

La calorimétrie

Techniques de base

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



***École du détecteur à la mesure
Roscoff, juin 2015***



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
- Techniques de base de détection
 - ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
 - ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
 - ▶ Détecteurs Gazeux
 - ▶ Quelques exemples
 - ▶ Effets annexes, et considérations «pour ingénieurs»
- Techniques avancées, la pratique et le futur...
 - ▶ Quelques ruses...
 - ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout vs. particle flow.
 - ◆ ILC & CMS-HGCAL

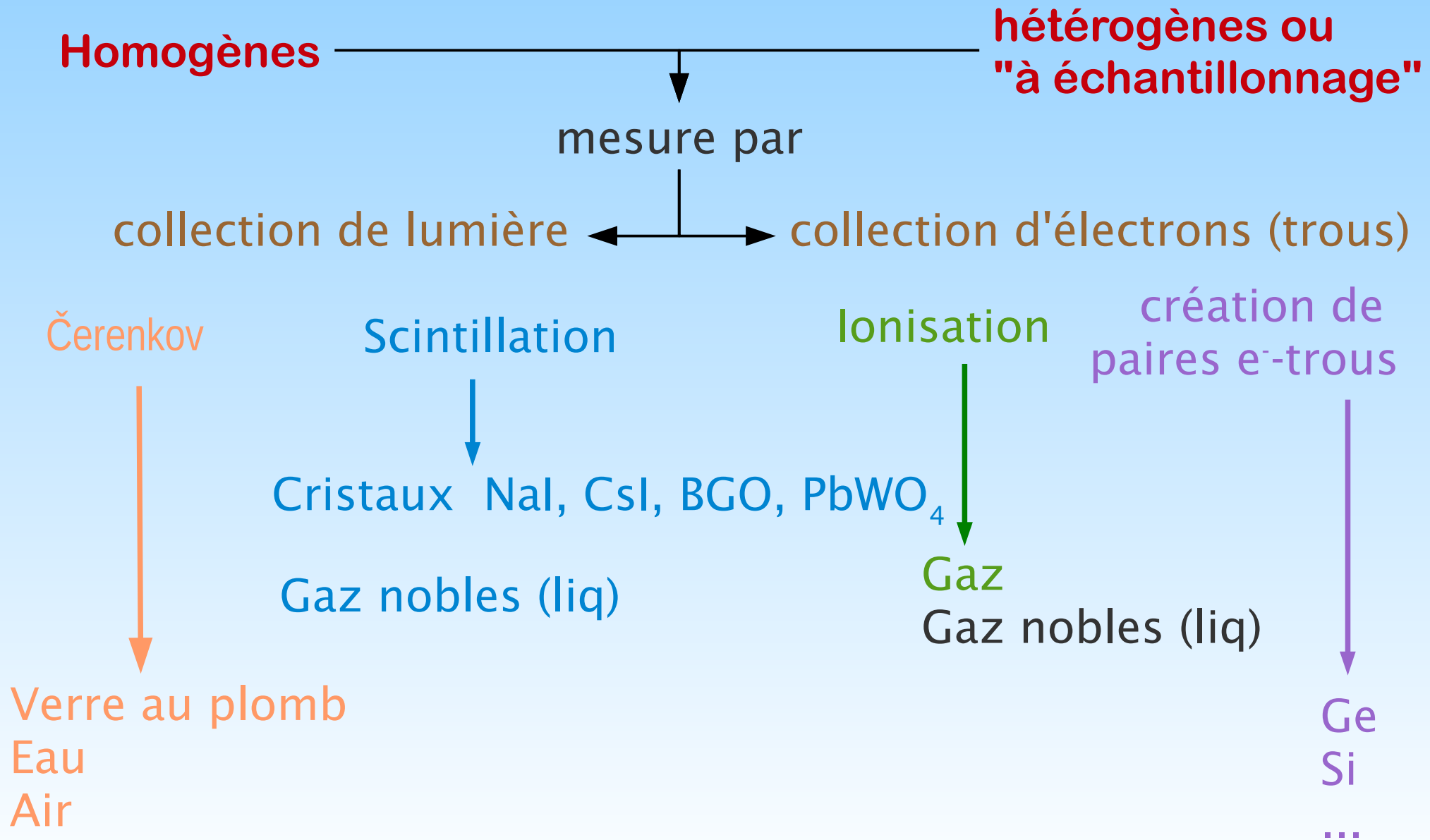
Mercredi

Jeudi

Vendredi

Choix des outils : Les capteurs

Arbre technologique



Calorimètres à échantillonnage

Radiateur + Capteur

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 Čerenkov,

chambres à ionisation, argon liquide, liquides chauds,

chambres à gaz en différents modes (prop, streamer, Geiger),

détecteurs silicium.

Quelles épaisseurs ?

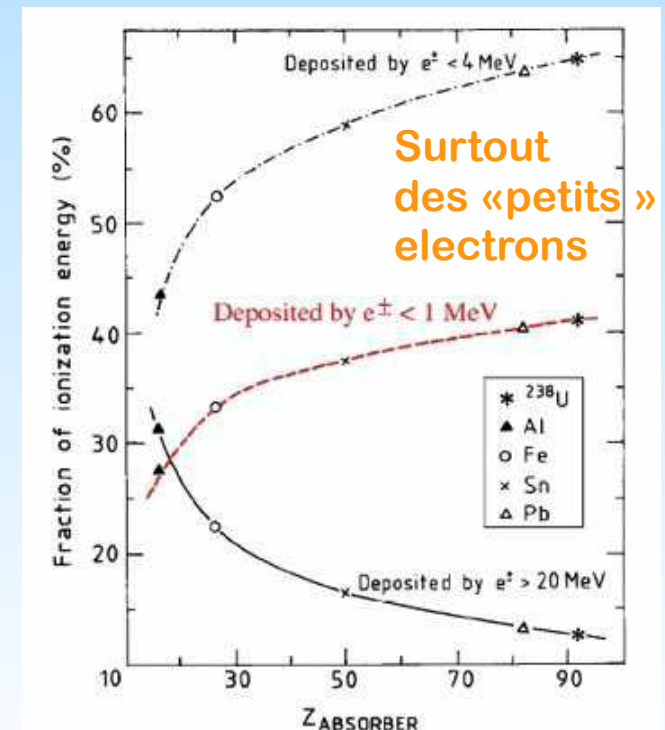
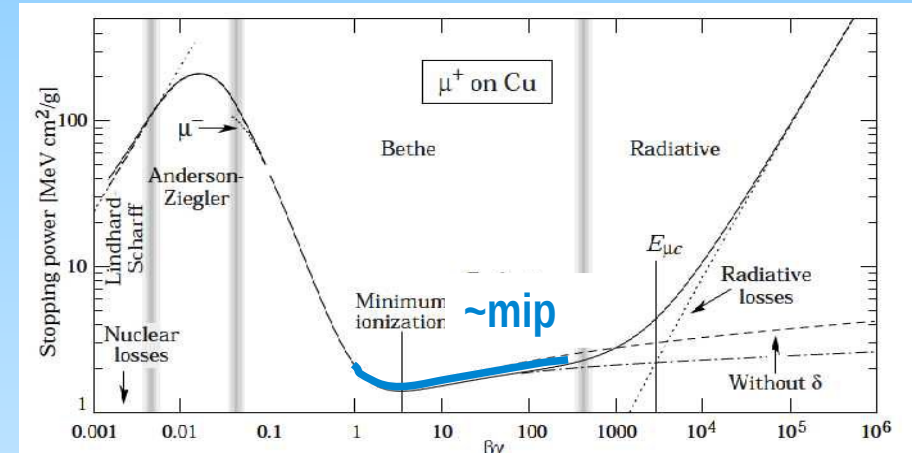
Fraction d'échantillonnage

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

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

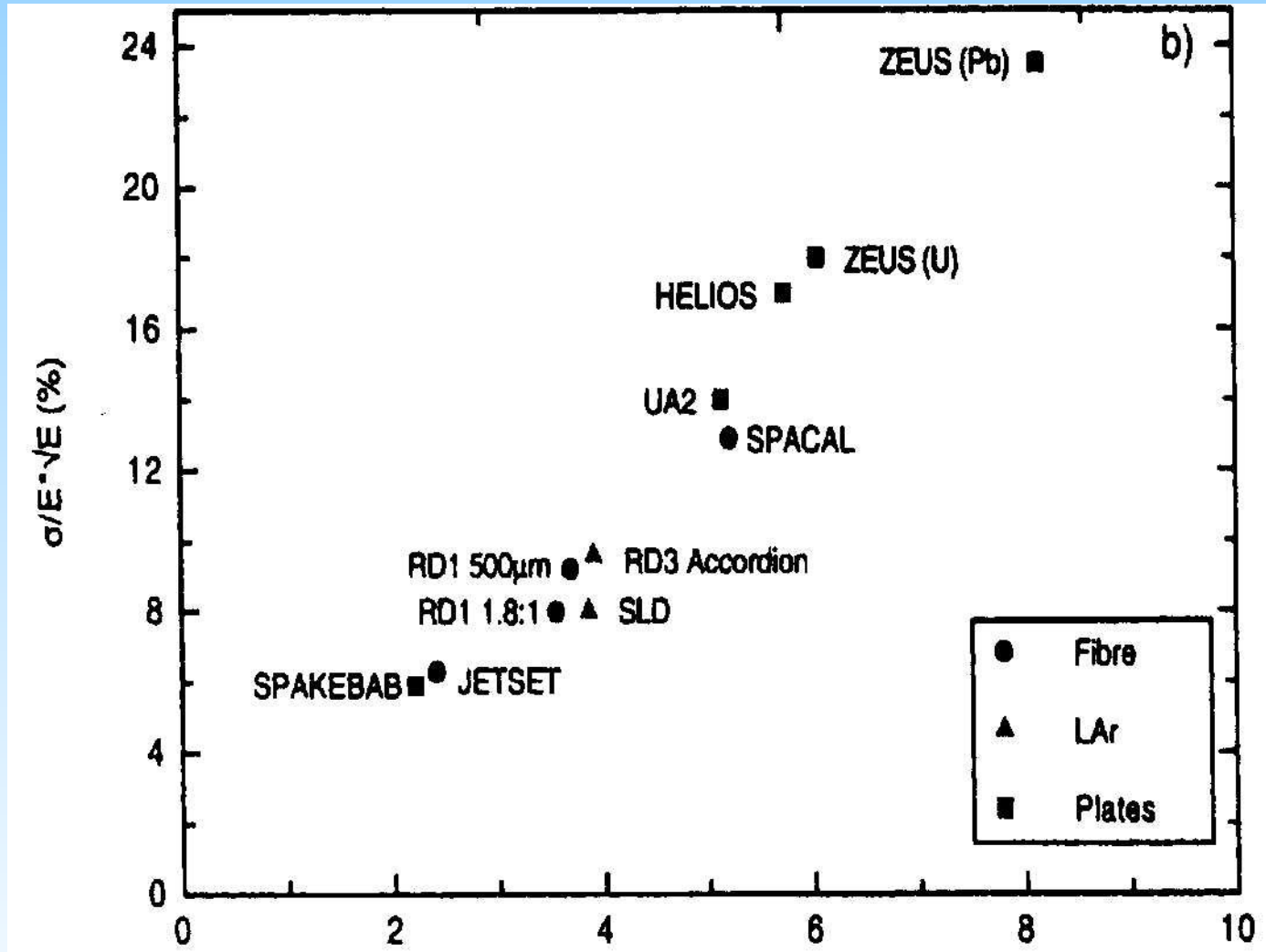
- Calorimètres homogènes : $e/\mu = 1$
- Calorimètre à échantillonnage : $e/\mu < 1$ (ou $\ll 1$)
 - ▶ petits photons absorbés : $\sigma_{\text{p.e.}} \propto Z^4$
 - ▶ Emission de X par les grands Z

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



Résolution vs $f_{\text{échant.}}$

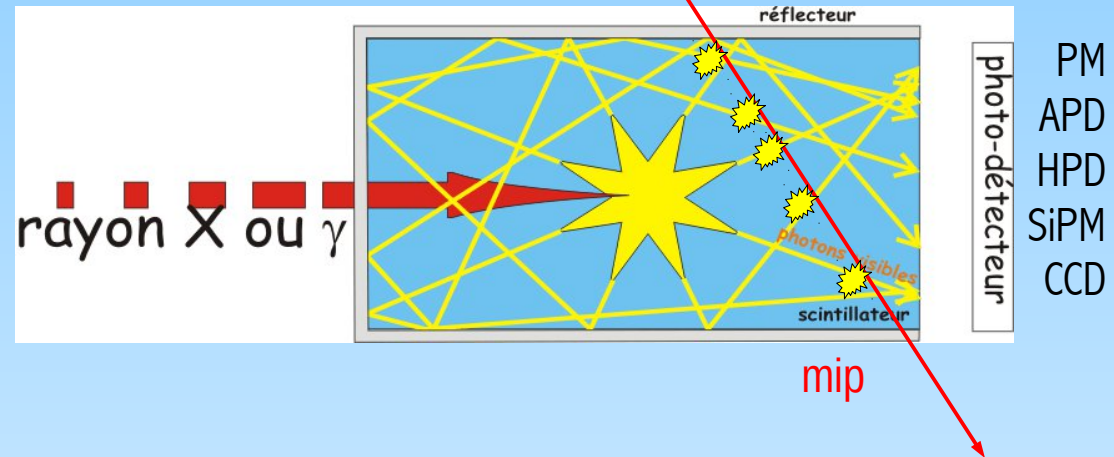
R. Wigmans



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

Scintillateurs

- Conversion d'une partie de l'ionisation en lumière
 - ▶ fluorescence = émission immédiate
 - ▶ phosphorescence = émission retardé
- Avantages / Désavantages
 - ▶ ⊕ peu de bruit (lumière)
 - ▶ ⊖ nécessite une conversion lumière → élect.



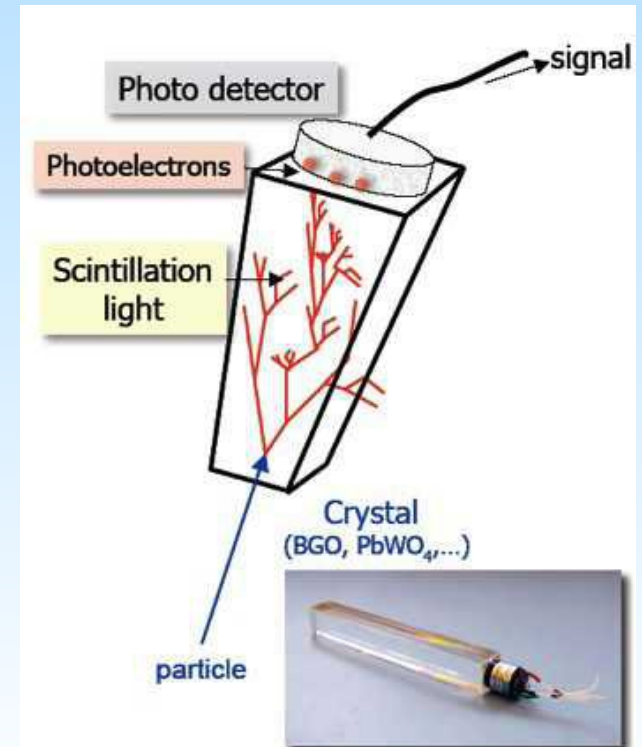
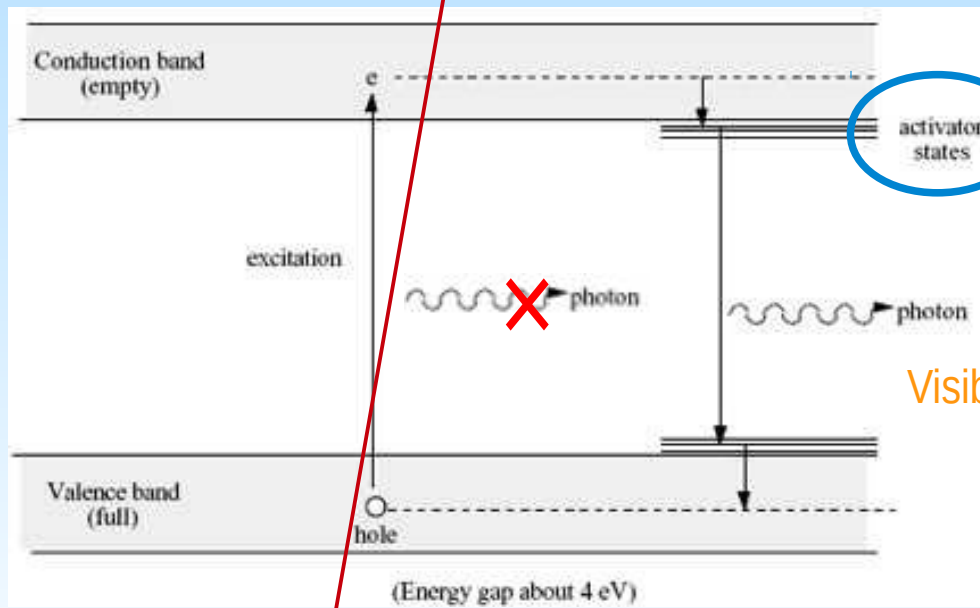
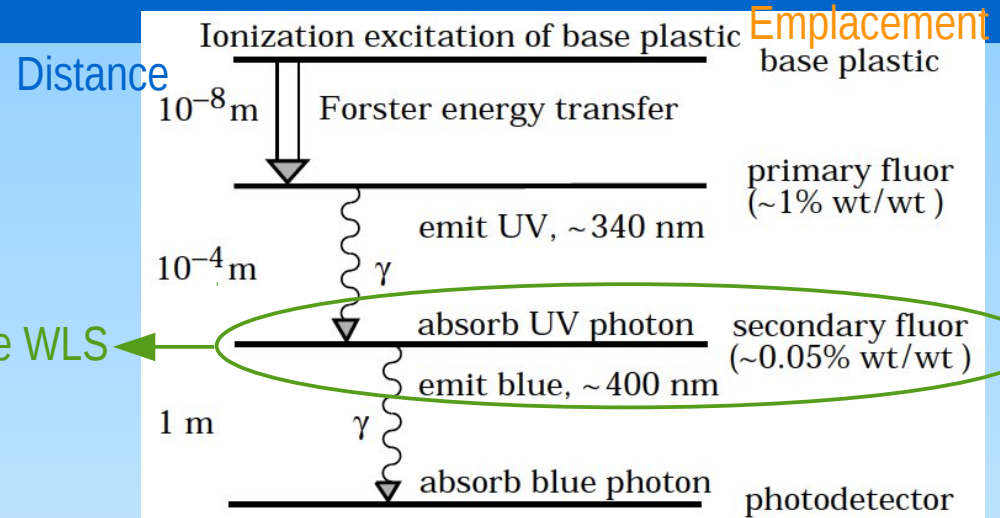
- ▶ organique
 - ◆ peu chers
 - ◆ légers, peu sensibles aux γ
 - échantillonnage
 - ◆ flexibles (solide / liquide, fibres, ...)
 - ◆ rapides (~ 0.1 ns)
 - ◆ sensibles aux n (\supset H)
 - ◆ Sensibilité aux radiations.
 - Récupération à l'Oxygène
 - ◆ Ex : polystyrène

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

Mécanismes de scintillation

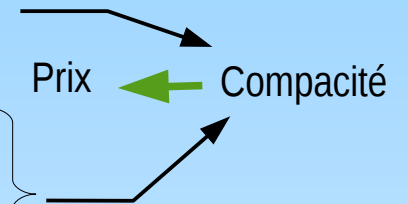
- Organique :
 - ▶ Chaîne complexes & rapide molécule → molécules.

