

La calorimétrie

Partie I

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



***École du détecteur à la mesure
Bénodet, juin 2018***

Mon parcours...

15 ans de H1 (collisionneur e-p HERA)

- Thèse : Test des modules du calorimètre Fe-~~e~~Ar (+ la recherche de lepto-quarks)
- Le calorimètre arrière «**SpaCal**» (+ structure du proton à «petits x »)
- Luminomètre : Calorimètre à 0° à Fibre **Cherenkov**

CALICE-ILD → International Linear Collider (ILC) [+ CEPC, CLIC, FCC-ee]

- Construction & tests de prototypes de calorimètre super-granulaires optimisés pour le «Particle Flow»
 - **SiW-ECAL** : calo silicium
 - **SDHCAL** : Fe-**GRPC**
 - Simulations → **optimisation détecteur** ⊕ techniques de reconstruction

Enseignement Travaux Expérimentaux & M1 à Polytechnique

- **NaI** + PM (2 voies)

Plan

Introduction

- Historique
- Les interactions des particules dans la matière
 - Interactions hadronique, réponse en temps, ...
 - Oh les belles gerbes !
- Principe de la mesure en calorimétrie
 - Calorimétrie électro-magnétique & hadronique
 - Mesures de la performance

Techniques de base de détection

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

En pratique :

- 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

Vendredi

la calorimétrie : Introduction

Pour quoi ?

Mesure de l'énergie de particules **par arrêt complet** (\perp philosophie trajectographes)

- «Calorimètre \cong bloc de matière dense instrumenté»

Mesure des neutres :

- Electromagnétique : γ
- Hadronique : n, K^0_L

Mesurer l'énergie des électrons & positrons : e^\pm

Mesurer l'énergie des hadrons chargés. h^\pm

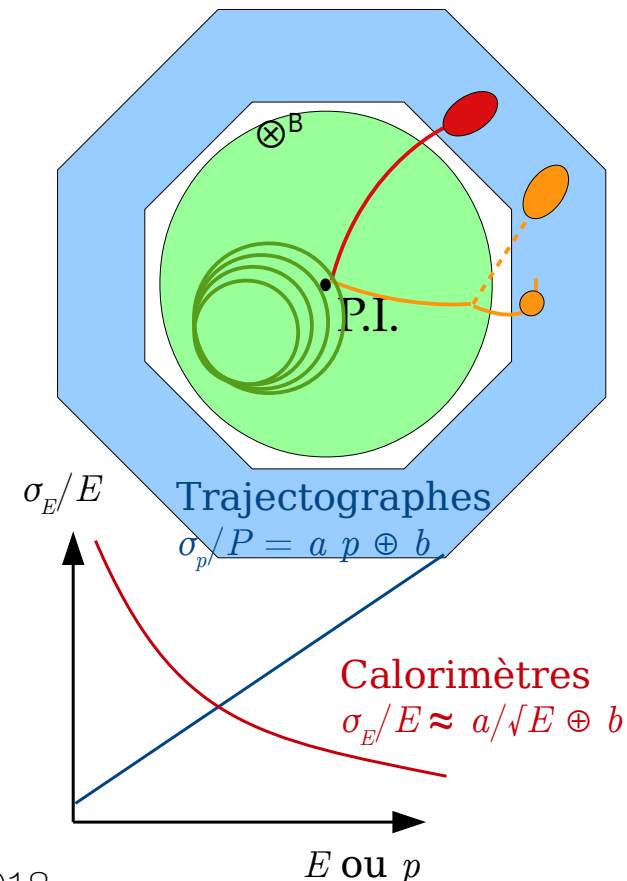
Identifier les leptons : électrons, μ , τ 's

- Muons \cong trace dans le détecteurs
- $\tau \sim$ jets

Mesurer les jets (\sim quarks) \rightarrow «Energy Flow» «Particle Flow»

- $\gamma c \tau =$ parcours moyen
> taille de trajectographe

- ▶ K^0_L, π^\pm
- ▶ $\mu, p, n \gg 100$ m



La calorimétrie

* https://fr.wikisource.org/wiki/%C5%92uvres_de_Pierre_Curie/44

1903 : P. Curie & A. Laborde : vrai calorimètre*

1930 : 1ère « vraie » mesure (e- du ^{207}Bi)

→ **Bolomètres**

1949 : Cristaux NaI + photo-multiplicateur :

- spectroscopie γ pour le nucléaire.
- Bon marché, stable, « pas mauvais » (↔ batterie au Pb p)

Système plus complexe → Phys. Nucl

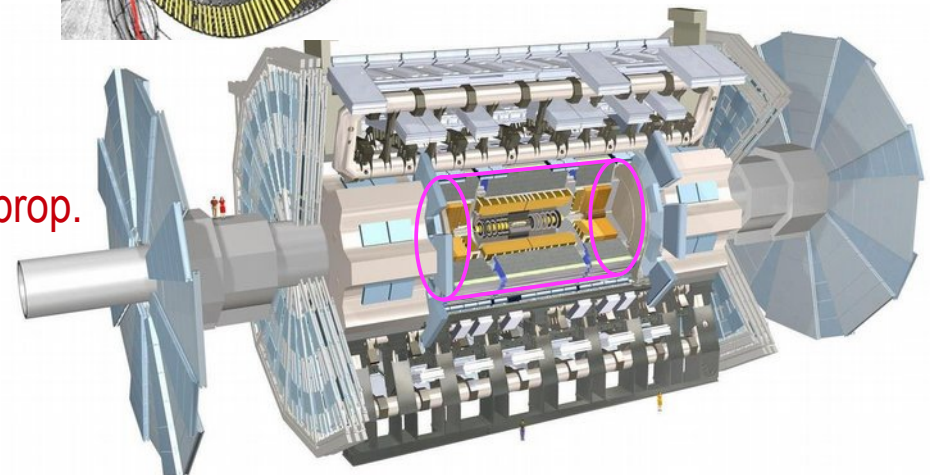
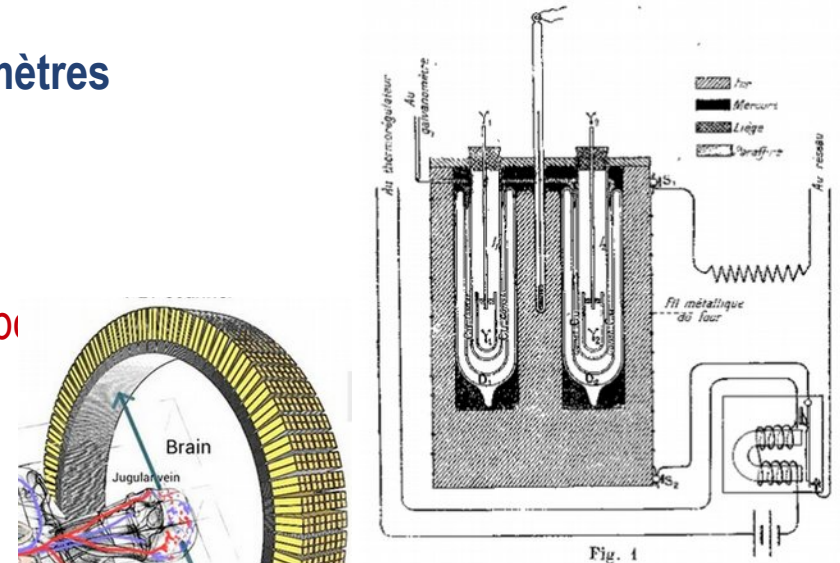
- Photons en coïncidences dans les réactions
 - Tomographie par émission de positrons (TEP)

En Physique des Particules

- Chambres à bulles = trajectographes
 - analyse magnétique
- Remplacement des ch. à bulle par des Ch à Fil Multi prop.
- 1^{ers} grands calorimètres dans les années 70

De + en + gros et plus complexes (environnement)

- LHC : CMS & Atlas



Ordres de grandeur

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} ; \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 10^{-10} \text{ J}$$

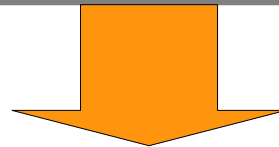
$$M_Z c^2 \sim 100 \text{ GeV} = 10^{-8} \text{ J}$$

$$- \Delta T (1 \text{ g d'eau}) = 10^{-8} / (4.18 \text{ J/cal}) = \text{qq nK}$$

But : Passage d'une particule (mip) dans 1 cm de mat \sim qq MeV

\rightarrow domaine des bolomètres (à qq 0,1°K)

Besoin d'une amplification
physique du signal d'ionisation



Analyse des processus microscopiques

Principe de la calorimétrie en PHE

On fait interagir les particules

- (Conversion des neutres en chargés)
 - γ (gamma) \rightarrow paire e^+e^- par interaction em
 - h^0 (hadrons neutres) : interaction forte
 - ν (neutrinos) \rightarrow interaction faible (courant chargé)
- Multiplication par réaction \rightarrow **Gerbes EM & Hadronique**

Puis mesure des traces chargées \leftarrow les seules laissant un signal

$$E_{\text{total}} \propto \sum \ell_{\text{traces}} \propto \begin{array}{l} \text{Nombre de messagers emis (photons, } e^-) \\ \text{Nombre de messagers mesurés} \end{array}$$

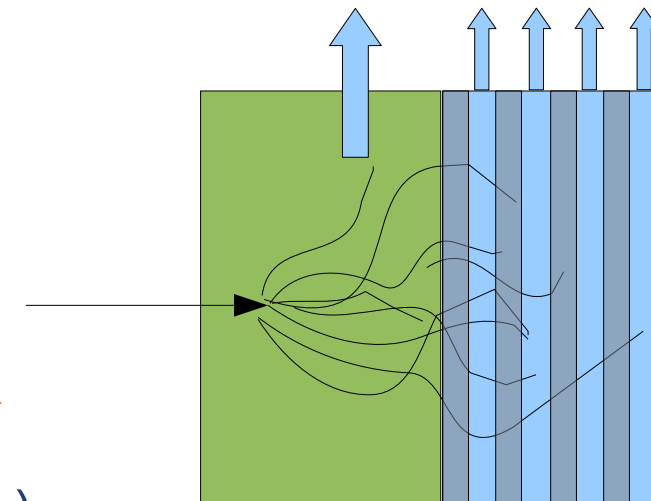
On doit fournir

- De la matière (bcp !) pour interagir (radiateur)
- un milieu sensible aux traces chargée (senseur)

Radiateurs & senseurs

- identiques \rightarrow **Calorimètre homogène**
- entrelacés \rightarrow **Calorimètre à échantillonnage**

Messenger = électrons, photons*



Les interactions dans un bloc de matière

Glossaire

em/EM: électromagnétique

E : énergie

p : impulsion

m : masse

– **facteurs relativistes** : $\beta = v/c$; $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} = E/m$

Z : numéro atomique des atomes (nbre d'électrons=nbre de protons)

A : masse atomique (nombre de nucléons = Nb proton + nb neutrons)

Bremsstrahlung = radiation de freinage

\check{C} = Čerenkov (émission de lumière par effet superluminique [dans un milieu])

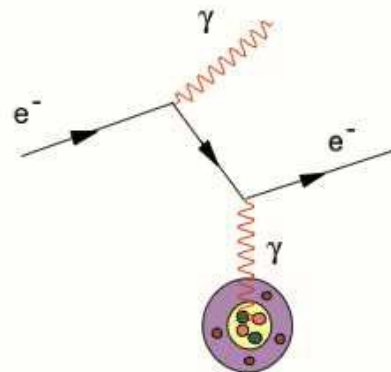
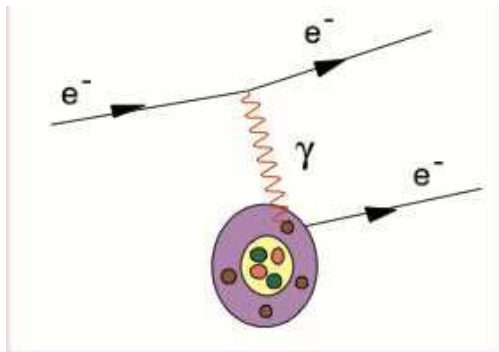
X_0 : longueur de radiation

λ_{had} : longueur d'interaction hadronique

Interactions purement EM

Chargés

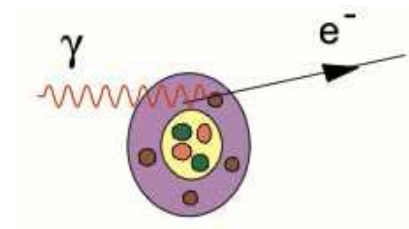
Ionisation



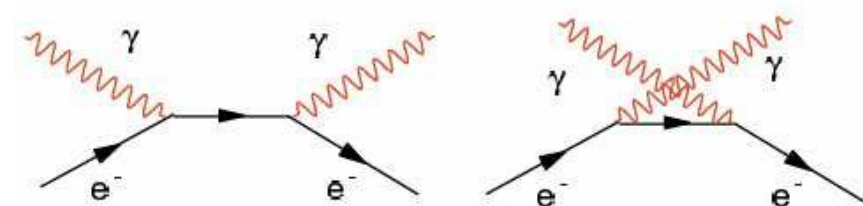
Rayonnement de freinage

Photons

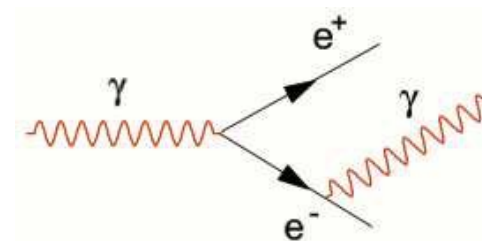
Effet photo électrique



Effet compton



Création de paire



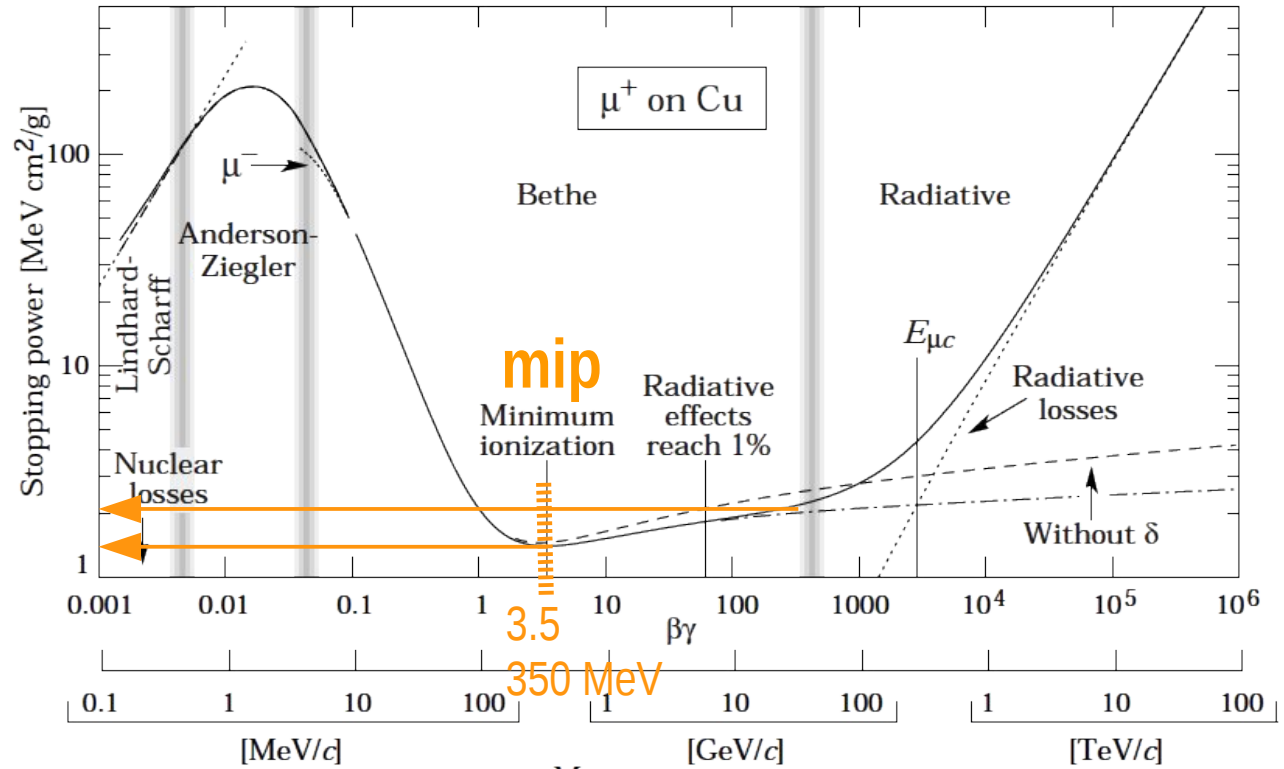
Les muons

Comme dans les trackers

$$-dE/dx$$

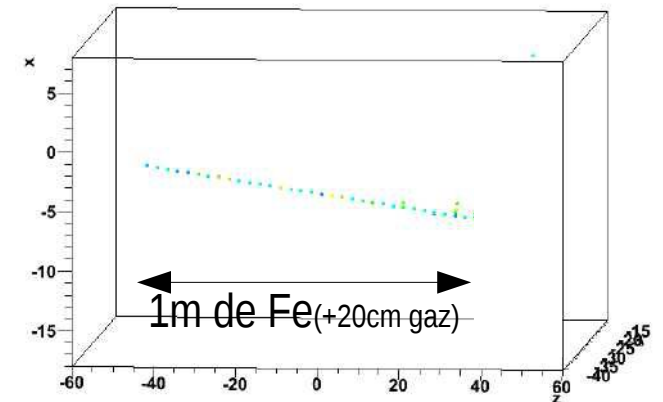


1-2
MeV cm²/g



μ de 10 GeV

x:y:z:Qinduced {evtlD==229}



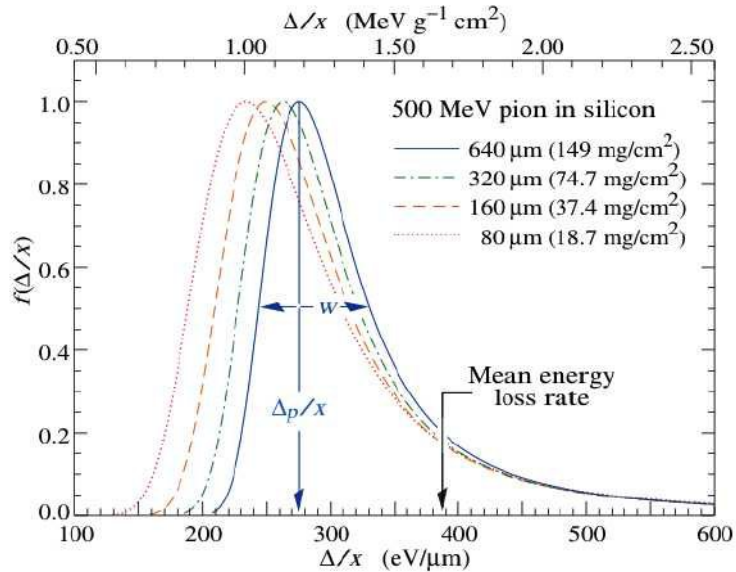
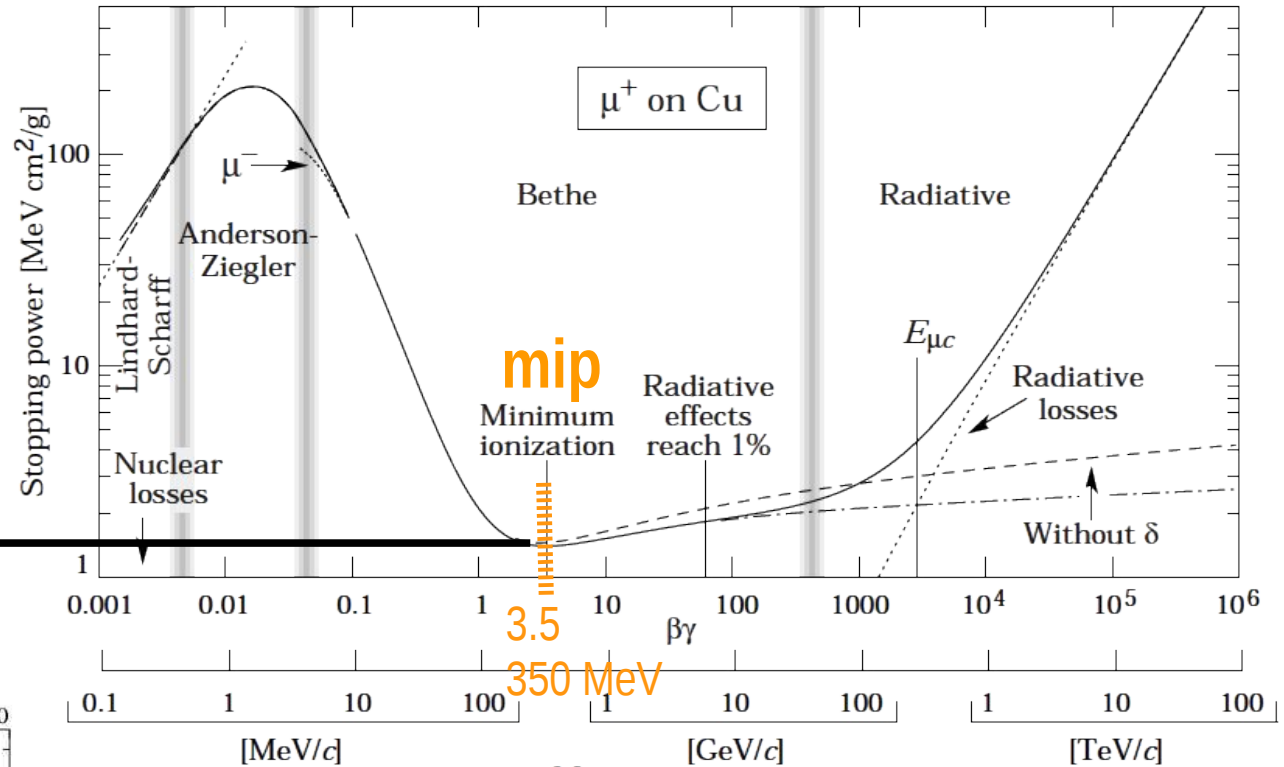
Les muons

Comme dans les trackers

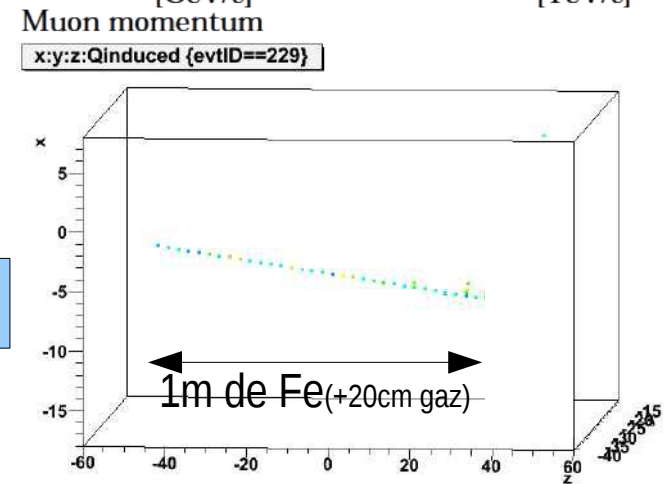
$- dE/dx$



Landau



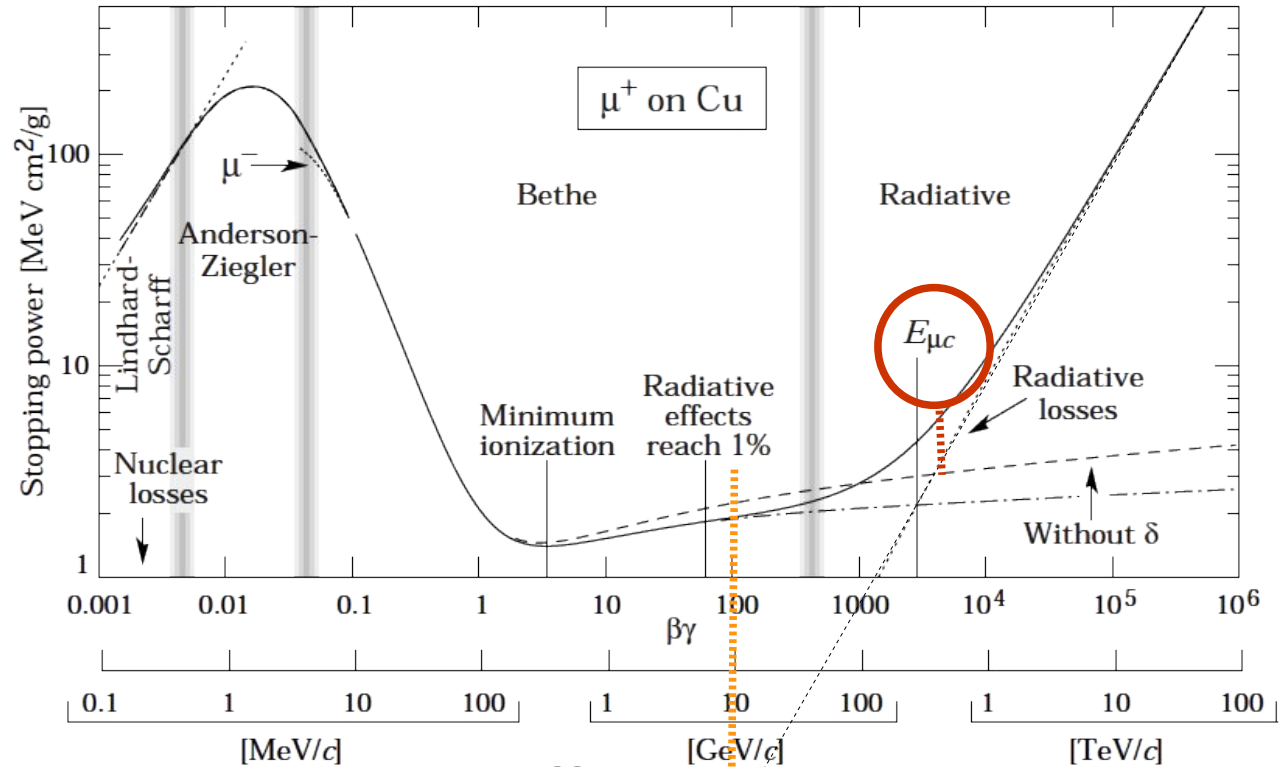
μ de 10 GeV



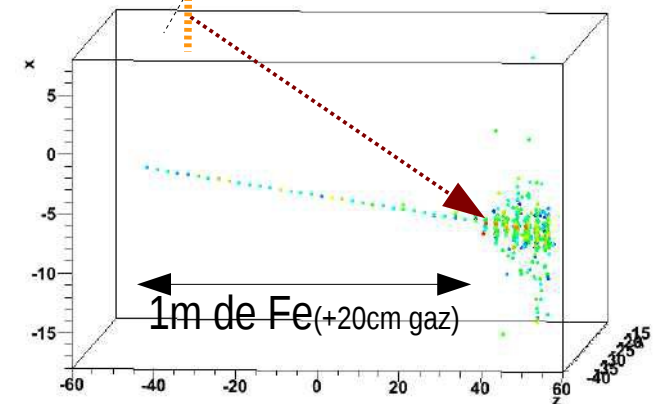
Les muons

Comme dans les trackers

- dE/dx
- Landau



μ de 10 GeV



Les photons dans la matière

«Tout ou rien»

- Section efficace $\sigma(E)$
[Barn/atome, cm^2/g , cm^{-1}]
- Atténuation exponentielle dans la matière

Effet Photo-Électrique

- $\sim Z^5 / E^3$

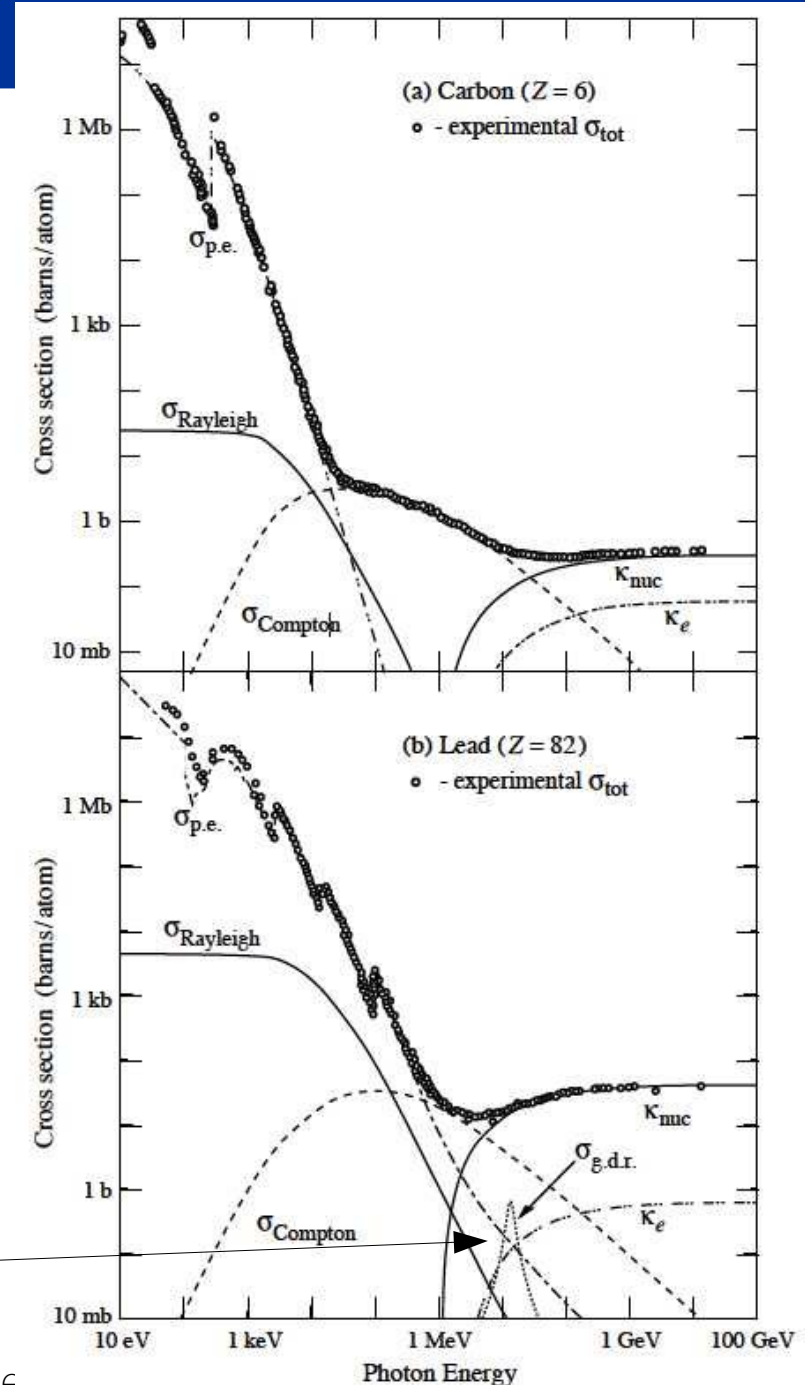
Effet Compton

- Et autres diffusions
 - Rayleigh ($\lambda >$ taille diff.)
 - $\sim Z$

Création de Paires

- $\sim Z^2$

Effets photo-nucléaires...



