

La calorimétrie

Partie 2

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



École du détecteur à la mesure
Oléron, 16—23 juin 2011

Plan

□ Introduction

- ▶ Les interactions des particules dans la matière
 - ◆ interactions hadronique, réponse en temps, ...
 - ◆ Les belles gerbes
- ▶ Principe de la mesure en calorimétrie
 - ◆ calorimétrie électromagnétique & hadronique
 - ◆ mesure de la performance

Jeudi

□ Techniques de détection

- ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
- ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
- ▶ Détecteurs Gazeux
- ▶ Quelques exemples

Vendredi

□ Quelques considérations générales

- ▶ Quelques effets «annexes»
- ▶ Considérations «pour les ingénieurs»
- ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout & le particle flow.

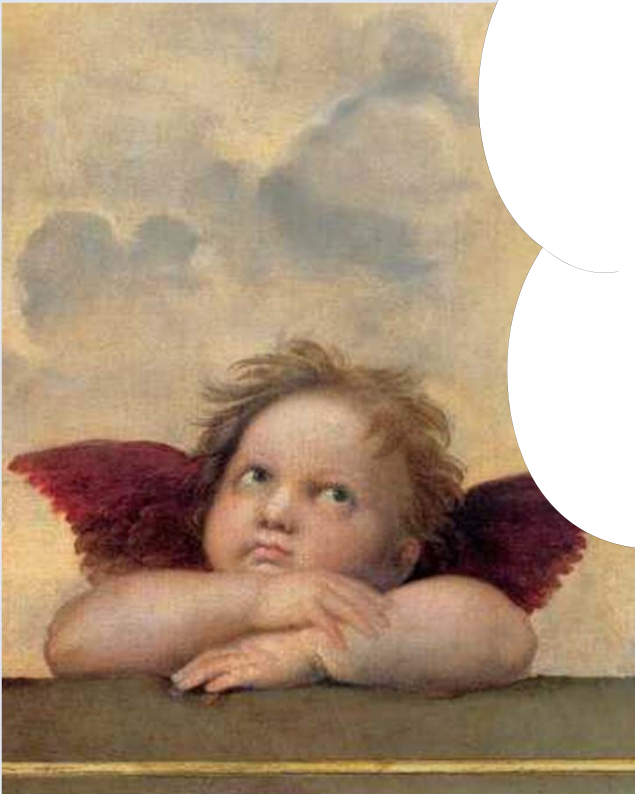
Lundi

Rappel

- Calorimétrie = mesure des particules passant le trajectographe par arrêt
- e^\pm et $\gamma \rightarrow$ gerbes dans le calorimètre EM
 - ▶ $\sim 30 X_0 \sim 20$ cm de mat dense ; $r \sim 2 R_M \sim qq$ cm
- Hadrons
 - ▶ $\lambda \sim 30 X_0$
 - ▶ Gerbes : $L_{95\%} \sim 8 \lambda$, $R_{95\%} \sim 1,5 \lambda$
 - ▶ Fluctuation de la composante EM
 - ▶ ...

L'élaboration d'un calorimètre

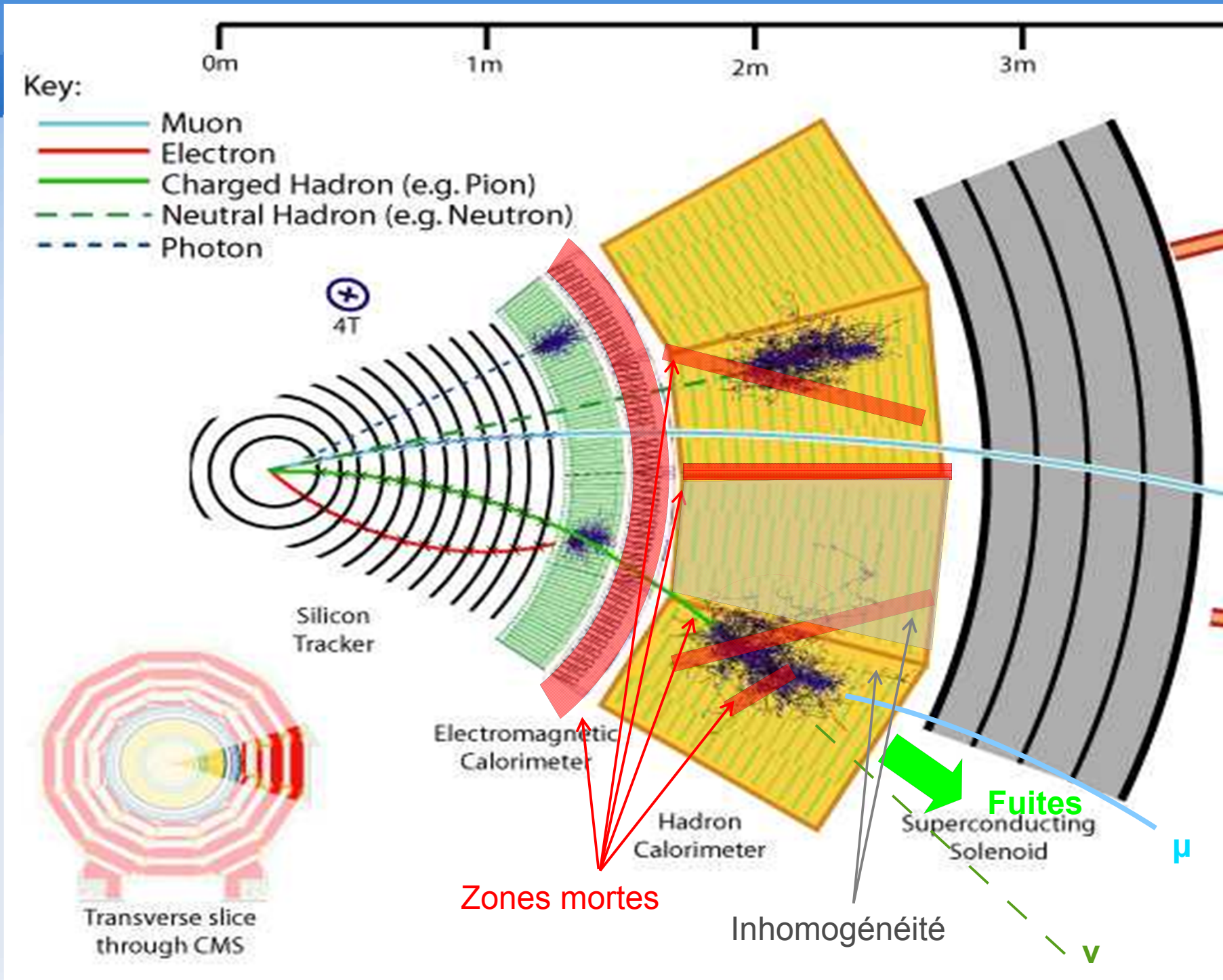
Le détecteur parfait



- infinie (pas de pertes)
- Sans bruit
- Infiniment précise
- Linéaire
- Précision spatiale & angulaire

- Rapide
- Homogène
- Stable
- Identification
- Séparation de particules

+ Bon marché...



Les détecteurs réels



Un expérimentateur...

- infinie (sans pertes)
- Sans bruit
- Infiniment précise
- Linéaire
- Rapide
- Stable
- Homogène
- Identification
- Position & angle
- Séparation
- % de pertes de fuite
- Résolution
- Non Linéarité
- Vitesse + empilement + Taux d'occupation
- Variations (\Rightarrow radiations)
- Inhomogénéité δ
- Efficacité & Pureté
- Précision position & Angle
- % Confusion (e/ π , hadrons, jets isolés, 2 jets)

+ Bon marché...

€€€ !!

< 10% machine ?

Comment on estime l'énergie:

en décomptant la longueur de trace chargée générée

estimée, échantillonnée
par le nombre de chargés
(e^\pm , p , π , fragme
produits

la Mesure c'est du Comptage

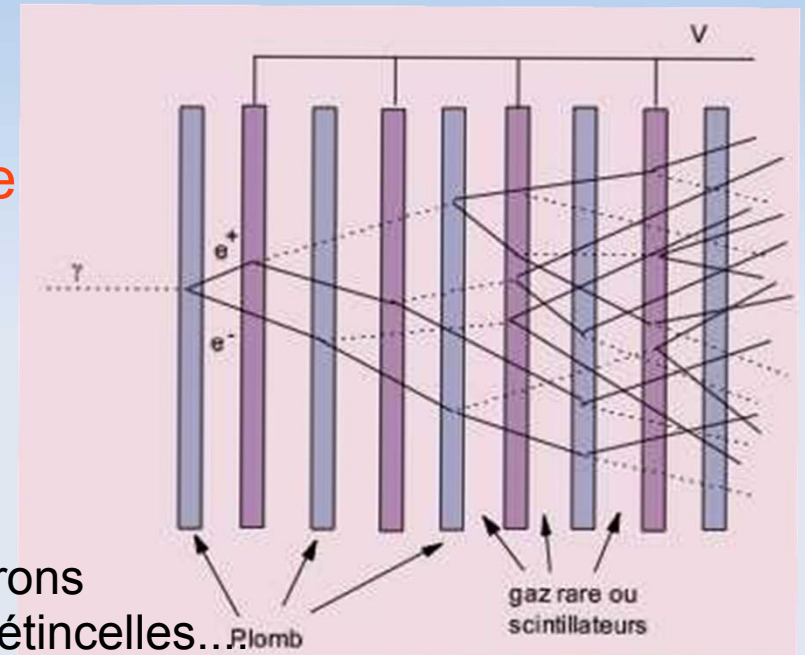
Nb Porteur d'information \propto Nb de Photons (visibles)
Indépendants

Nb d'électrons
Nb d'étincelles... Plomb

Processus stochastique:
(Poisson)

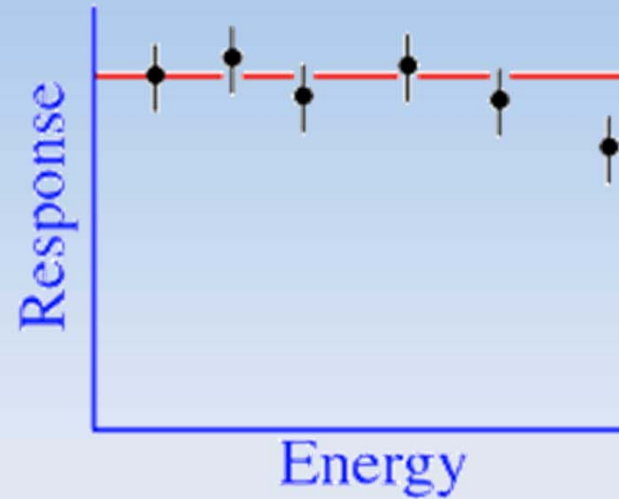
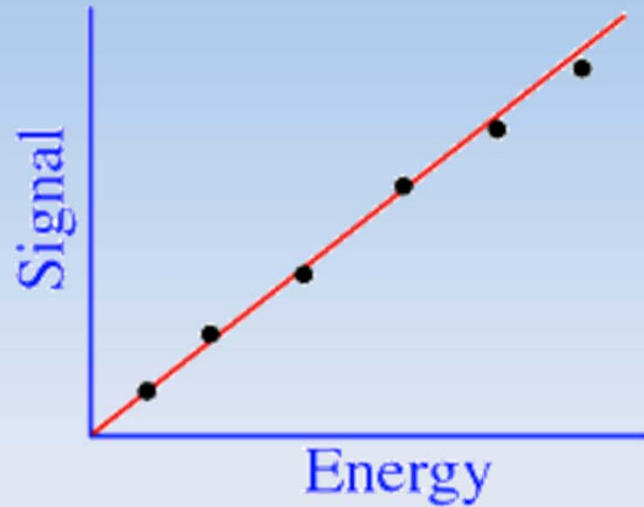
$$\delta N = \alpha \sqrt{N}$$

$$E \propto N \Rightarrow \frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}}$$



Également vrai pour les milieux
Homogènes

La linéarité



- En général OK pour EM
- Plus difficile pour l'Hadronique
 - ▶ facteur $e/h = f(f_{\tau 0}) = f(E)$
 - ▶ Leakage
 - ◆ Correction par les Monte-Carlo
 - Validités des modèles MC ?
 - ◆ Calibration par des tests
 - Pas des jets...

~10%

Mesure de la résolution

$$a \oplus b = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Termes:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \frac{\beta}{E} \oplus \gamma$$

α stochastique

β bruit

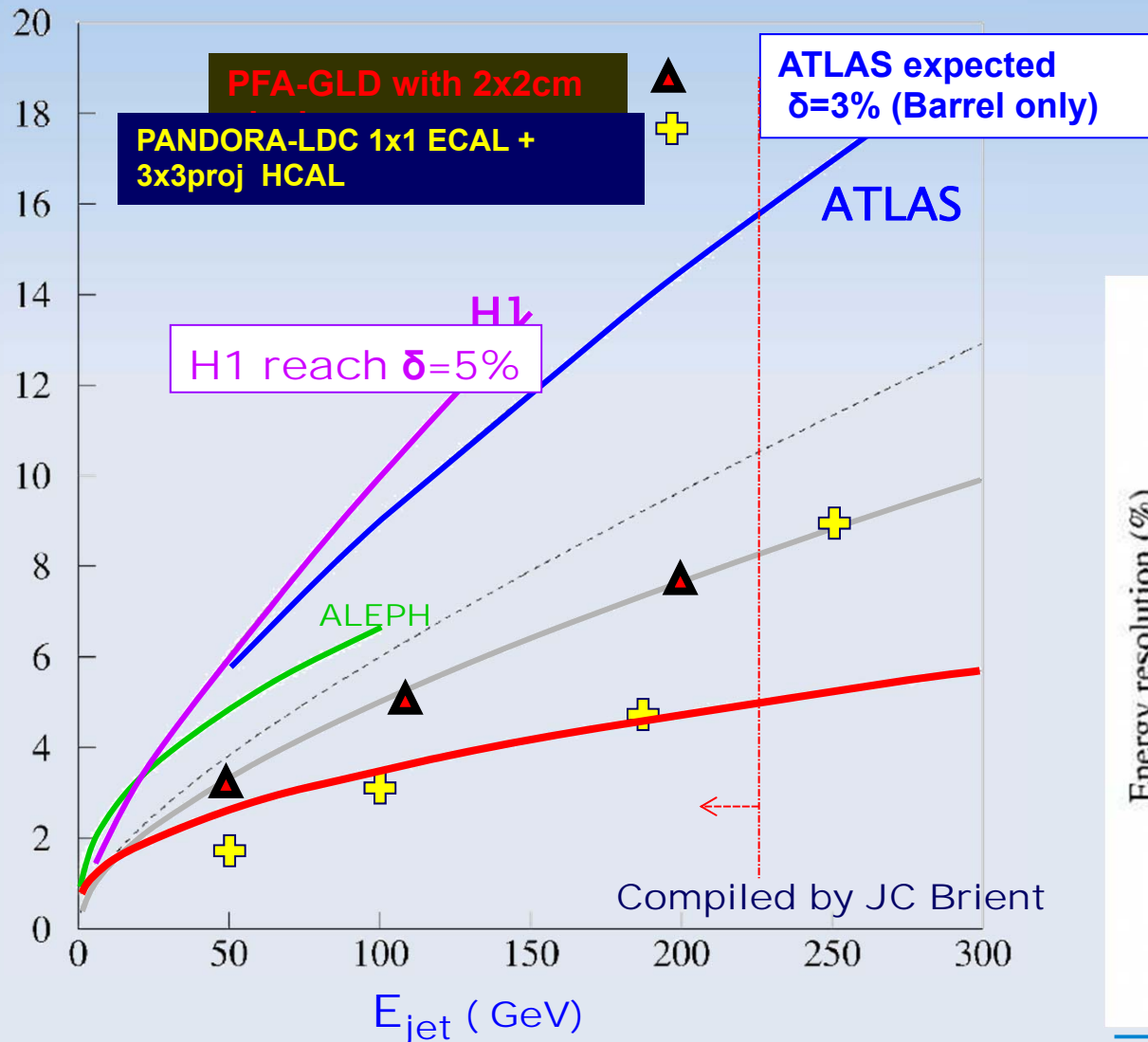
γ intercalibration
(inhomogénéité)

- Fuite : $\oplus \sigma_{\text{fuite}} \sim 4 f_{\text{fuite}}$
(corrigé mais pas les fluctuations)
- Fluctuations additionnelles due à la technologie
 - ▶ saturations, effet de charge d'espace...

$\sigma(E)/E$

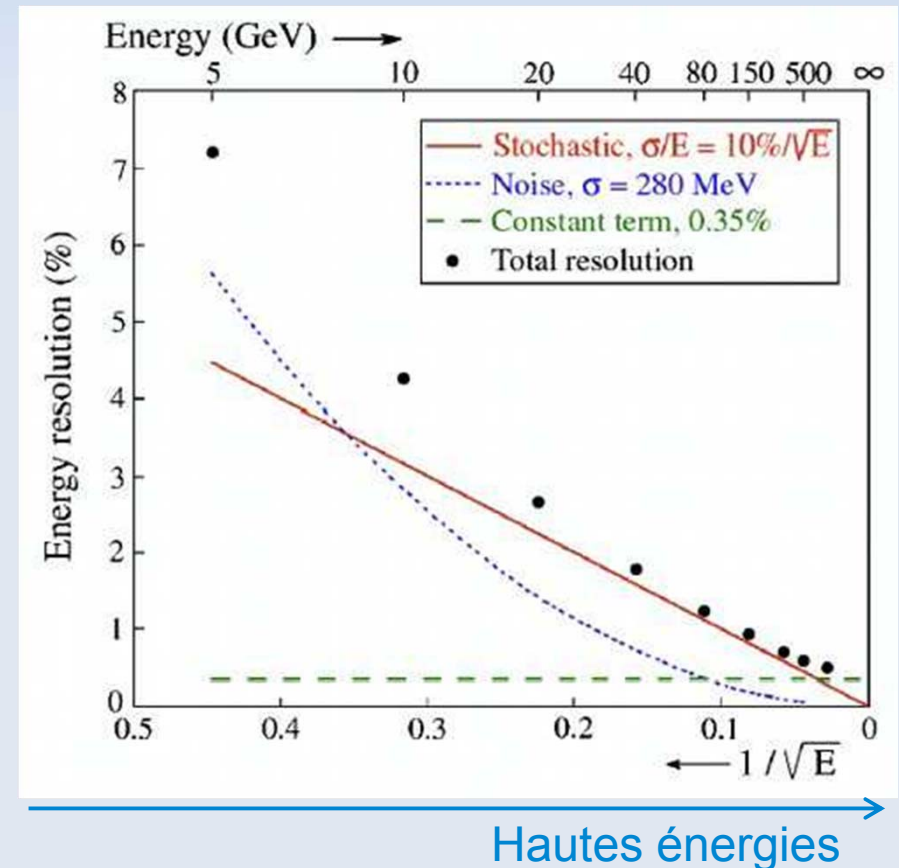
- **Electromagnétique**
- e, γ isolés
- **Hadronique**
- h isolés
- **Jets**
- Mélange : γ , h, e

Résolution : performance

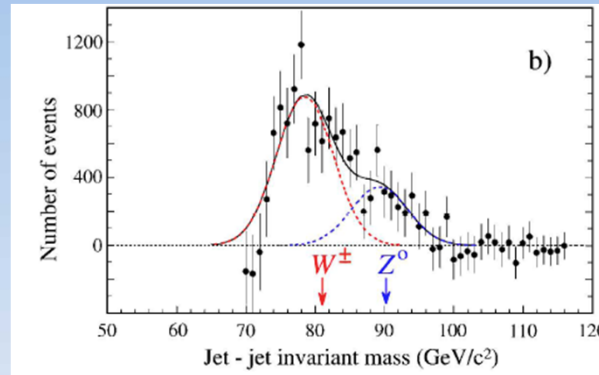
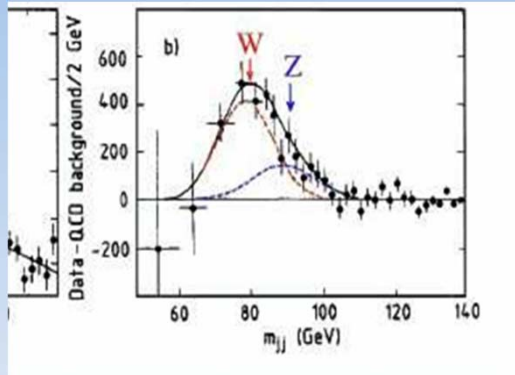


α :

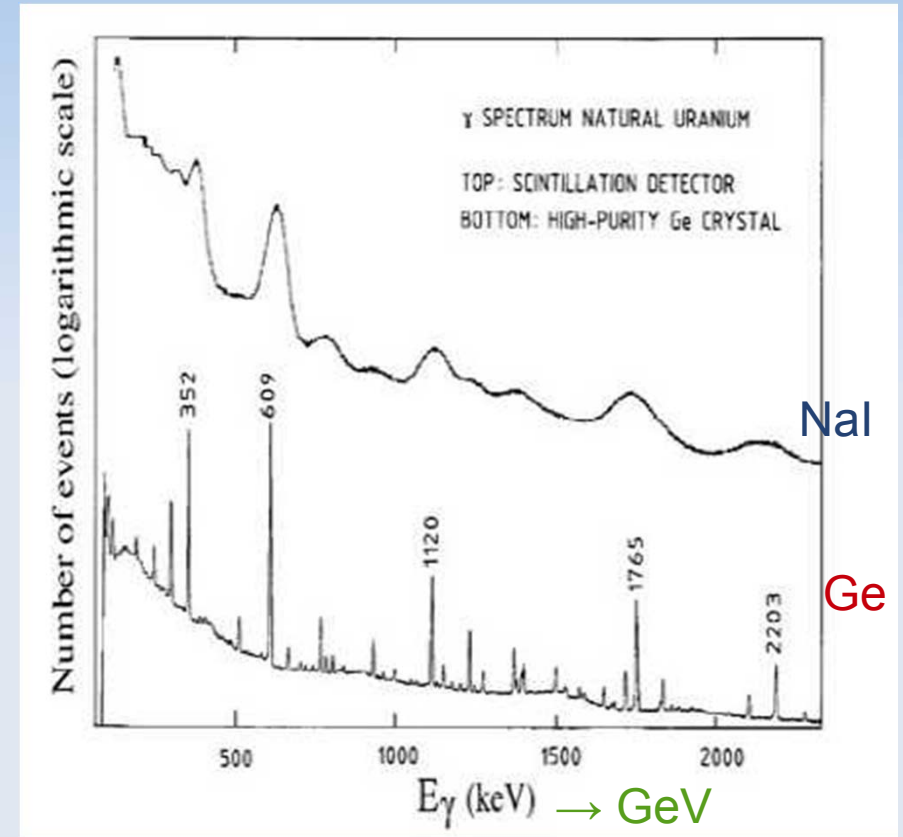
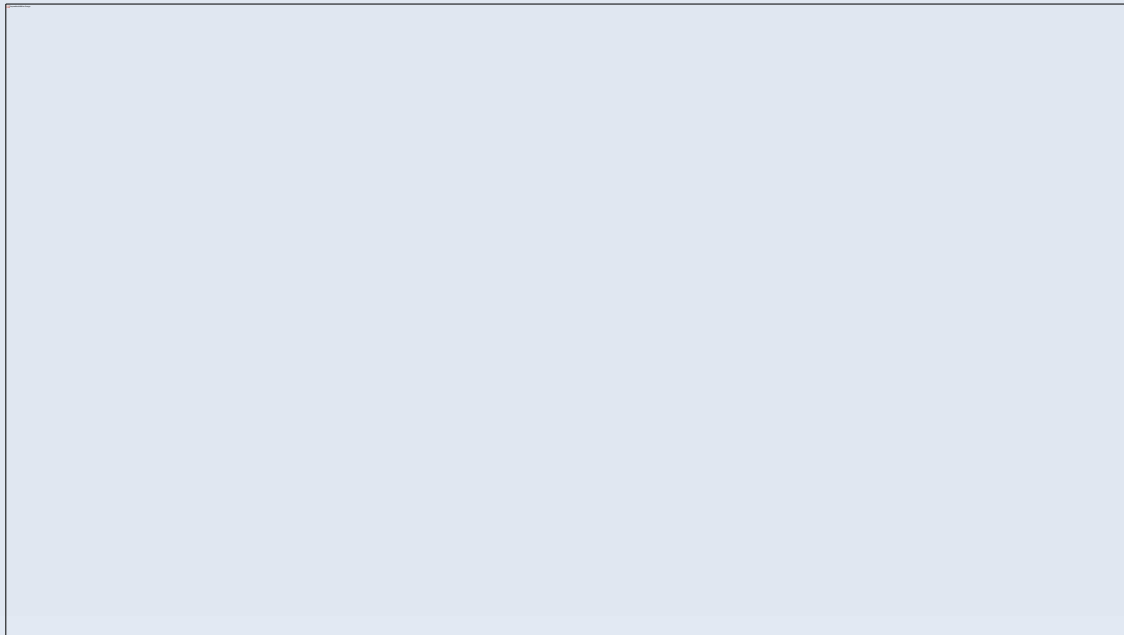
- EM : $\sim 3-20\% / \sqrt{E}$ (GeV)
- Had : $\sim 50\% / \sqrt{E}$ (GeV)
- $\delta \sim 5\%$ (mauvais) —



La résolution



Reconstruction de la masse des W & Z^0
 dans UA2(années 80-90), CDF (2000)
 Pour l'ILC (année 2019?) ↘

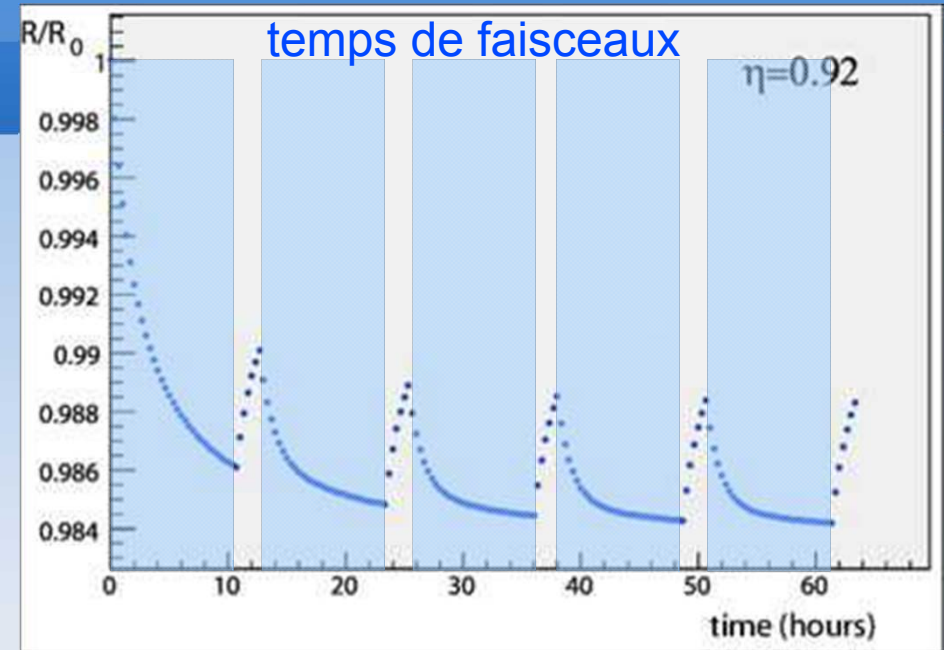


Spectre SUSY dans 5-20 ans ???