- Inorganique :



Quelques scintillateurs inorganiques

Crystal	Nal(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?	-	-



Č + optique
Mécanique

Optique + Ampli

$\sigma(t)$ + DAQ

$\sigma(E)$

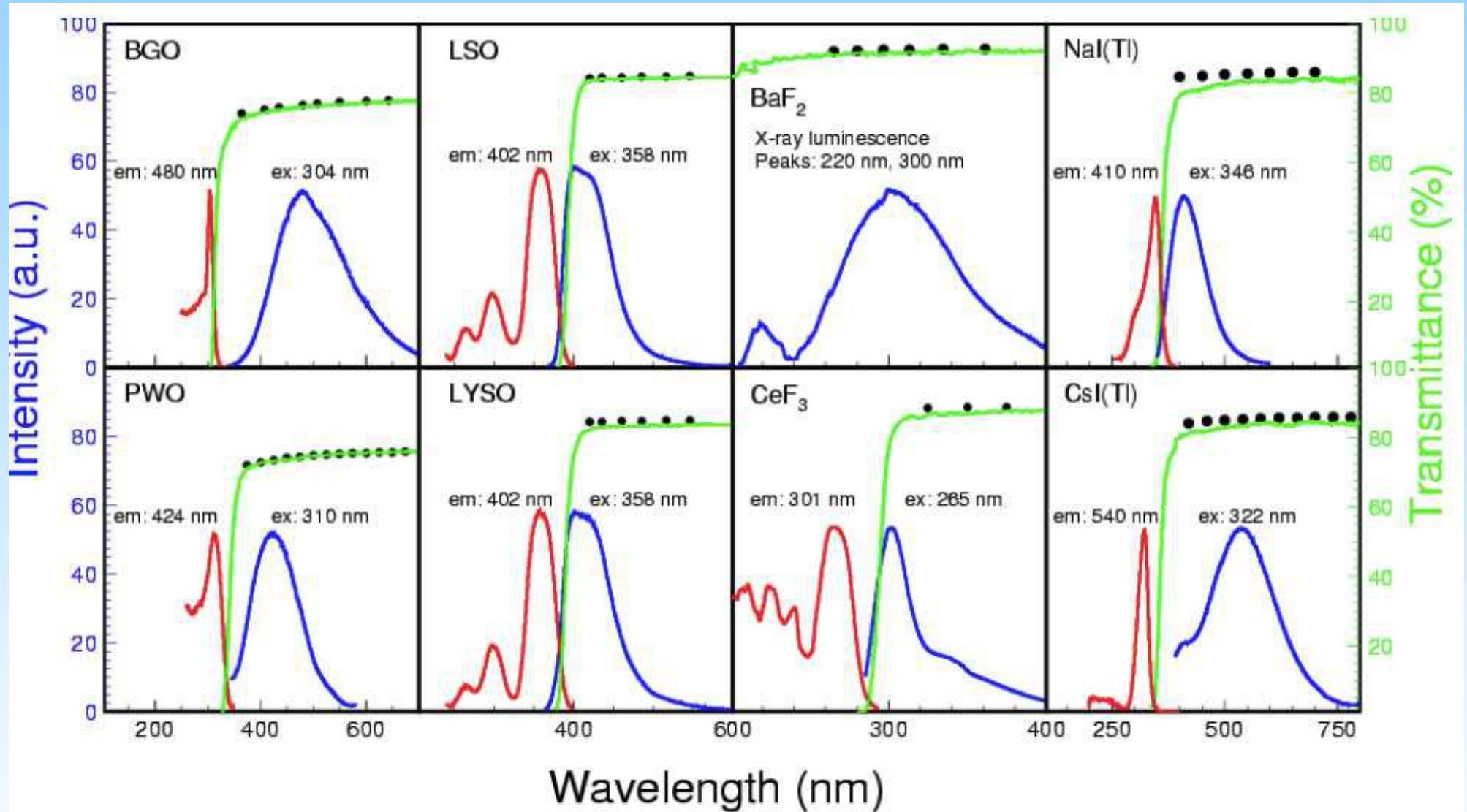
Stabilité en temp.

+ Longueur abs.
+ résistance Rad.

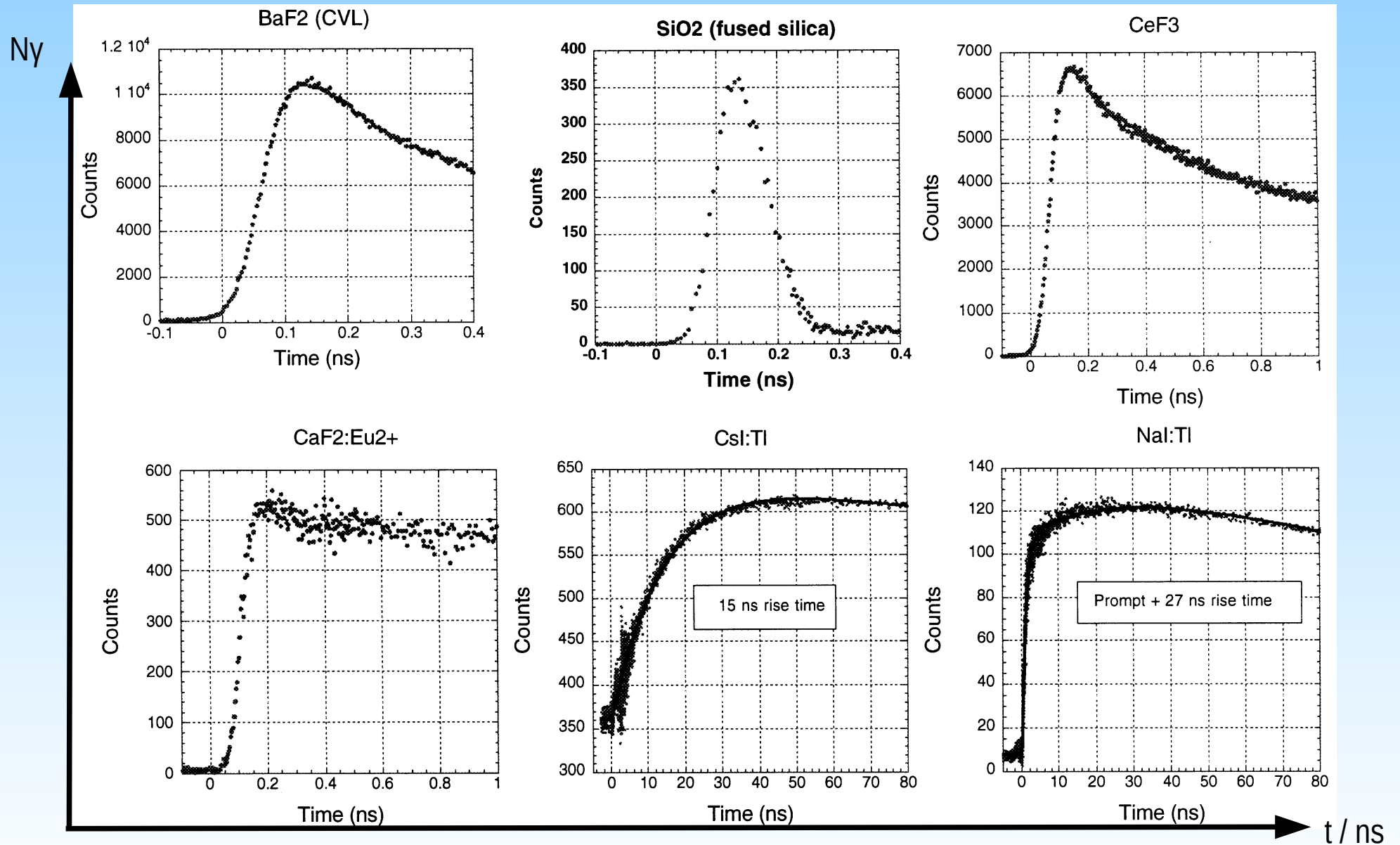
a. at peak of emission; b. up/low row: slow/fast component; c. PMT QE taken out.

R.-Y. Zhu @ CALOR 2010

Lumière des scintillateurs



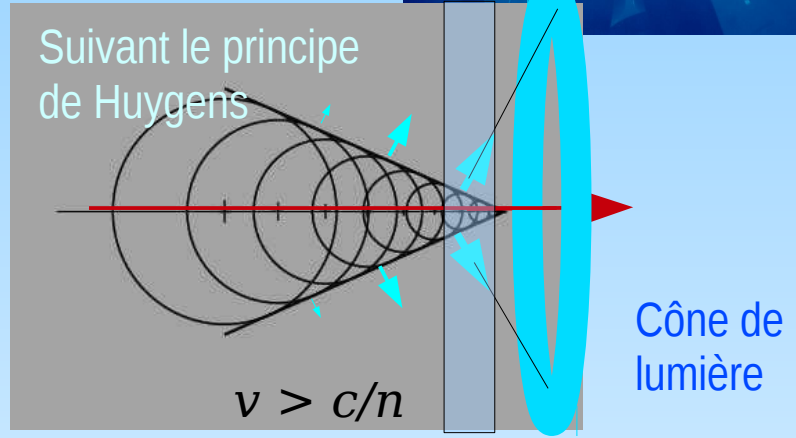
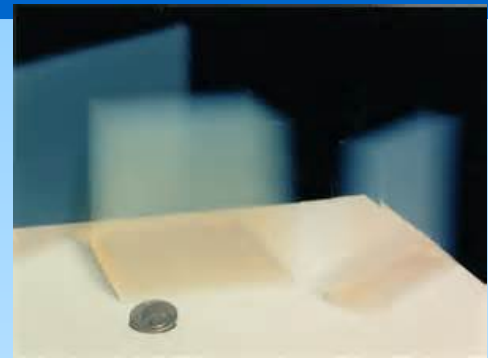
Courbes de lumière



Čerenkov

- Types

- ▶ Cristaux : indice > 1,5
- ▶ Verre au Plomb
- ▶ Gels de Silice
- ▶ Fibres à quartz («Fused silica»)



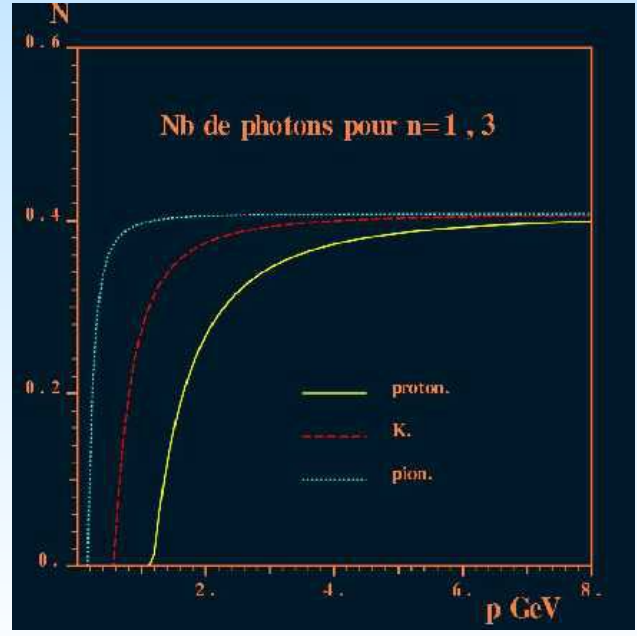
Exemples : Luminomètre de H1, FCAL de CMS, DREAM
Sensibilité ; RadHard

$$\cos \theta_y = \frac{1}{n\beta} + \frac{n^2 - 1}{2n\beta} \frac{E_y}{E_1} \quad \text{si} \quad \frac{1}{n} < \beta$$

$$N_y : \frac{d^2 N}{dx dE_y} = \frac{\alpha}{\hbar c} \sin^2 \theta_y$$

TB résolution en temps

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



Rendements...

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-Détecteurs

- Amplifications

- ▶ Photo-Multiplicateurs

- ◆ simples
 - ◆ multi-anode

- ▶ Hybride Photo-Diodes (HPD)

- ◆ PIN diode + HT

- ▶ Avalanche PD

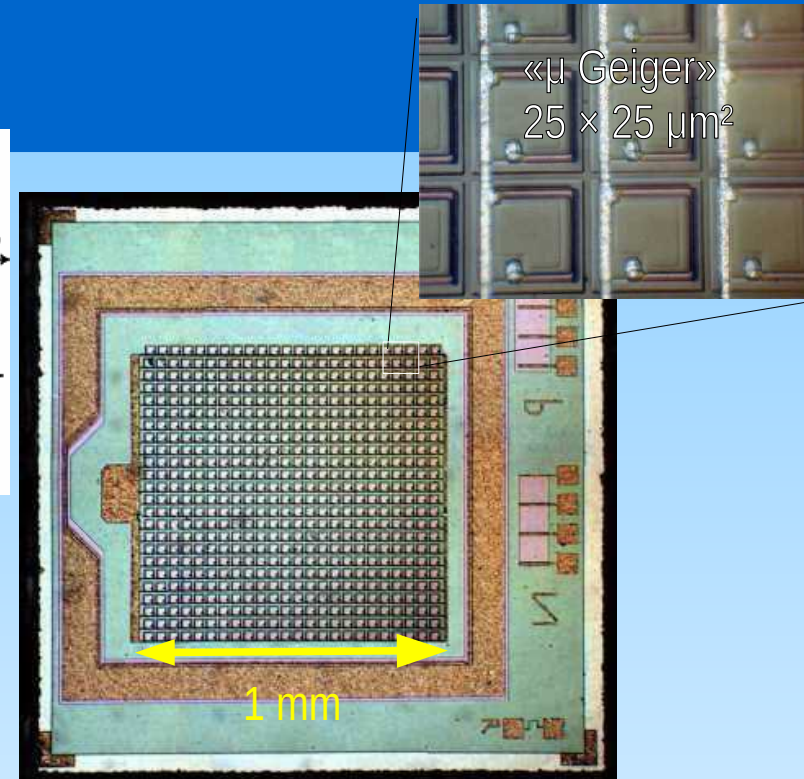
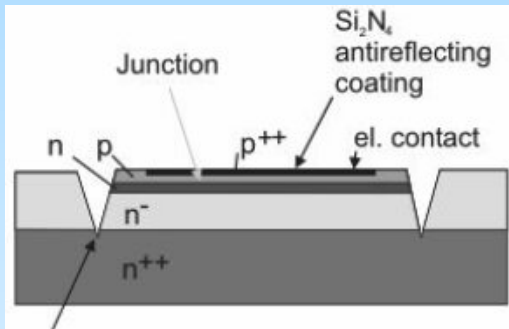
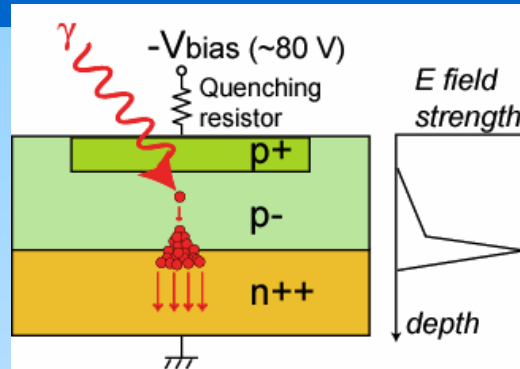
CMS ECAL

- ▶ Pixelized Photo-Detectors (PPD / SiPM / MPPC)

- Gain 1

- ▶ pour complétion (pas dans les calos)

- ◆ ex : CNAO, systèmes d'étalonnage



Efficacité quantique
Surface
Gain
Linéarité
Bruit

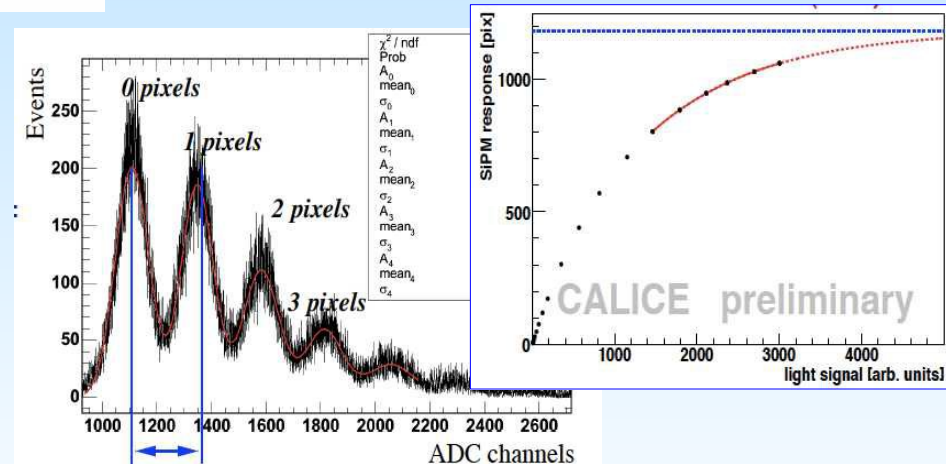


Photo-détecteurs

100nm λ <math>< 1000\text{ nm}</math>

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	$O(100)$ 10
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 inéluctable (O)

- Exemple NA48, H1, D0, ATLAS

- ▶ Projets : Chambres larges biphasée
→ «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

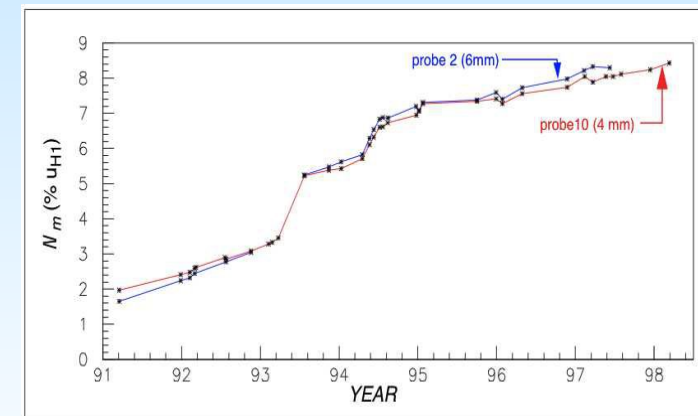
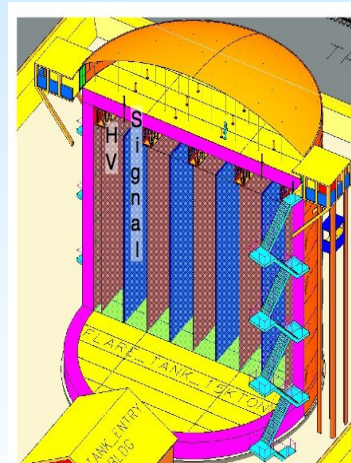
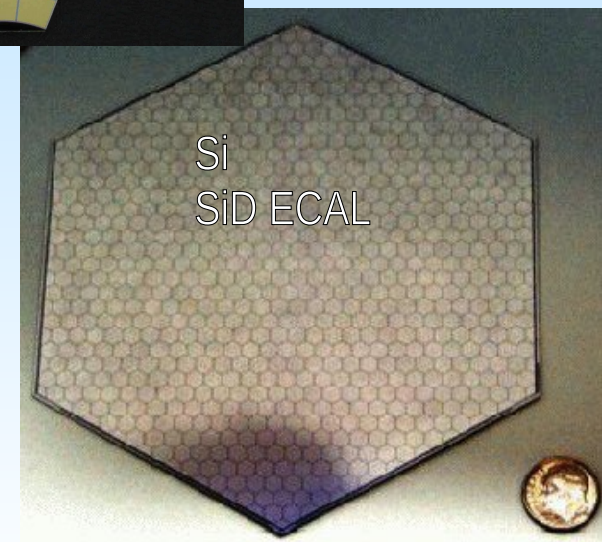
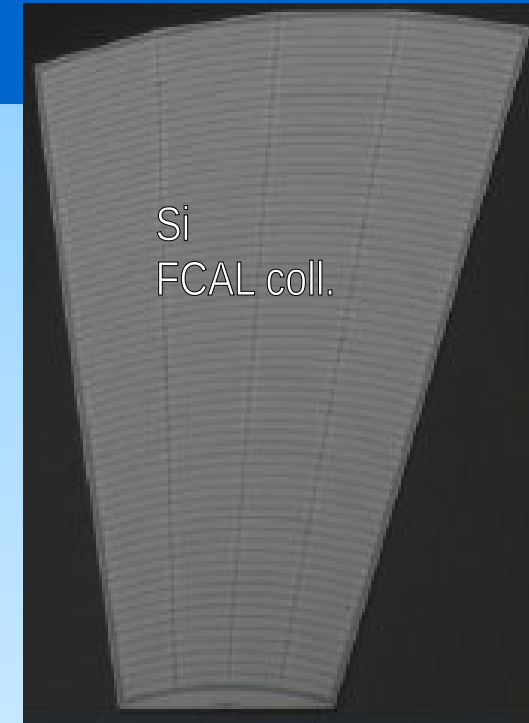
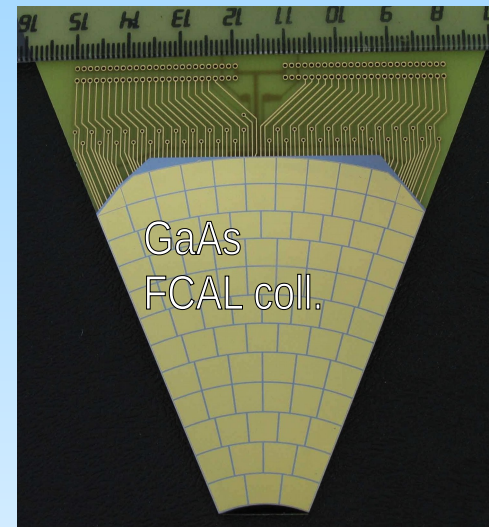