Interactions des particules chargées

Particules Chargées (μ^\pm, h^\pm, e^\pm)

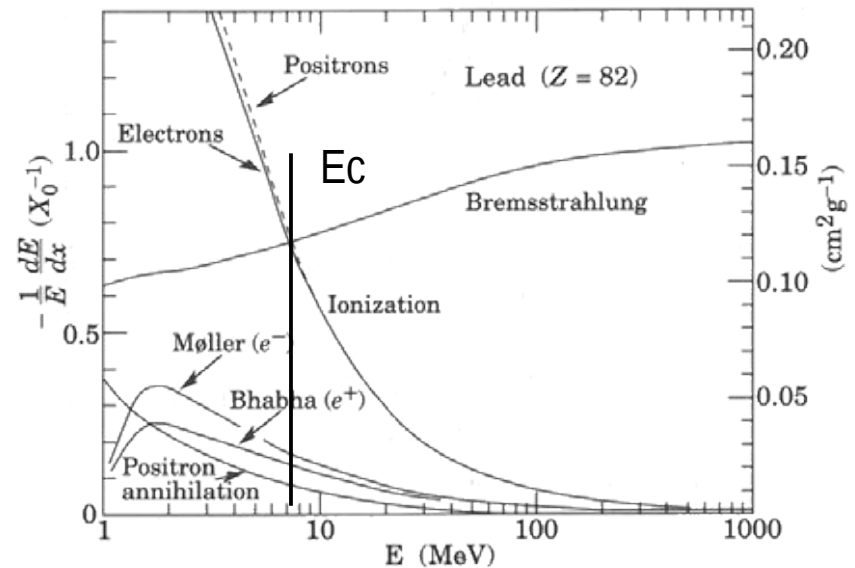
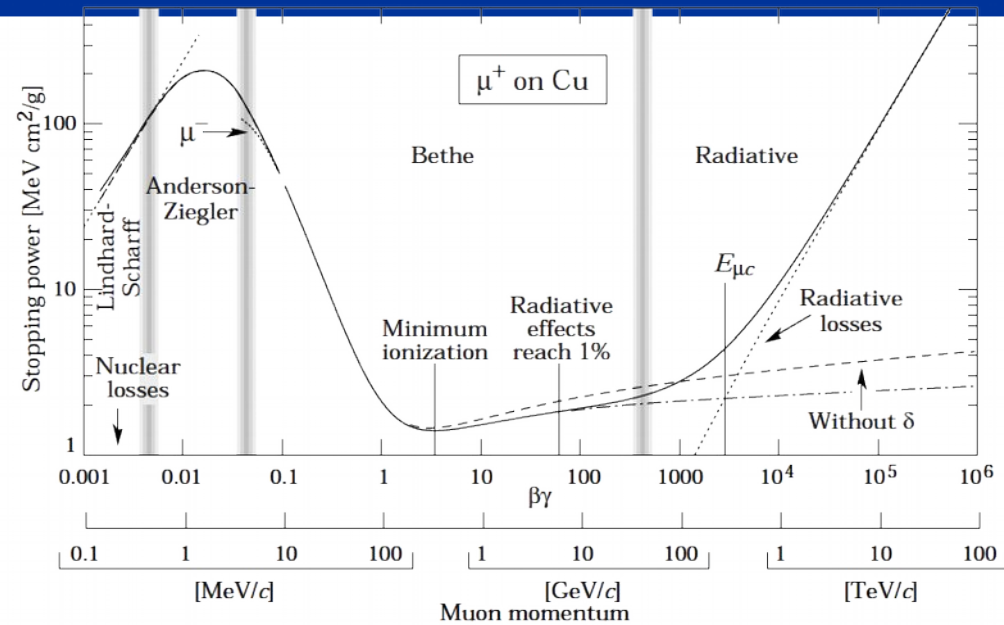
- Pertes graduelles par Ionisation
 - Par bremsstrahlung à haute énergie
- Pour les particules lourds (tout sauf e^\pm)

Équation de Bethe-Bloch qq %

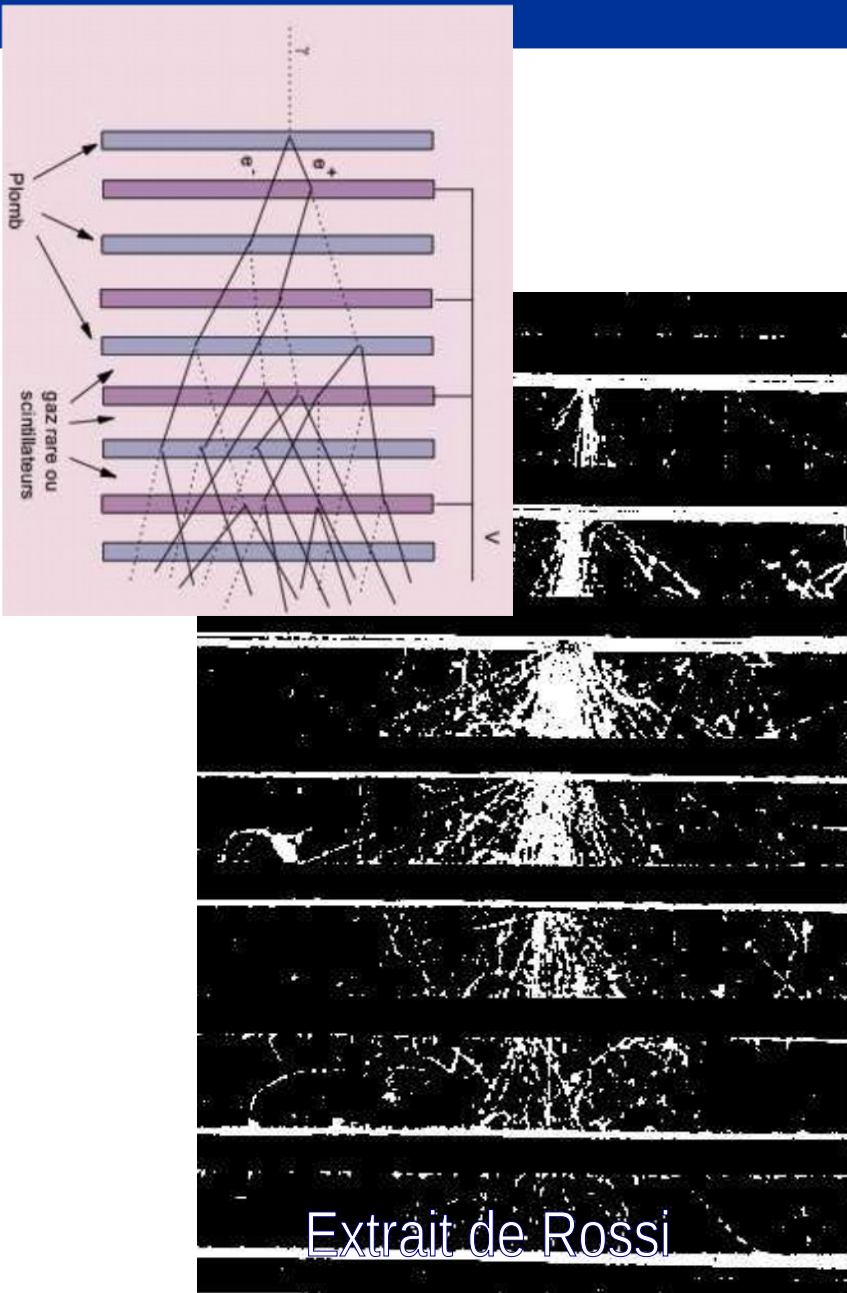
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Électrons/Positrons

- Termes supplémentaires (Moller, Bhabha, Annihilation)
- Trajectoire non rectiligne
 - Diffusion multiple

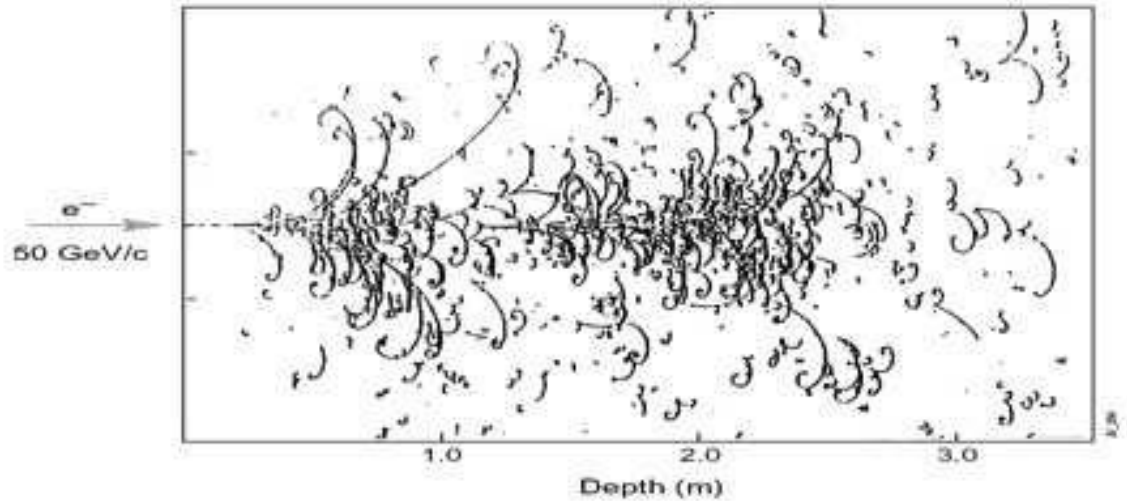


Gerbes électromagnétiques



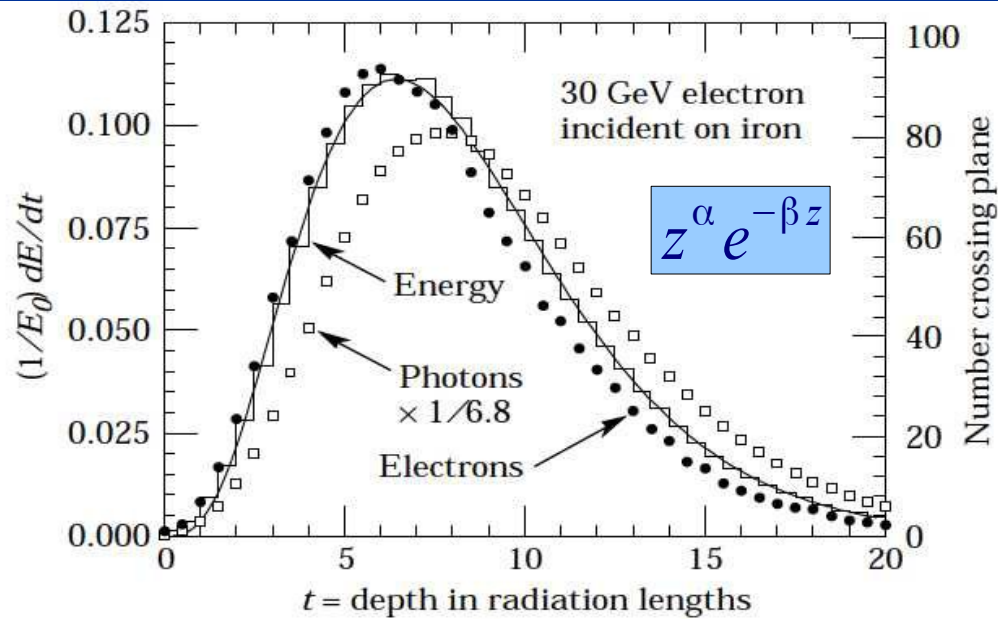
Extrait de Rossi

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



Electron gerbant dans des plaques
de plomb dans une chambre de
Wilson (1949)

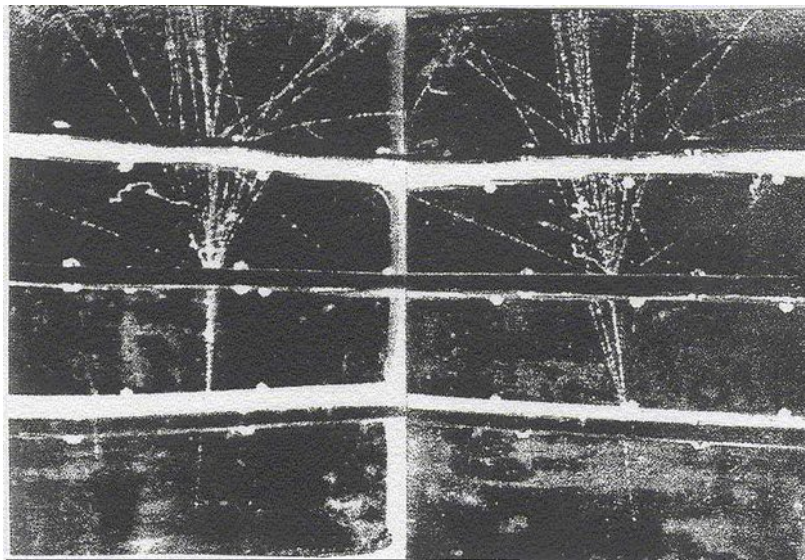
Profils longitudinal ; Longueur de radiation X_0



$1 X_0 =$

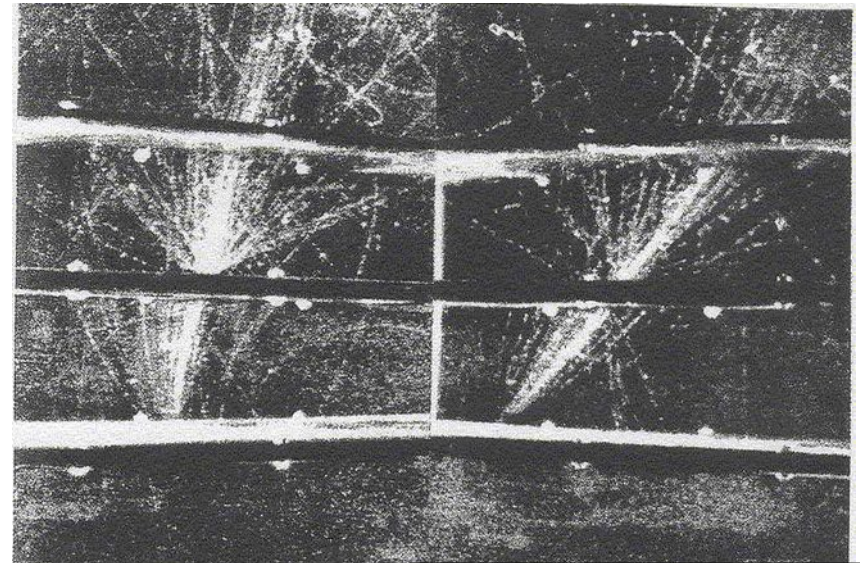
- épaisseur pour qu'un e^\pm perde les 2/3 ($1-1/e$) de son énergie
- 7/9 de la longueur moyenne de production d'une paire e^+e^-

Réponse moyenne
Elle fluctue...



Gerbe pour 1 électron

L. Fussel 1939 [from Nessi ICFA 2001]



Gerbe pour 1 photon

Caractérisation transverse de la gerbe : rayon de Molière

La structure transverse est indépendante de l'énergie

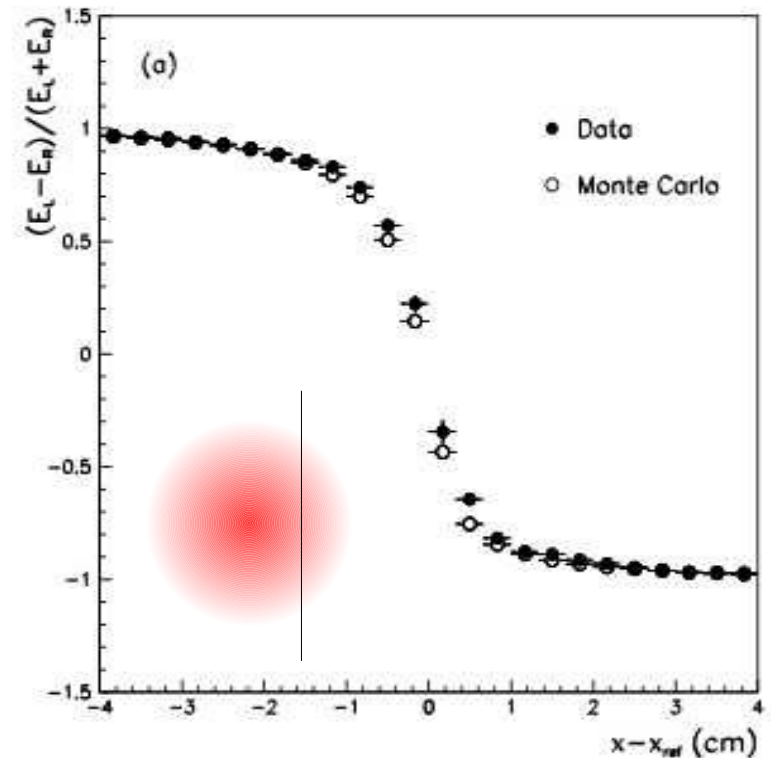
- 1 cœur compact
- 1 halo diffus (Comptons)

$$f(r) = \frac{2r R^2}{(r^2 + R^2)^2},$$

GEANT shower
(PbWO₄
crystal)



Fraction gauche/droite
Electrons de 4 GeV dans
un SpaCal Pb/fibre scint.

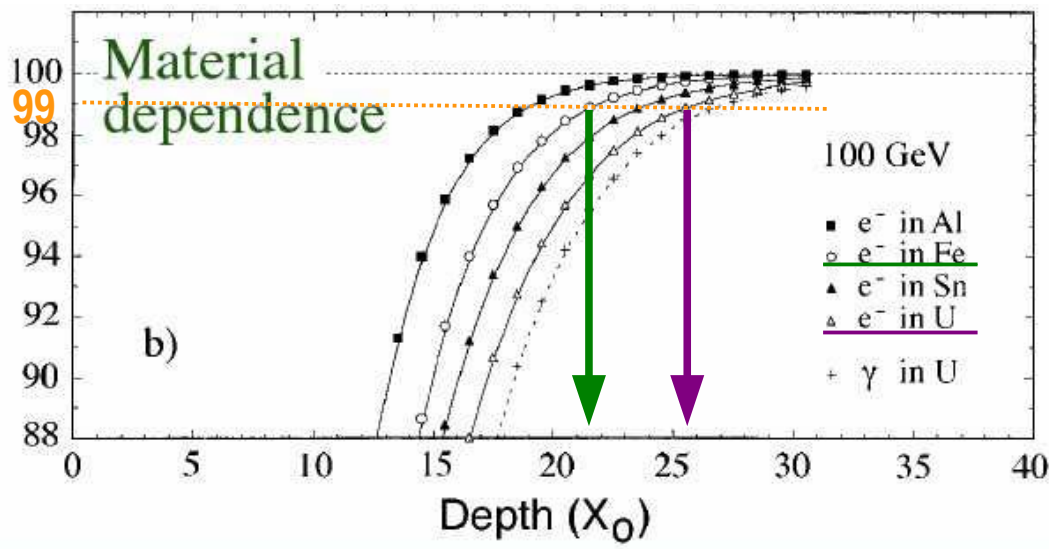
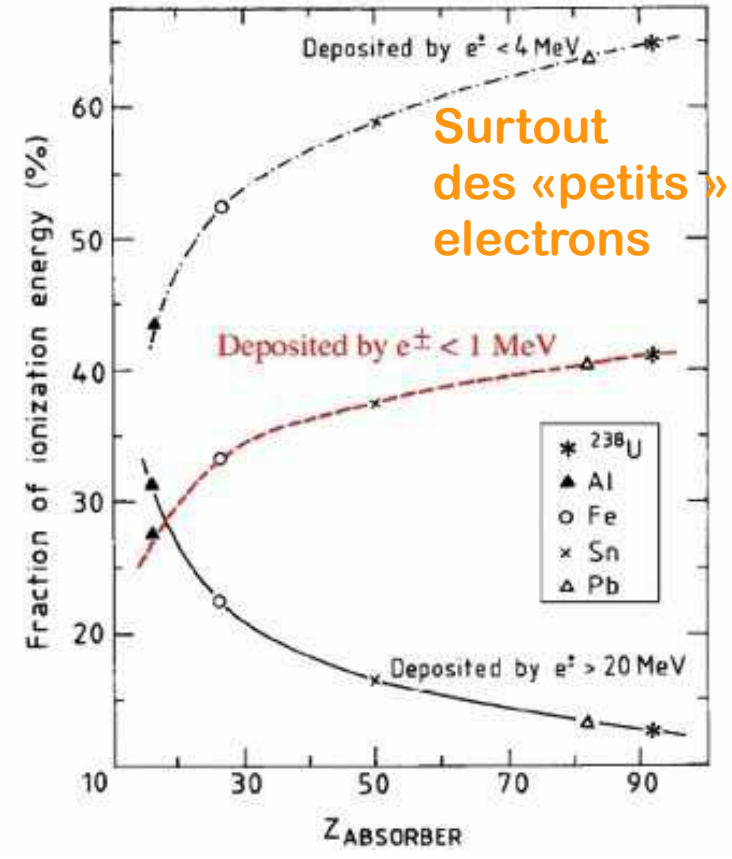
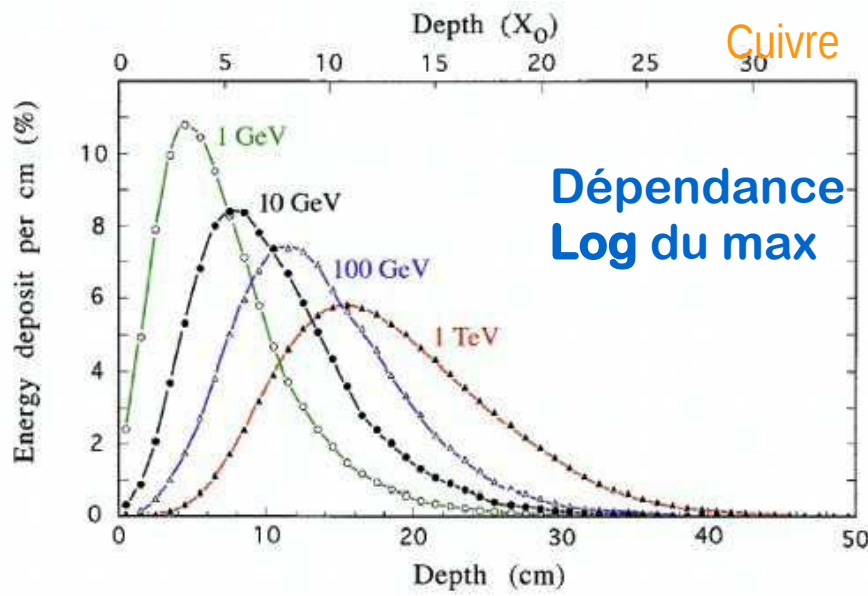


Rayon de Molière (R_M)

rayon du cylindre contenant 90% de l'énergie.
varie comme l'inverse de la densité

99% est contenu dans
 $r = 2 R_M$

Quelques propriétés générales et utiles



$E_c : dE/dx(E_c) \sim \text{Rad}(E_c)$

les gerbes EM sont contenues dans $\sim 25-30 X_0$

Quelques chiffres

$$R_M = X_0 E_s / E_c$$

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

(sol. & liq.)