$\alpha \times 0.5 \Leftrightarrow$ Gain de 40% sur la \mathcal{L}

La calibration

- Non homogénéités dominantes à haute énergie
- instabilités en temps (radiation)
 - ▶ **Système de calibration**
 - ▶ **Très dépendant des techniques utilisées**
- Intercalibration
 - ▶ **En faisceaux-test avant montage + calibration**
 - ▶ **Par les cosmiques**
 - ▶ **Par les μ du faisceau**
 - ▶ **Par les processus physiques**
 - ◆ **Balance en E**
 - ◆ **$Z \rightarrow ee, \mu\mu, \pi$**



Réponse des cristaux de PbWO4 à la radiation

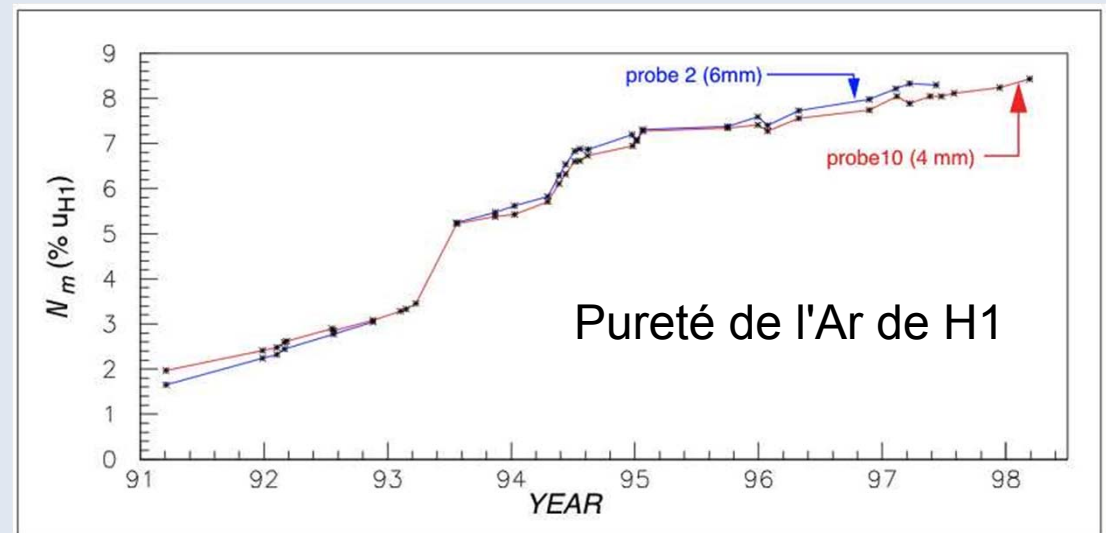


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

Mesures additionnelles d'importance

- Précision en temps
 - ▶ Sync des détecteurs
 - ◆ LHC : $\Delta t = 25 \text{ ns}$
 - ◆ HERA = 96ns ; ILC $\sim 400 \text{ ns}$;
 - ◆ BaBar $\sim 2.5\text{ns}$; CLIC $\sim 2.5\text{ns}$ \rightarrow limite du continu
 - ▶ Réjection du BdF
 - ▶ temps de vol (identification)
 - ▶ Composante neutronique
 - ▶ Physique «exotique»
- En position
 - ▶ Liens traces \leftrightarrow dépôts calorimétrique
 - ◆ \square Energy Flow & Particle Flow
- Angulaire
 - ▶ γ pointant vers le vertex, un jets, une particule exotique ?

Identification de particules

- Utile pour
 - ▶ Selection d'événements
 - ▶ meilleure estimation de l'énergie
- Séparations
 - ▶ EM vs Hadron
 - ◆ Forme des gerbes
 - Latérale / Longitudinale
 - $f_{EM} = E_{Ecal} / (E_{Ecal} + E_{hcal})$
 - densité d'énergie
 - ◆ limite ($\sim 10^{-4}$) : processus hadroniques
 - $\gamma \rightarrow \mu\mu, \pi\pi$
 - $\pi^+ + n \rightarrow \pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma) + p$
 - ▶ γ simple vs π^0
 - ◆ 2 gerbes EM très proches...
 - ▶ μ vs π / hadrons
 - ▶ Jets vs τ

Particle ID with a very simple Preshower Detector

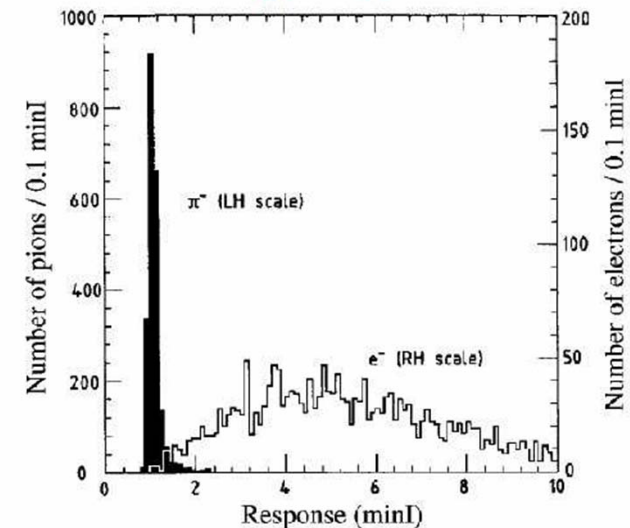


FIG. 7.35. Signal distributions for 75 GeV pions and electrons in a preshower detector used in beam tests of CDF calorimeters.

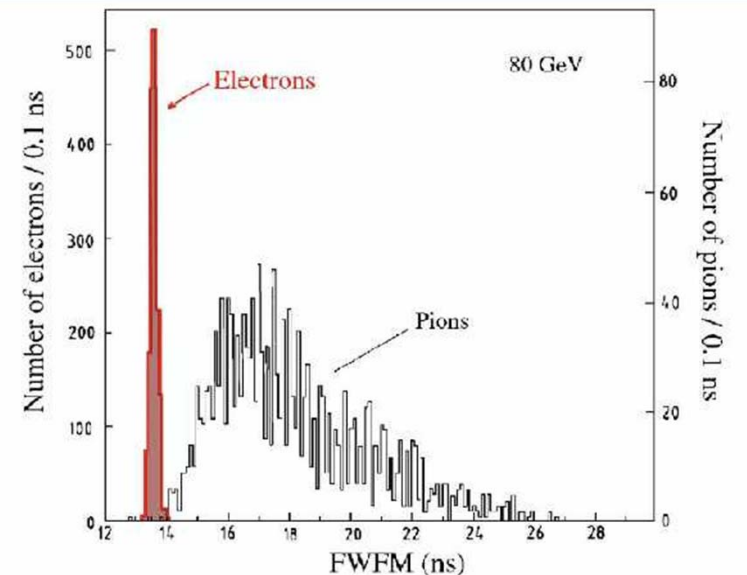
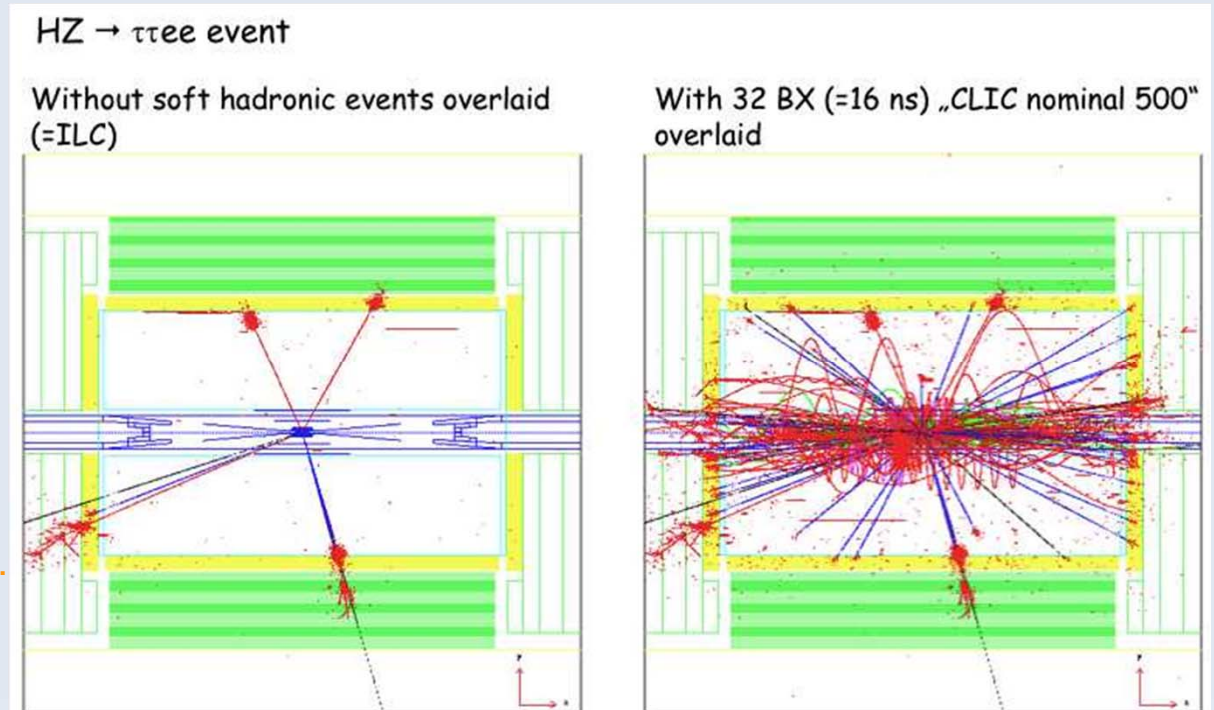
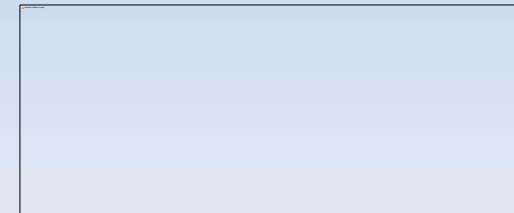
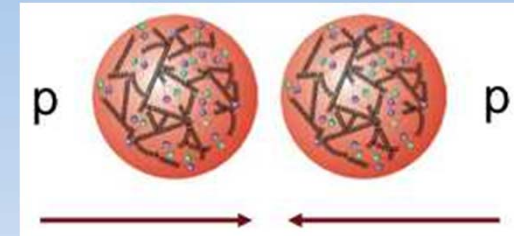


FIG. 7.33. The distribution of the full width at one-fifth maximum (FWFM) for 80 GeV electron and pion signals in SPACAL [Aco 91a].

Lecture des données

- Acquisition
 - ▶ **Déclenchement**
 - ◆ lecture de 1er niveau
 - Sommes partielles
 - ◆ lecture complète
 - Calculs de niveau 2...n
 - rejet
 - ◆ Écriture
 - ▶ **Sans trigger**
- Taux d'occupation
 - ▶ **Physique**
 - ▶ **Technologie machine**
 - ◆ LHC : pp @ 25 ns
 - ◆ ILC : ee @ 400 ns & 5Hz
 - ◆ CLIC : ee @ 2.5 ns & 50 Hz..
- Temps de lecture...



Choix des outils :

Les senseurs

Différents types de calorimètres

Homogènes

**hétérogènes ou
"à échantillonnage"**

mesure par

collection de lumière

collection d'électrons (trous)

Čerenkov

Scintillation

Ionisation

création de
paires e⁻-trous



Cristaux NaI, CsI, BGO, PbWO₄

Gaz nobles (liq)

Gaz

Gaz nobles (liq)

Verre au plomb

Eau

Air

Ge

Si

Calorimètres à échantillonnage

(sampling)

Radiateurs

pour l'électromagnétique (Z élevé):

Plomb Pb, Uranium U, Tungstène W

attention aux propriétés physiques mais aussi mécaniques !

pour l'hadronique (bon marché, bon mécaniquement)

fer (retour de champ),

inox (dans un champ), cuivre
plomb, tungstène, uranium? $e/h \sim 1$

l'énergie hadronique échappe
sous forme de fission de noyaux,
neutrons de basse énergie

délais...

Détecteurs similaires pour les deux:

scintillateurs,

lumière Cerenkov,

chambres à ionisation, argon liquide, liquides chauds,

chambres à gaz en différents modes (prop, streamer)

détecteurs silicium.

Fraction d'échantillonnage

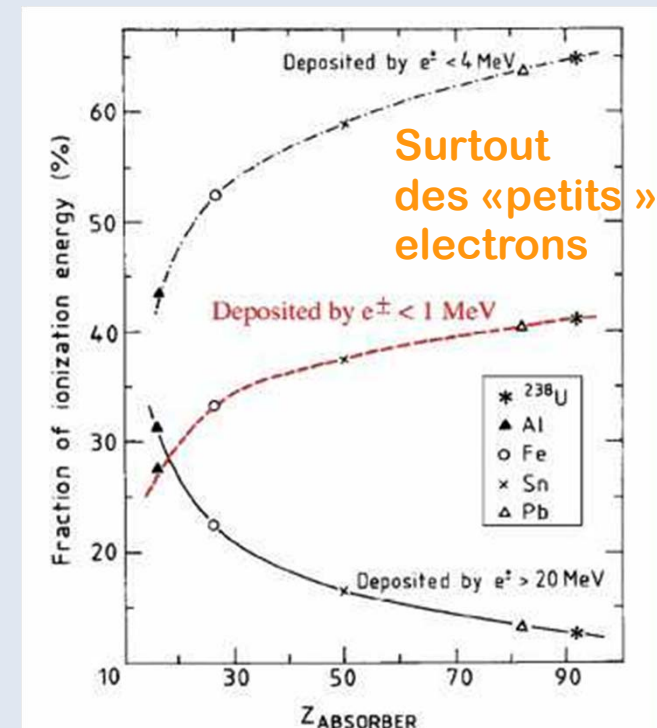
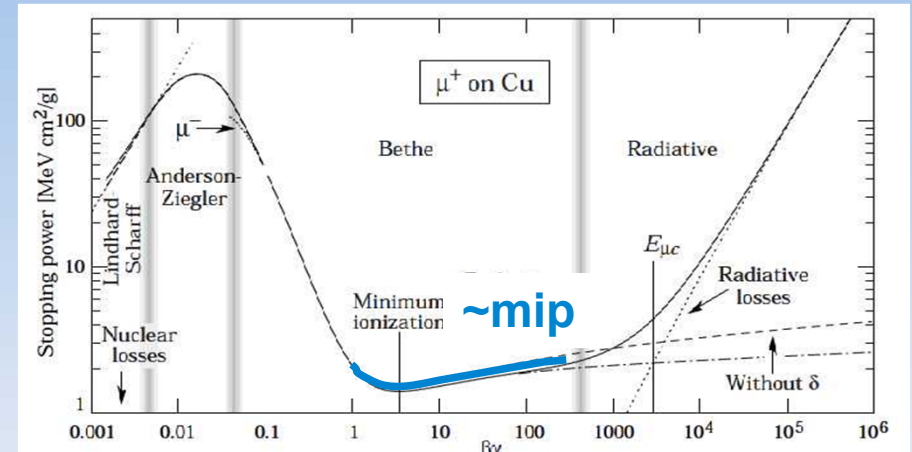
- Développement de gerbe → radiateur (dense)
- **mips** dans les senseurs («légers»)

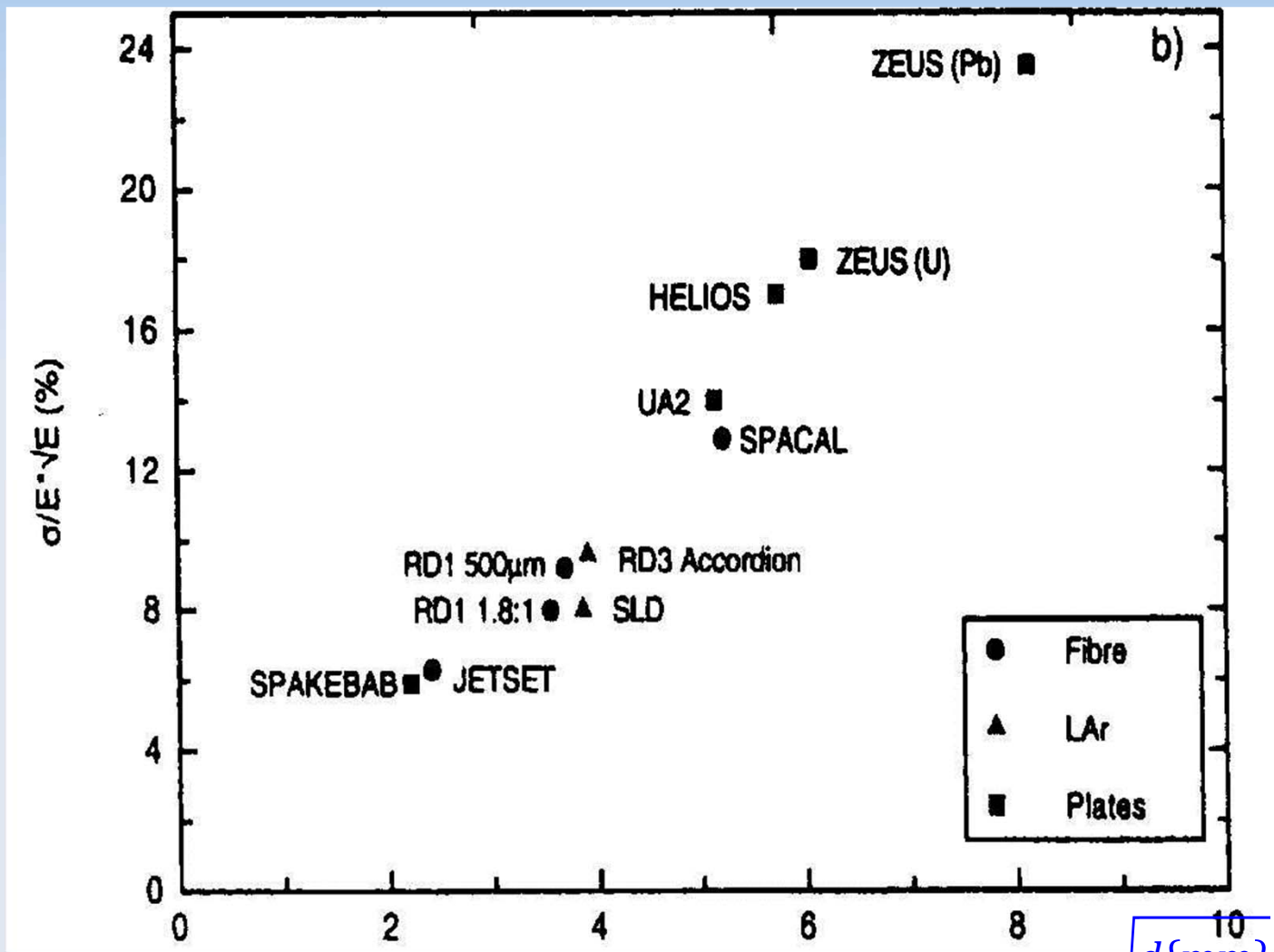
$$f_{\text{échant.}} = \frac{(dE/dx)_{\text{mip}}(\text{senseur})}{(dE/dx)_{\text{mip}}(\text{total})}$$

$$\Rightarrow \frac{e}{\mu}$$

- Calorimètres homogènes : $e/\mu = 1$
- Calorimètre à échantillonnage : $e/\mu < 1$ (ou $\ll 1$)
 - ▶ **petits photons absorbés** : $\sigma_{\text{p.e.}} \propto Z^4$
 - ▶ **Emission de X par les grands Z**

$$\frac{\delta E_{\text{échant.}}}{E} = \frac{\alpha_{\text{homog.}} \sim 2.7\%}{\sqrt{E}} \times \sqrt{\frac{d\{\text{mm}\}}{f_{\text{échant.}}}}$$

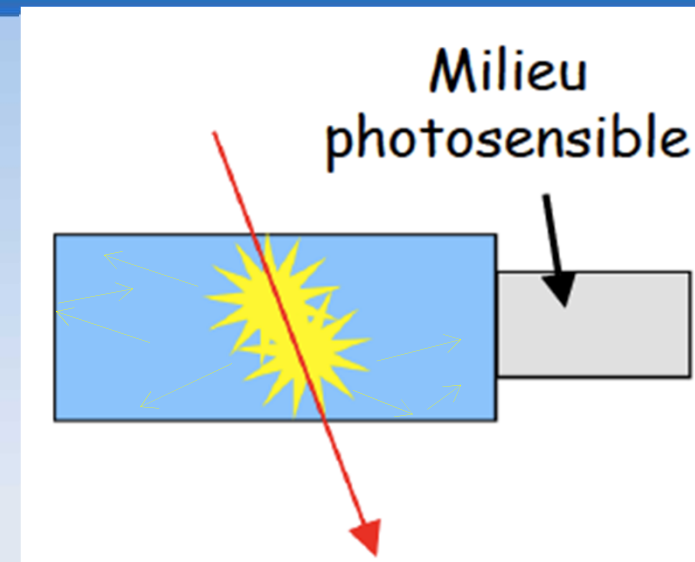




$$\sqrt{\frac{d\{\text{mm}\}}{f_{\text{échant.}}}}$$

Scintillateurs

- Conversion d'une partie de l'ionisation en lumière
 - ▶ fluorescence = émission immédiate
 - ▶ phosphorescence = émission retardé
- Avantages :
 - ▶ ⊕ peu de bruit (lumière)
 - ▶ ⊖ nécessite une conversion lumière → élect.
- 2 Types
 - ▶ organique
 - ◆ peu chers
 - ◆ légers, peu sensibles aux γ
 - échantillonnage
 - ◆ flexibles (solide / liquide, fibres, ...)
 - ◆ rapides (~ 0.1 ns)
 - ◆ sensibles aux n (\Rightarrow H)
 - ◆ Sensibilité aux radiations.
 - Récupération à l'Oxygène



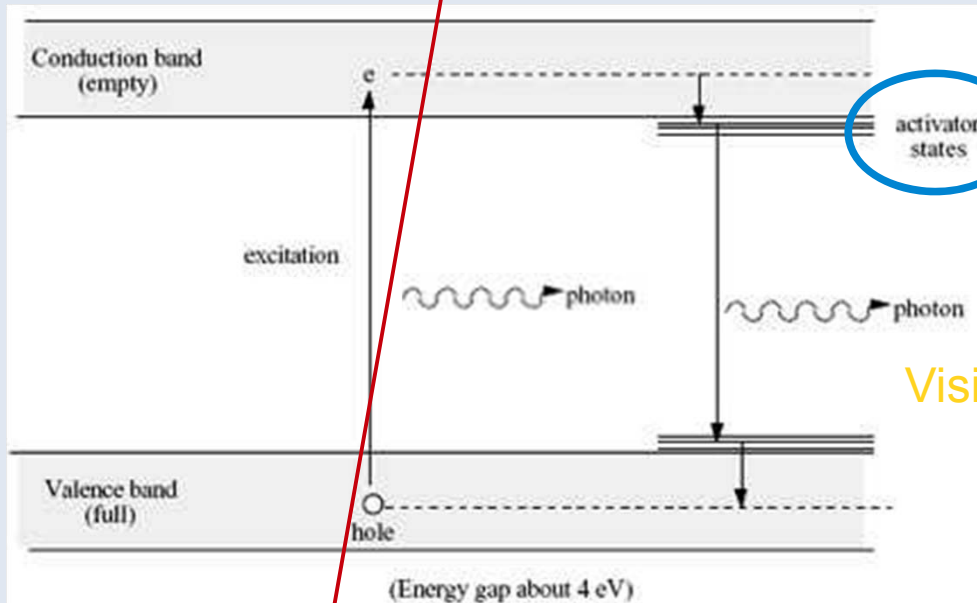
- ▶ in-organique
 - ◆ chers
 - ◆ denses, bon rendement
 - homogène, pas de segmentation
 - ◆ Fragile, hygroscopique
 - Sensibilité envir (t° , rad)
 - ◆ généralement lents
 - ◆ Ex : NaI(Tl), CsI, $PbWO_4$

Mécanismes de scintillation

- Organique :
 - Chaîne complexes & rapide molécule → molécules.

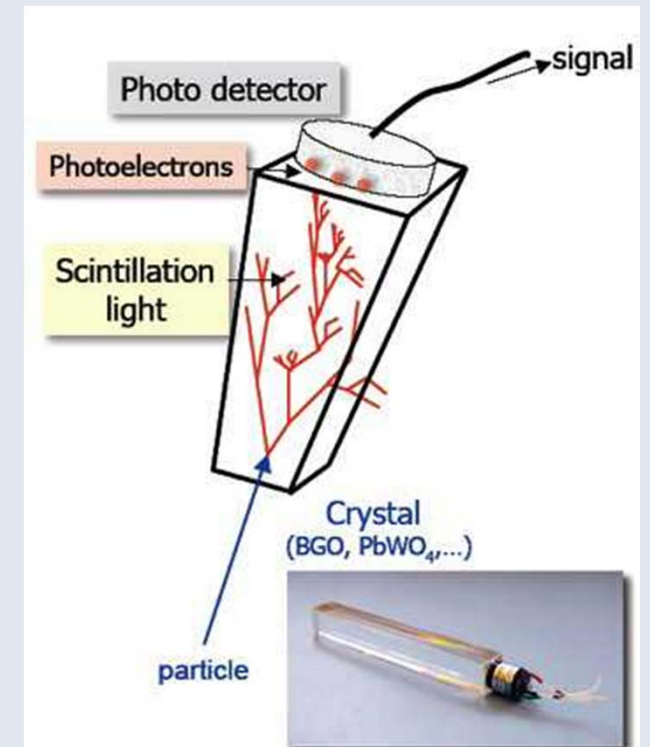
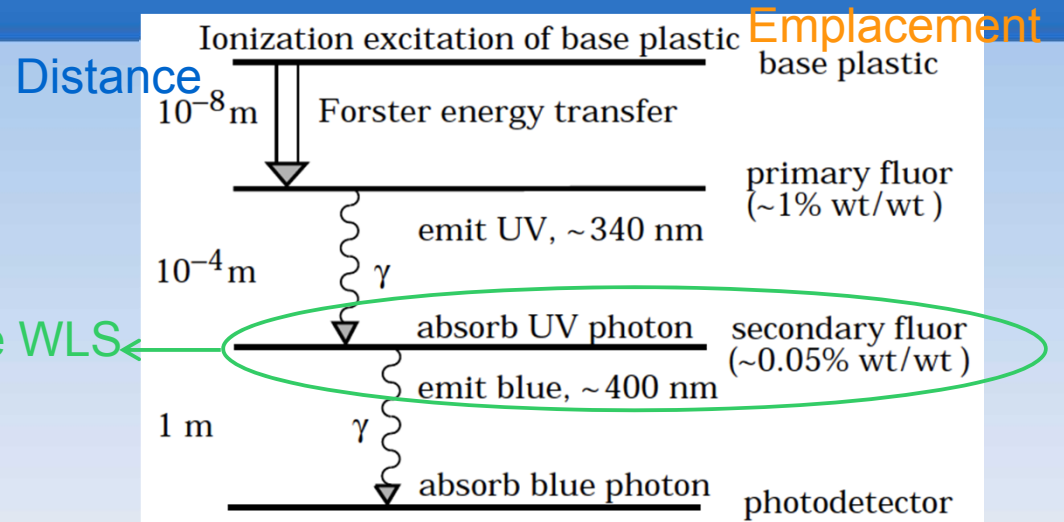
Parfois : Fibre WLS
 $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$

- Inorganique :



dopant ou défauts ou impureté

Visible / UV



Quelques scintillateur inorganiques

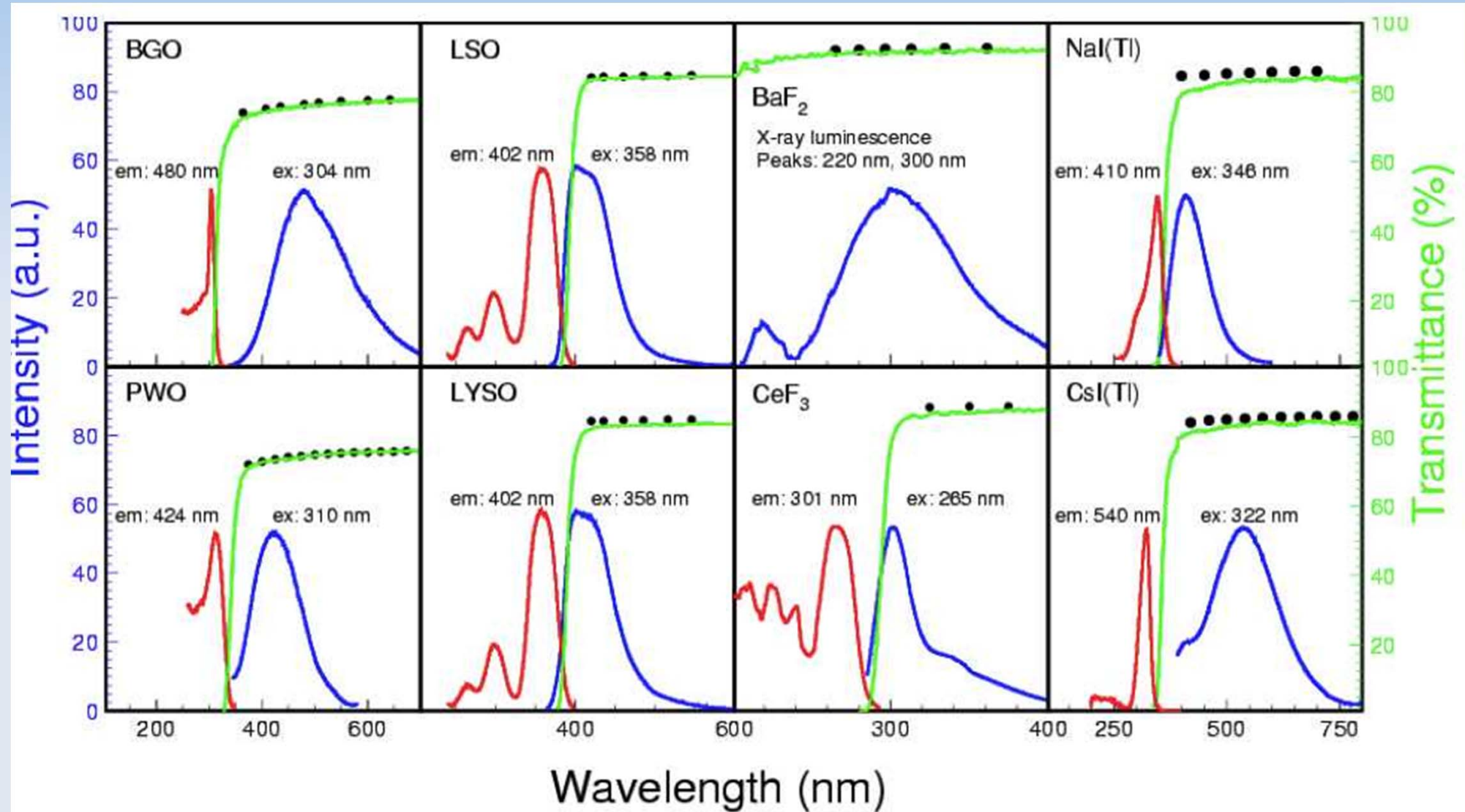
Crystal	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	BGO	PWO(Y)	LSO(Ce)	GSO(Ce)
Density (g/cm ³)	3.67	4.51	4.51	4.89	7.13	8.3	7.40	6.71
Melting Point (°C)	651	621	621	1280	1050	1123	2050	1950
Radiation Length (cm)	2.59	1.86	1.86	2.03	1.12	0.89	1.14	1.38
Molière Radius (cm)	4.13	3.57	3.57	3.10	2.23	2.00	2.07	2.23
Interaction Length (cm)	42.9	39.3	39.3	30.7	22.8	20.7	20.9	22.2
Refractive Index ^a	1.85	1.79	1.95	1.50	2.15	2.20	1.82	1.85
Hygroscopicity	Yes	Slight	Slight	No	No	No	No	No
Luminescence ^b (nm) (at peak)	410	550	420 310	300 220	480	425 420	402	440
Decay Time ^b (ns)	230	1250	30 6	630 0.9	300	30 6	40	60
Light Yield ^{b,c} (%)	100	165	3.6 1.1	36 3.4	21	0.29 .083	83	30
d(LY)/dT ^b (%/ °C)	~0	0.3	-0.6	-2 ~0	-1.6	-1.9	~0	-0.1
Experiment	Crystal Ball	CLEO BaBar BELLE BES III	KTeV	TAPS (L*) (GEM)	L3 BELLE PANDA?	CMS ALICE PrimEx PANDA?	-	-

a. at peak of emission; b. up/low row: slow/fast component; c. PMT QE taken out.

