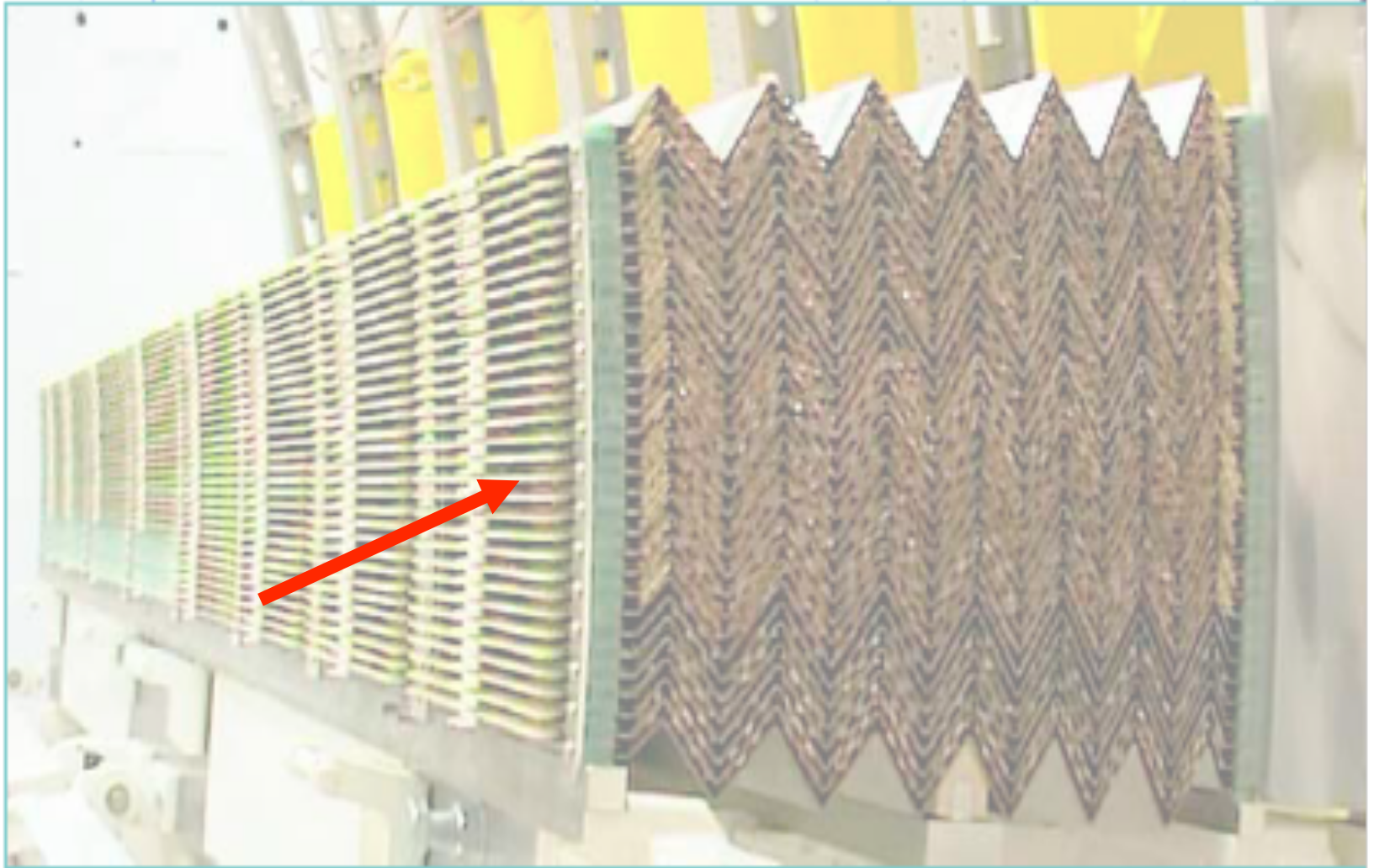
Les performances de l'accordéon: **uniformité**



Middle η index

middle η index

Les performances de l'accordéon: **uniformité**

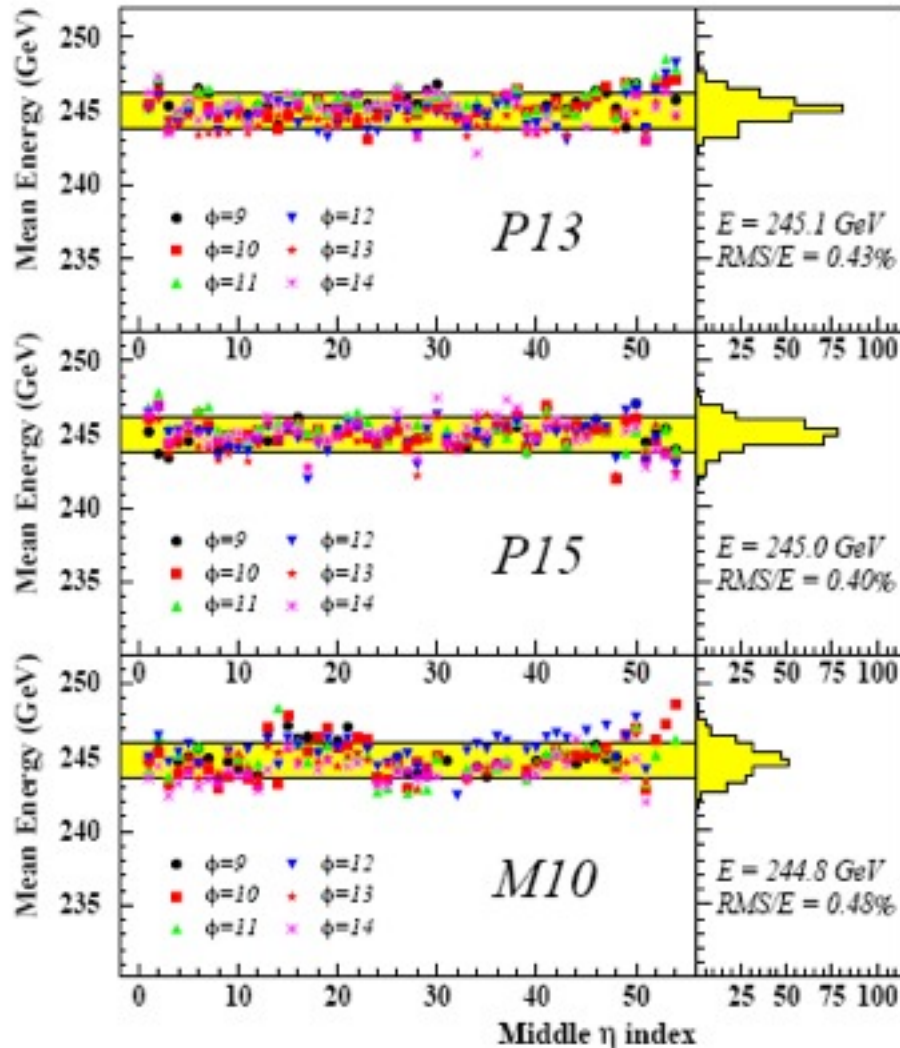


Middle η index

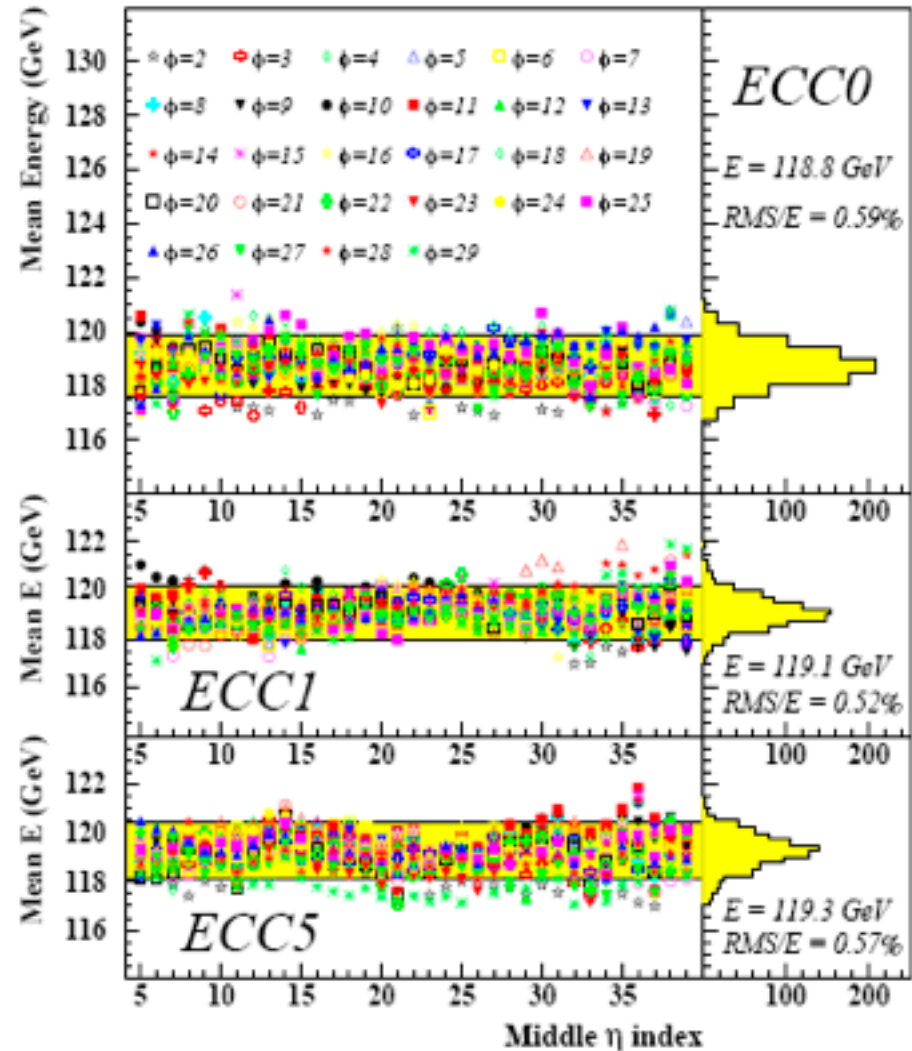
middle η index

Les performances de l'accordéon: **uniformité**

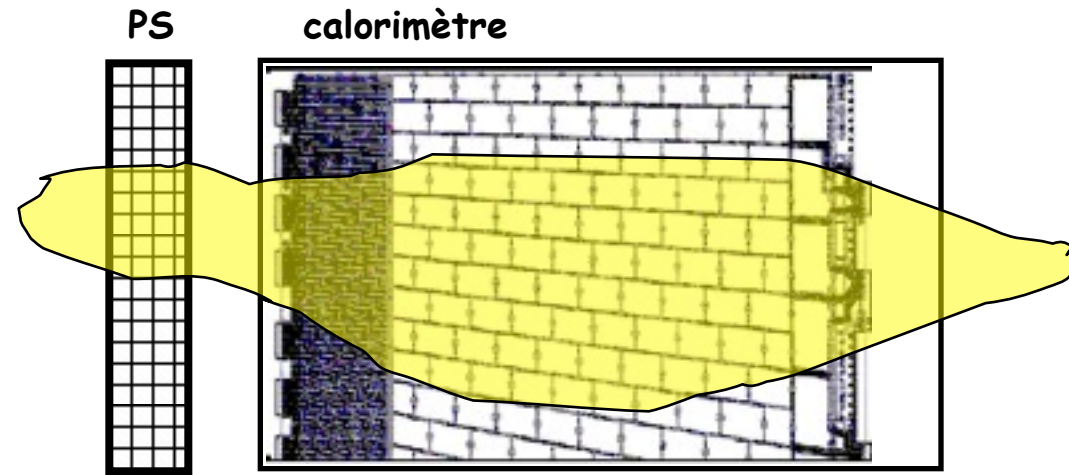
Tonneau



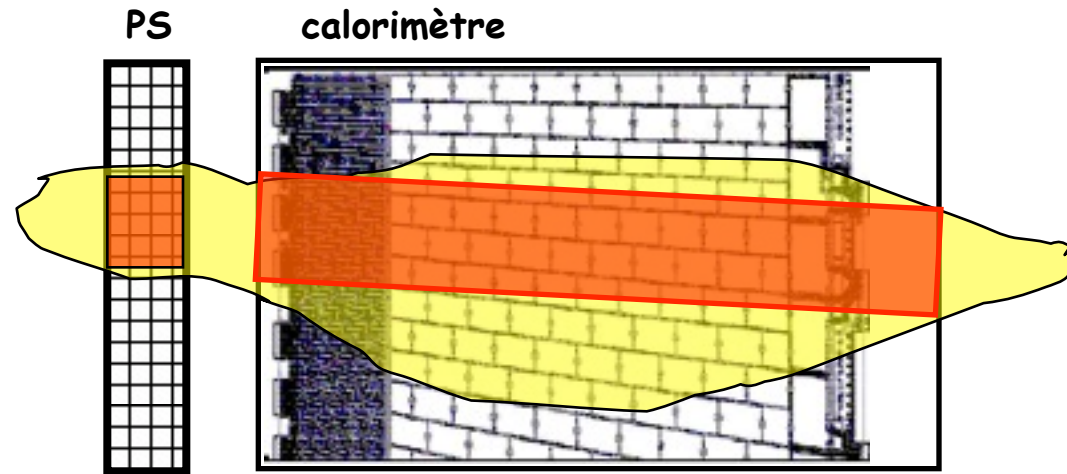
Bouchons



Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

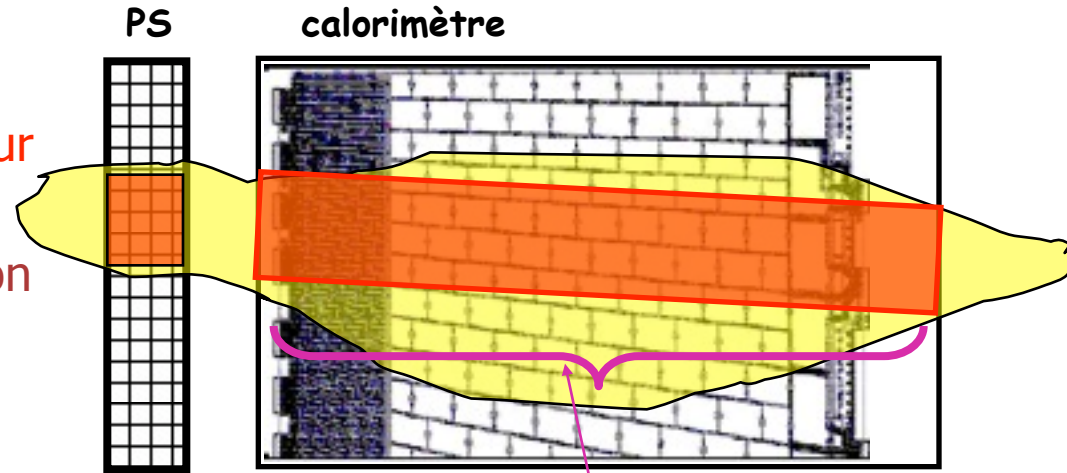


Calibration des clusters (gerbes reconstruites)



Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

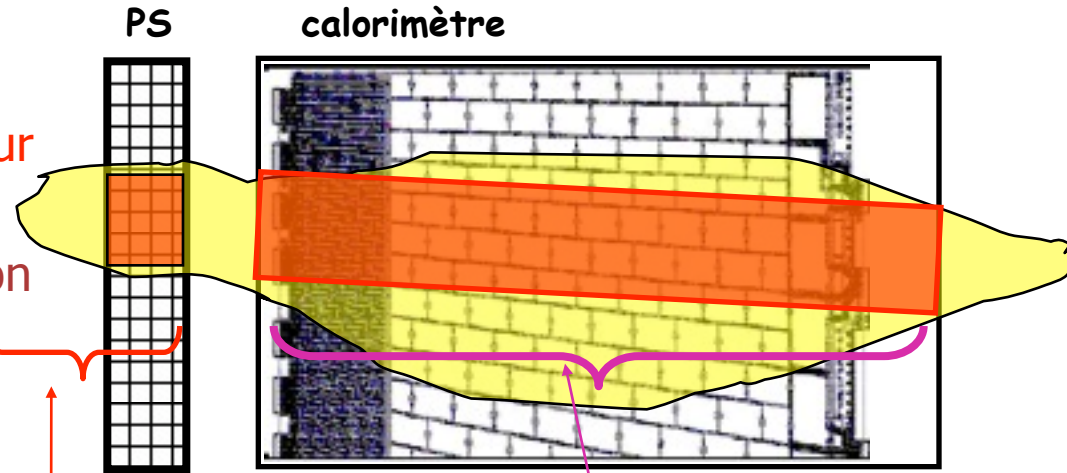
- E_{rec} : corriger E_{acc} pour les pertes
 - dans la matière avant le détecteur (détecteur central + cryostat)
 - entre le presamplifier et l'accordéon
 - sur les côtés de la gerbe reconstruite $E_{outcluster}$
 - à l'arrière de l'accordéon E_{leak}



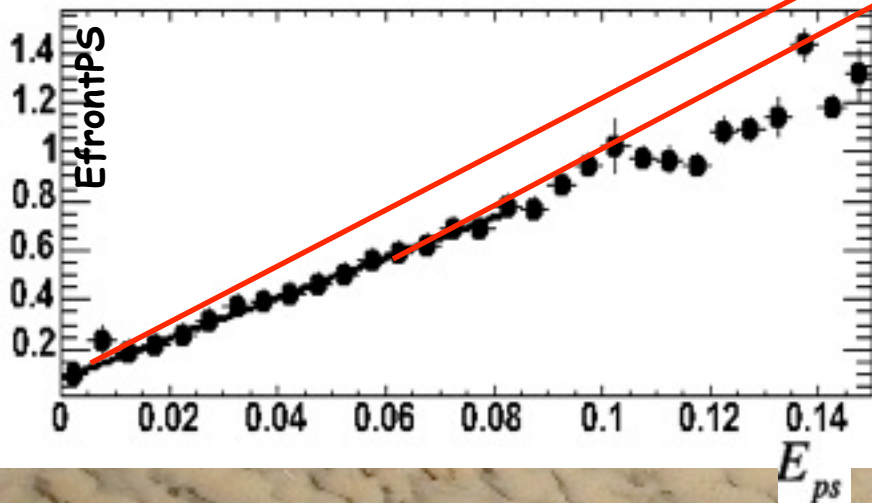
$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$

Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

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

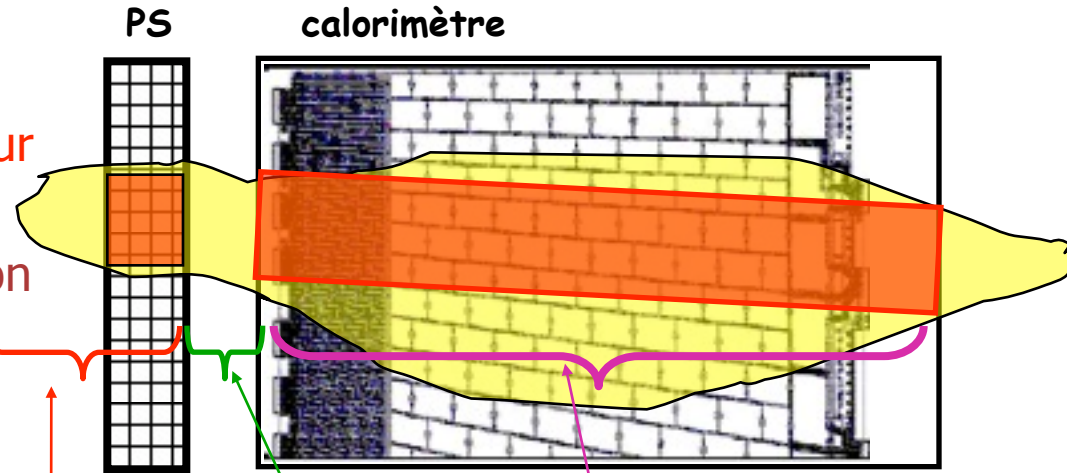


$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$

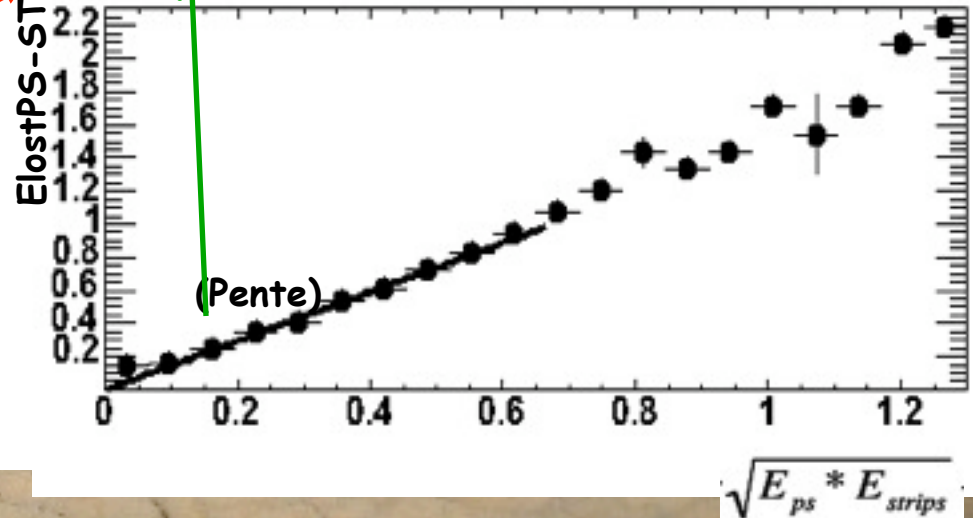
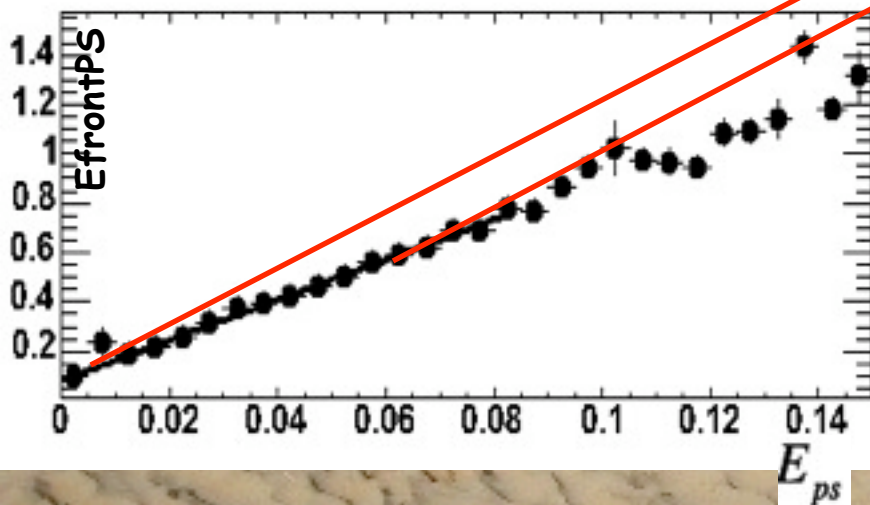


Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

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

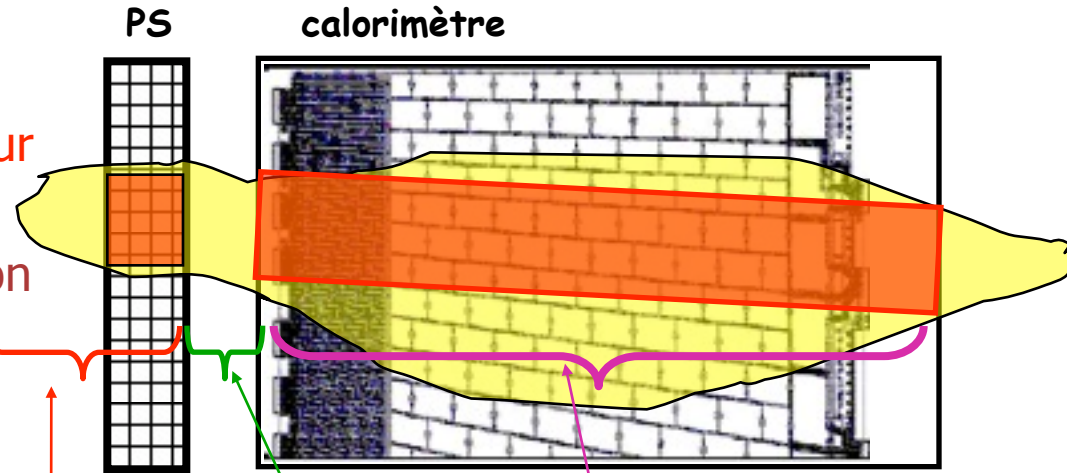


$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$

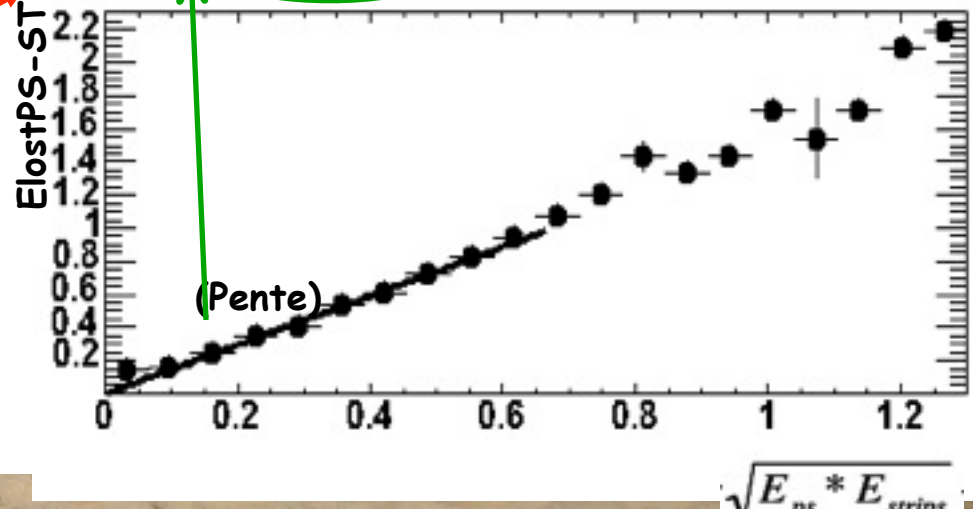
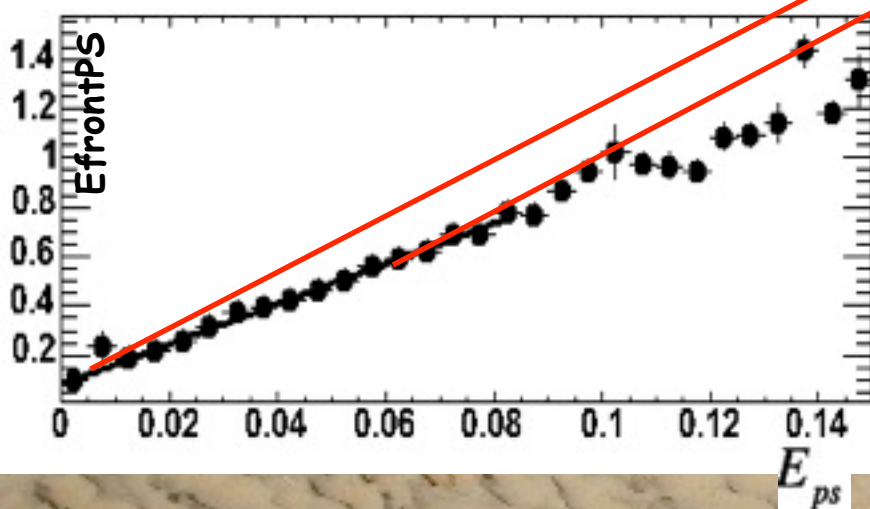


Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

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



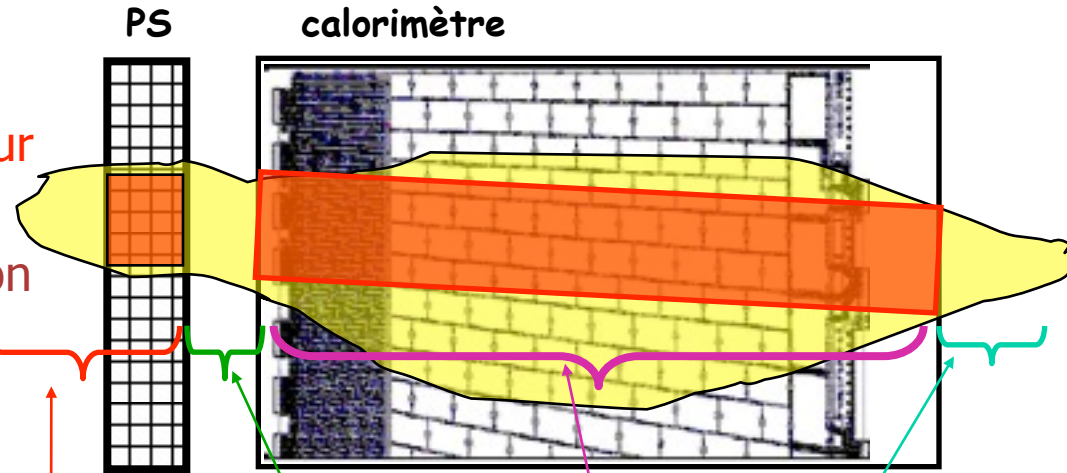
$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$



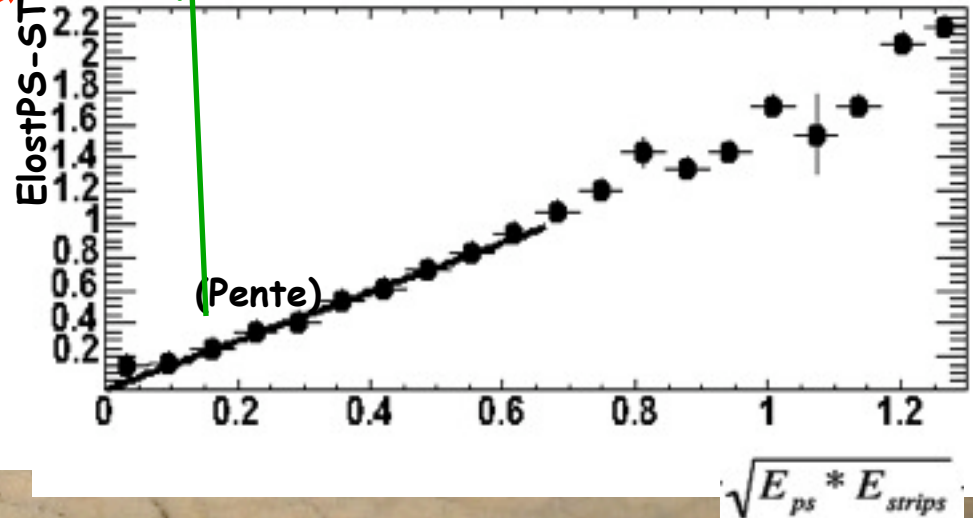
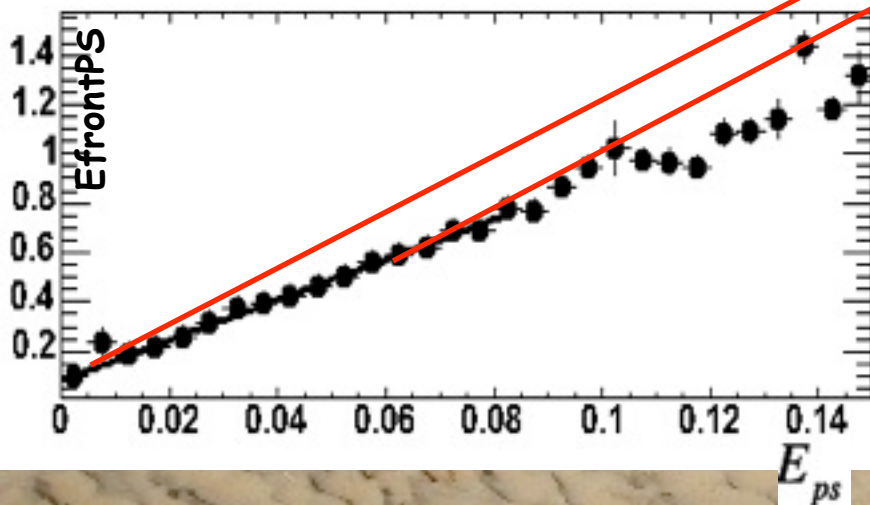
$$\sqrt{E_{ps} * E_{strips}}$$