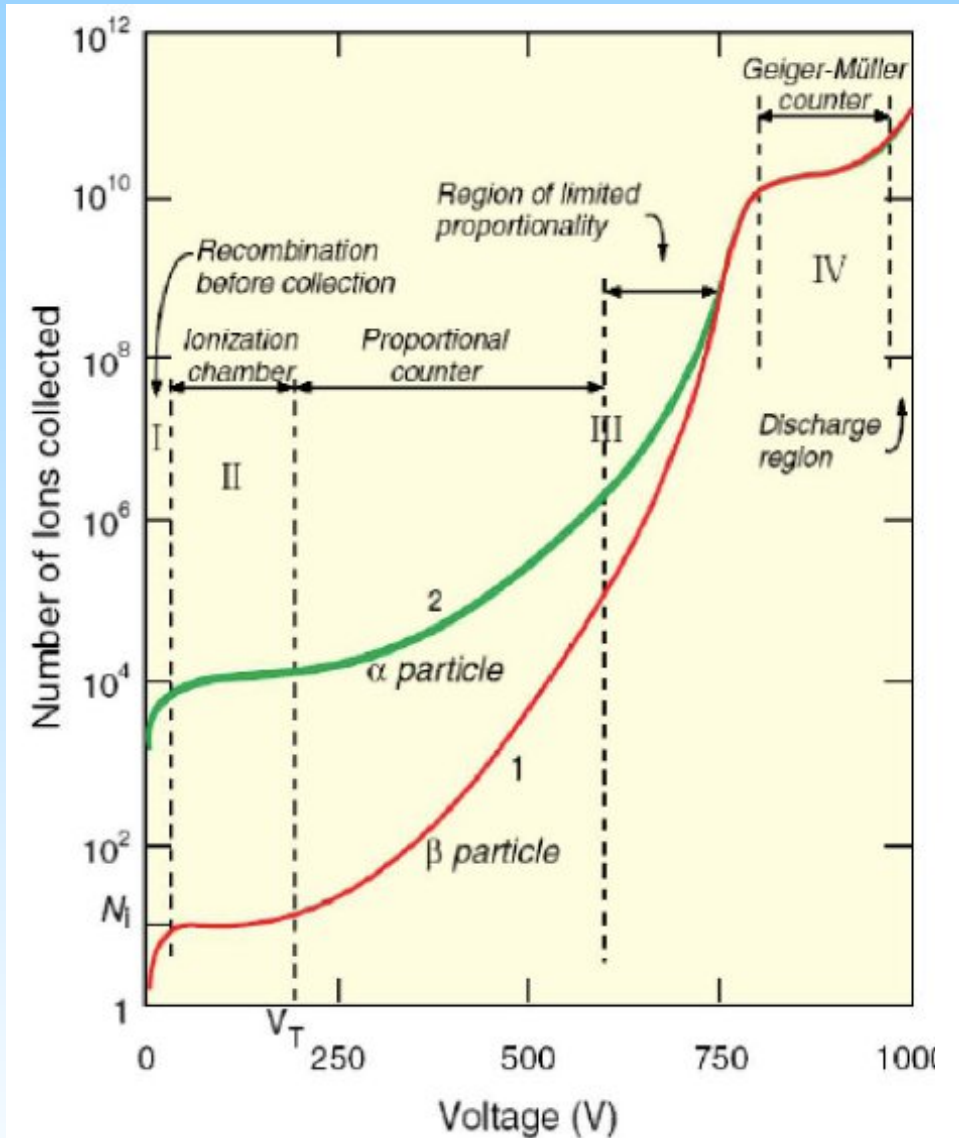
Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

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 (RadHard)
- ⊕ Très bon rendement
 - ▶ $w_{e-h} \sim \text{qq eV} \rightarrow \sim 100 \text{ e-h}/\mu\text{m}$
 - ▶ Facteur de Fano \rightarrow meilleur que $1/\sqrt{N}$
 - ▶ Stabilité, sensibilité au mip
- ⊖ Prix



Détecteurs Gazeux : amplification



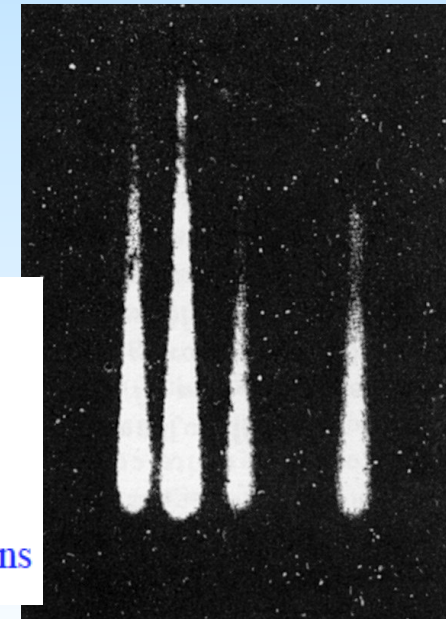
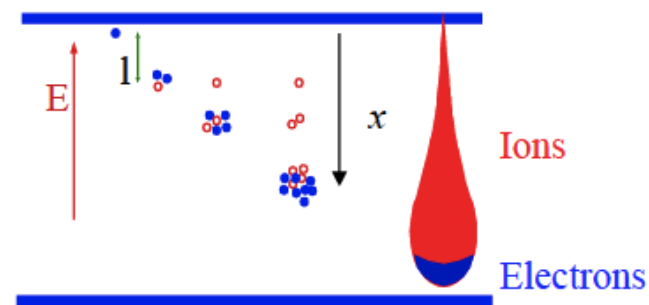
- Forts gains : $10^6 - 10^7$
- Temps de récupération
 - ▶ ($\sim 1/\text{Gain}$)
 - ▶ Peut-être local
- Géométrie

Cylindrique : Geiger

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

Plane

- ◆ Champ constant
- ◆ plusieurs zone

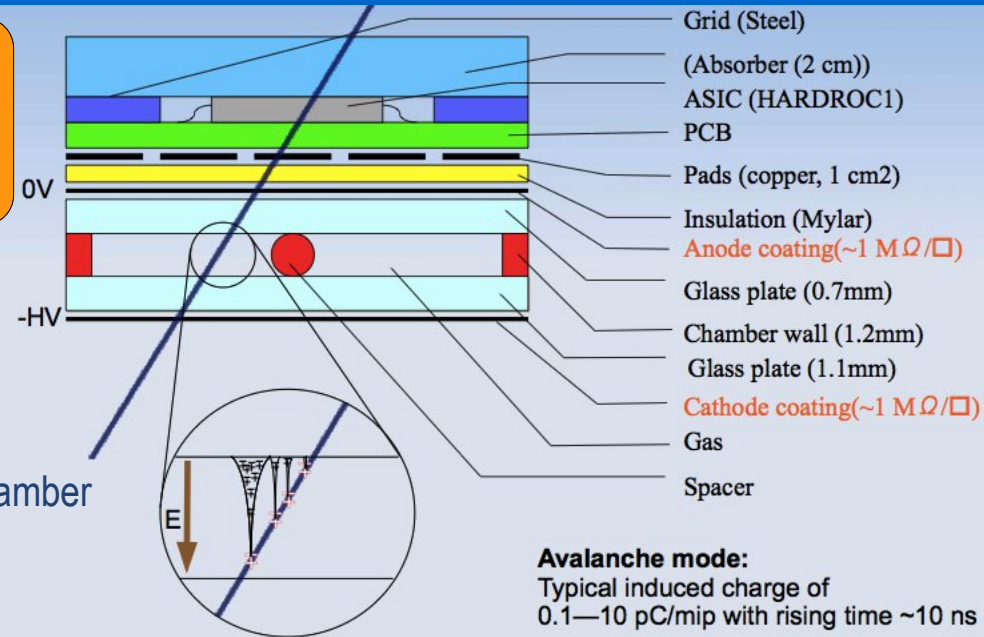


Détecteurs gazeux

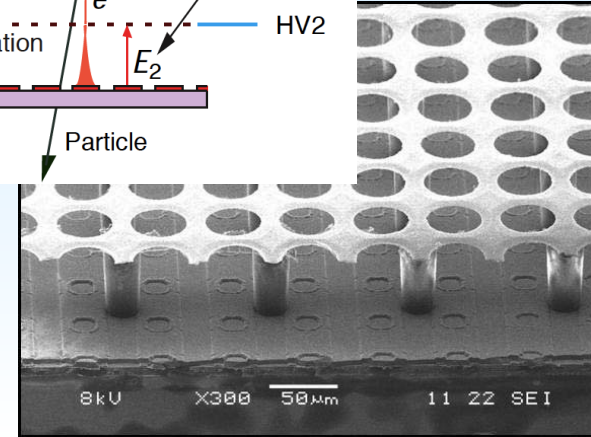
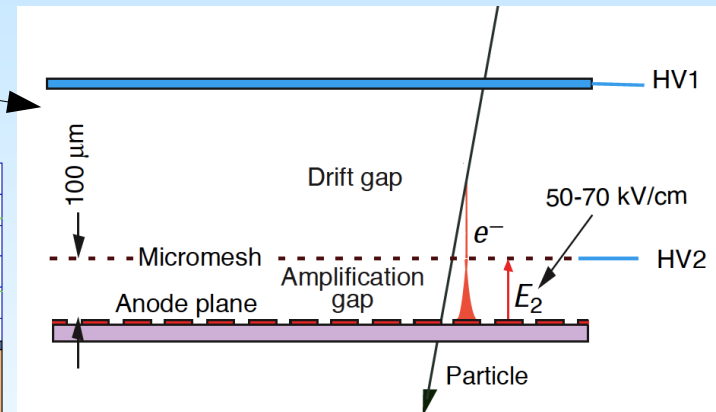
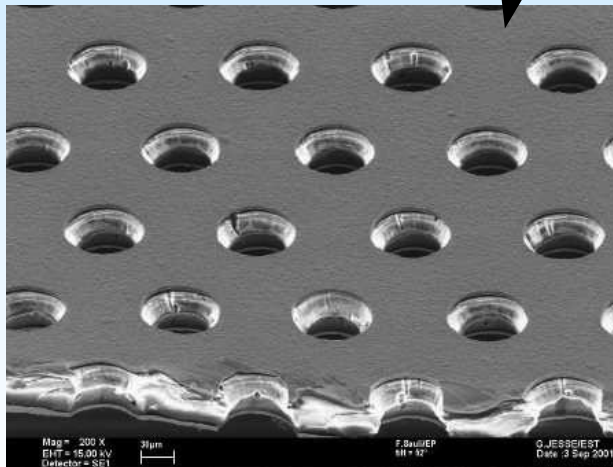


- ⊕ **Larges surfaces, (coût)**
- ⊕ **(Rapidité)**
- ⊖ **$f_{\text{échant.}}$**

- Tubes (Proportionnels, Geiger)
 - ▶ Aleph, Muons Atlas
- GRPC : (Glass) Resistive Plate Chamber
 - ▶ Muons CMS



- MicroMegas
- GEMs



MonBeauCaloShooping.fr

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 175–450 μm	\sim 200 ns	\sim 2 μs
Micro-pattern gas detectors [8]	30–40 μm	< 10 ns	20 ns
Resistive plate chamber [9]	\lesssim 10 μm	1–2 ns	\leq 10 ms
Silicon strip	pitch/(3 to 7) ^f	<i>g</i>	<i>g</i>
Silicon pixel	2 μm^h	<i>g</i>	<i>g</i>

Effets de saturation

- Pour les particules fortement ionisantes

- ▶ part. basse E
- ▶ α
- ▶ fragments

- Scintillateurs

- ▶ Loi de Birks

- Gaz nobles liquéfiés

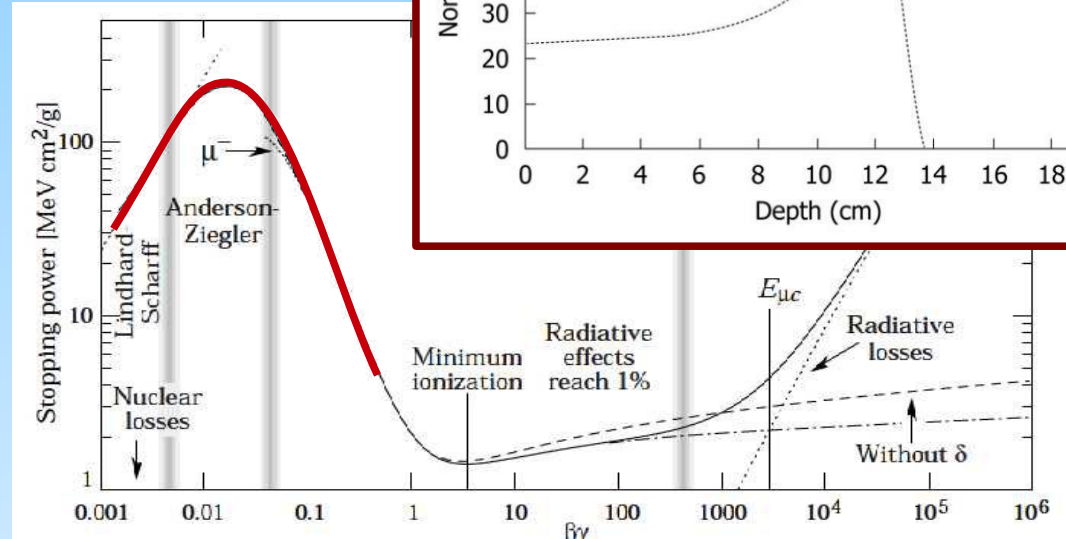
- ▶ Charge d'espace

- ◆ \rightarrow recombinaison & scintillation

- Détecteurs Gazeux :

- ▶ 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 cristal Csl, ~ pas de HCAL

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

SLC SLD Pb/Fe-ℓAr

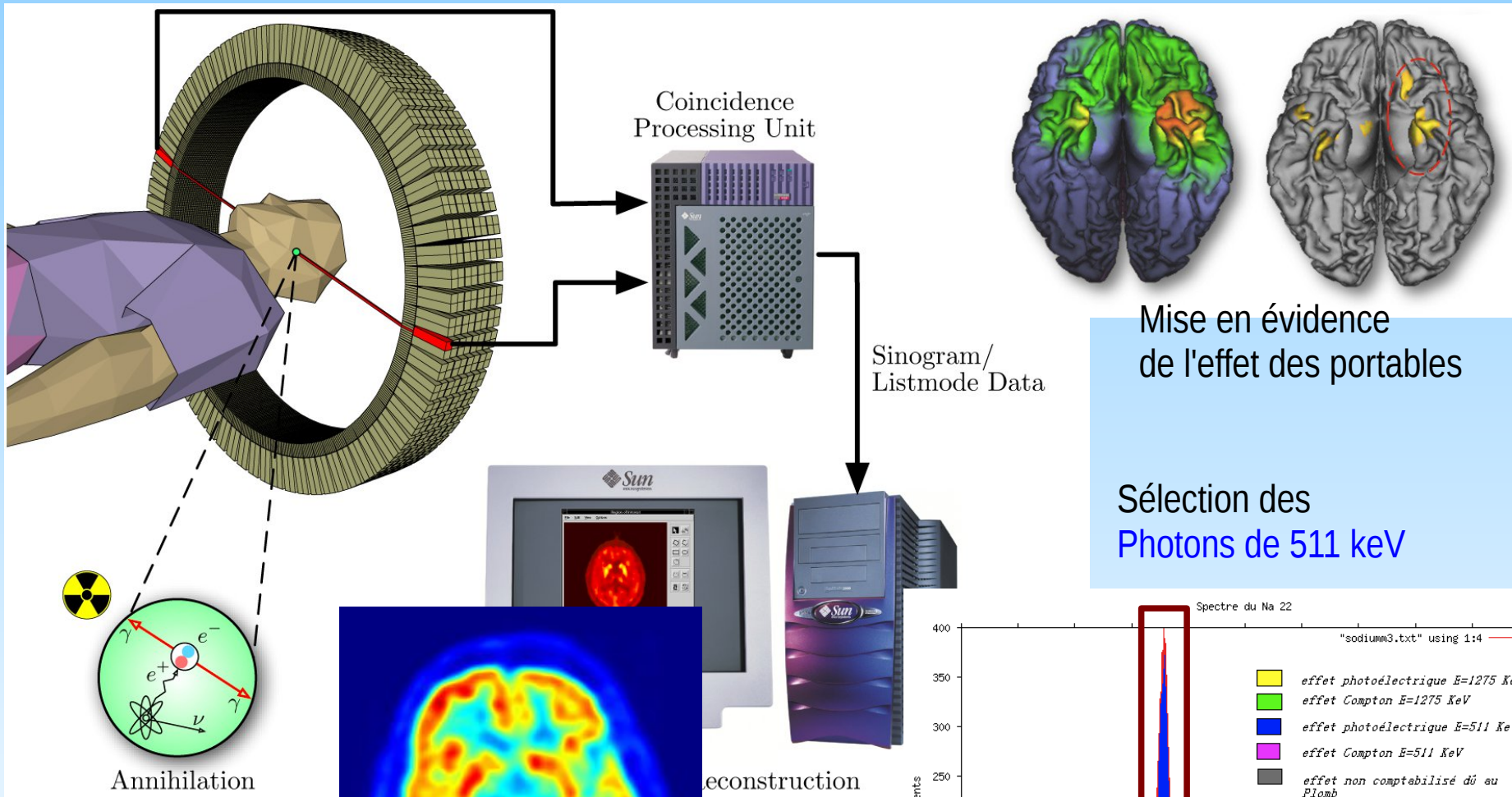
HERA H1 Pb/Fe-ℓAr ZEUS U-scint.

TeVatron D0 U-ℓAr CDF Pb/Fe-scint.