Prix ← Compacité
 ←
 Č + optique
 Mécanique
 Optique
 σ(t) + DAQ
 σ(E)
 Stabilité

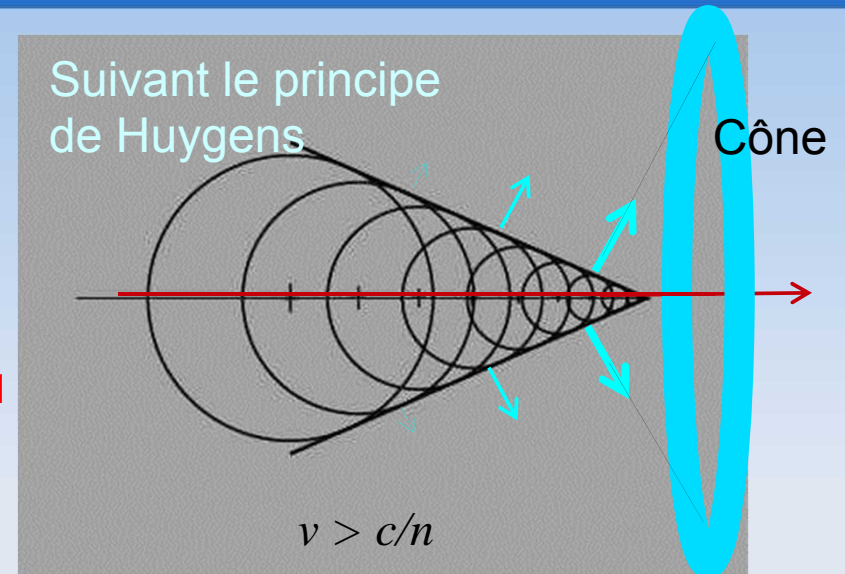
R.-Y. Zhu

Lumière des scintillateurs



Čerenkov

- Types
 - ▶ Crystaux : indice > 1,5
 - ▶ Verre au Plomb
- fibres à quartz («Fused silica»)
 - ▶ Exemple Luminomètre de H1, FCAL de CMS, DREAM
- Sensibilité
- RadHard

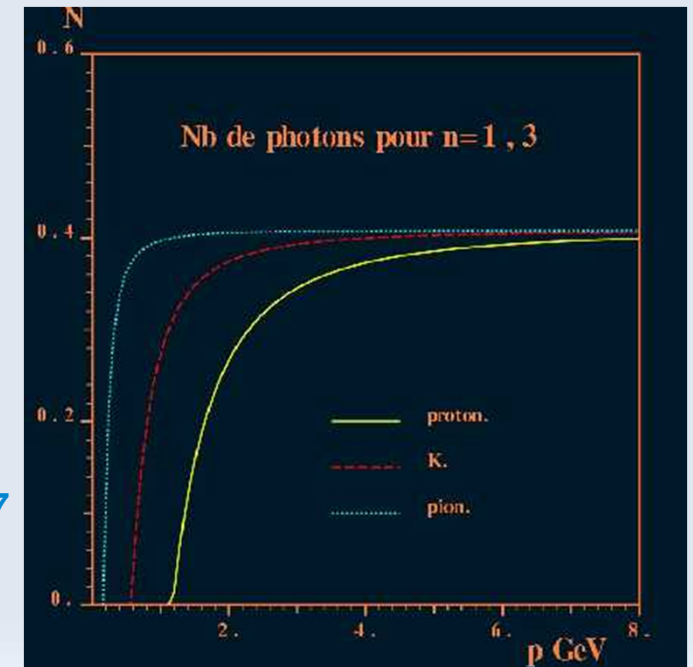


$$\cos\theta_\gamma = \frac{1}{n\beta} + \frac{n^2 - 1}{2n\beta} \frac{E_\gamma}{E_1} \text{ si } \frac{1}{n} < \beta$$

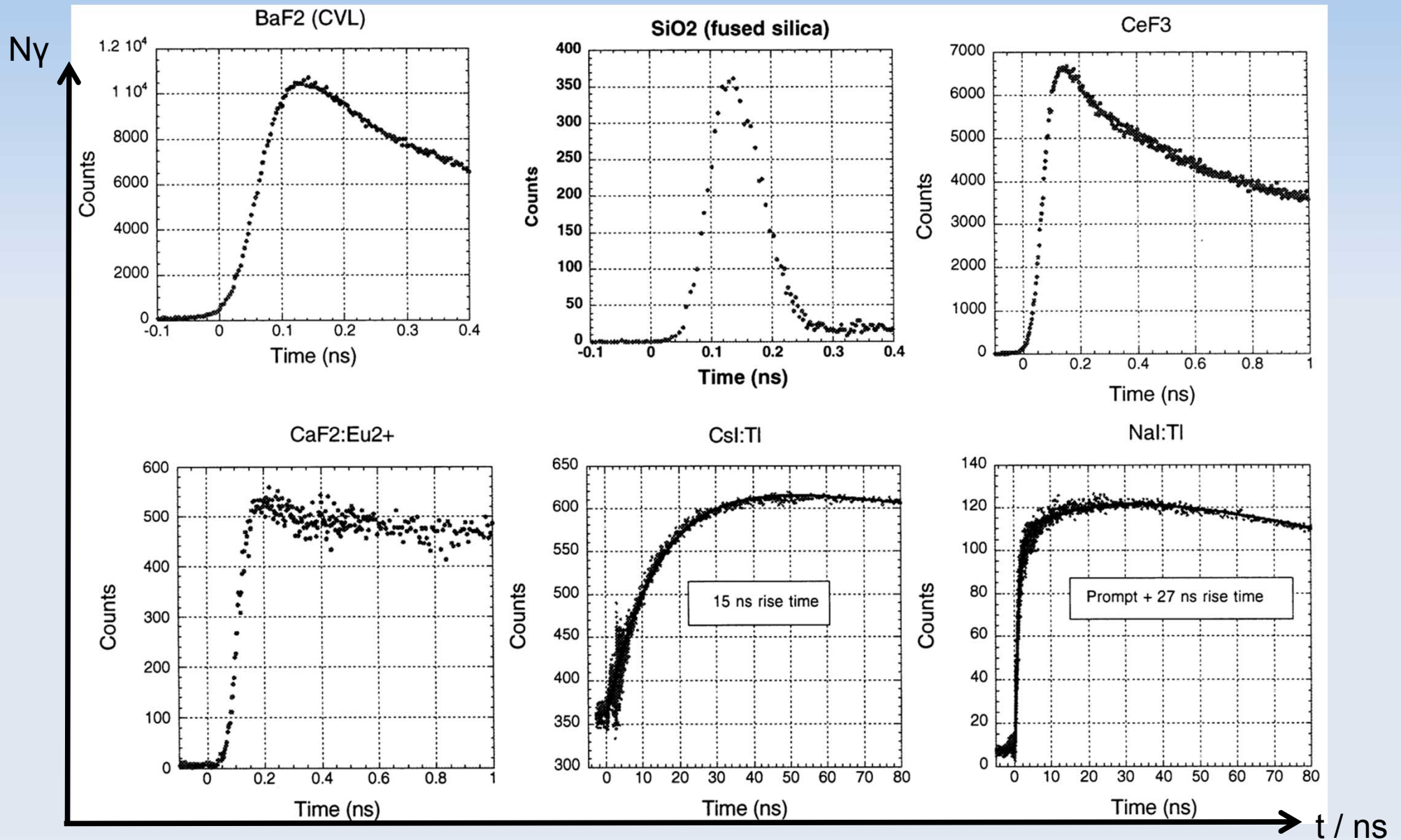
$$N_\gamma : \frac{d^2N}{dx dE_\gamma} = \frac{\alpha}{\hbar c} \sin^2\theta_\gamma$$

Remarques: résolution en temps, polarisation linéaire

Exemple : $dx=1\text{cm} = 5 \cdot 10^4 \text{ eV}^{-1}$, $dE = 0,02 \text{ eV} \Rightarrow dN \sim 7$



Courbes de lumière



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

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

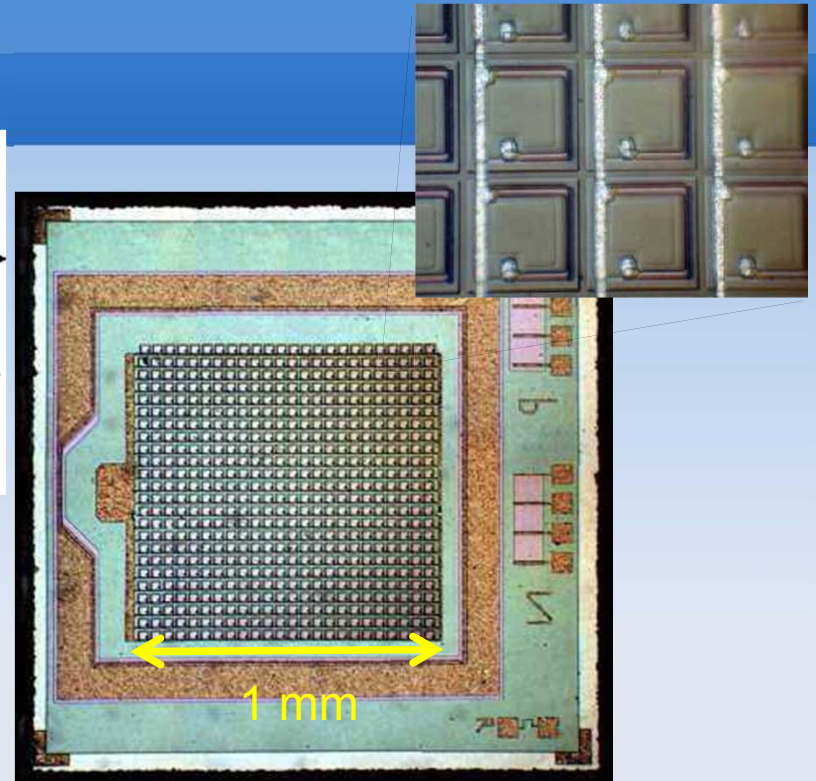
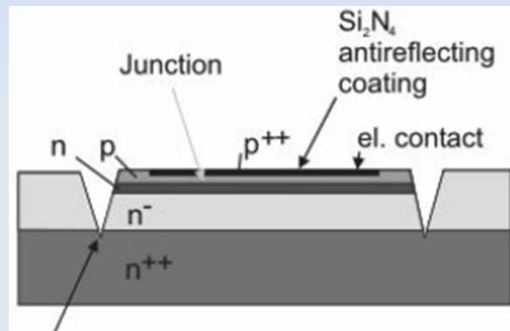
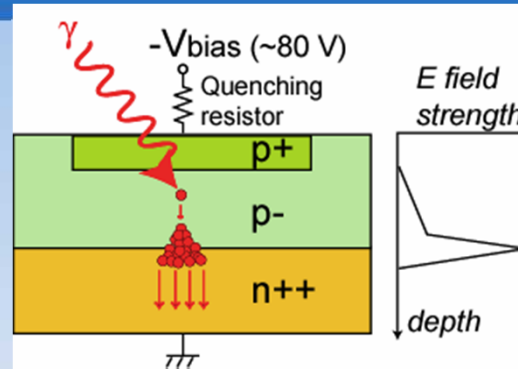
$$\sigma / E \sim (10 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Isabelle Wingerter-Seez

Photo-detecteurs

Amplifications

- ▶ Photo-Multiplicateurs
 - ◆ simples
 - ◆ multi-anode
- ▶ Hybride Photo-Diodes (HPD)
 - ◆ PIN diode + HT
- ▶ Avalanche PD
 - ◆ CMS ECAL
- ▶ Pixelized Photo-Detectors (SiPM / MPPC)



Gain 1

- ▶ pour complétion (pas dans les calos)
 - ◆ ex CNAO, systèmes de calibrations

Efficacité quantique
Surface
Gain
Linarité
Bruit

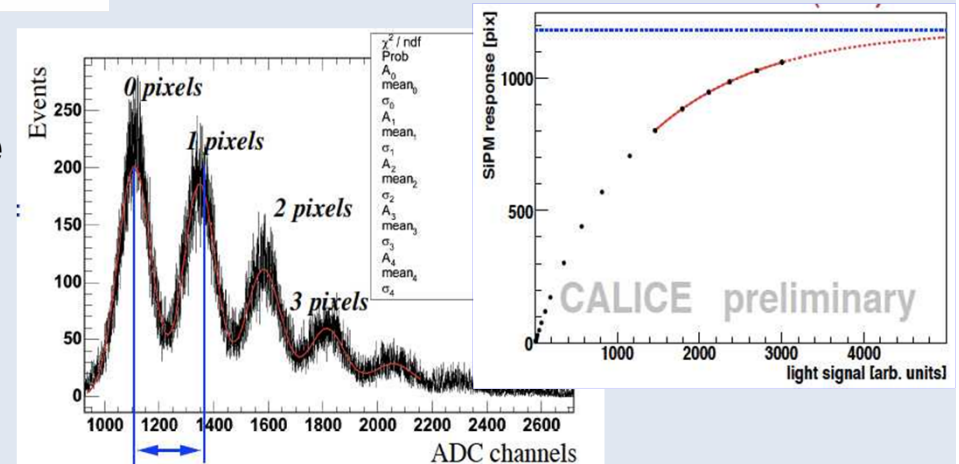


Photo-detecteurs

100nm $<\lambda < 1000$ nm UV \rightarrow IR

Type	λ (nm)	$\epsilon_Q \epsilon_C$	Gain	Risetime (ns)	Area (mm ²)	1-p.e noise (Hz)	HV (V)	Price (USD)
PMT*	115–1700	0.15–0.25	10^3 – 10^7	0.7–10	10^2 – 10^5	10 – 10^4	500–3000	100–5000
MCP*	100–650	0.01–0.10	10^3 – 10^7	0.15–0.3	10^2 – 10^4	0.1–200	500–3500	10–6000
HPD*	115–850	0.1–0.3	10^3 – 10^4	7	10^2 – 10^5	10 – 10^3	$\sim 2 \times 10^4$	~ 600
GPM*	115–500	0.15–0.3	10^3 – 10^6	$O(0.1)$	$O(10)$	10 – 10^3	300–2000	$O(10)$
APD	300–1700	~ 0.7	10 – 10^8	$O(1)$	10 – 10^3	1 – 10^3	400–1400	$O(100)$
PPD	320–900	0.15–0.3	10^5 – 10^6	~ 1	1–10	$O(10^6)$	30–60	$O(100)$
VLPC	500–600	~ 0.9	$\sim 5 \times 10^4$	~ 10	1	$O(10^4)$	~ 7	~ 1

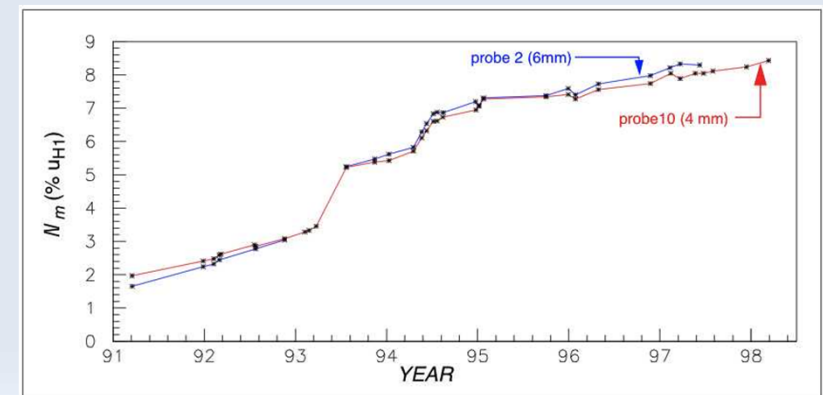
PMT = Photo-multiplicateur ; MCP = Micro Channel Plate; HPD = Hybrid Photo-Diode ;
 GPM = Gas Photon-Detector;
 APD = Avalanche Photo-Diodes ; PPD = SiPM = Pixelized Photon Detector;
 VLPC = Visible Light Photon Counters

Gaz nobles liquéfiés

- Ar, Kr, Xe
- Signal :
 - ▶ ionisation + scintillation (recombinaison)
 - ◆ W_{e-h} élevé mais bruit ↘
 - ▶ Excellente résolution
 - ◆ $5\%/\sqrt{E}$ pour NA48
- ⊕ homogénéité
- Système cryogénique (→ Mat. morts)
- ⊖ contamination inéductable (O)
- Exemple H1, Atlas, D0, NA48
 - ▶ Projets : Chambres larges biphasé
→ «CaloTPC» + Amplification gazeuse
(André Rubbia)

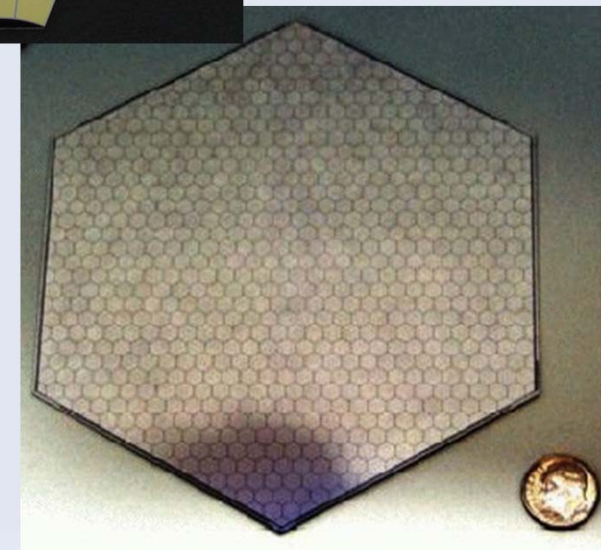
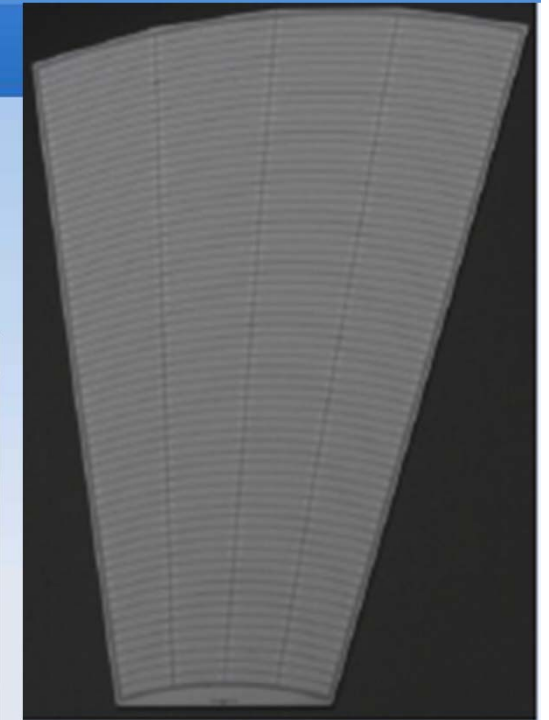
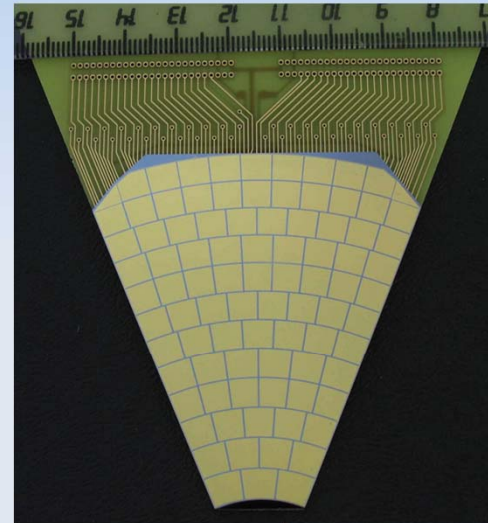
	Ar	Kr	Xe
Z	18	36	58
A	40	84	131
X_0 (cm)	14	4.7	2.77
E_C (Mev)	41.7	21.5	14.5
R_M (cm)	7.2	4.7	4.2
W (eV/pair)	23.3	20.5	15.6
v drift (mm/ μ s)	10	5	3

→ Prix & rareté

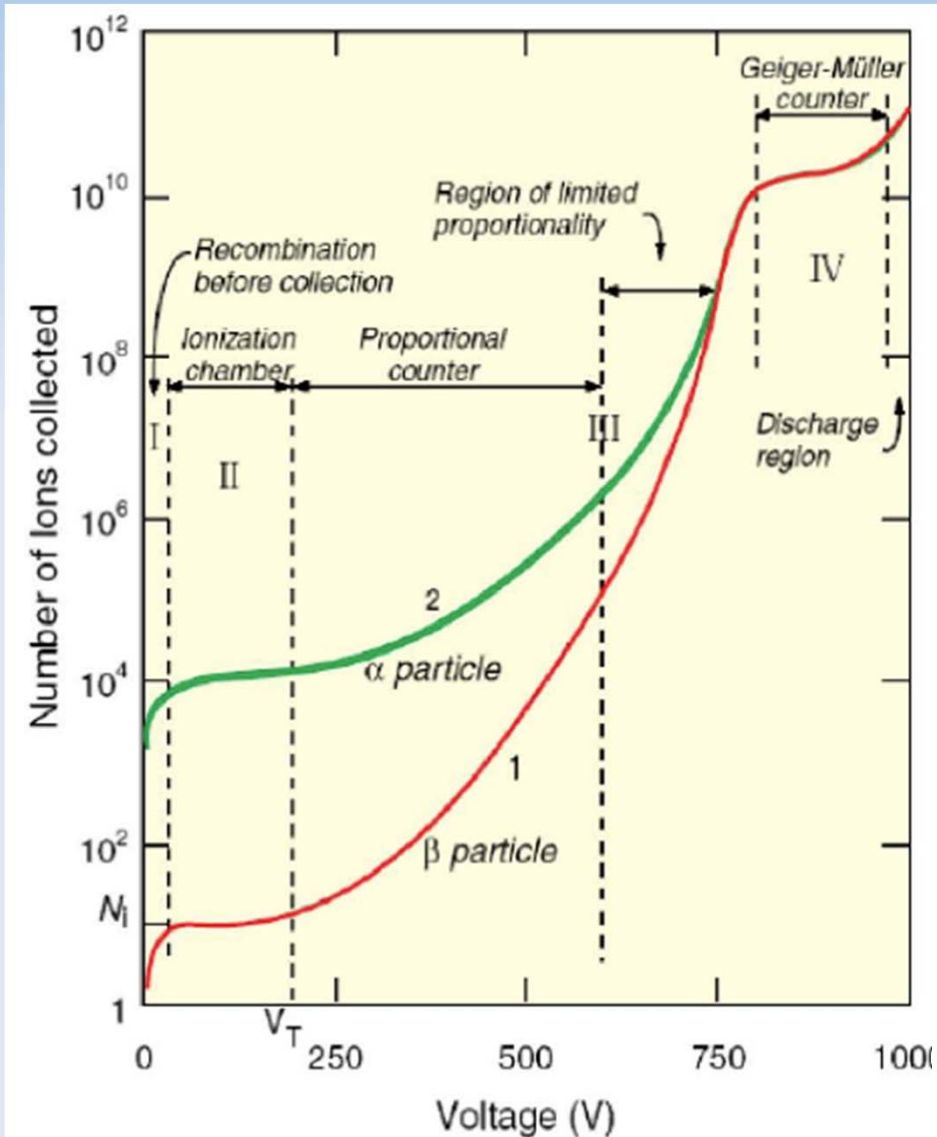


Semi-Conducteurs

- Collection directe de charge
 - ▶ **Besoin d'1 électronique d'amplification**
- sous un potentiel élevé (qq 100 V)
 - ▶ **Silicium de haute résistance**
 - ▶ **Germanium**
 - ▶ **Diamant**
- ⊕ Très bon rendement
 - ▶ $W_{e-h} \sim \text{qq eV}$
 - ▶ **facteur de Fano \rightarrow meilleur que $1/\sqrt{N}$**
 - ▶ **Stabilité, sensibilité au mip**
- ⊖ Prix