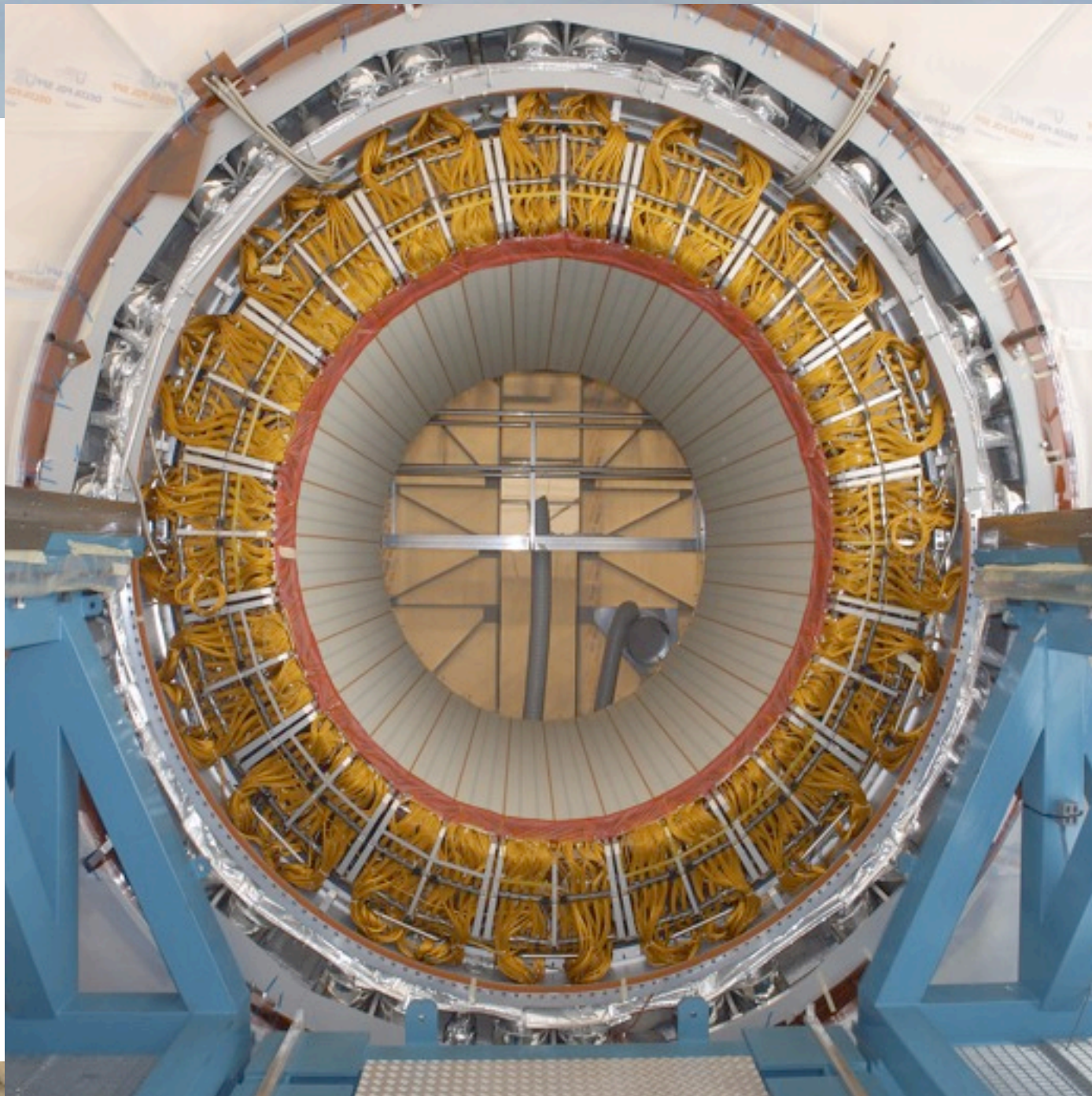
Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

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

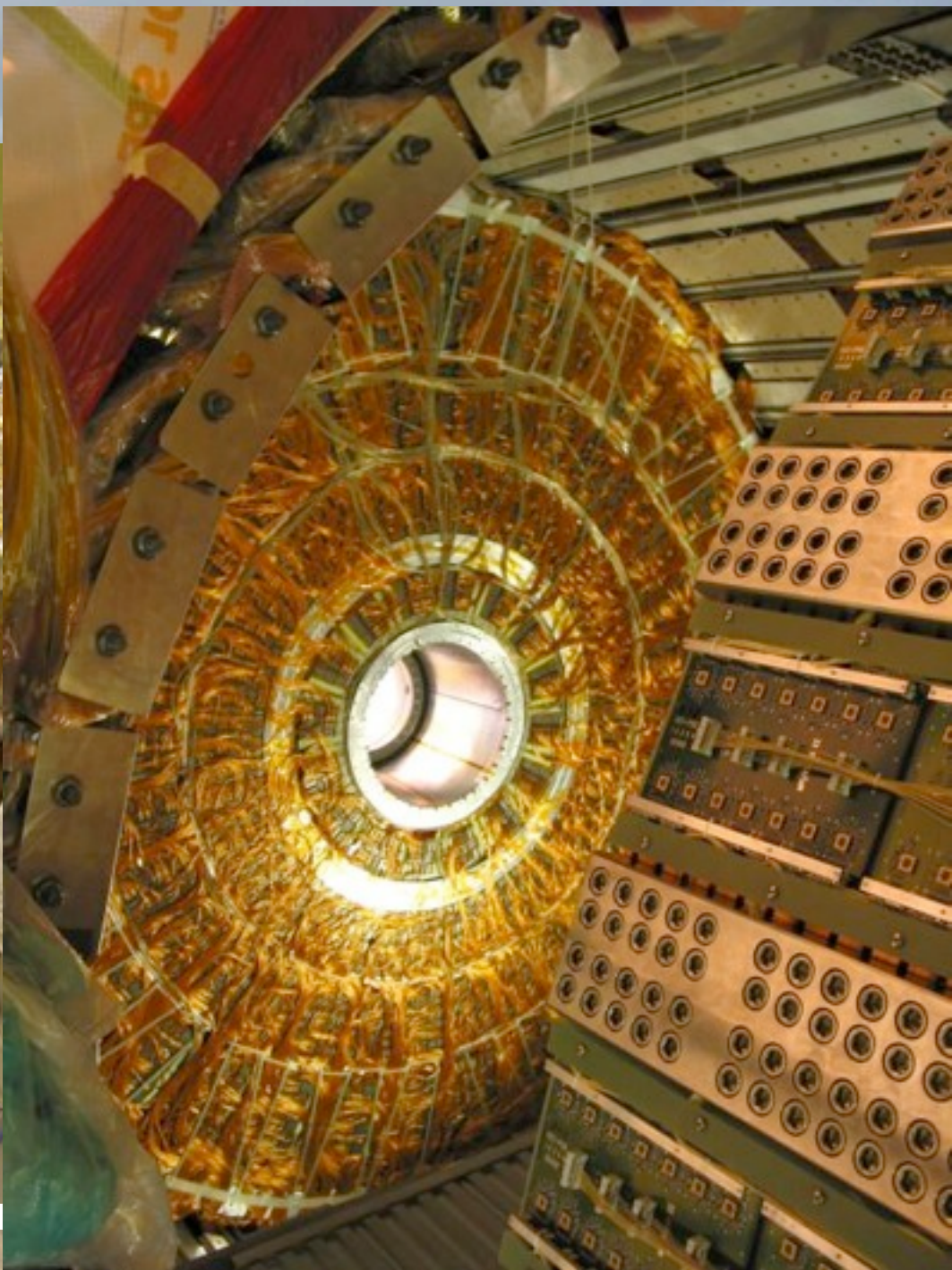


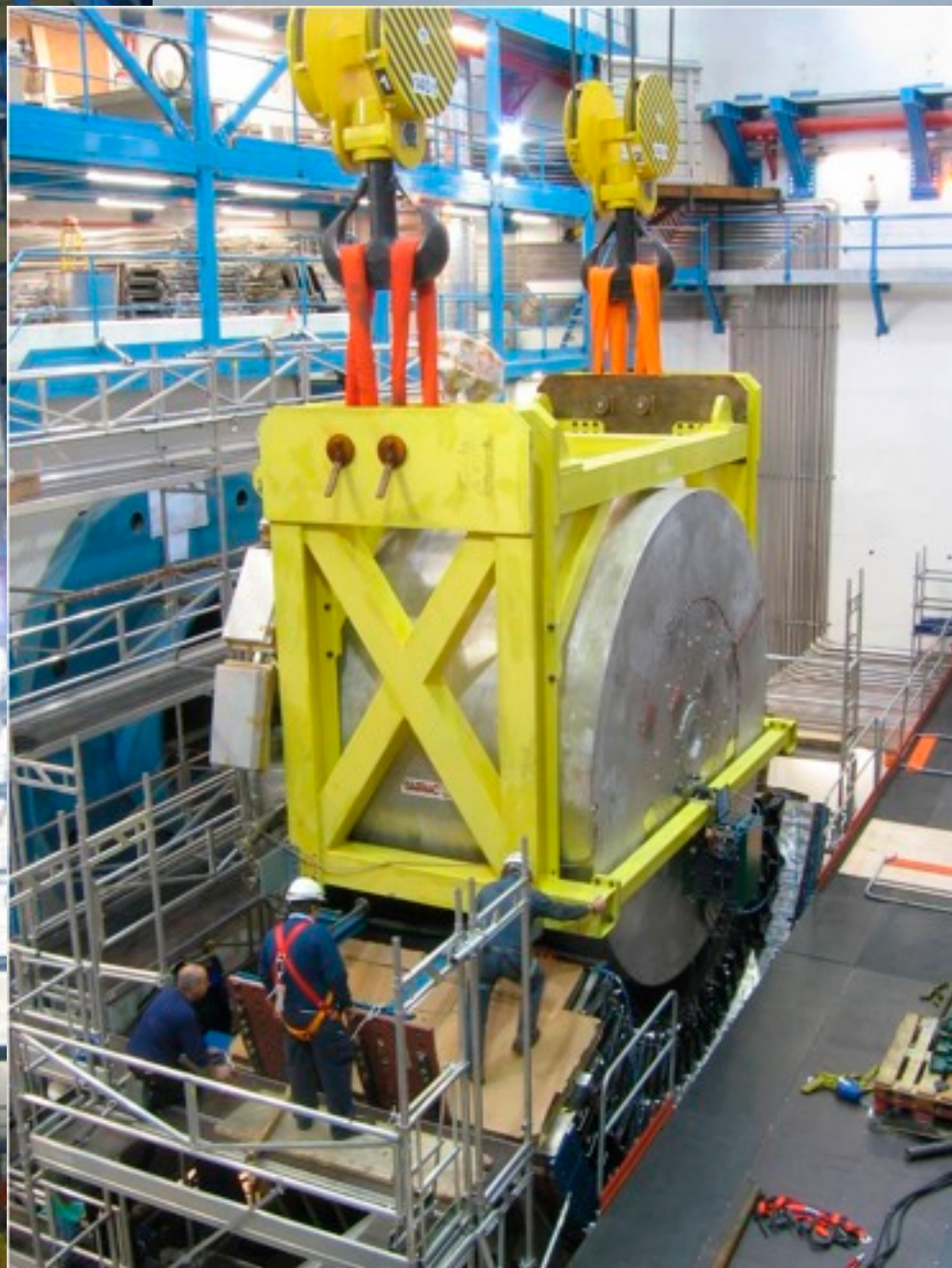
$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$

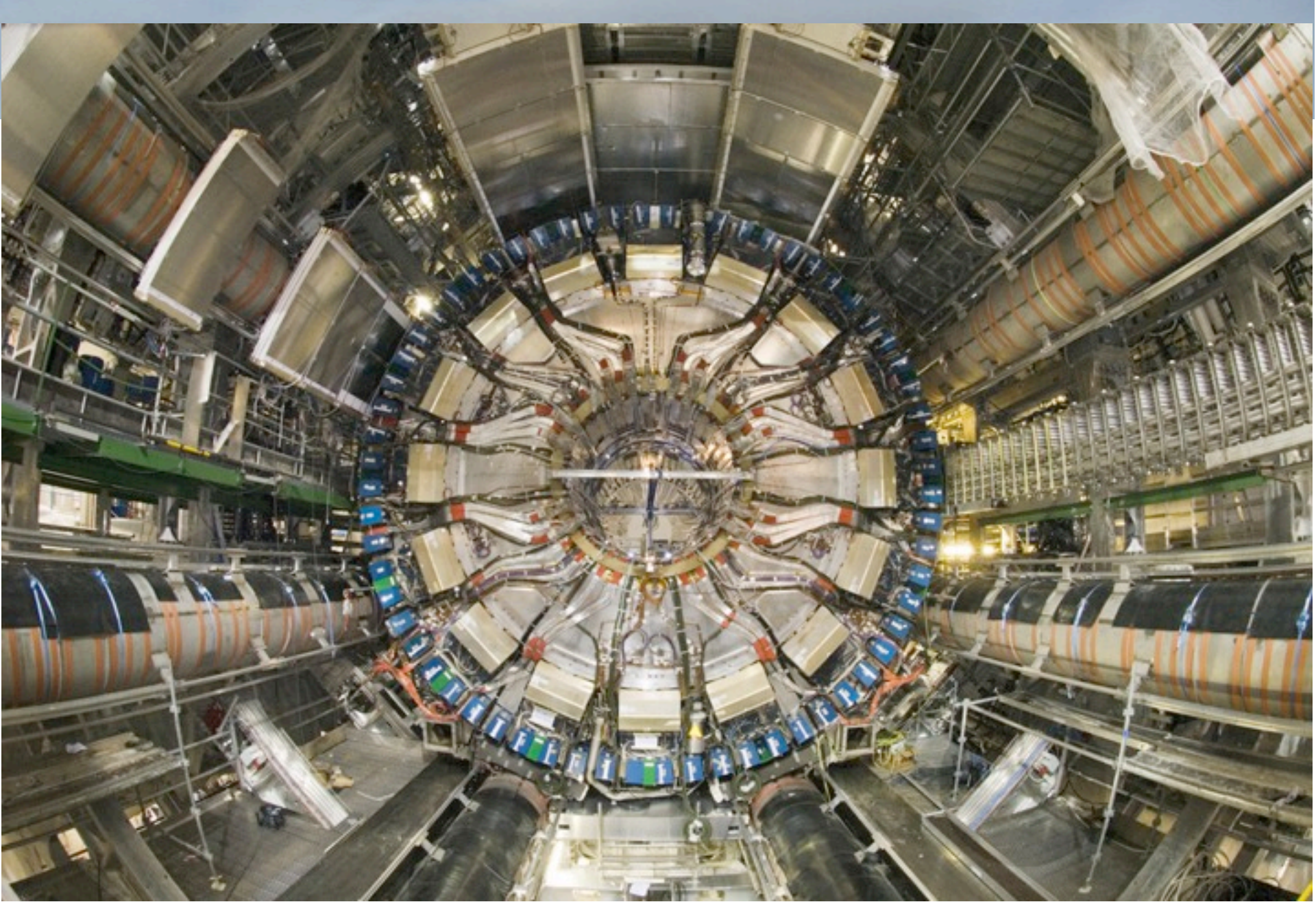


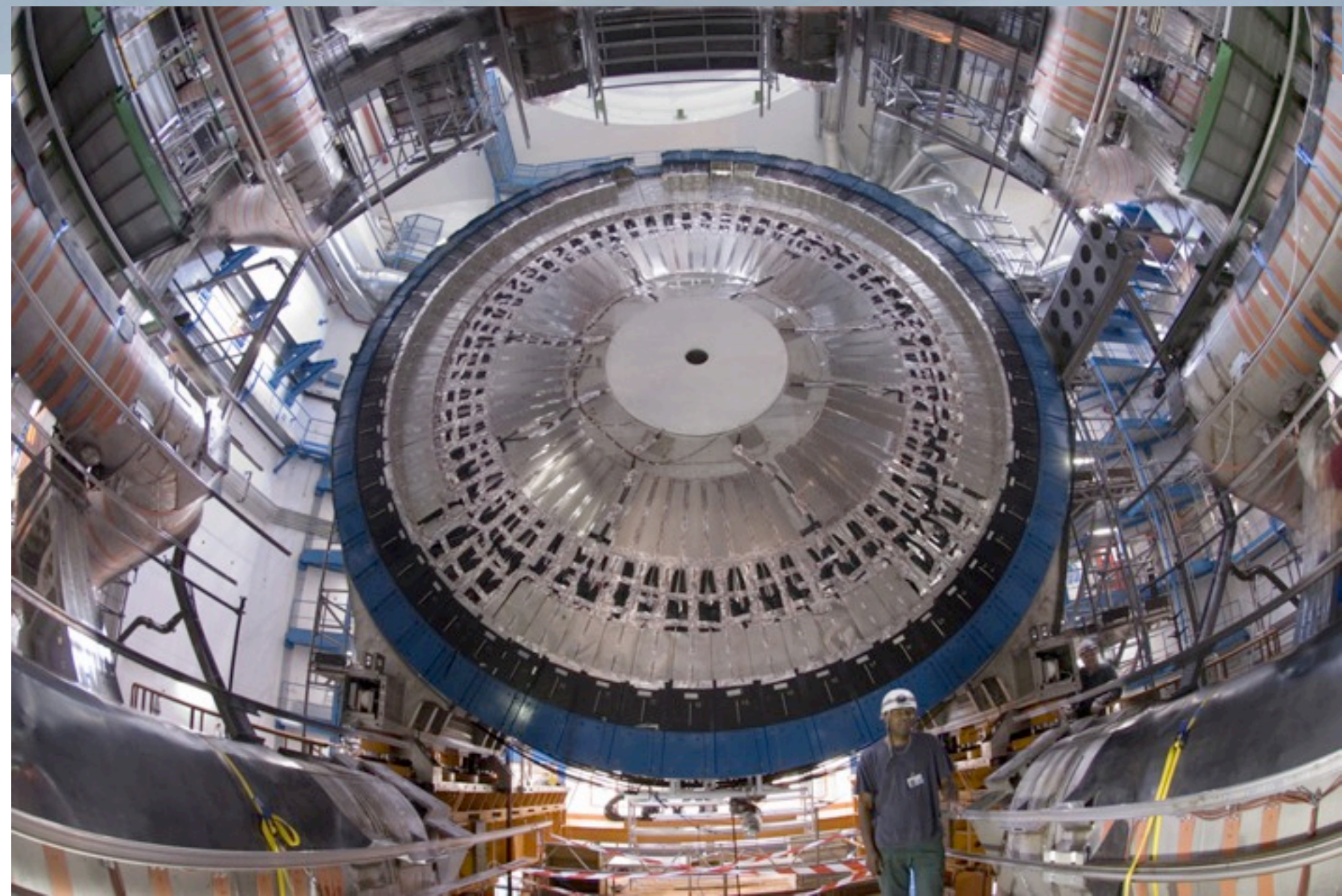


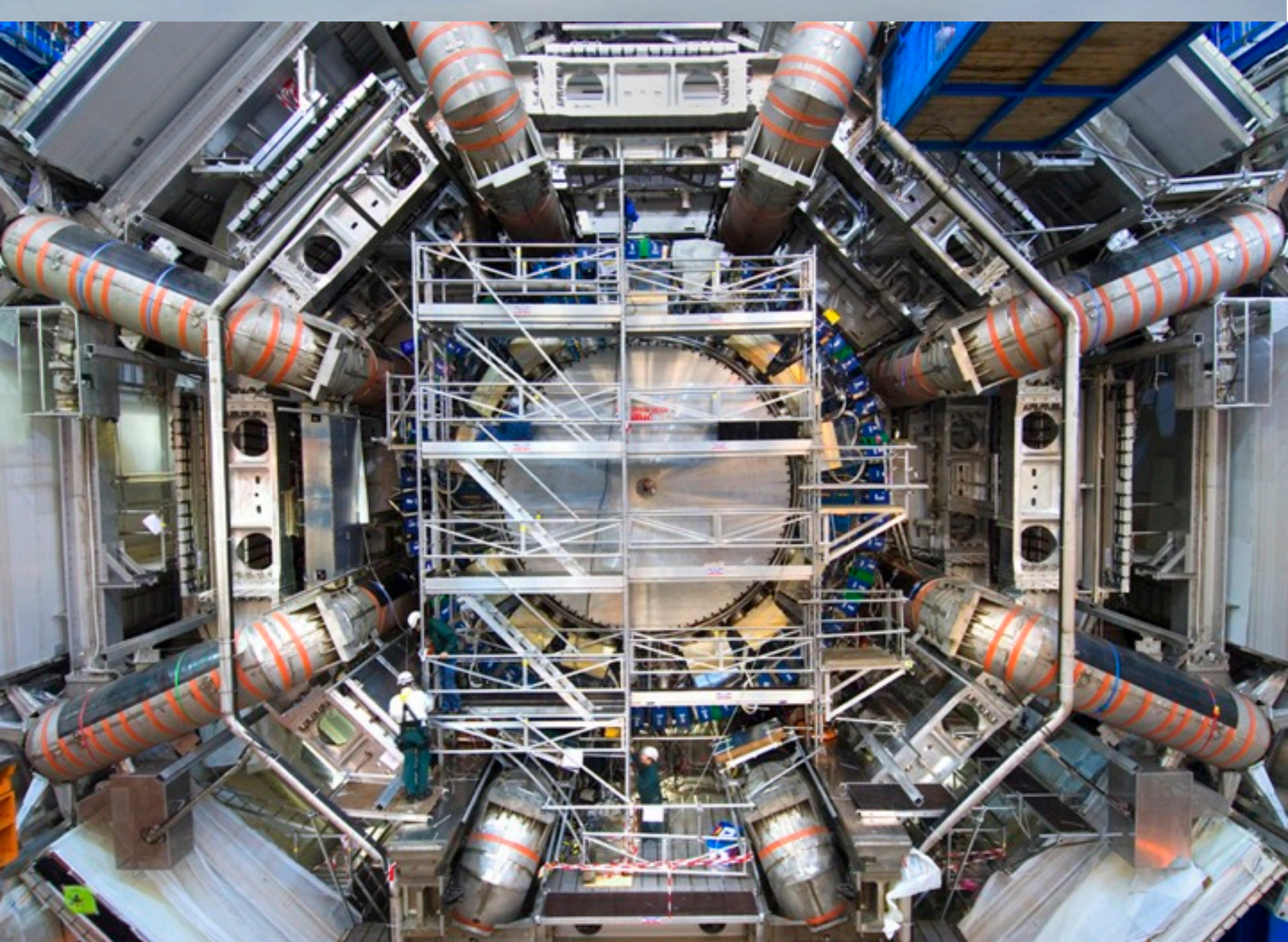












Le pour et le **contre** des calorimètre à argon liquide

- Beaucoup de charges dérivent (gd nombre de paires e⁻-ion produites):
courant naturel élevé (Es(LAr) = 23.6 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 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



Les calorimètres hadroniques

Généralités/Rappels

- Les interactions hadroniques sont plus erratiques que les interactions électromagnétiques
 - les gerbes fluctuent plus
 - les gerbes sont plus larges
 - les gerbes sont plus profondes
- Les calorimètres hadroniques vont donc être
 - plus grossiers
 - avec une segmentation moins découpée
 - plus épais (longueur d'interaction λ)
- Le calorimètre hadronique est toujours après le calorimètre électromagnétique (qui représente $\sim 1\lambda_{int}$)

Performances

- La résolution en énergie est moins bonne que pour les calorimètres électromagnétiques

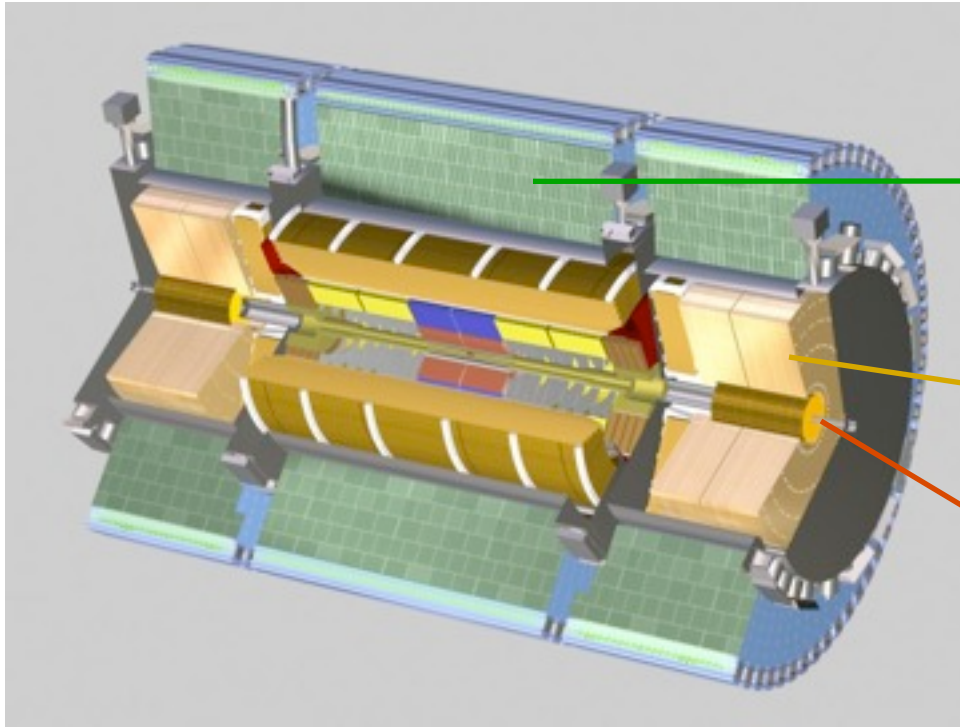
$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{50-100\%}{\sqrt{E}} \oplus 3-5\% \text{ (E en GeV)}$$

- Le Fer est le matériaux le plus utilisé ($\lambda_{int} \propto A^{1/3}$)
- Le milieu détecteur est souvent du scintillateur

Les calorimètres hadroniques: la compensation

- La gerbe hadronique débute souvent dans le calorimètre électromagnétique toujours devant le hadronique
 - Le milieu n'est donc pas uniforme le long de la gerbe
- Les processus hadroniques produisent de l'énergie invisible
- Le signal collecté dépend des processus et est tjrs inférieur à celui d'un électron de même énergie incidente: $e/h (>1)$
- La composante électromagnétique des gerbes hadroniques varie beaucoup: f_{em}
- Dans les années 1980-2000 beaucoup d'attention a porté sur la conception de calorimètres compensant
 - calorimètres compensant ($e/h \sim 1$)
 - mesure f_{em} événement par événement

Les calorimètres hadroniques de ATLAS



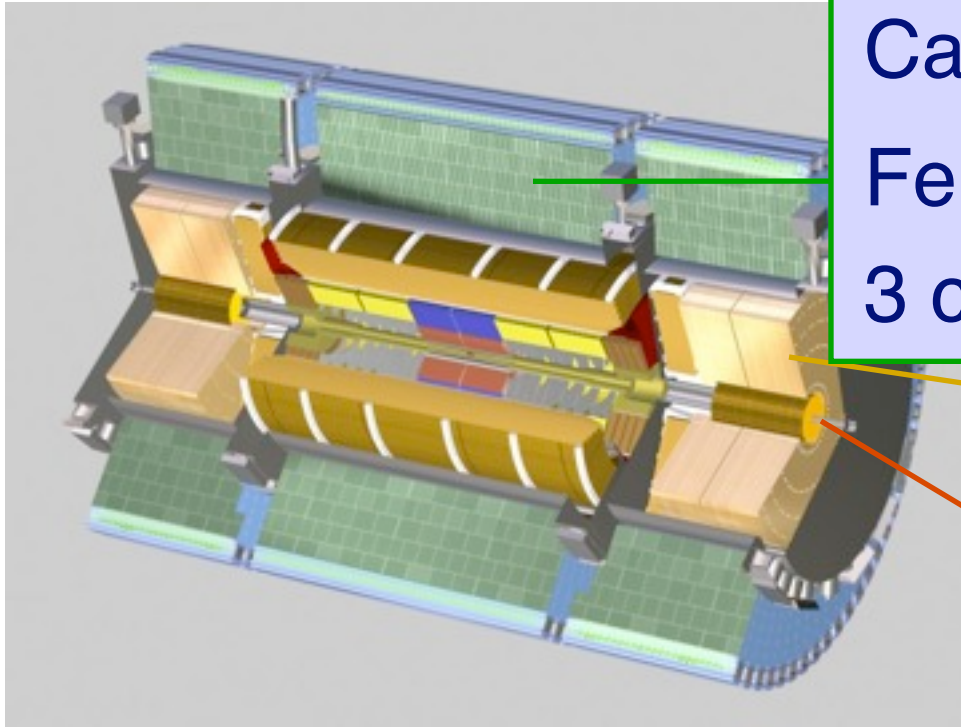
Calorimètre à Tuiles $|\eta| < 1.7$
Fe / Scintillateurr
3 compartiments en profondeur

LAr/Cu $1.7 < |\eta| < 3.2$
4 compartiments en profondeur

A l'avant: à la fois em et had
LAr/Cu or W $3.2 < |\eta| < 4.9$
3 compartiments en profondeur

Profondeur totale: $\sim 8 - 10 \lambda$
Differentes techniques pour résister aux radiations à l'avant