LHC CMS PbWO₄, Fe-scintillator
ATLAS Pb-ℓAr, Fe-scintillator

Cristaux

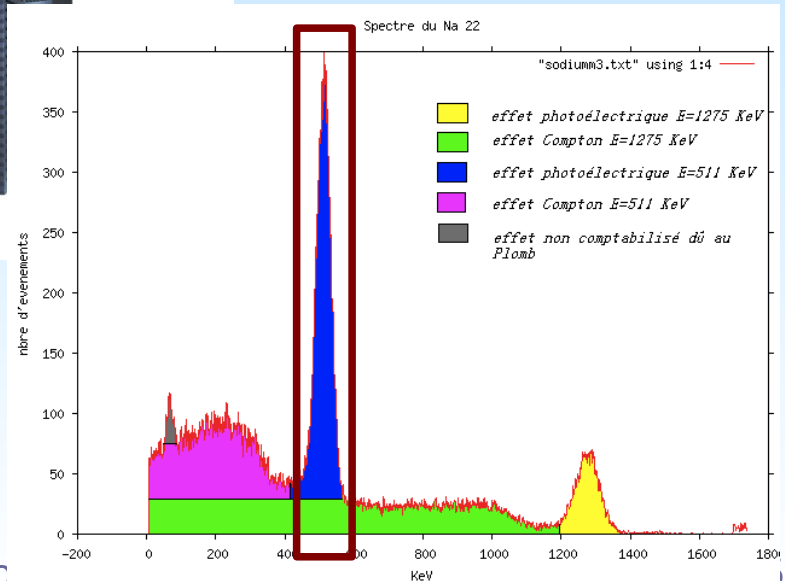
Tomographie par émission de positrons : des calos industriels...



Ex : Siemens New Biograph mCT Product
 4x4x20 mm³ LSO
 Matrice de 400x400

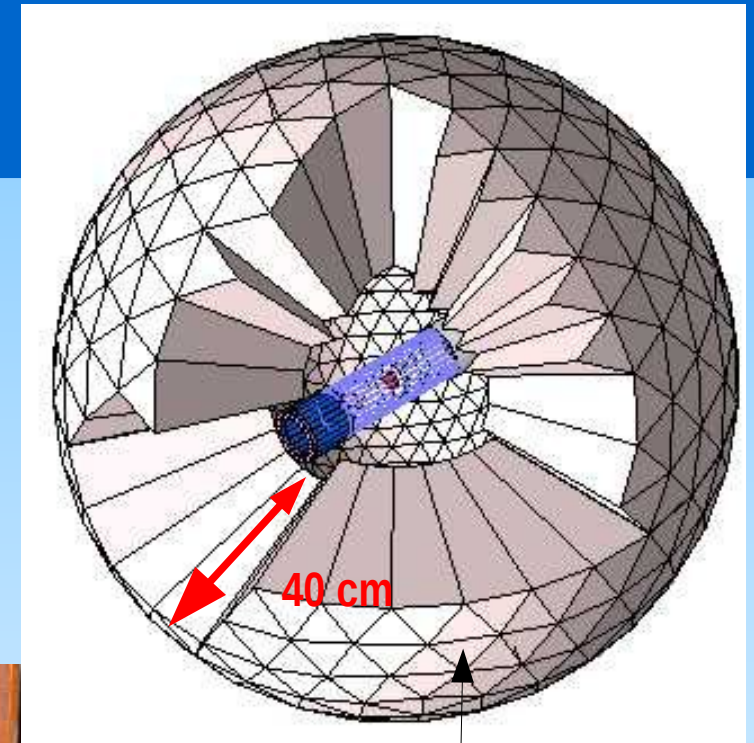
Mise en évidence de l'effet des portables

Sélection des Photons de 511 keV



Crystal Ball

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



Cristaux pyramide tronquées



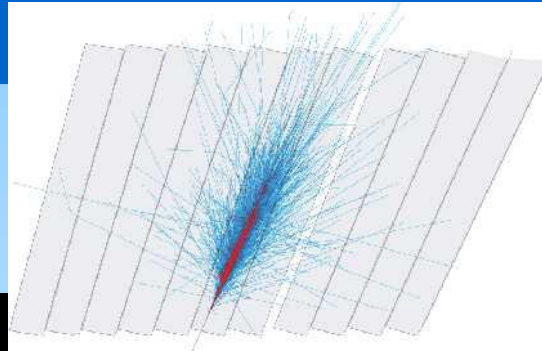
Tubes photomultiplicateurs

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

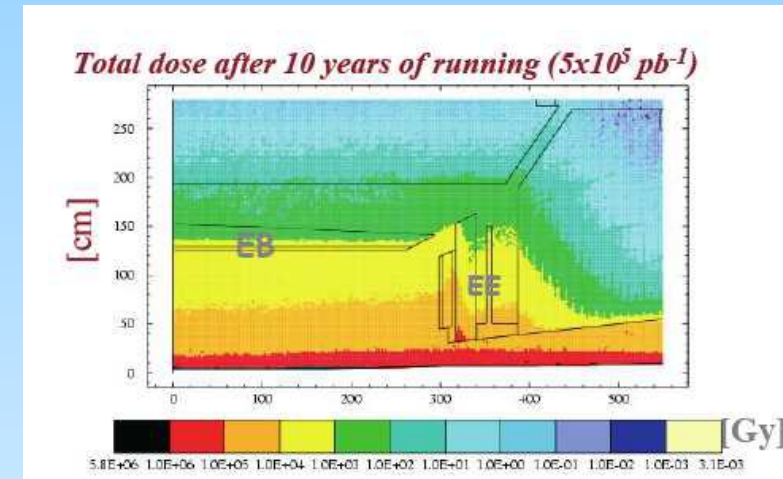
- ▶ Rapidité (80% de la lumière $\leq 15\text{ns}$)

- ▶ Résistance aux radiations (105Gy)

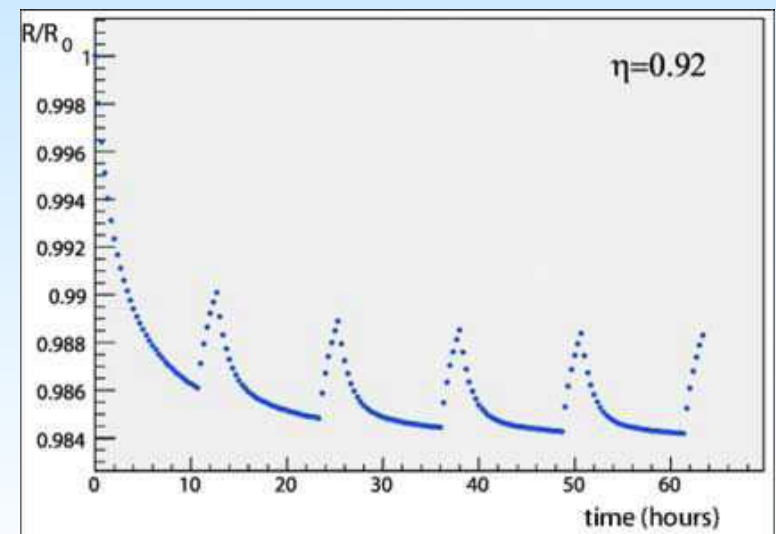
- Moins : **~ 40 kGy**

- ▶ Faible rendement : 150 γ/MeV

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

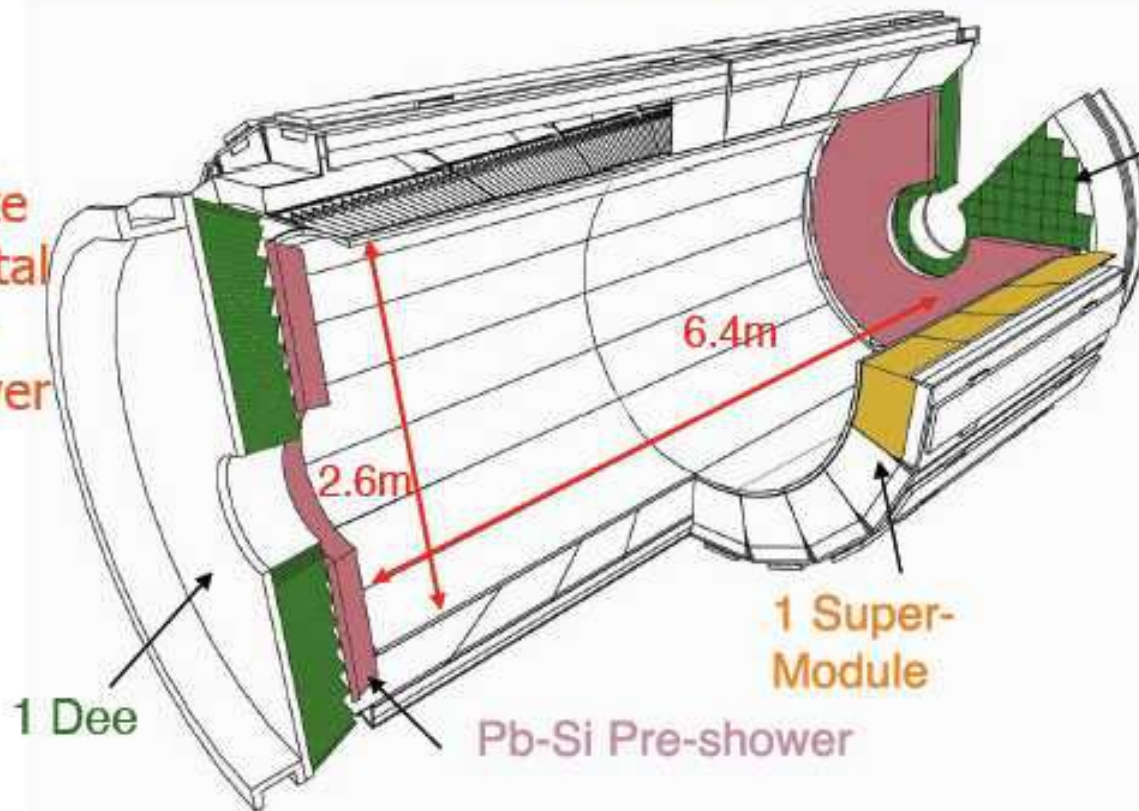


~ 2 kGy



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):

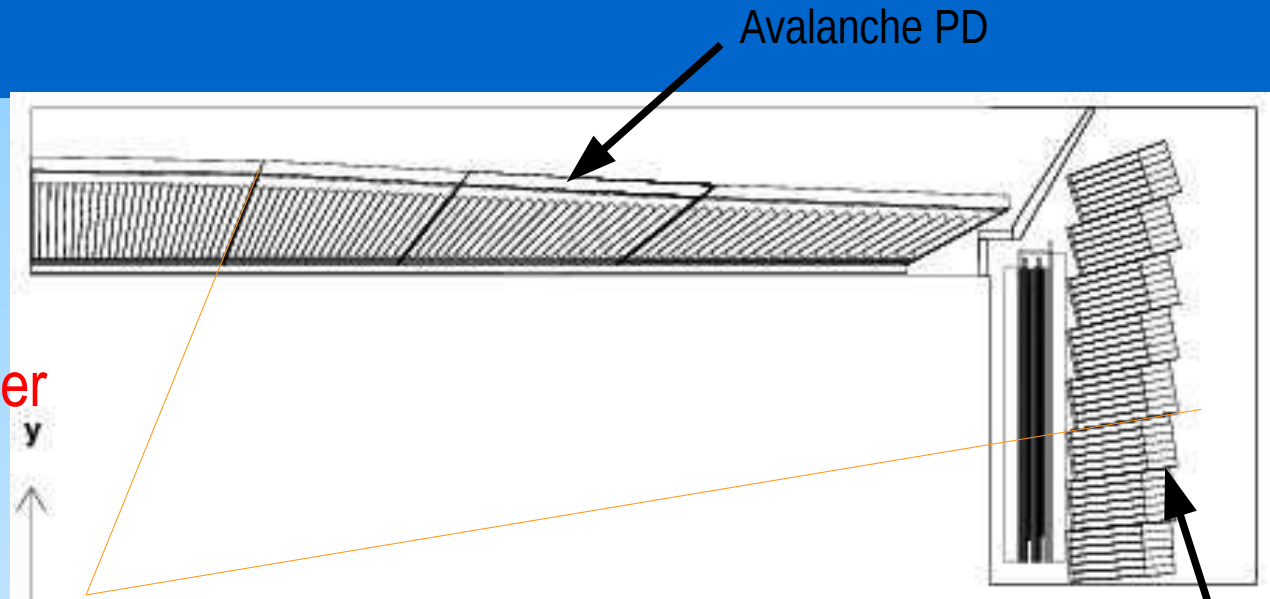
- 14648 crystals
- 4 Dees, SuperCrystals of
5x5 xtals
- $1.48 < |\eta| < 3.0$

Preshower (ES):

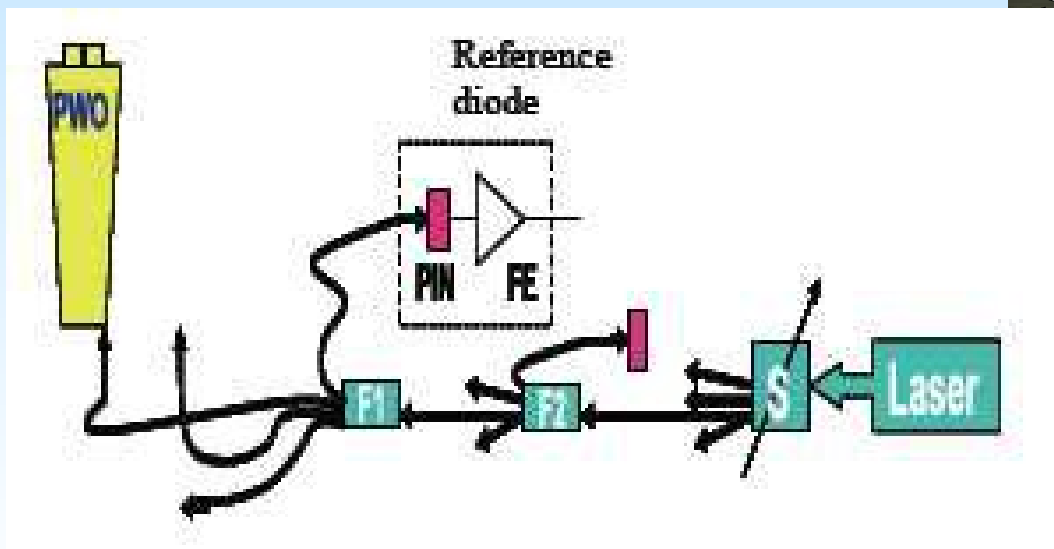
- Pb-Si
- 4 Dees
- 4300 Si strips
- $1.65 < |\eta| < 2.6$

CMS ECAL

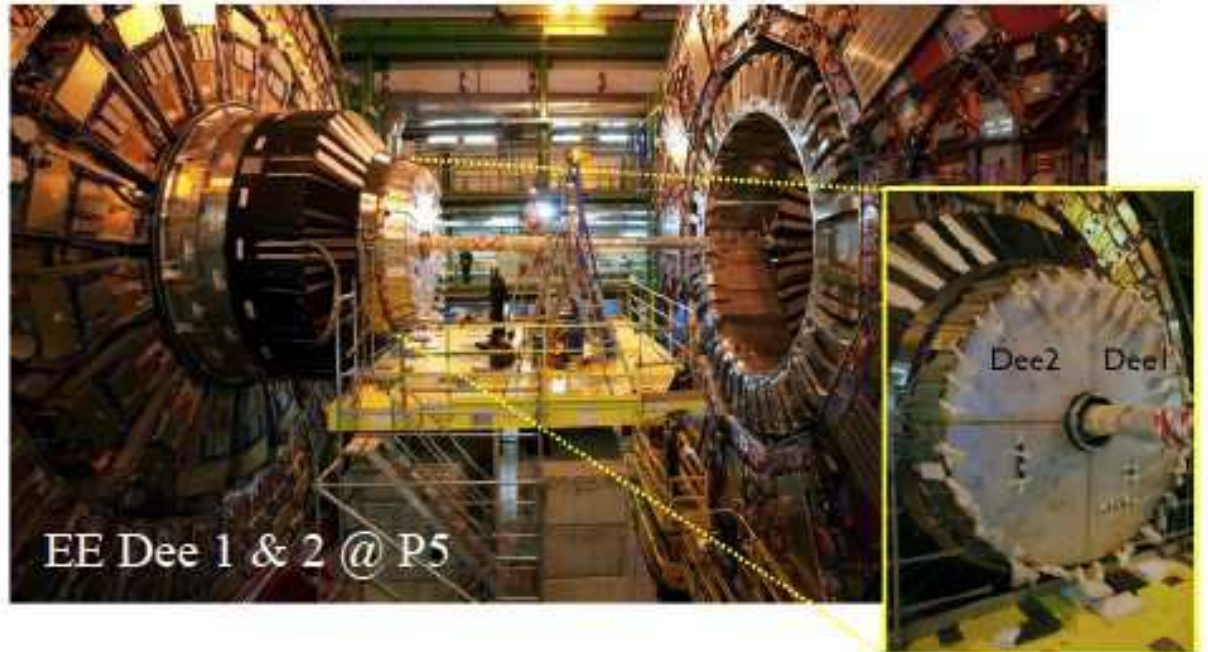
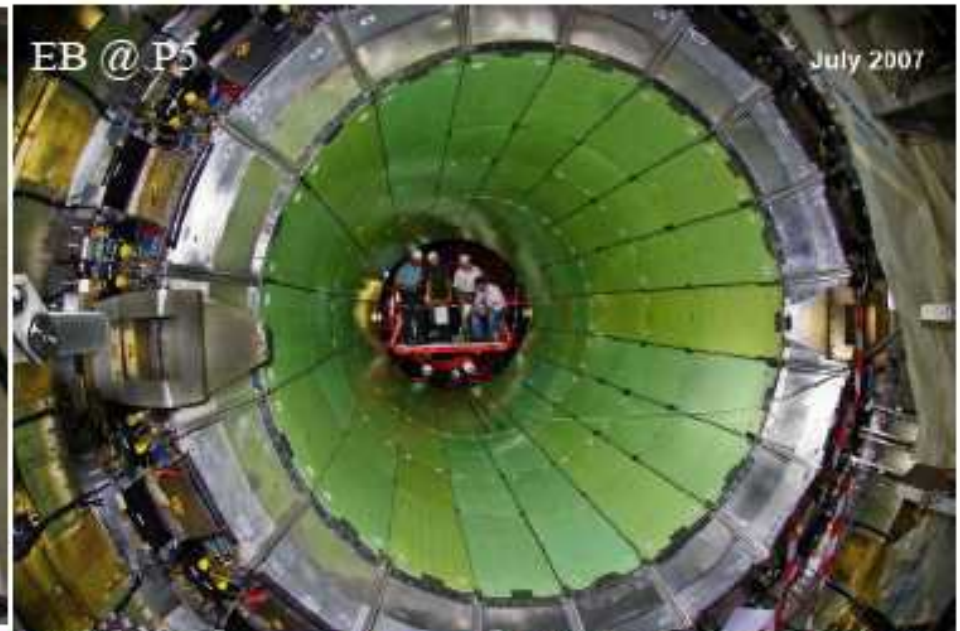
- $2 \times 2 \text{ cm}^2$
 - ▶ 80% des e- dans 1 cristal
 - ▶ groupe de 3×3 pour le trigger
 - ▶ Presque pointant