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

Matériau	Z	A	$\rho / \text{g cm}^{-3}$	X_0 / cm	R_M / cm	E_c / MeV
Si	14	28	2,33	9,4	4,9	40,0
Argon liquide	18	40	1,4	14,0	7,9	37,0
Fer	26	56	7,9	1,8	1,7	22,0
Cuivre	29	64	8,9	1,4	1,5	20,2
Plomb	82	207	11,35	0,56	1,6	7,4
Uranium	92	238	18,9	0,32	1,1	6,2
Tungstène	74	184	19,3	0,32	0,8	8,1
Nal			3,67	2,59		
Air			0,001	30420		

Combinaison de matériaux :

$$\frac{1}{X_0} = \sum w_j / X_j \qquad \frac{1}{R_M} = \frac{1}{E_s} \sum \frac{w_j E_{cj}}{X_j}$$

w_j = poids relatifs

Les interactions hadroniques

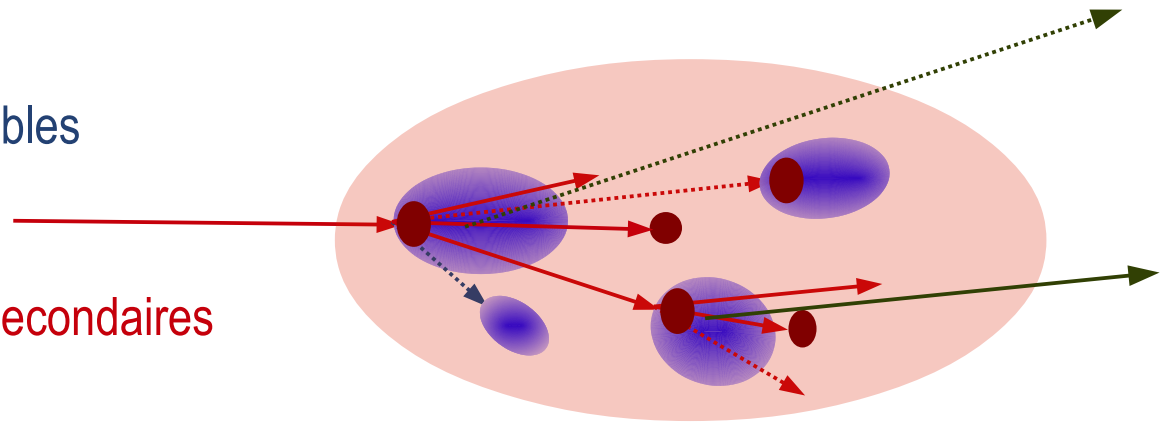
Matière hadronique (\equiv lourds \leftrightarrow leptons \equiv légers)

- **Baryons** : constitués de 3 quarks
 - p, n, Δ^{++}, \dots
- **Mésons** : constitués de paires quark– $\overline{\text{quark}}$
 - $\pi^{\pm,0}, K^{\pm}, K_{L,S}^0$

Chargés / Neutres \rightarrow interaction EM et faibles

+ interactions hadroniques

- **Collisions dures sur noyaux** $\rightarrow N$ secondaires
- **Collision quasi-élastiques**
 - échange de charge (ex : $K_L^0 + p \rightarrow K^+ + n$)
- **Diffusion multiple**
- **Désintégrations « en vol »** :
 - $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ($\tau \sim 10^{-15}\text{s}$) \rightarrow gerbes EM

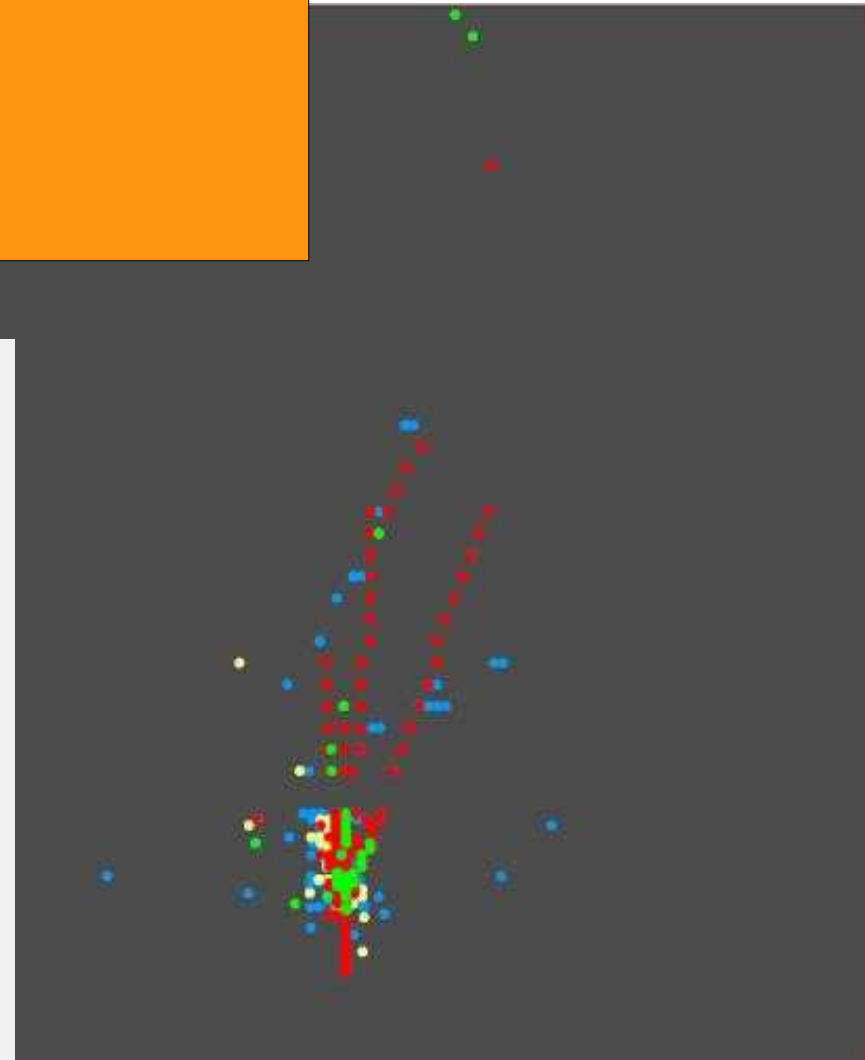
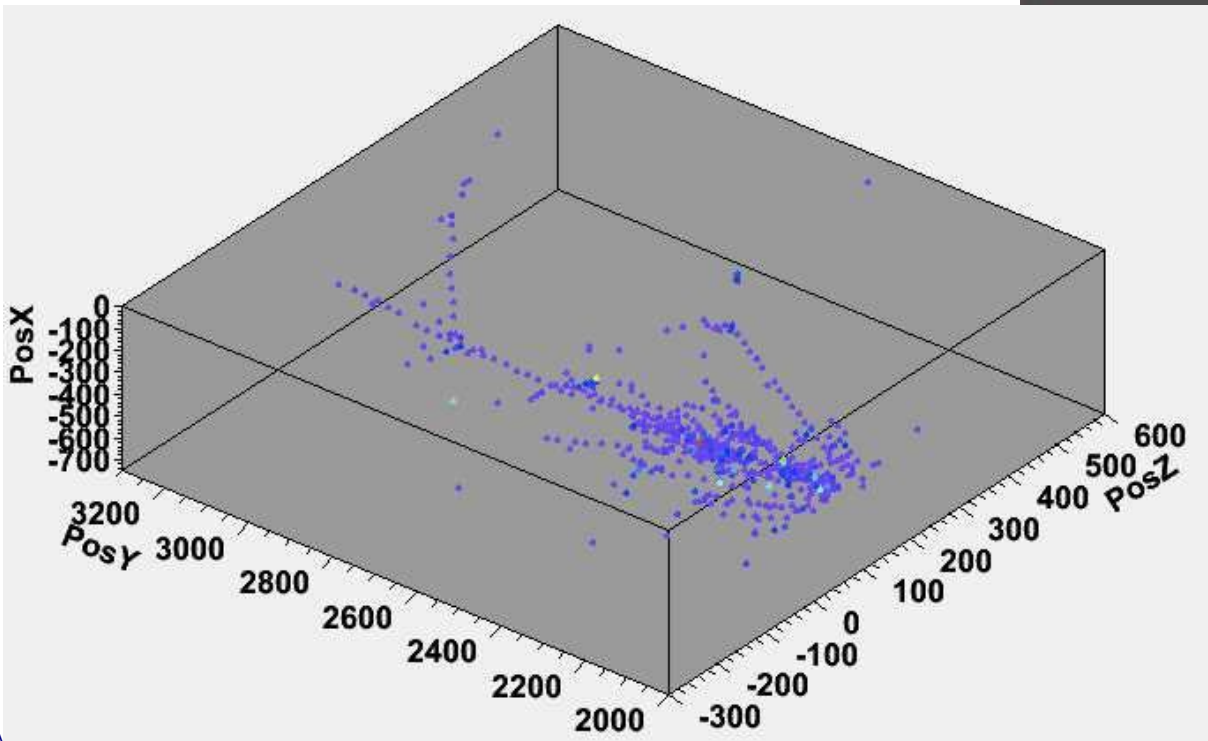


Interaction hadroniques

Processus beaucoup plus complexes

Source principale de fluctuation:
réponse différente

- aux particules électromagnétiques, γ , e
- et aux particules hadroniques, p , K , π
fraction de π^0 (e/h)

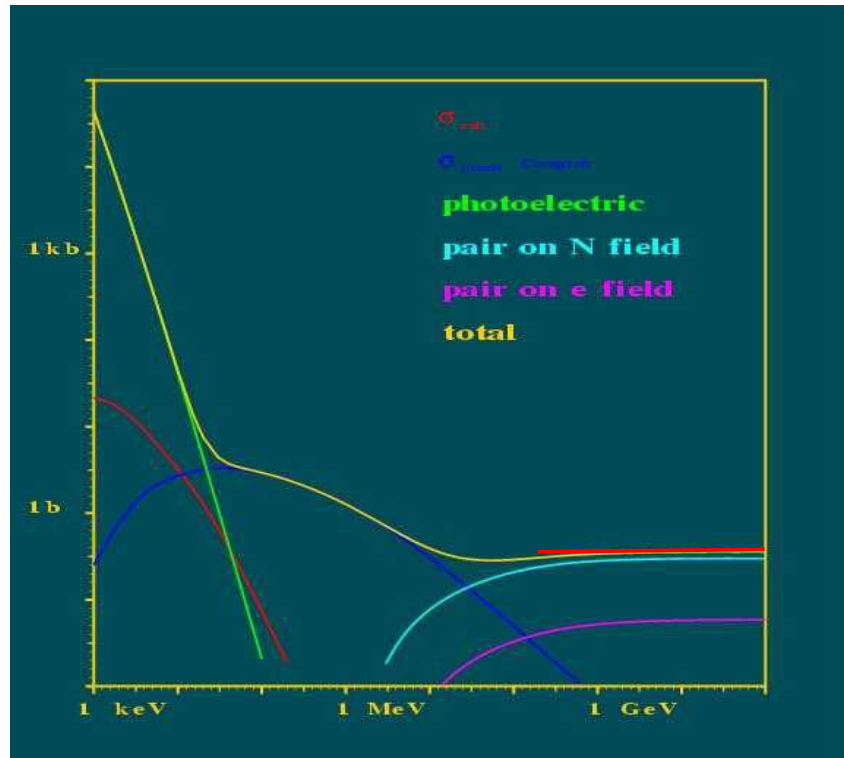


Longueur de radiation λ_0 ,

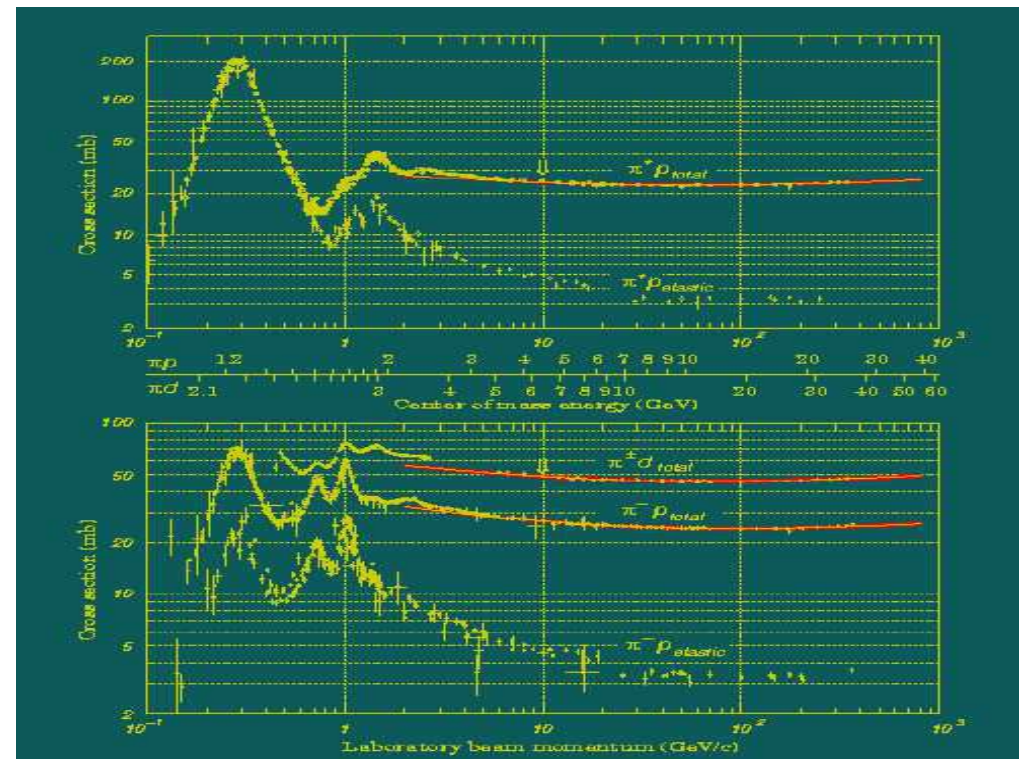
Longueur d'interaction λ_{int} :

Dans un domaine d'énergie,
la probabilité d'interaction dans un intervalle dx donné
est essentiellement indépendante de l'énergie (loi exponentielle),
on peut donc définir la longueur caractéristique d'interaction

Contribution to the cross section γ Carbon in barns/atom



$\pi^+ p$ and $\pi^- p$ cross sections



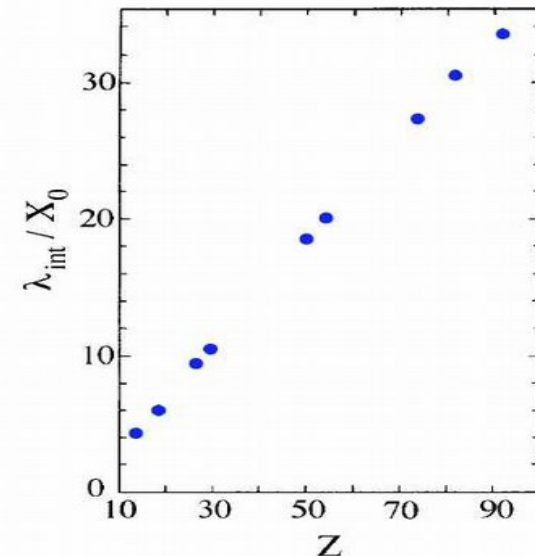
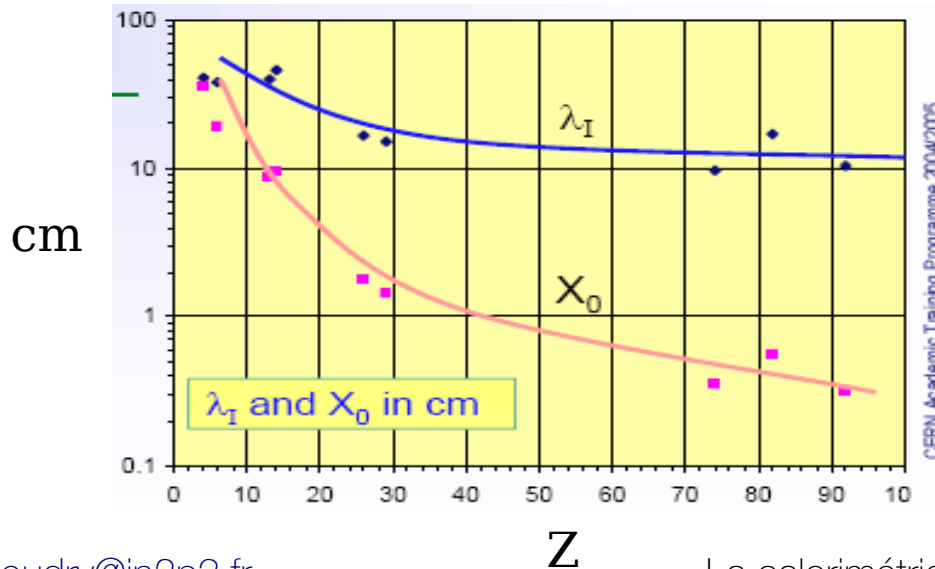
Quelques chiffres

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

Matériau	Z	A	ρ {g cm ⁻³ }	X ₀ {cm}	λ_{int} {cm}	$\lambda_{\text{int}} / X_0$
Si	14	28	2,33	9,4	46,4	5
Argon liquide	18	40	1,4	14,0	85,5	6,1
Fer	26	56	7,9	1,8	16,7	9,5
Cuivre	29	64	8,9	1,4	15,4	11
Plomb	82	207	11,35	0,56	10,5	19
Uranium	92	238	18,9	0,32	11,1	35
Tungstène	74	184	19,3	0,32	9,9	31

Gerbe (30 X₀) ~ 1 λ_{int}

Petit λ_{int} &
Meilleure
distinction
e/h



Pratique

Base de données

- **PDG** : Particle Data Book
<http://pdg.web.cern.ch/pdg/>
- **NIST** : <http://www.nist.gov/pml/data/index.cfm>

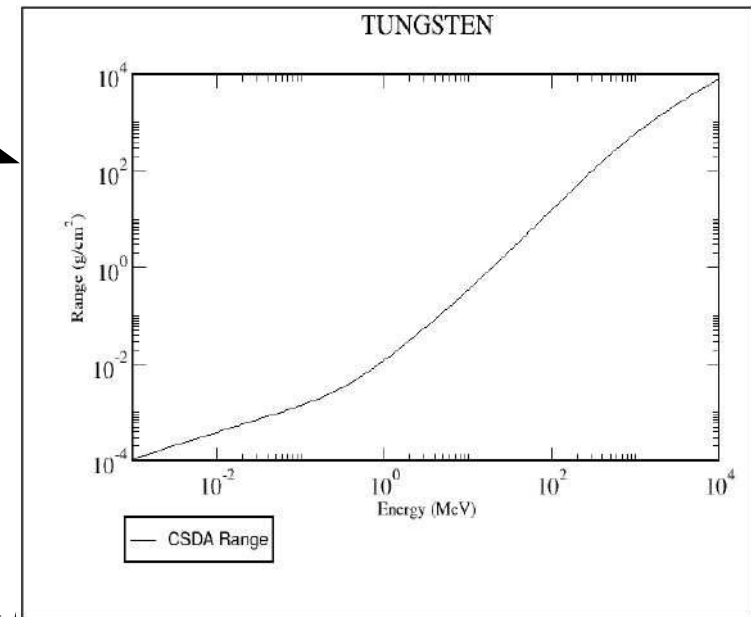
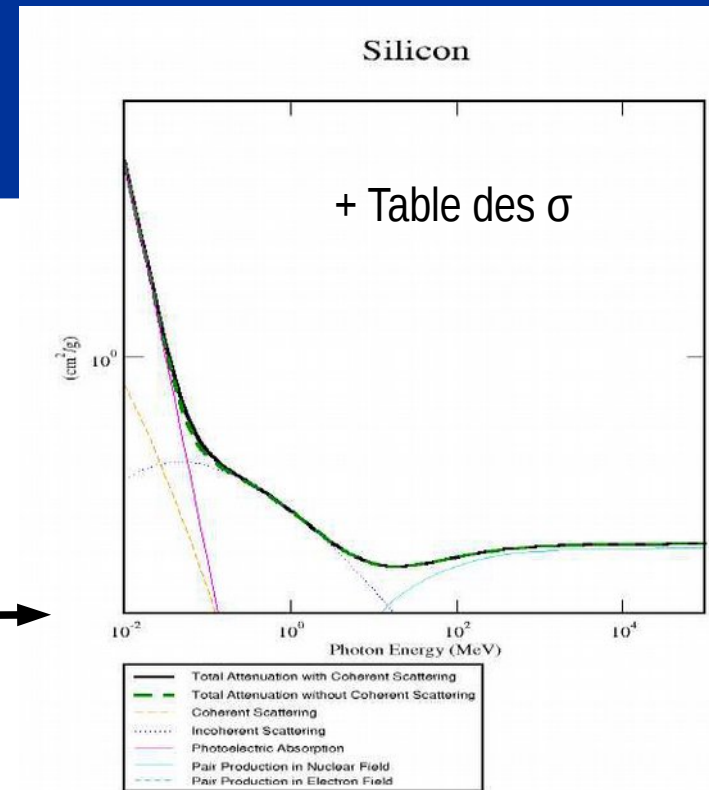
- X-COM : $\sigma_V(E)$

- Calculs de range

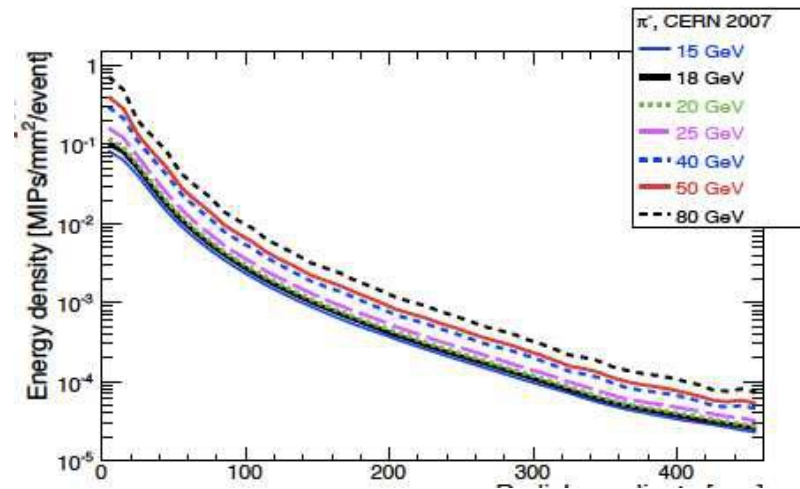
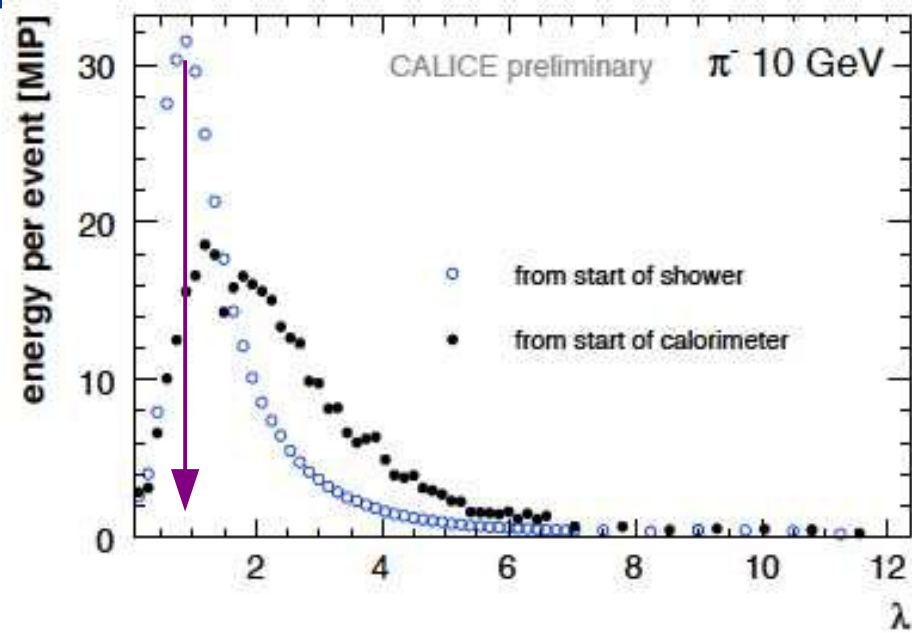
- estar : electrons
- pstar : protons
- astar : α