Les calorimètres hadroniques de ATLAS



Calorimètre à Tuiles $|\eta| < 1.7$

Fe / Scintillateurr

3 compartiments en profondeur

LAr/Cu $1.7 < |\eta| < 3.2$

4 compartiments en profondeur

A l'avant: à la fois em et had

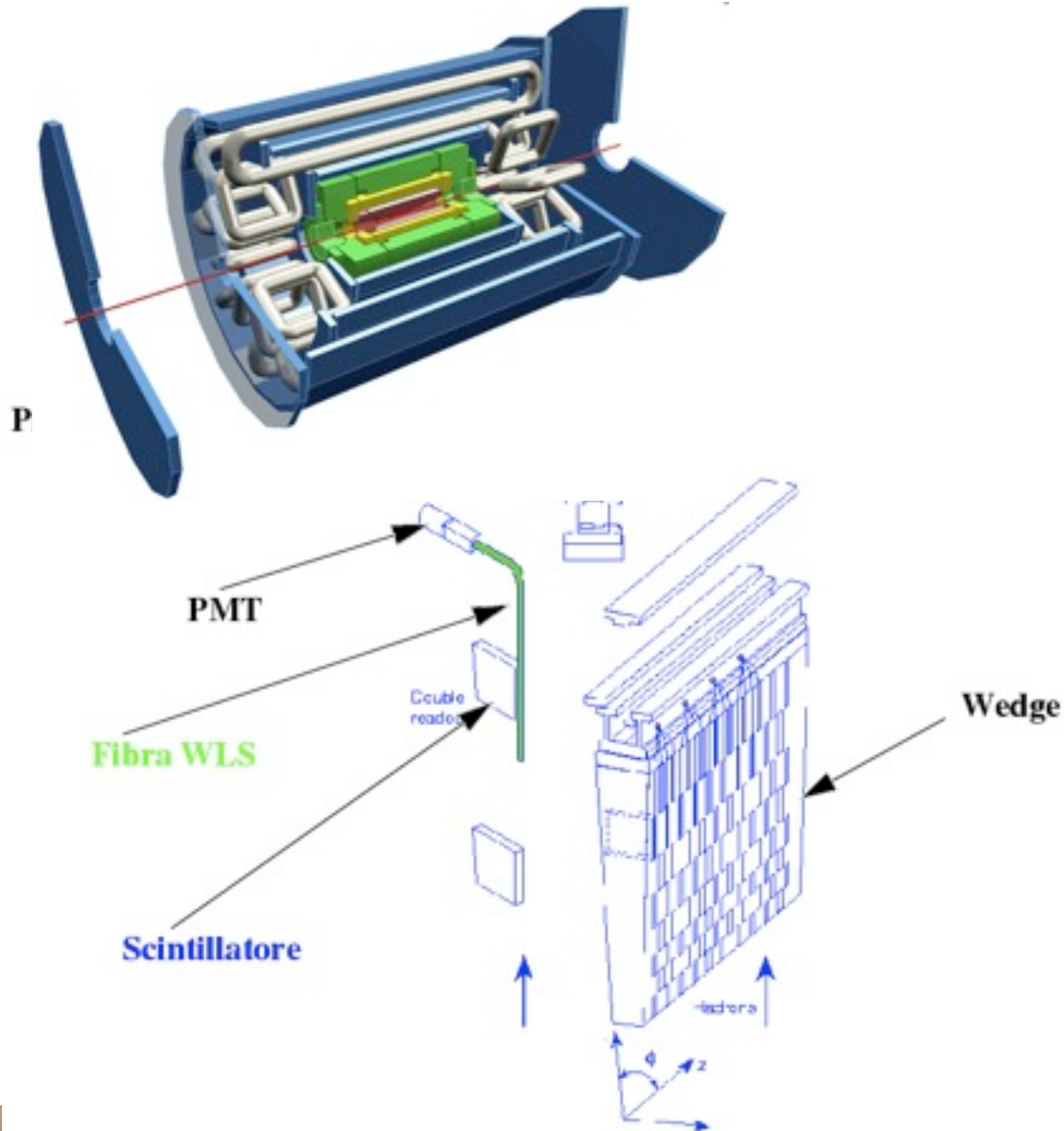
LAr/Cu or W $3.2 < |\eta| < 4.9$

3 compartiments en profondeur

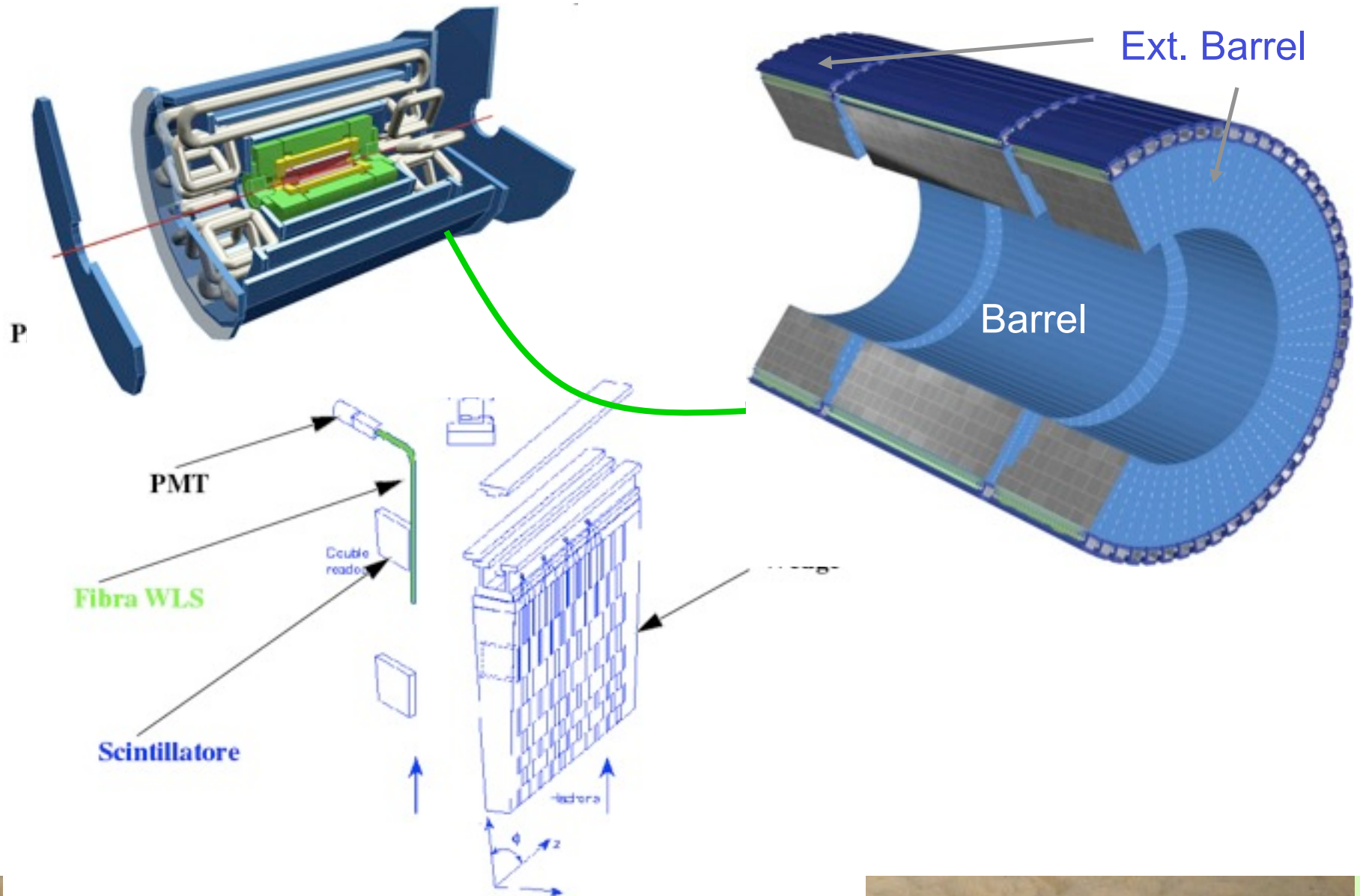
Profondeur totale: $\sim 8 - 10 \lambda$

Differentes techniques pour résister aux radiations à l'avant

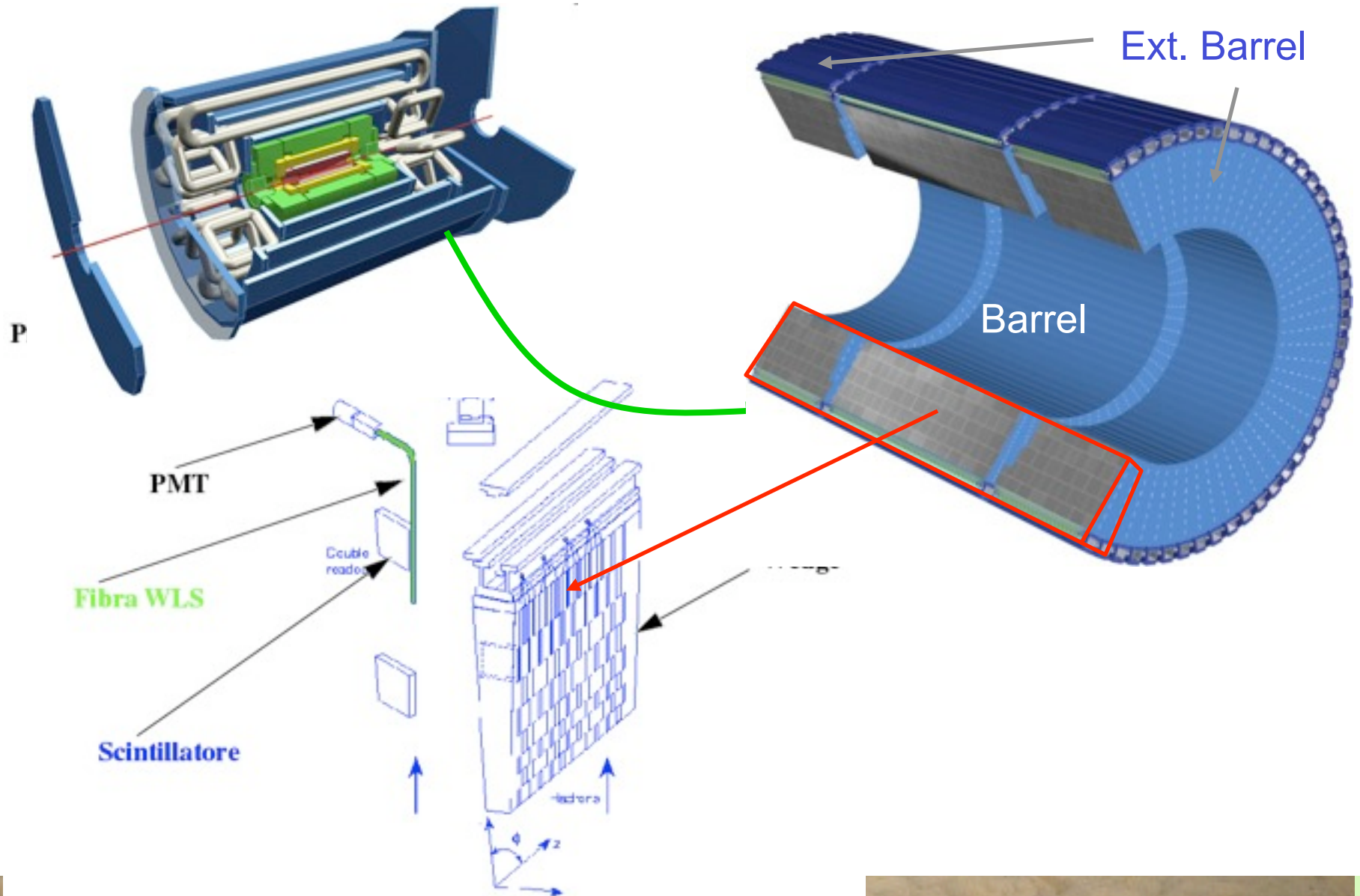
La calorimètre hadronique à tuiles



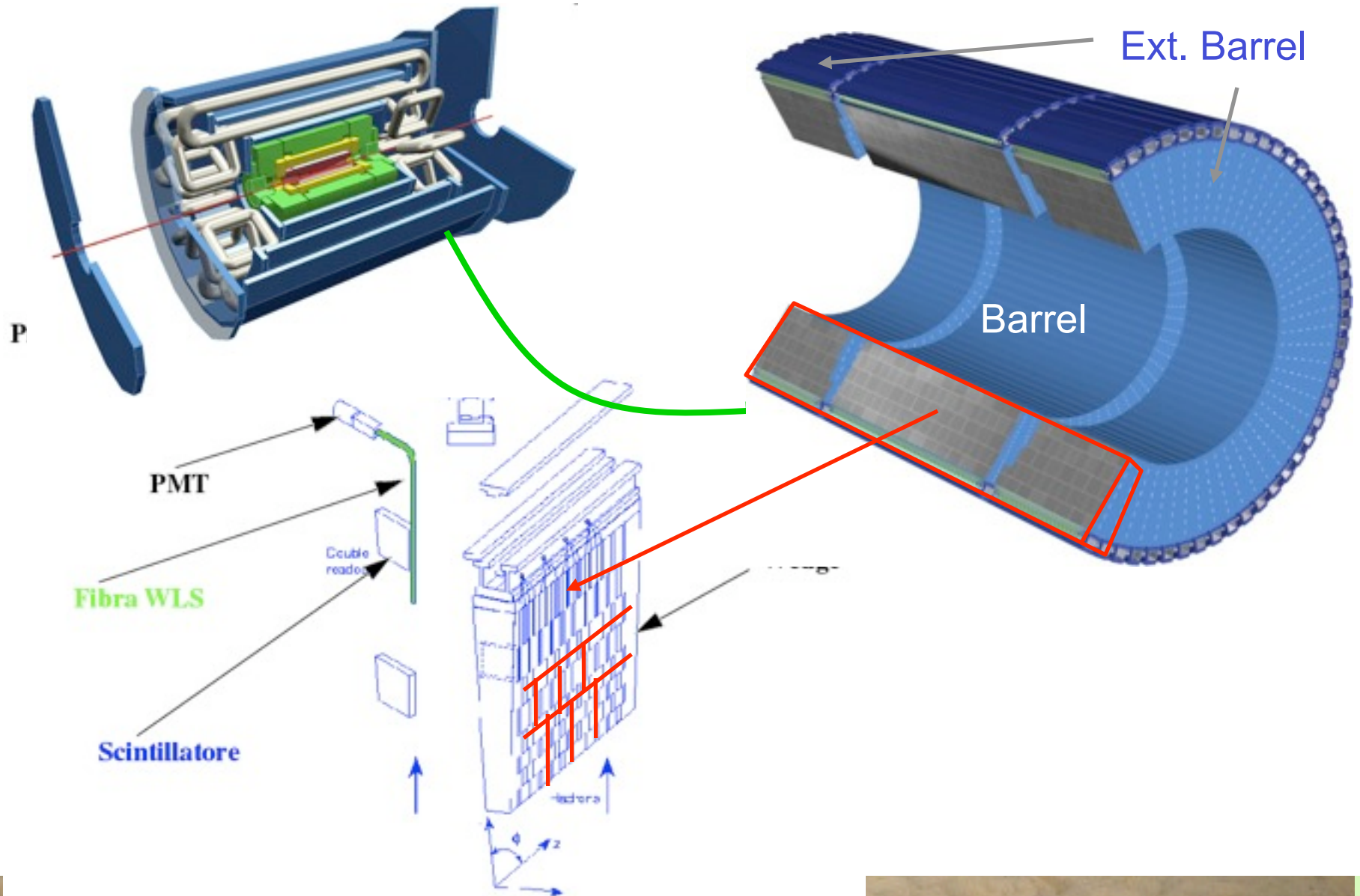
La calorimètre hadronique à tuiles



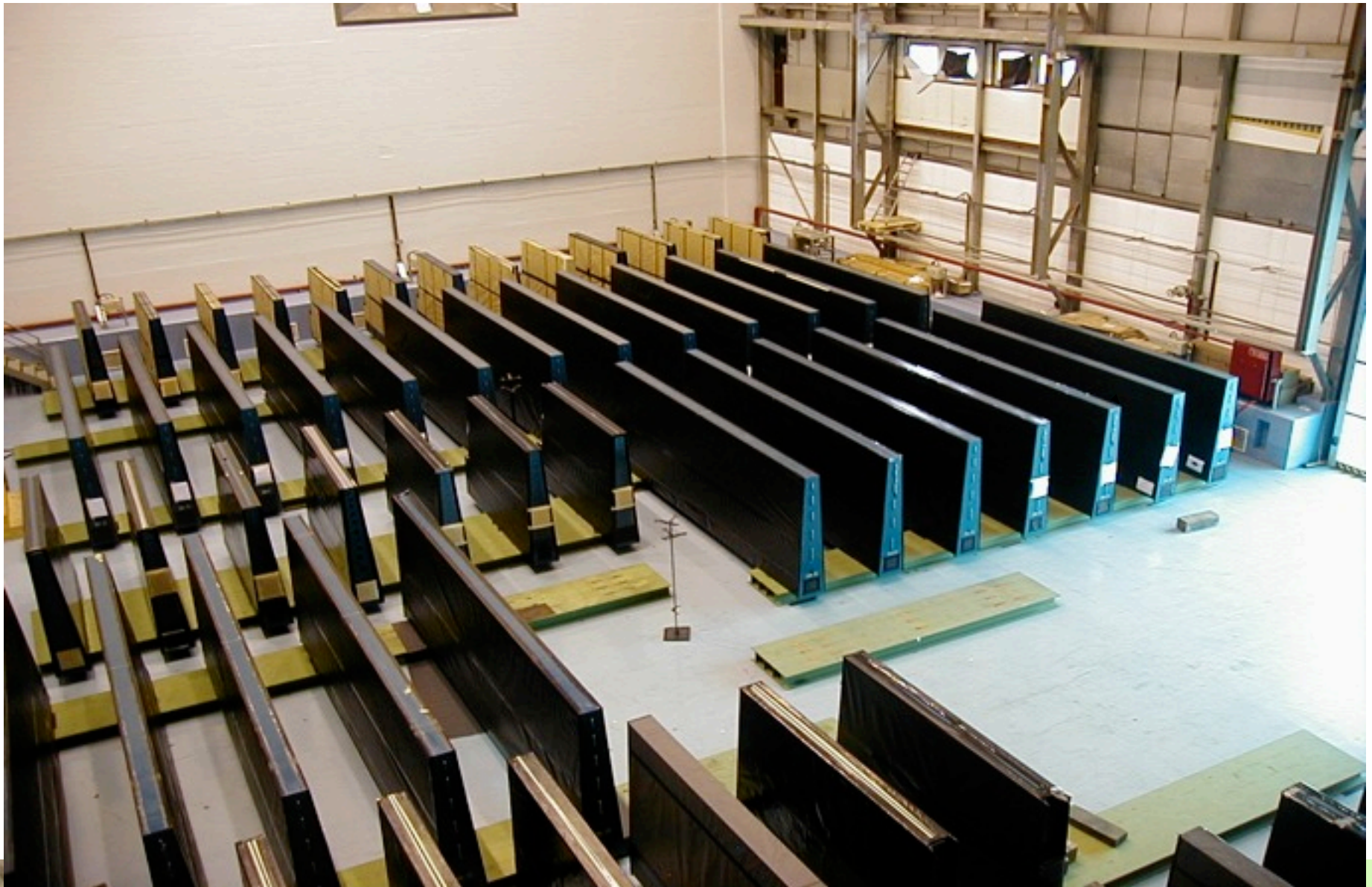
La calorimètre hadronique à tuiles



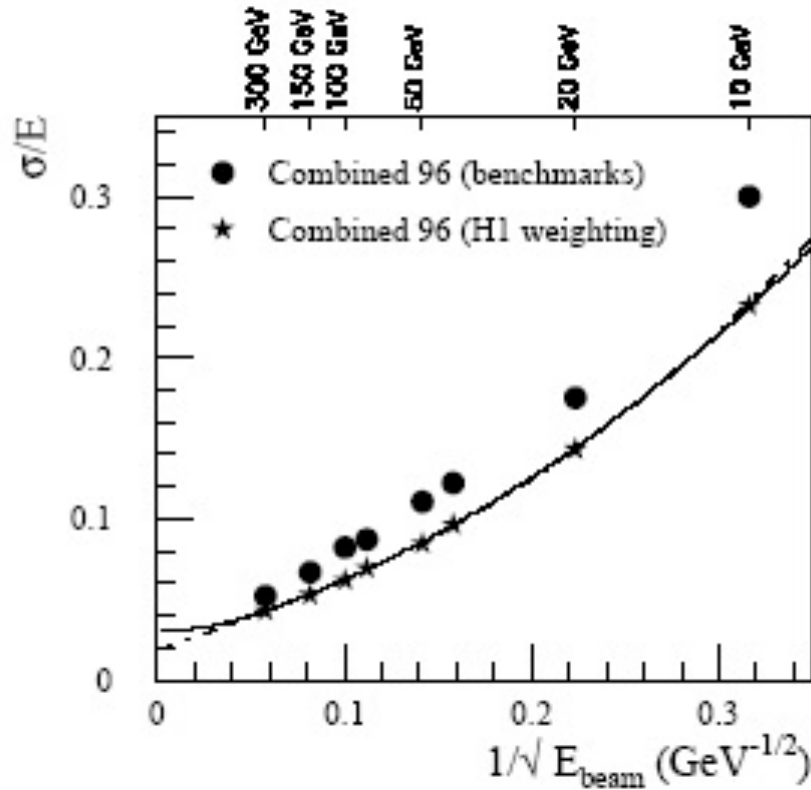
La calorimètre hadronique à tuiles



Les modules des tuiles

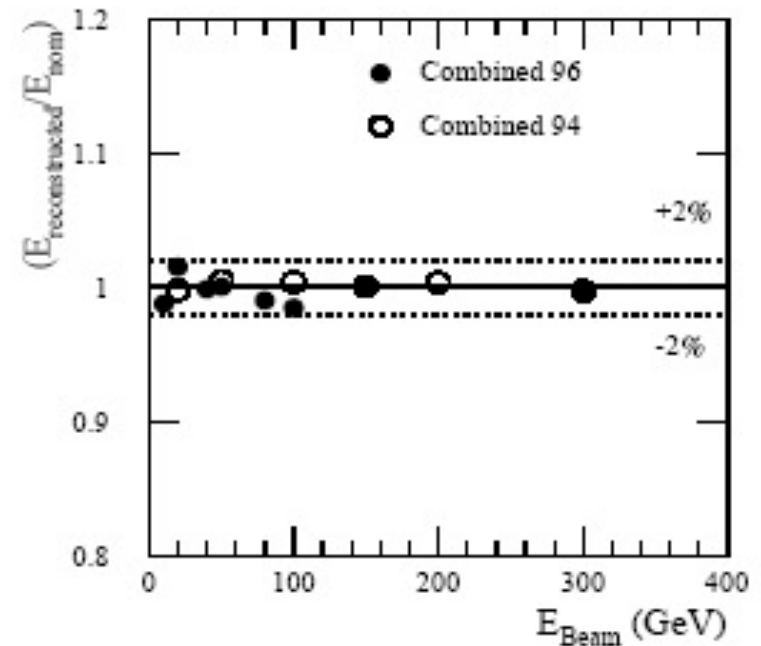


Calorimètre à tuiles: performances



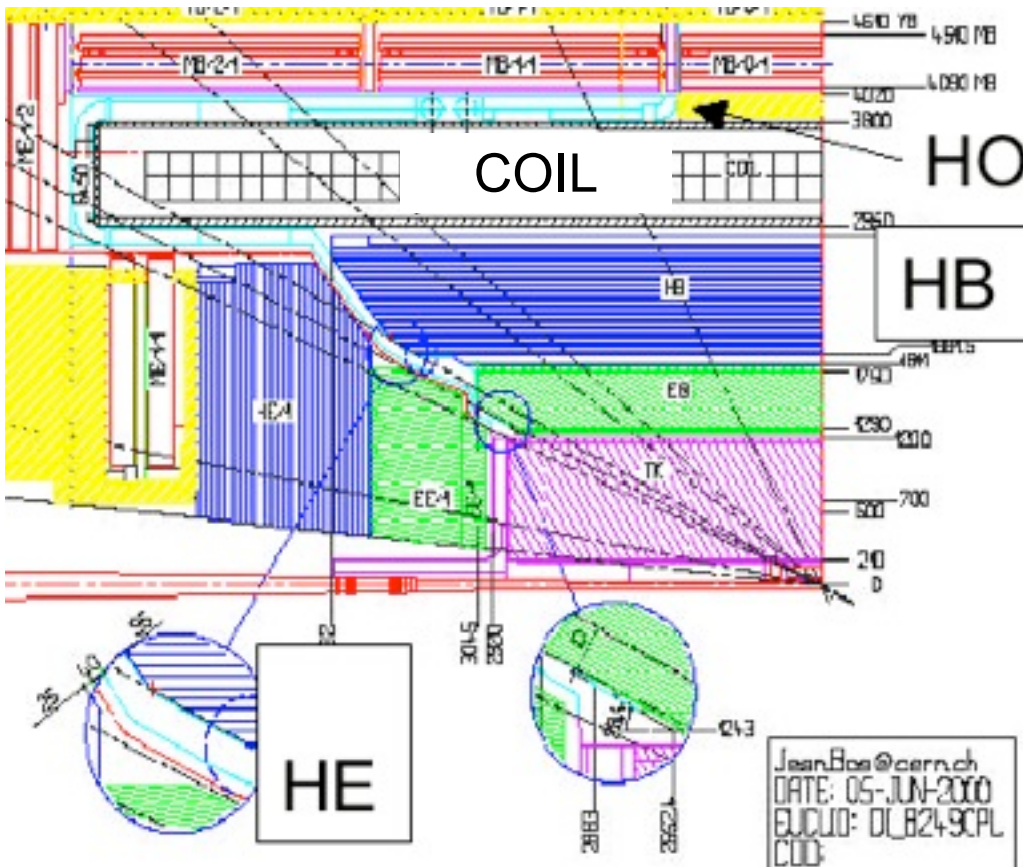
Linearité < 2%

ATLAS ~CMS



$$\frac{\sigma}{E} = \left(\frac{41.9\%}{\sqrt{E}} + 1.8\% \right) \oplus \frac{1.8}{E}$$

Calorimètre hadronique de CMS



Partie centrale: $|\eta| < 1.7$ Cuivre/
scintillateur + WLS

2 + 1 (HO) compartiments
profondeur

$5.9 + 3.9 \lambda$ ($|\eta| = 0$)

Partie bouchon $1.3 < |\eta| < 3$
Cuivre/scintillateur + WLS

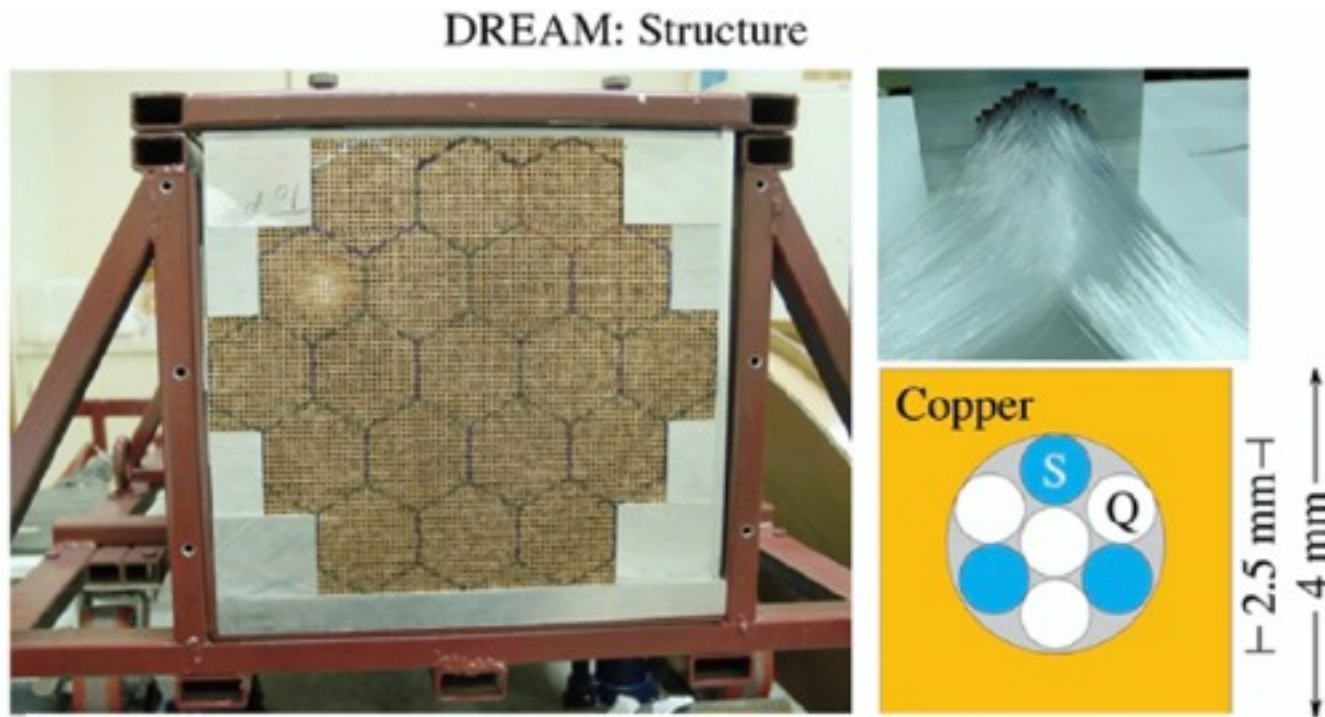
2/3 Longitudinal sections

Avant $2.85 < |\eta| < 5.19$

Fer/fibres de quartz (radiations)

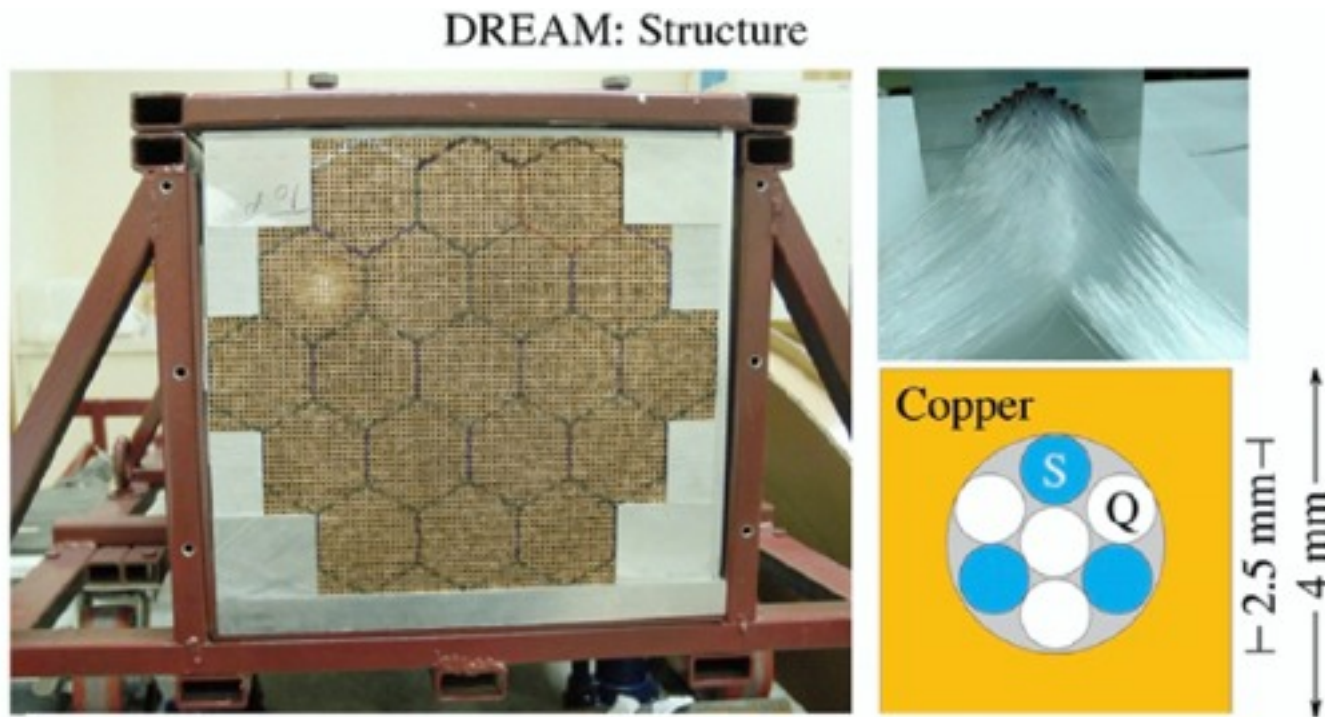
Cuivre: matériau non magnétique

Nouvelle idée: mesurer f_{em} pour chaque événement



- Le quartz n'est sensible qu'à la fraction électromagnétique de la gerbe ($e/h \sim 5$ pour CMS)
- Le scintillateur (ou l'argon liquide) sont sensibles à l'énergie visible