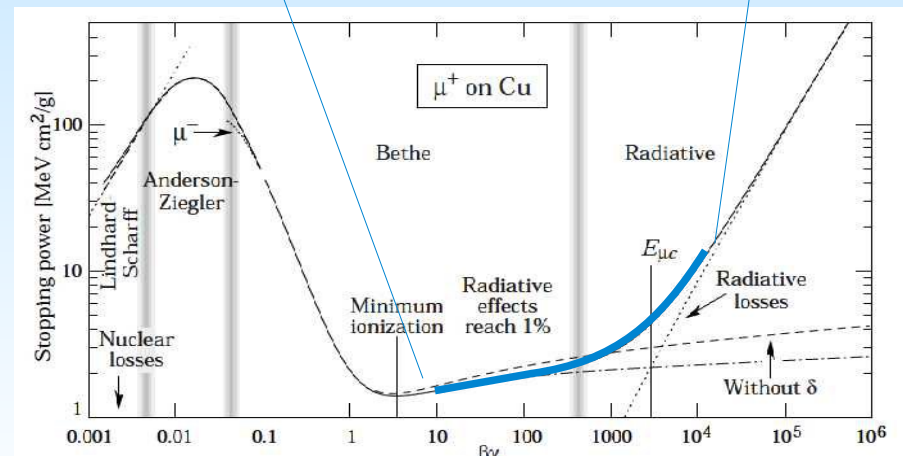
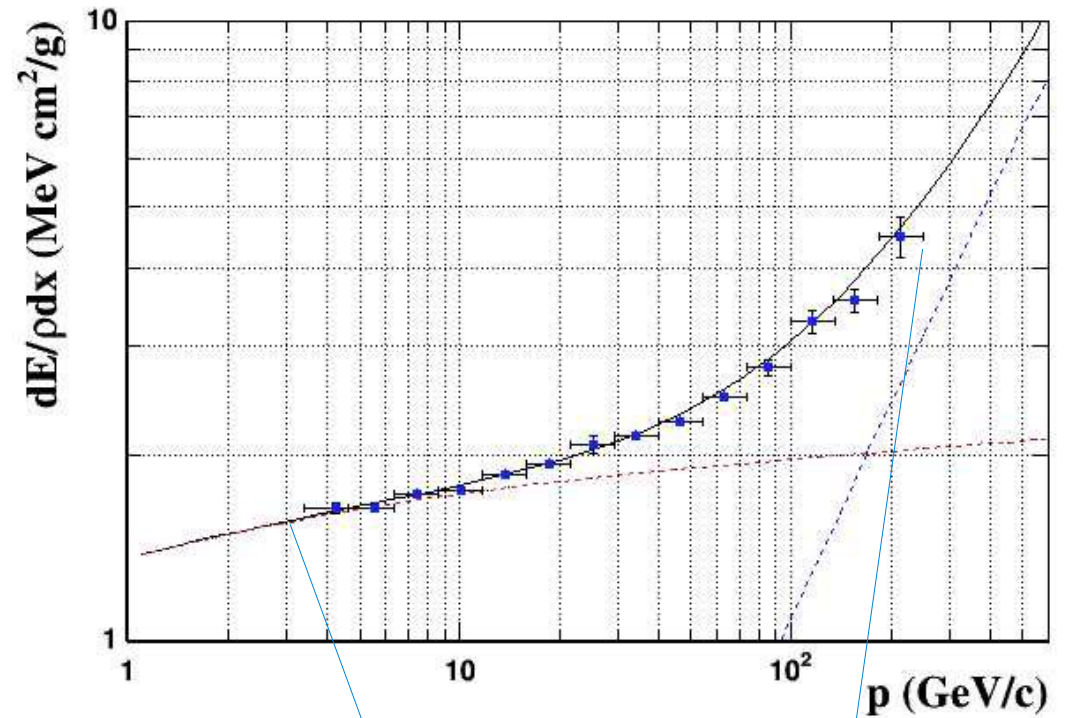
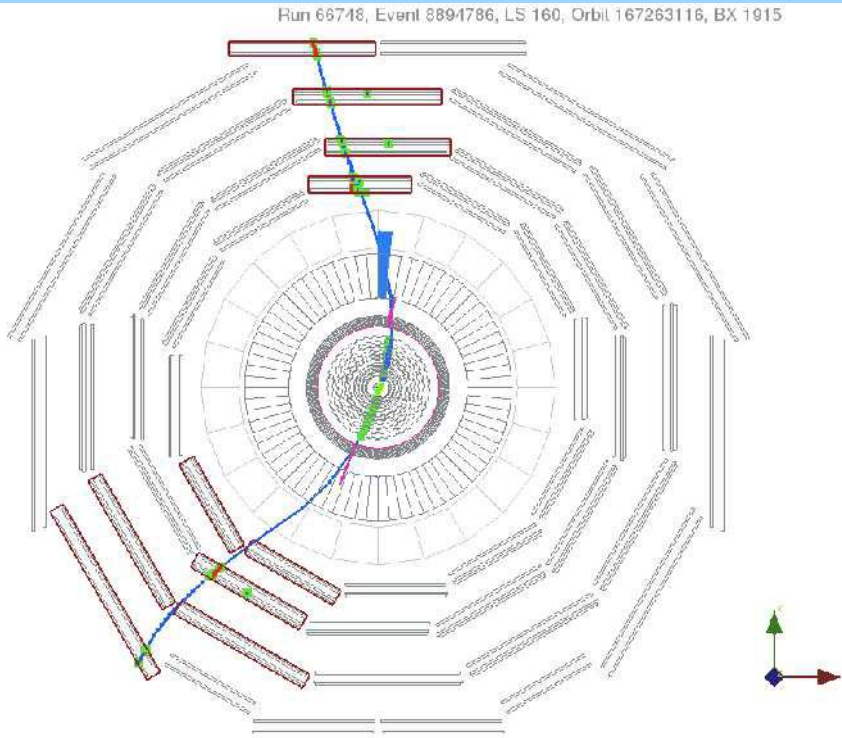
vacuum phototriodes (VPT)
(RadHard)



CMS ECAL construction



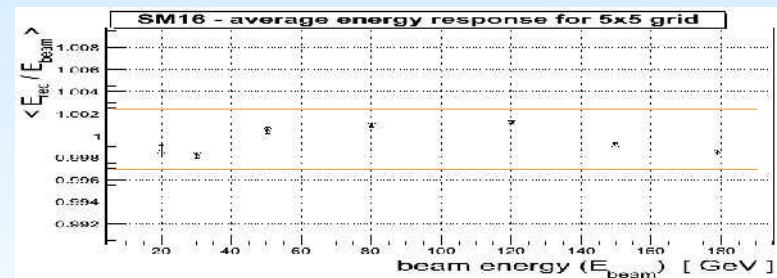
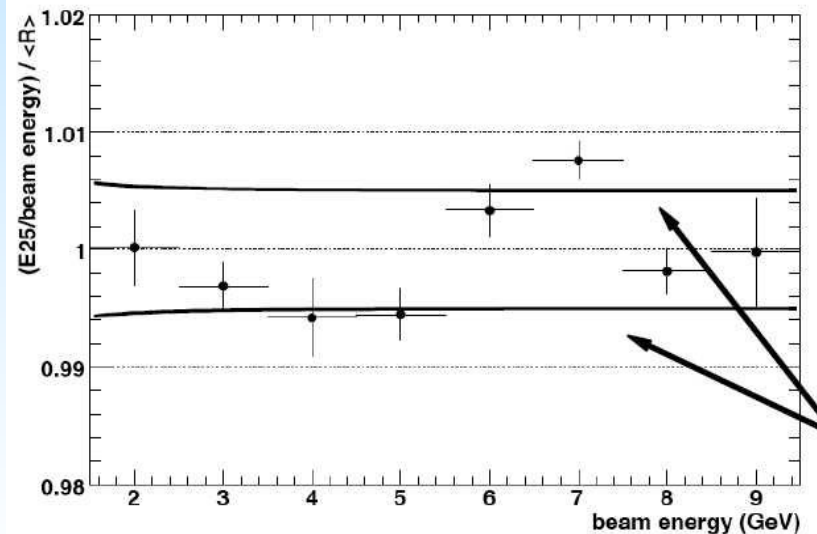
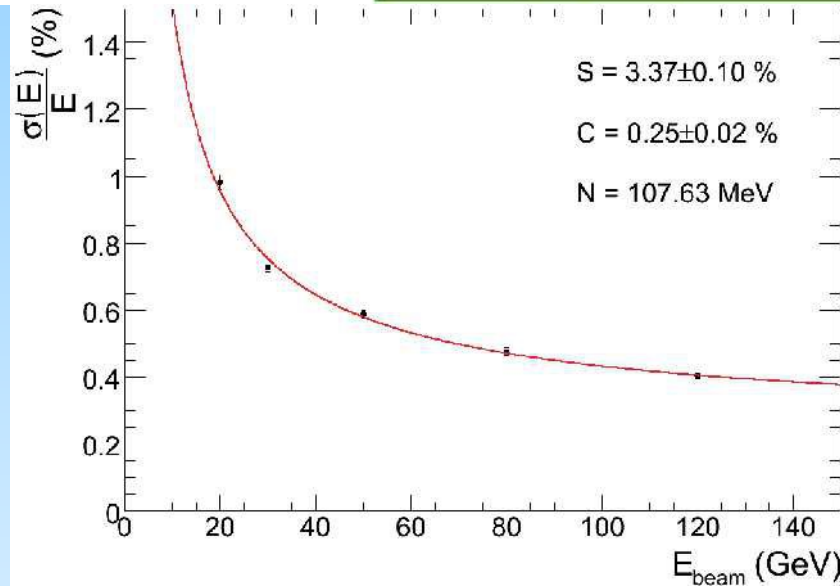
Intercalibration tracker ↔ ECAL

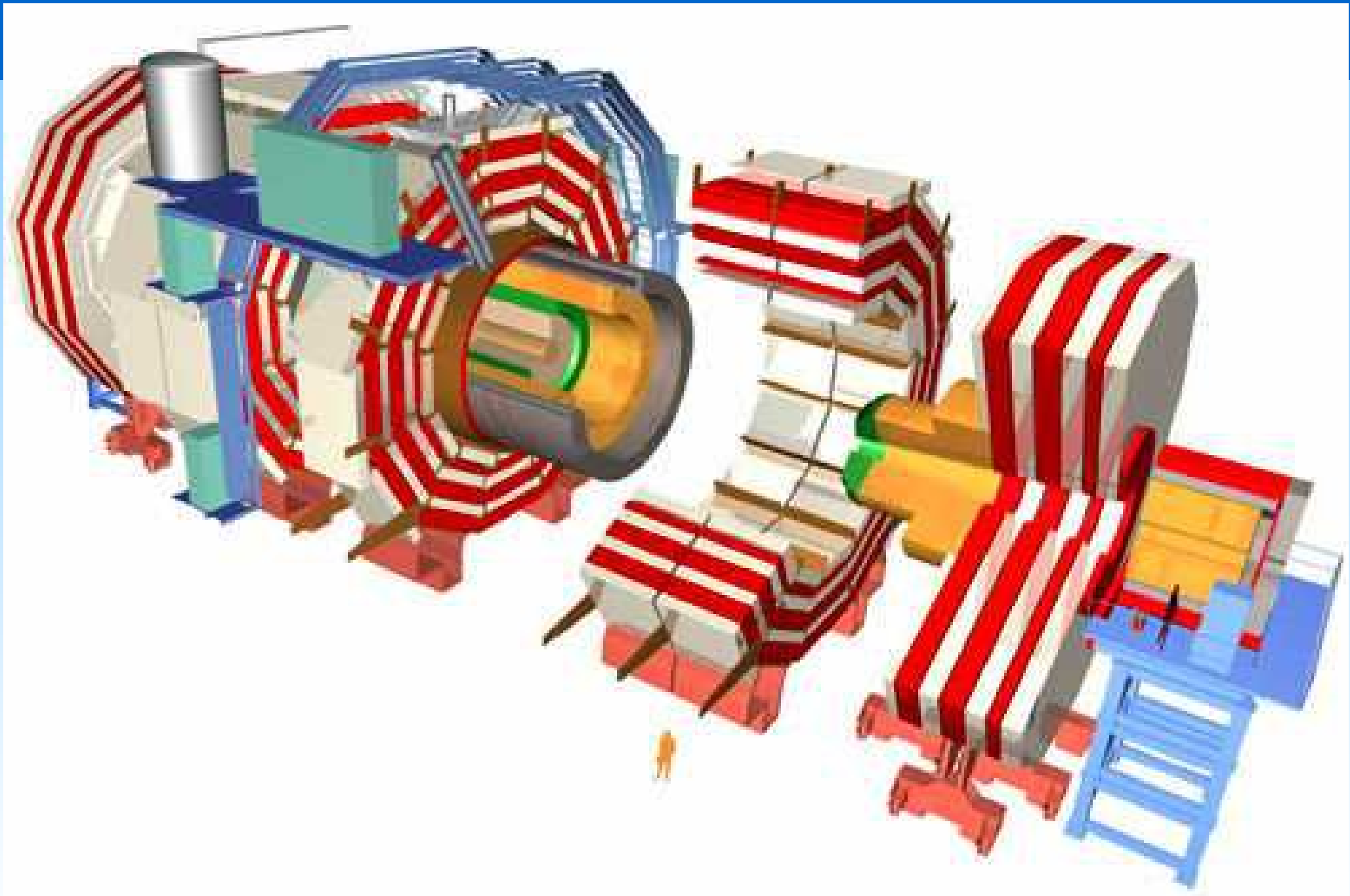


Performances ECAL (tests en faisceau)

CMS (PbWO₄)

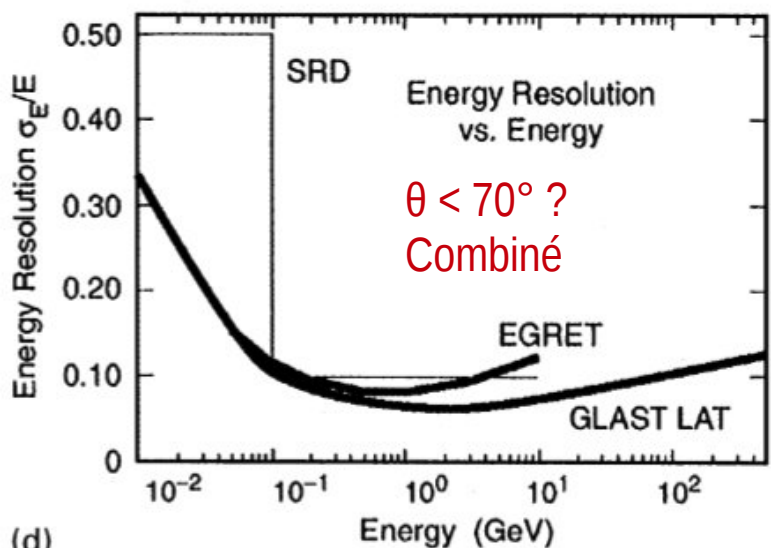
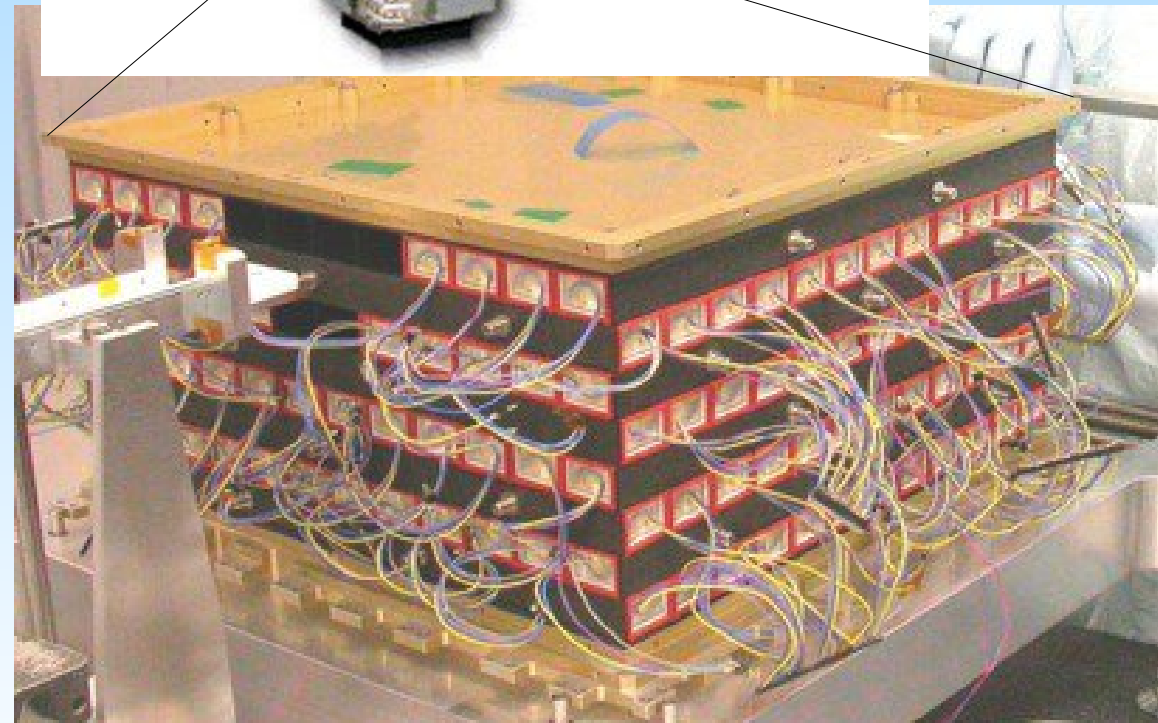
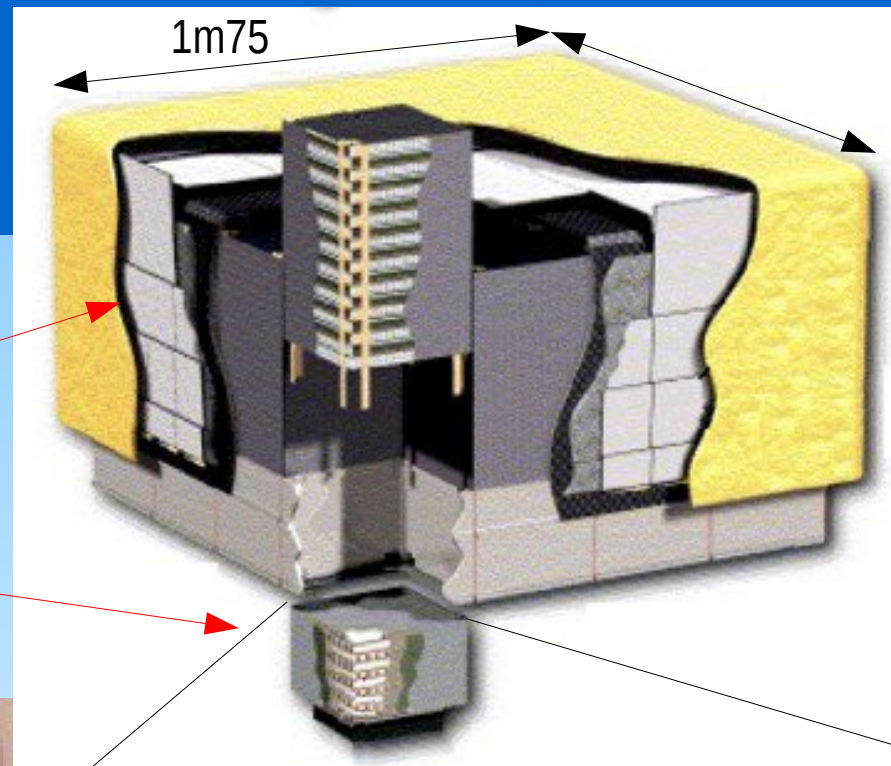
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.03}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.005$$