Nuclear properties

- <http://www.exphys.uni-linz.ac.at/Stopping/>

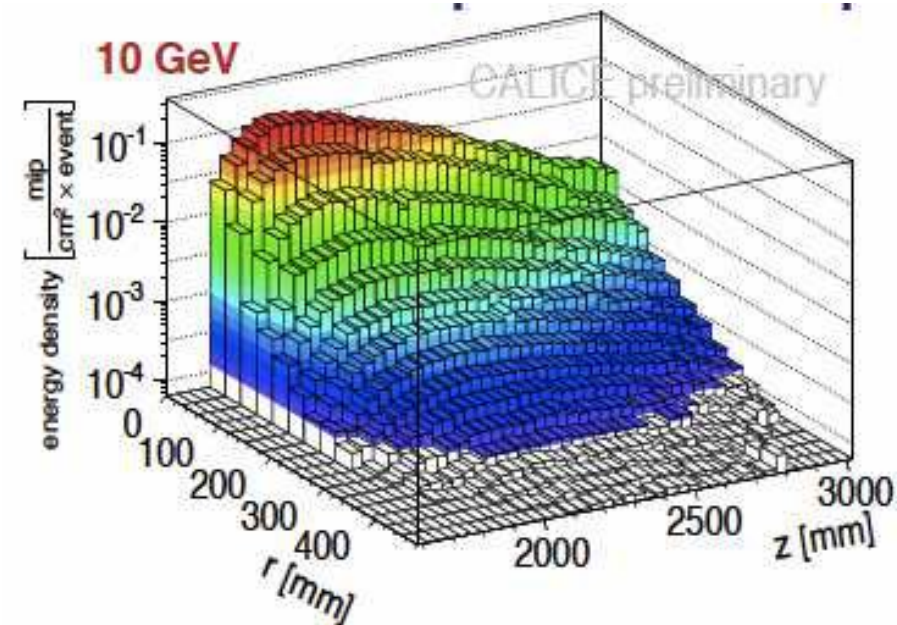


Profil des gerbes hadronique

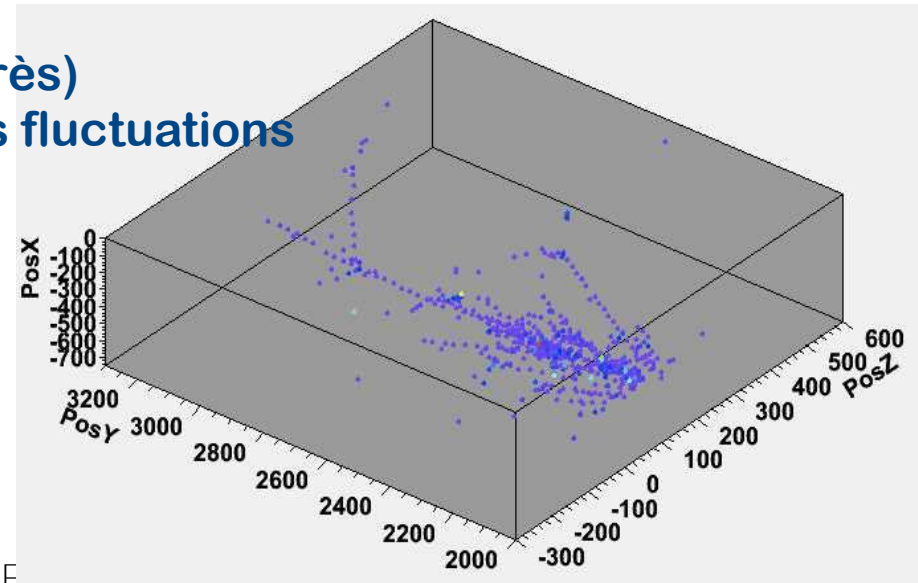


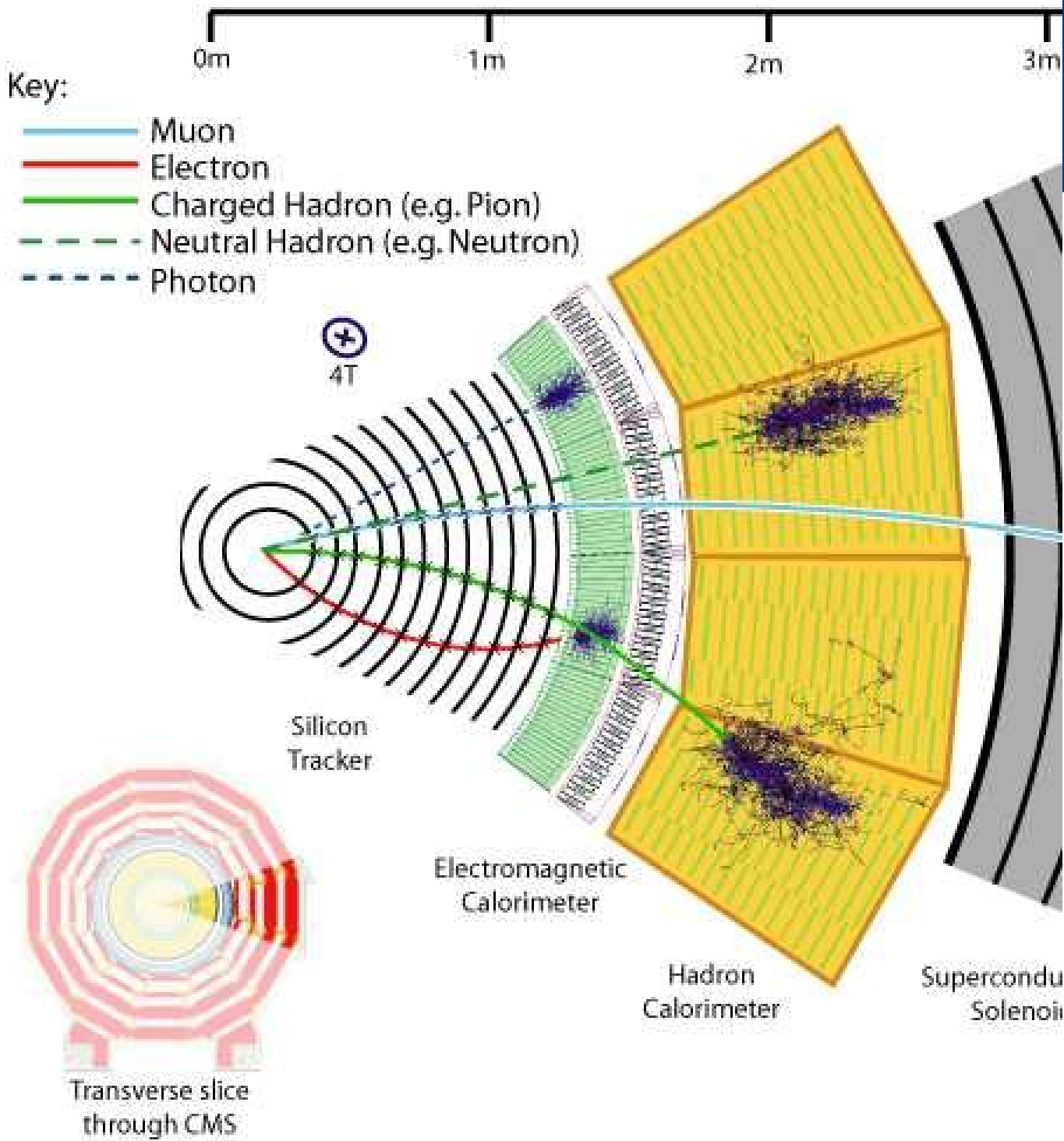
Gerbe Hadronique ~100 GeV à

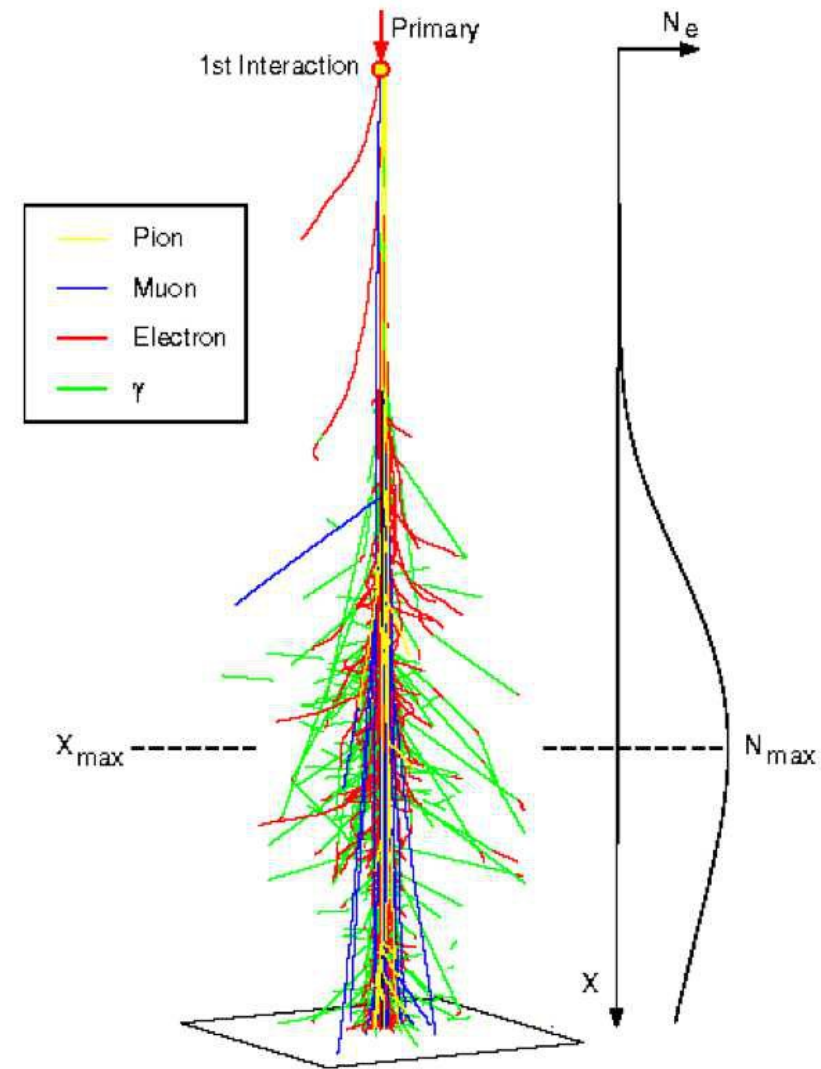
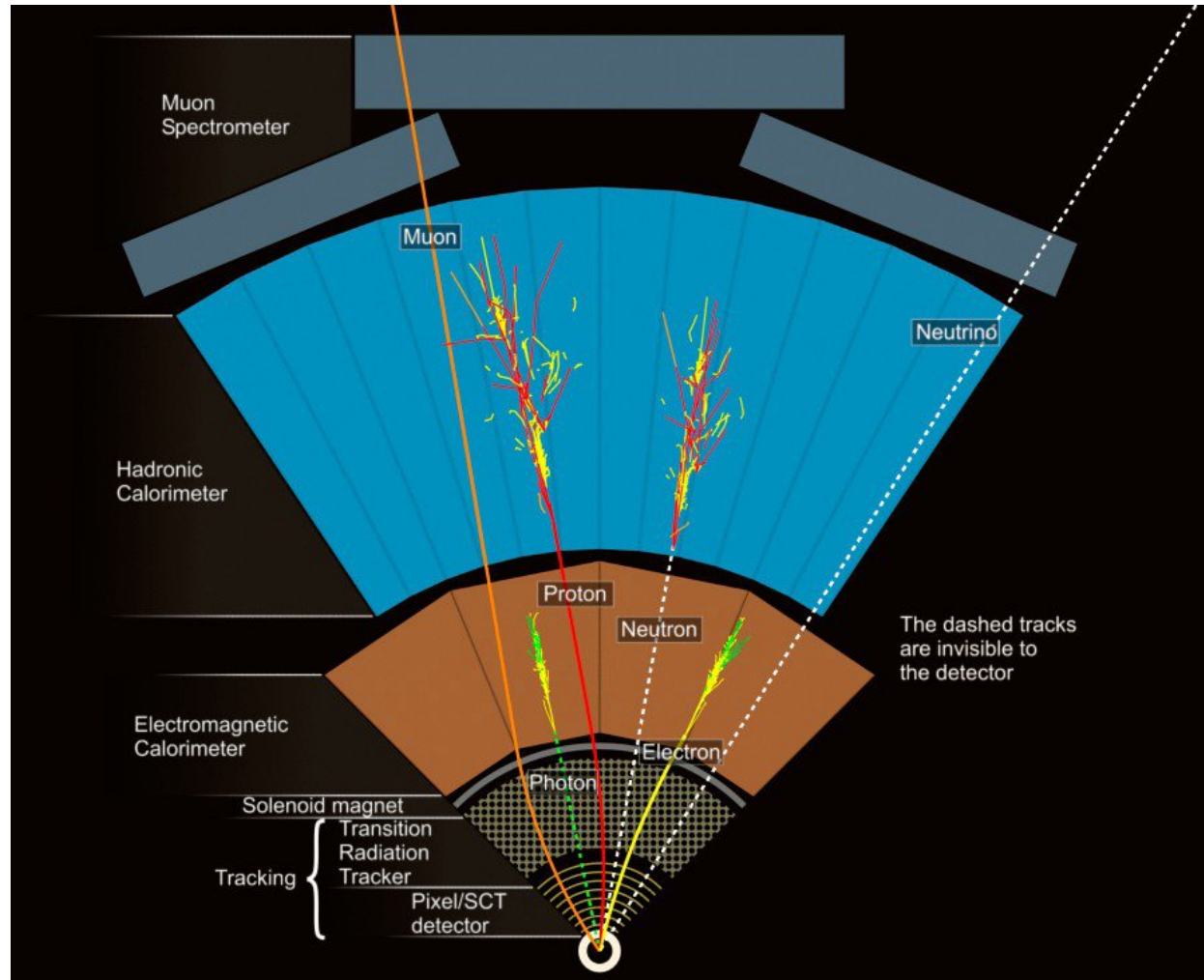
- longitudinalement : 95% dans $8 \lambda_{int}$
- latéralement : 95% dans $R \leq 1,5 \lambda_{int}$



(très très)
Larges fluctuations

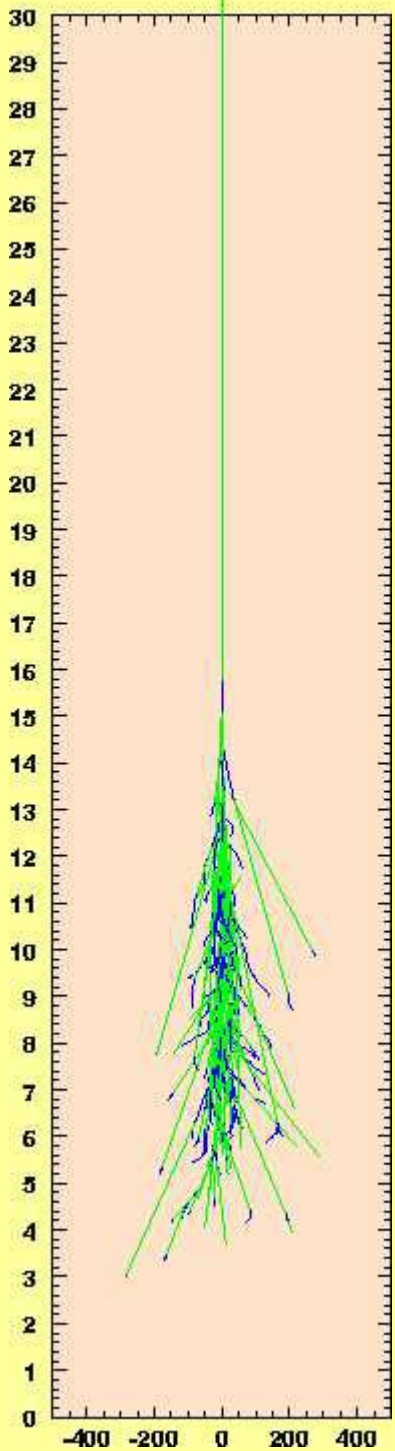




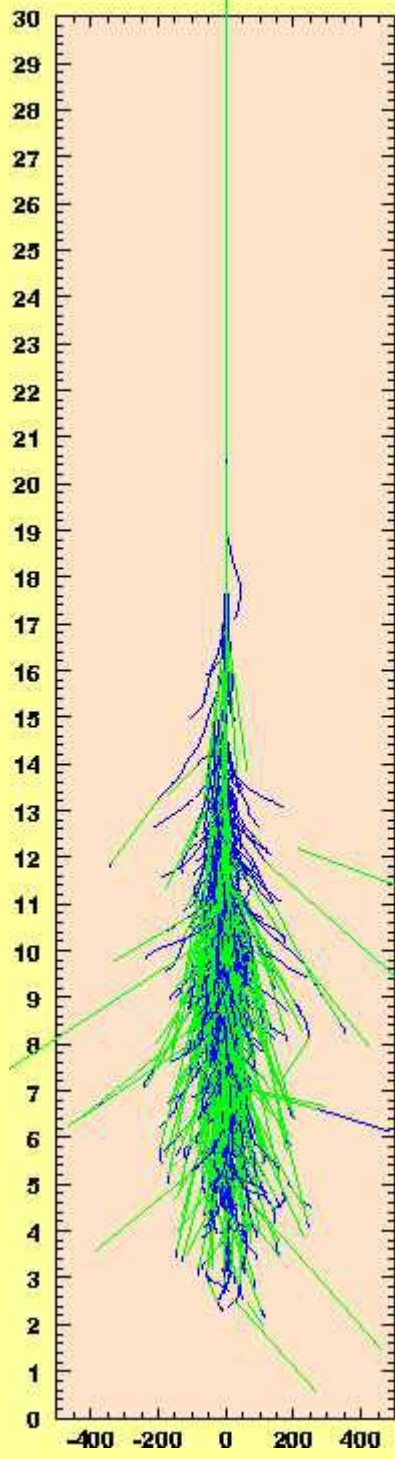


M. De Naurrois

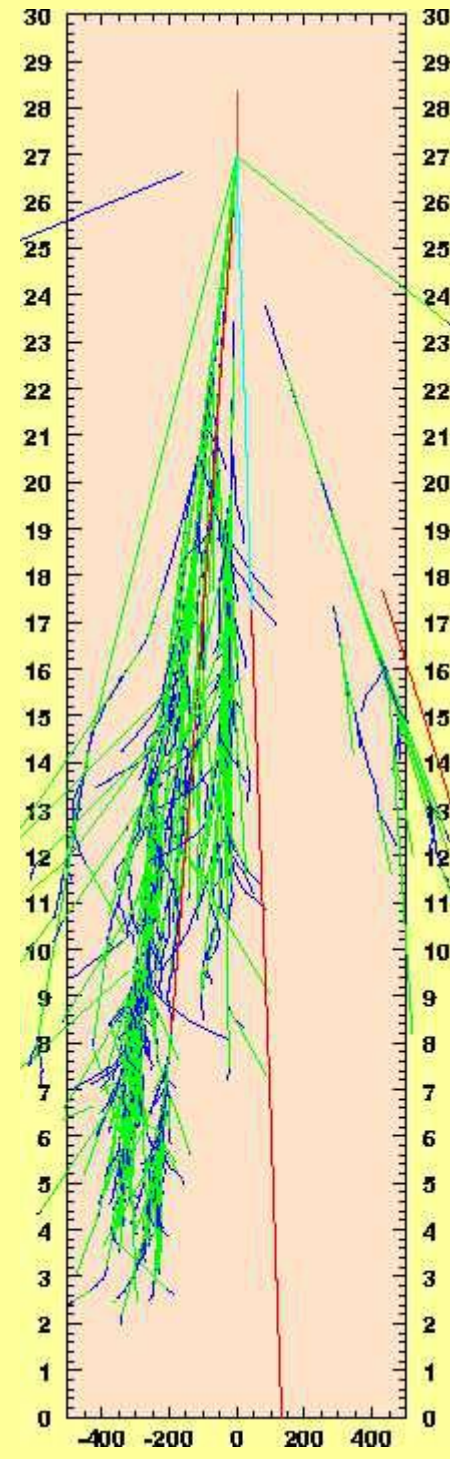
γ 50 GeV



γ 300 GeV



p 300 GeV



By courtesy of Mathieu de Naurois

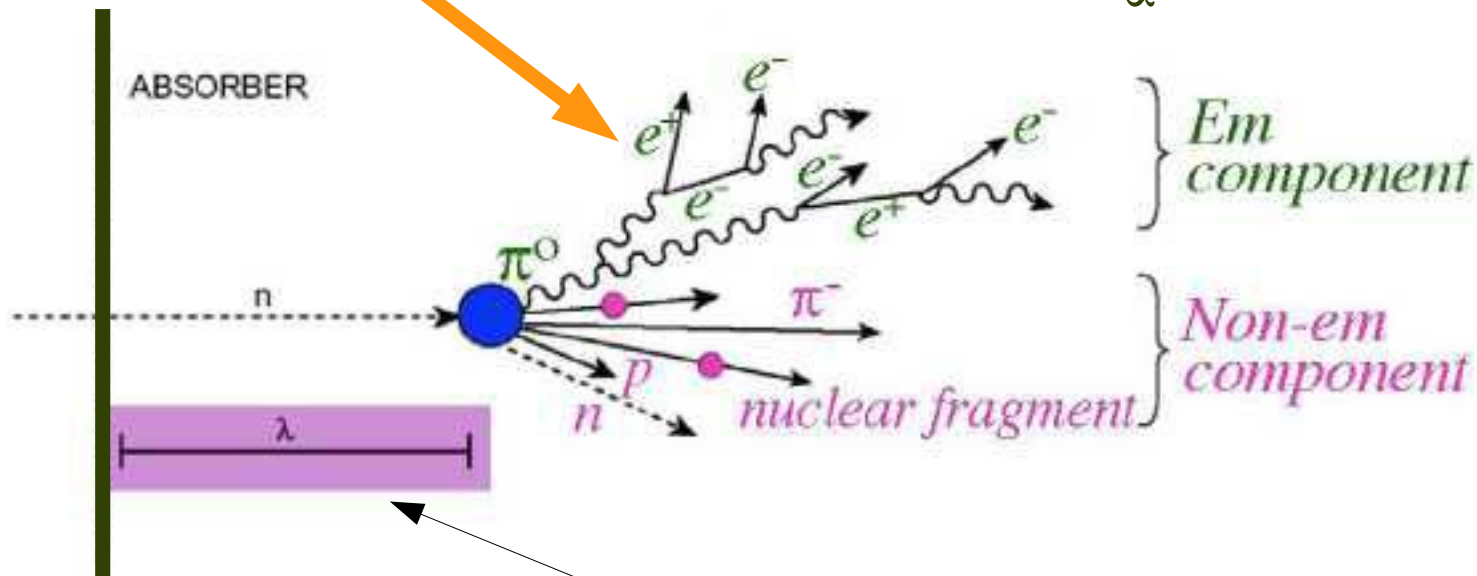
Autopsie d'une gerbe hadronique

Collisions dures

- production de secondaires
- populations
 - $\sim 30\% \pi^+$
 - $\sim 30\%$ de π^-
 - $30\% \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

+ fragments de noyaux

- neutrons rapides
- dés-excitations
 - n
 - γ
 - α



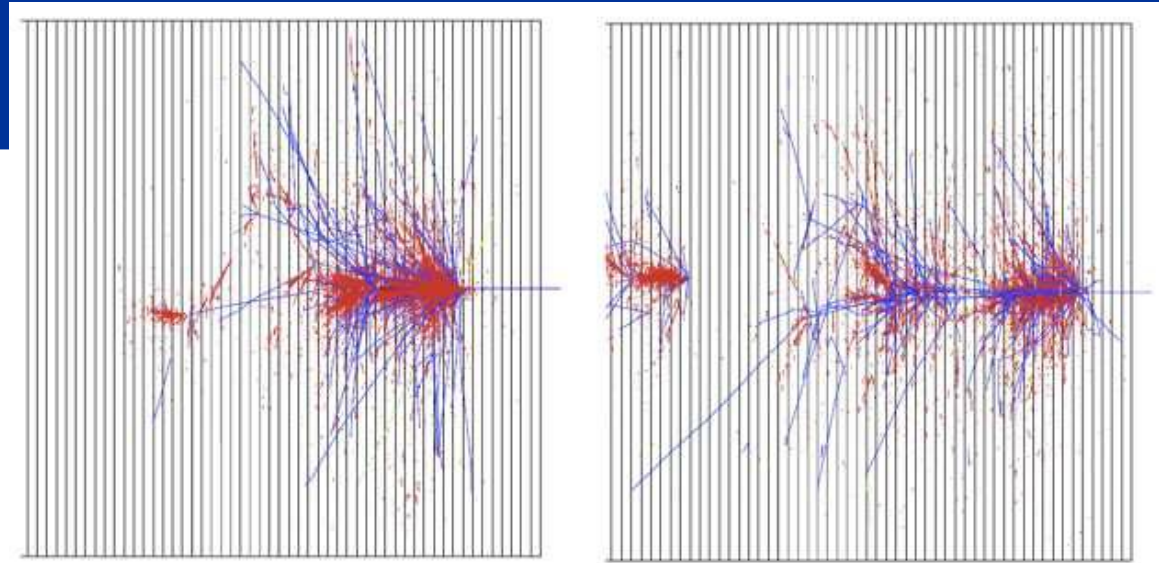
Longueur typique d'interaction

La calorimétrie – Bénodet 2018

La fraction EM

À chaque collision :

- π produits ~ à égalité :
 π^+ , π^- , π^0
 - $\pi^0 \rightarrow$ gerbe EM «locale»

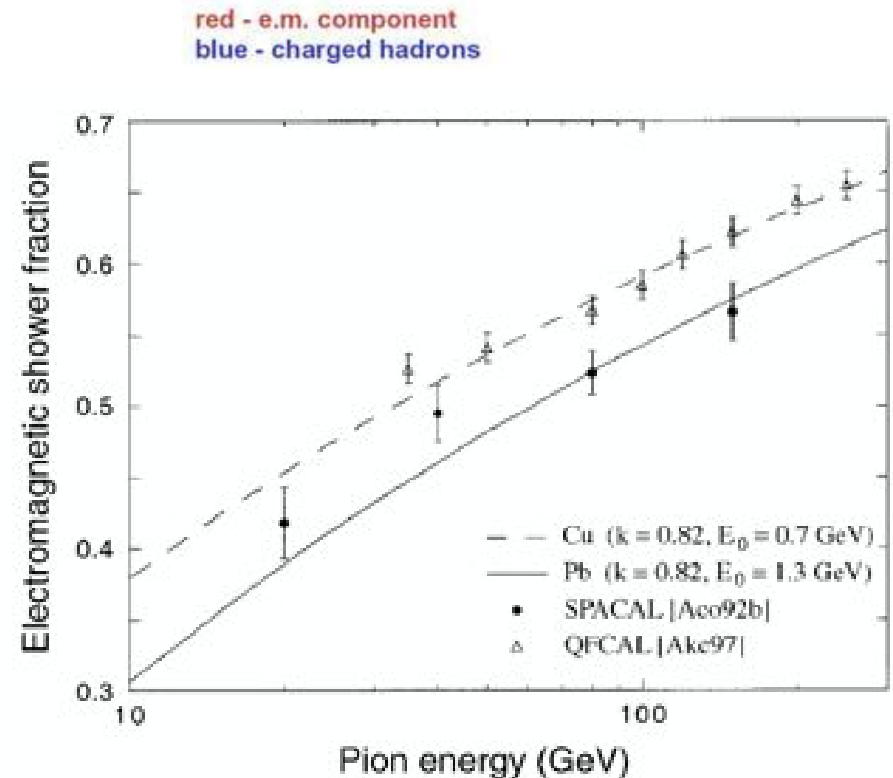


Fraction f_0 de π^0 dans chaque interaction

Avec les mains :

- $F_0 = f_0 + (1-f_0) f_0 + (1-f_0)^2 f_0 + \dots$
- $F_0 = 1 - (1 - f_0)^n$ pour n générations

- $n \propto E$



La non-linéarité → facteur e/h

Calorimètres compensants

Réponse d'un calorimètre aux hadrons :

$$R_h = \varepsilon_e E_e + \varepsilon_h E_h$$
$$= (\varepsilon_e F_0 + \varepsilon_h (1-F_0)) E$$

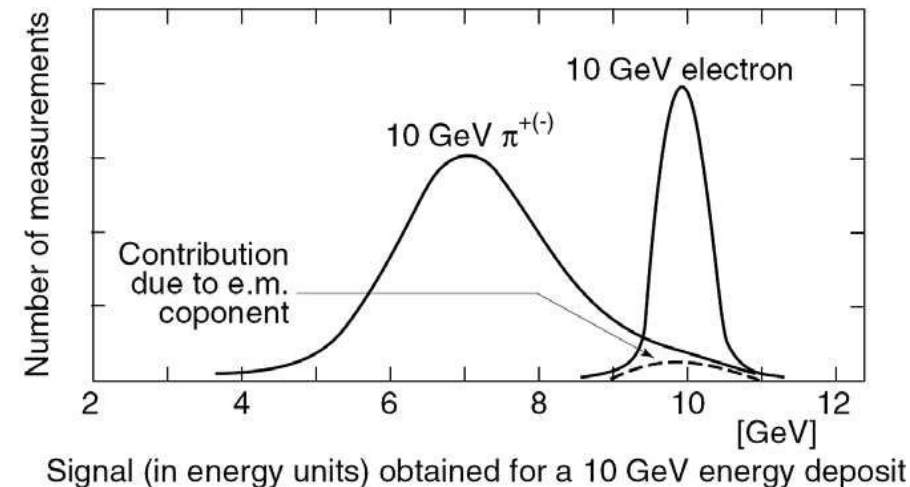
Rapport

$$e/h = \varepsilon_e / \varepsilon_h$$

- E_e = Energie EM
- E_h = énergie hadronique
- ε_e = fraction d'énergie EM détectée
- ε_h = fraction d'énergie Hadronique détecté

e/h =

- ~ 1 → calorimètre à compensation
- $\neq 1$ → calorimètre non-compensant



Bilan énergétique

Résultats de simulations (par ex. FLUKA, GEANT4)

- basé sur des mesures de σ_{eff} d'interaction

Particule	Nombre		Energie	
	Pb	Fe	Pb	Fe
Pions	1.2%	2.1%	19%	21%
Protons	3.5%	8%	37%	53%
Energie de liaison nucléaire			32%	16%
Recul			2%	5%
Neutrons d'évaporation	32%	5%	10%	5%
Neutrons de cascade	5.4%	5%		

} Energie invisible

Les effets nucléaires dépendent beaucoup du matériau (!)

Les effets des neutrons difficiles :

- σ pas toujours bien connues
- Effets des senseurs (présence d'Hydrogène)

Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

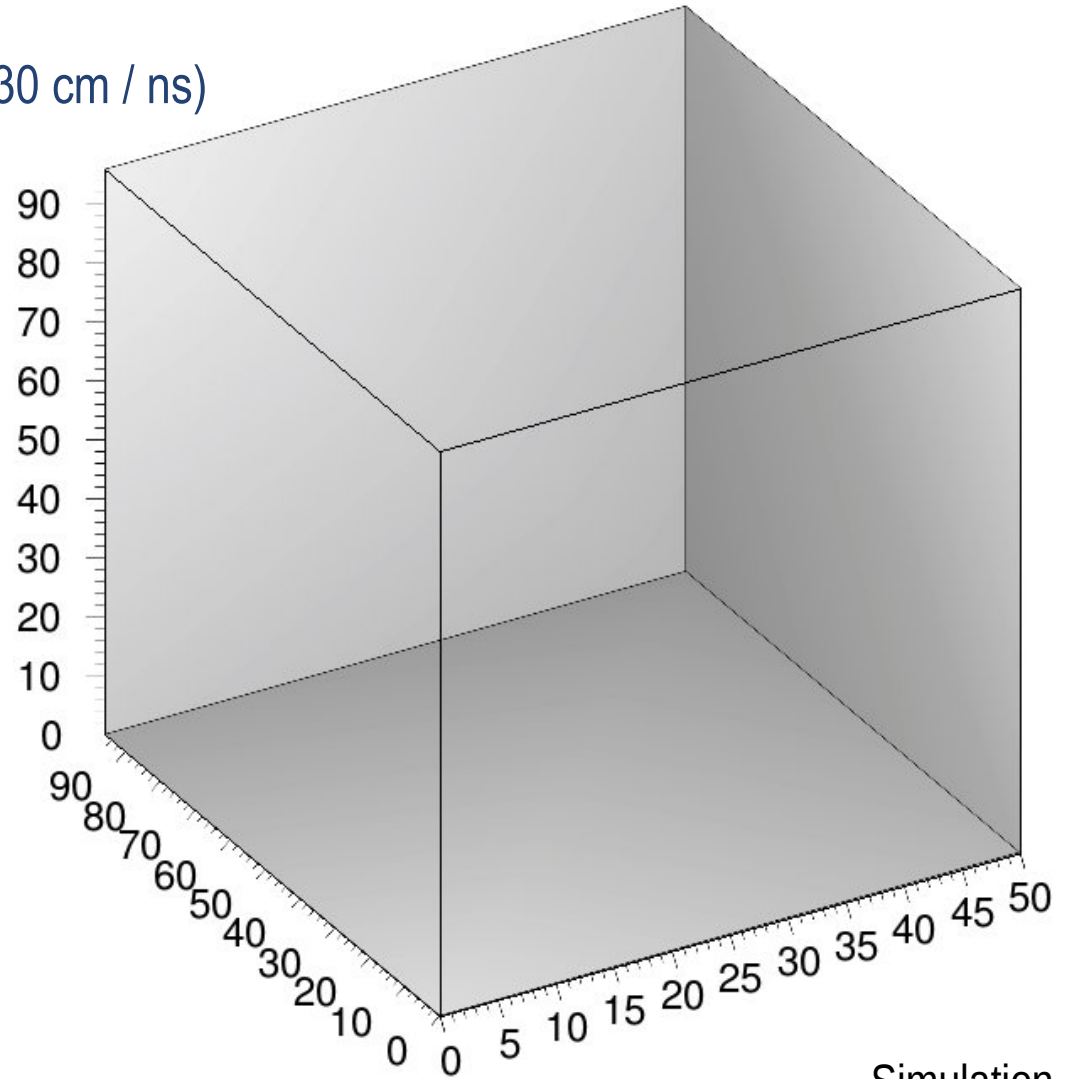
- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation

Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation



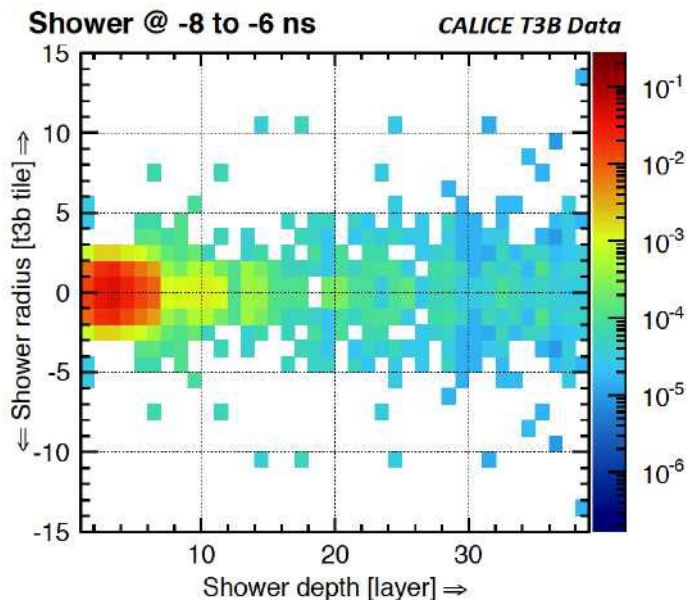
Simulation π
Guillaume Garillot (IPNL)

Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



T = 0: Activity maximum in layer 39 (rear of calorimeter)

Shown: First hits in each cell only

Composante neutronique secondaire

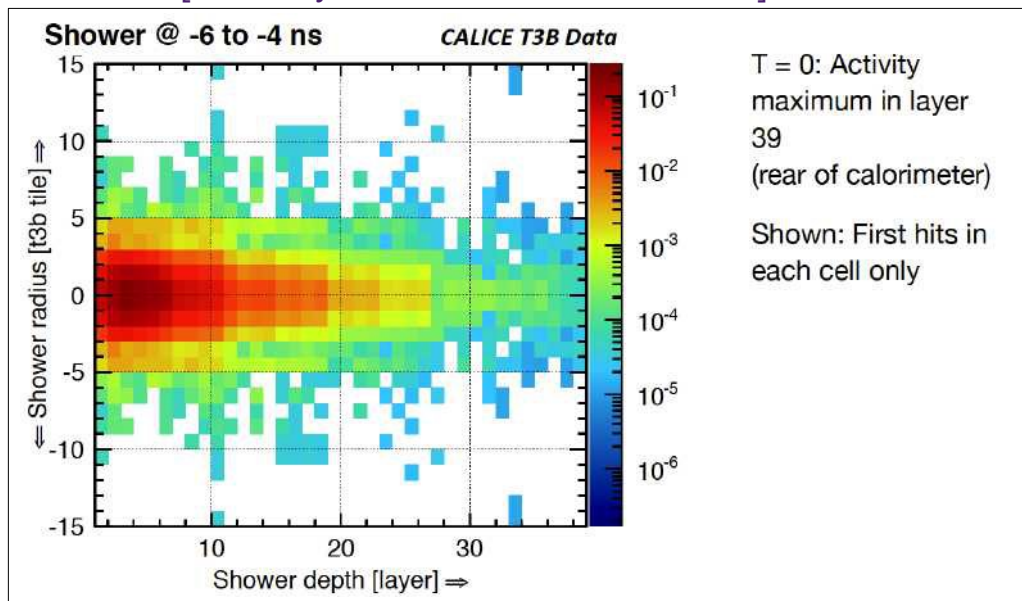
En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n

- σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

- → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



Composante neutronique secondaire

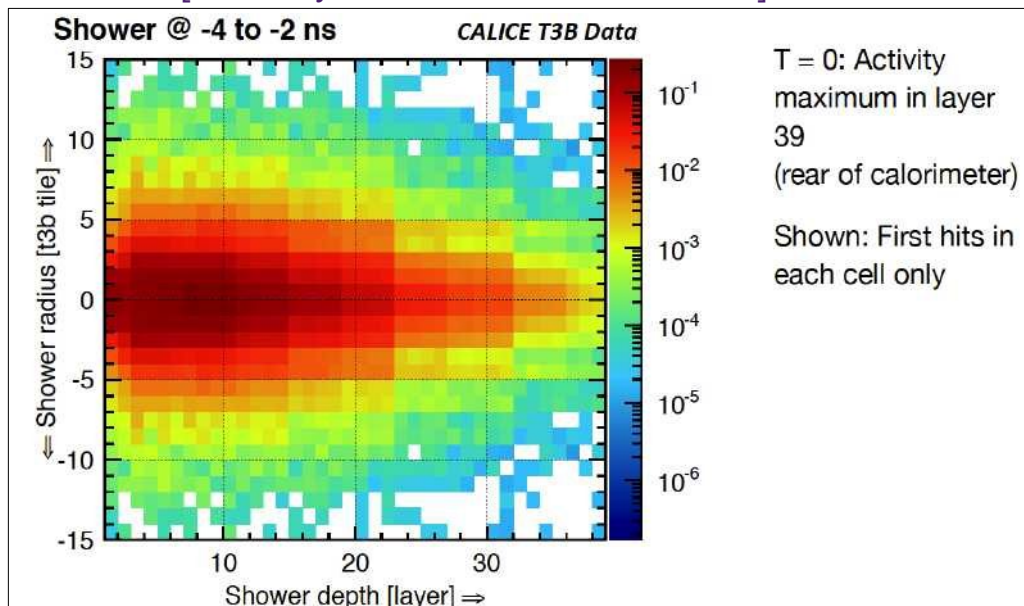
En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n

- σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

- → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



Composante neutronique secondaire

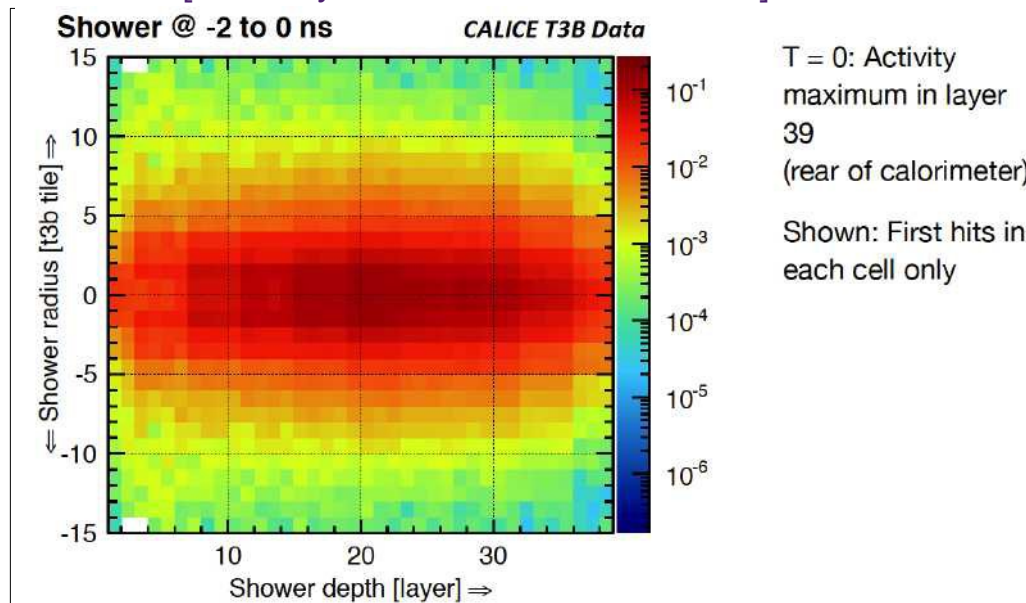
En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n

- σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

- → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

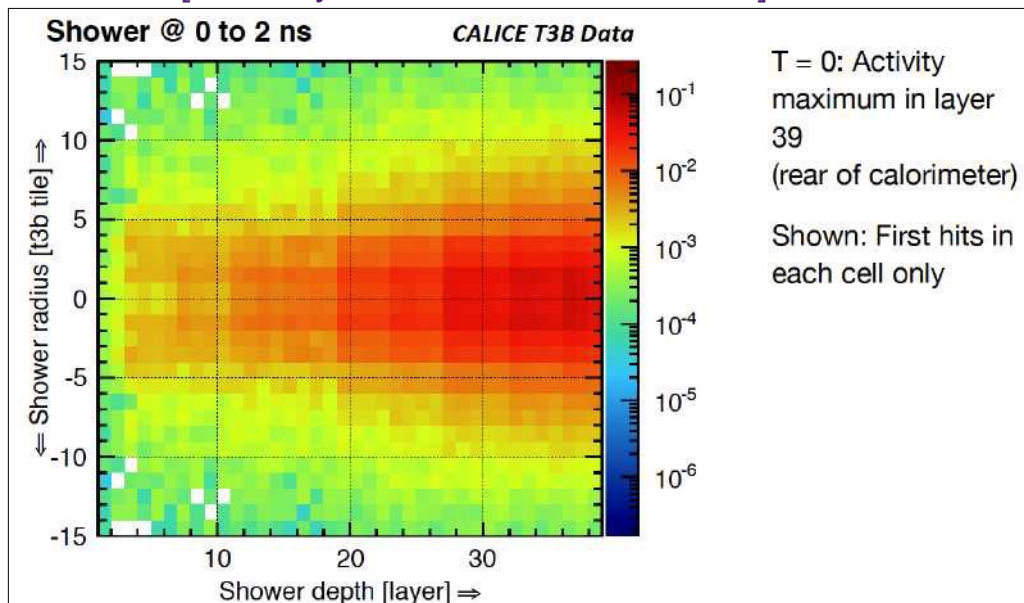


Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture \nearrow
à basse énergie
 - \rightarrow temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

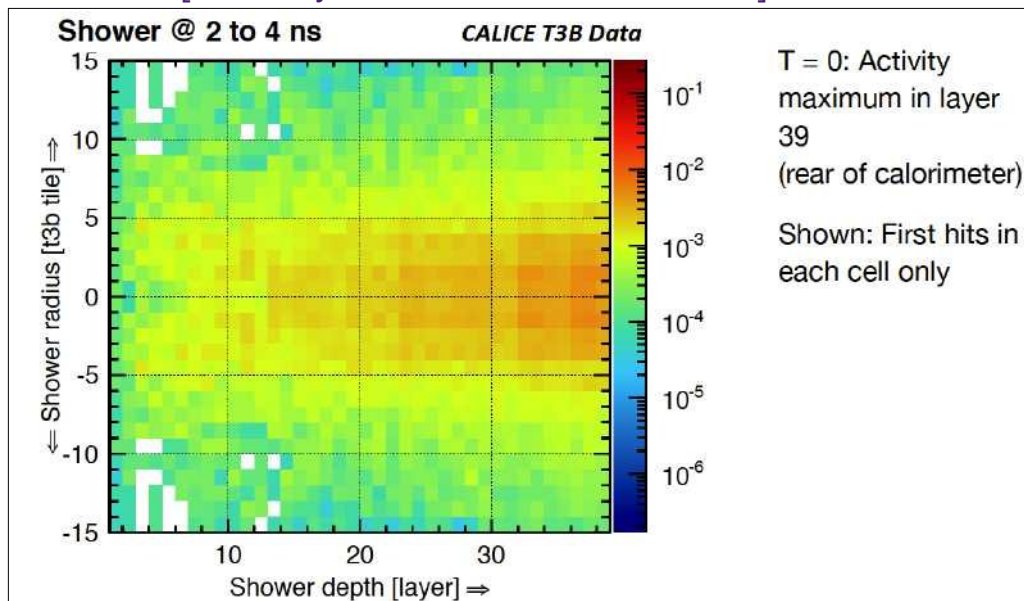


Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

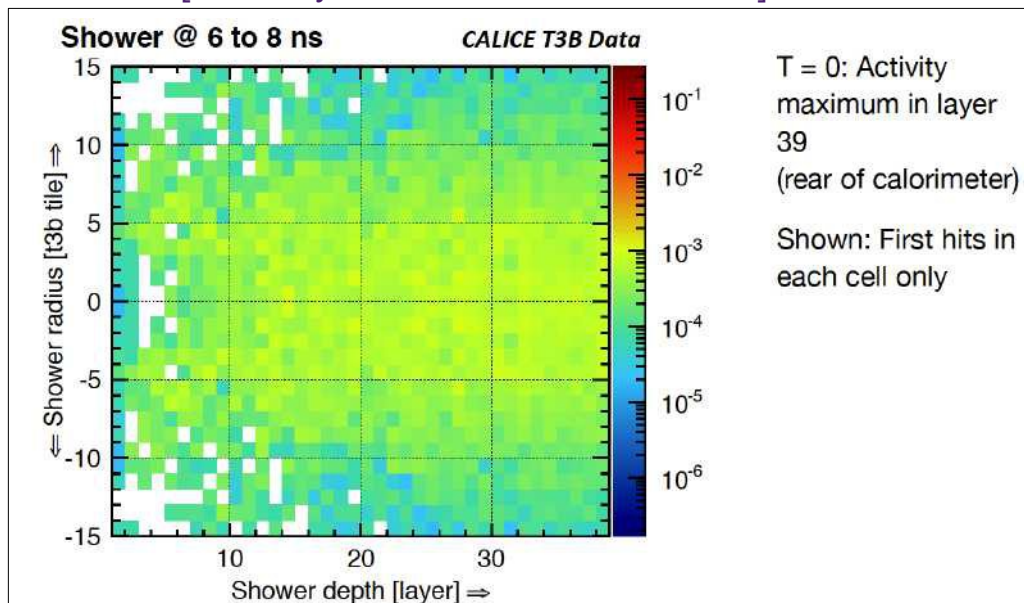


Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

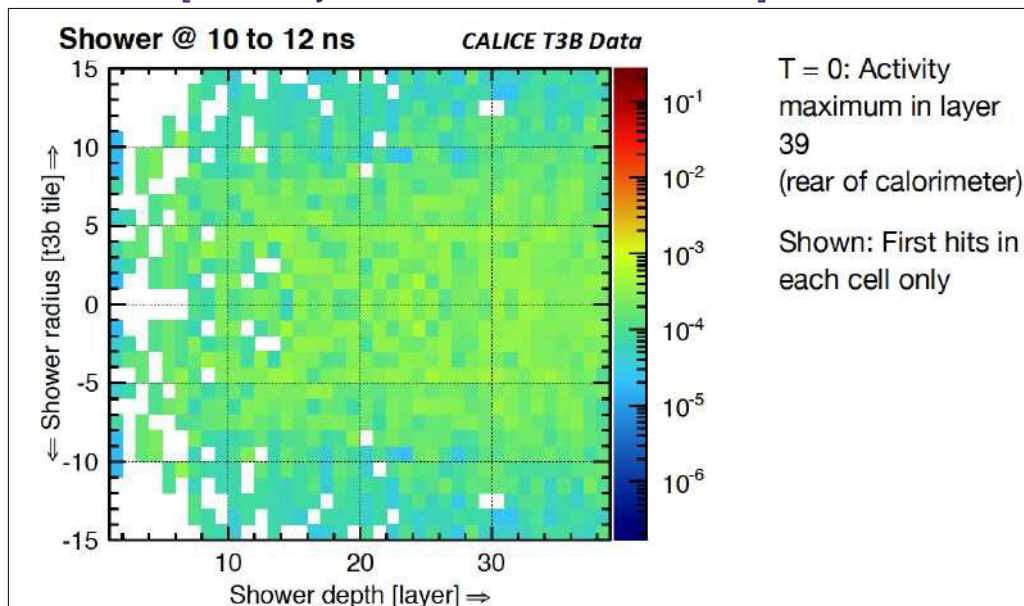


Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

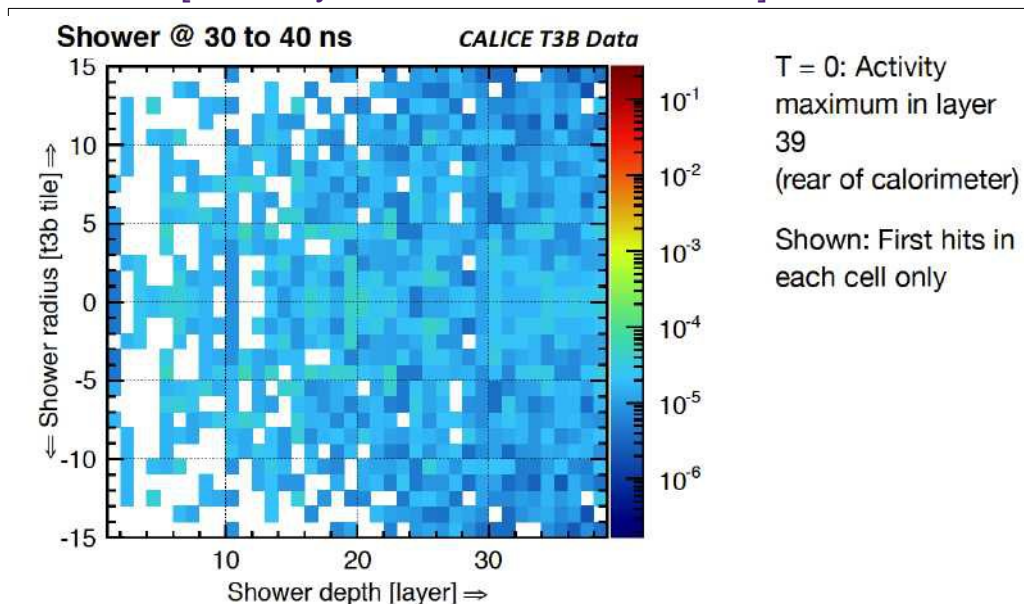


Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques ~qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - → temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

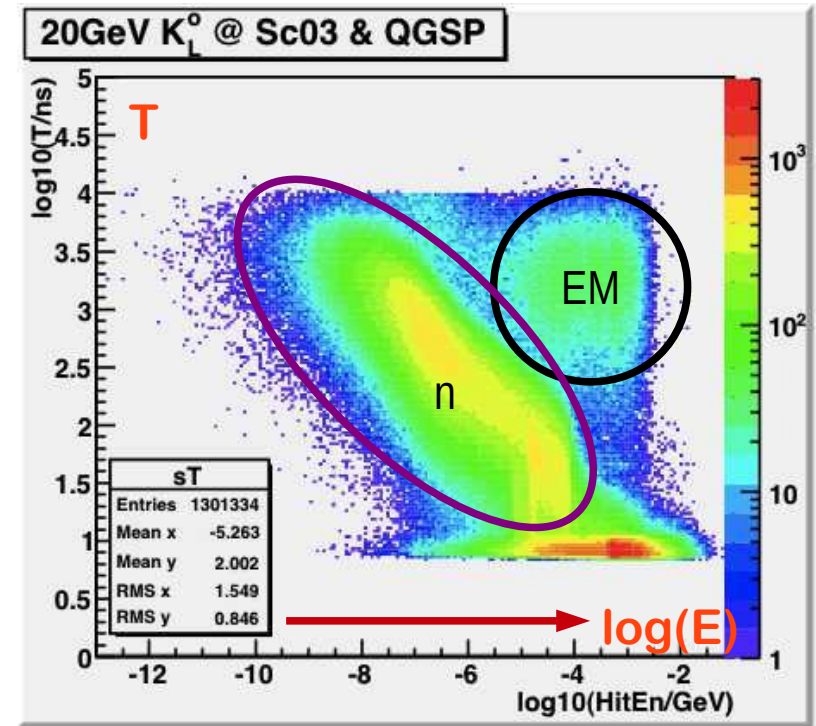
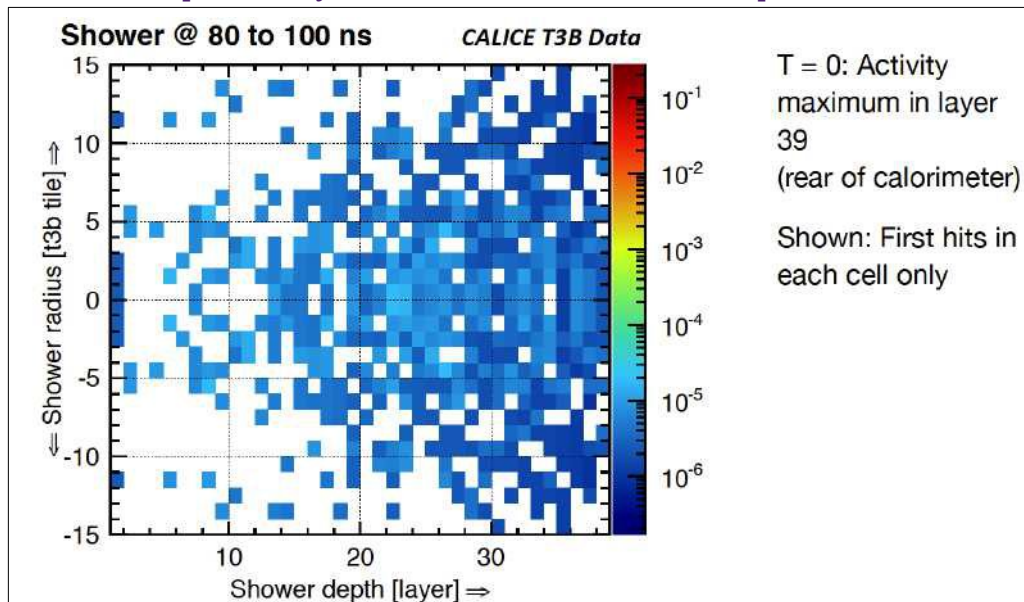


Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture \nearrow
à basse énergie
 - \rightarrow temps de thermalisation
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



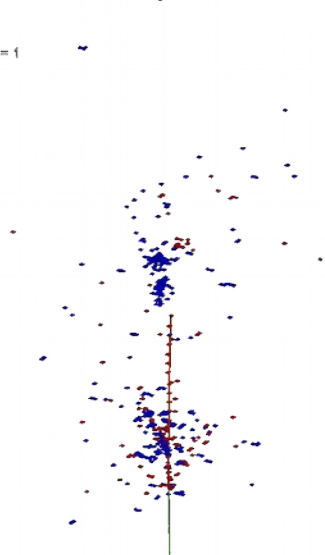
Composante neutronique secondaire

En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)

Sauf pour

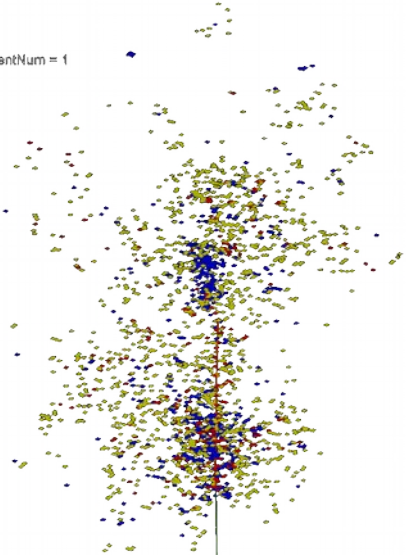
- les des-excitations nucléaires
- les n
 - σ_{eff} de capture \nearrow
à basse énergie
 - \rightarrow temps de thermalisation

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1

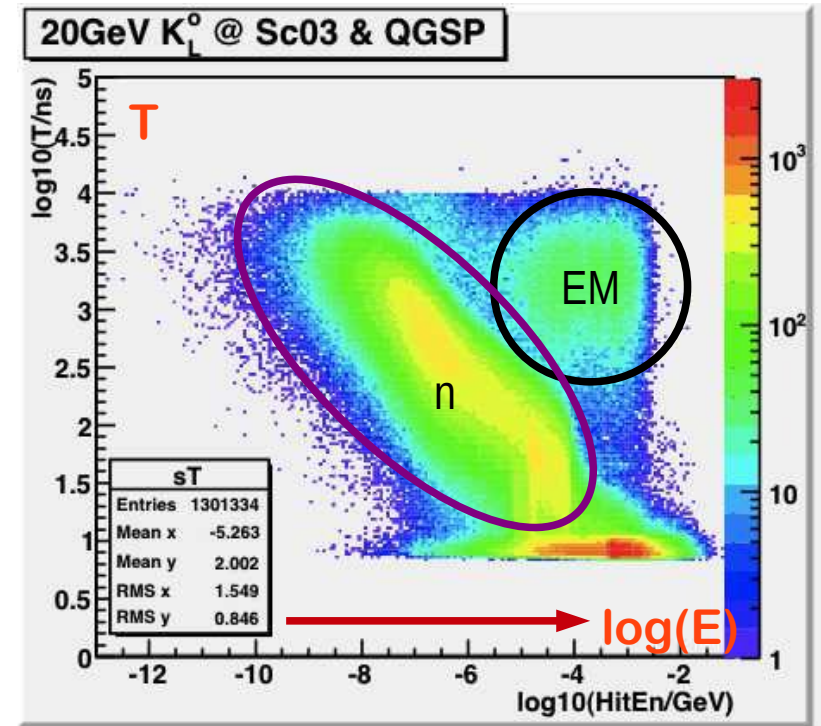


sans neutrons

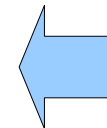
DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1



avec neutrons



[courtesy of M. Ruan, LLR]



Rappel

Calorimétrie = mesure de l'énergie des particules (passant le trajectographe)
par arrêt

e^\pm et γ → gerbes dans le calorimètre EM (ECAL)

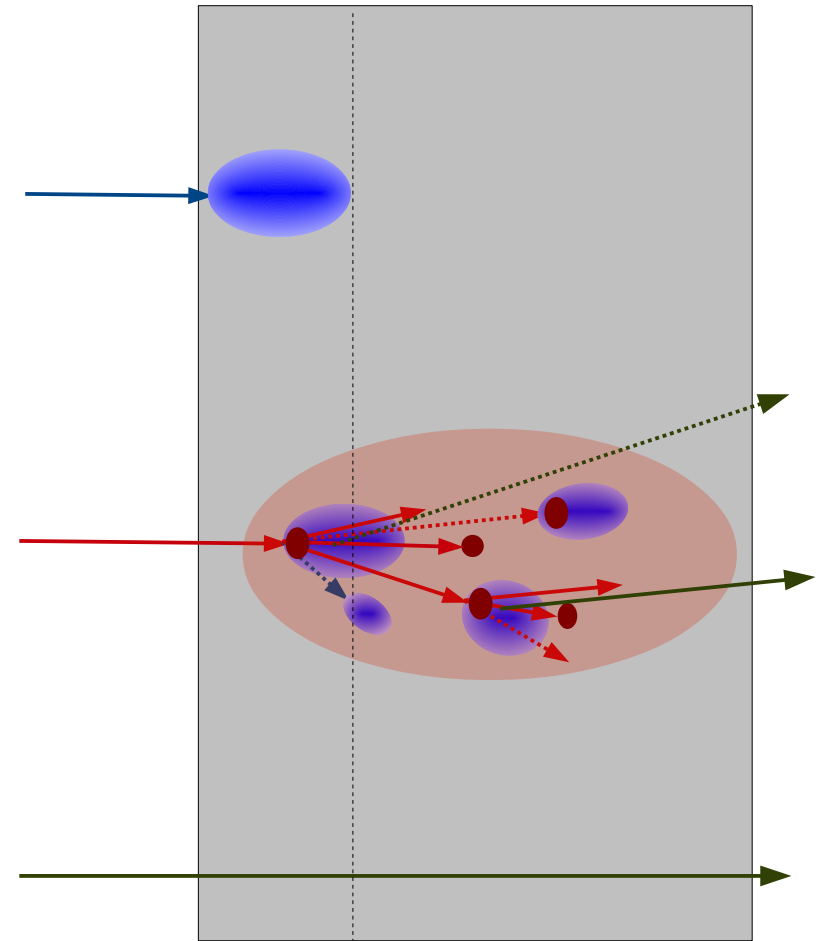
- $\sim 30 X_0 \sim 20$ cm de mat dense
- $r \sim 2 R_M \sim 99$ cm ; ($R_M = R_{90\%}$)

Hadrons → gerbe dans le ECAL et le HCAL

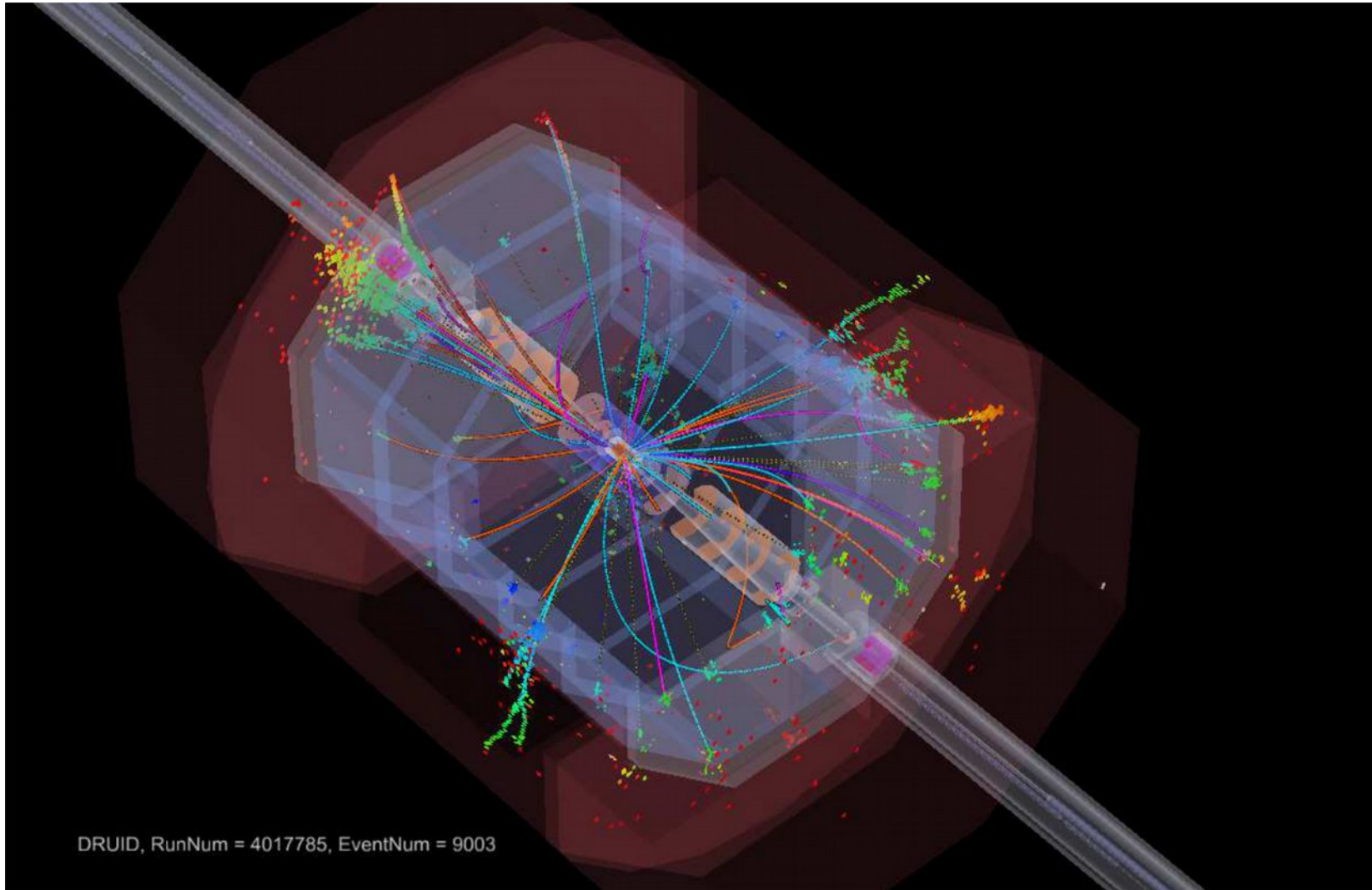
- $\lambda_{int} \sim 30 X_0$
- Gerbes : $L_{95\%} \sim 8 \lambda$, $R_{95\%} \sim 1,5 \lambda$
- Grosse fluctuation (composante EM, forme, ...)