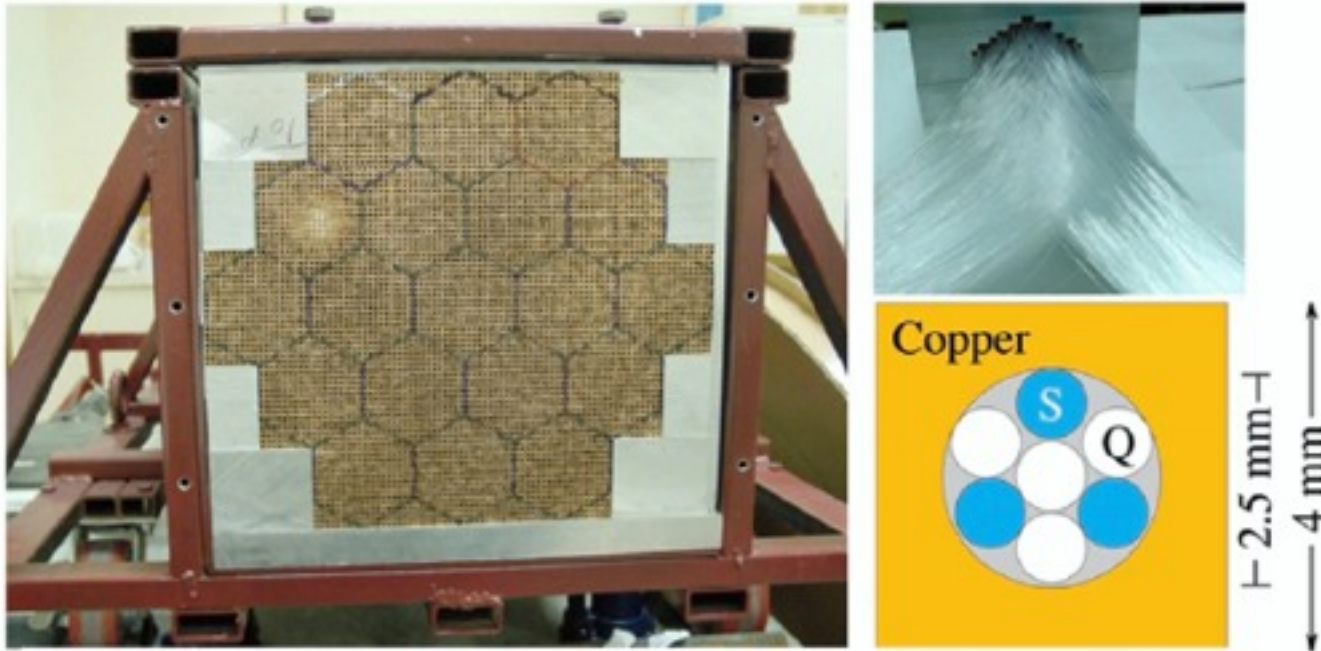
Nouvelle idée: mesurer f_{em} pour chaque événement



- Le scintillateur (ou l'argon liquide) sont sensibles à l'énergie visible

Nouvelle idée: mesurer f_{em} pour chaque événement

DREAM: Structure



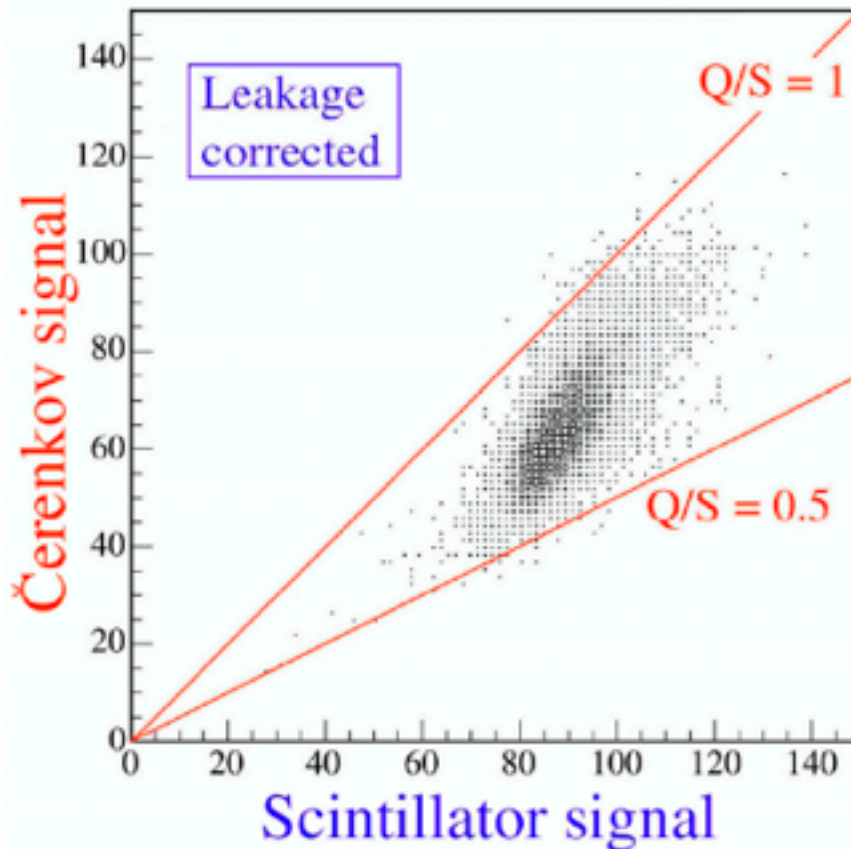
- *Some characteristics of the DREAM detector*
 - **Depth** 200 cm ($10.0 \lambda_{int}$)
 - Effective **radius** 16.2 cm ($0.81 \lambda_{int}$, $8.0 \rho_M$)
 - **Mass** instrumented volume 1030 kg
 - Number of **fibers** 35910, diameter 0.8 mm, total length ≈ 90 km
 - Hexagonal **towers** (19), each read out by 2 PMTs

DREAM readout



Mesure de la corrélation (Č vs scintillateur)

DREAM: The (energy-independent) Q/S method



$$S = E \left[f_{em} + \frac{1}{(e/h)_S} (1 - f_{em}) \right]$$

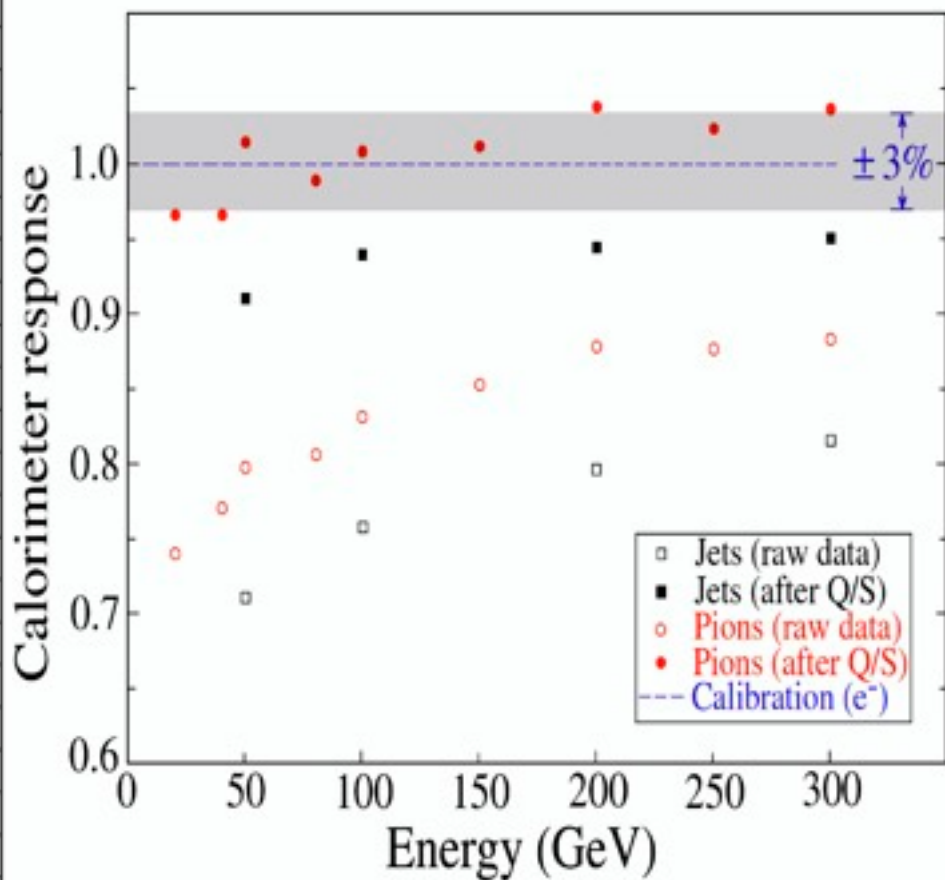
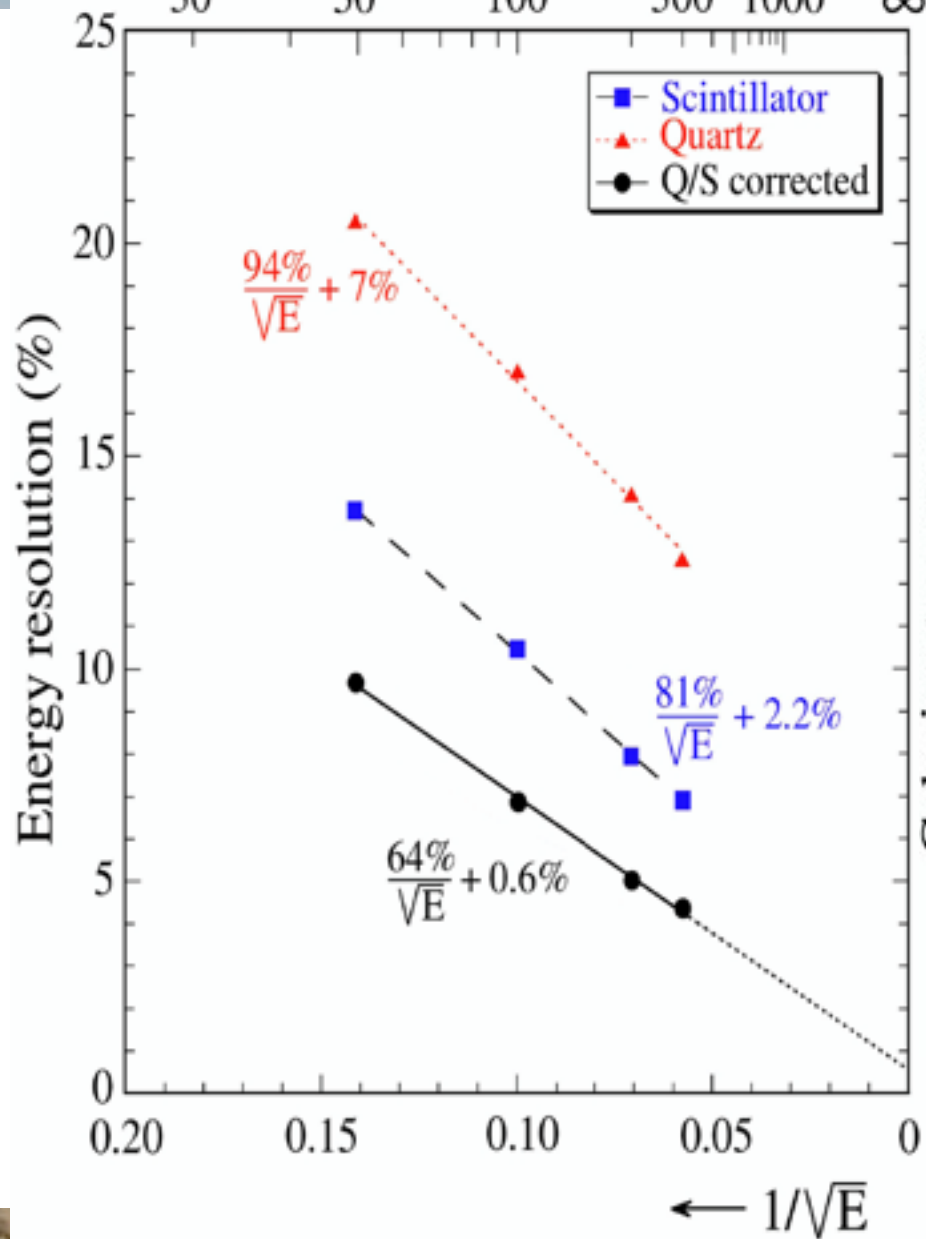
$$Q = E \left[f_{em} + \frac{1}{(e/h)_Q} (1 - f_{em}) \right]$$

$$e/h = 1.3 (S), \quad 5 (Q)$$

$$\frac{Q}{S} = \frac{f_{em} + 0.20 (1 - f_{em})}{f_{em} + 0.77 (1 - f_{em})}$$

Energy (GeV)

30 50 100 300 1000 ∞

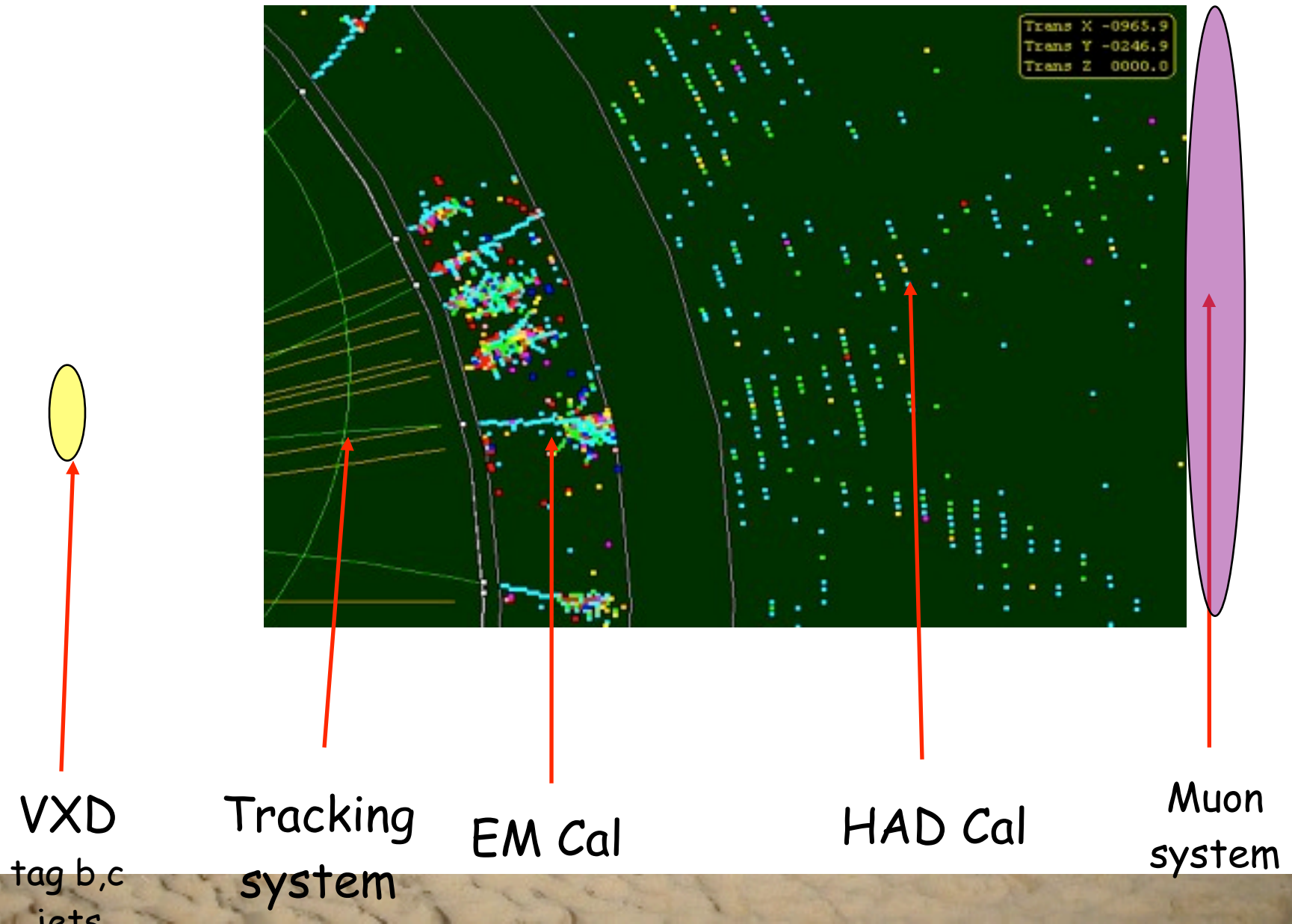




Les calorimètres pour ILC

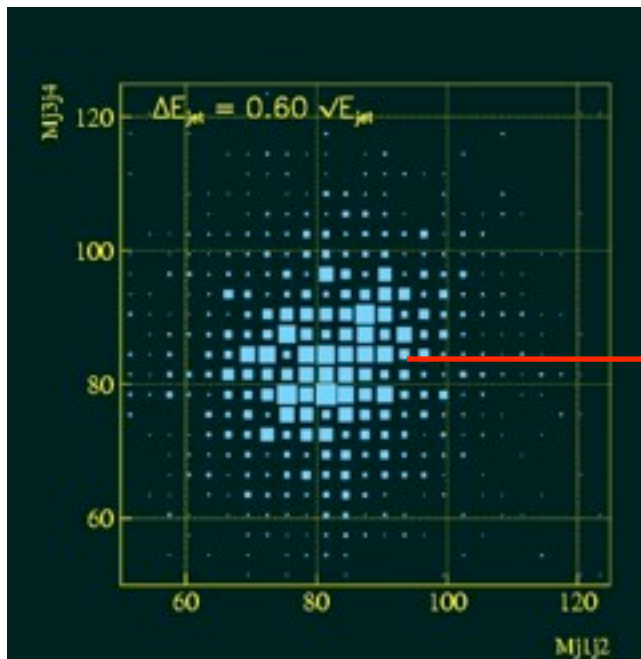
(International Linear Collider)

Les calorimètres pour les collisionneurs linéaires

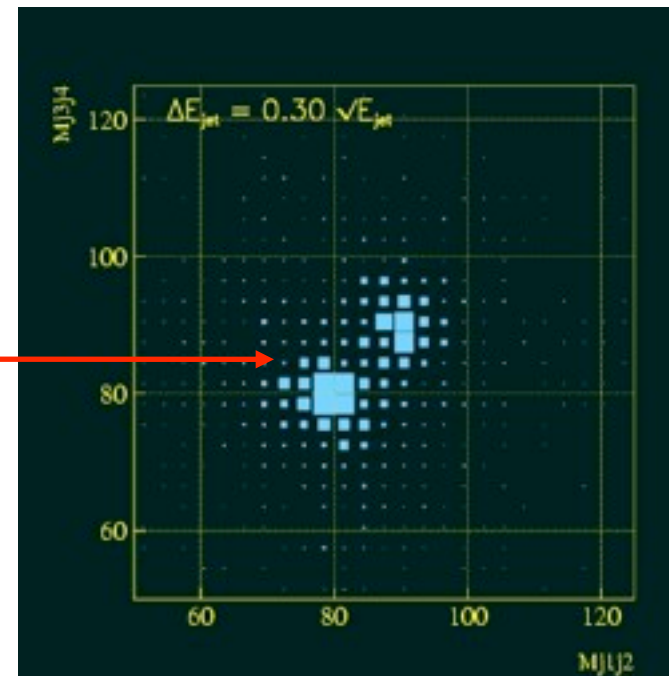


Les calorimètres pour les collisionneurs linéaires

Séparation des evts WW ou ZZ → excellente résolution pour les jets



60%/√E








30%/√E

Target region for jet
energy resolution

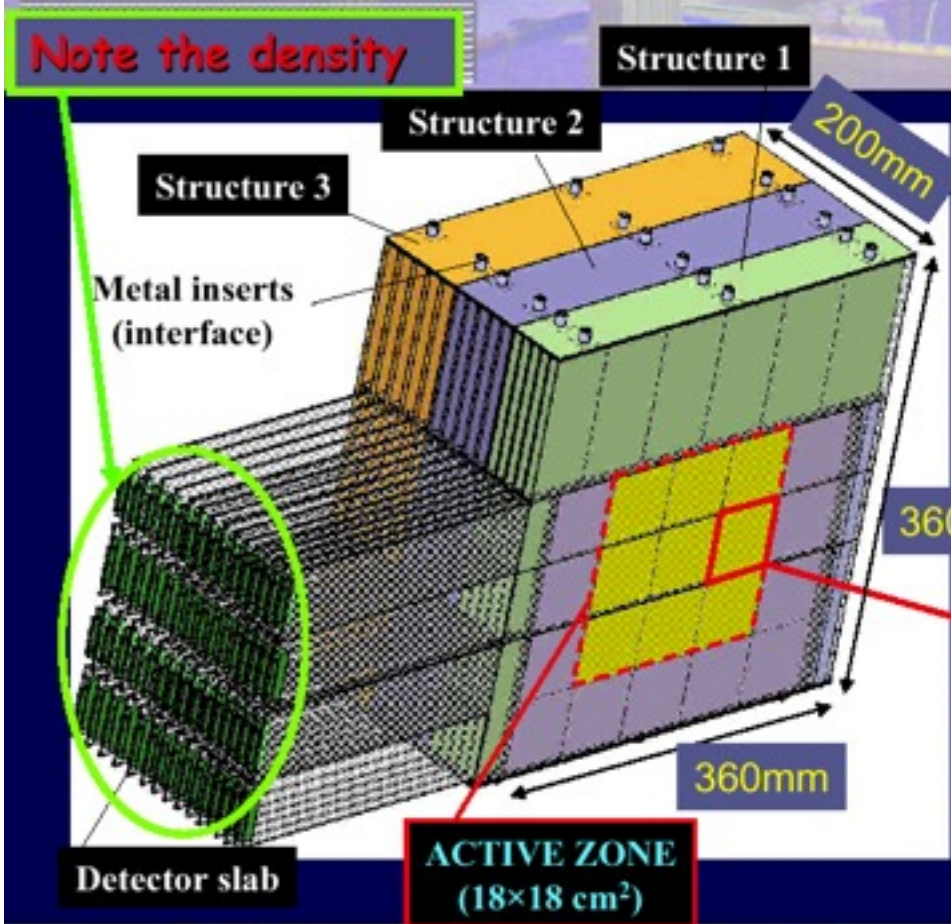
Sandwich Tungstene/Silicium

The ECAL prototype

CALICE ECAL

-  LAL, LLR, LPC, PICM
-  Imperial College, UCL, Cambridge, Birmingham, Manchester, RAL
-  ITEP, IHEP, MSU
-  Prague (IOP-ASCR)
-  SNU, KNU

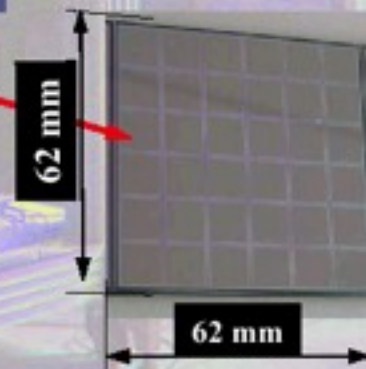
Note the density



- ◆ 3 structures W-CFi (1,2,3 x1.4mm)
- ◆ 15 « detector slabs »
- ◆ Dimension 200x360x360 mm



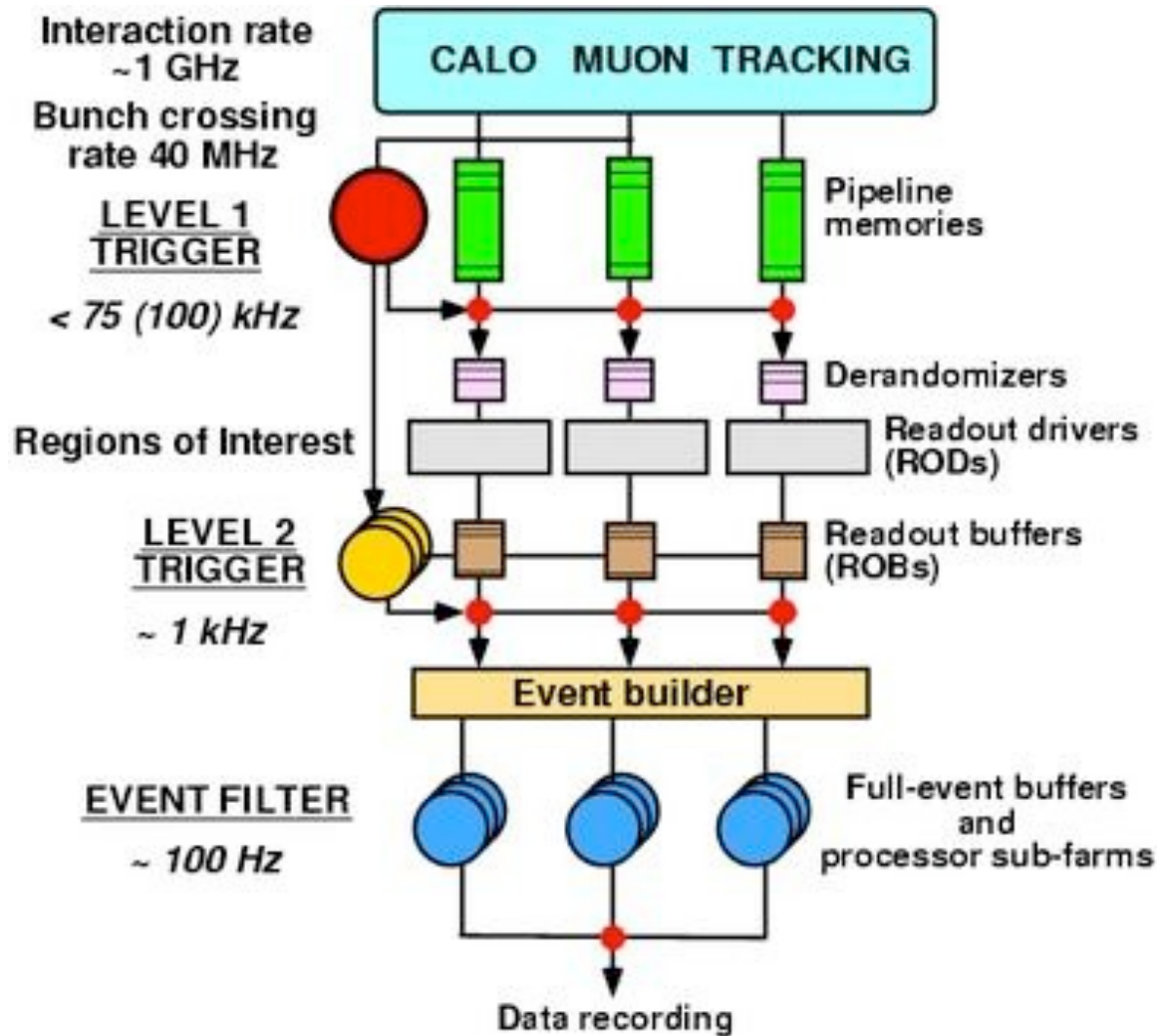
Silicon wafers with
6×6 pads (10×10 mm²)



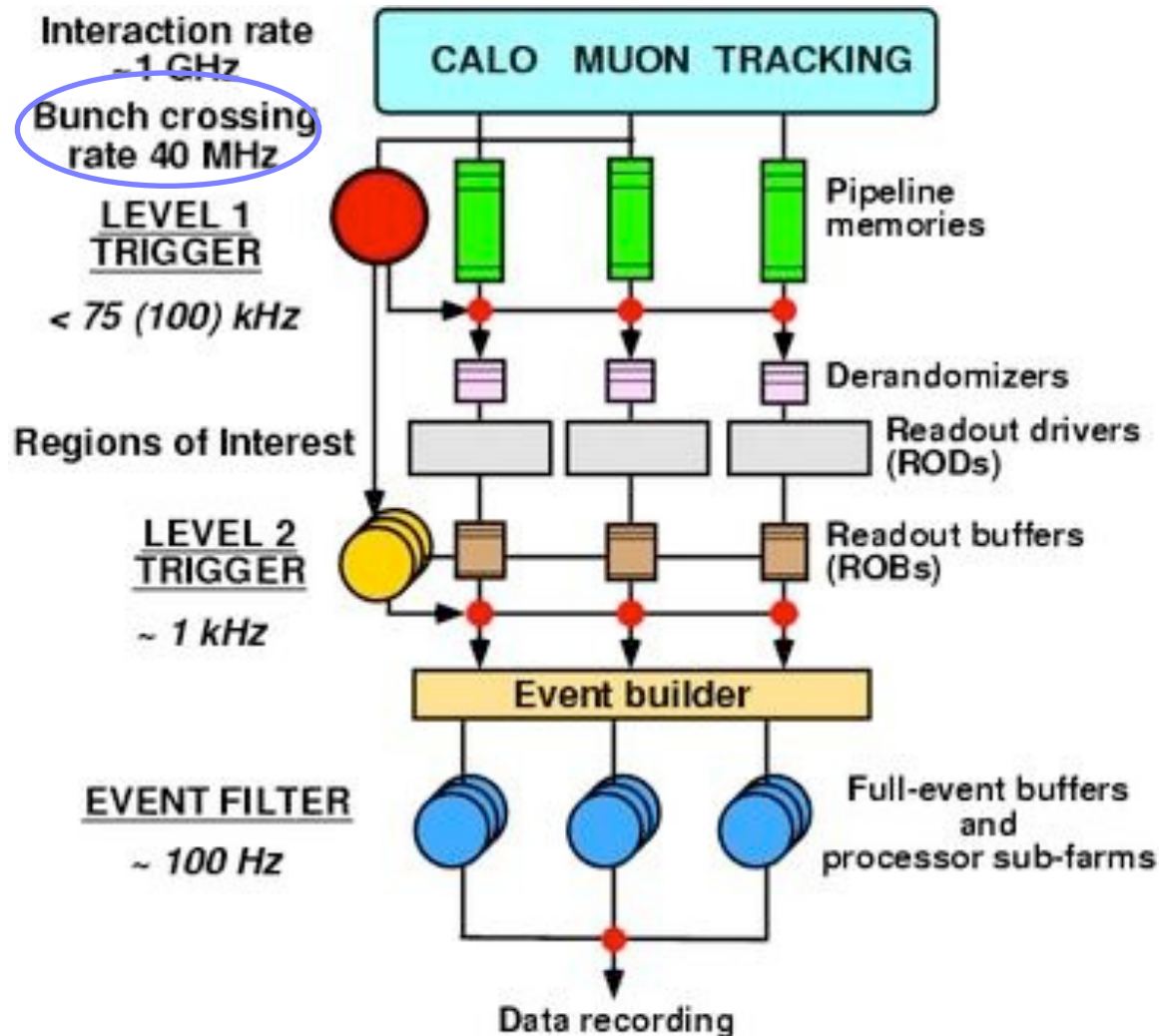
Systeme de declenchement

- Un Must pour les experiences
 - avec $\sigma_{\text{etude}}/\sigma_{\text{tot}} \ll 1$ (LHC): 40MHz \Rightarrow 100 Hz
 - avec bruit de fond naturel (muons cosmiques,)
 - avec coincidences
- Dans les collisions e^+e^- à $\sqrt{s}=500 - 1000$ GeV, σ est très faible
 - systeme de declenchement n'est pas necessaire
 - il faut cependant demarrer l'acquisition si un evenement est produit