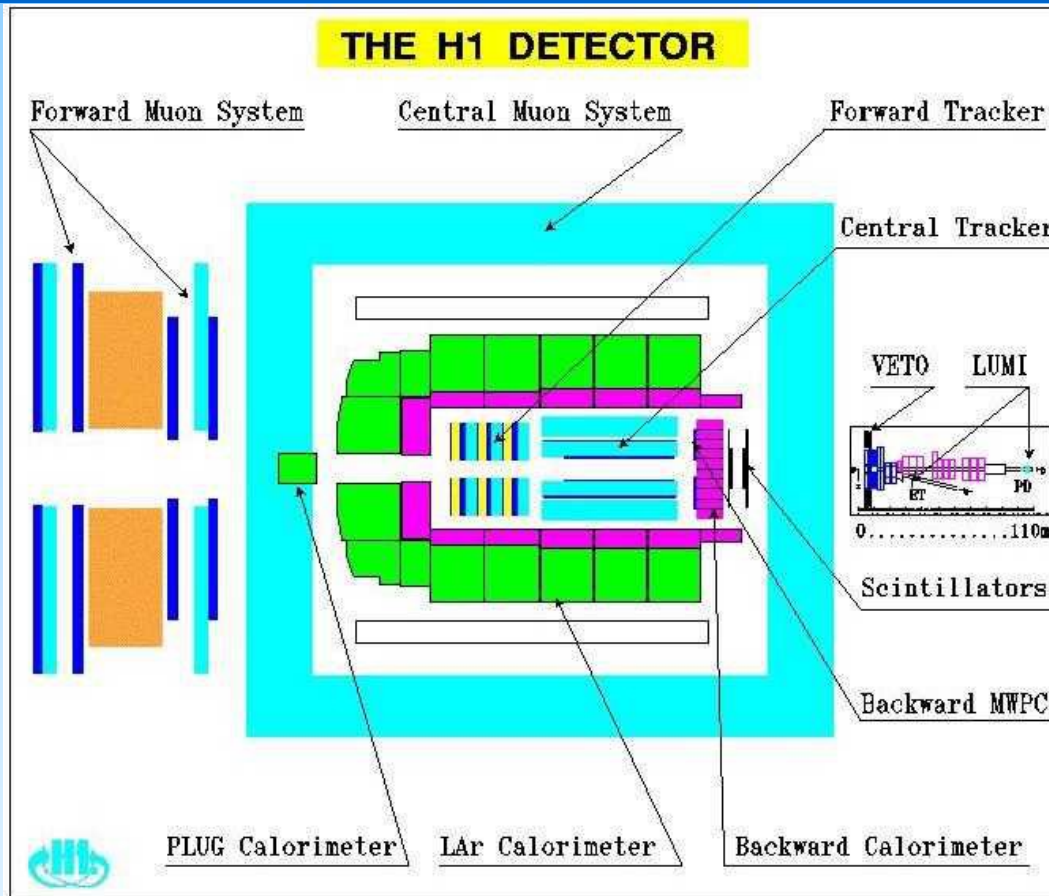
Fermi/Glast

- Satellite observation γ de HE
 - ▶ $20 \text{ MeV} < E_\gamma < 300 \text{ GeV}$
- LAT = Large Area Telescope
- ECAL
 - ▶ 8 couches de CsI
 - ◆ $8,5 X_0 \rightarrow$ fuites
 - ◆ Orientation alterné
 - ▶ Lecture double : APD
 - ◆ reconstruction pos.
 - ◆ correction atténuation ($\sim 65\%$)



Gas nobles liquéfiés

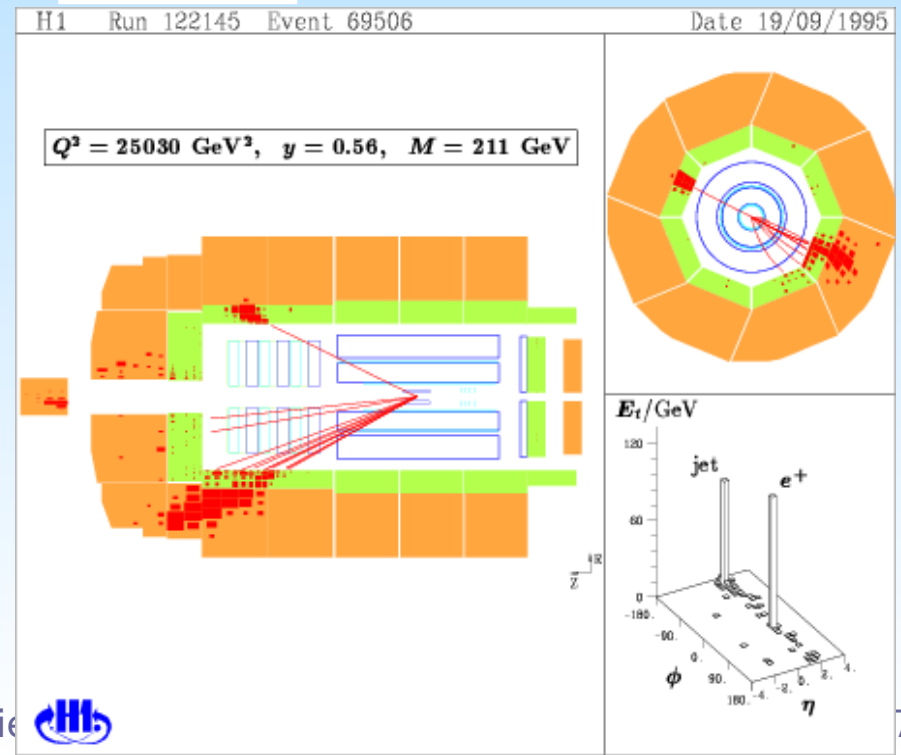
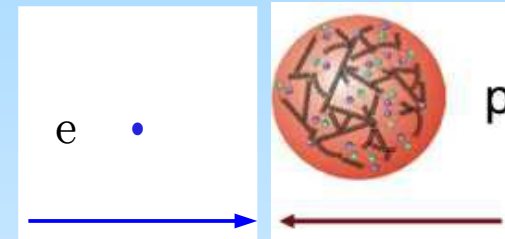
H1 un détecteur de HERA (asymétrique)



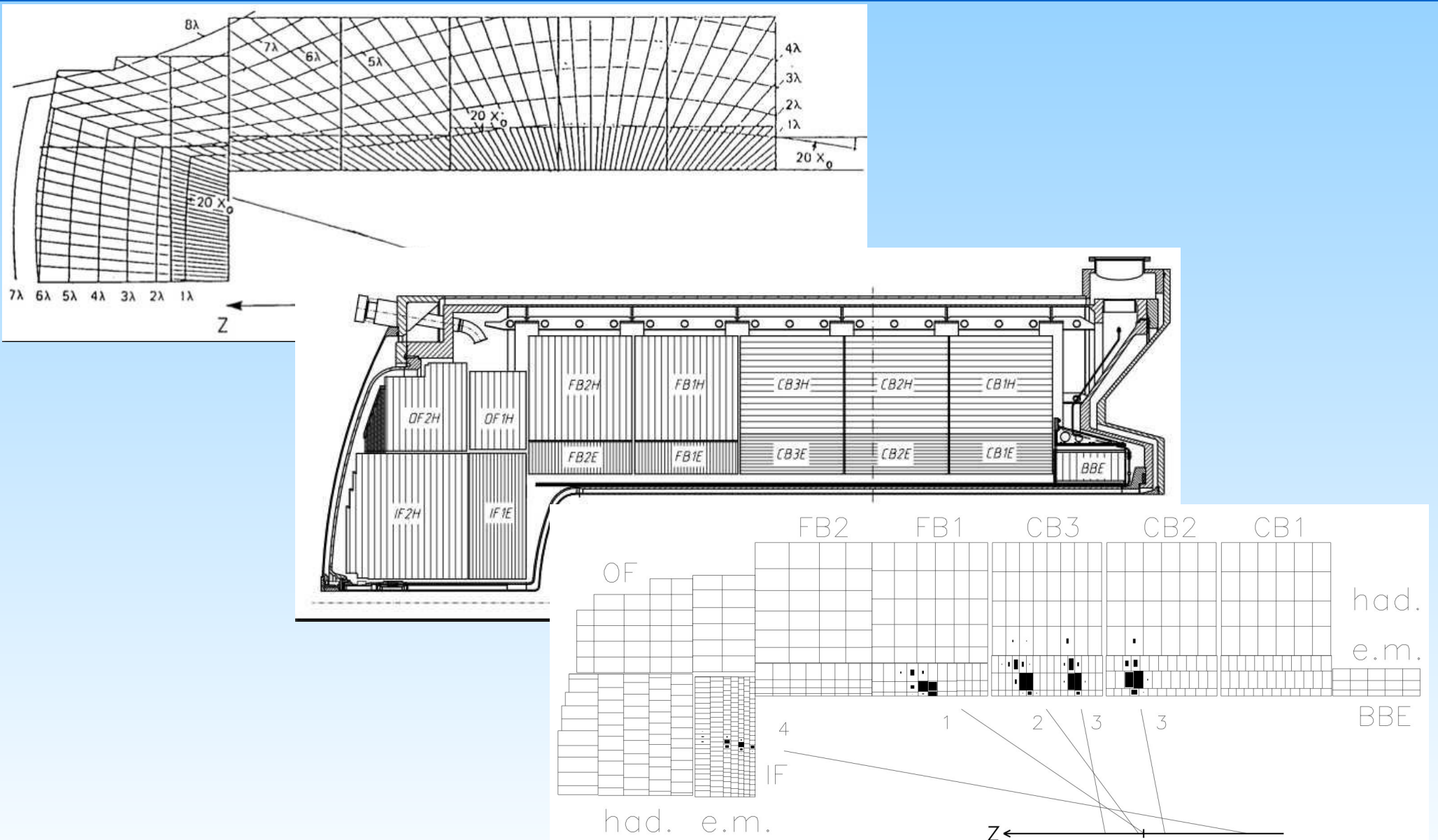
Collisions à HERA
(DESY, Hambourg)

e^{\pm} p

30 → ← 900 GeV

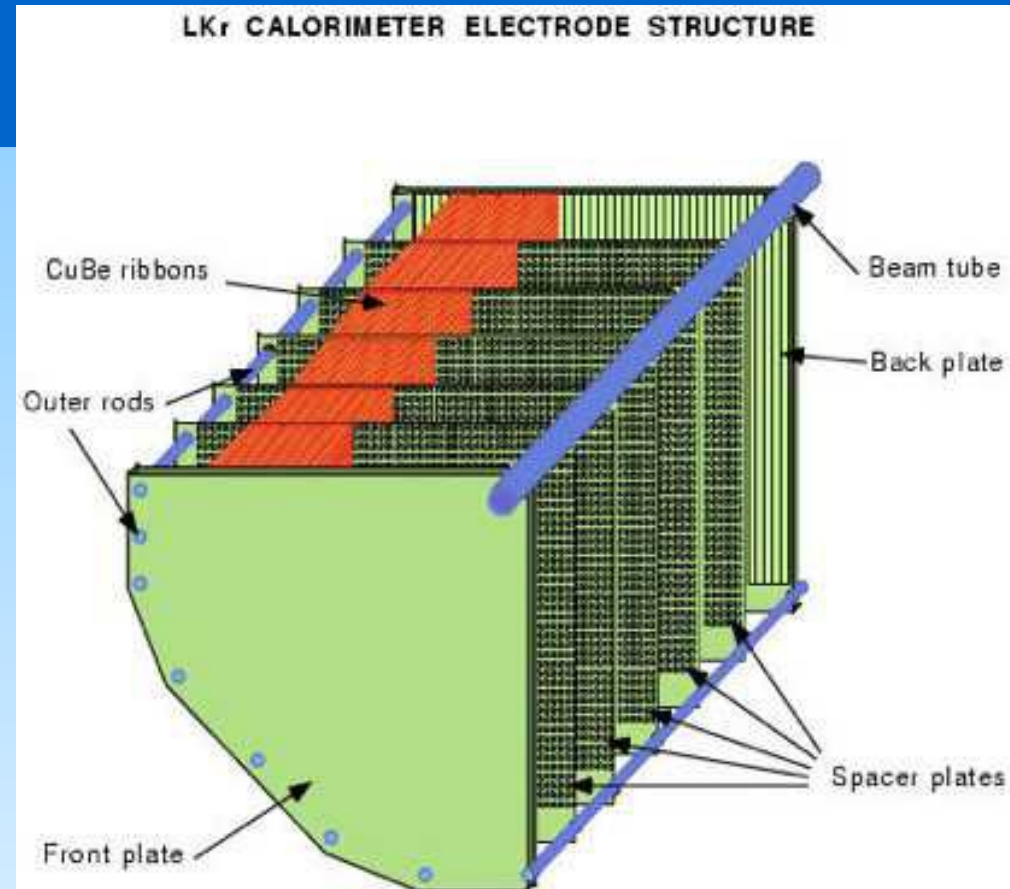
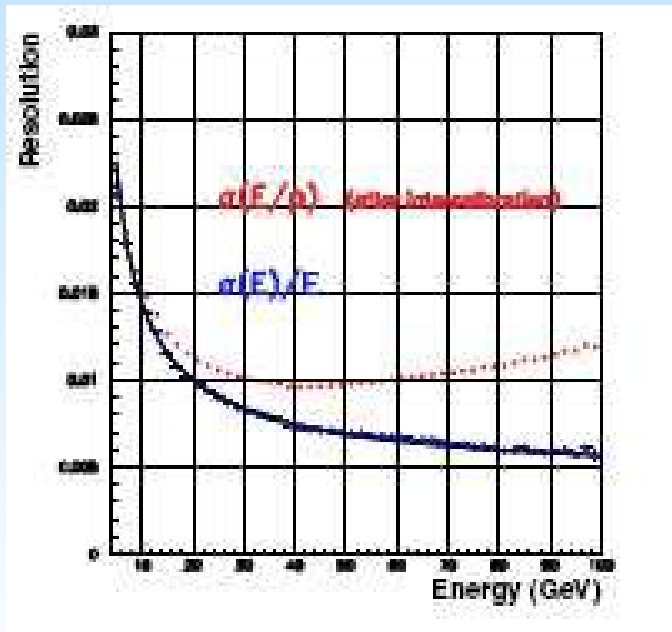


Calorimètre ℓ Ar de H1



NA48

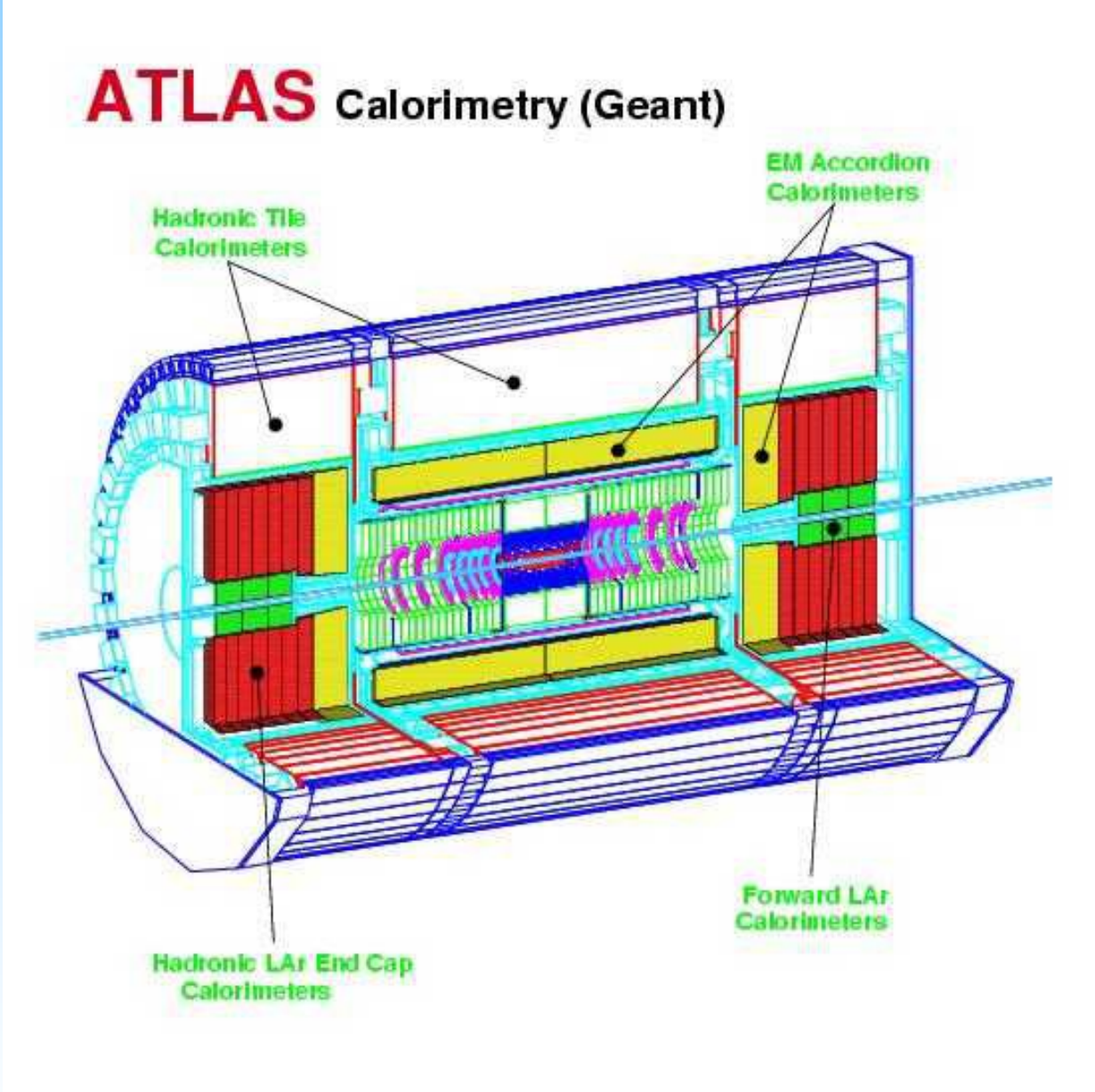
- Expérience cible fixe (CERN)
 - Physique du K
- ℓKr @ 120°K
- Electrodes en accordéon
- $\sigma(t) \sim 220$ ps
 - temps de vol. $\delta \leq 0.3$ ns