Muons

- ... ne font que passer...
 - Calorimètre (si suffisamment segmenté) + ch. magnétique = trajectographe



Information en temps



$e^+ e^- \rightarrow t \bar{t}$ à 500 GeV ; couleur = temps

L'élaboration d'un calorimètre : les critères

Le détecteur parfait



infini (pas de pertes)

Sans bruit

Infiniment précis

Linéaire

Précis spatiale^t
& angulaire^t

Rapide

Homogène

Stable

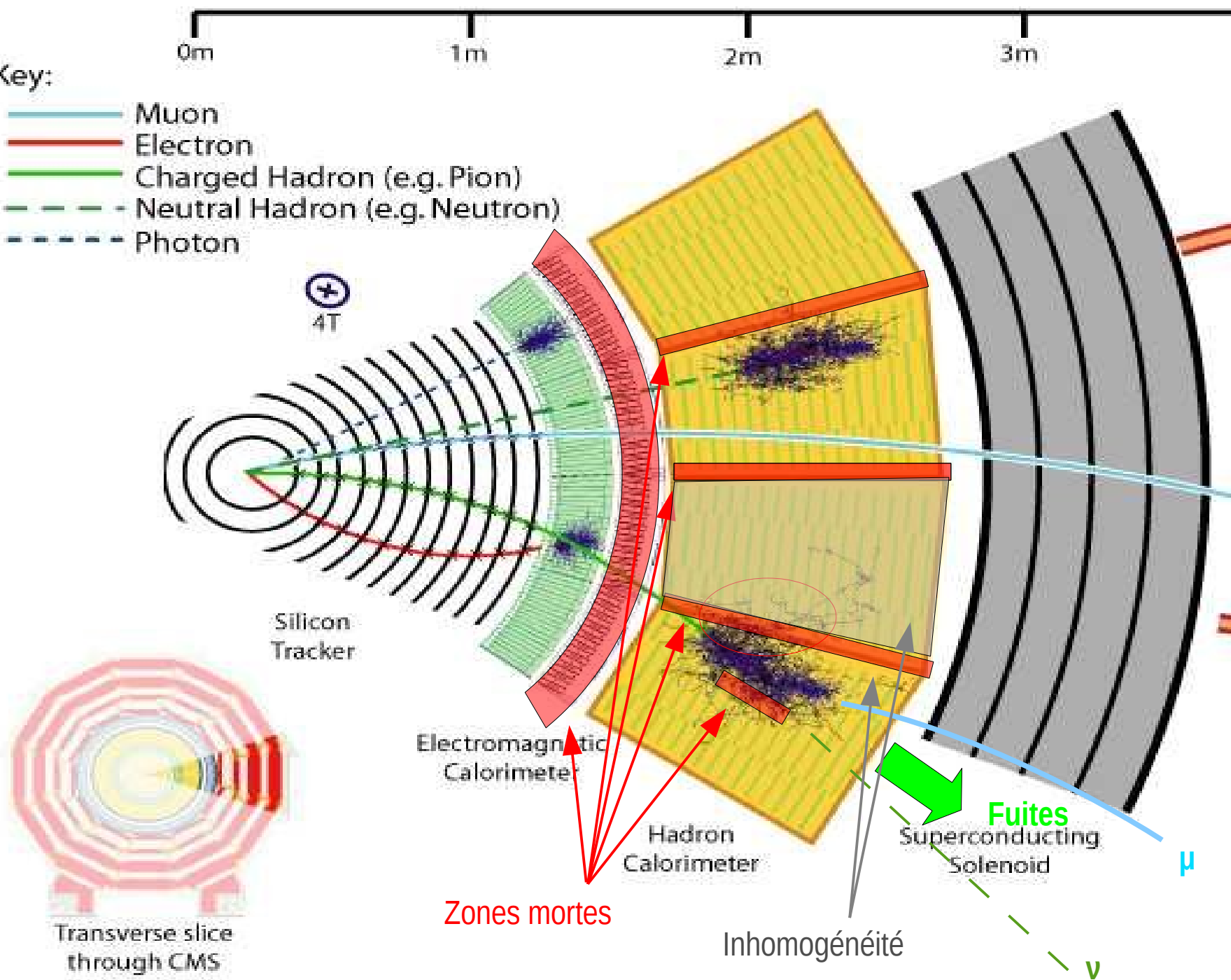
Identification

Séparation de particules

+ Bon marché...

Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - - Photon



Les détecteurs réels



Un expérimentateur...

infinie (sans pertes)

Sans bruit

Infiniment précise

Linéaire

Rapide

Stable

Homogène

Identification

Position & angle

Séparation

+ *Bon marché...*

% de pertes de fuite

Résolution

Non Linéarité

Vitesse + empilement +
Taux d'occupation

Variations
(\supset radiations)

Inhomogénéité δ

Efficacité & Pureté

Précision position & Angle

% Confusion
(e/π , hadrons, jets isolés, 2 jets)

€€€ !! < 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 , fragments)
produits

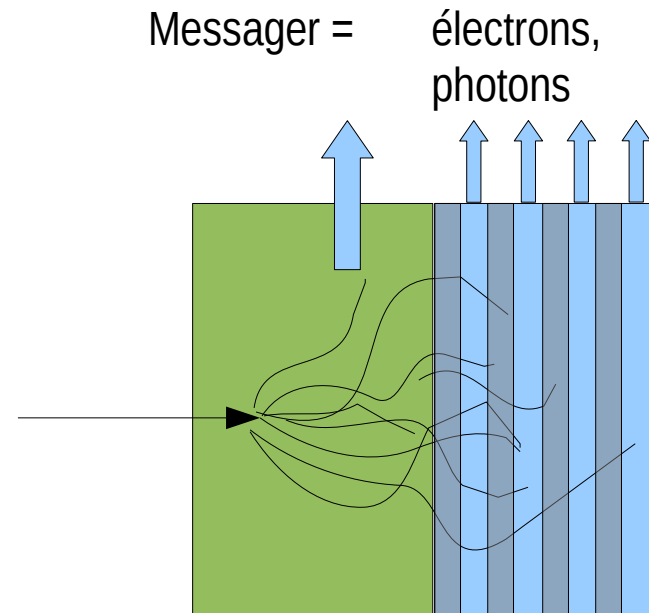
la Mesure c'est du Comptage

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

Processus stochastique:
(Poisson)

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

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



Homogène ou à échantillonnage

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)

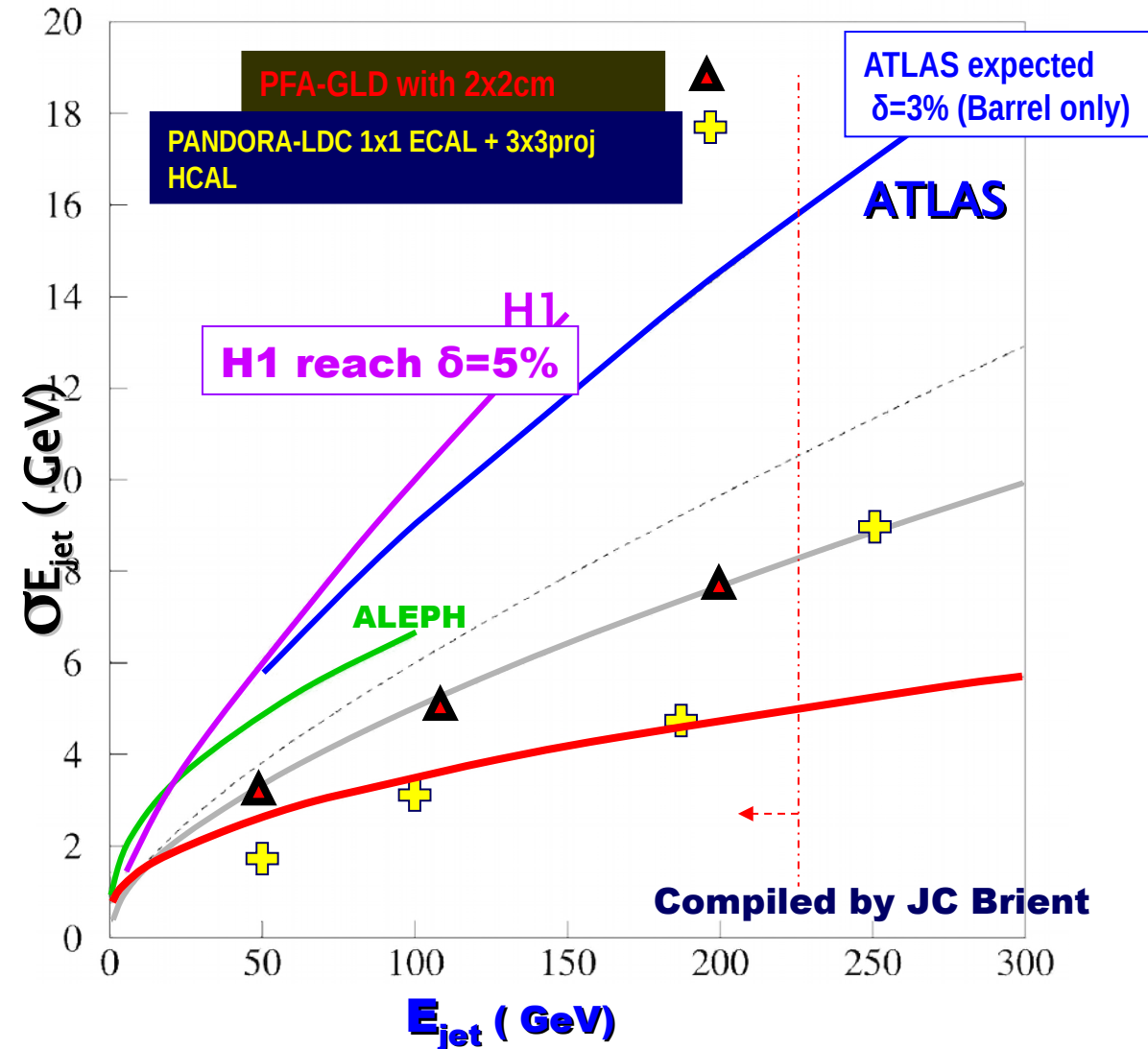
Fuite : $\oplus \sigma_{\text{fuite}} \sim 4 f_{\text{fuite}}$
(corrigé mais pas les fluctuations)

Fluctuations additionnelles due à la technologie
– saturations, effet de charge d'espace...

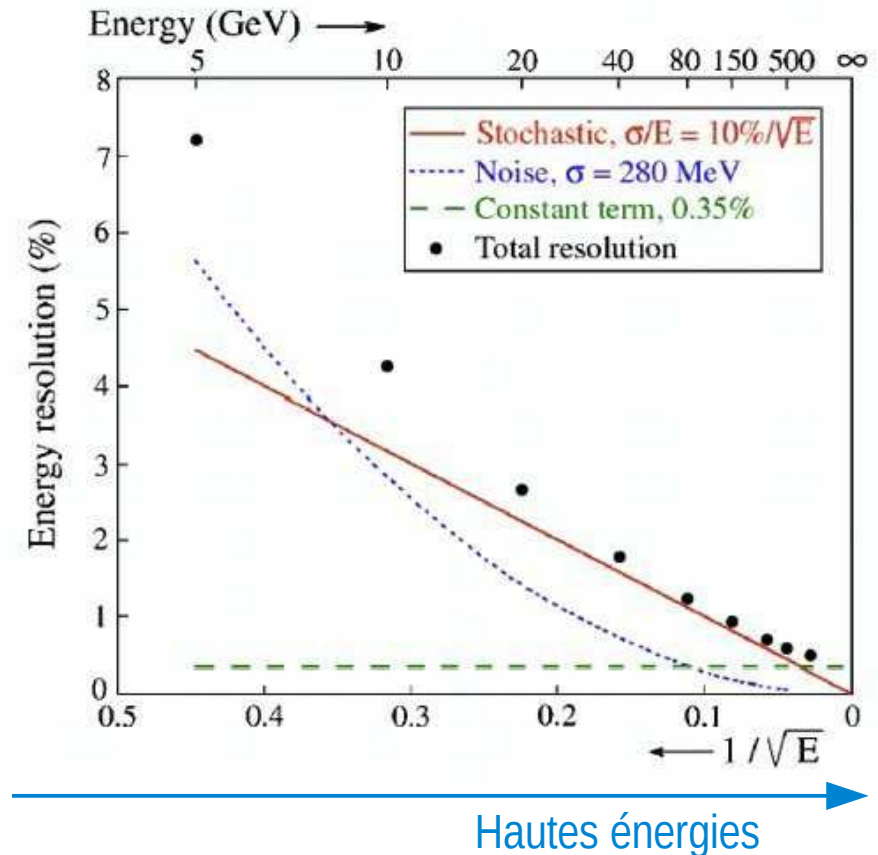
$\sigma(E)/E$

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

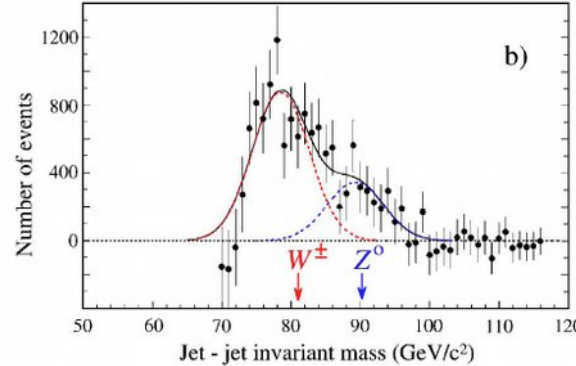
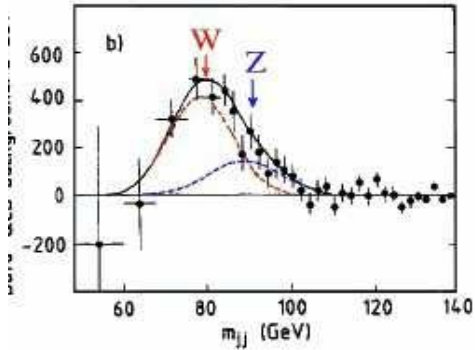
Résolution : performance



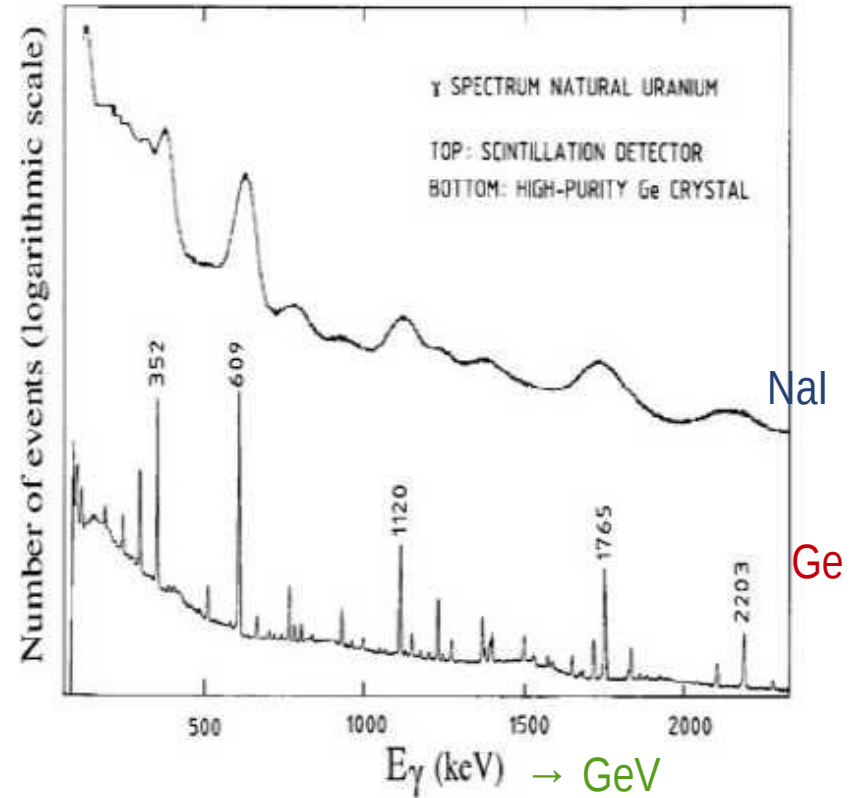
α :
EM : $\sim 3\text{--}20\% / \sqrt{E}$ (GeV)
Had : $\sim 50\% / \sqrt{E}$ (GeV)
 $\delta \sim 5\%$ (mauvais) —
 0.5% (bon)



La résolution

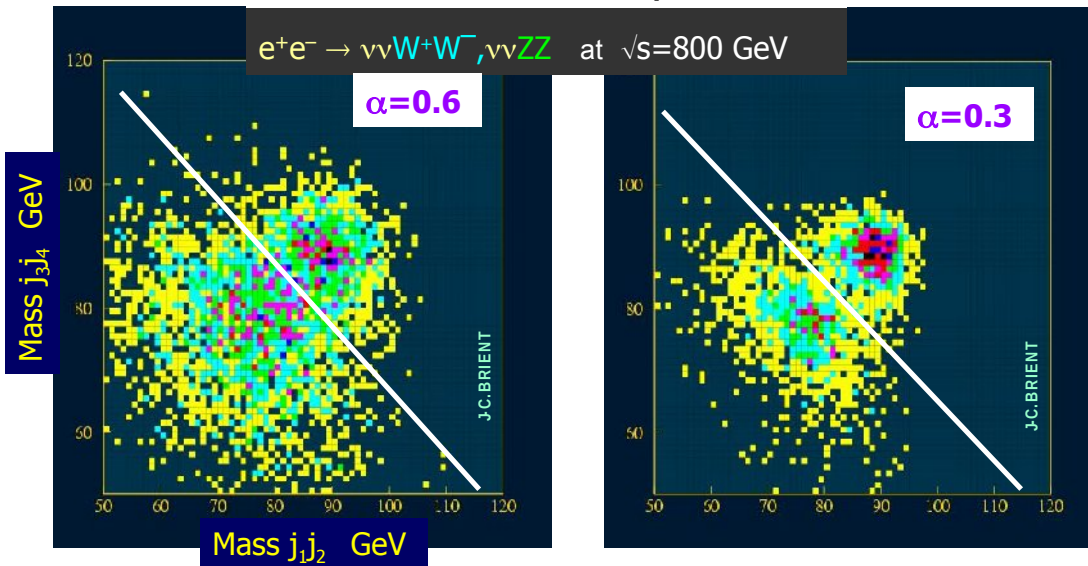


CDF



Reconstruction de la masse des W & Z^0
 dans UA2(années 80-90), CDF (2000)
 Pour l'ILC (année 2026?) ➔

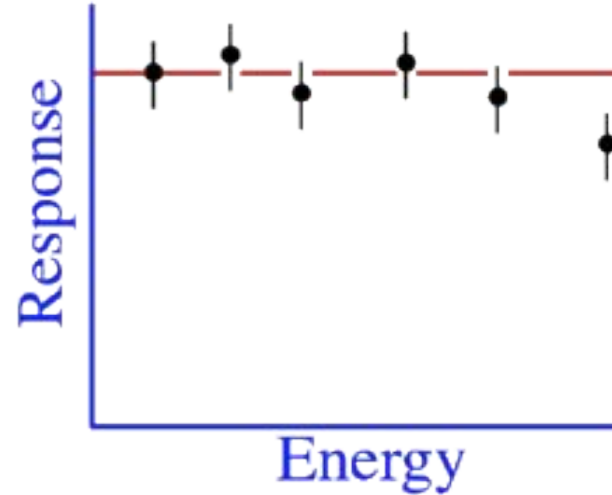
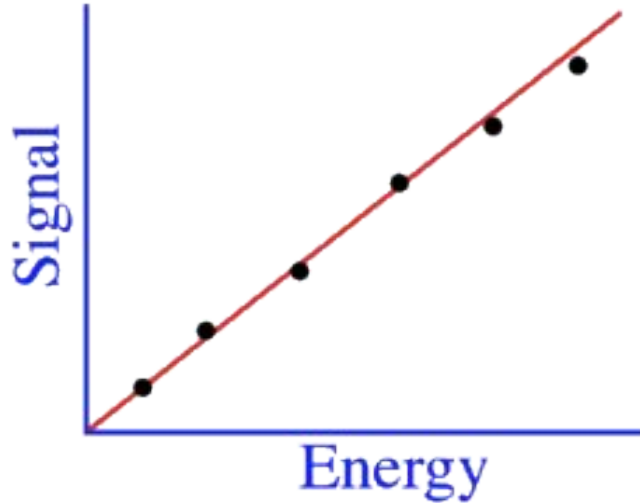
WW versus ZZ separation



Spectre SUSY dans 5-20 ans ???

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

La linéarité $E \propto N$



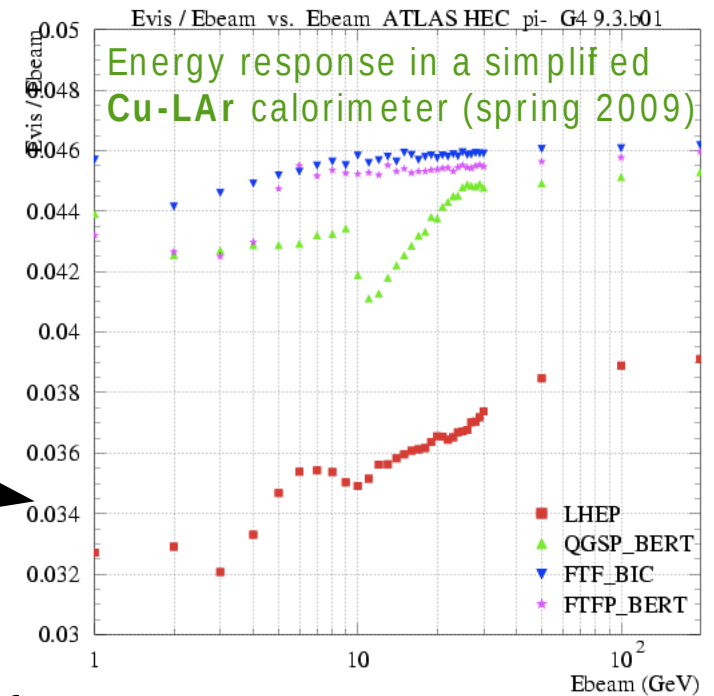
En général OK pour EM

Plus difficile pour l'Hadronique

- facteur $e/h = f(f_{\pi 0}) = f(E)$
- Leakage
 - Correction par les Monte-Carlo
 - Validités des modèles MC ?
 - Calibration par des tests
 - Pas des jets...



~10%



L'étalonnage

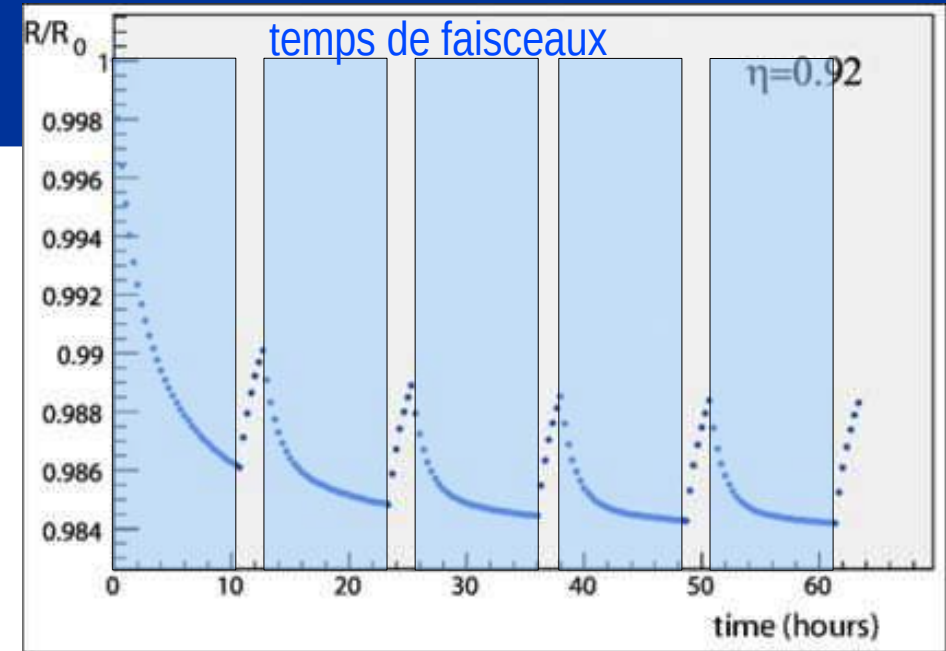
Non homogénéités dominantes
à haute énergie

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
 - $Z \rightarrow ee, \mu\mu, \tau\tau$



Réponse des cristaux de PbWO4
à la radiation

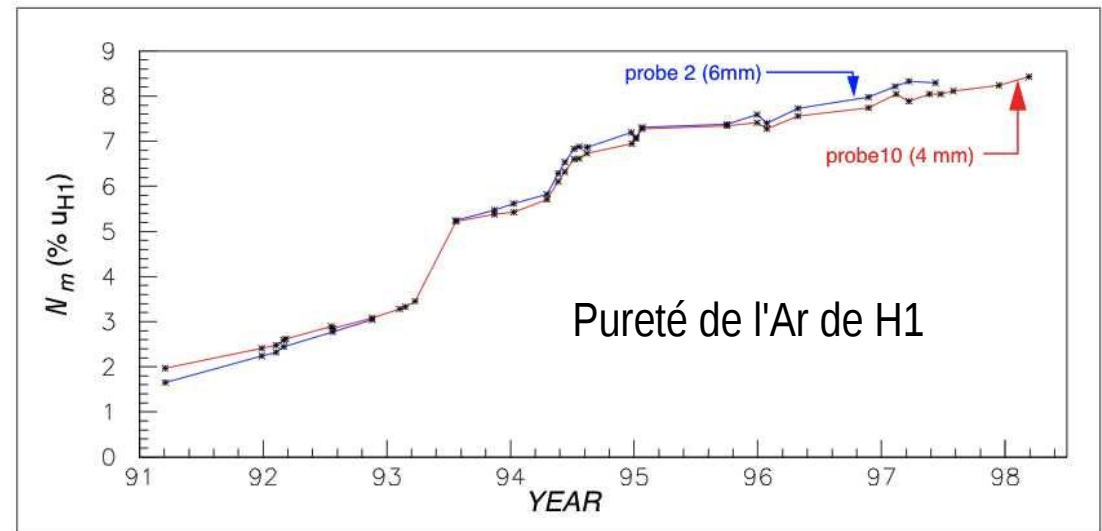


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

Lecture des données

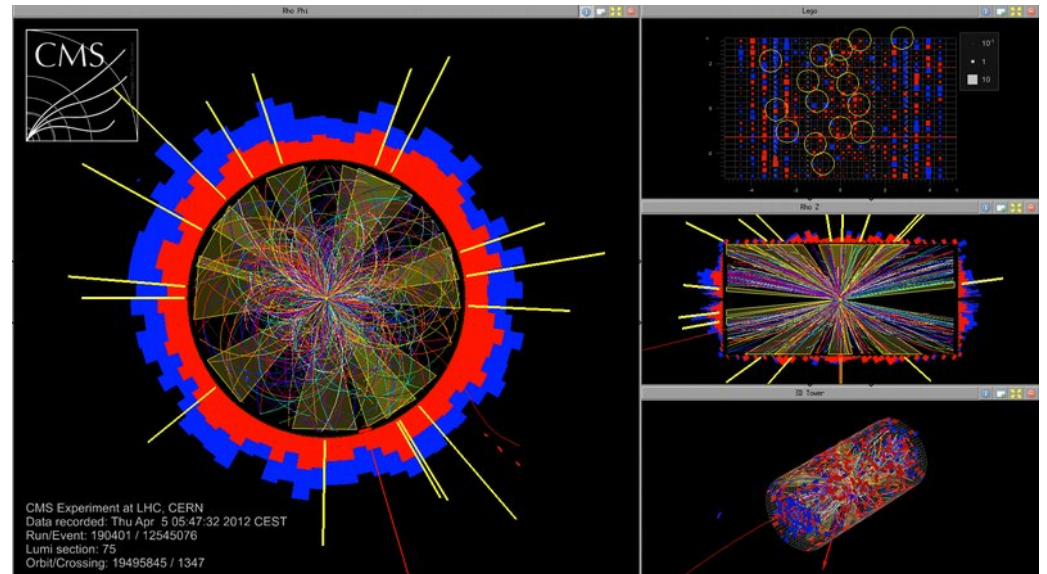
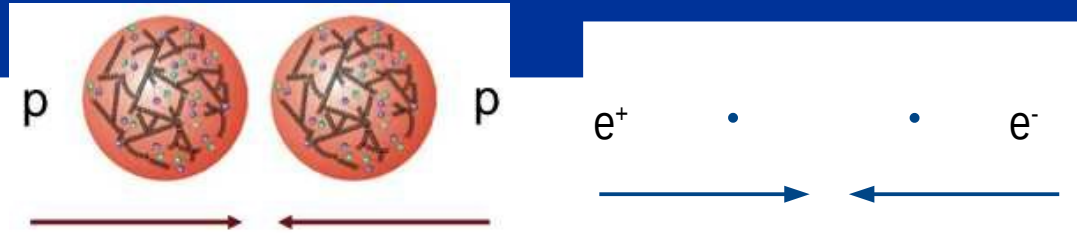
Acquisition

- **Déclenchement**
 - lecture de 1er niveau
 - Sommes partielles
 - lecture complète
 - Calculs de niveau 2...n → rejet
 - Écriture
- **Sans trigger**

Taux d'occupation

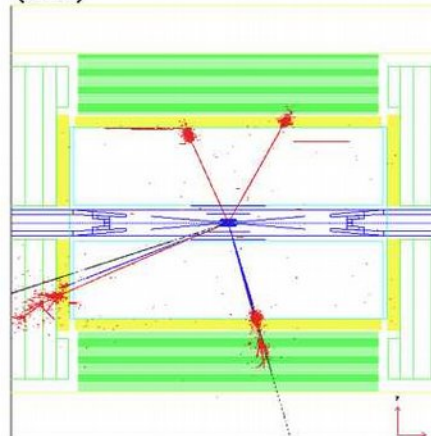
- **Physique**
- **Technologie machine**
 - LHC : pp @ 25 ns
 - ILC : ee @ 400 ns & 5Hz
 - CLIC : ee @ 2.5 ns & 50 Hz...