Détecteurs Gazeux : amplicification



- Forts gains : $10^6 - 10^7$
- Temps de récupération

- ▶ (~ 1/ Gain)
- ▶ Peut-être local

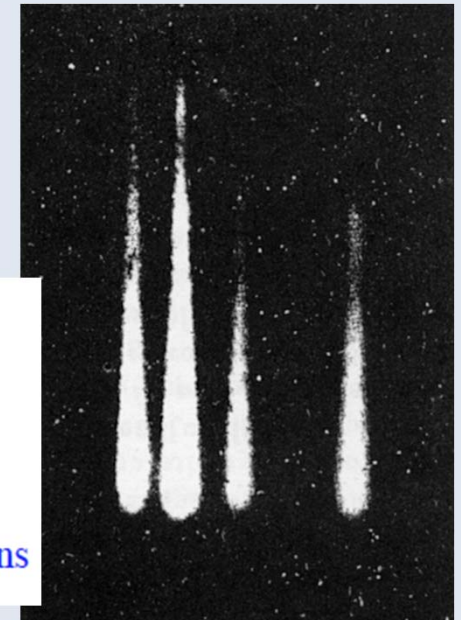
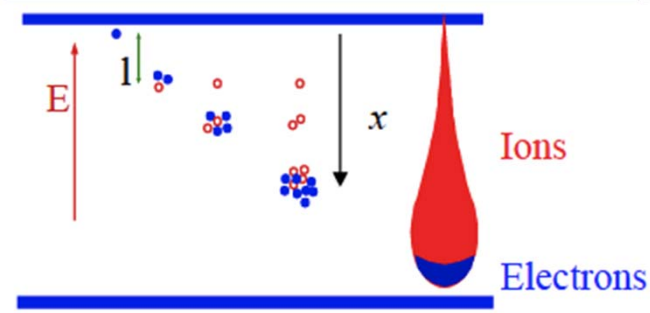
- Géométrie

- ▶ **Cylindrique : Gieger**

- ◆ Champ en $1/r$
- ◆ \varnothing qq $10 \mu\text{m}$

- ▶ **Plane**

- ◆ Champ constant
- ◆ plusieurs zone



Détecteurs gazeux



□ Tubes (Proportionnels, Geiger)

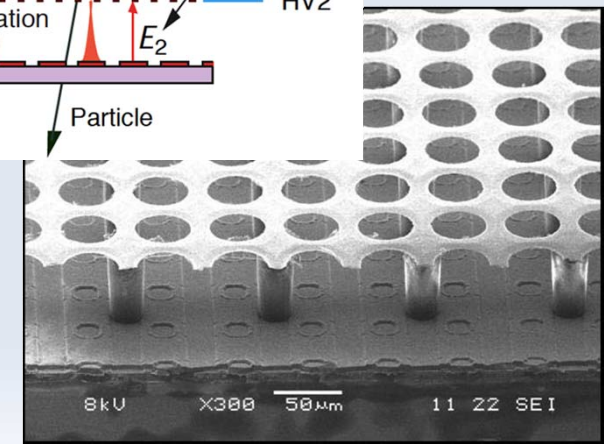
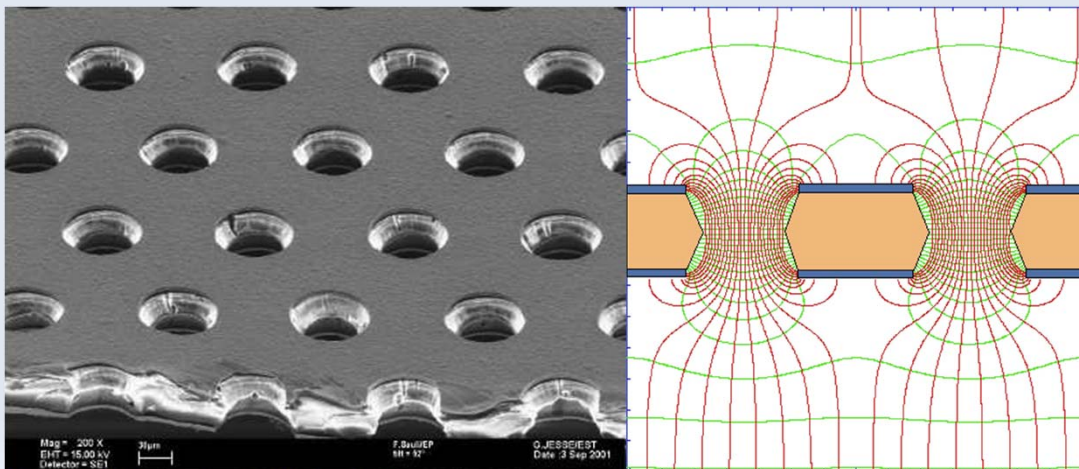
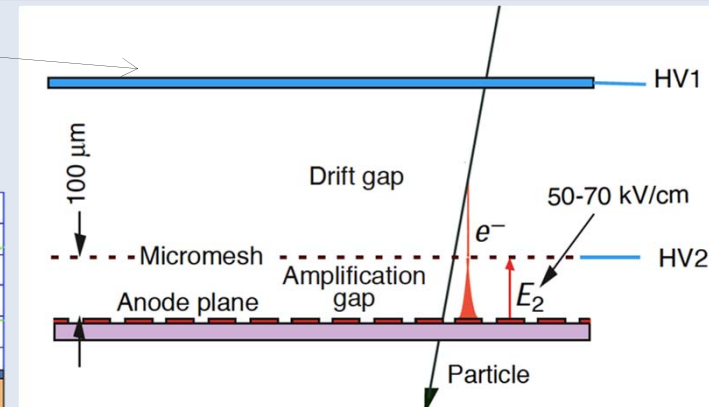
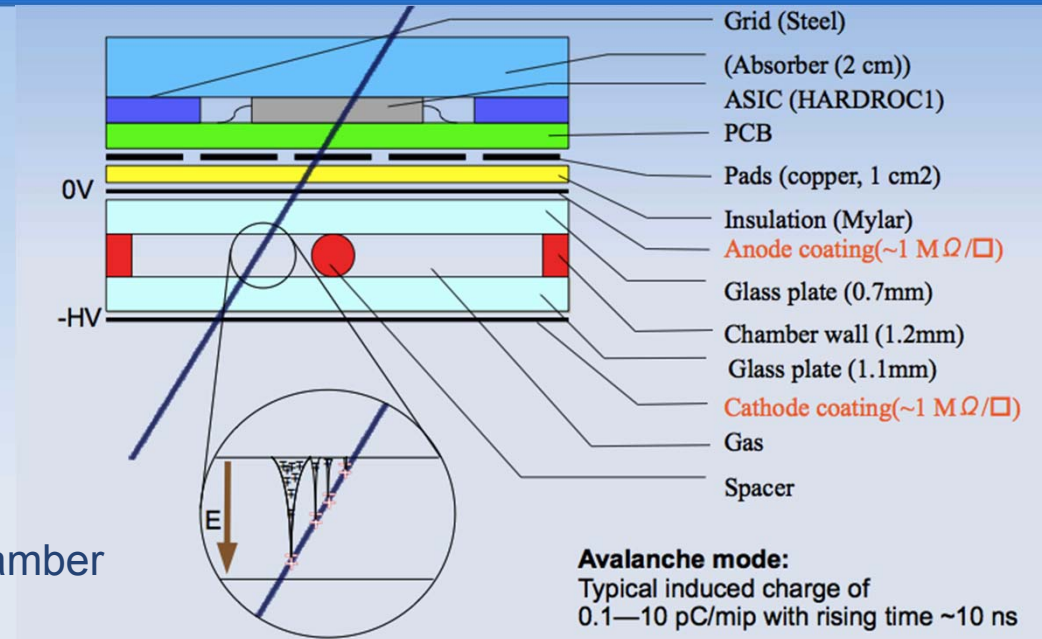
▶ Aleph, Muons Atlas

□ (Glass) Resistive Plate Chamber

▶ Muons CMS

□ μ Megas

□ GEMs

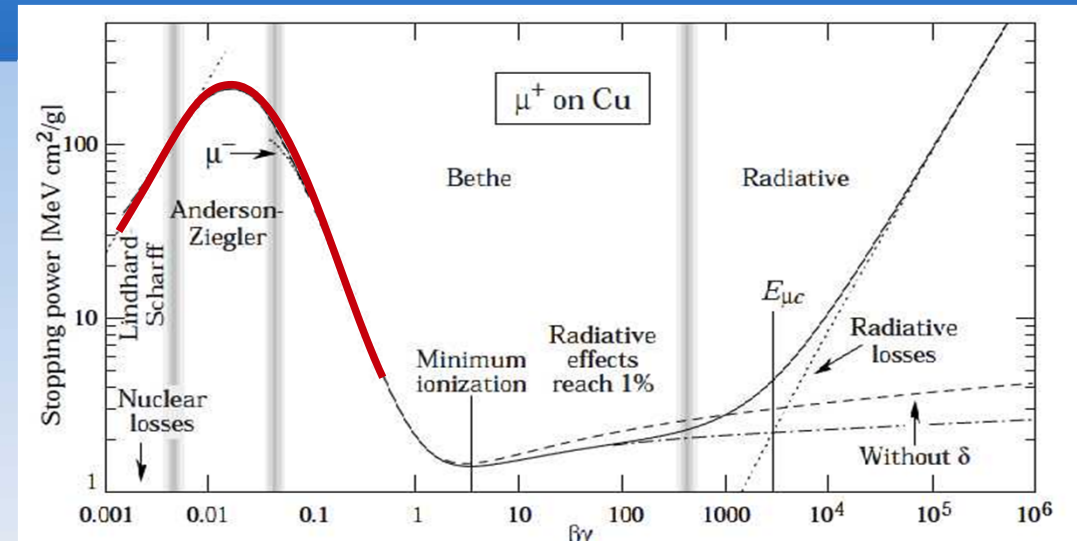


Réponse en temps

Detector Type	Accuracy (rms)	Resolution Time	Dead Time
Bubble chamber	10–150 μm	1 ms	50 ms ^a
Streamer chamber	300 μm	2 μs	100 ms
Proportional chamber	50–100 $\mu\text{m}^{b,c}$	2 ns	200 ns
Drift chamber	50–100 μm	2 ns ^d	100 ns
Scintillator	—	100 ps/ n^e	10 ns
Emulsion	1 μm	—	—
Liquid argon drift [7]	$\sim 175\text{--}450 \mu\text{m}$	$\sim 200 \text{ ns}$	$\sim 2 \mu\text{s}$
Micro-pattern gas detectors [8]	30–40 μm	< 10 ns	20 ns
Resistive plate chamber [9]	$\lesssim 10 \mu\text{m}$	1–2 ns	$\leq 10 \text{ ms}$
Silicon strip	pitch/(3 to 7) ^f	g	g
Silicon pixel	2 μm^h	g	g

Effets de saturation

- Pour les particules fortement ionisantes
 - ▶ part. basse E
 - ▶ α
 - ▶ fragments
- Scintillateurs
 - ▶ Loi de Birks
- Gas nobles liquéfiés
 - ▶ Charge d'espace
 - ◆ \rightarrow recombinaison & scintillation
- RPC :
 - ▶ Charge d'espace
 - ◆ Limitation du gain.



Birks' Law

- Describes the light output of organic scintillators
- Fluorescence S in general not proportional to energy loss
 - \Rightarrow quenching effects between excited molecules
 - with low energy electrons (< 125 KeV)
 - scintillation by heavy ions $<$ than by electrons
- $$\Delta S \propto \frac{\Delta E}{1 + k_B (\Delta E / \Delta x)}$$
 - k_B is the Birks' constant
 - \Rightarrow must be determined for each scintillator

Quelques exemples de détecteurs (techniques)

Quelques exemples de grands calorimètres

Machines basse E: CLEO, BaBar crystal Cs I, ~ no HCAL

LEP OPAL lead glass, Fe-w.ch. L3 BGO
ALEPH, DELPHI → Pb/Fe-wire chambers sandwich

SLC SLD Pb/Fe-liq.Ar

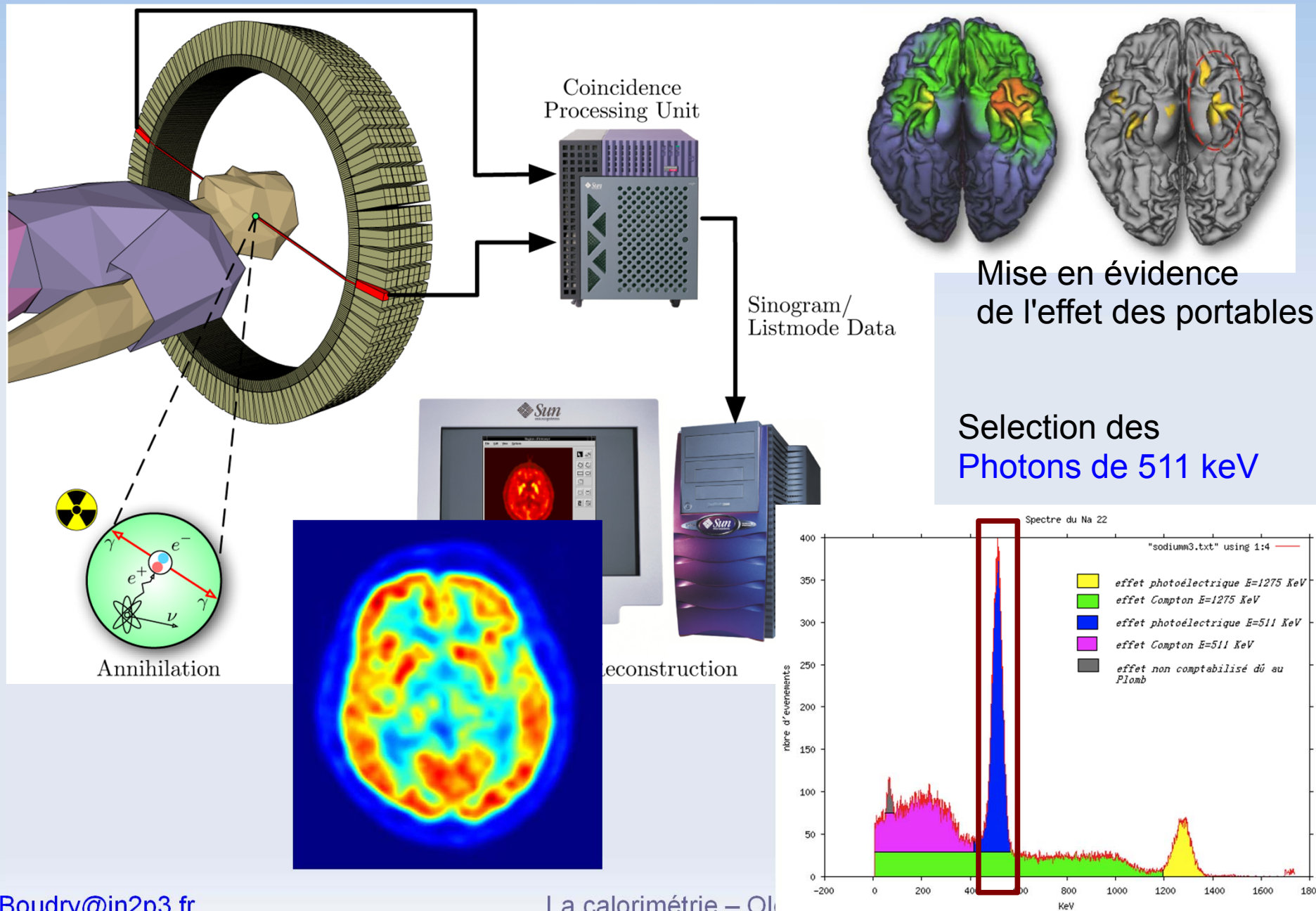
HERA H1 Pb/Fe-liq.Ar ZEUS U-scint.

Tevatron D0 U-liq. Ar CDF Pb/Fe-scint.

LHC CMS PbWO₄, Fe-scintillator
ATLAS Pb-liq. A, Fe-scintillator

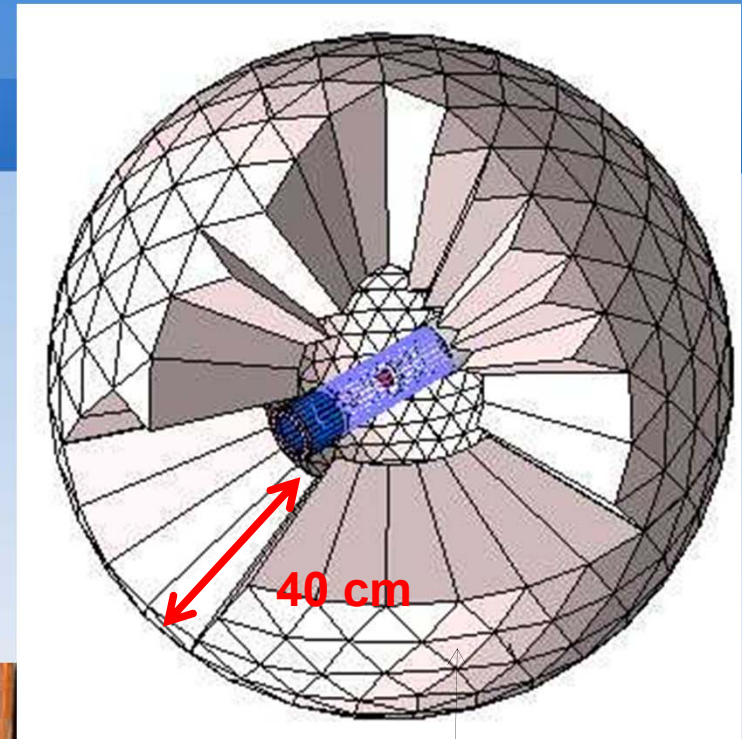
Crystaux

Tomographie par émission de positrons : des calos industriels...



Crystal Ball

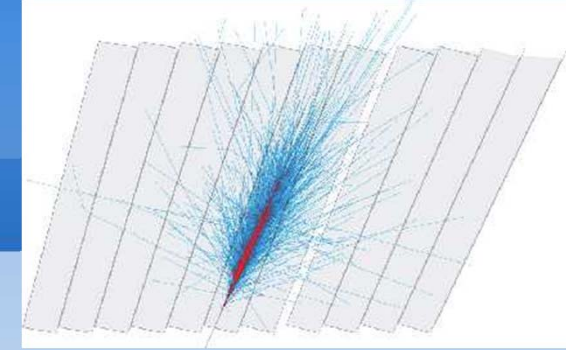
- 672 Crystaux de NaI(Tl) + PM
 - Couverture 93% 4π steradians
- $\sim 16 X_0 \rightarrow$ Photons moyenne En
- Détecteurs nomade
 - SLAC puis DESY, puis Mayence.



Crystaux pyramide tronquées

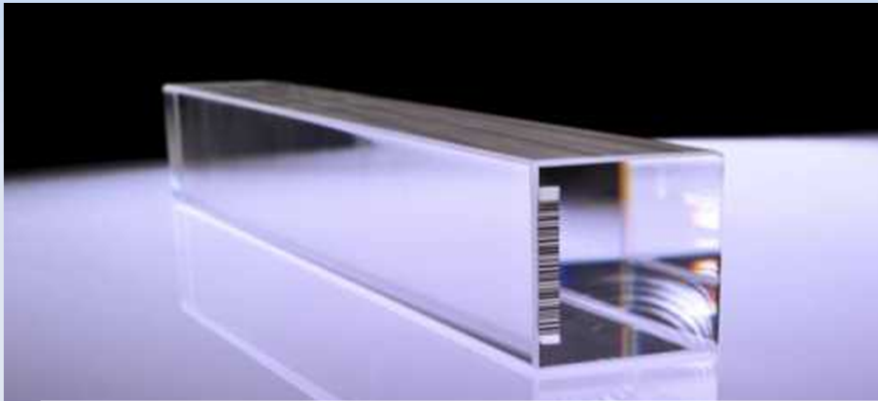
Tubes photomultiplicateurs

CMS ECAL



□ PbWO_4

- ▶ $X_0 = 0,89 \text{ cm}$ (Pb : 0,56 cm)
- ▶ $R_M = 2,2 \text{ cm}$



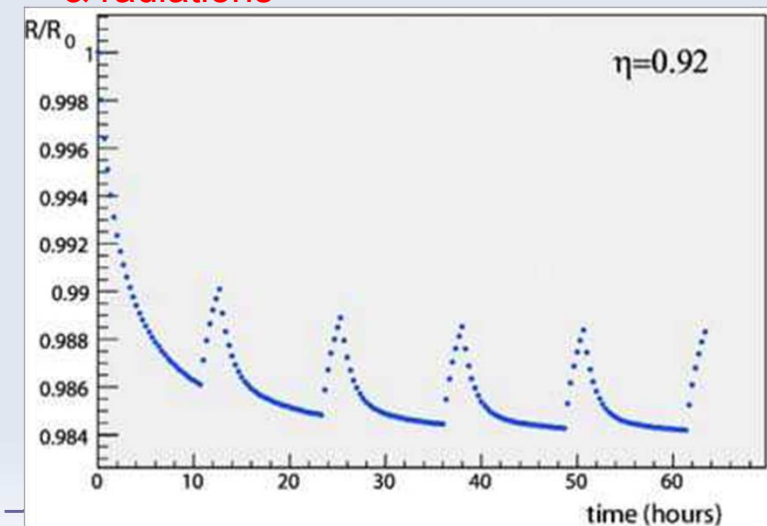
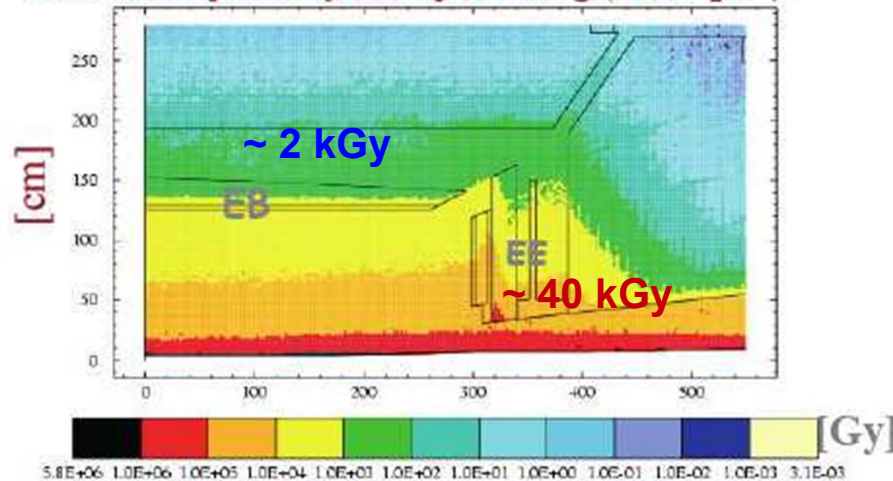
□ Plus :

- ▶ Excellente résolution en E
- ▶ Calorimètre compact (longueur du cristal 23cm pour 26 X_0)
- ▶ gerbe très compacte
- ▶ Rapidité (80% de la lumière $\leq 15\text{ns}$)
- ▶ Résistance aux radiations (105Gy)

□ Moins :

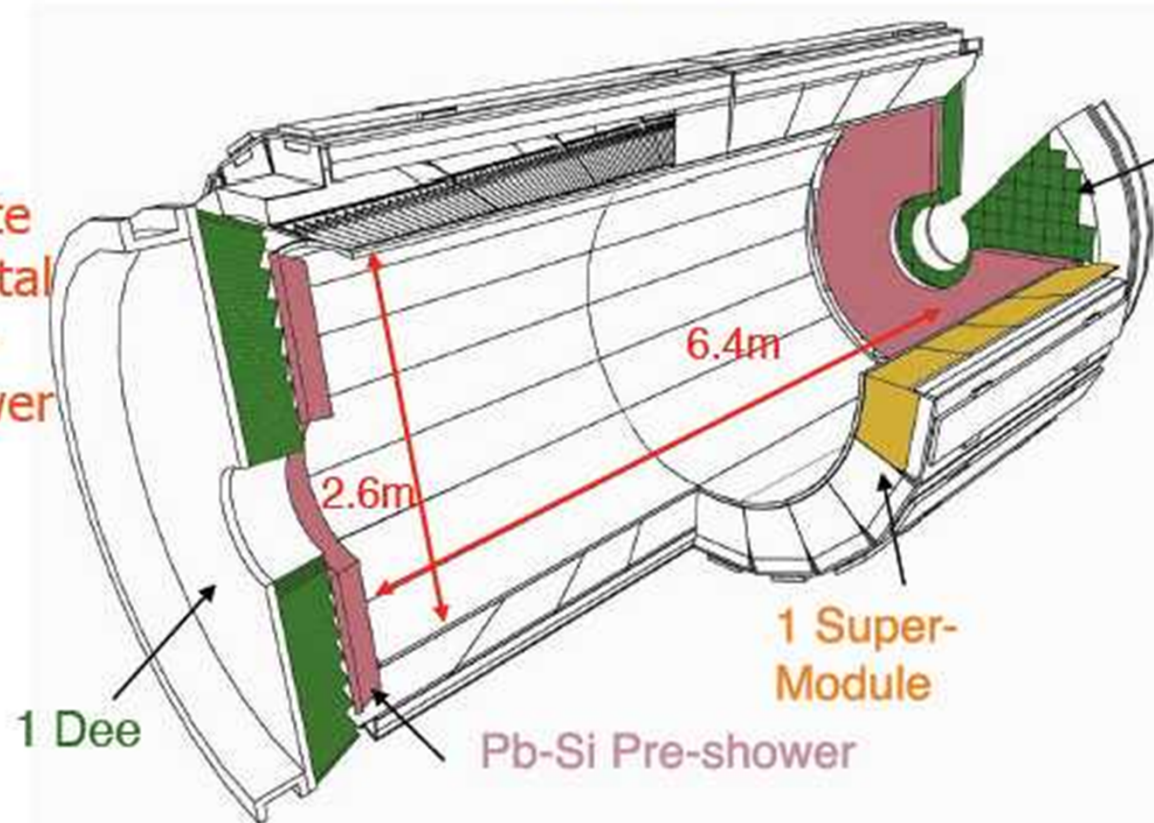
- ▶ Faible rendement : 150 γ/MeV
- ▶ Sensibilité à la t° (-1,9% / $^\circ\text{C}$) & radiations

Total dose after 10 years of running ($5 \times 10^5 \text{ pb}^{-1}$)



CMS ECAL (EM) design

Homogenous
Lead Tungstate
(PbWO_4) Crystal
Calorimeter +
Pb-Si Preshower



1 Endcap
Super-Crystal

Crystals are
projective and
positioned
pointing slightly
off the IP to
avoid cracks.