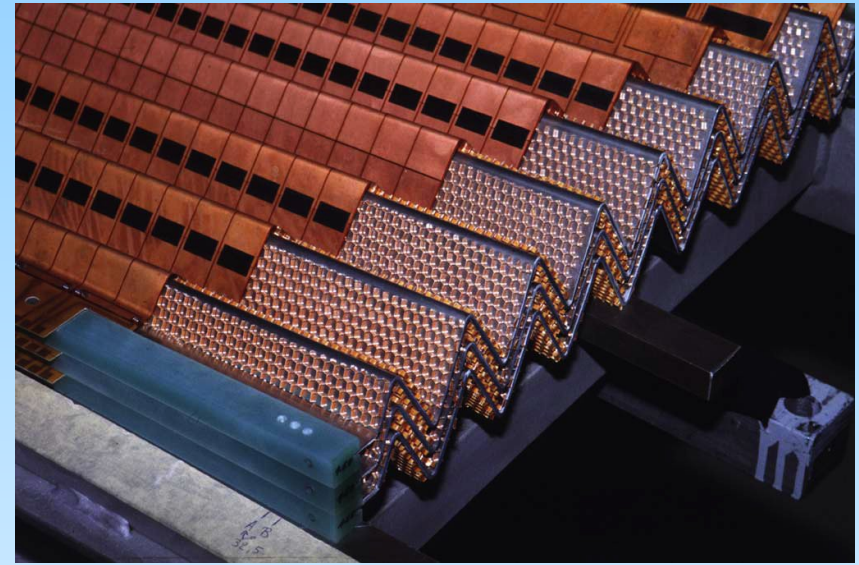
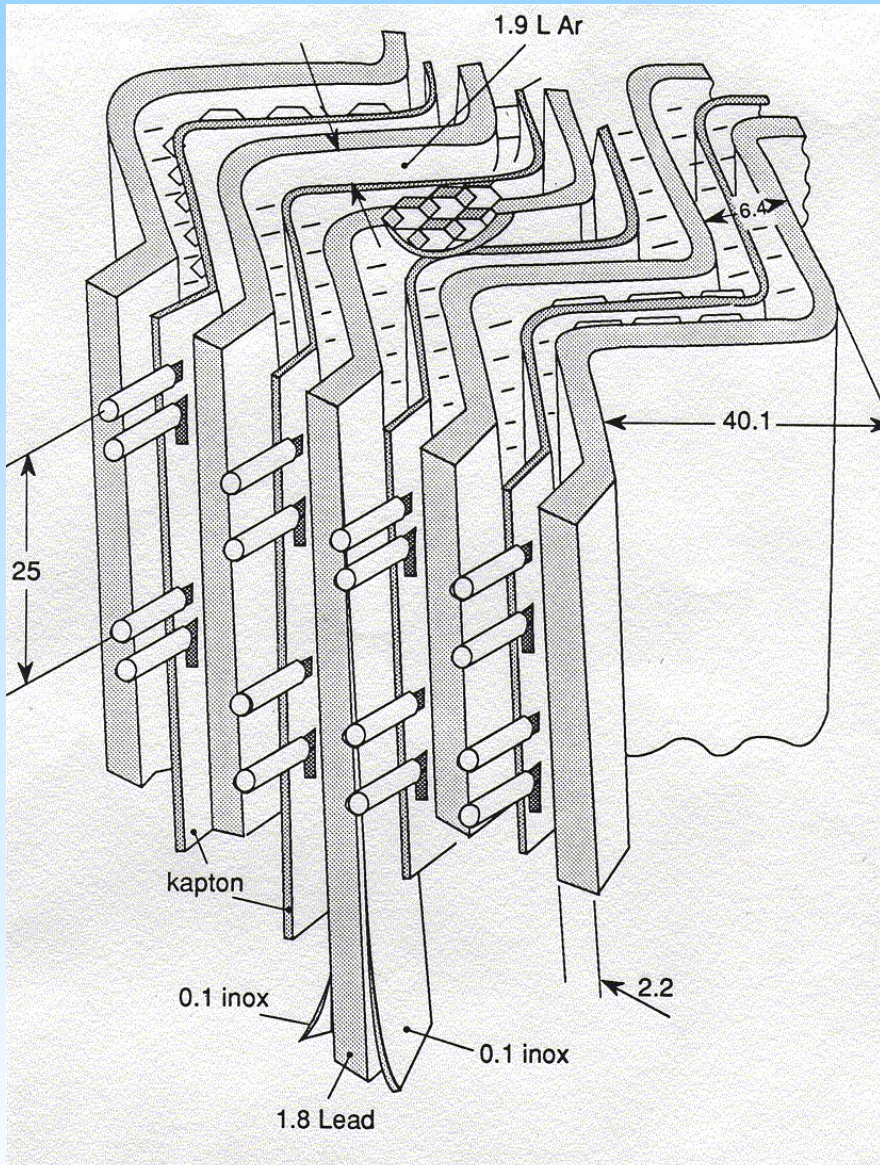
$$\sigma_x \approx \sigma_y \approx 1 \text{ mm}$$

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

ECAL d'ATLAS

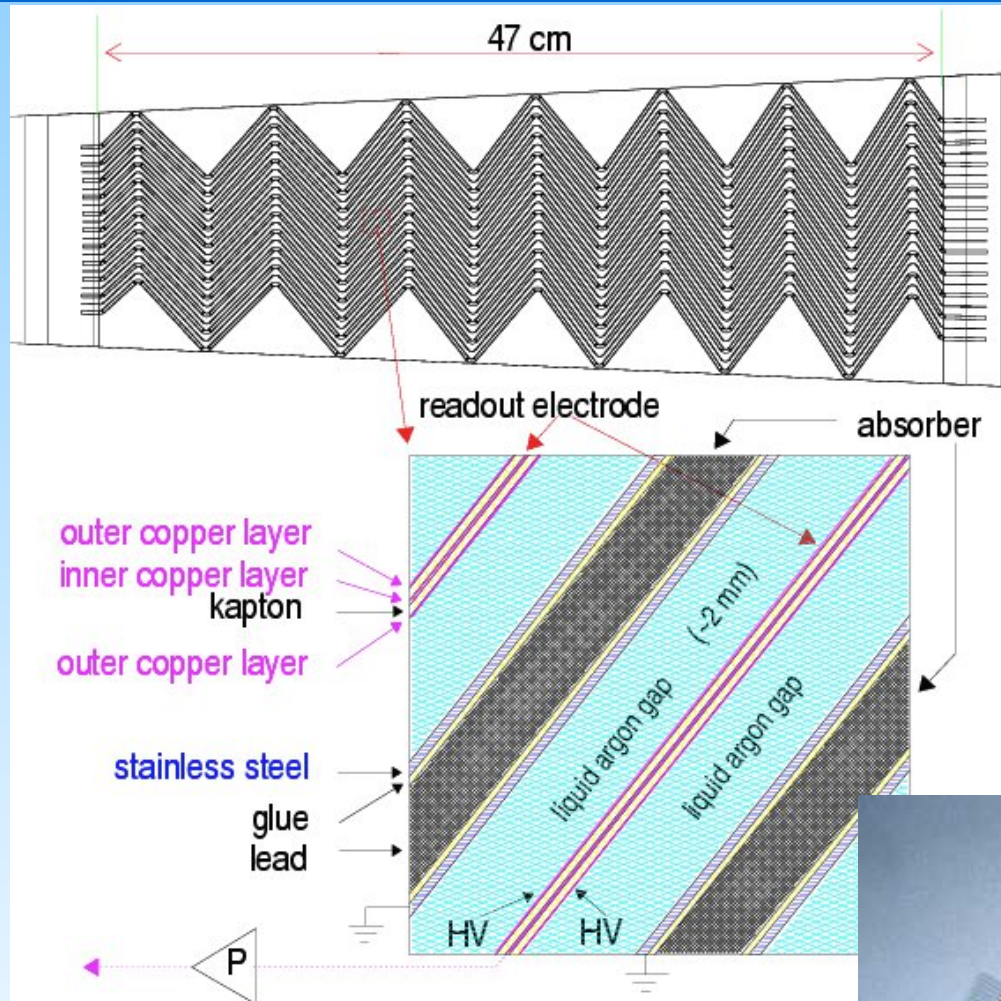


Atlas ECAL : ℓ Ar

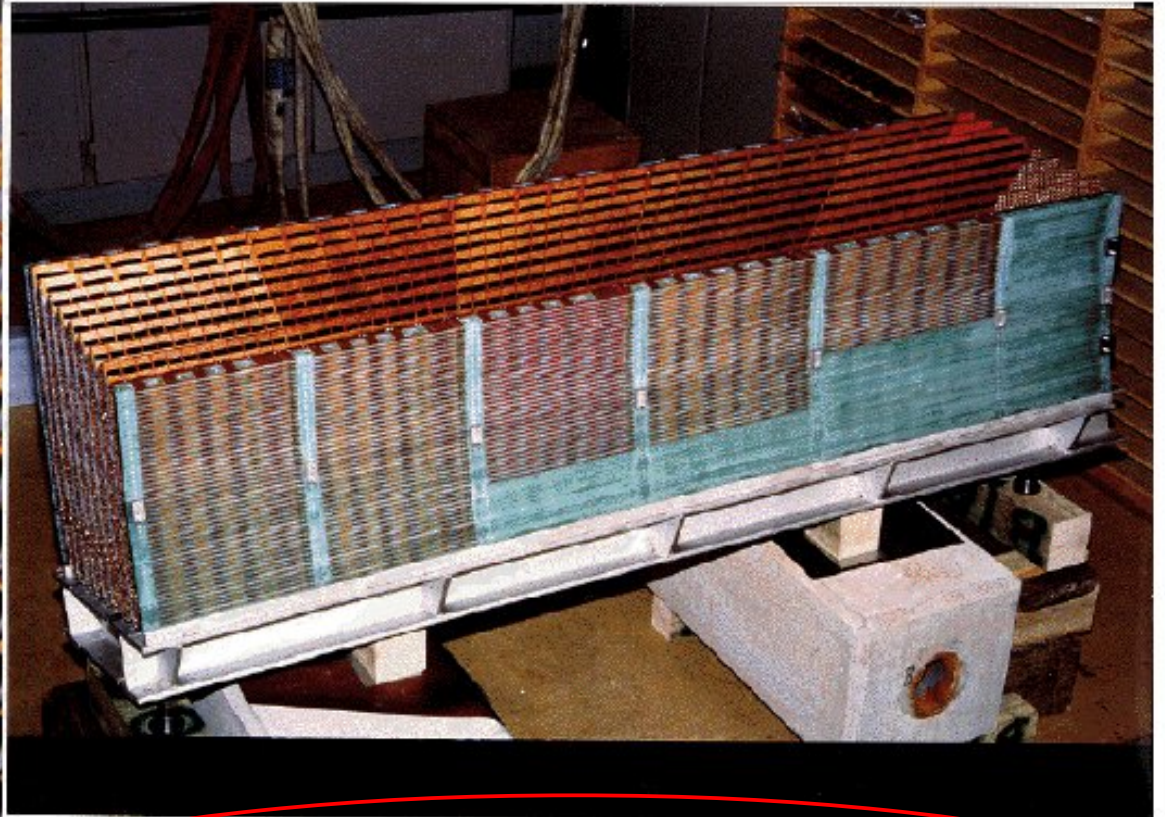


- Pbm : Temps de dérive long dans ℓ Ar
 - Idée : faire de petits espaces de dérive
 - ▶ Ar «lourd» $\rightarrow f_{\text{échant.}}$ OK
 - ▶ \rightarrow signal 40 ns
- \leftrightarrow 20 ns inter-paquet nom. de LHC

Atlas ECAL

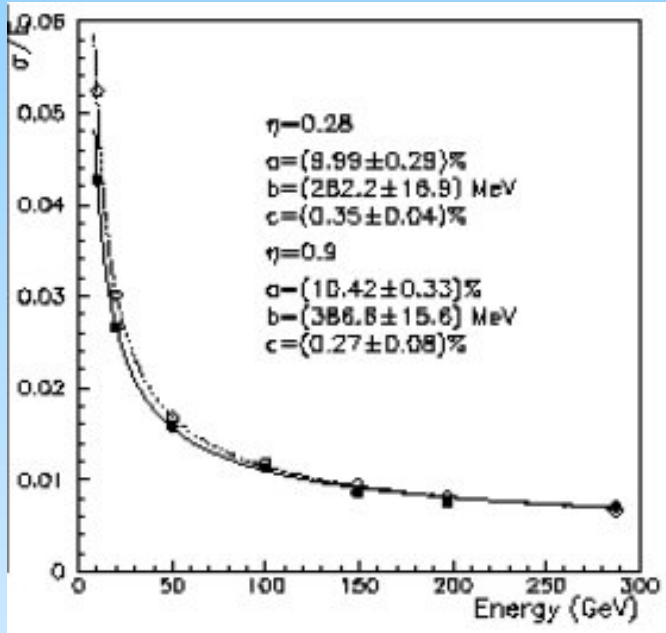


Accordion barrel



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

Atlas ECAL : performances

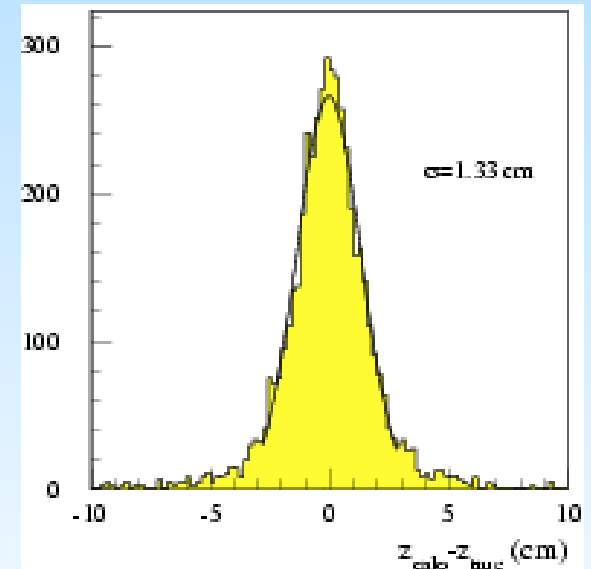
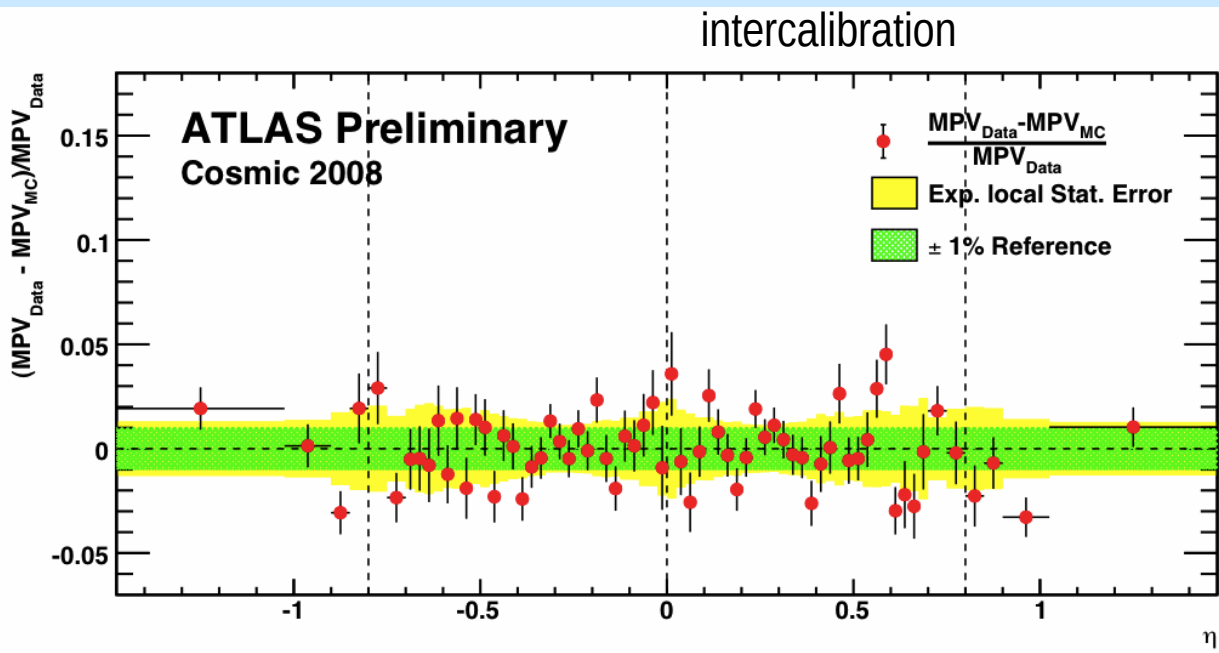


ATLAS (LARG)

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

Signal : $H \rightarrow \gamma\gamma$
 Bruit : $pp \rightarrow X + \pi^0$
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

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

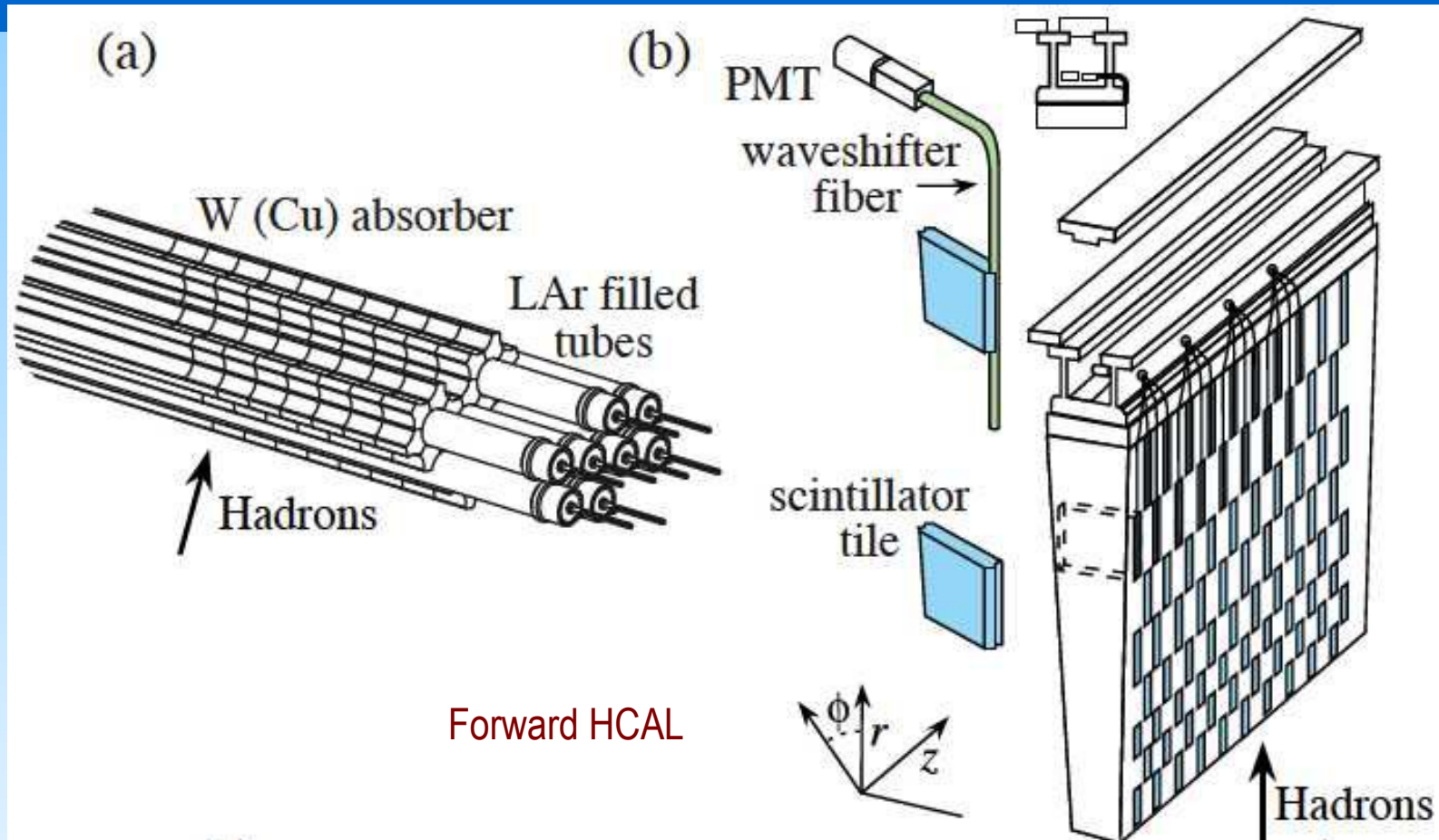


Quelques performances de ECAL

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)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16\text{--}18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO ₄ (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20\text{--}30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20\text{--}30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

HCAL CMS & Atlas

ATLAS HCAL



Barrel HCAL
Fe + Plastic
+ WLS

En test en faisceau 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.