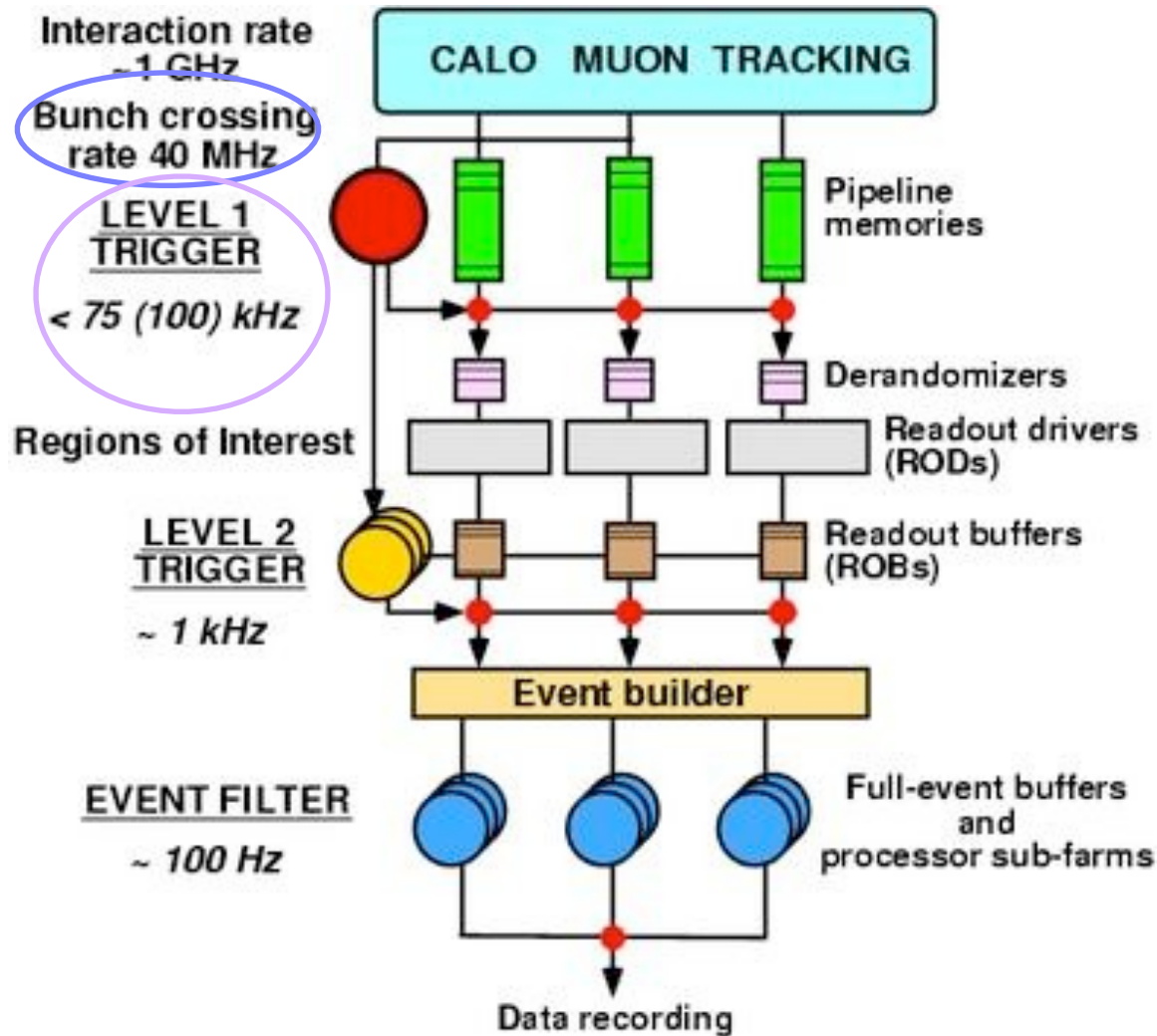
Déclenchement/Trigger



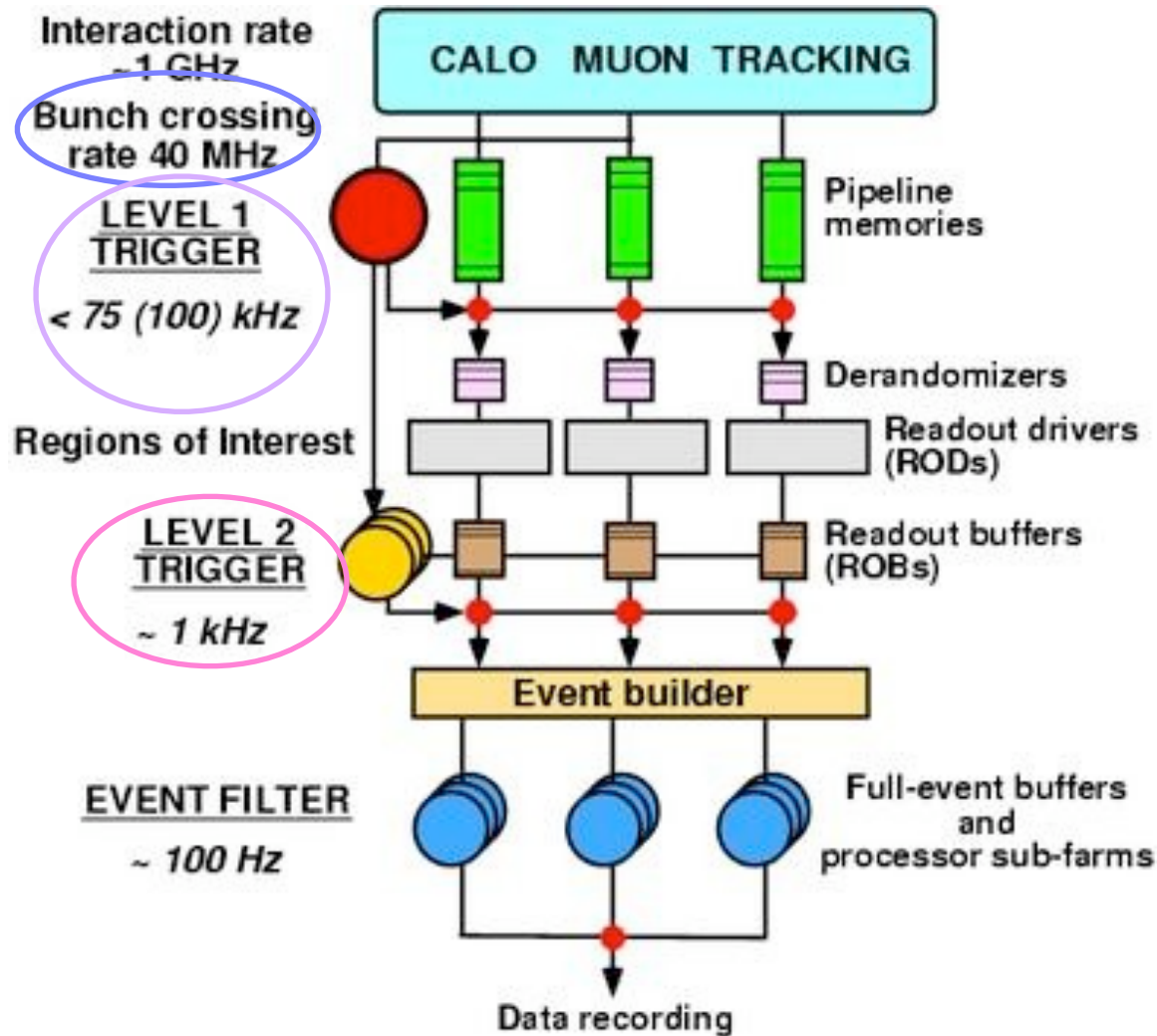
Déclenchement/Trigger



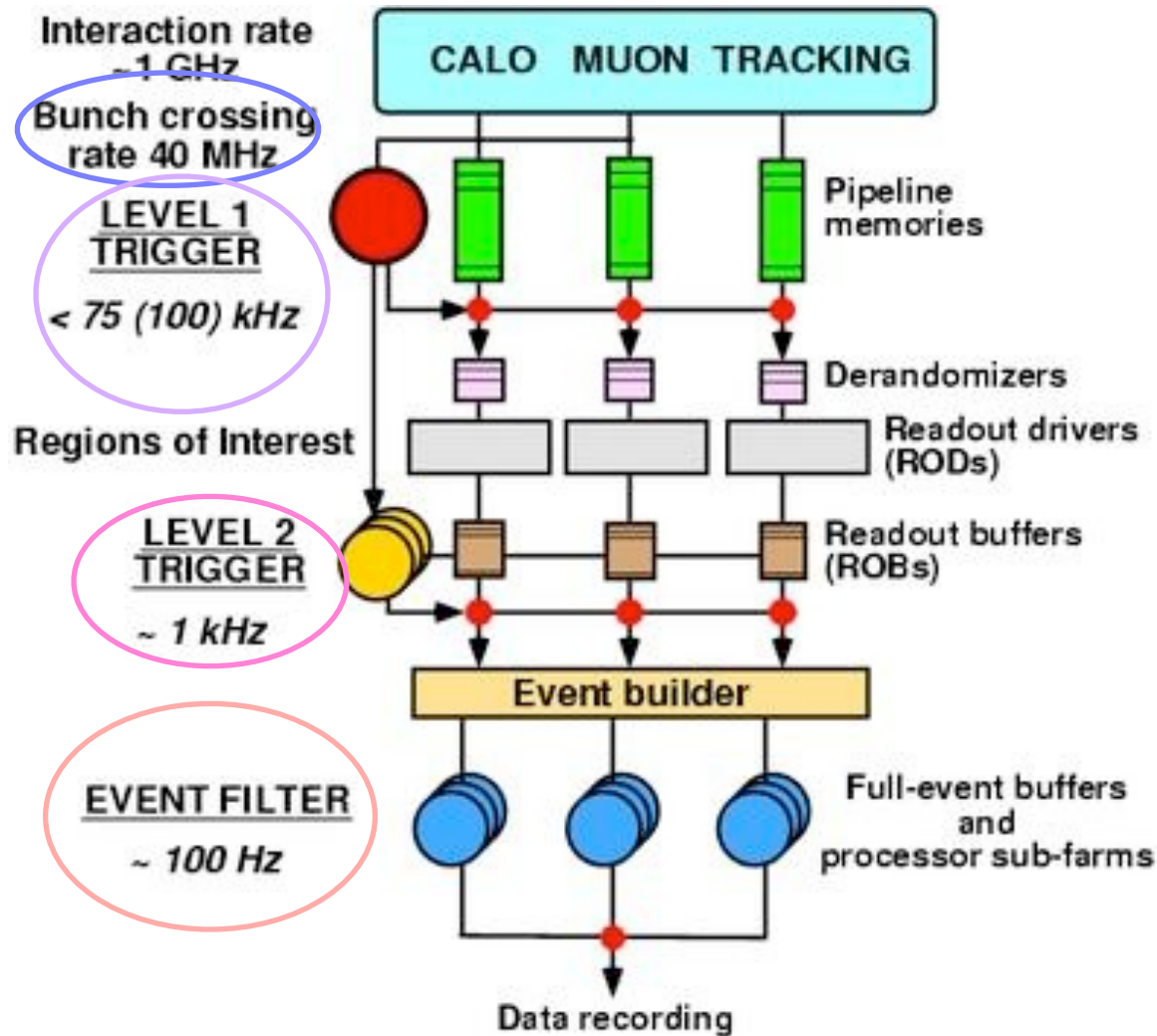
Déclenchement/Trigger



Déclenchement/Trigger

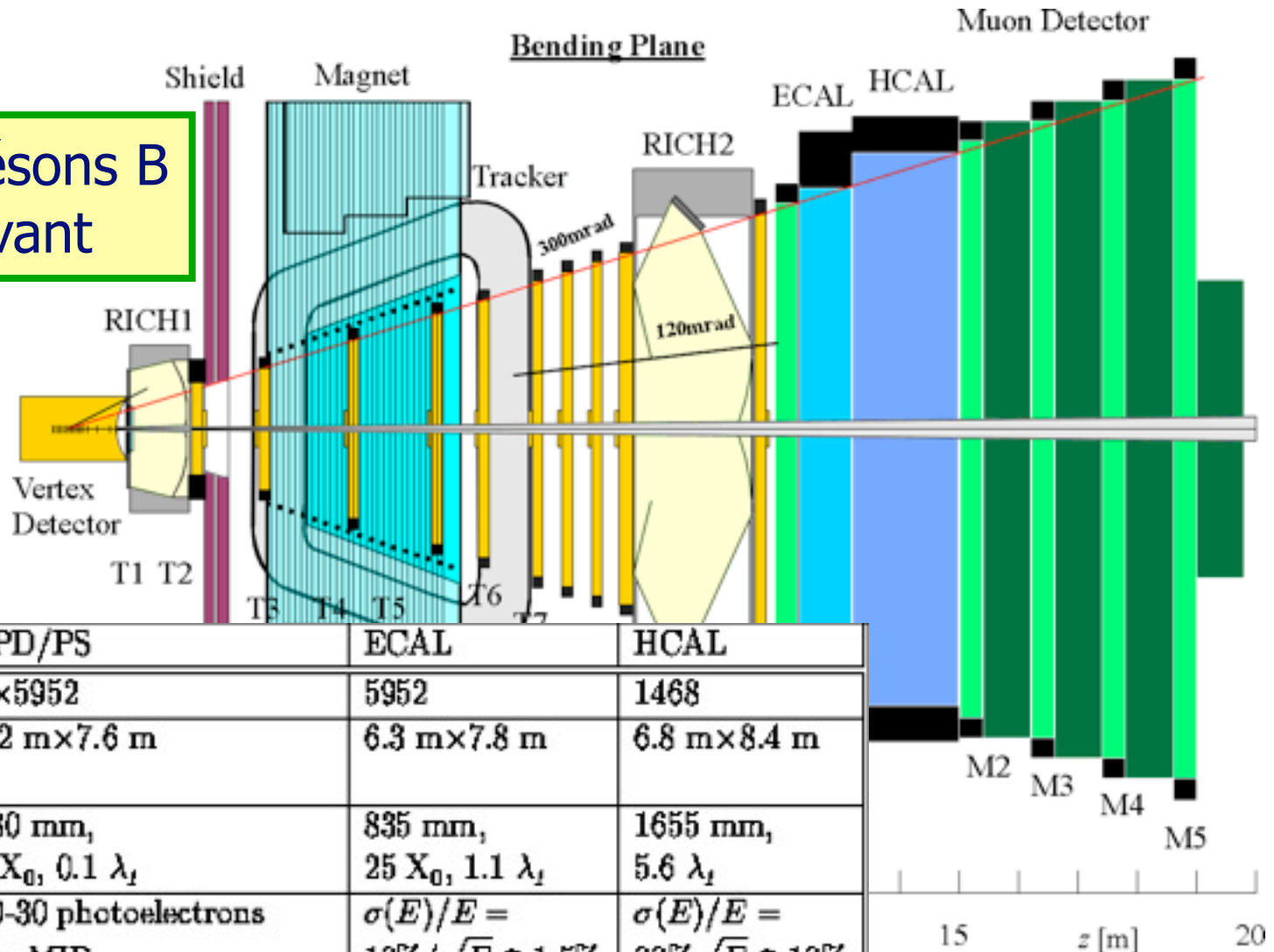


Déclenchement/Trigger



Quelques calorimètres à l'IN2P3

Etude des mésons B produits à l'avant



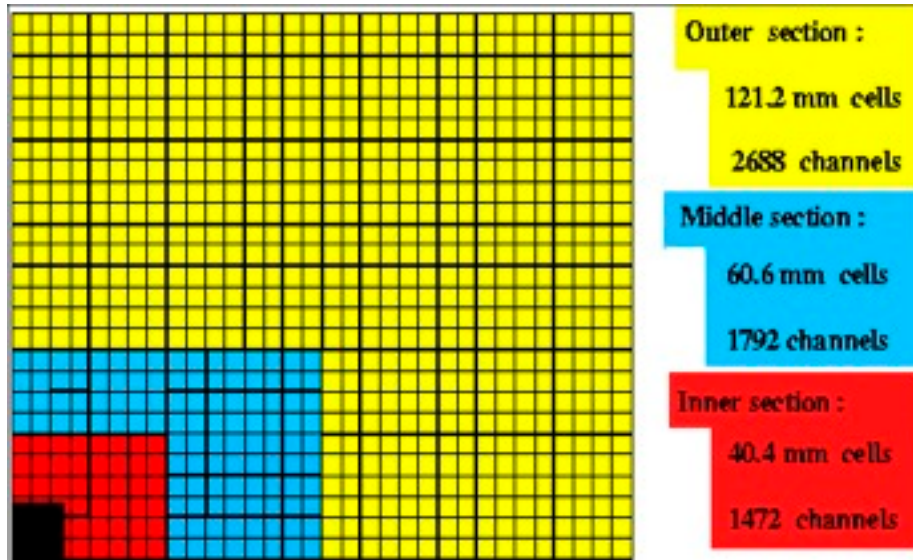
sub-detector	SPD/PS	ECAL	HCAL
number of channels	2×5952	5952	1468
overall lateral dimension in x,y	6.2 m×7.6 m	6.3 m×7.8 m	6.8 m×8.4 m
depth in z	180 mm, 2 X ₀ , 0.1 λ _I	835 mm, 25 X ₀ , 1.1 λ _I	1655 mm, 5.6 λ _I
basic requirements	20-30 photoelectrons per MIP	$\sigma(E)/E =$ 10%/√E ⊕ 1.5%	$\sigma(E)/E =$ 80%√E ⊕ 10%
dynamic range	0-100 MIPs 10 hits (PS), 1 bit (SPD)	0-10 GeV E _T 12 bits	0-10 GeV E _T 12 bits

Overview and evolution since the TP

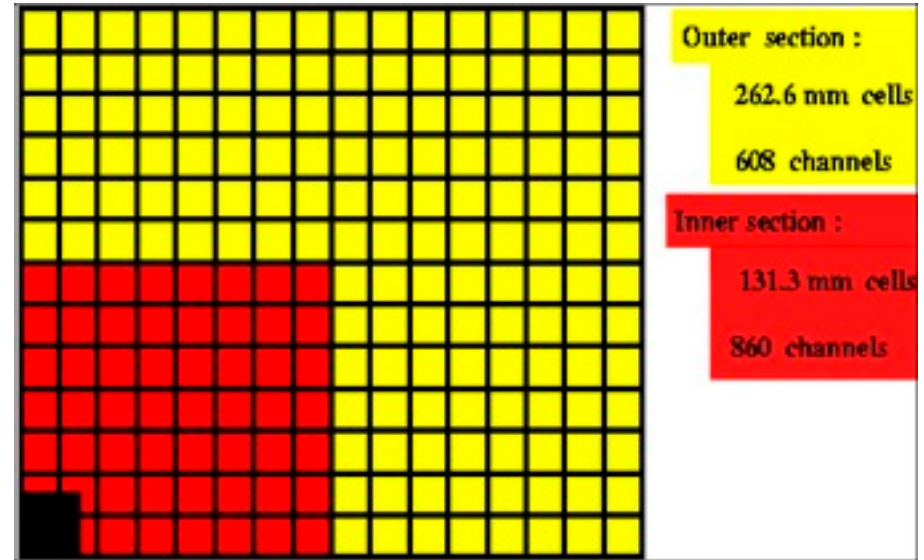
Lateral segmentation:

(showing 1/4 of the detectors front face)

ECAL (SPD/PS)

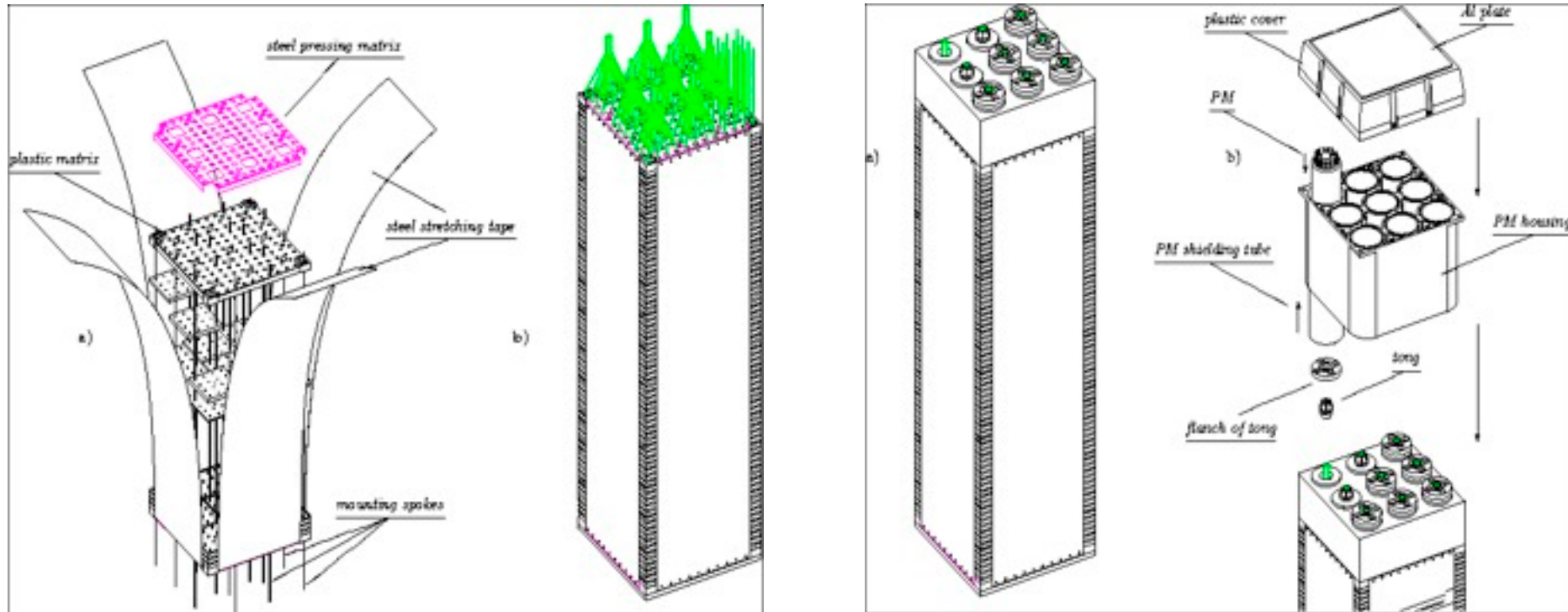


HCAL



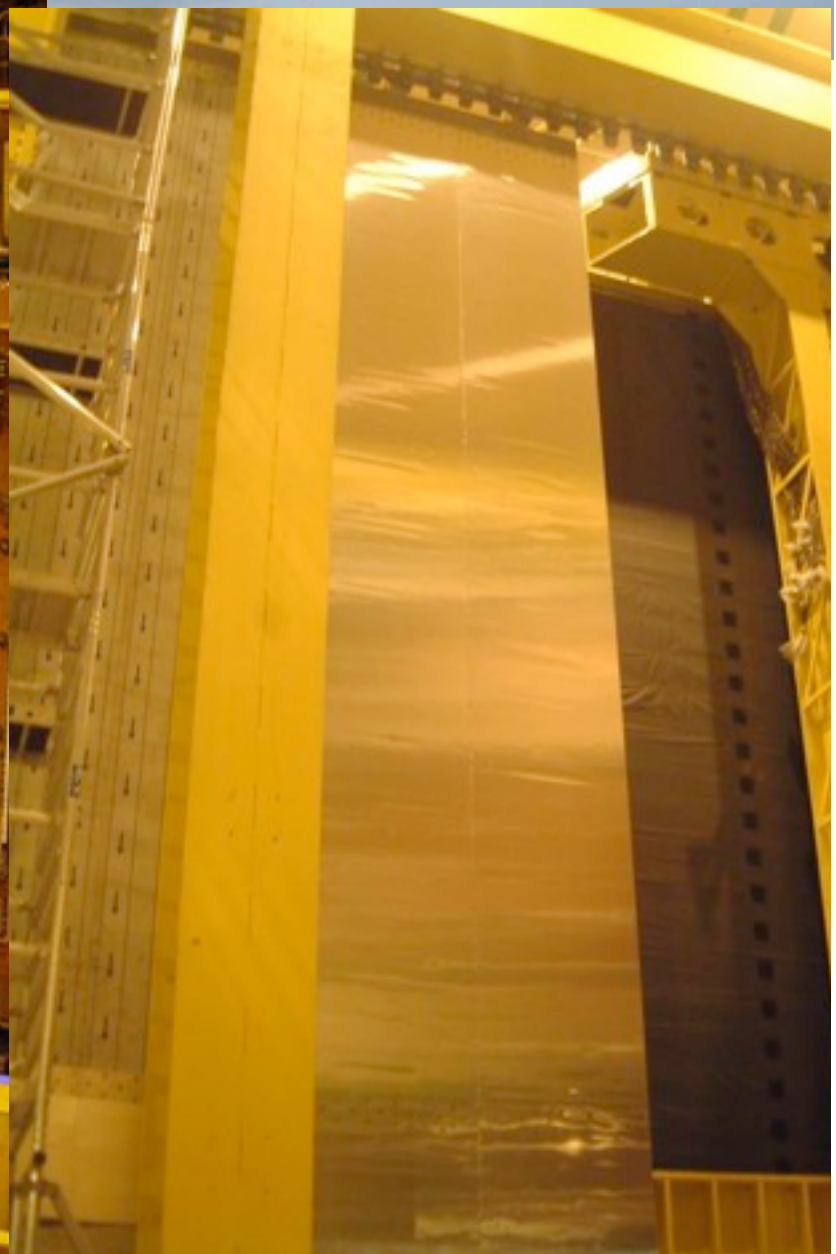
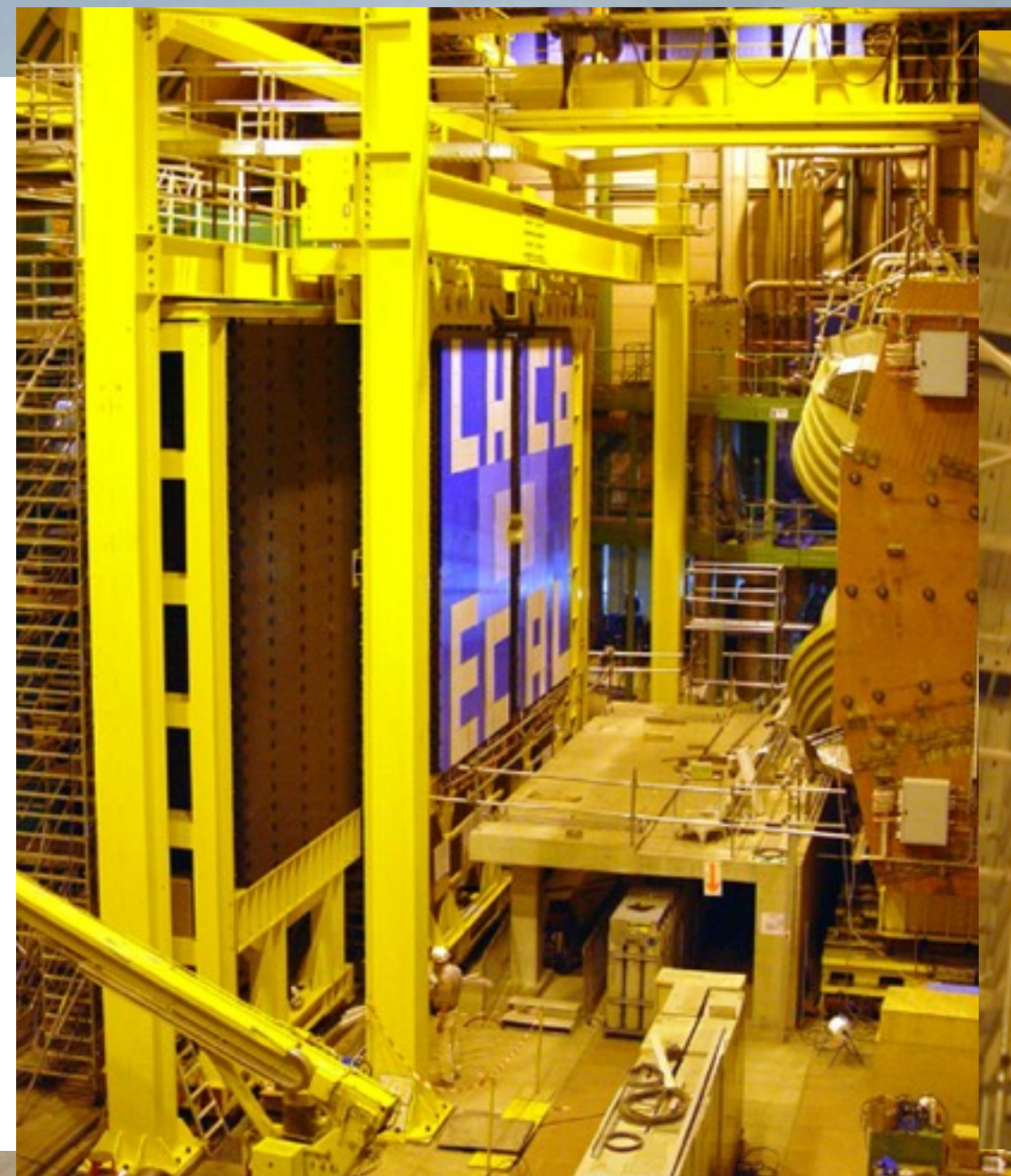
Electromagnetic Calorimeter

Engineering design and assembly of modules:

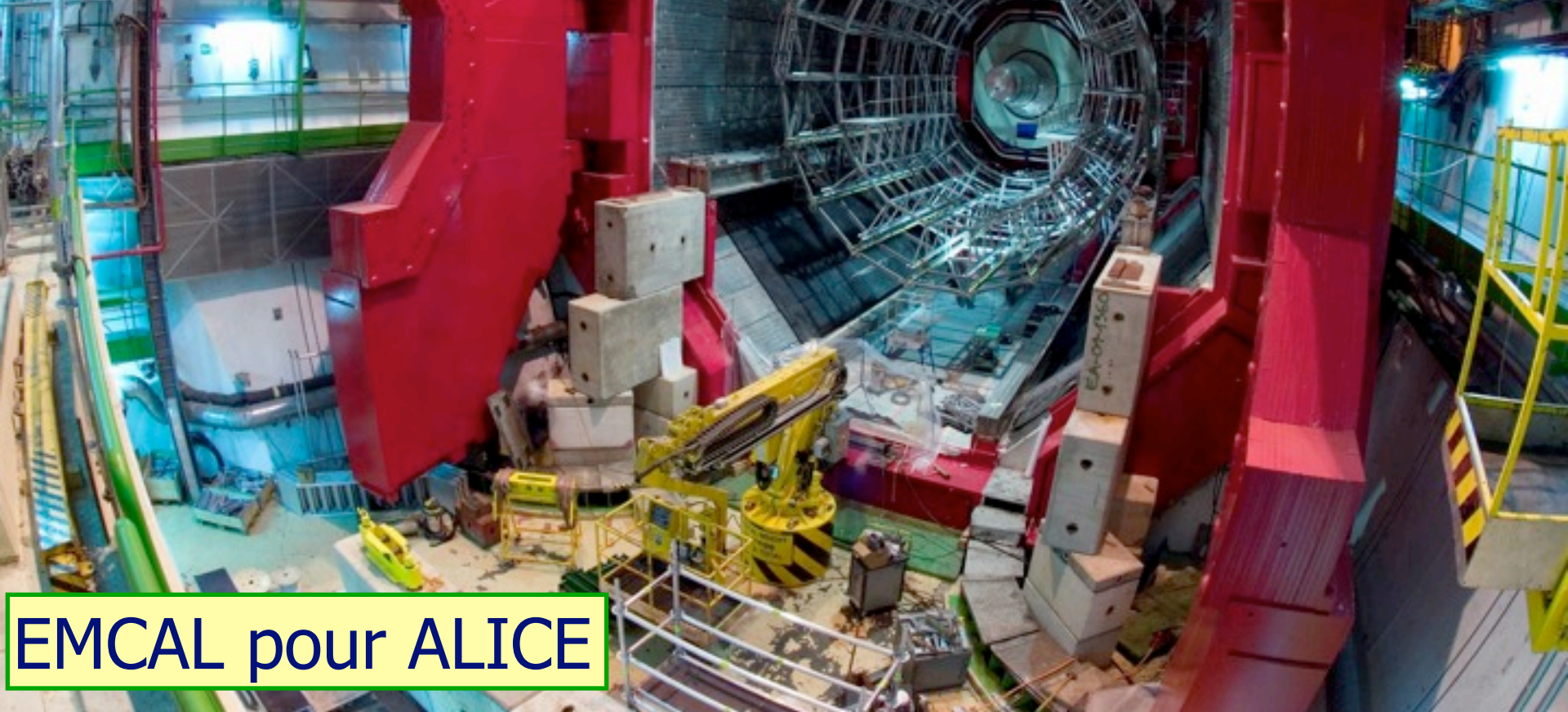
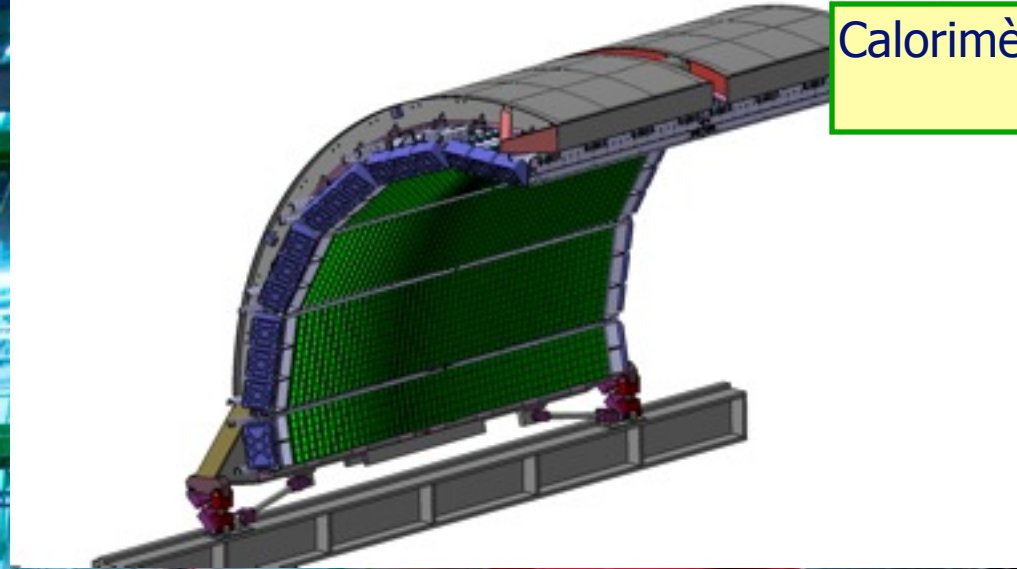