Barrel (EB):

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

Endcap (EE):

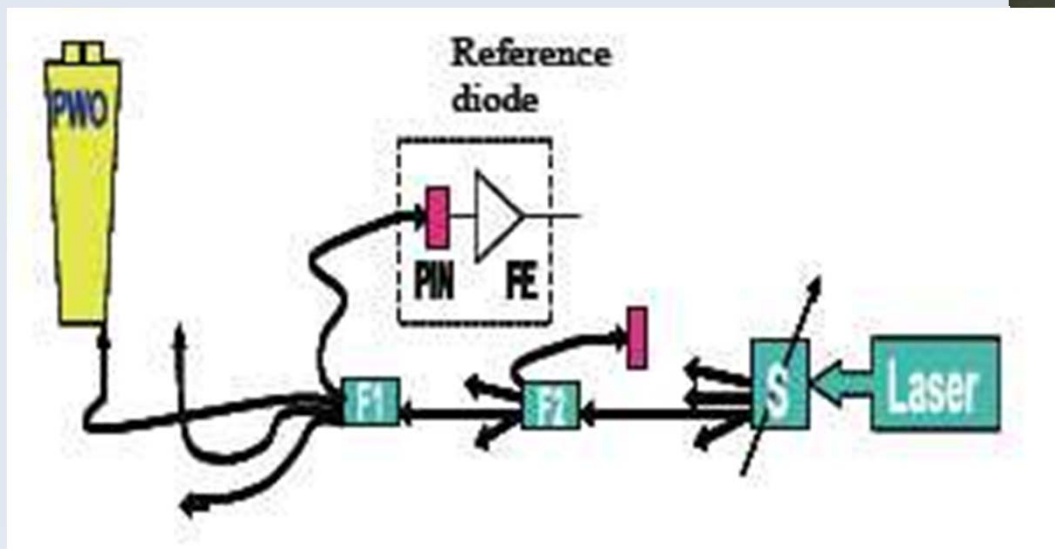
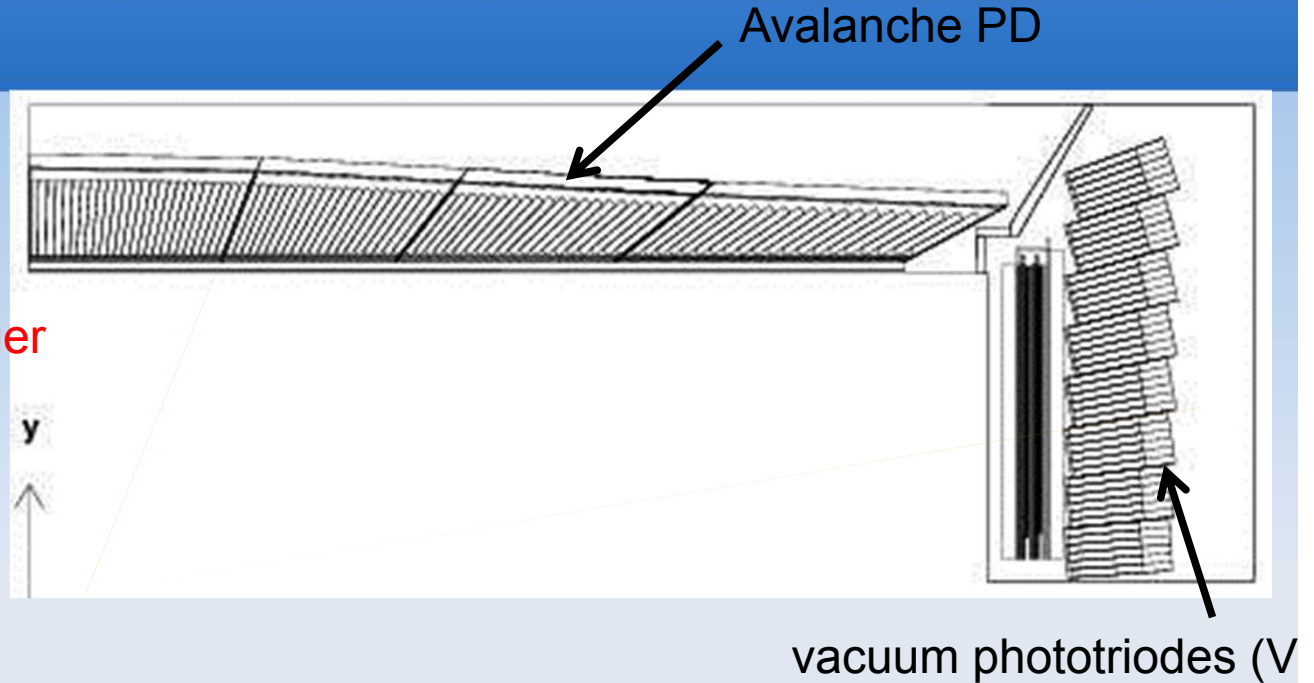
- 14648 crystals
- 4 Dees, SuperCrystals of 5x5 xtals
- $1.48 < |\eta| < 3.0$

Preshower (ES):

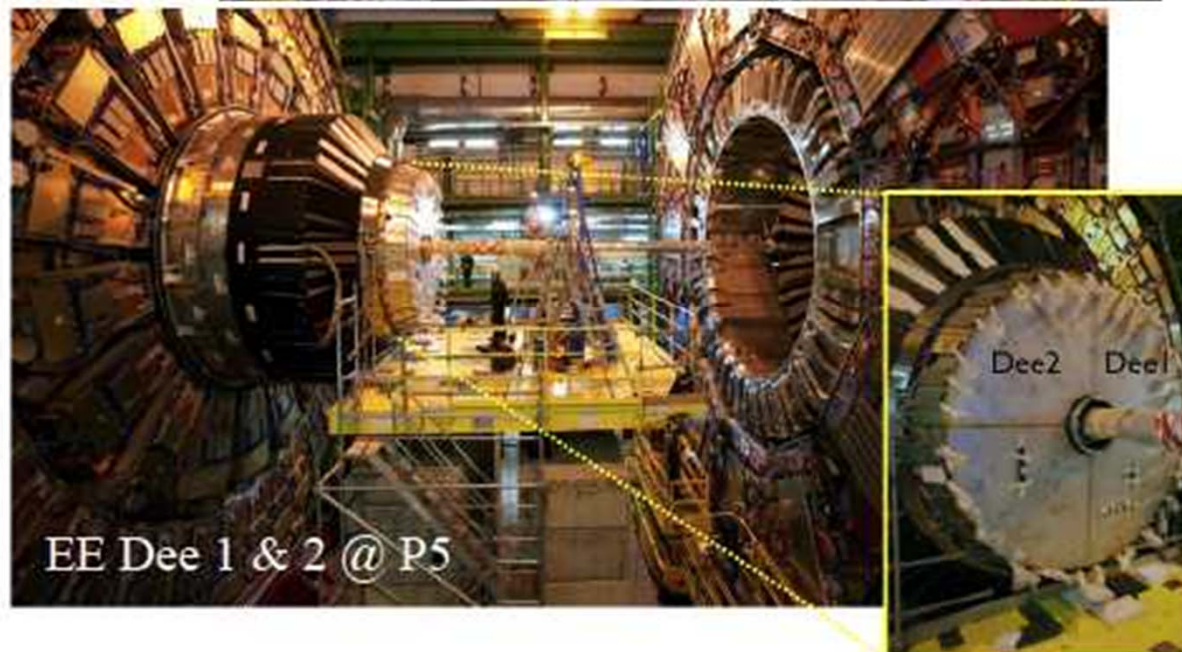
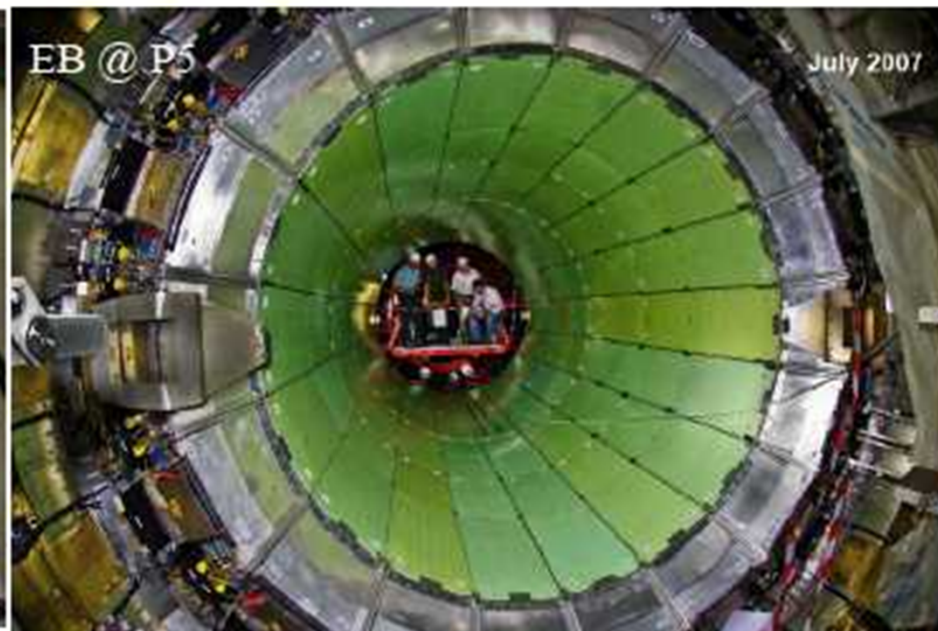
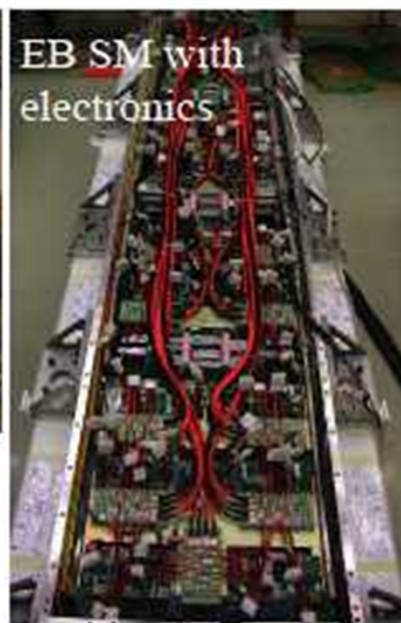
- Pb-Si
- 4 Dees
- 4300 Si strips
- $1.65 < |\eta| < 2.6$

CMS ECAL

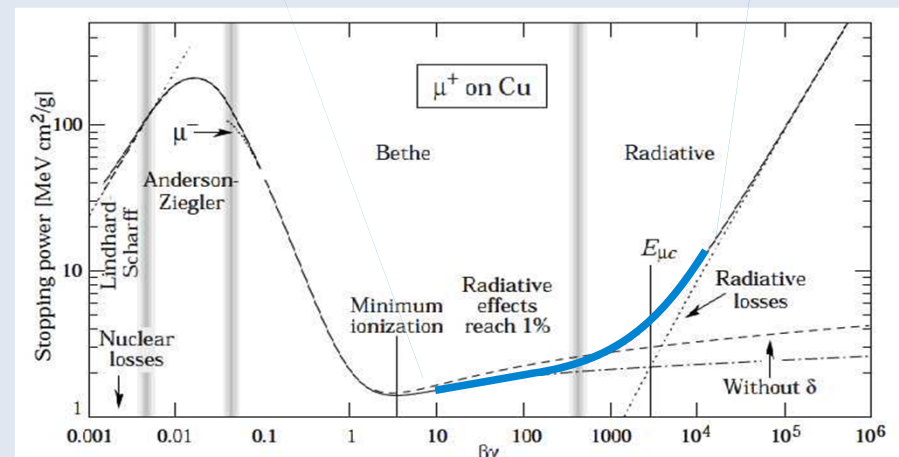
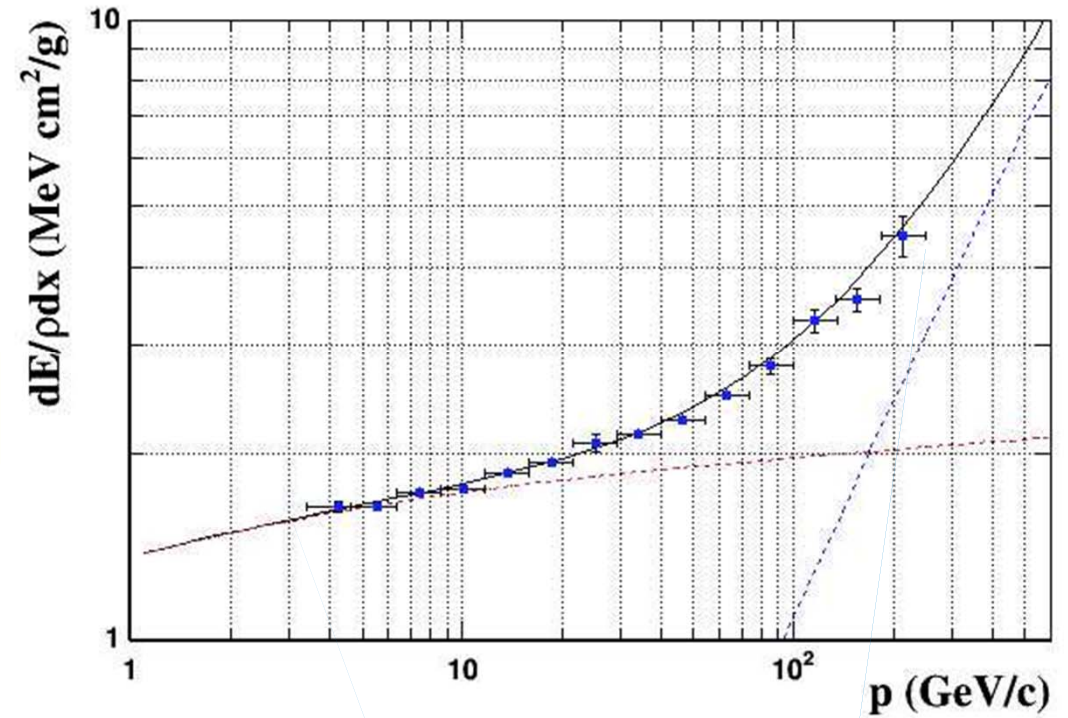
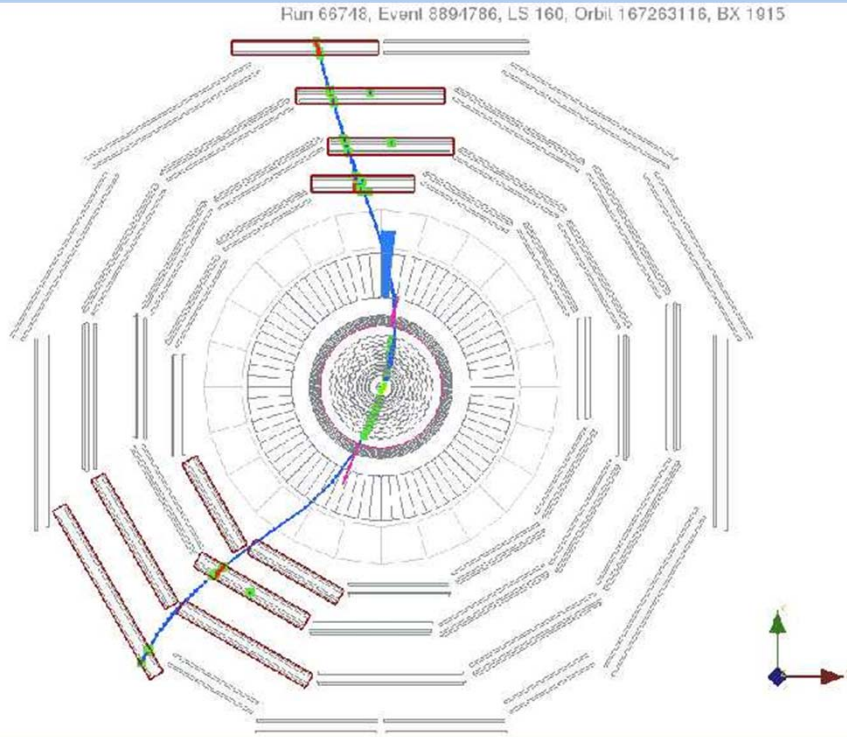
- $2 \times 2 \text{ cm}^2$
 - ▶ 80% des e- dans 1 crystal
 - ▶ groupe de 3×3 pour le trigger
 - ▶ Presque pointant



CMS ECAL construction



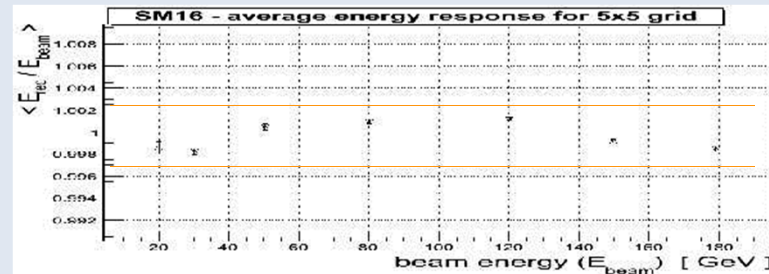
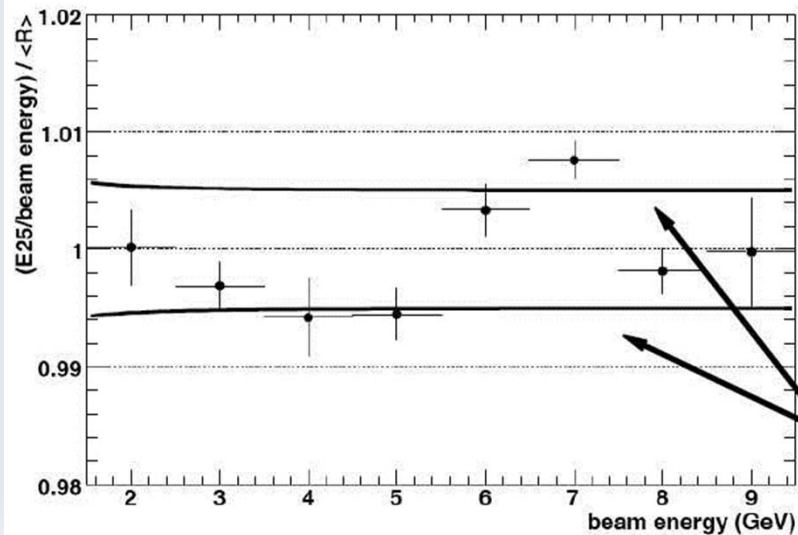
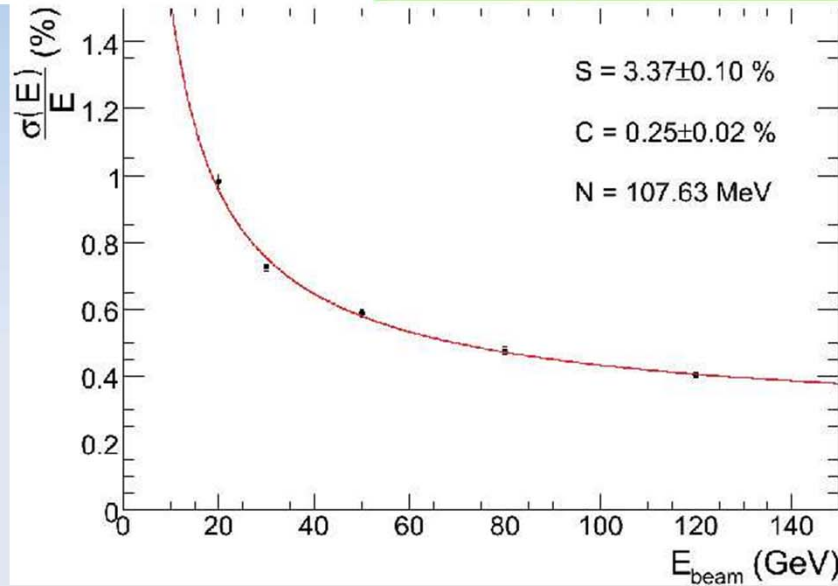
Intercalibration tracker \leftrightarrow ECAL

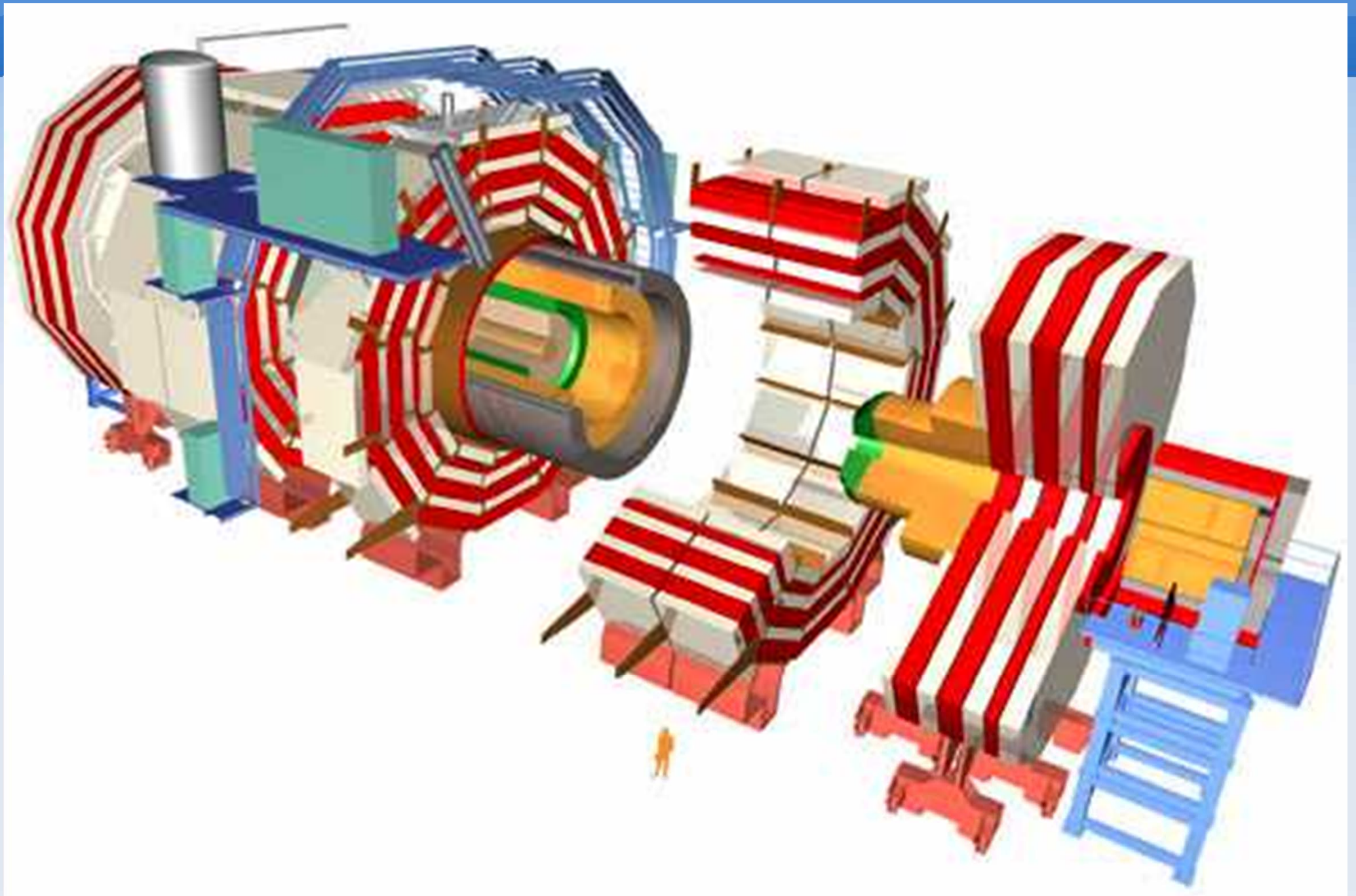


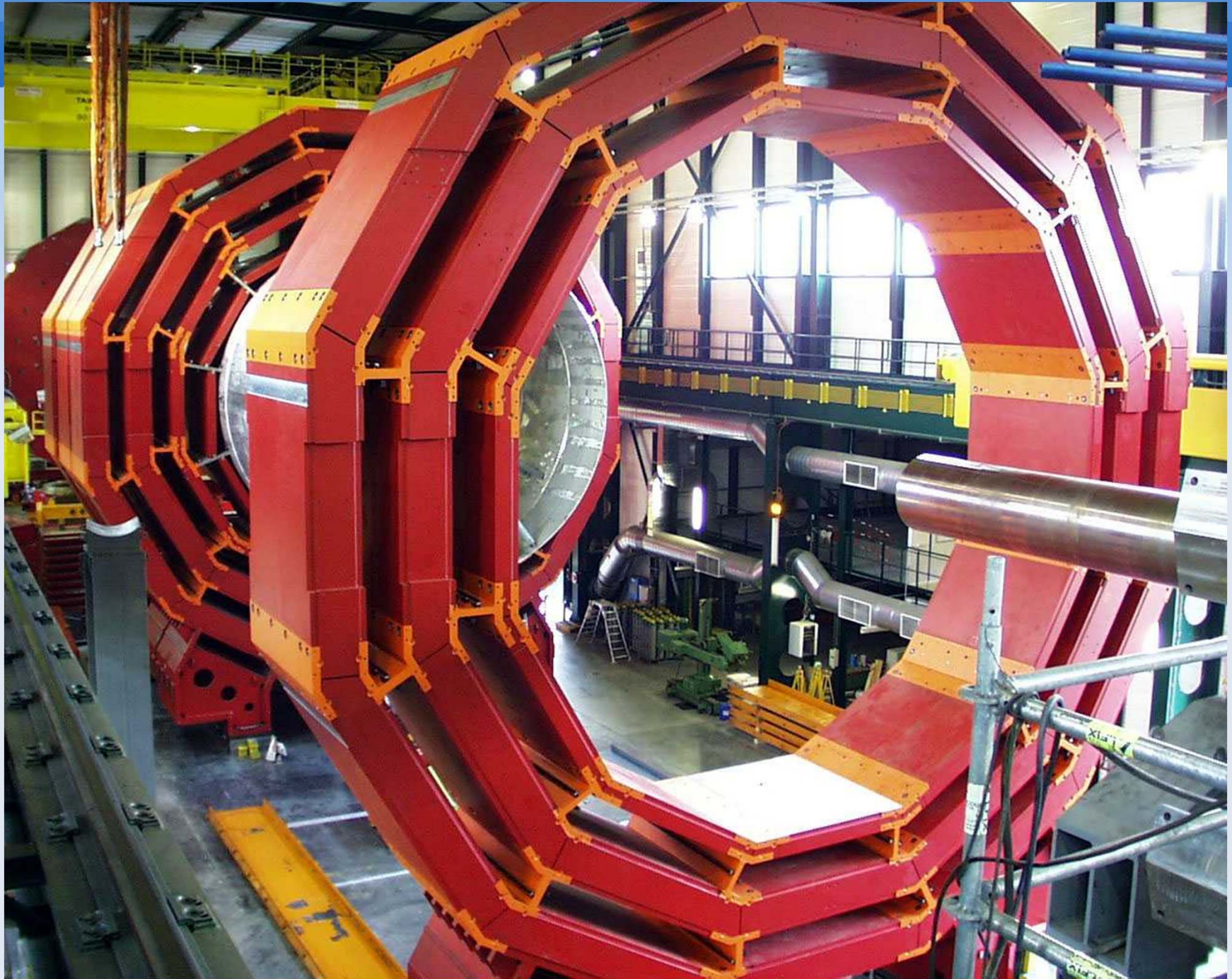
Performances ECAL (tests en faisceau)

CMS (PbWO₄)

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.03}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.005$$