Temps de lecture...

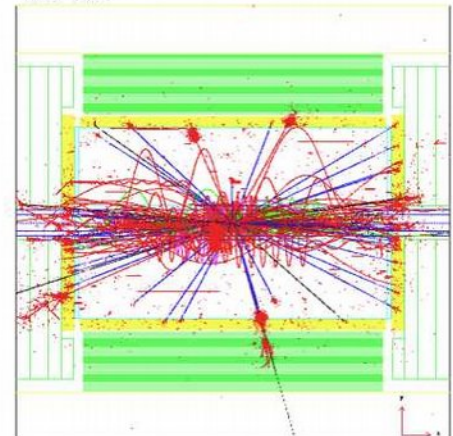


HZ → $\tau\tau ee$ event

Without soft hadronic events overlaid (=ILC)



With 32 BX (=16 ns) „CLIC nominal 500“ overlaid



Autres éléments critiques

En position

- Liens traces \leftrightarrow dépôts calorimétrique
 - \triangle Energy Flow & Particle Flow

Angulaire

- γ pointant vers le vertex, un jets, une particule exotique ?

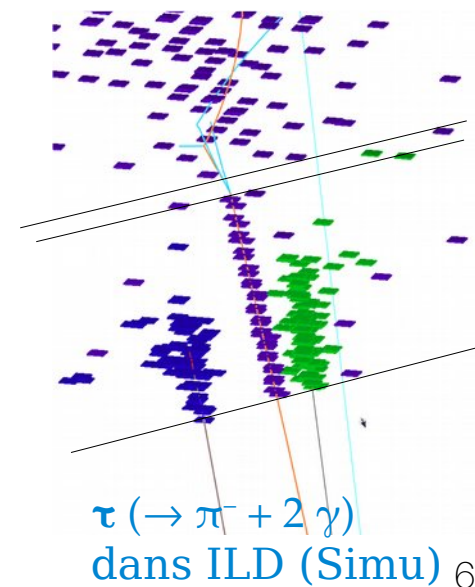
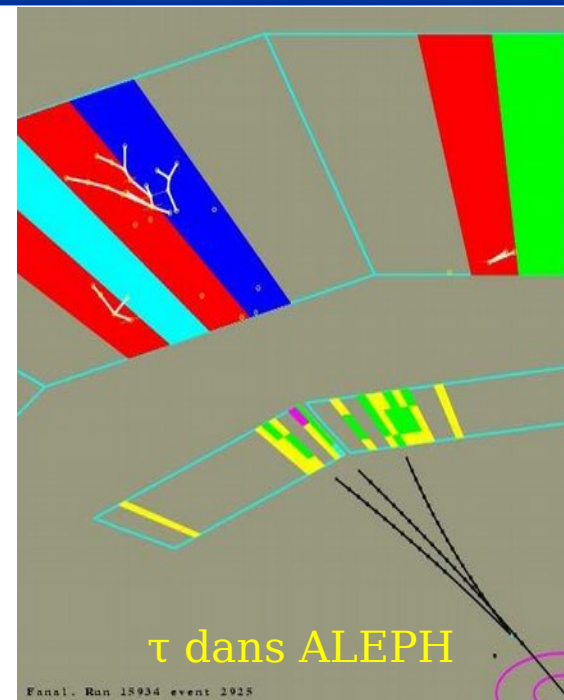
Précision en temps

- Réjection du BdF
- temps de vol (identification)
- Composante neutronique
- Physique «exotique»



Type de collision

But de physique



Identification de particules

Utile pour

- Sélection 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

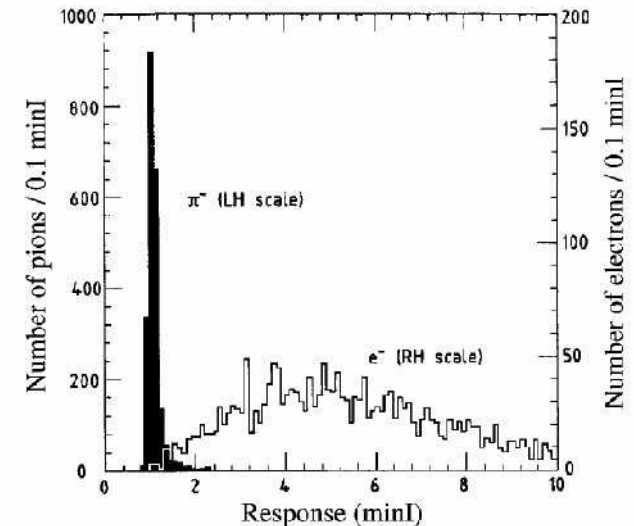


FIG. 7.35. Signal distributions for 75 GeV pions and electrons in a preshower detector used in beam tests of CDF calorimeters.

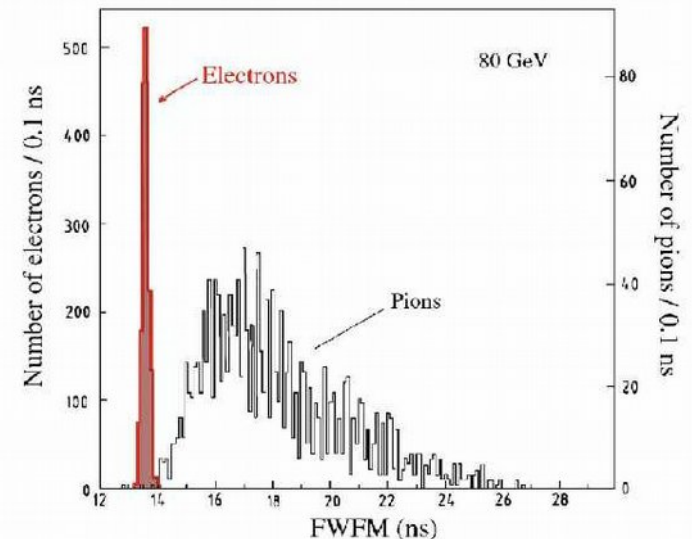
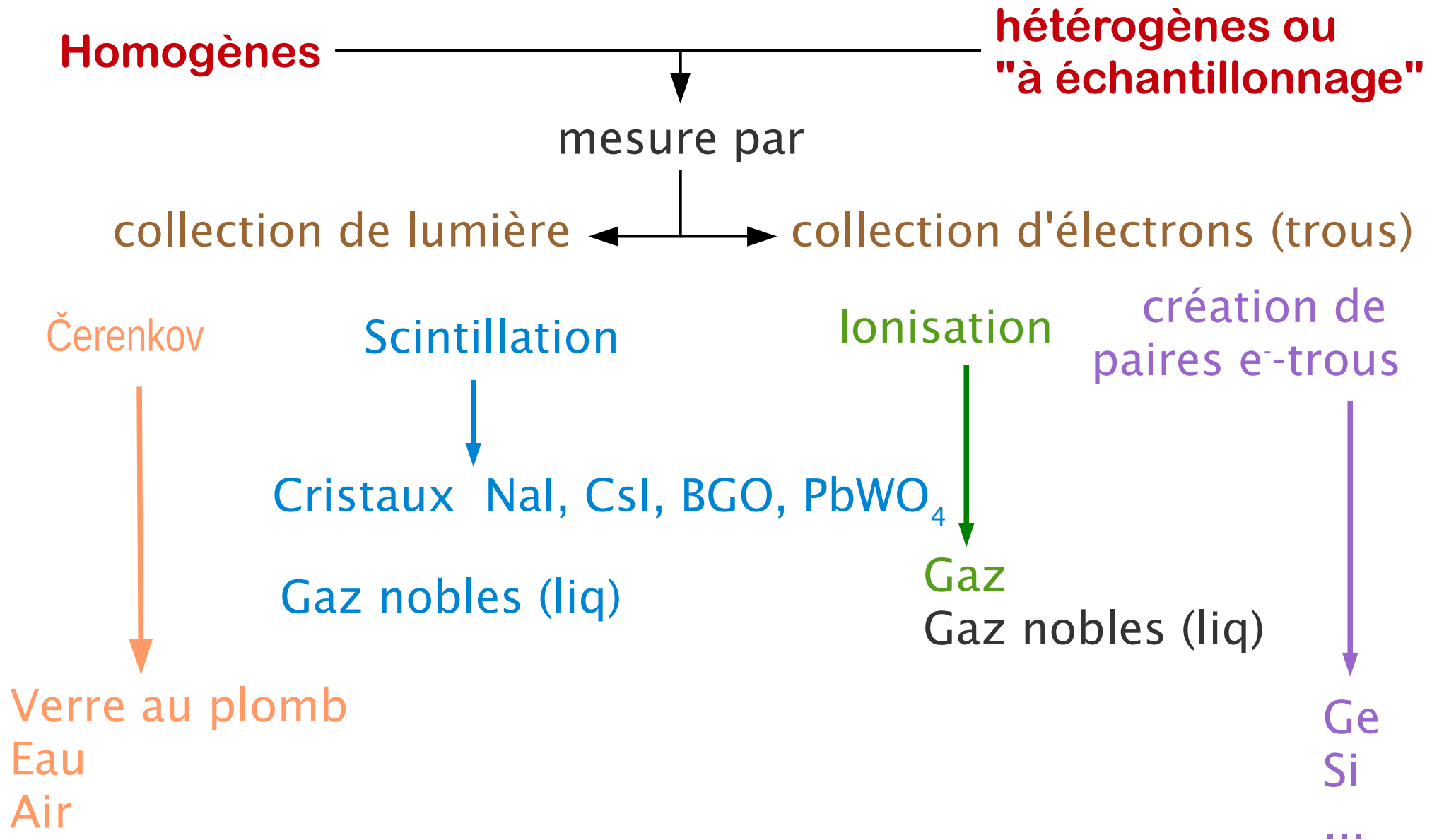


FIG. 7.33 The distribution of the full width at one-fifth maximum (FWFM) for 80 GeV electron and pion signals in SPACAL [Aco 91a].

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.

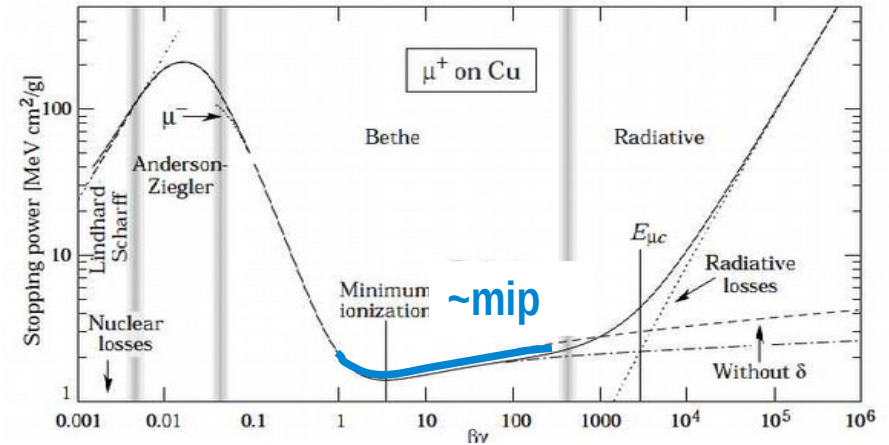
Quelles épaisseurs ?

Fraction d'échantillonnage EM

Développement de gerbe → radiateur (dense)

mips dans les senseurs («légers»)

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

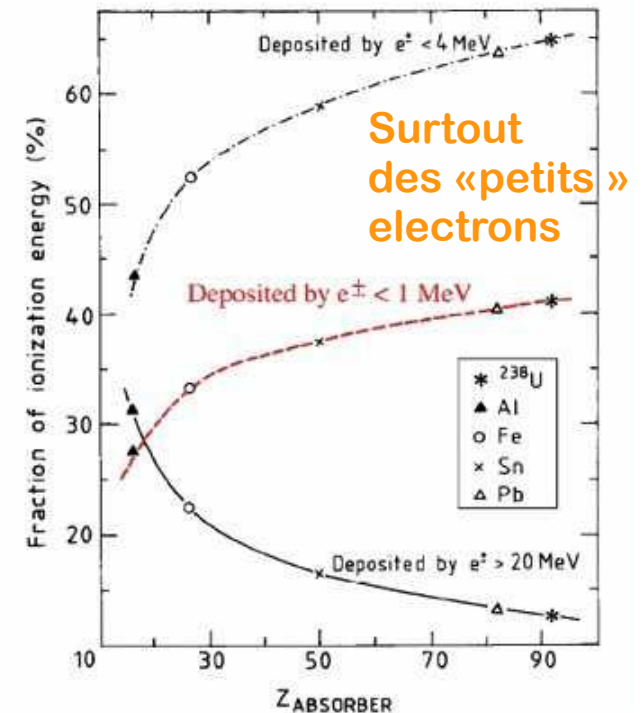


Calorimètres homogènes : $e/\mu = 1$

Calorimètre à échantillonnage : $e/\mu < 1$ (ou $\ll 1$)

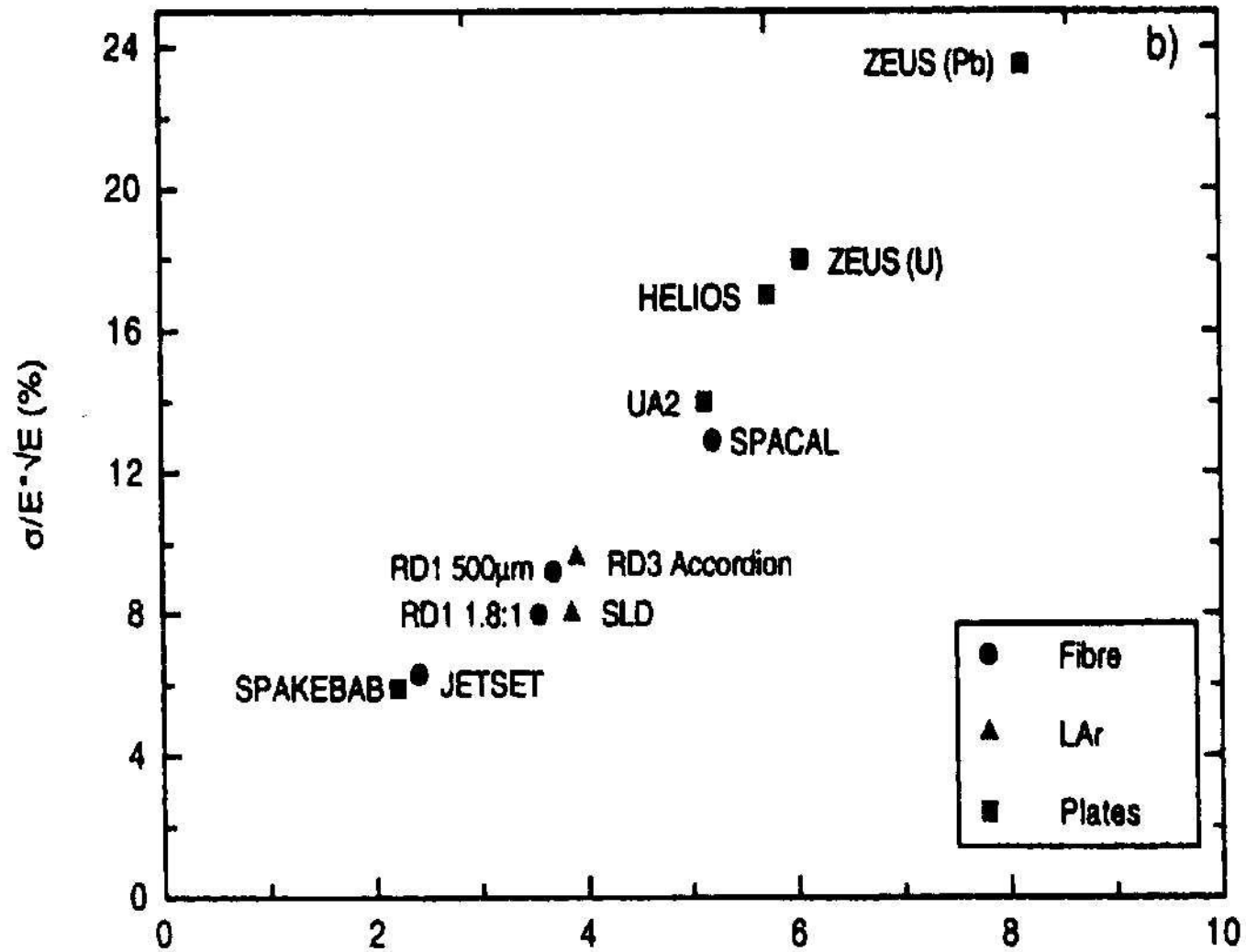
- petits photons absorbés : $\sigma_{\text{p.e.}} \propto Z^4$
- Emission de X par les grands Z

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



Résolution vs $f_{\text{échant.}}$

R. Wigmans



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

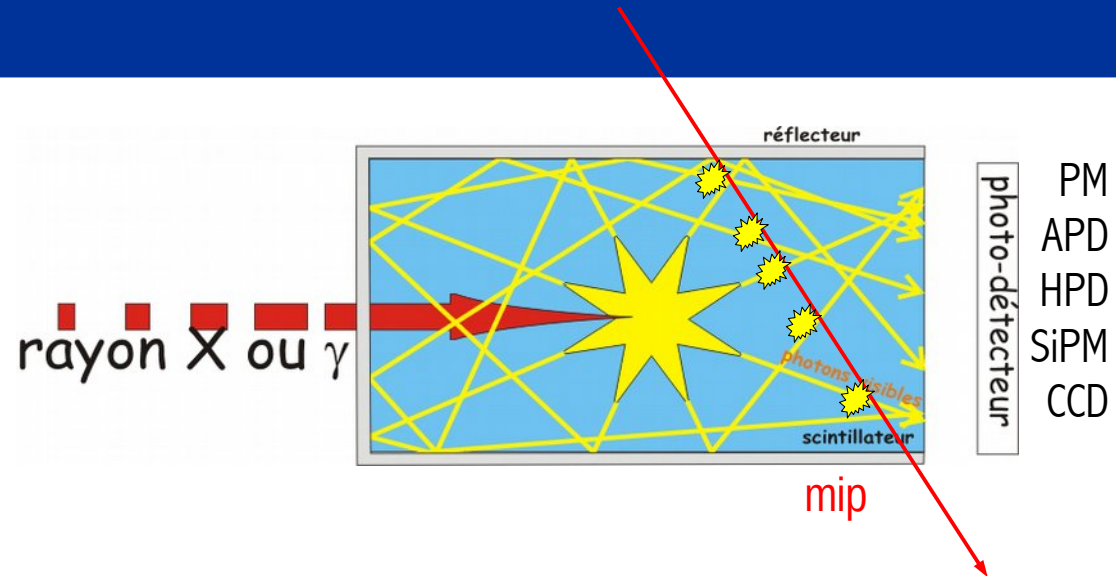
Scintillateurs

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 ($> H$)
- Sensibilité aux radiations.
 - Récupération à l'Oxygène

Ex : polystyrène

Inorganique

- chers
- denses, bon rendement
- homogène
 - Fragile, hygroscopique
 - Sensibilité env. (t° , rad)
- généralement lents

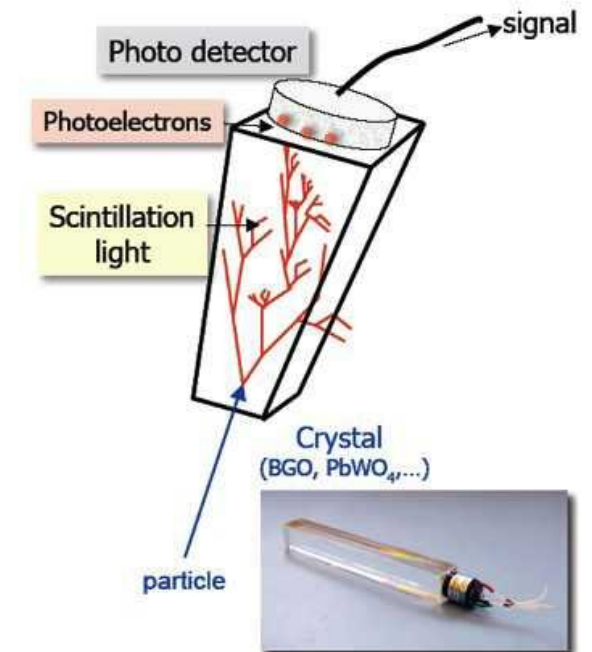
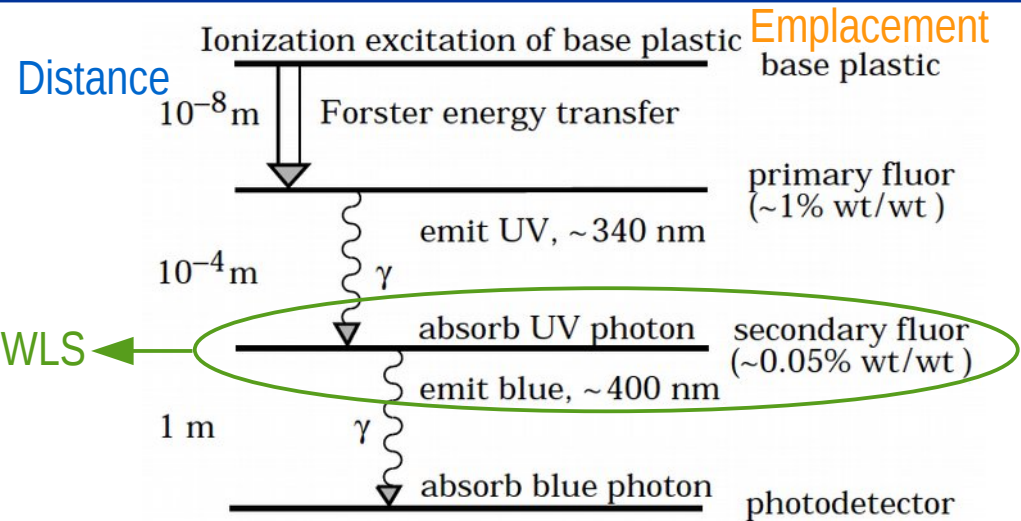
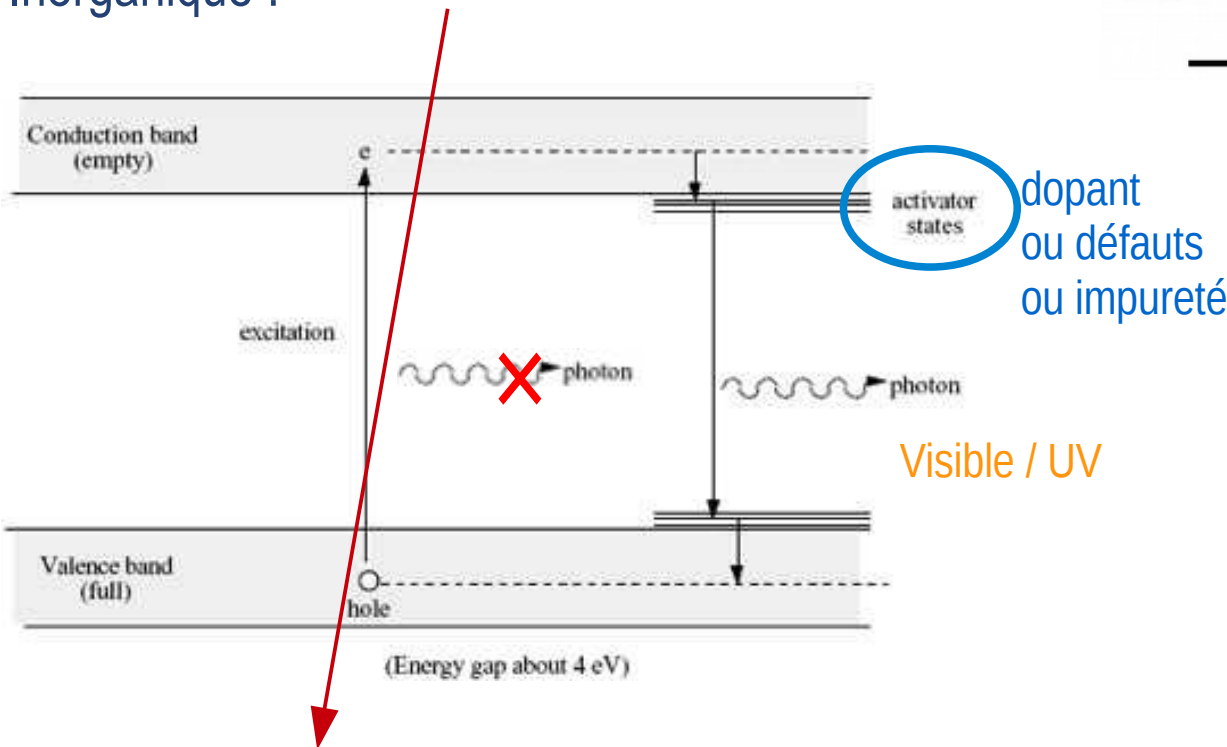
Ex : NaI(Tl), CsI, PbWO₄

Mécanismes de scintillation

Organique :

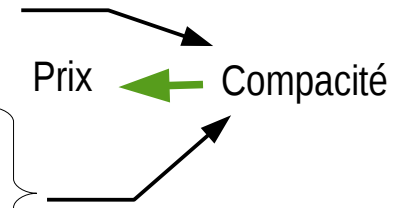
- Chaîne complexes & rapide molécule → molécules.