Weight of one module ~28 kg

Assembly of scintillator, lead, fibres and the readout part for inner section modules

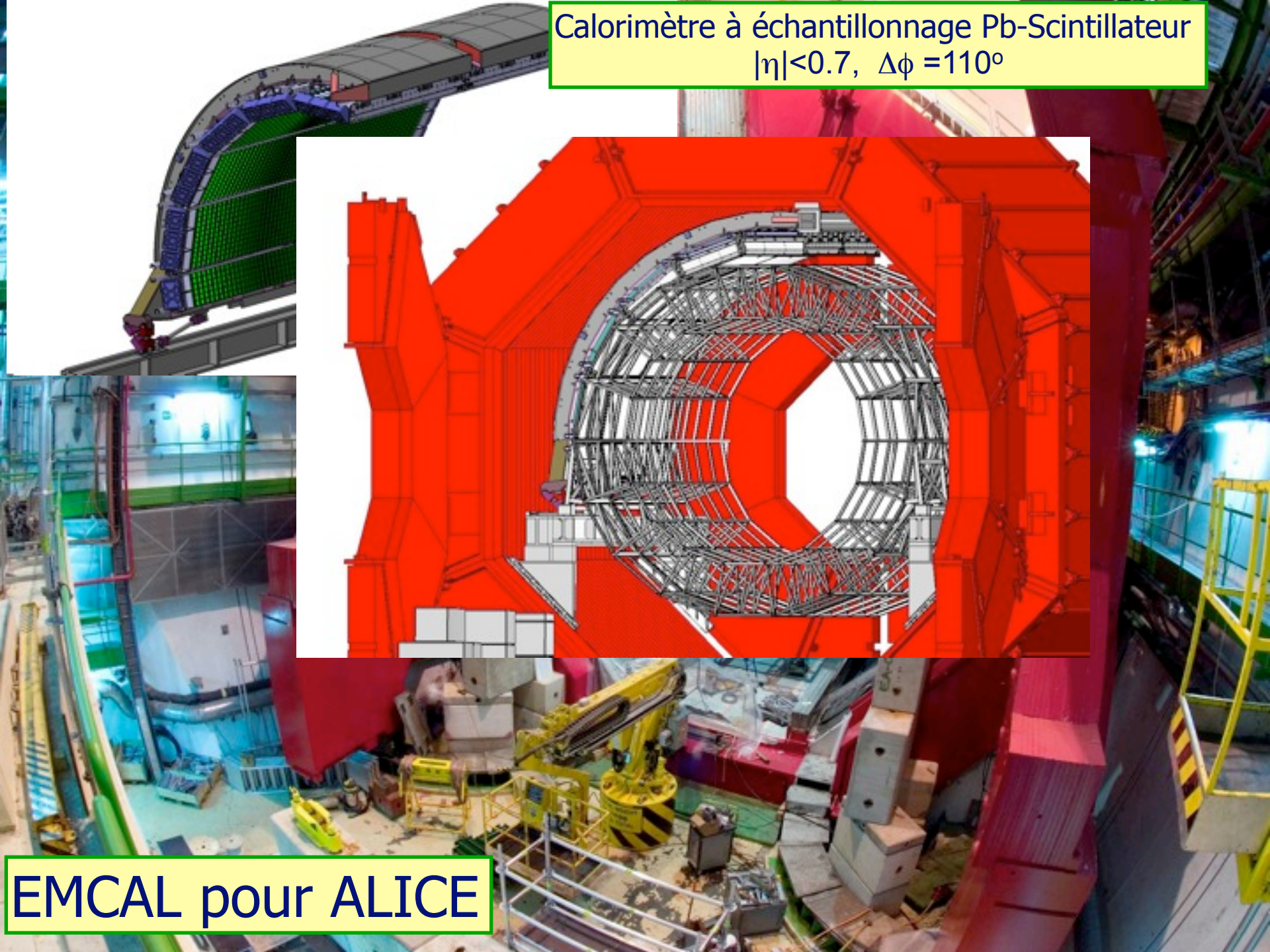


Calorimètre à échantillonnage Pb-Scintillateur
 $|\eta| < 0.7$, $\Delta\phi = 110^\circ$



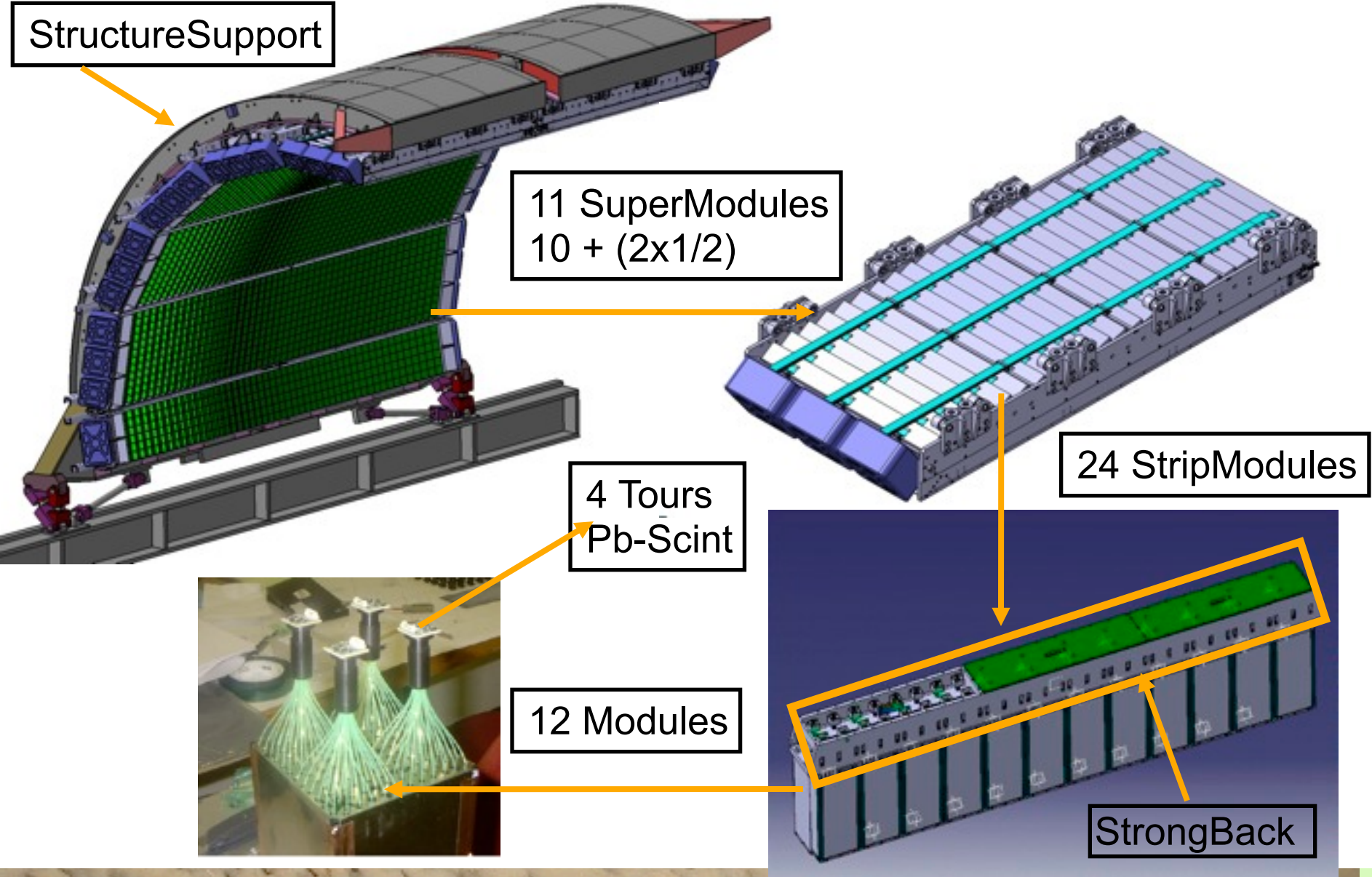
EMCAL pour ALICE

Calorimètre à échantillonnage Pb-Scintillateur
 $|\eta| < 0.7, \Delta\phi = 110^\circ$



EMCAL pour ALICE

EMCal – Éléments



EMCal – Éléments

StructureSupport

11 SuperModules
 $10 + (2 \times 1/2)$

Calorimètre à échantillonnage ($20 X_0$)

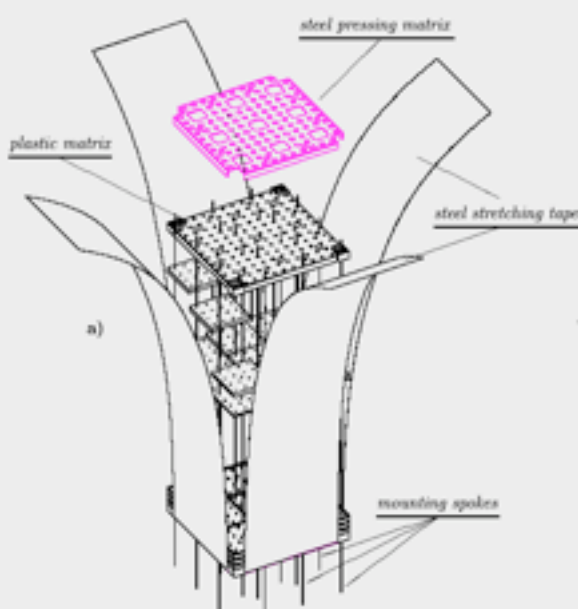
- 1 module = 4 tours
($\Delta\eta\Delta\phi \sim 0.014 \times 0.014$)
- 1 tour = 77 couches
1.76 mm scint./ 1.44 mm Pb

4 Tours
Pb-Scint

24 StripModules

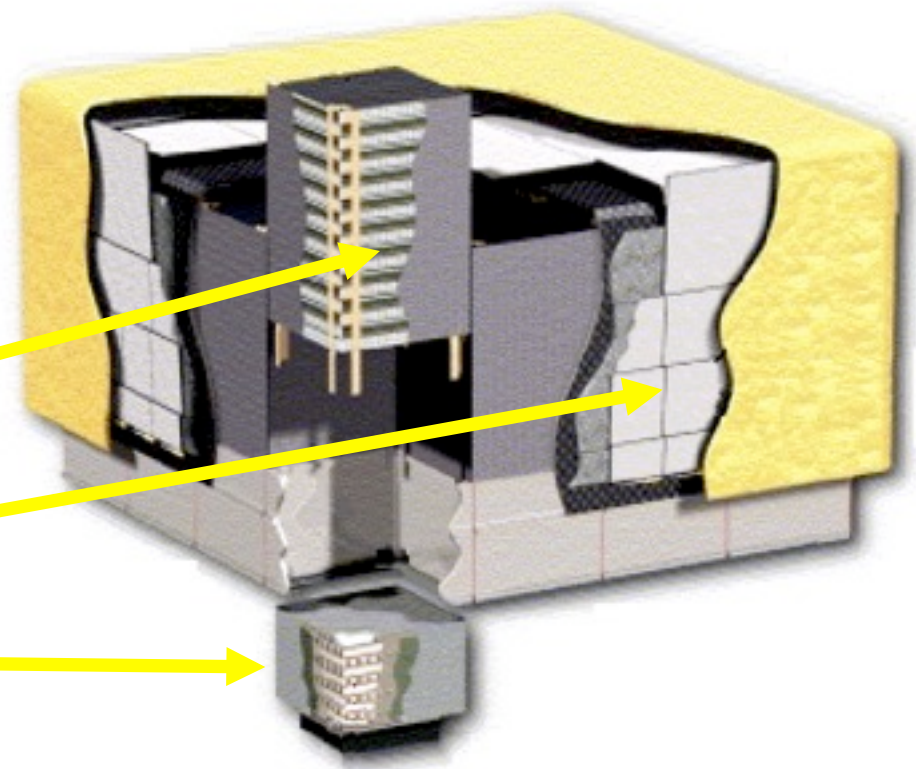
2 Modules

StrongBack



Détecteur principal de GLAST: Large Area Telescope

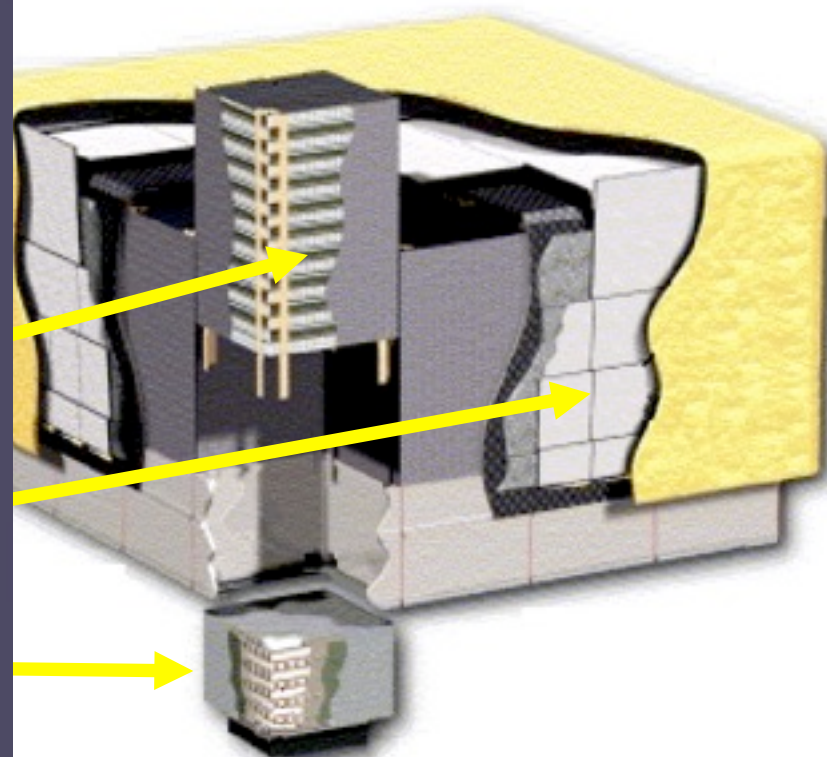
- Large Area Telescope
 - Matrice de 4x4 modules identiques
 - Dimensions 1.75m x 1.75m x 1.0 m
 - Sensible aux photons $20 \text{ MeV} < E_\gamma < 300 \text{ GeV}$
 - avec un angle polaire $< 70^\circ$
- Module de tracker
 - Si-strip dans un radiateur de W
- Détecteur d'anti-coïncidence
 - Scintillateur plastique segmenté
- Module de calorimètre
 - Hodoscope de cristaux de CsI



al de GLAST: elescope

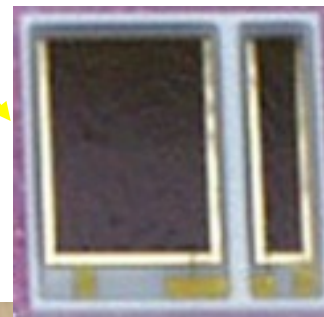
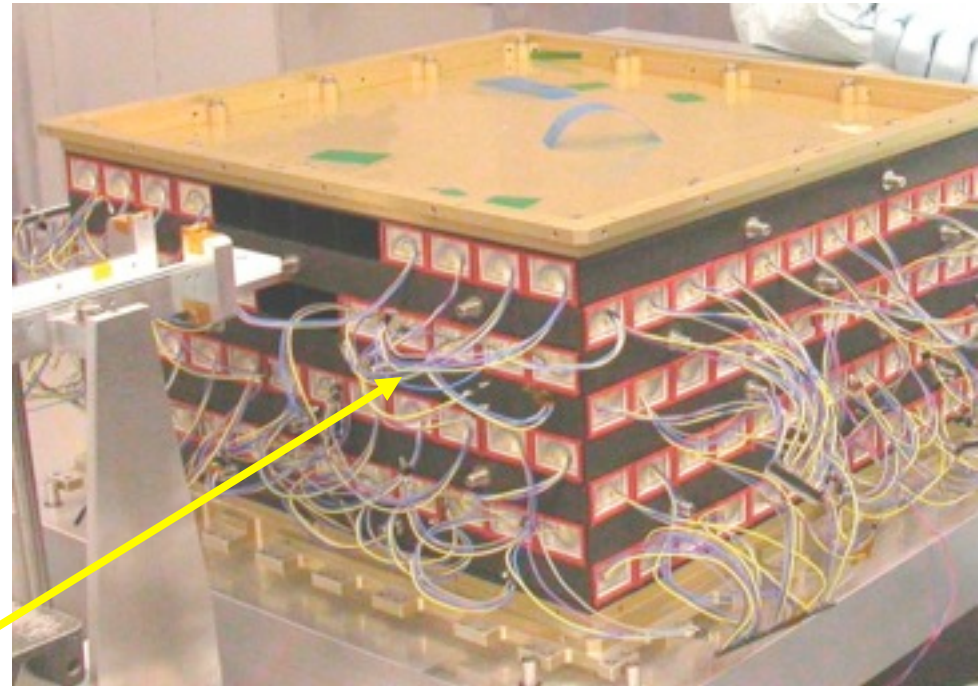
Les rayons gamma (γ) sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible mais dont l'énergie est des milliards de fois plus élevée. Ces rayons sont absorbés dans l'atmosphère et indétectables depuis le sol! GLAST les observera depuis l'espace dès 2007.

Par rapport à ses prédécesseurs, GLAST possède une sensibilité 30 à 100 meilleure, pour détecter des sources plus faibles et éloignées. Un champ de vue très large compense une orbite basse et l'occultation régulière des sources par la terre. Les résolutions angulaire et en énergie sont améliorées pour une imagerie plus fine.

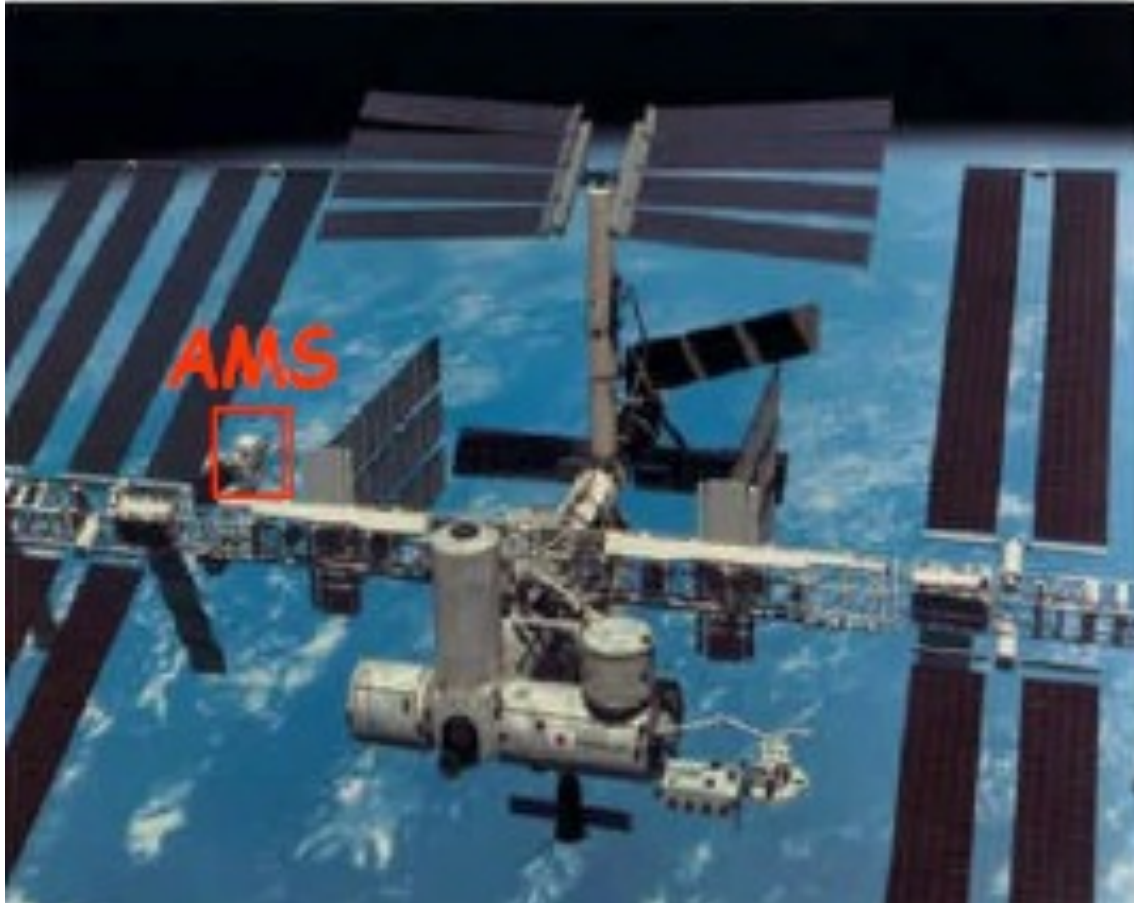


GLAST: Module de Calorimètre

- 8 couches de cristaux de 12 CsI(Tl)
 - Crystal dimensions: 26.7 mm x 19.9 mm x 326 mm
 - Empilement Hodoscope: alternance de couches orthogonales
 - Atténuation de la lumière le long du cristal (~ 0.65) pour faire une mesure de position
 - Epaisseur totale de $8.5 X_0$
- Dual PIN photodiode à chaque extrémité
 - Asymétrie droite/gauche
- Electronique est installée à chaque extrémité du cristal



Alpha Magnétique Spectrometer



- AMS est conçu pour étudier les rayons cosmiques de haute énergie.
- AMS s'intéresse en particulier à la recherche d'anti-matière (anti-He)
- AMS peut aussi mesurer les photons de haute énergie grâce au calorimètre.

Photo-montage

AMS doit partir sur la station spatiale internationale avec la navette spatiale en septembre 2010?

AMS

Transition Radiation Detector

Foam + drift tubes (Xe/CO₂)

Time of Flight (trigger)

Scintillators, fine mesh PMT's

$$\sigma_t \sim 120 \text{ ps}$$

Superconducting magnet (0.86 T·m²)

Tracker (8 layers, 6m²)

6 double-sided silicon strips

$$\sigma_x = 10 \text{ } \mu\text{m in bending plane}$$

RICH

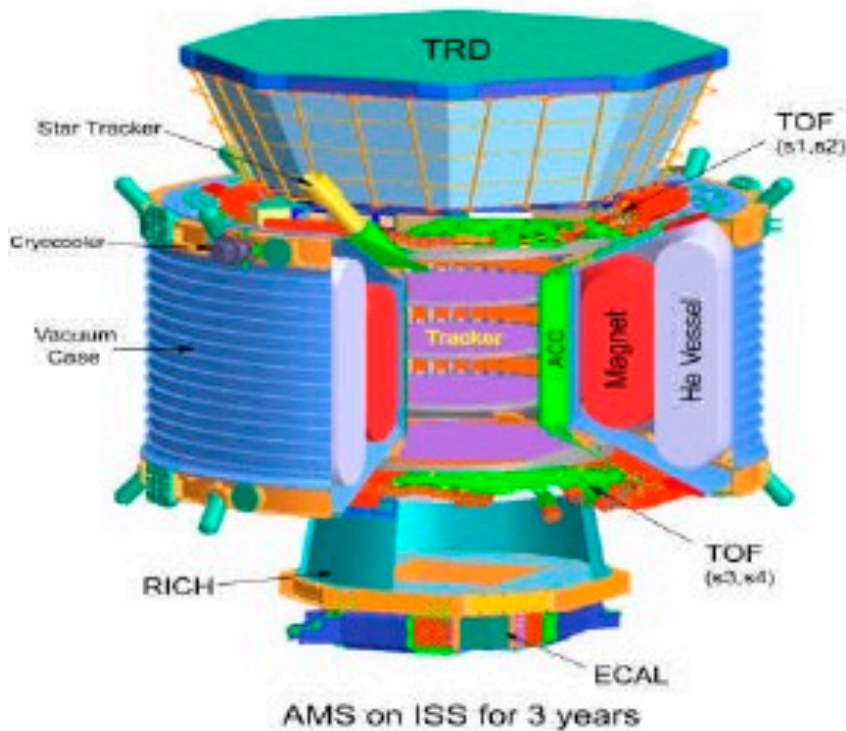
Radiator (Aerogel+NaF)

PMT's (16 pixels)

3D-sampling ECAL

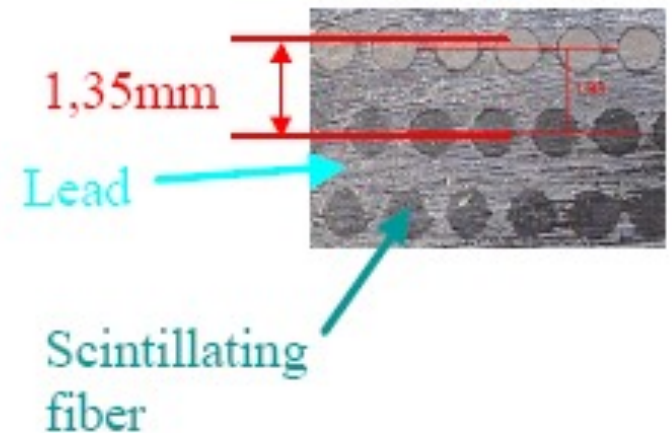
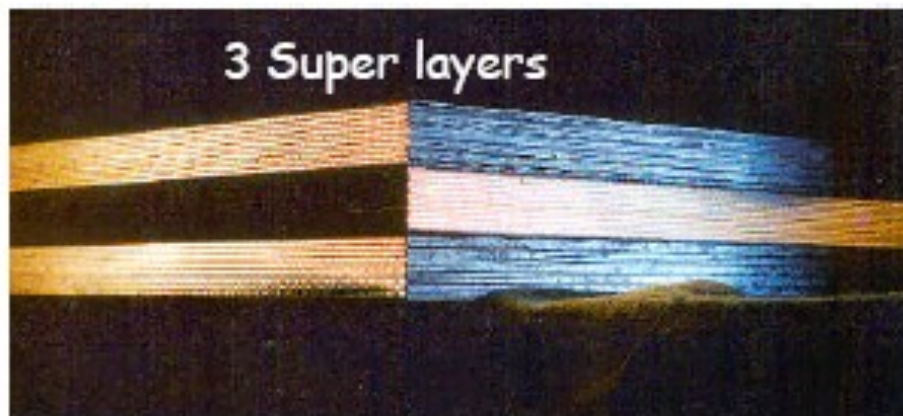
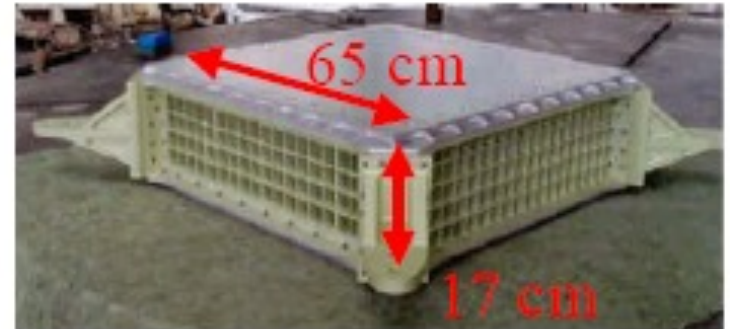
Lead+Scintillating-fibers

PMT's (4 pixels)