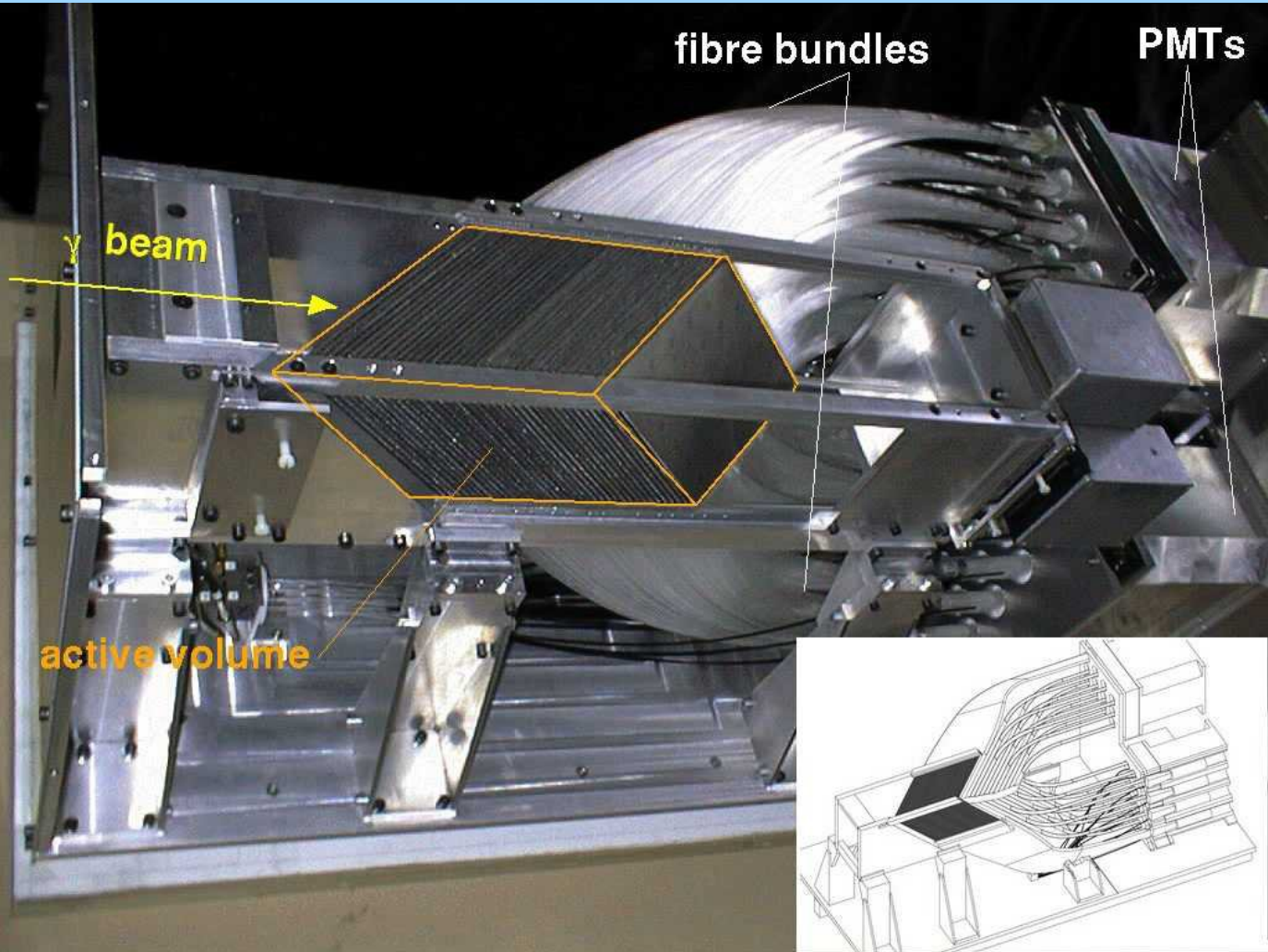
MET fits

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

CMS using Part. Flow $\rightarrow 45\% / \sqrt{\Sigma E}$

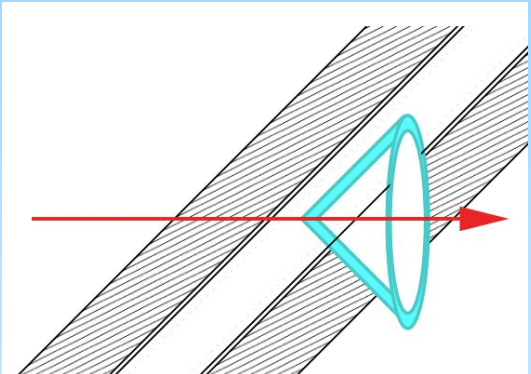
Des calorimètres Čerenkov

Luminomètre de H1



Hodoscope à γ

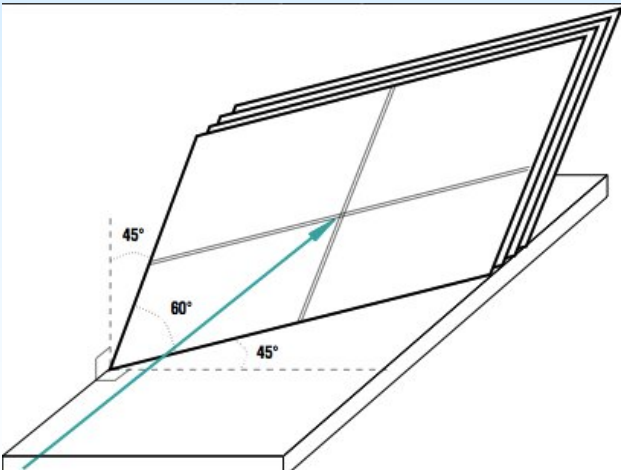
▶ Angle fixé



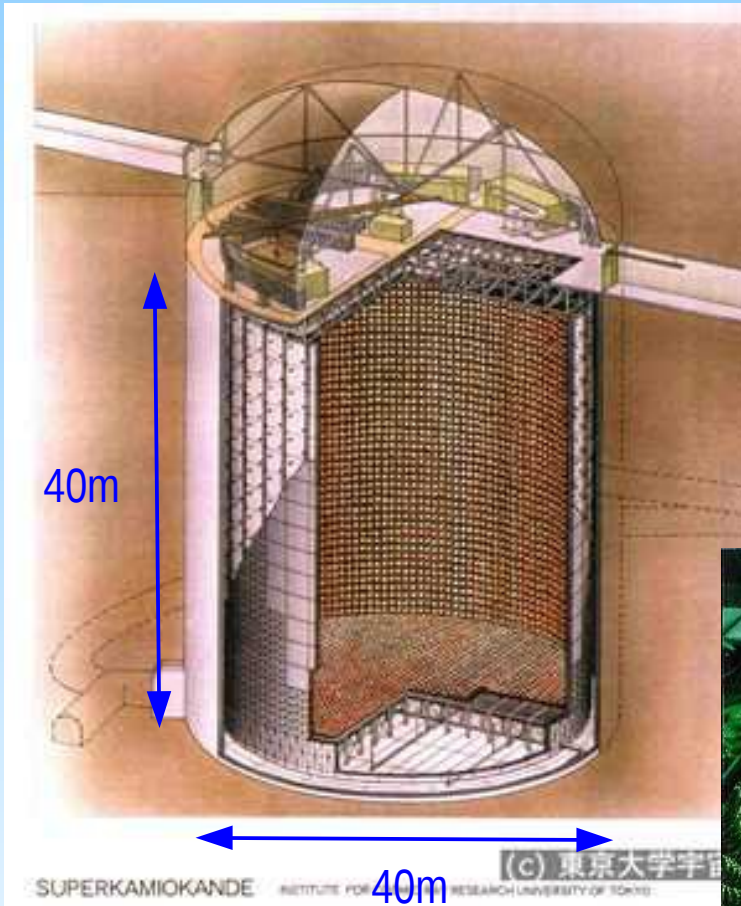
▶ Fibre de Quartz

▶ Sensibilité

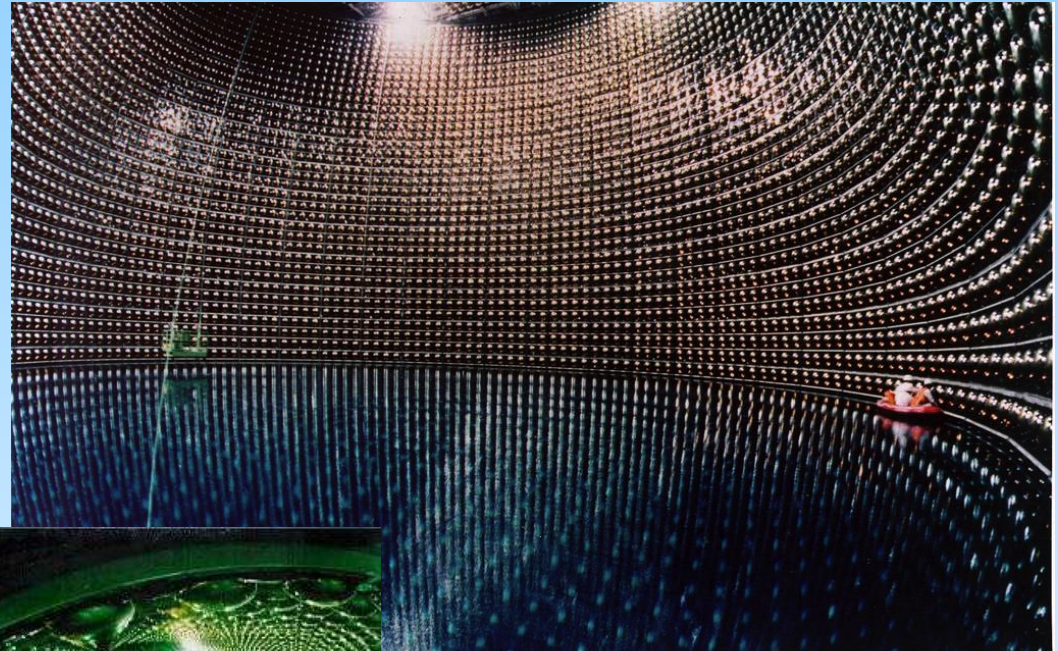
- ◆ Cœur de gerbe
- ◆ + 1 partie du halo



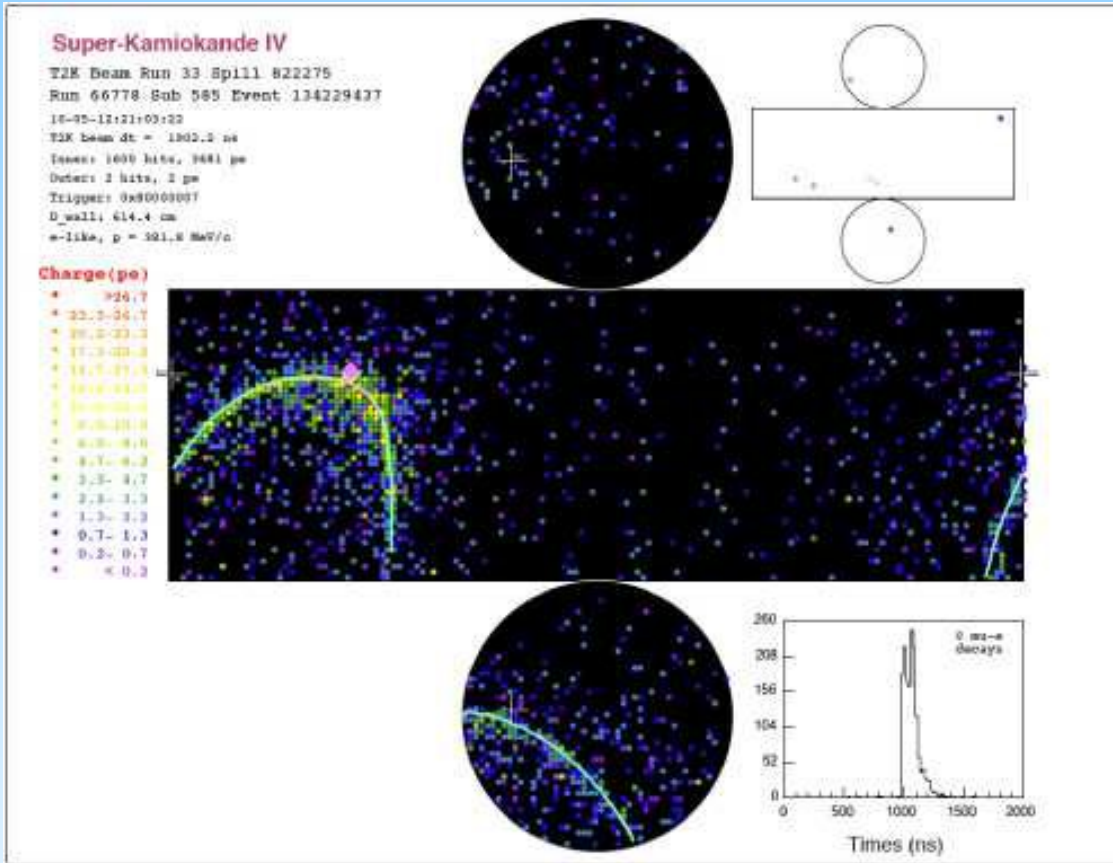
neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



50 kt eau pure
12000 PMTs
(remplacés 1 fois)



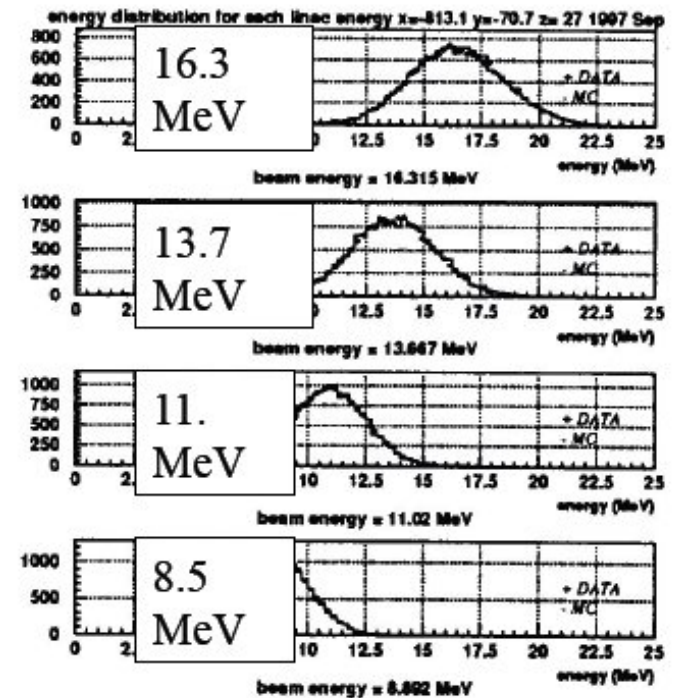
neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



1 événement d'apparition
d'électron

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

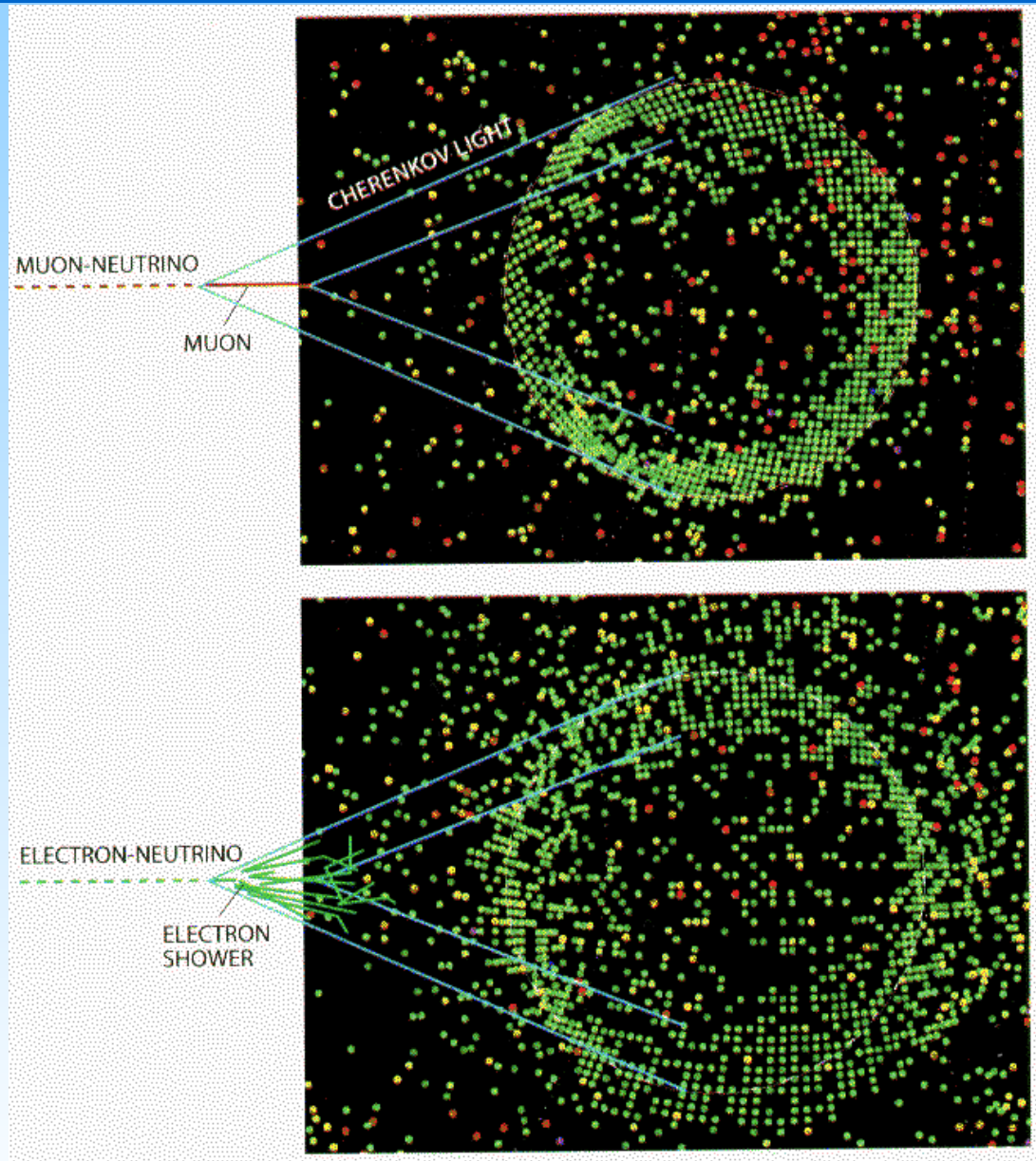
Uniformity and stability of response vs
position and time to $\pm 0.5\%$
to avoid distortions in measured spectrum.



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

- ▶ Réponse disproportionnée à des neutrons

- ◆ neutron \sim MeV dans le senseur, localisé

- collision élastique n-p

- ◆ \rightarrow signal \sim GeV

- ▶ Vu dans les détecteurs gazeux (\supset Hydrogène)

- ▶ Vu dans les APD de CMS (pbm de triggers)

- Rupture de gain

- ▶ Electronique multi-gain

- ▶ ⚠ intercalibration \rightarrow apparition de pics !

**découverte d'une
«nouvelle» physique !**

Quelques considérations pour les ingénieurs (mais pas uniquement!)

- La mécanique :
«le calorimètre volant» (en simu)
 - ▶ Zone mortes
 - ▶ déformations / précision
- L'électronique
 - ▶ La consommation (power pulsing)
 - ▶ La dissipation thermique
 - ▶ les CEM, mise à la masse
- La fiabilité sur 10–20 ans
 - ▶ Usure...
 - ▶ Accessibilité
- Les services
 - ▶ passage des services
 - ▶ l'intégration
- L'acquisition
 - ▶ Flux de données
 - ▶ Redondance
- L'intégration
 - ▶ Coûts
 - ▶ Risques :
 - ◆ la dépendance à 1 fournisseur
 - ◆ obsolescence du matériel : déjà «vieux» à l'installation