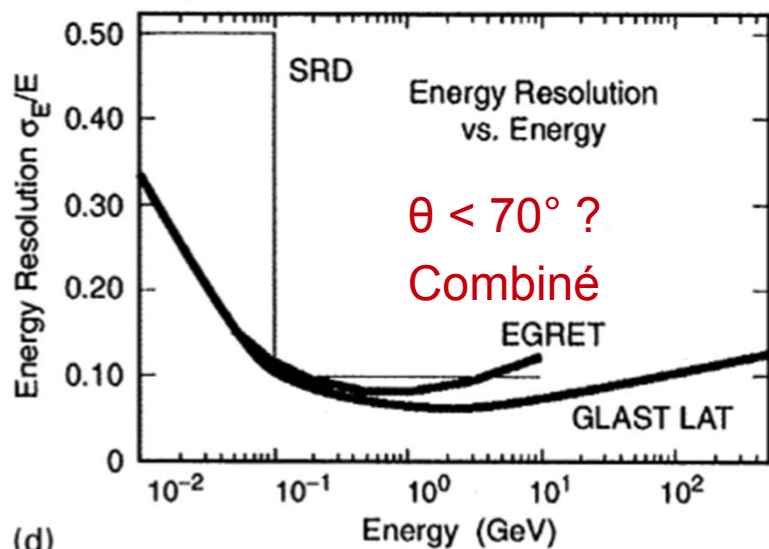
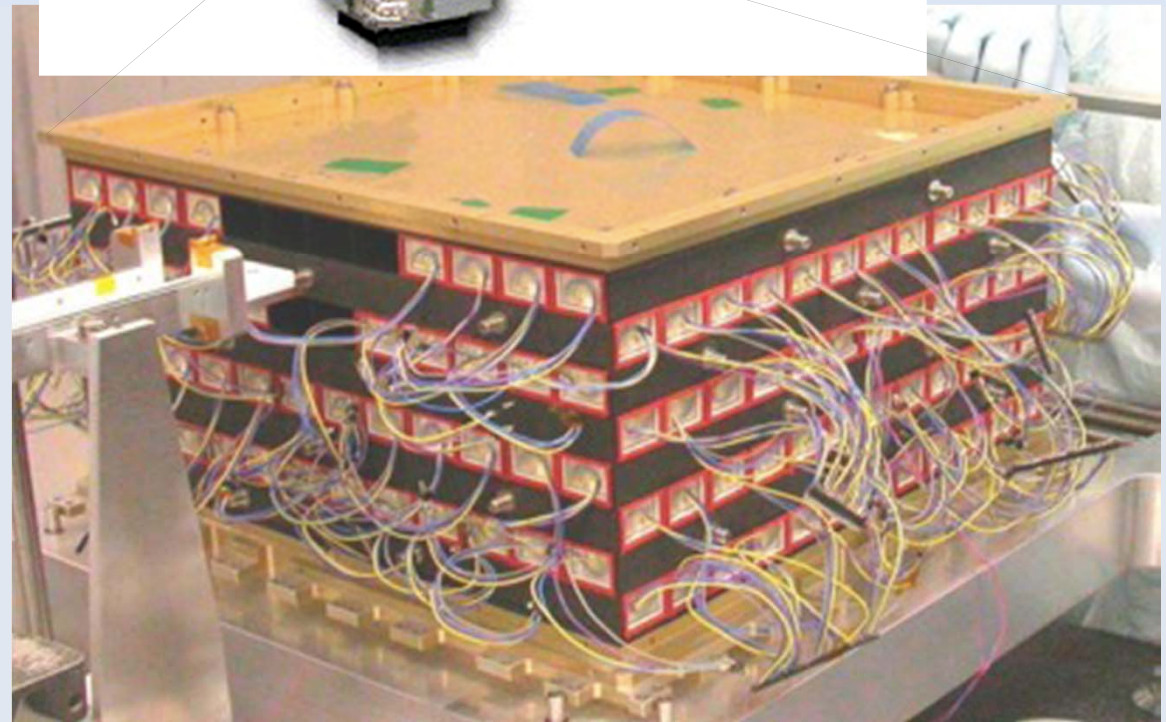
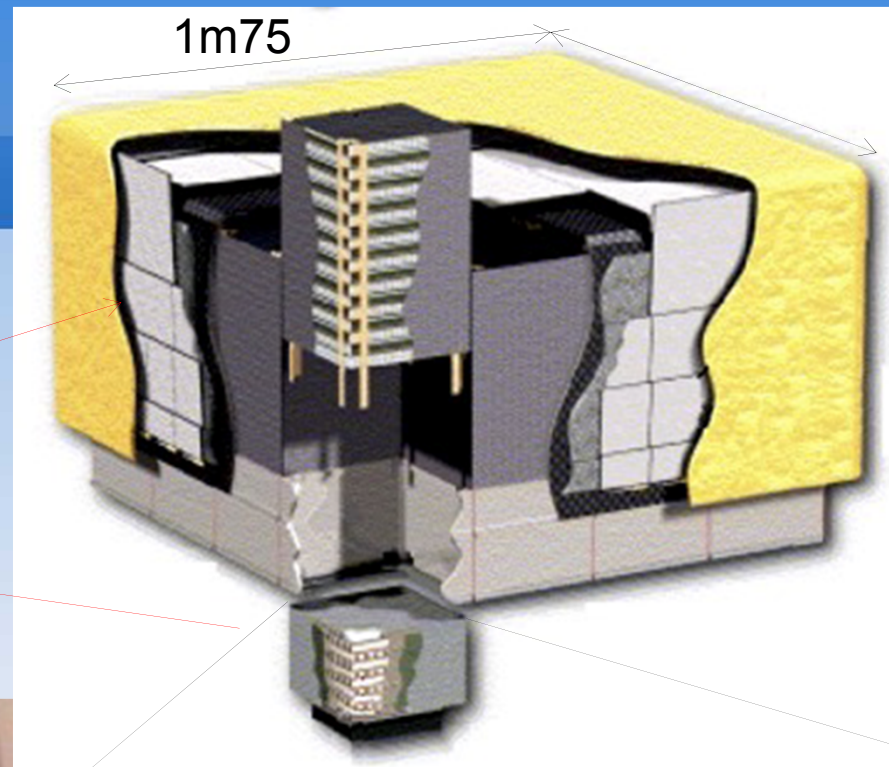






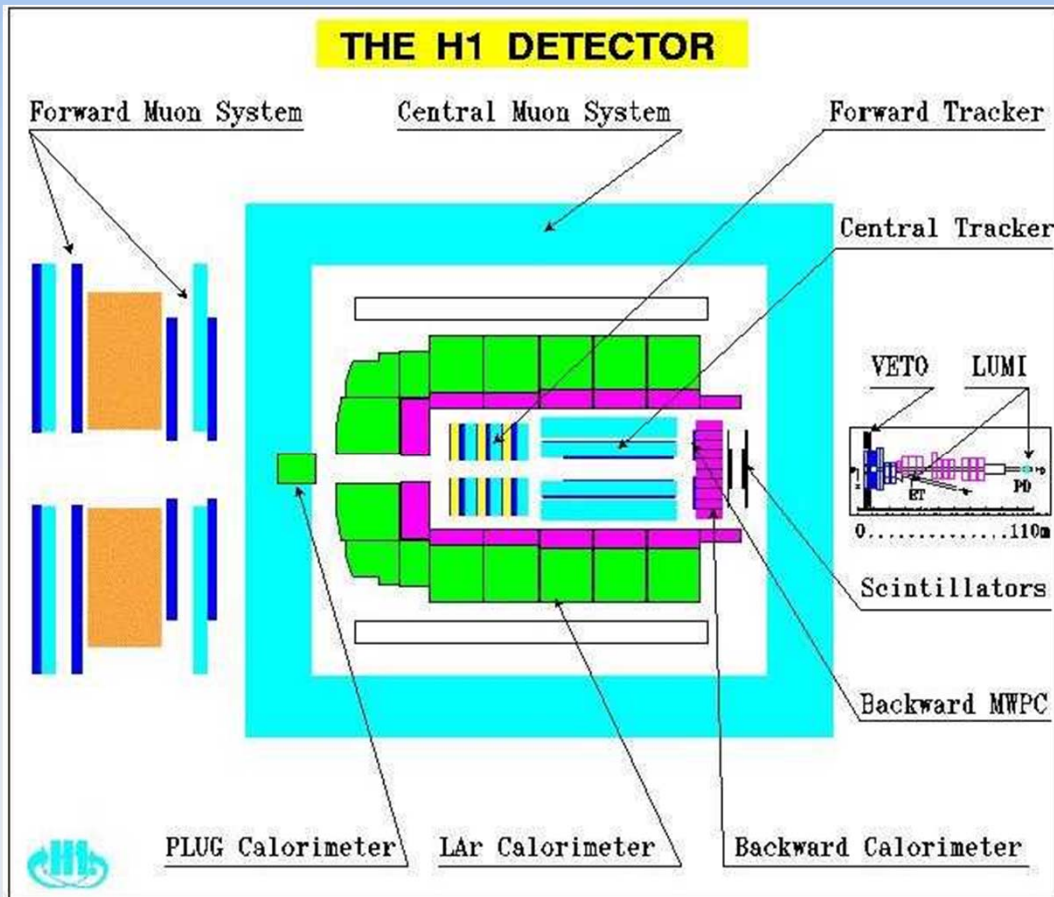
Fermi/Glast

- Satellite observation γ de HE
 - ▶ 20 MeV $<E_\gamma < 300$ GeV
- LAT = Large Area Telescope
- ECAL
 - ▶ 8 couches de CsI
 - ◆ 8,5 $X_0 \rightarrow$ fuites
 - ◆ Orientation alterné
 - ▶ Lecture double : APD
 - ◆ reconstruction pos.
 - ◆ correction attenuation



Gas nobles liquéfiés

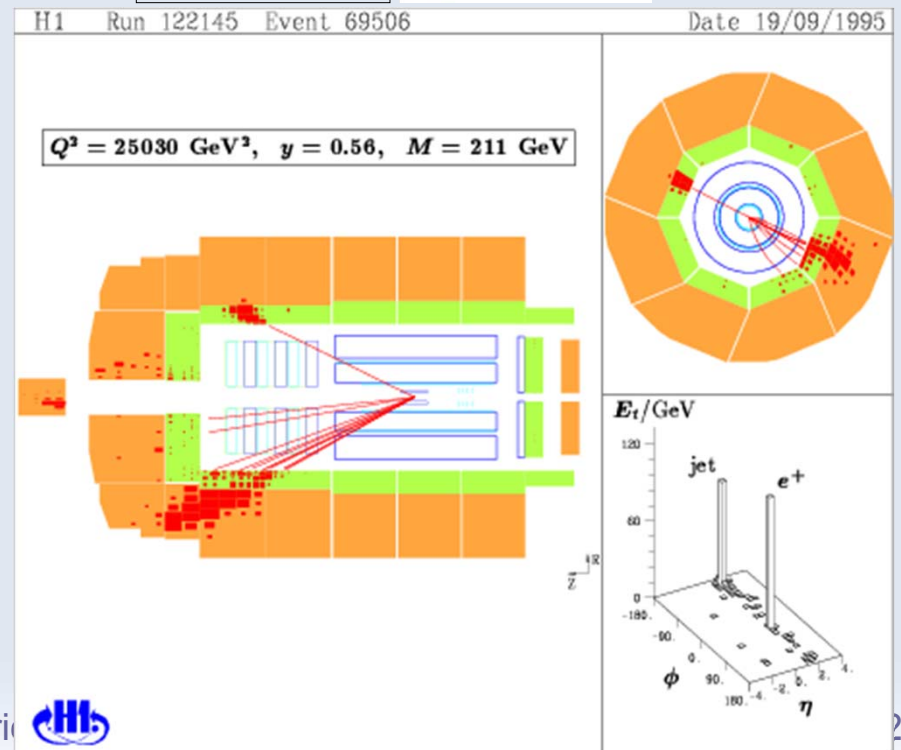
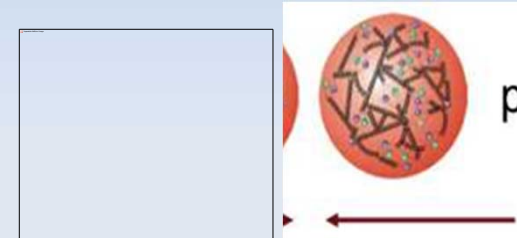
H1 un détecteur de HERA (asymétrique)



Collisions à HERA
(DESY, Hambourg)

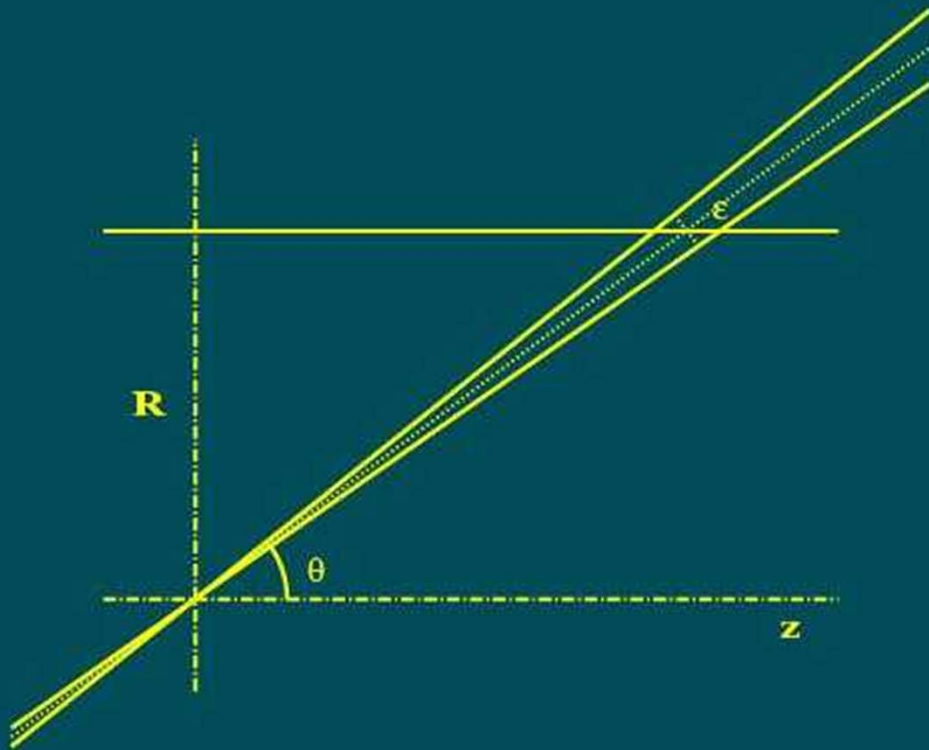
$e^{\pm} p$

30 → ← 900 GeV



Cinématique des collisions

Cells in the barrel for a projective geometry



To match well the transverse size of the cells to the shower

In \backslash , take a constant d

In \backslash , take a constant η

$$\varepsilon = \frac{R}{\sin\theta} d\theta$$

Recalling that the rapidity y is such th

$$\cos\theta = \tanh y$$

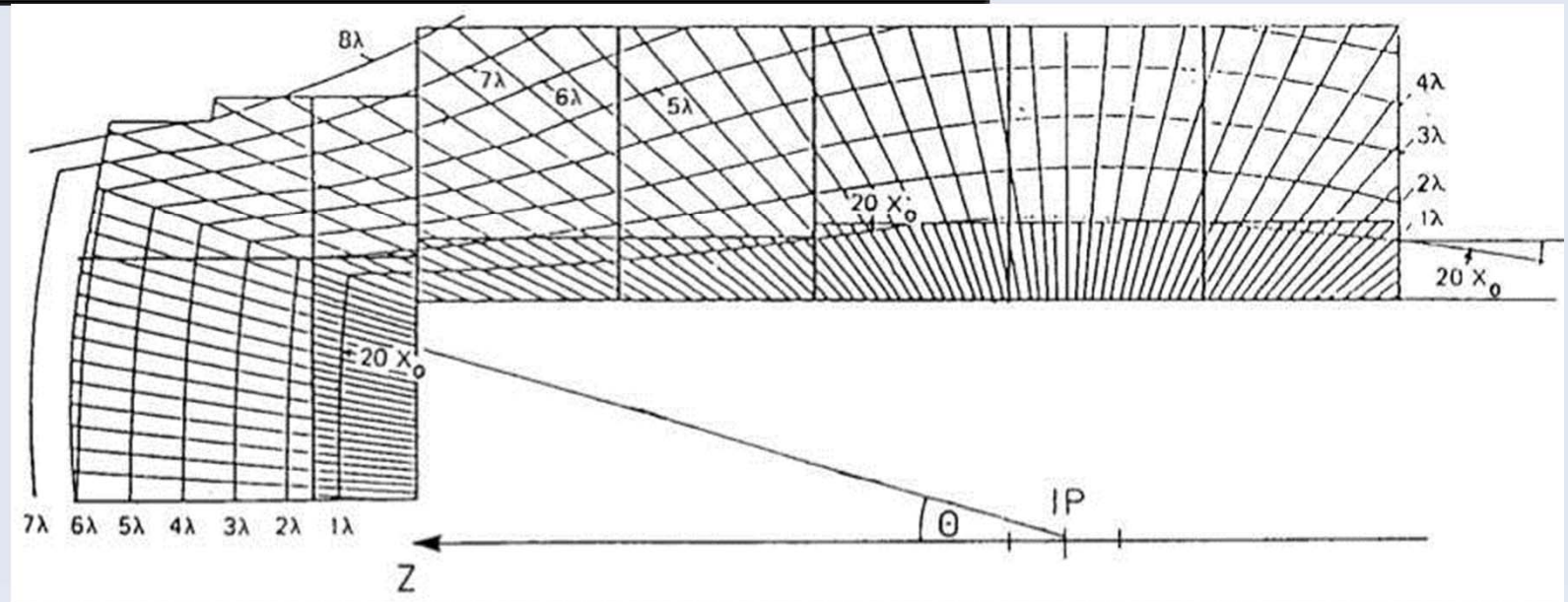
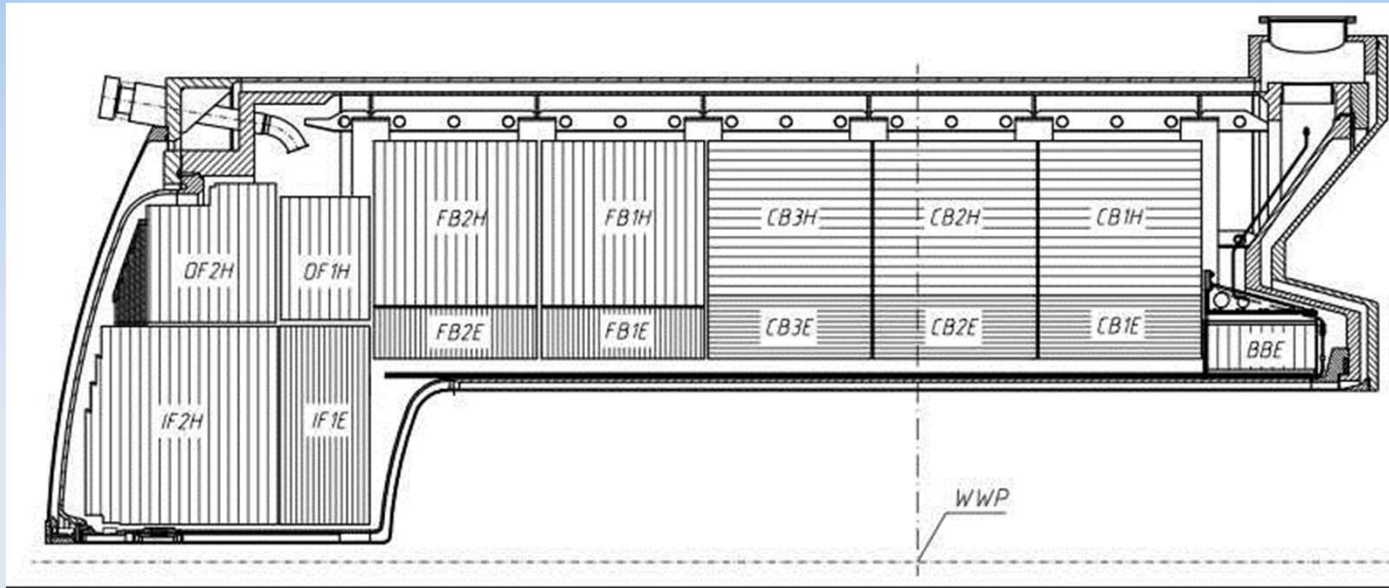
$$\varepsilon = dy$$

Constant rapidity interval

$$z_k = \sinh(ky_0)$$

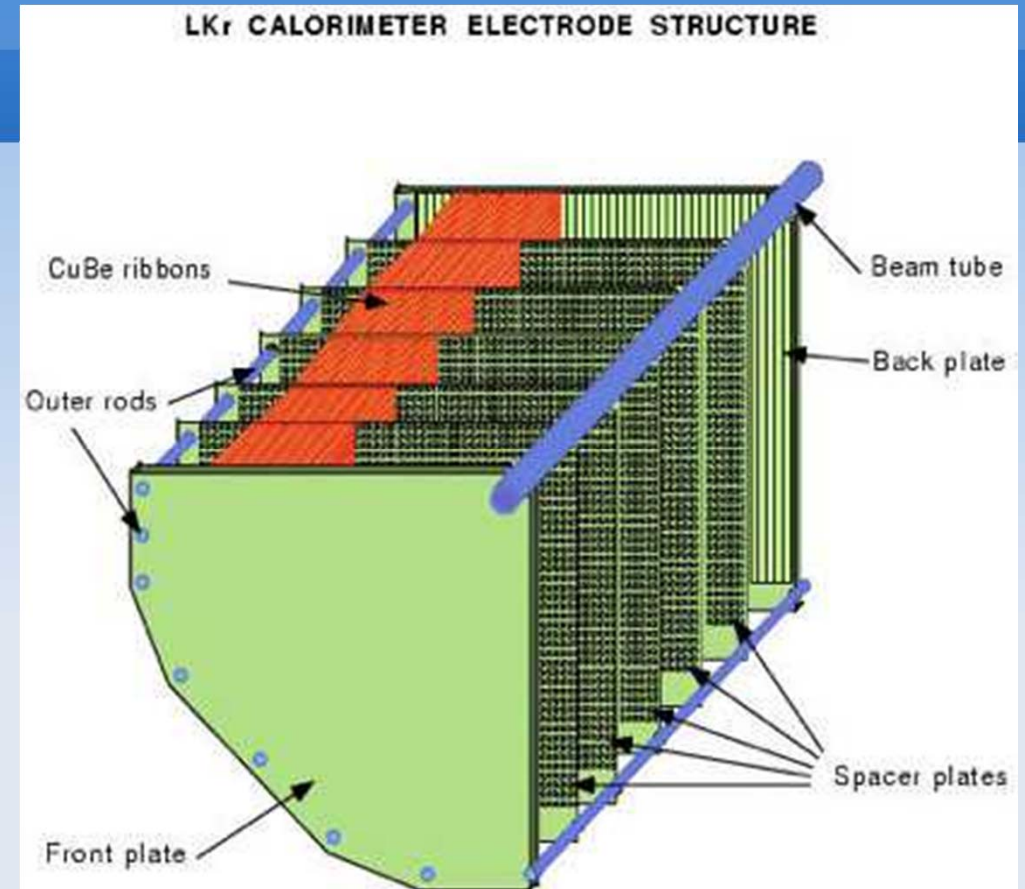
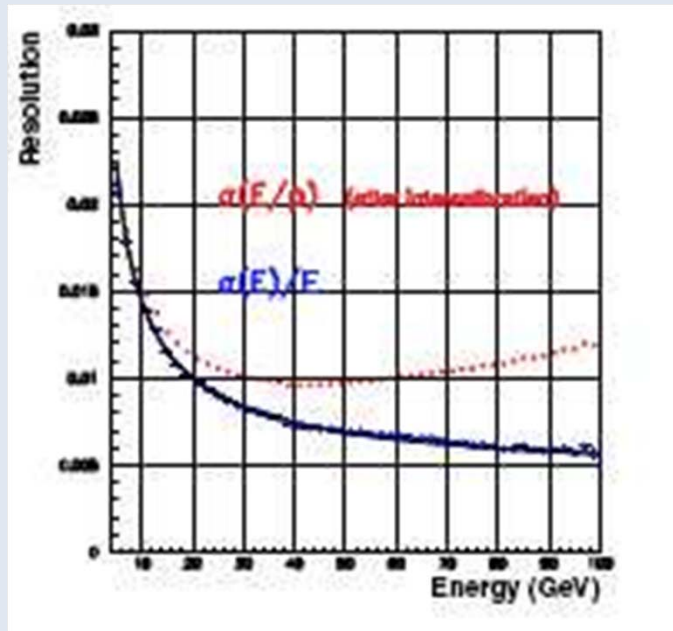
En collisions pp distribution plate avec la pseudo-rapacité