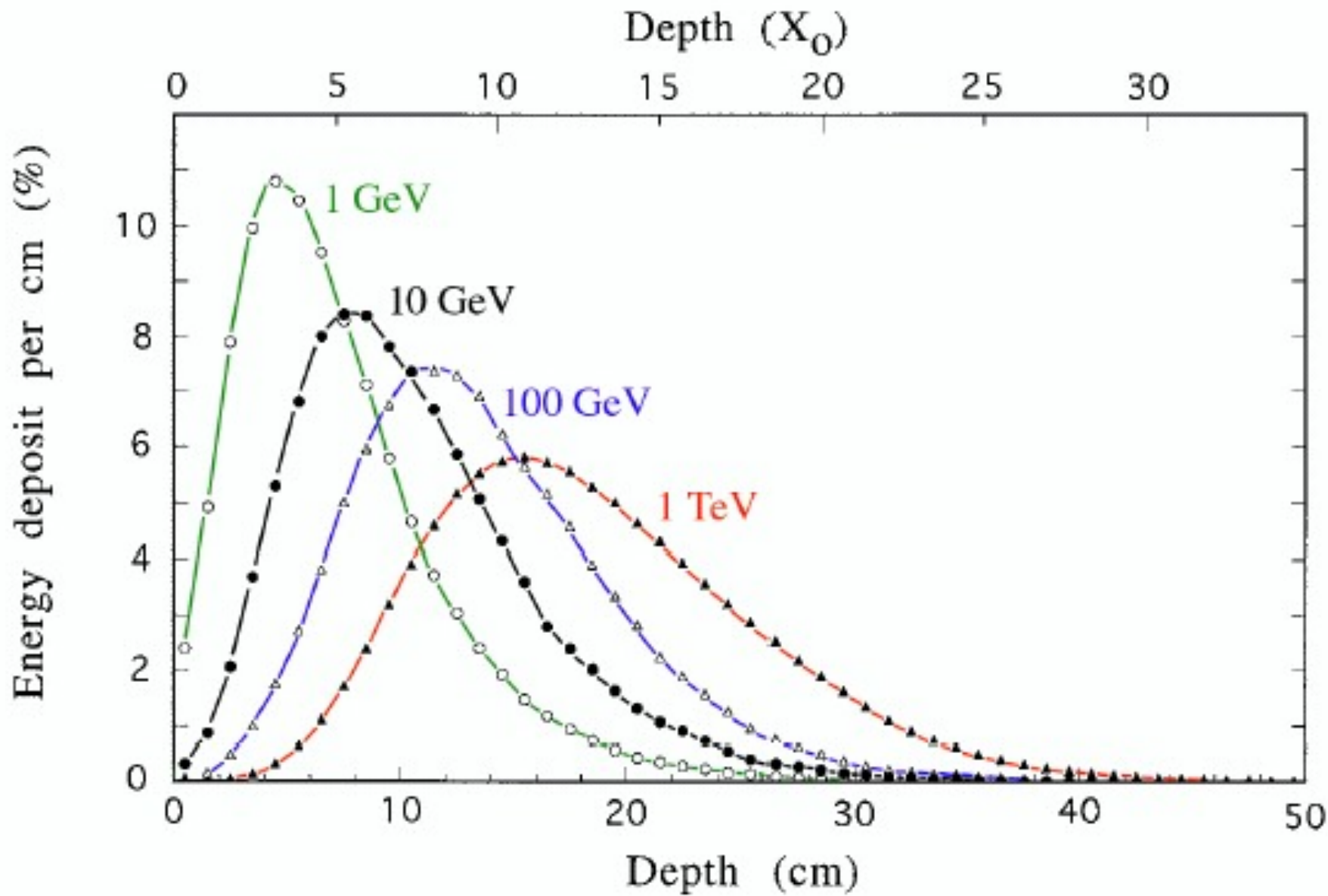


ECAL Structure

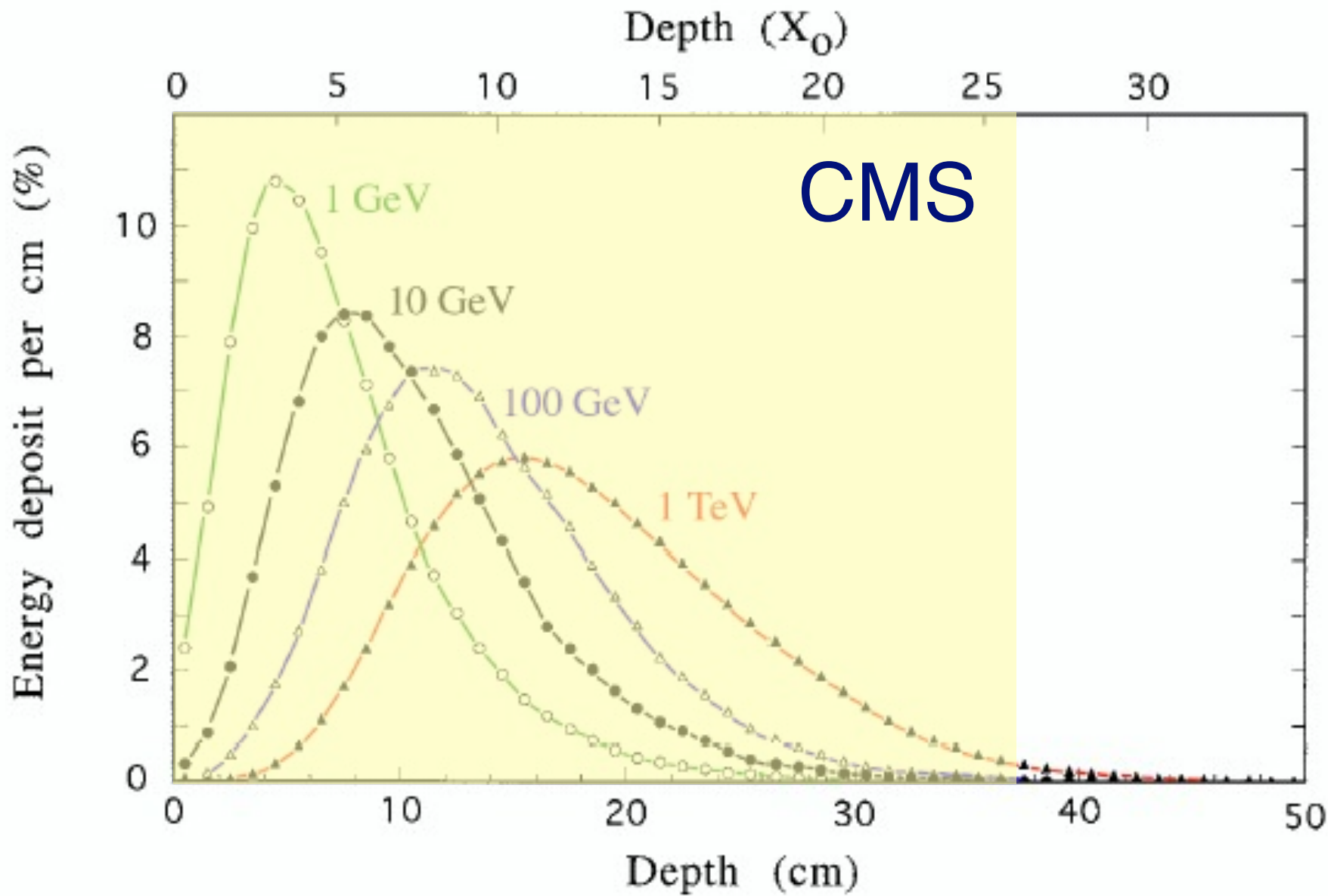
- ❑ 9 super layers ($16X_0$) alternatively oriented along X and Y axis
- ❑ 1 Super layer:
11 grooved Pb foils (1mm thick) interleaved with 10 layers of scintillating fibers ($\varnothing=1\text{mm}$) glued by an epoxy resin



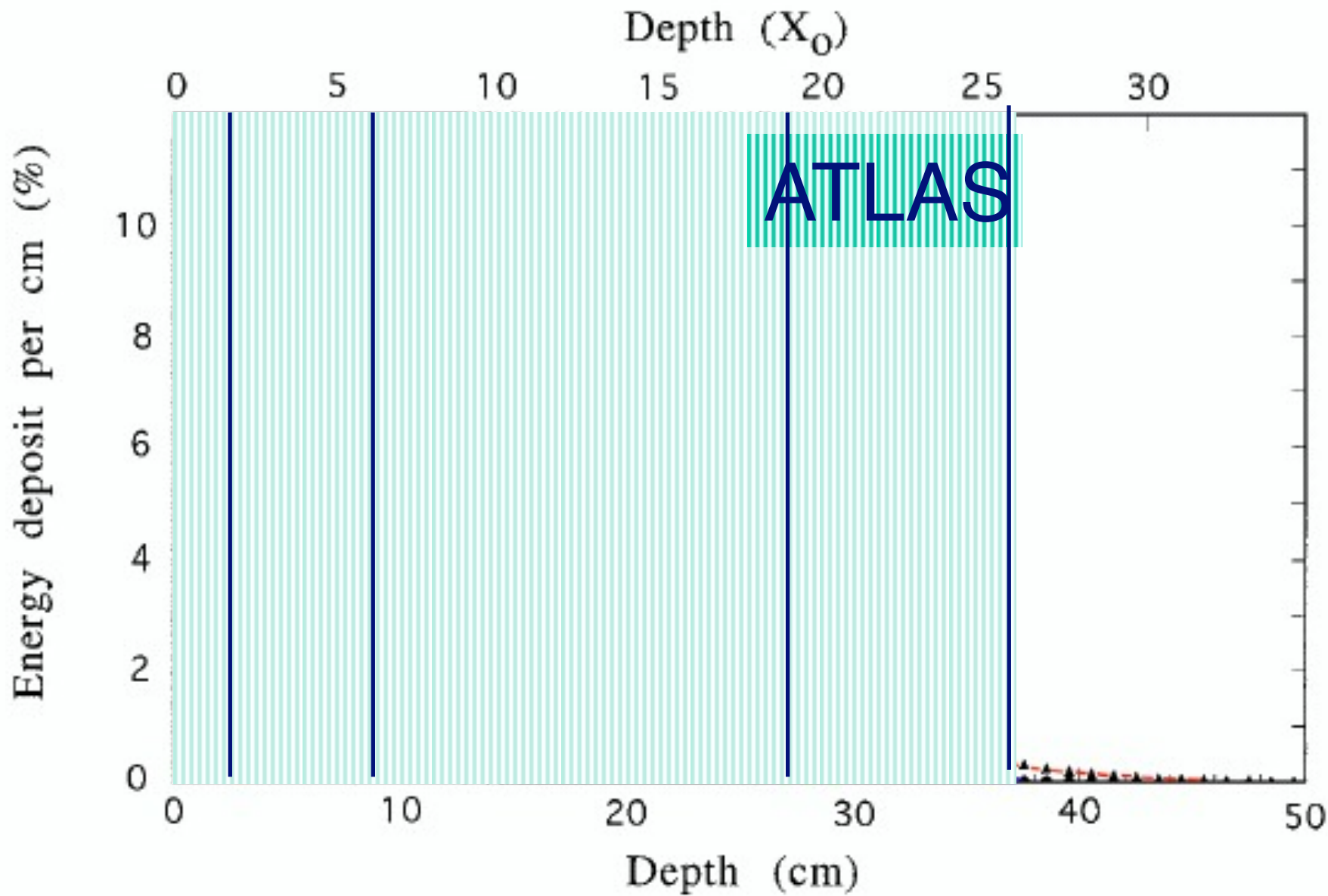
Gerbes Electromagnétiques/Calorimètres EM



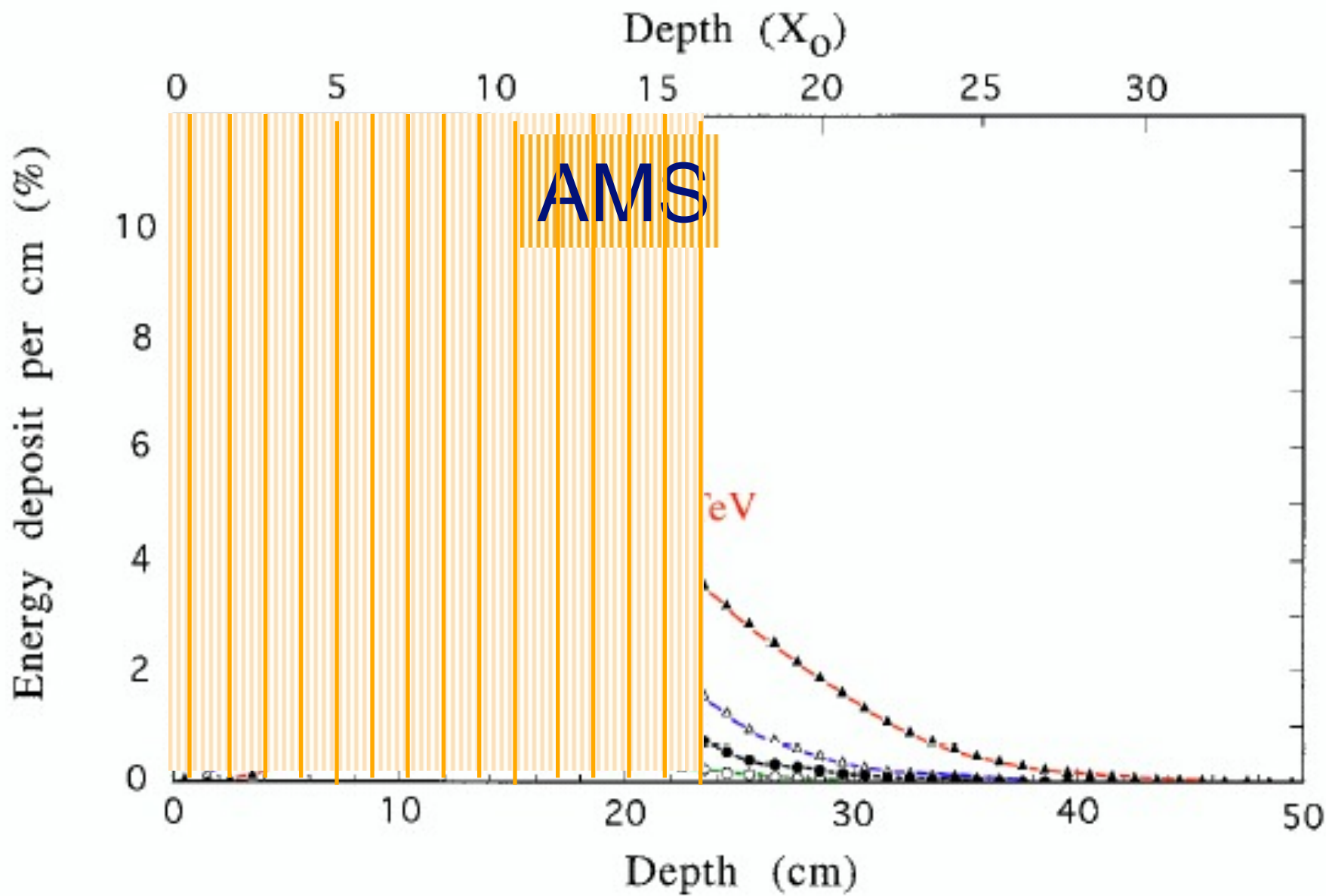
Gerbes Electromagnétiques/Calorimètres EM



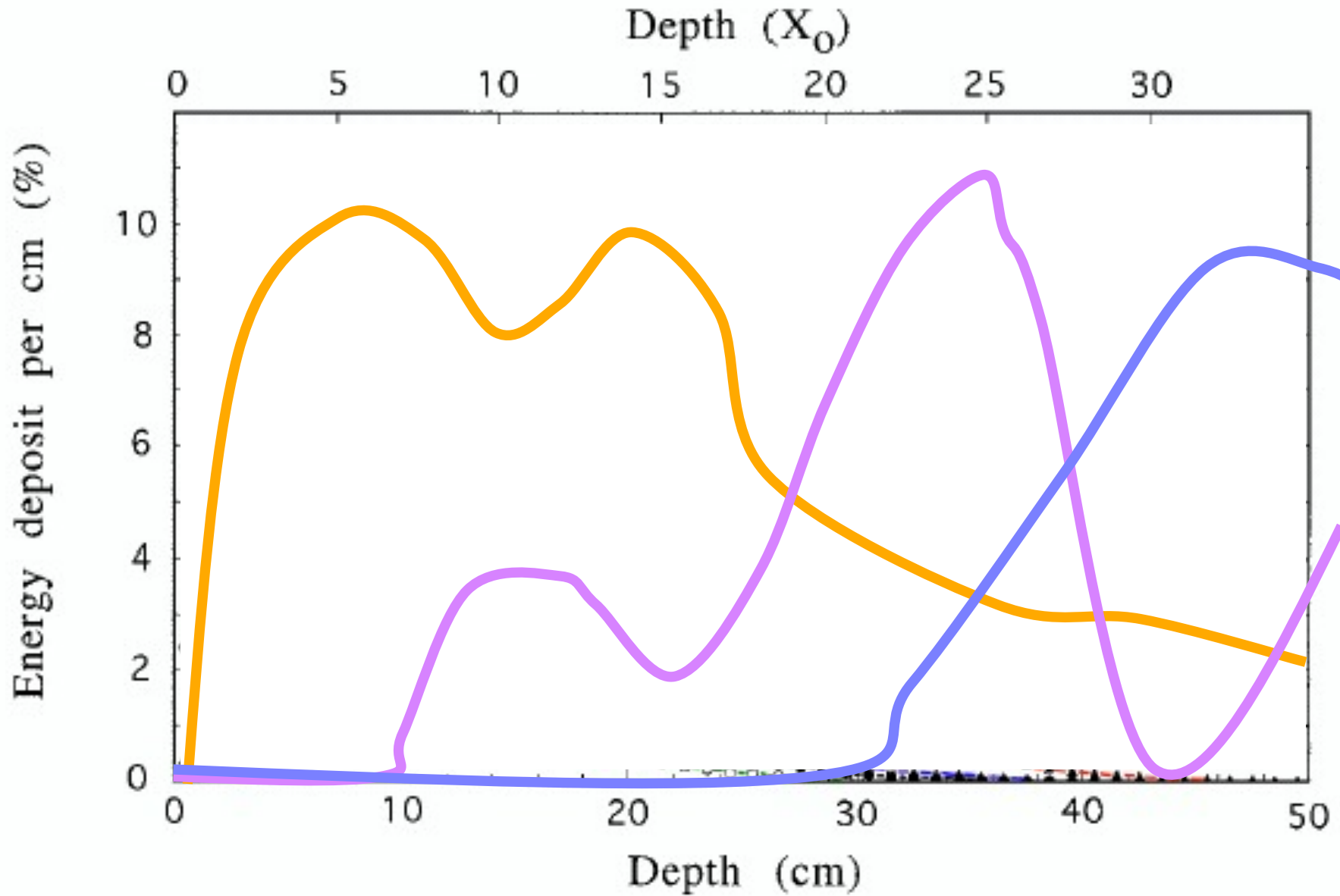
Gerbes Electromagnétiques/Calorimètres EM



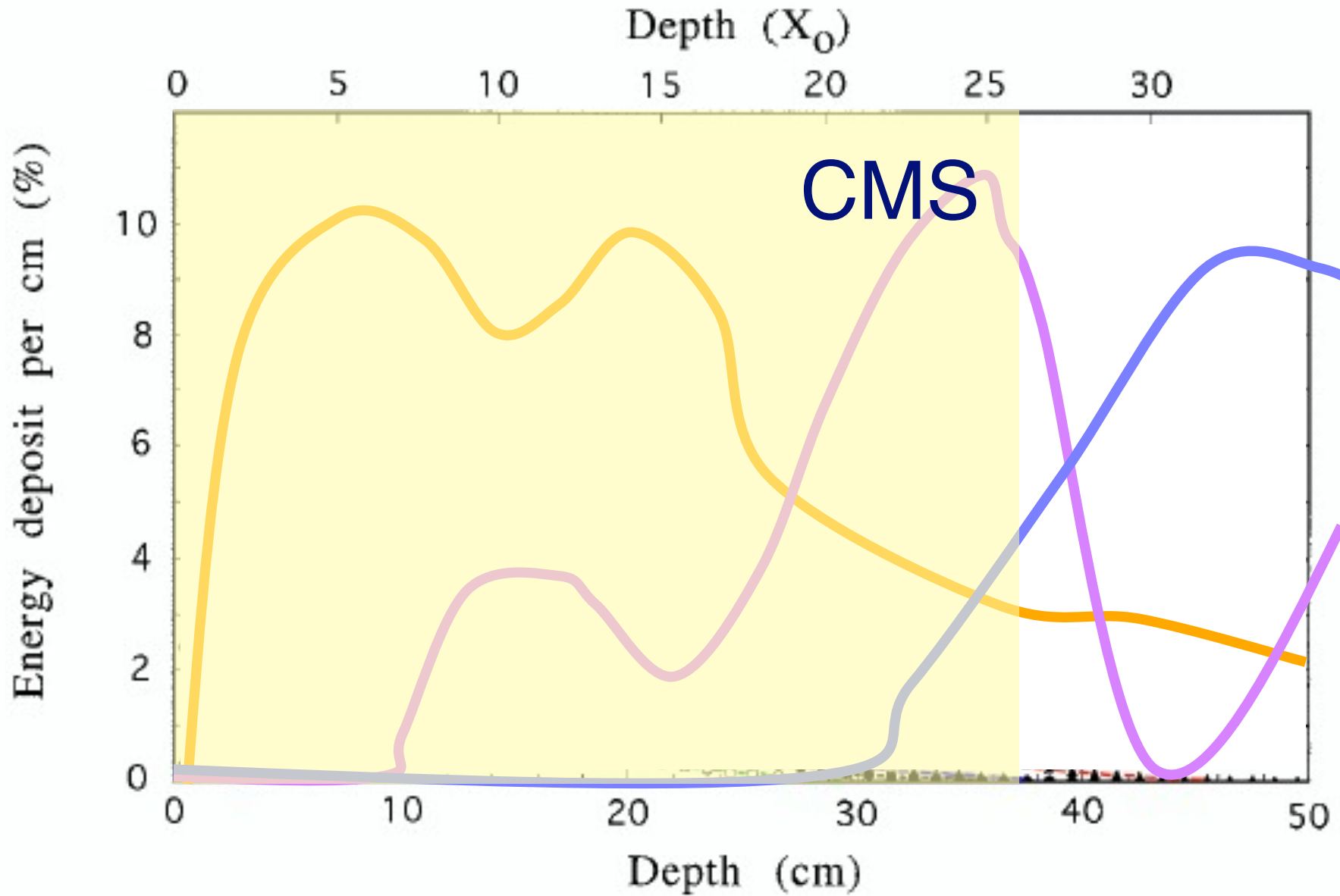
Gerbes Electromagnétiques/Calorimètres EM



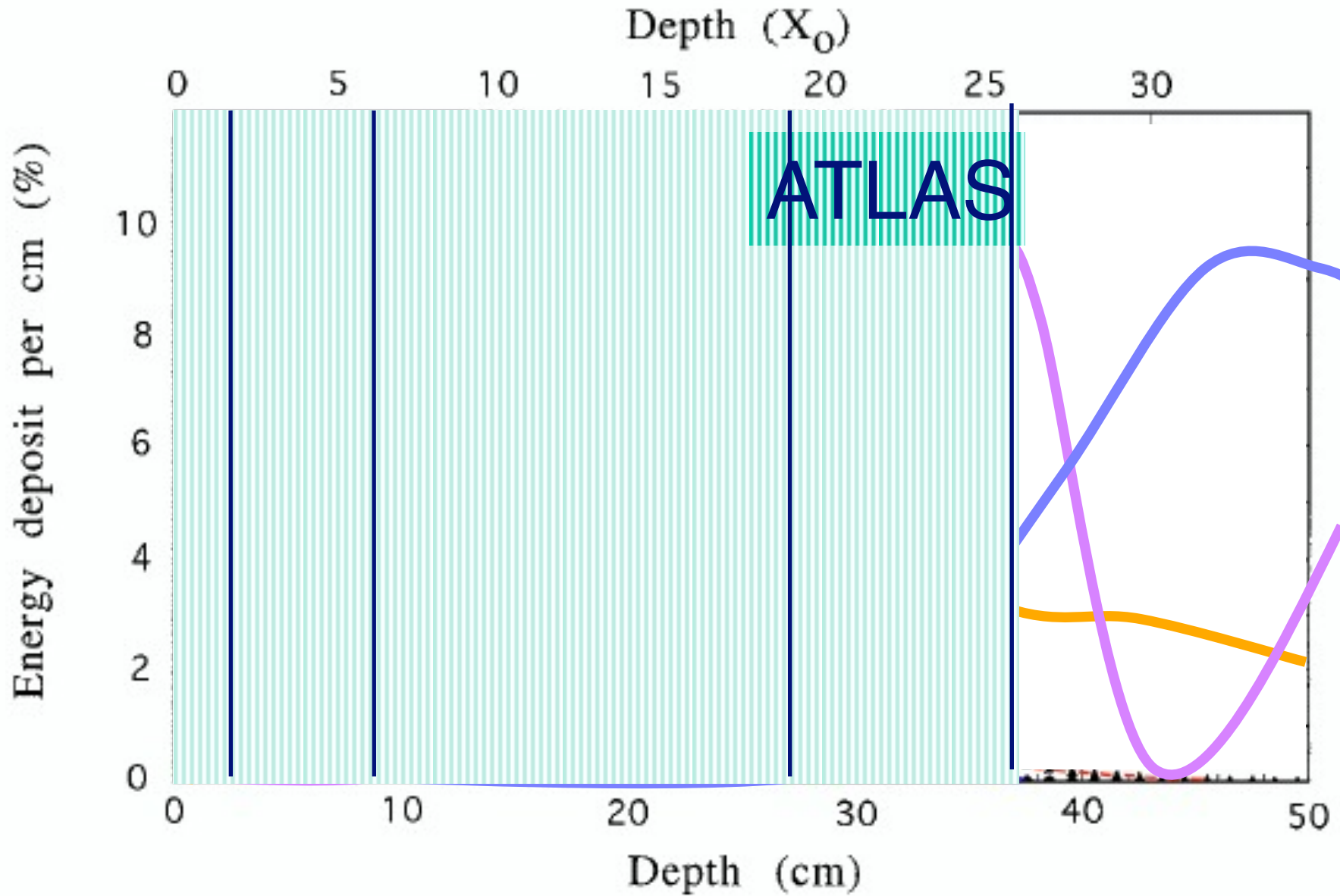
Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM



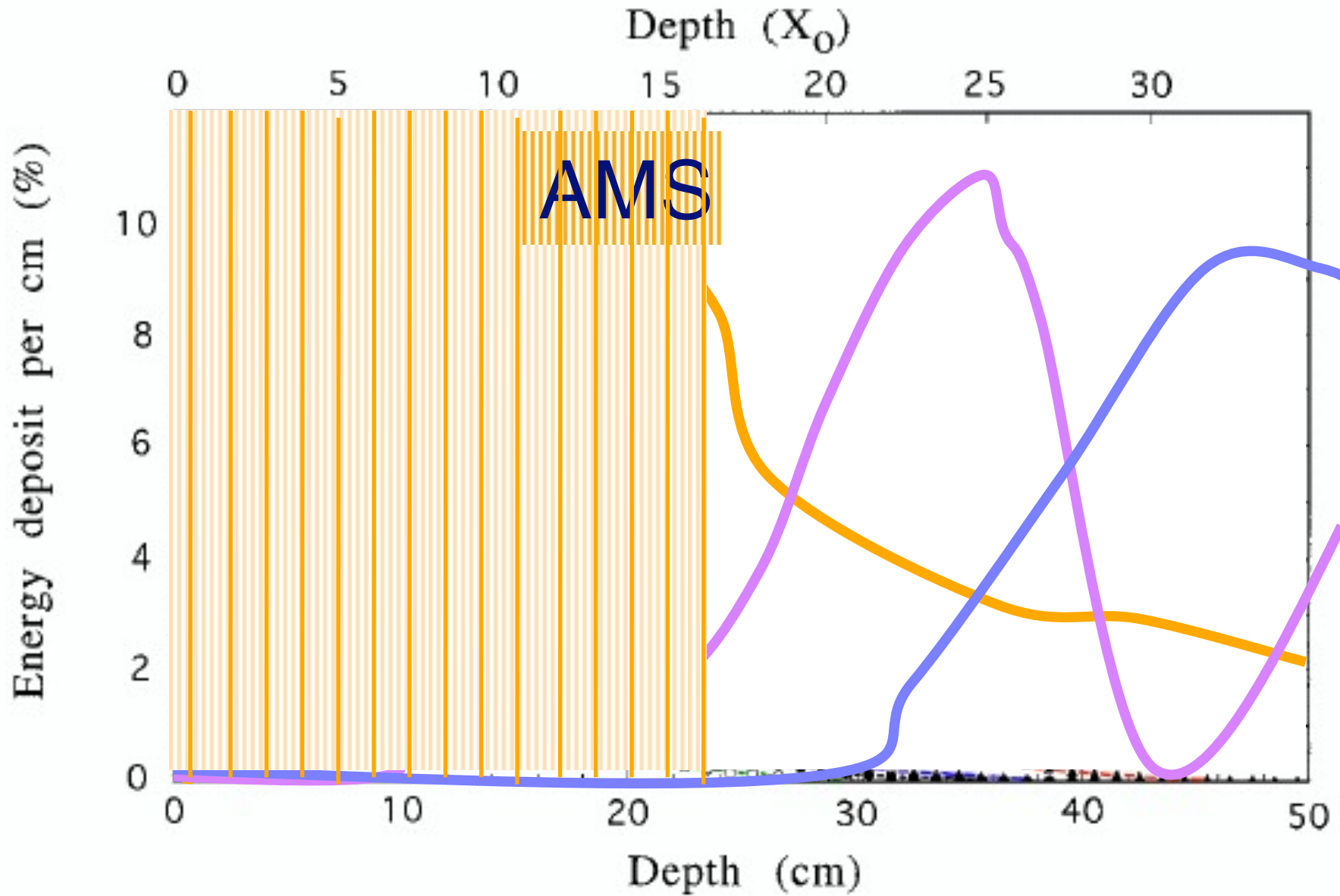
Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM



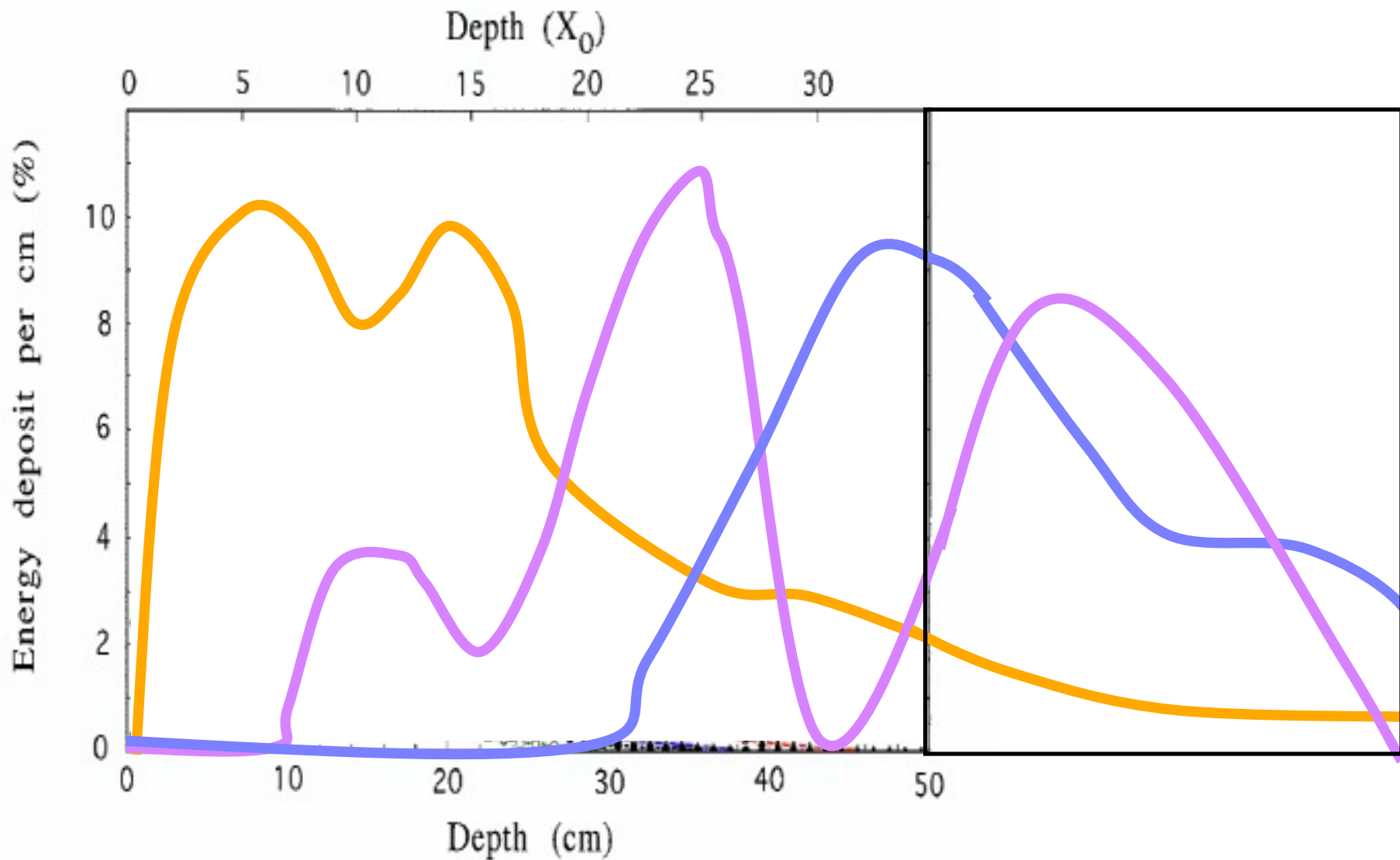
Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM



Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM

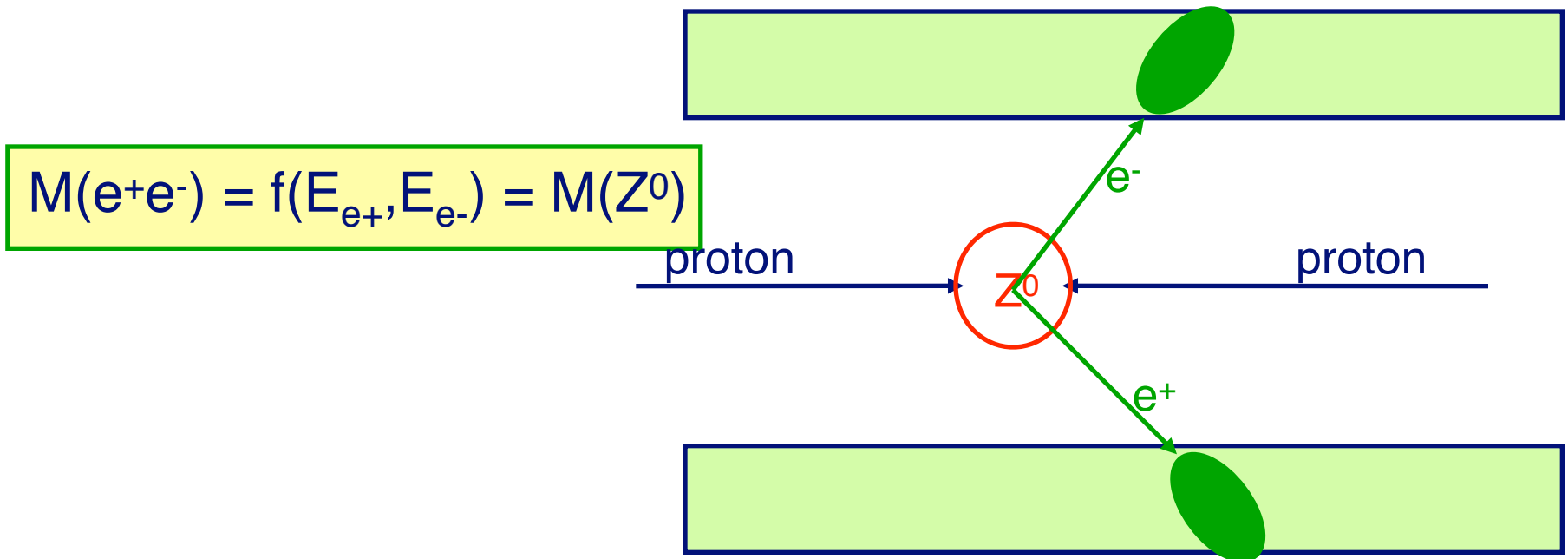


Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM+HAD



Calibration avec les données

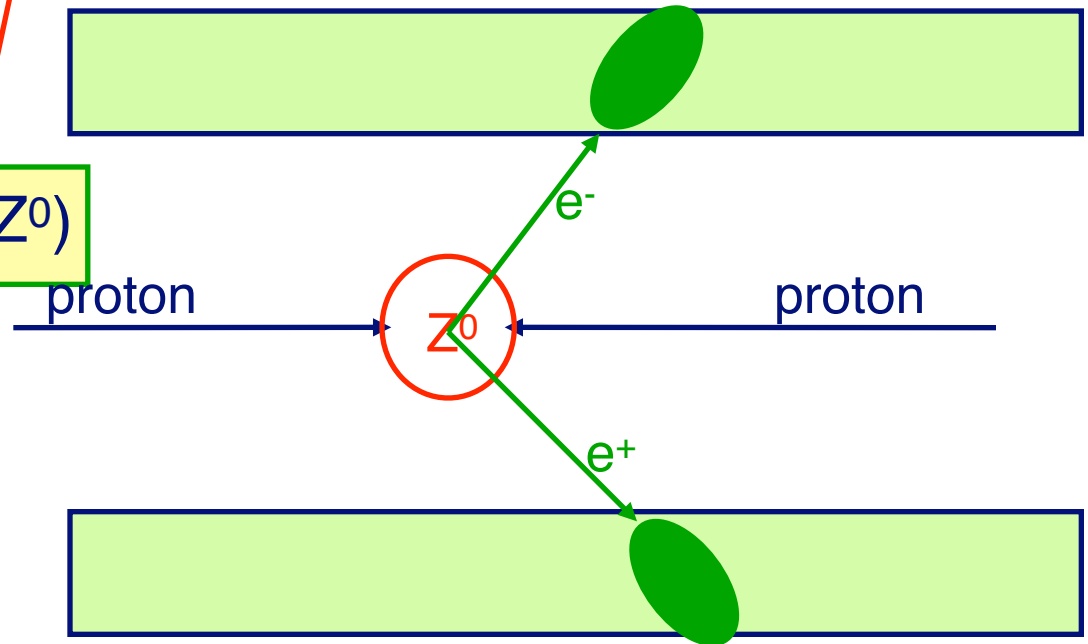
- ◇ $M(Z^0) = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$ (précision de $2\text{MeV}/c^2$)
- ◇ ATLAS et CMS vont utiliser cette particule pour ajuster l'échelle d'énergie absolue



Calibration avec les données

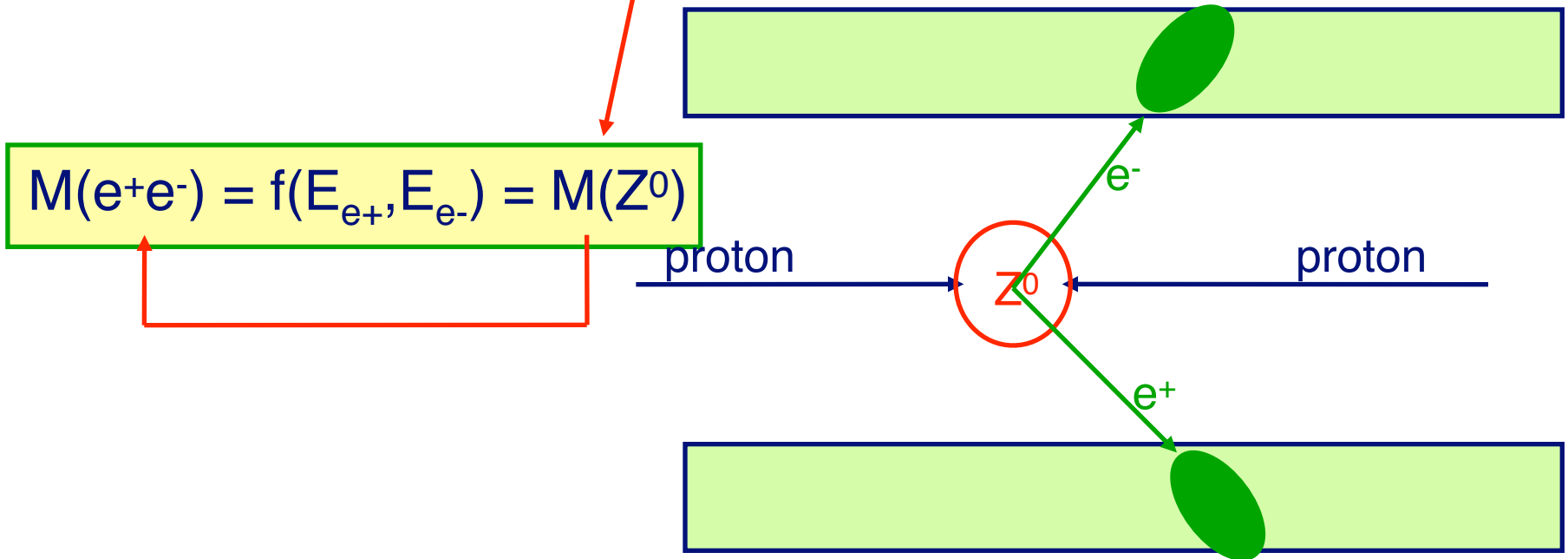
- ◇ $M(Z^0) = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$ (précision de $2\text{MeV}/c^2$)
- ◇ ATLAS et CMS vont utiliser cette particule pour ajuster l'échelle d'énergie absolue

$$M(e^+e^-) = f(E_{e^+}, E_{e^-}) = M(Z^0)$$



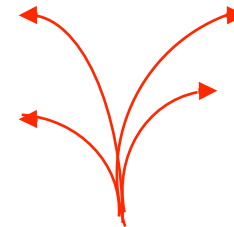
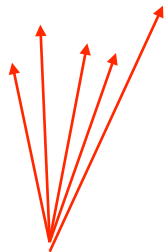
Calibration avec les données

- ◇ $M(Z^0) = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$ (précision de $2\text{MeV}/c^2$)
- ◇ ATLAS et CMS vont utiliser cette particule pour ajuster l'échelle d'énergie absolue



Avec un champ magnétique

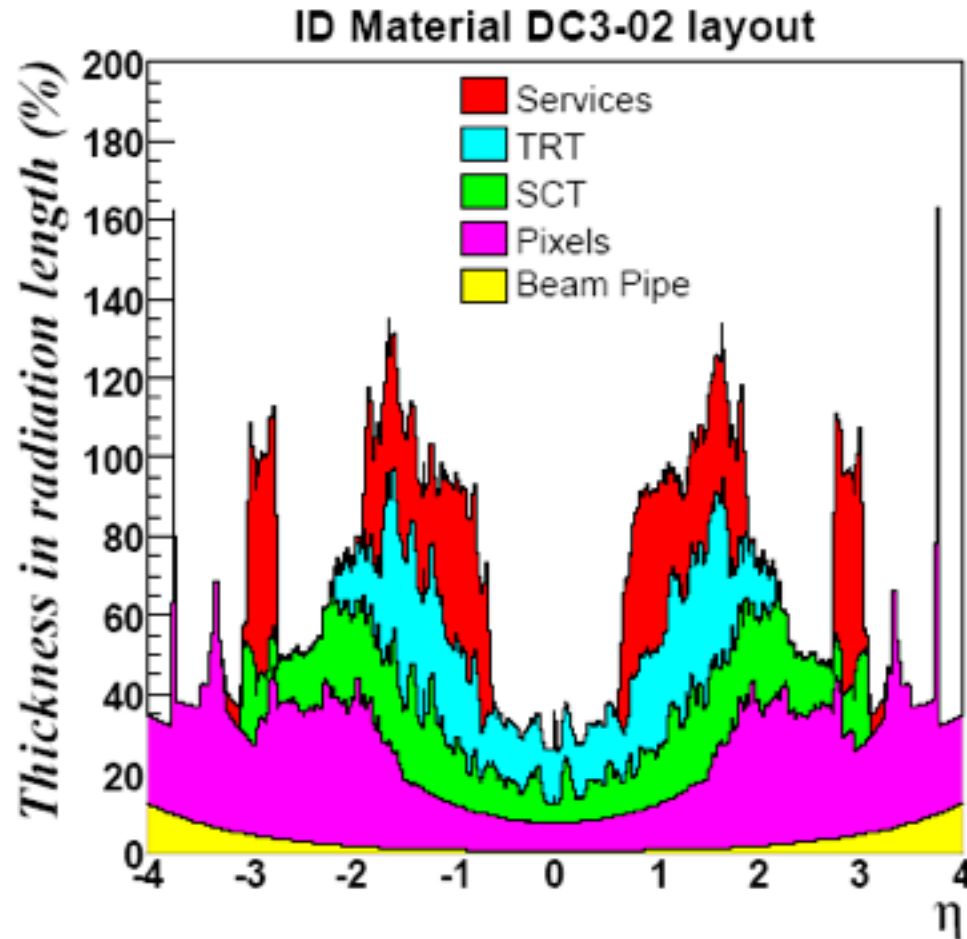
- ◇ Les calorimètres sont toujours après le détecteur de traces
- ◇ Pour ATLAS l'aimant est devant le calorimètre
- ◇ Pour CMS, l'aimant est entre les calorimètres électromagnétique et hadronique
- ◇ La gerbe s'ouvre dans le champs magnétique
 - complique la reconstruction



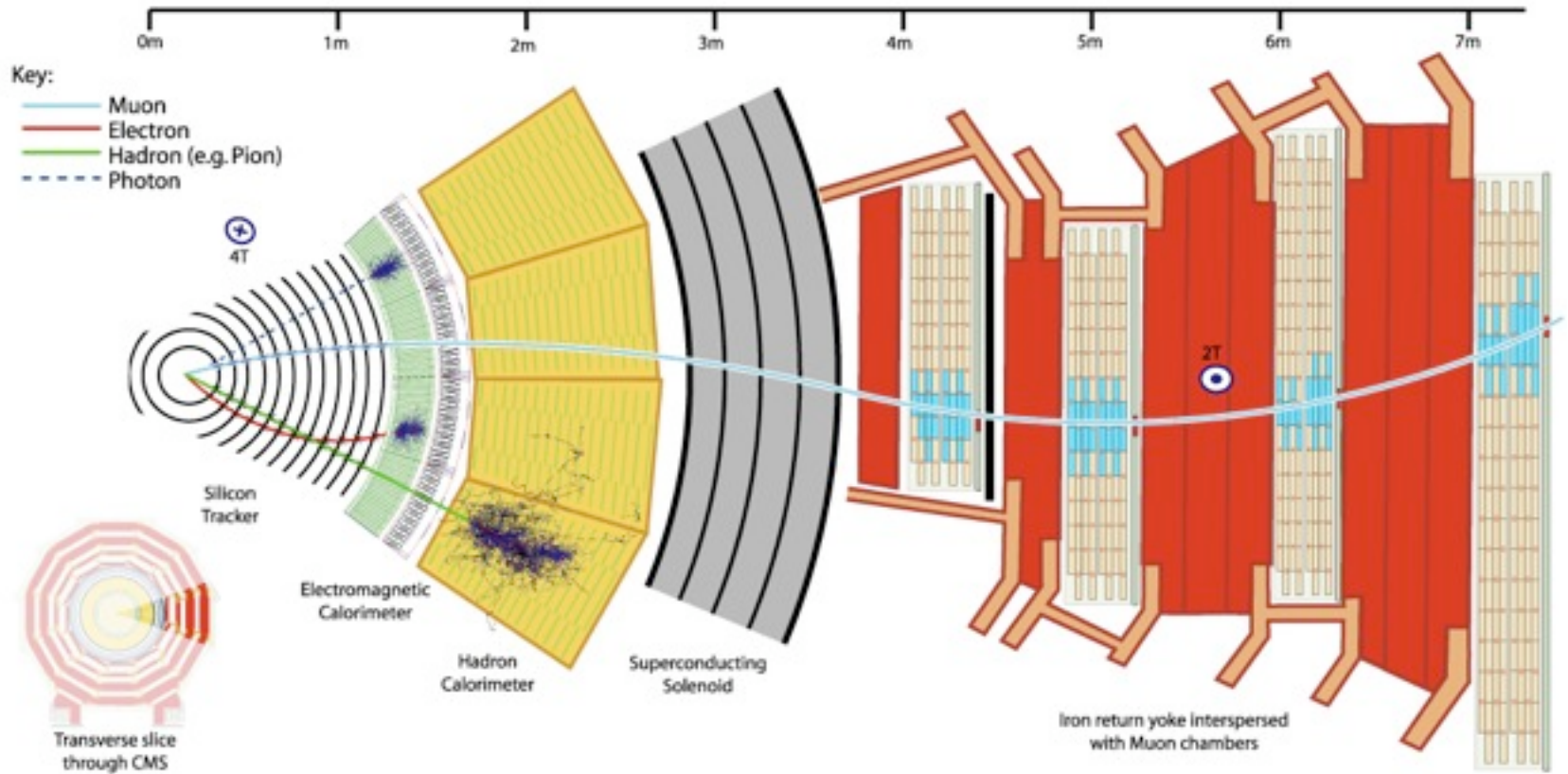
Résumé

- Les calorimètres jouent un rôle essentiel dans la plupart des expériences de physique des particules
- Ils permettent de mesurer l'énergie des particules électromagnétiques mieux que les particules hadroniques.
- Il existe de nombreux types de calorimètres, adaptés à chaque expériences
- Les exigences de physique demandent de plus en plus de raffinement (segmentation → gd nbre de voies, radiations, fréquence,....)

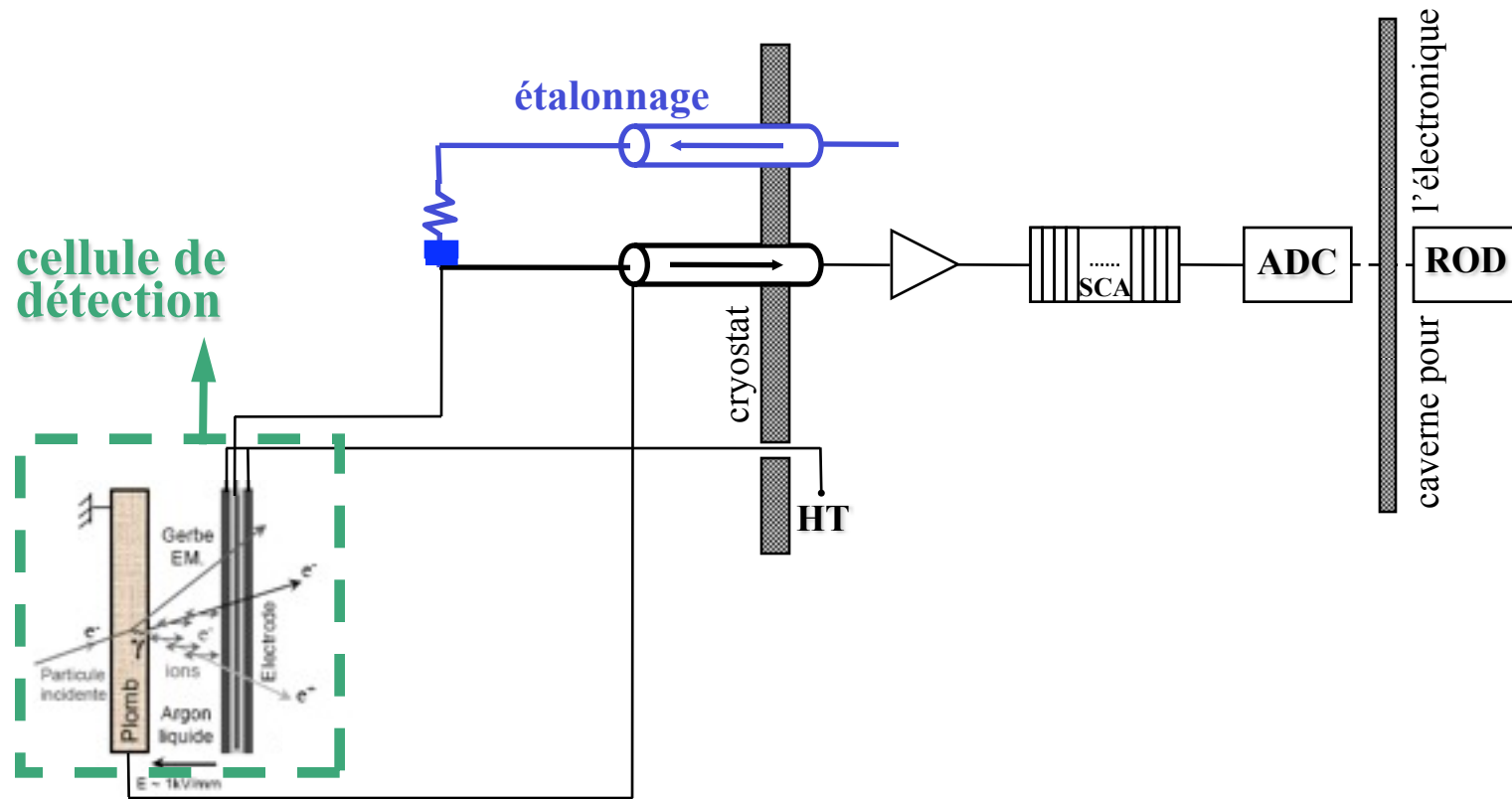
Matière en amont du calorimètre



Structure générale d'un détecteur

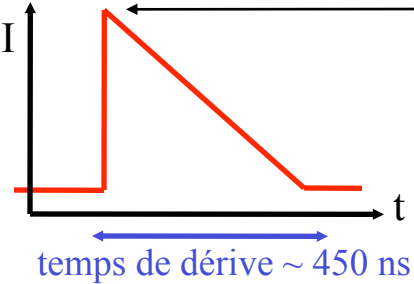


Chaîne de lecture de l'accordéon



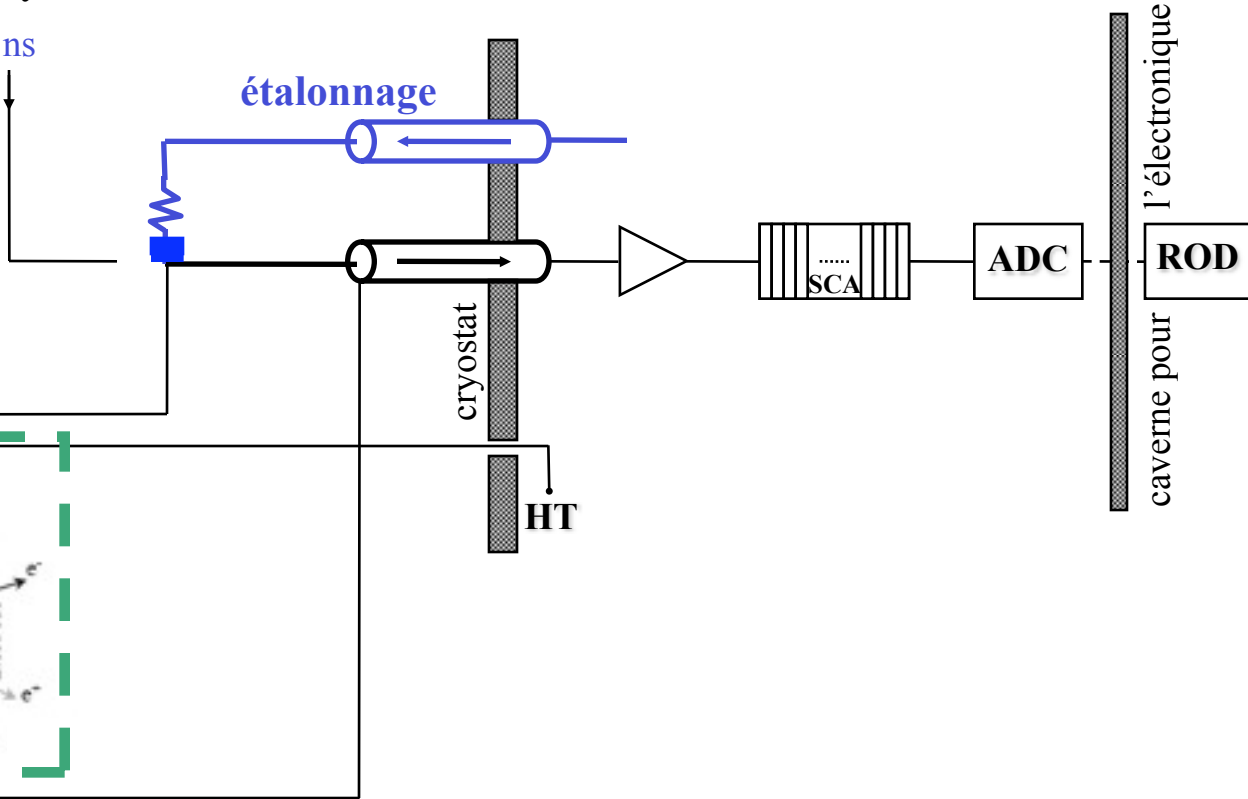
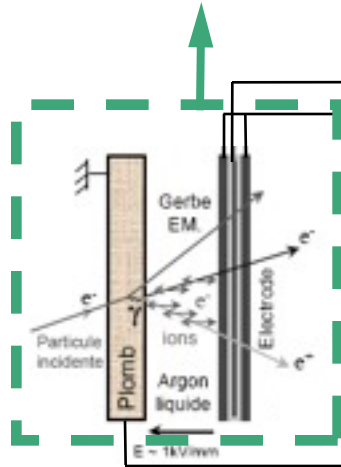
Chaîne de lecture de l'accordéon

signal de physique



$$A^{\max} \propto E_{\text{déposée}} \quad (2.8 \mu\text{A/GeV})$$

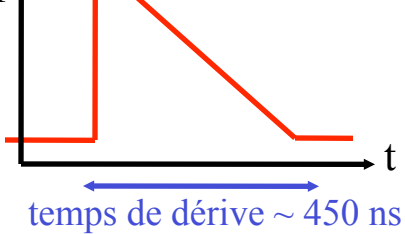
cellule de détection



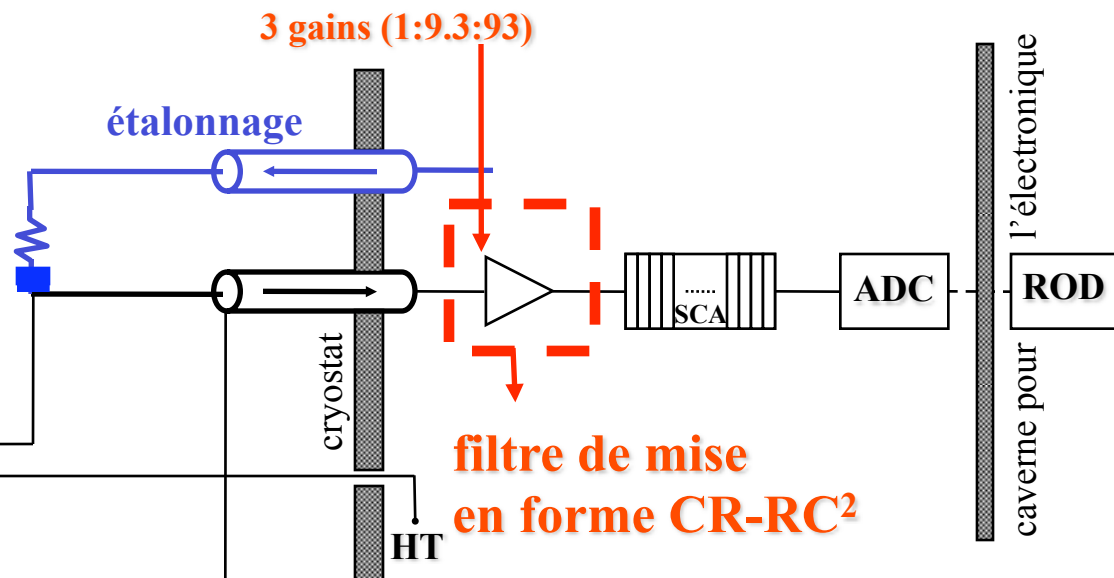
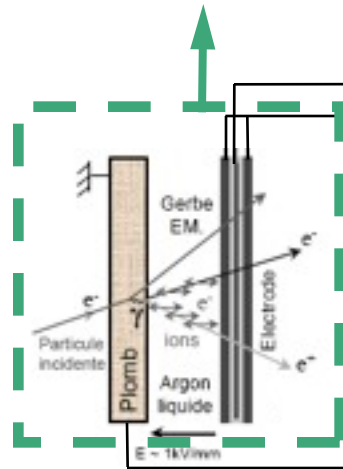
Chaîne de lecture de l'accordéon

signal de physique

I $A^{\max} \propto E_{\text{déposée}} \text{ (2.8 } \mu\text{A/GeV)}$



cellule de détection



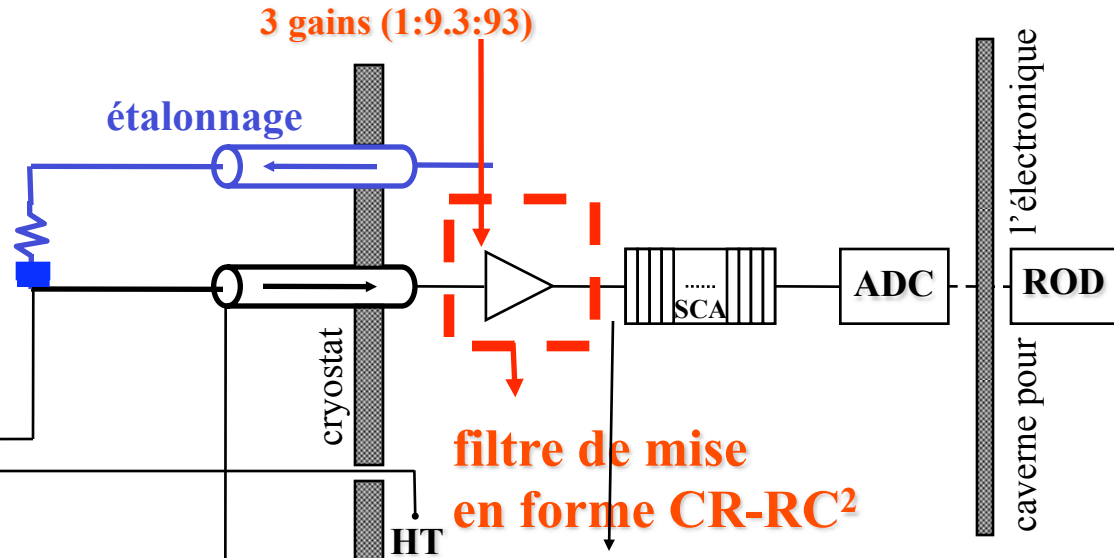
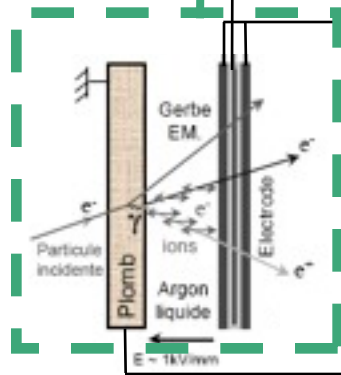
Chaîne de lecture de l'accordéon

signal de physique

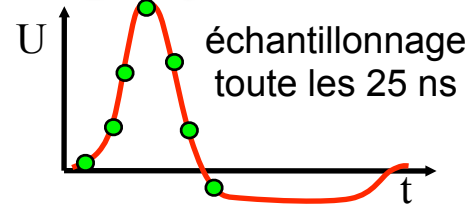
I $A^{\max} \propto E_{\text{déposée}} \text{ (2.8 } \mu\text{A/GeV)}$

temps de dérive $\sim 450 \text{ ns}$

cellule de détection



signal après mise en forme



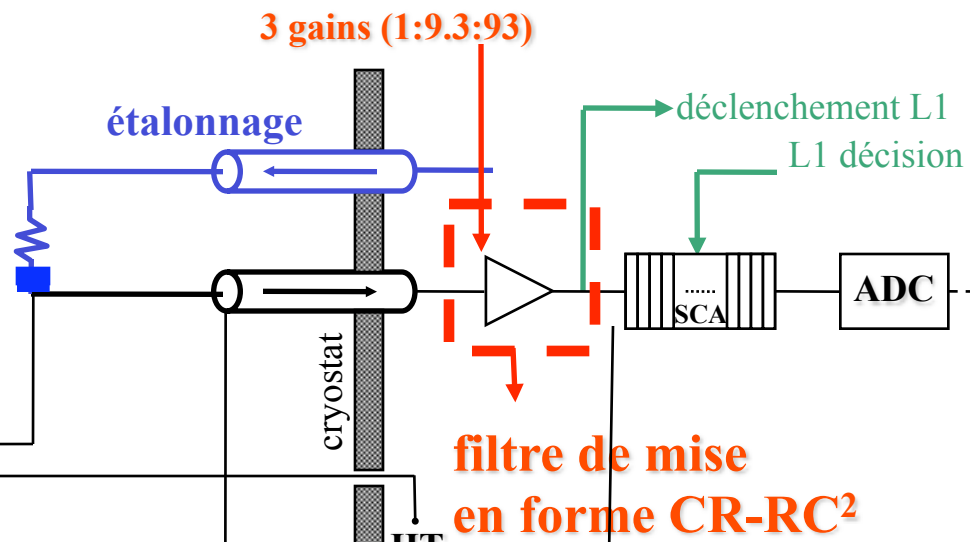
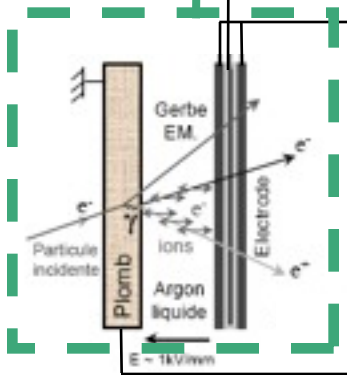
Chaîne de lecture de l'accordéon

signal de physique

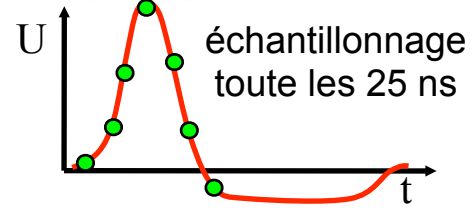
I $A^{\max} \propto E_{\text{déposée}} \text{ (2.8 } \mu\text{A/GeV)}$

temps de dérive ~ 450 ns

cellule de détection



signal après mise en forme



reconstruction de l'énergie par filtrage optimal

$$E = \sum a_i s_i$$



Chaîne de lecture de l'accordéon