Calorimètre ℓ Ar de H1



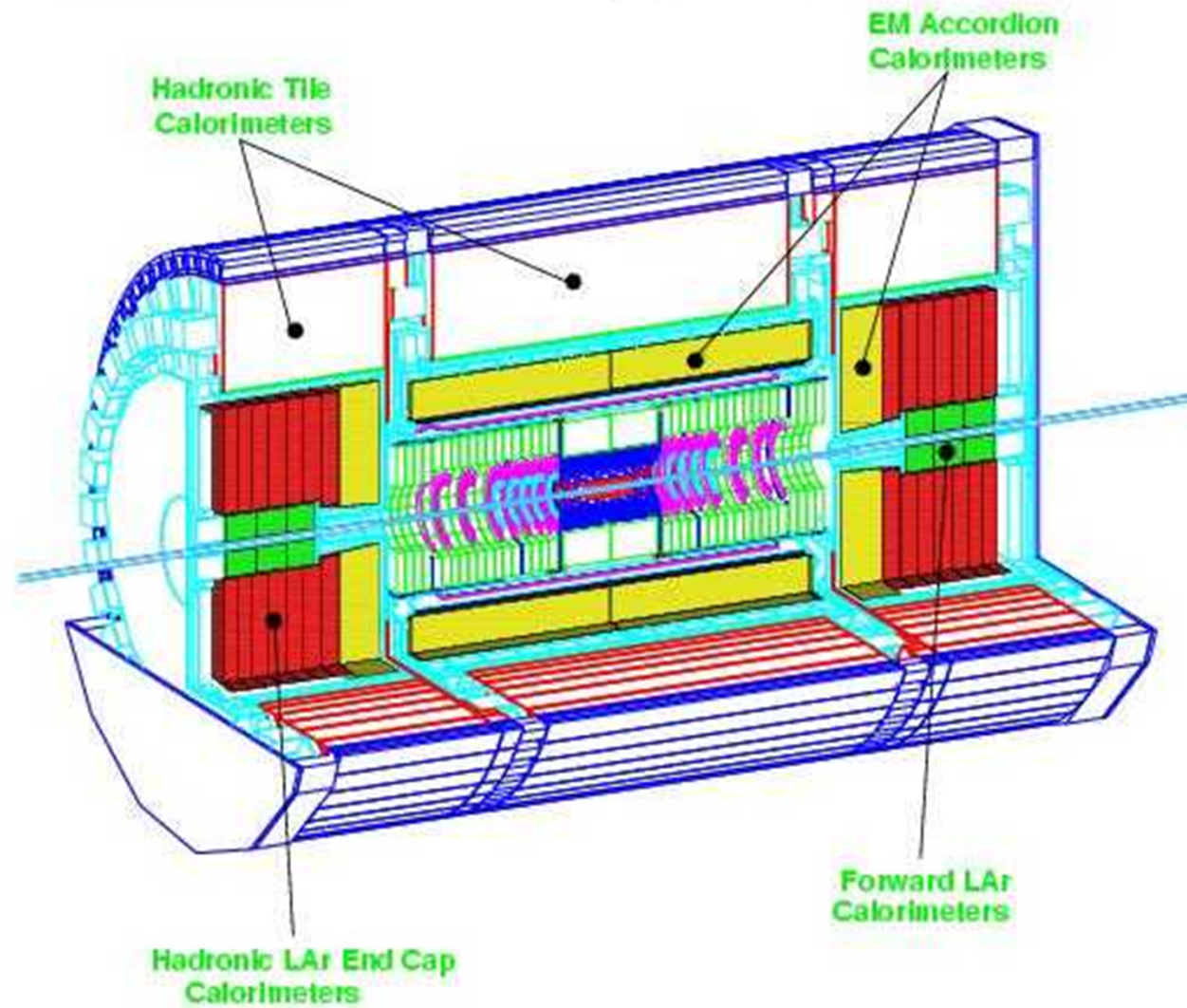
NA48

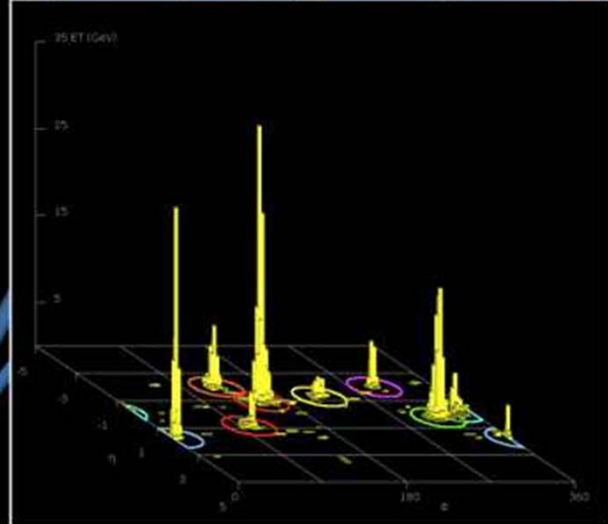
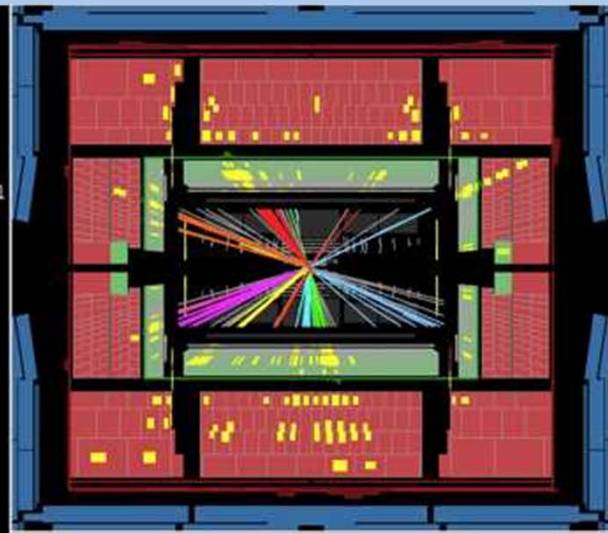
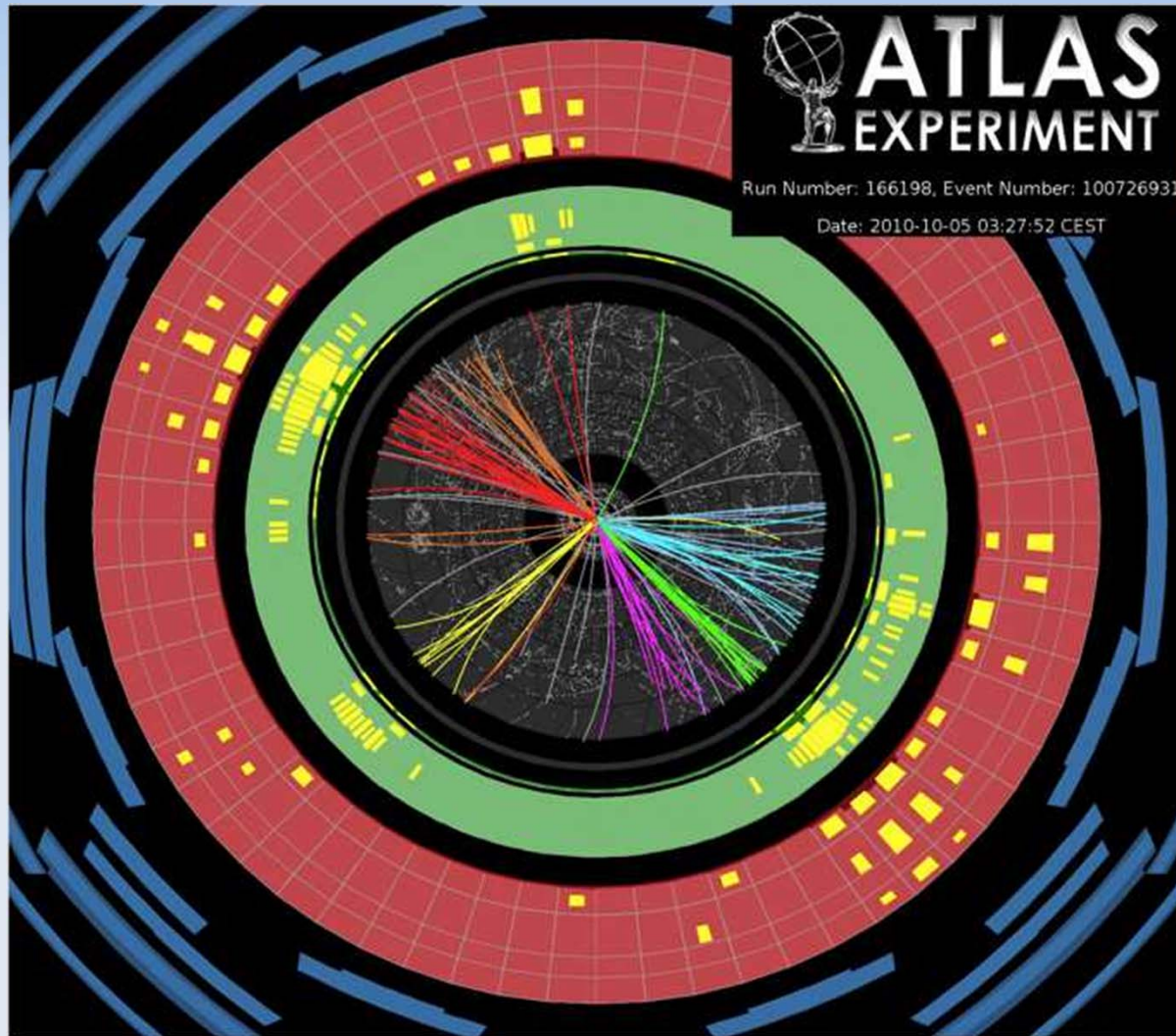
- Expérience cible fixe (CERN)
 - Physique du K
- 4Kr @ 120°K
- Electrodes en accordéon
- $\sigma(t) \sim 220$ ps
 - temps de vol.



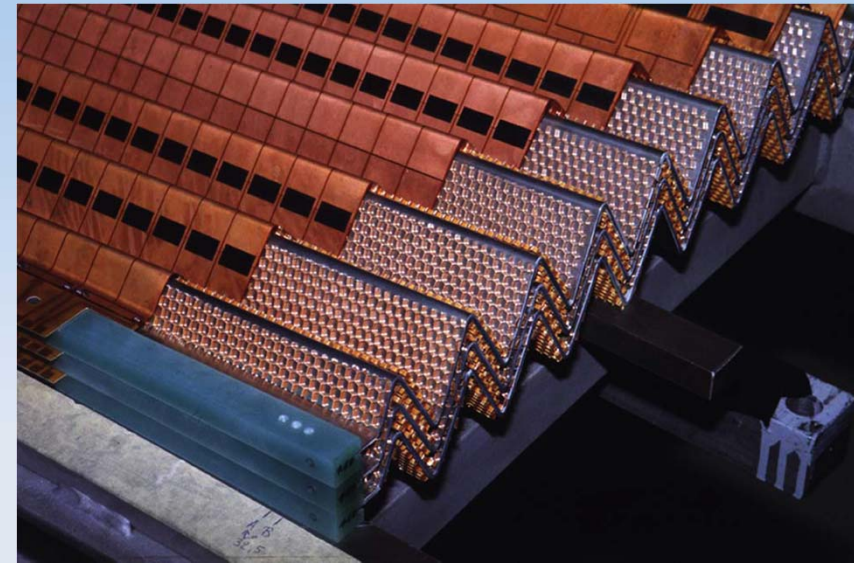
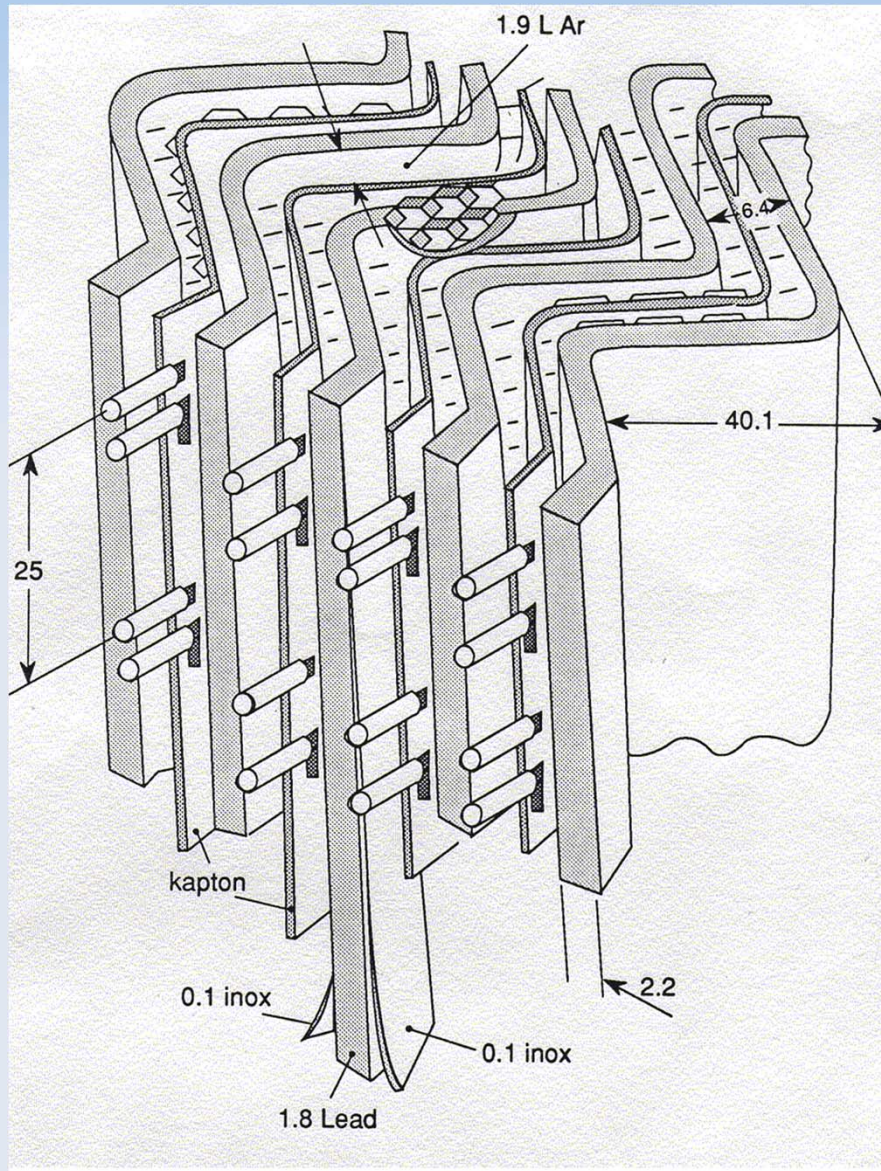
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(3.2 \pm 0.2)\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{(0.09 \pm 0.01)}{E} \oplus (0.42 \pm 0.05)\%$$

ATLAS Calorimetry (Geant)



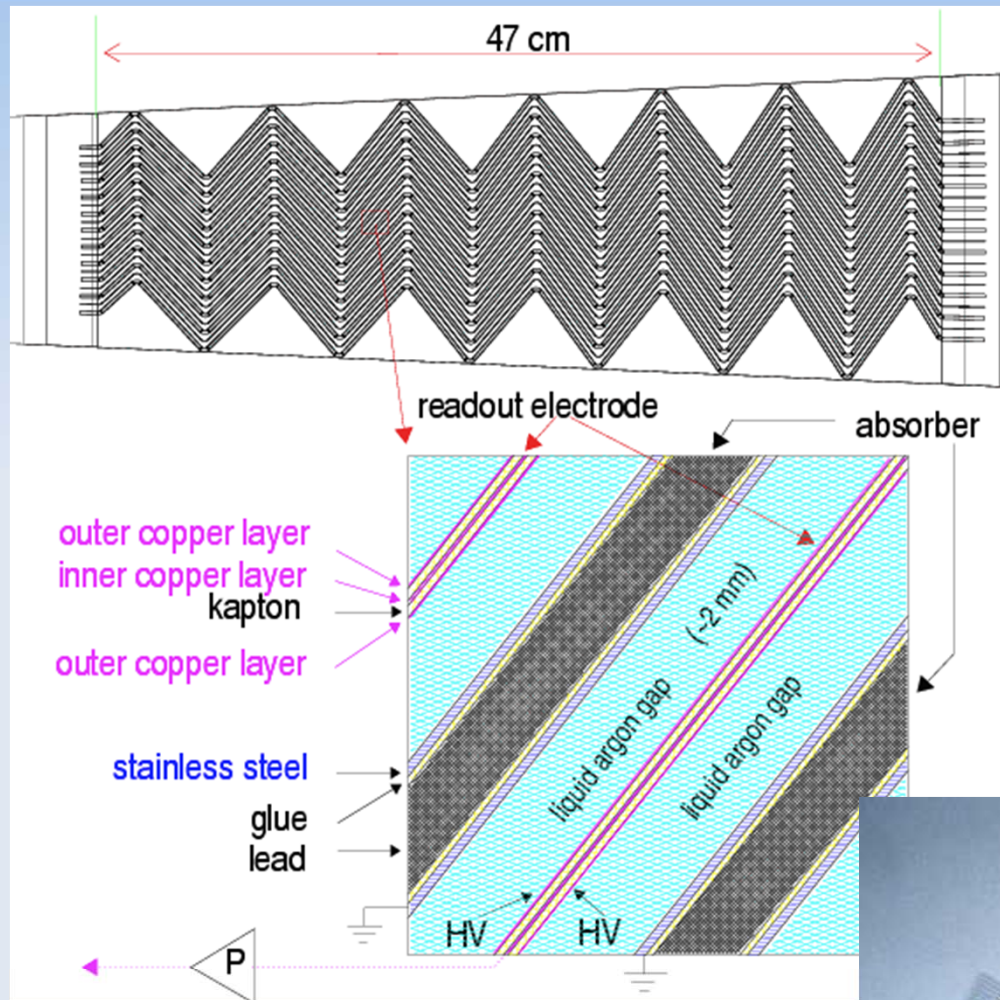


Atlas ECAL : ℓ Ar

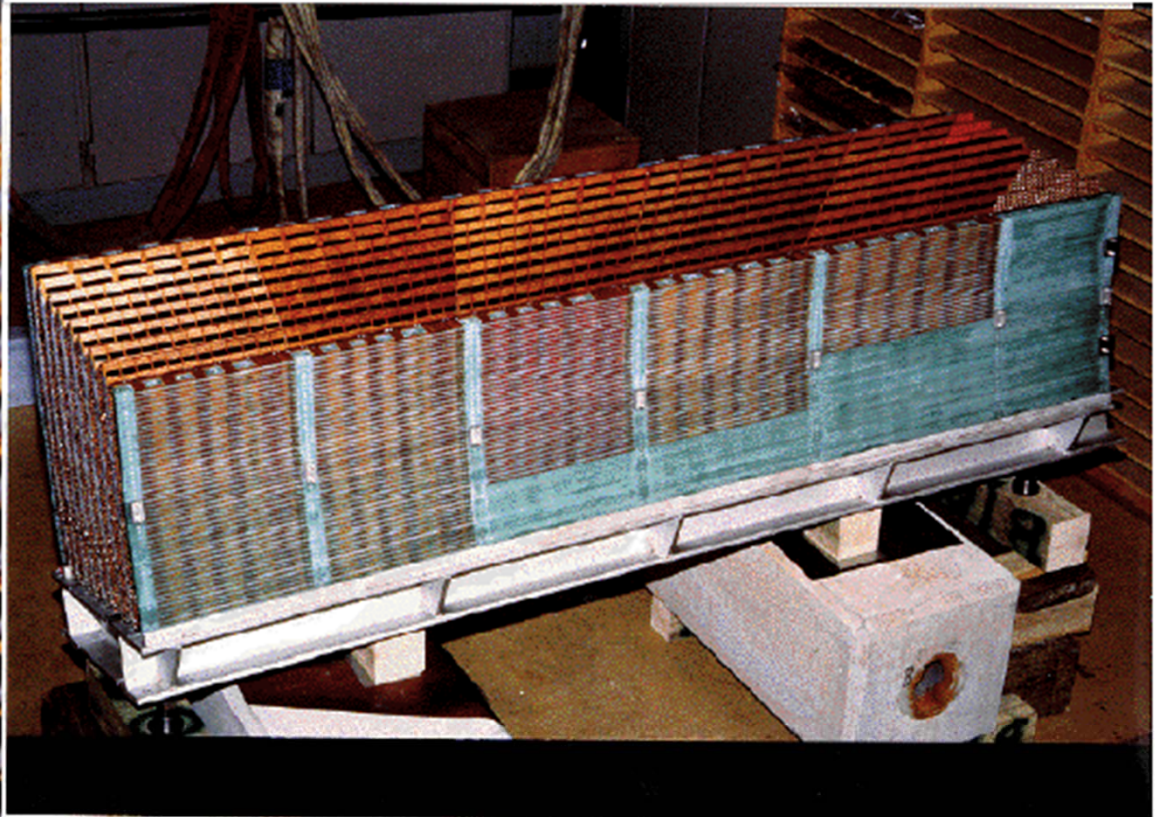
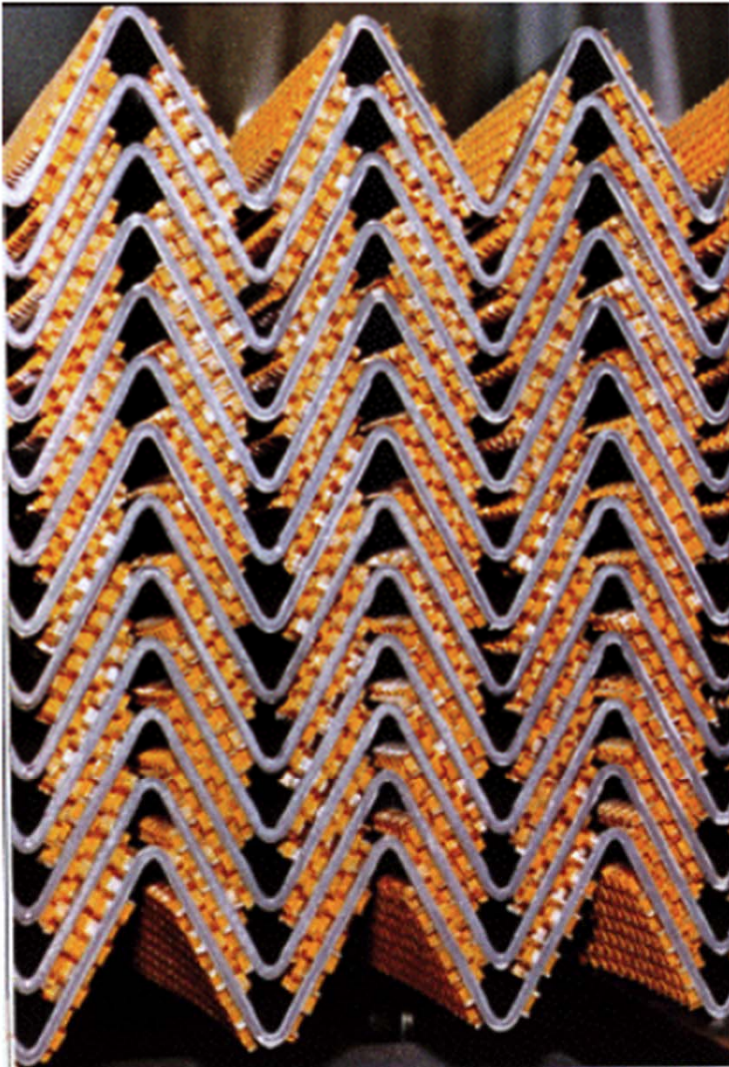


- Pbm : Temps de dérive long dans ℓ Ar
- Idée : faire de petits espaces de dérive
 - ▶ Ar «lourd» $\rightarrow f_{\text{échant.}} \text{ OK}$
 - ▶ \rightarrow signal 40 ns
 - ◆ \leftrightarrow 20 ns inter-paquet nom. de LHC

Atlas ECAL



Accordion barrel



2 π detector with no cracks or gaps, no cables inside the detector

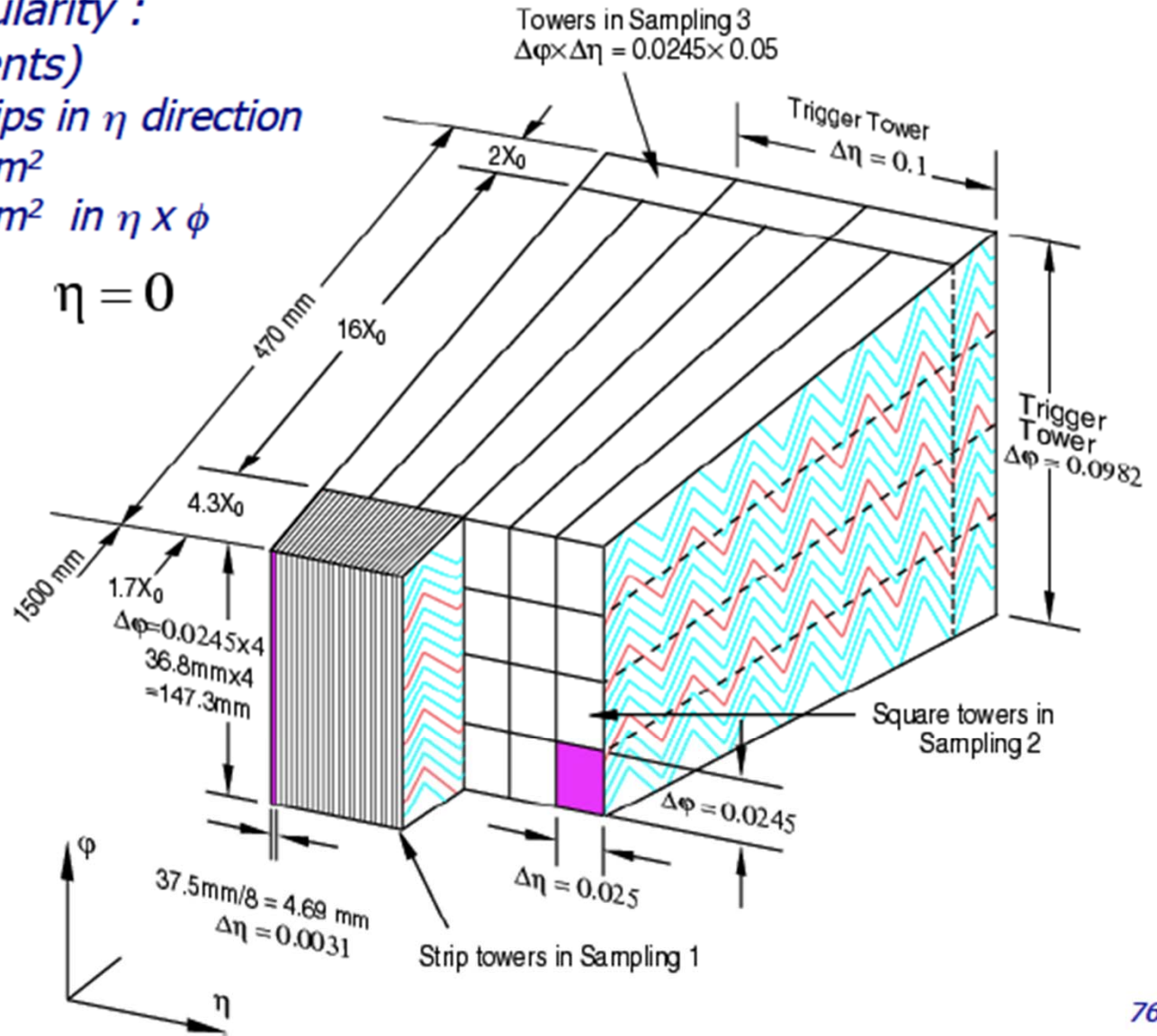
LAr accordion structure

Fine segmentation and granularity :
(longitudinally 3 compartments)

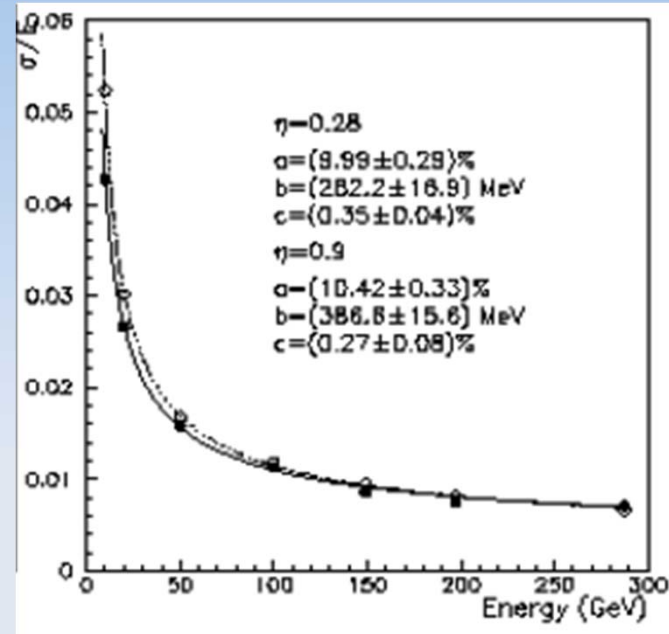
- compartment 1 : 4 mm strips in η direction
- compartment 2 : $\sim 4 \times 4 \text{ cm}^2$
- compartment 3 : $\sim 8 \times 4 \text{ cm}^2$ in $\eta \times \phi$

Total:
 $\sim 200\,000$
channels

Readout: warm preamps + 3-gain shapers ($t_p \sim 40 \text{ ns}$) + 40 MHz analog pipeline + 12-bit ADC



Atlas ECAL : performances



ATLAS (LARG)

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.1}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.007$$

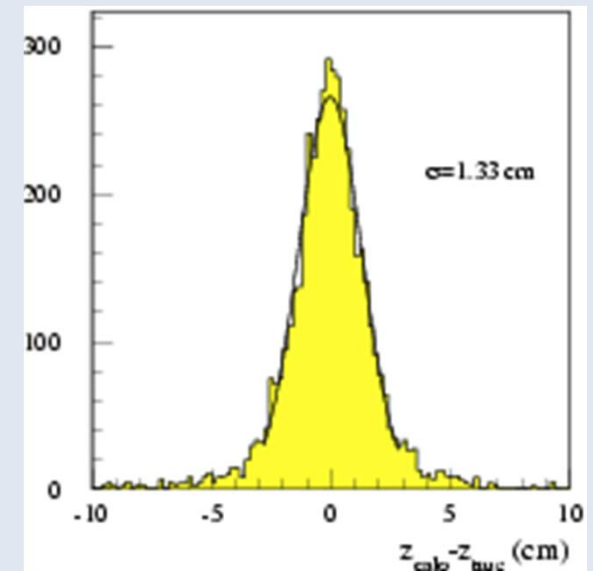
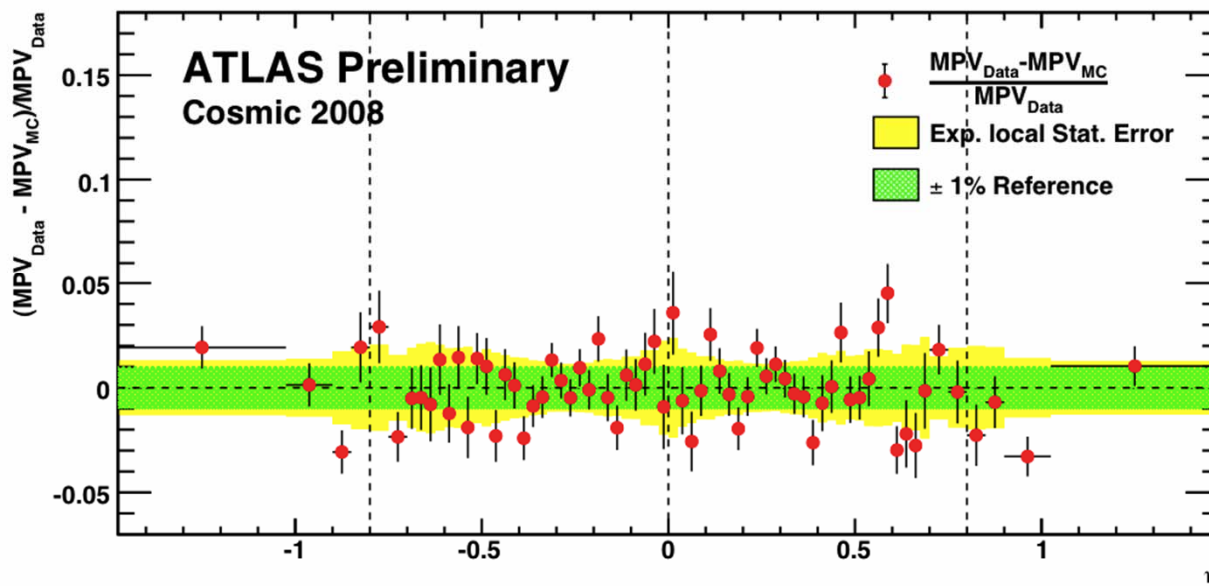
Signal : $H \rightarrow \gamma\gamma$

Bruit : $pp \rightarrow X + \pi^0$

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

3 long segmentations :
 → Reconstruction de la l'angle :
 $\sigma() = 50 \text{ mrad} / \sqrt{E}$

intercalibration

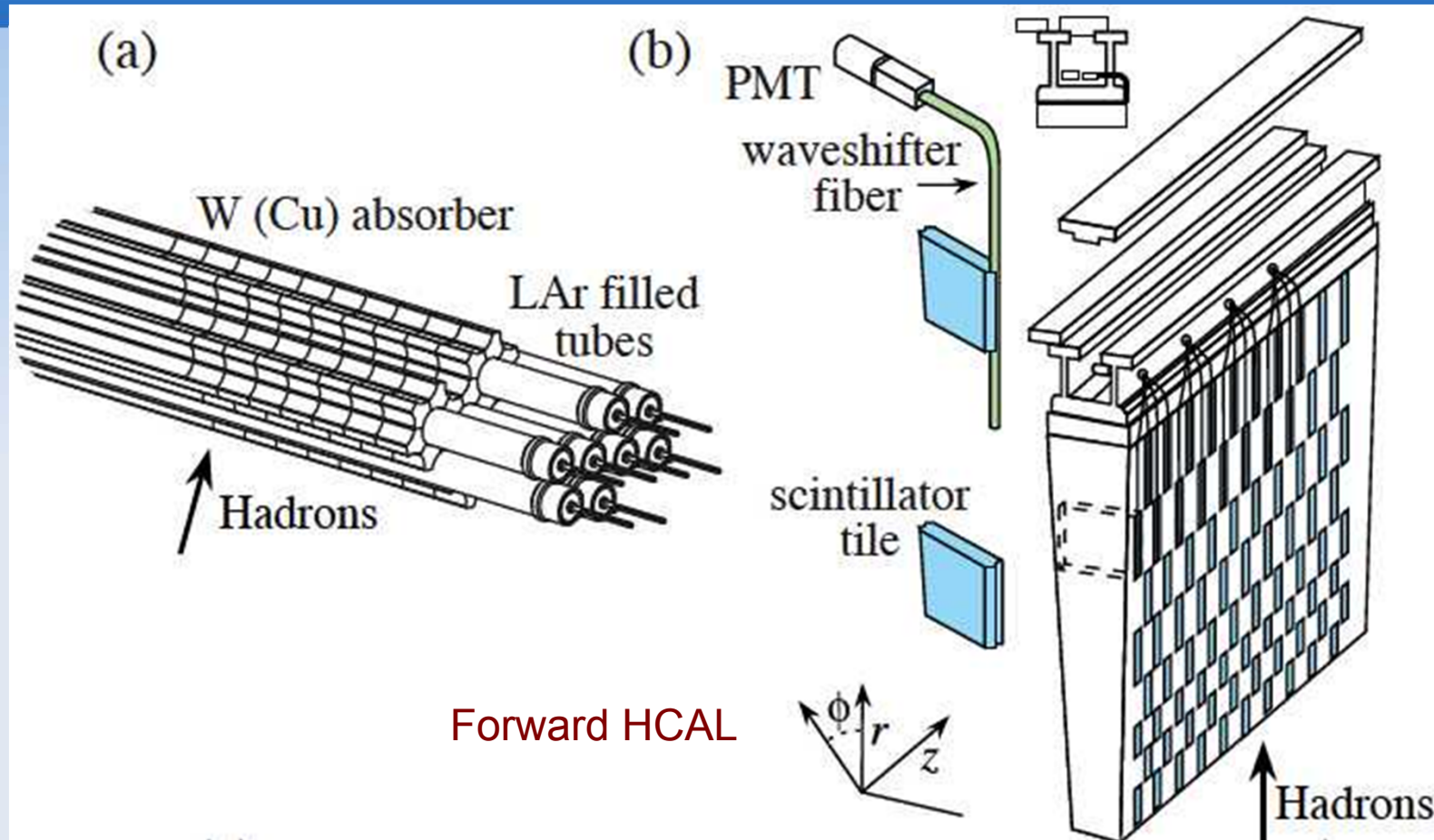


Quelques performances de ECAL

Technology (Experiment)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	20X ₀	2.7%/E ^{1/4}	1983
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO) (L3)	22X ₀	2%/√E ⊕ 0.7%	1993
CsI (KTeV)	27X ₀	2%/√E ⊕ 0.45%	1996
CsI(Tl) (BaBar)	16–18X ₀	2.3%/E ^{1/4} ⊕ 1.4%	1999
CsI(Tl) (BELLE)	16X ₀	1.7% for E _γ > 3.5 GeV	1998
PbWO ₄ (PWO) (CMS)	25X ₀	3%/√E ⊕ 0.5% ⊕ 0.2/E	1997
Lead glass (OPAL)	20.5X ₀	5%/√E	1990
Liquid Kr (NA48)	27X ₀	3.2%/√E ⊕ 0.42% ⊕ 0.09/E	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	20–30X ₀	18%/√E	1988
Scintillator/Pb (CDF)	18X ₀	13.5%/√E	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	15X ₀	5.7%/√E ⊕ 0.6%	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	27X ₀	7.5%/√E ⊕ 0.5% ⊕ 0.1/E	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	21X ₀	8%/√E	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	20–30X ₀	12%/√E ⊕ 1%	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	20.5X ₀	16%/√E ⊕ 0.3% ⊕ 0.3/E	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	25X ₀	10%/√E ⊕ 0.4% ⊕ 0.3/E	1996

HCAL CMS & Atlas

ATLAS HCAL



Barrel HCAL
Fe + Plastic
+ WLS

En test en faiceau de π : $52.9\%/\sqrt{E} \oplus 5.7\%$

HCAL : CMS & Atlas

	ATLAS	CMS
Technology		
Barrel / Ext. Barrel	14 mm iron / 3 mm scint.	50 mm brass / 4 mm scint.
End-caps	25 mm (front) - 50 mm (back) copper / 8.5 mm LAr	80 mm brass / 4 mm scint.
Forward	Copper (front) - Tungsten (back) 0.25 - 0.50 mm LAr	4.4 mm steel / 0.6 mm quartz
# Channels		
Barrel / Ext. Barrel	9852	2592
End-caps	5632	2592
Forward	3524	1728
Granularity ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		
Barrel / Ext. Barrel	0.1 x 0.1 to 0.2 x 0.1	0.087 x 0.087
End-caps	0.1 x 0.1 to 0.2 x 0.2	0.087 x 0.087 to 0.35 x 0.028
Forward	0.2 x 0.2	0.175 x 0.175
# Longitudinal Samplings		
Barrel / Ext. Barrel	Three	One
End-caps	Four	Two
Forward	Three	Two
Absorption lengths		
Barrel / Ext. Barrel	9.7 - 13.0	5.8 - 10.3 10 - 14 (with Coil / HO)
End-caps	9.7 - 12.5	9.0 - 10.0
Forward	9.5 - 10.5	9.8

TB single π : 52.9%/ $\sqrt{E} \oplus 5.7\%$

Single π ECAL+HCAL : 110%/ $\sqrt{E} \oplus 7.3\%$
84.7% / $\sqrt{E} \oplus 7.4\%$ corrected for ECAL/HCAL non lin.

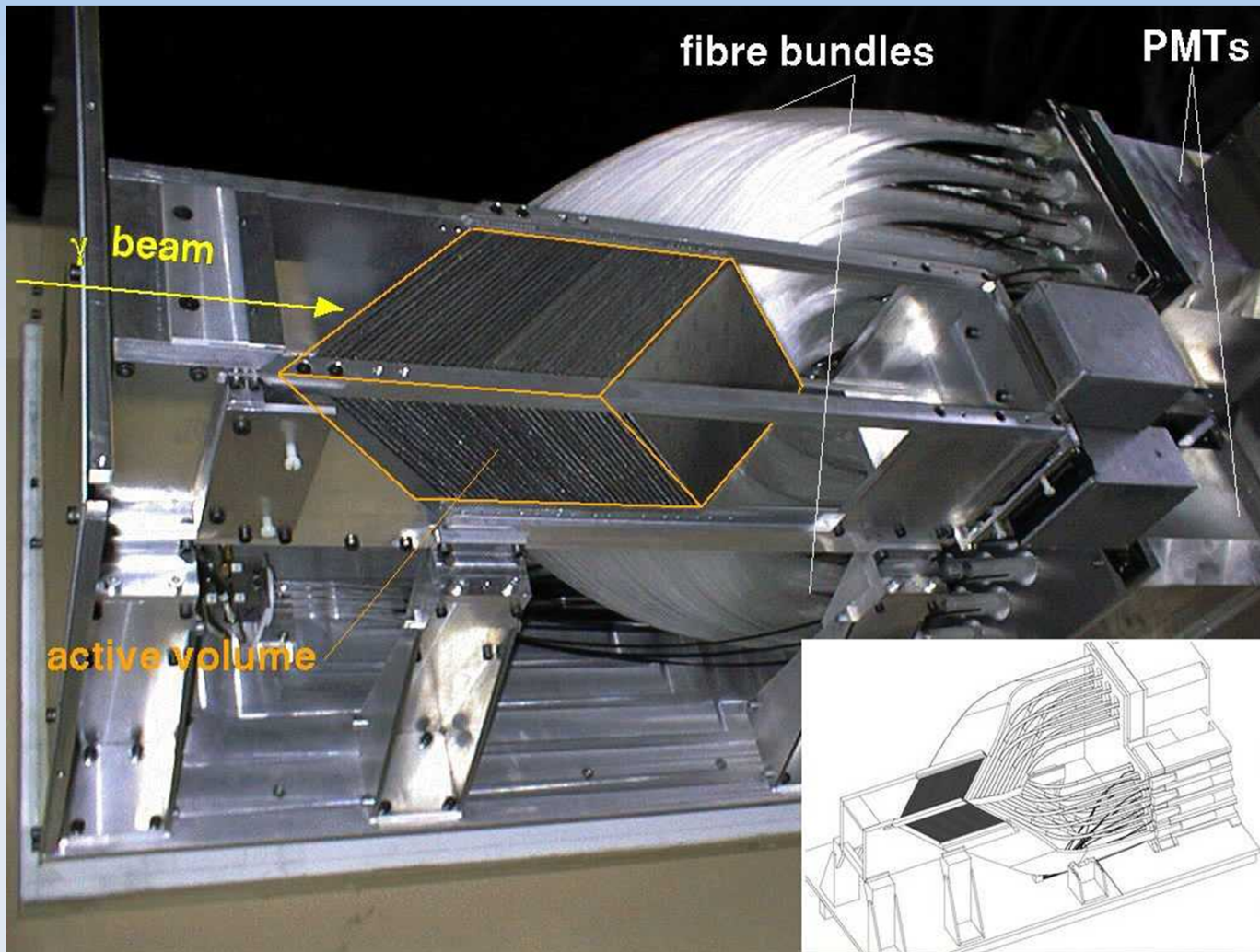
MET fits

ATLAS using super cluster $\rightarrow 37\% / \sqrt{\sum E}$

CMS using Part. FLow $\rightarrow 45\% / \sqrt{\sum E}$

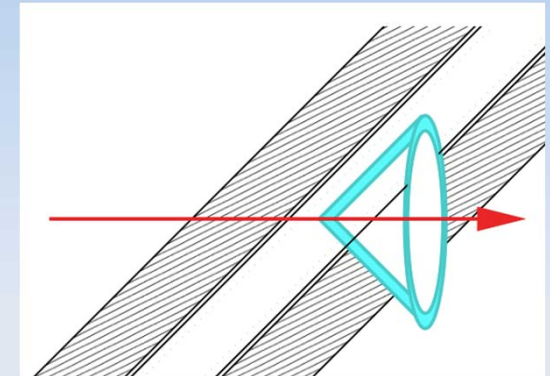
Des calorimètres Čerenkov

Luminomètre de H1



Hodoscope à γ

- ▶ Angle fixé

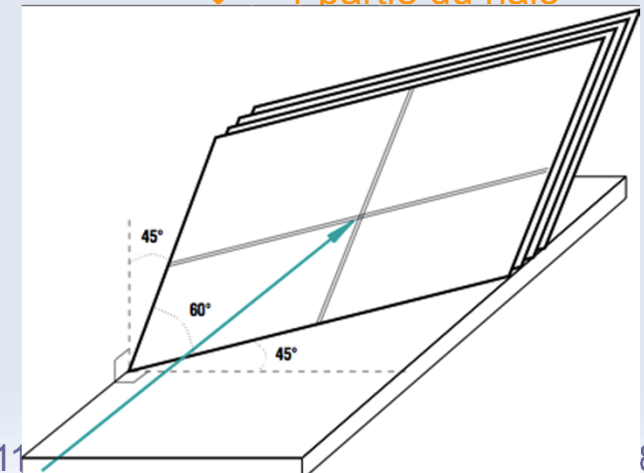


- ▶ Fibre de Quartz

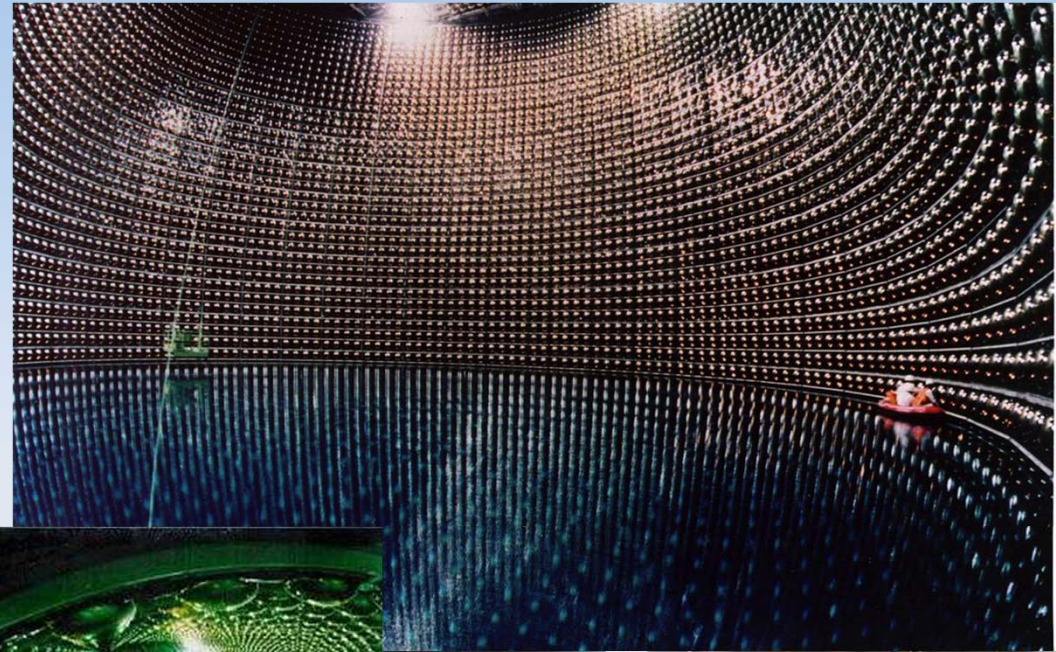
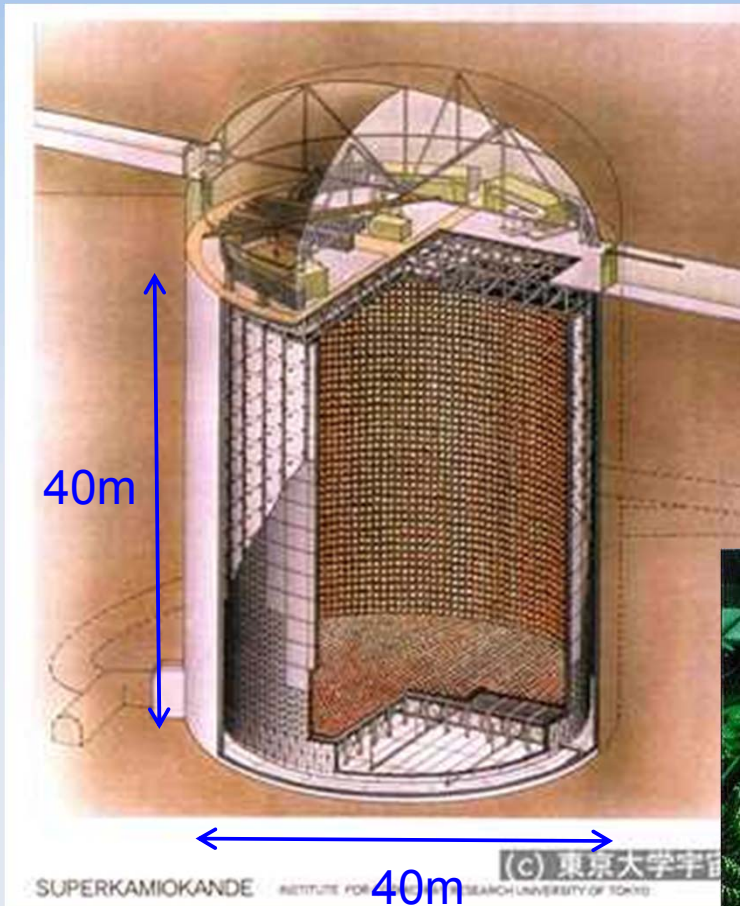
- ▶ Sensibilité

- ◆ Cœur de gerbe

- ◆ + 1 partie du halo

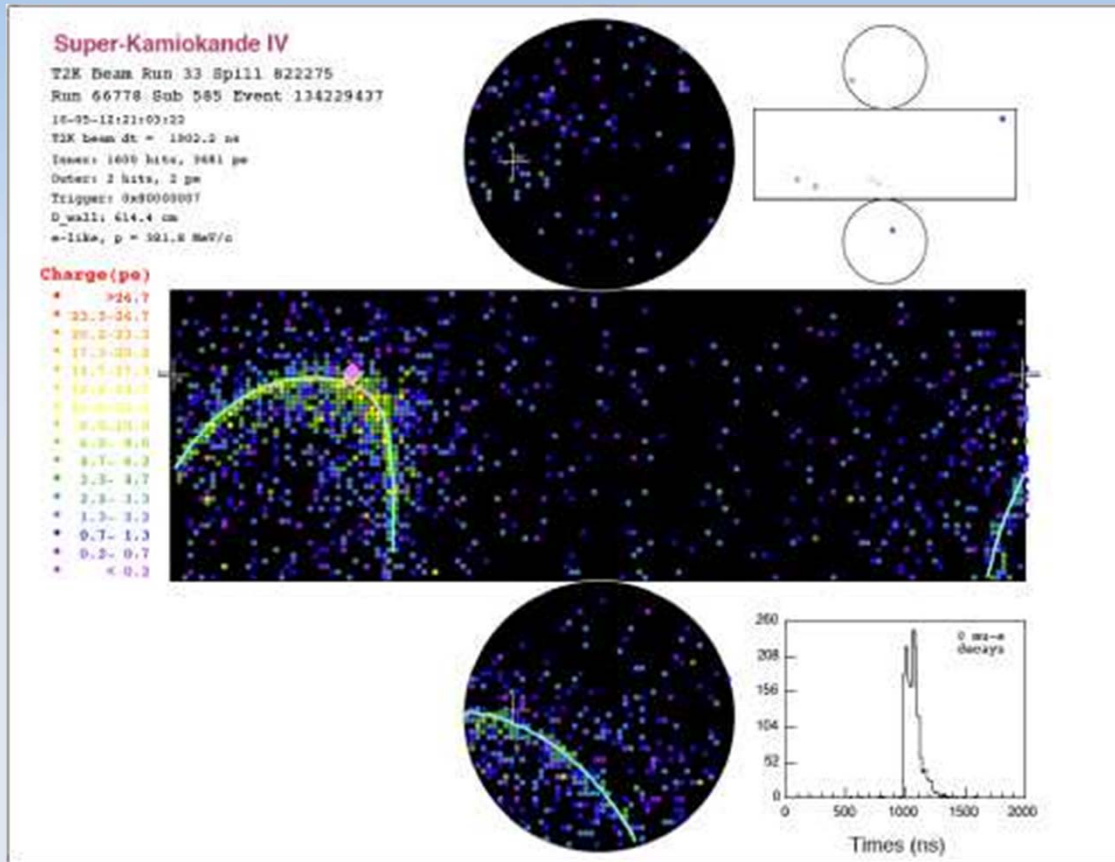


neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



50 kt eau pure
12000 PMTs
(remplacés 1 fois)

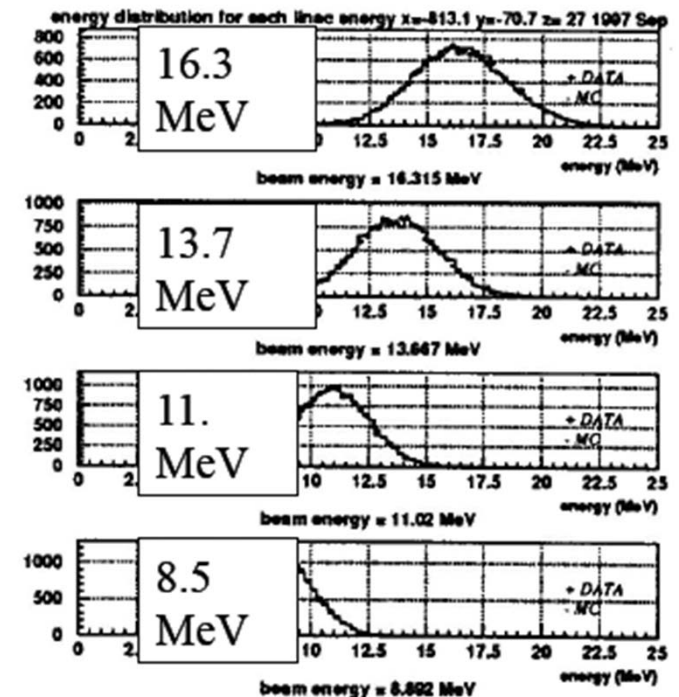
neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



1 événement d'apparition
d'électron (cette semaine)

$\sigma(E)/E = 2.5\%$ (for 1GeV)
to 16% (for 10MeV)
Energy threshold : 5 MeV

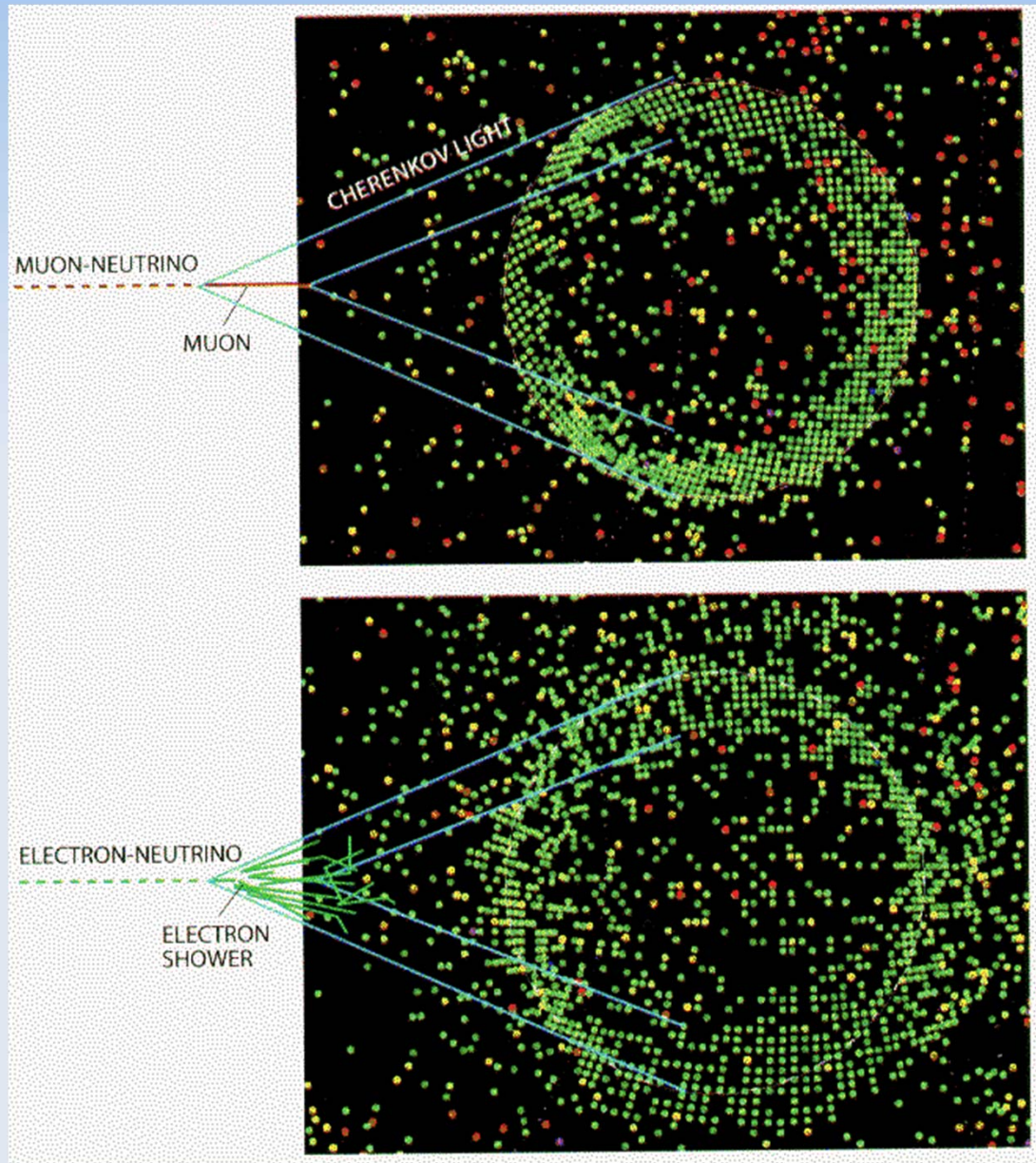
Uniformity and stability of response vs
position and time to $\pm 0.5\%$
to avoid distortions in measured spectrum.



LINAC: injects electrons of 7 different
energies at 6 different positions

Super-K

Identification de particules



Bonus...
Après — avant construction

Quelques effets «annexes»

- Texas tower
 - ▶ Reponse disproportionnée à des neutrons
 - ◆ neutron \sim MeV dans le senseur, localisé
 - collision élastique n-p
 - ◆ \rightarrow signal \sim GeV

- ▶ Vu dans les détecteurs gazeux (\Rightarrow Hydrogène)
- ▶ Vu dans les APD de CMS (pbm de triggers)

- Rupture de gain
 - ▶ Electronique multi-gain
 - ▶ $\boxed{?}$ intercalibration \rightarrow apparition de pics !



découverte d'une «nouvelle» physique !

Quelques considérations pour les ingénieurs (mais pas uniquement!)

- La mécanique : le calorimètre volant
 - ▶ Zone mortes
 - ▶ déformations / précision
- L'électronique
 - ▶ La consommation (power pulsing)
 - ▶ La dissipation thermique
 - ▶ les CEM, mise à la masse
- Les services
 - ▶ passage des services
 - ▶ l'intégration
- L'acquisition
 - ▶ Flux de données
 - ▶ Redondance
 - ▶ Fiabilité de l'électronique «profonde» [REM : ce n'est pas spatial]
- L'intégration
 - ▶ Coûts
 - ▶ Risques :
 - ◆ la dépendance à 1 fournisseur
 - ◆ obsolescence du matériel : déjà vieux à l'installation

Quelques considérations pour les ingénieurs (mais pas uniquement!)

- La mécanique : le calorimètre volant
 - ▶ Zone mortes
 - ▶ déformations / précision
- L'électronique
 - ▶ La consommation (power pulsing)
 - ▶ La dissipation thermique
 - ▶ les CEM, mise à la masse
- Les services
 - ▶ passage des services
 - ▶ l'intégration
- L'acquisition
 - ▶ Flux de données
 - ▶ Redondance
 - ▶ Fiabilité de l'électronique «profonde» [REM : ce n'est pas spatial]
- L'intégration
 - ▶ Coûts
 - ▶ Risques :
 - ◆ la dépendance à 1 fournisseur
 - ◆ obsolescence du matériel : déjà vieux à l'installation