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

$\sigma(E)$

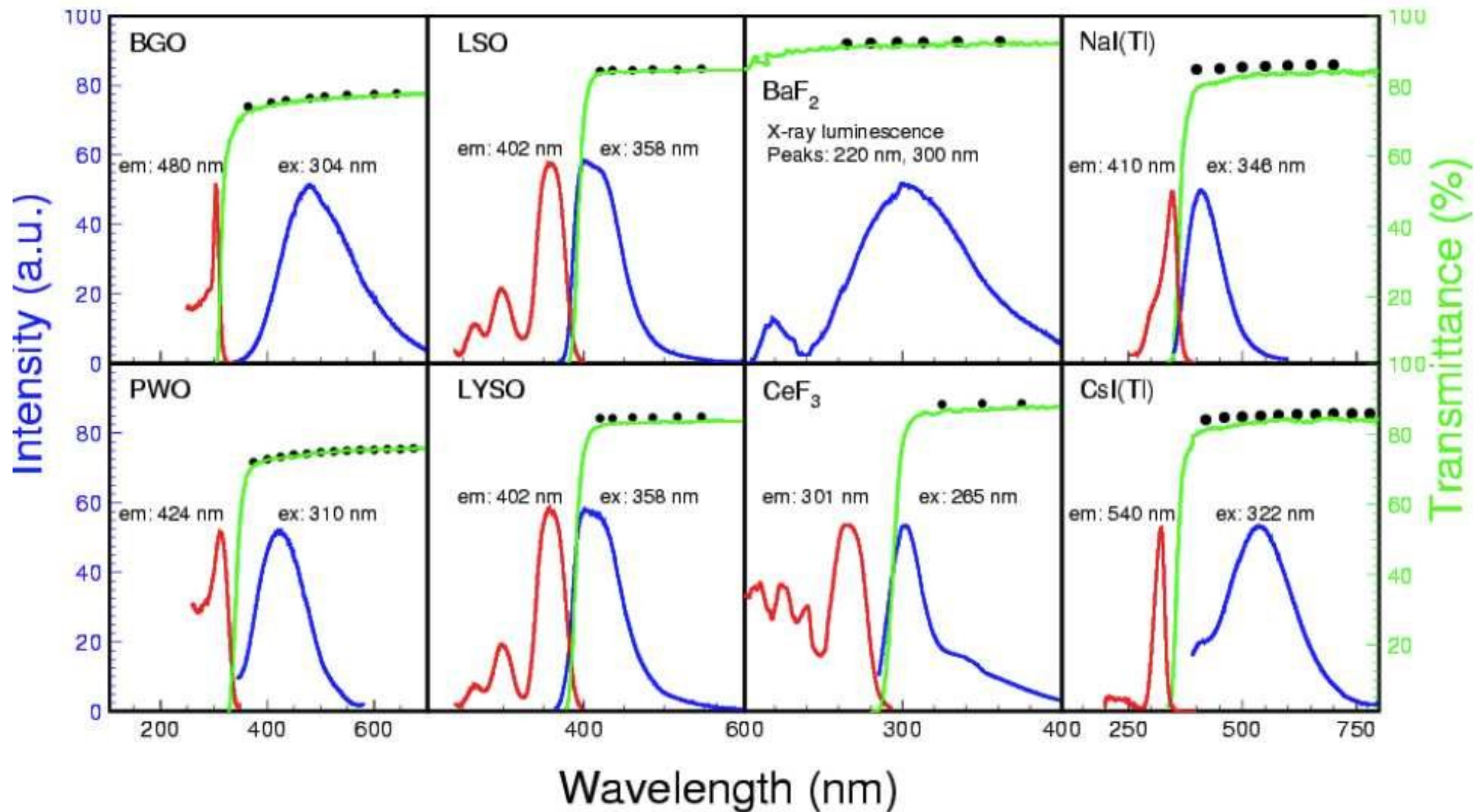
Stabilité en temp.

+ Longueur abs.
+ résistance Rad.

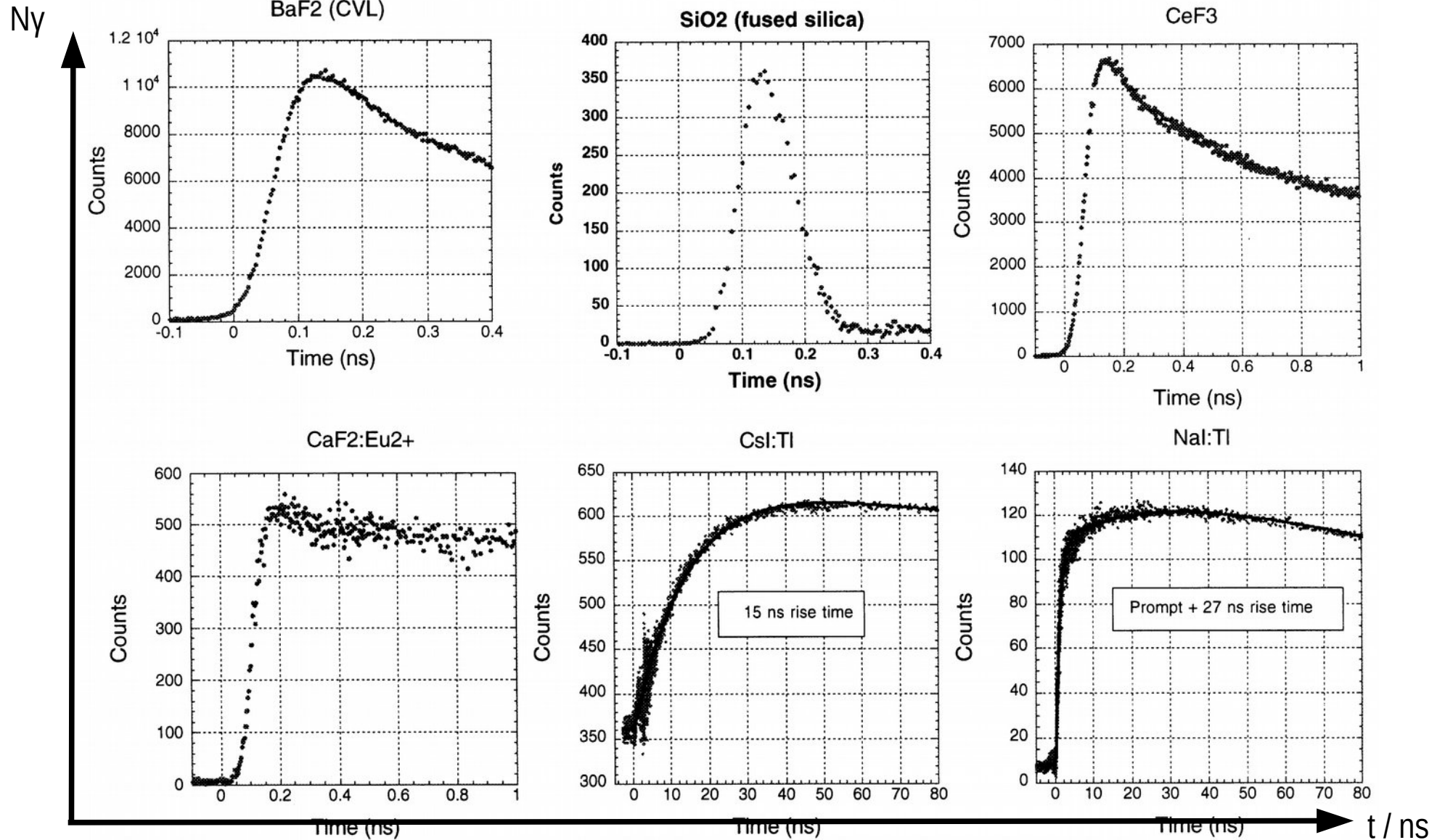
a. at peak of emission; b. up/low row: slow/fast component; c. PMT QE taken out.

R.-Y. Zhu @ CALOR 2010

Lumière des scintillateurs



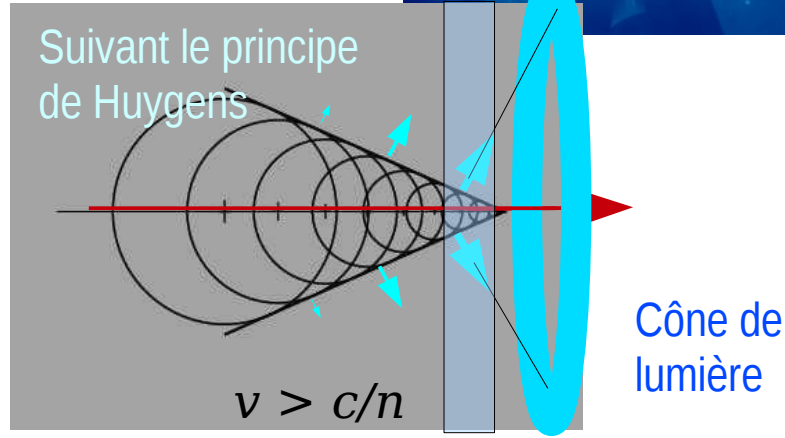
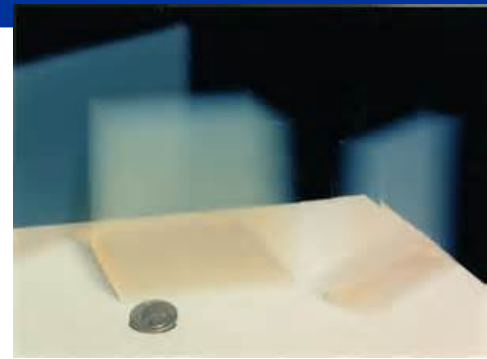
Courbes de lumière



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

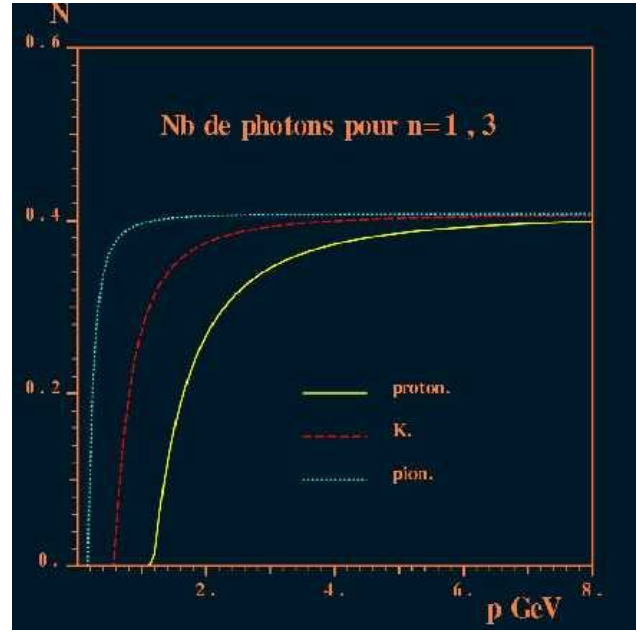
Sensibilité ; RadHard

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

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

TB résolution en temps

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



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

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

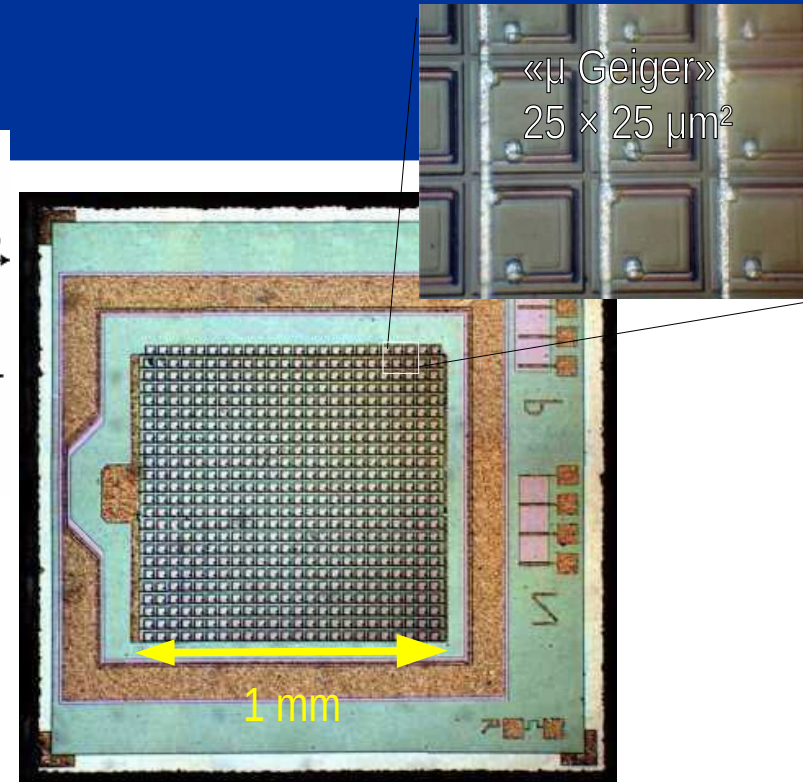
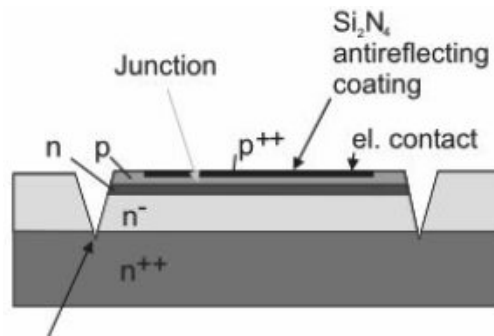
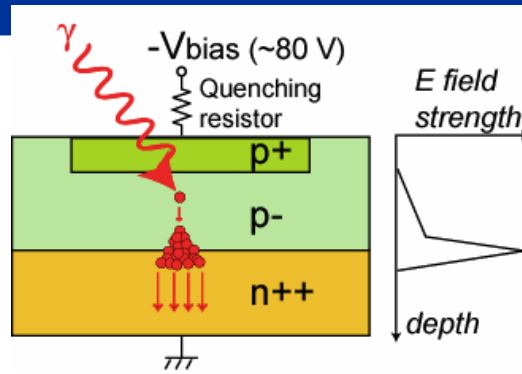
$$\sigma / E \sim (10 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

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 calor)
- ex : CNAO, systèmes d'étalonnage

Efficacité quantique
Surface
Gain
Linarité
Bruit

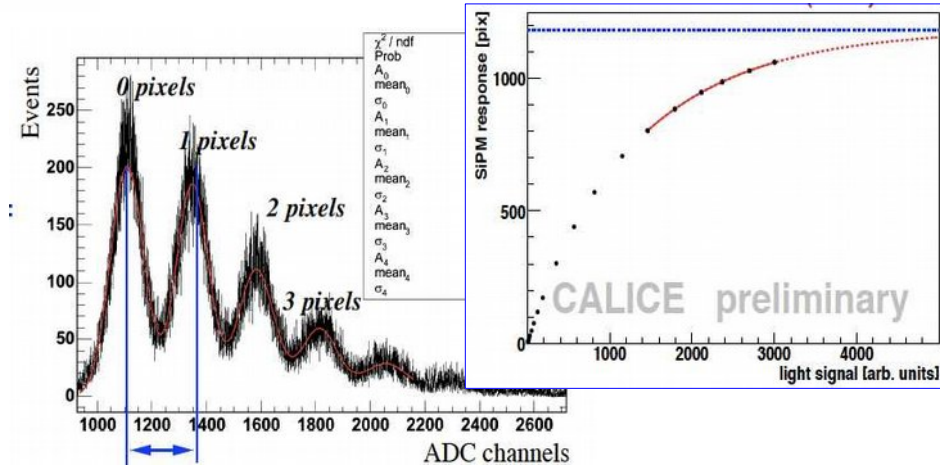


Photo-détecteurs

100nm λ <math>< 1000</math> 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	$O(100)$ 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

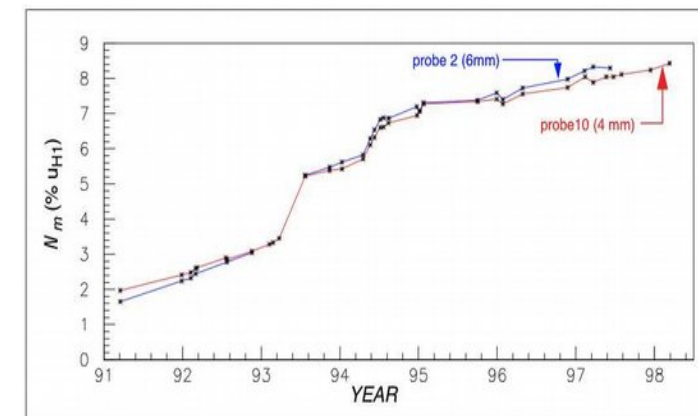
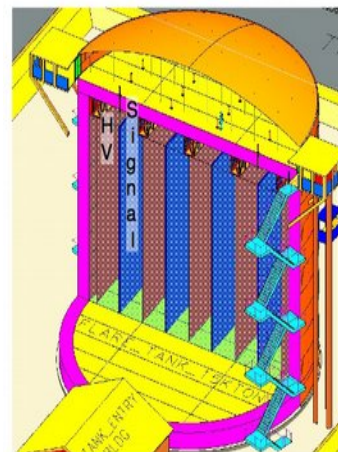


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

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)**

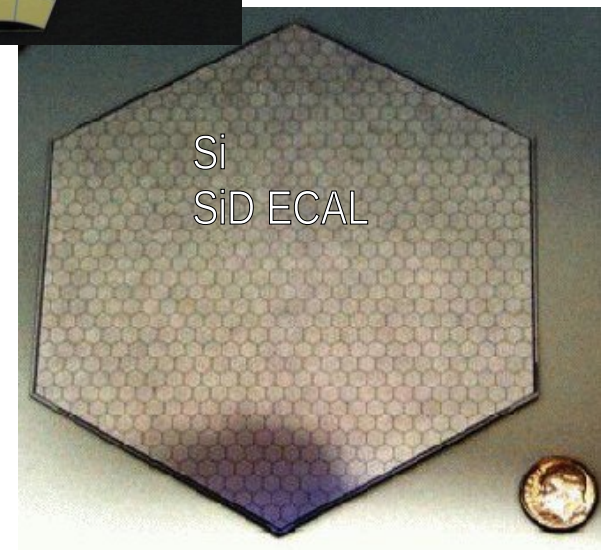
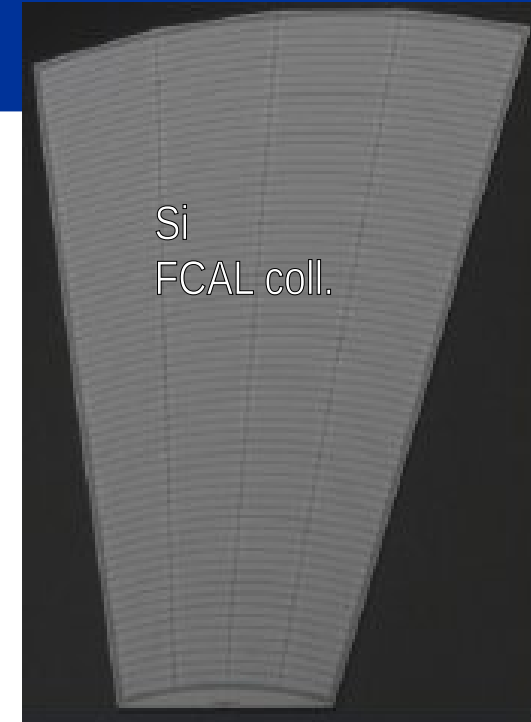
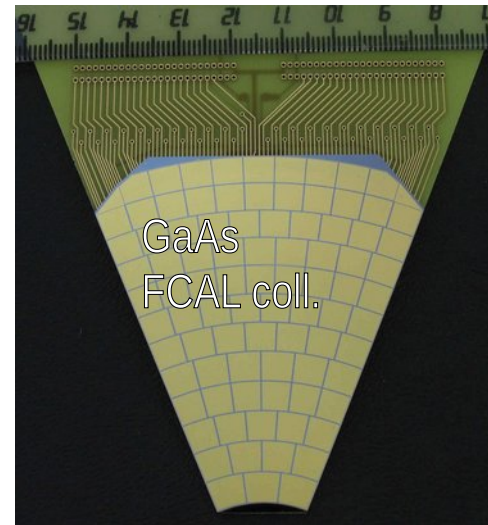
⊕ Très bon rendement

- $w_{e-h} \sim \text{qq eV} \rightarrow \sim 100 \text{ e-h}/\mu\text{m}$

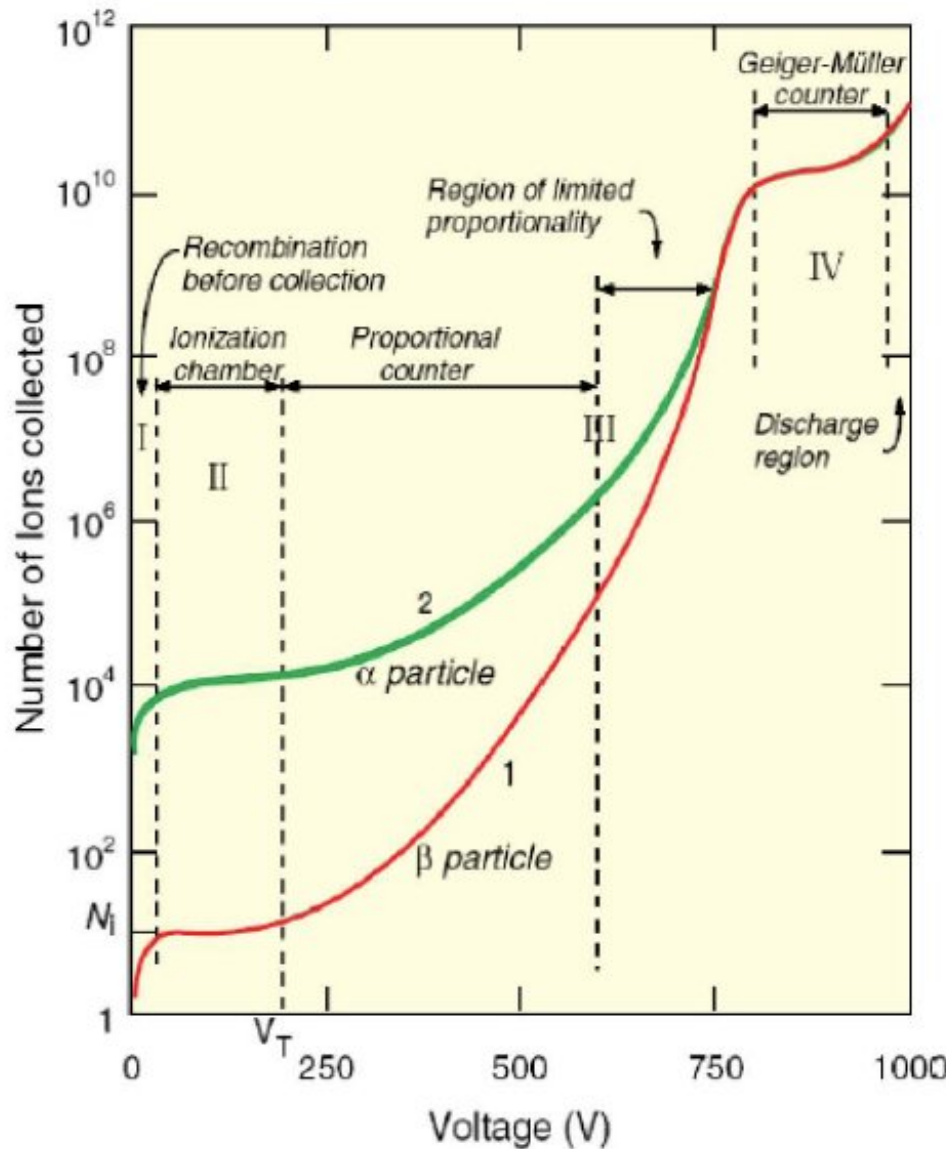
- **Facteur de Fano \rightarrow meilleur que $1/\sqrt{N}$**

- **Stabilité, sensibilité au mip**

⊖ Prix



Détecteurs Gazeux : amplification



Forts gains : $10^6 - 10^7$

Temps de récupération

- ($\sim 1/\text{Gain}$)
- Peut-être local

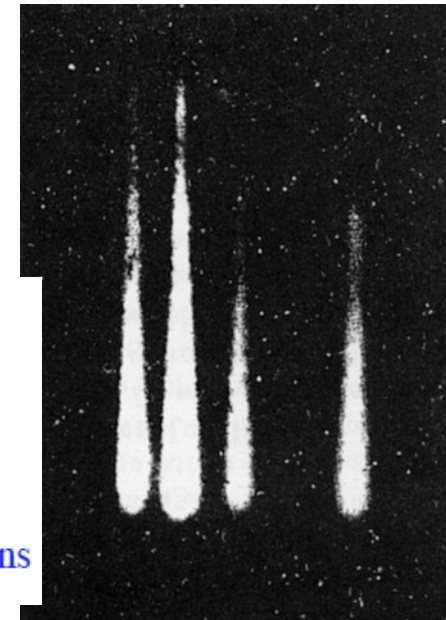
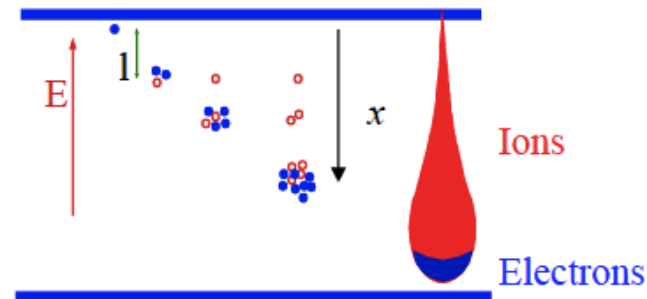
Géométrie

Cylindrique : Geiger

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

Plane

- Champ constant
- plusieurs zone



Détecteurs gazeux



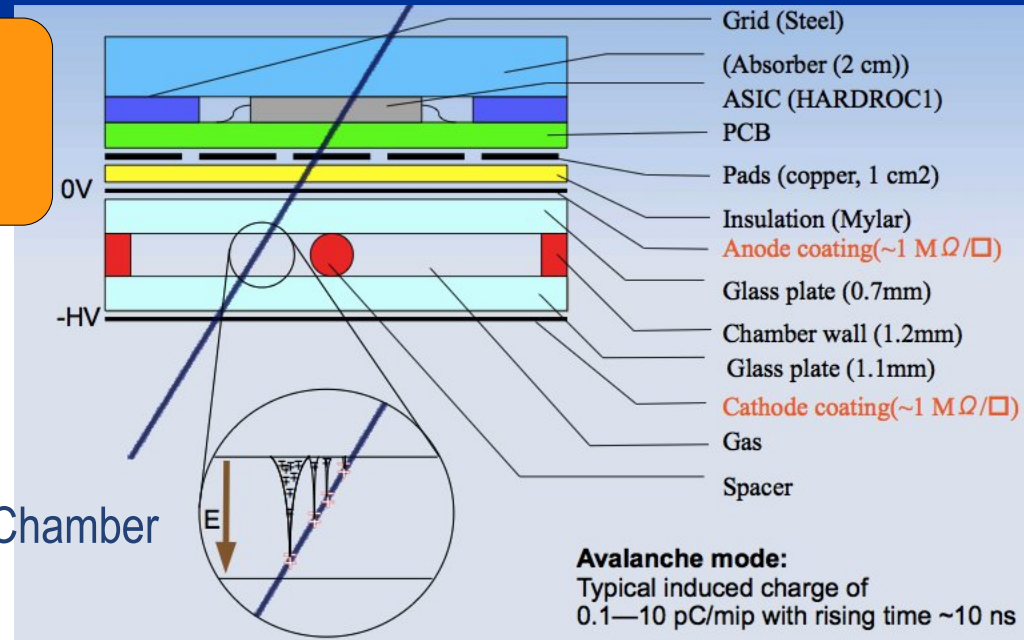
- ⊕ **Larges surfaces, (coût)**
- ⊕ **(Rapidité)**
- ⊖ **f échant.**

Tubes (Proportionnels, Geiger)

– Aleph, Muons Atlas

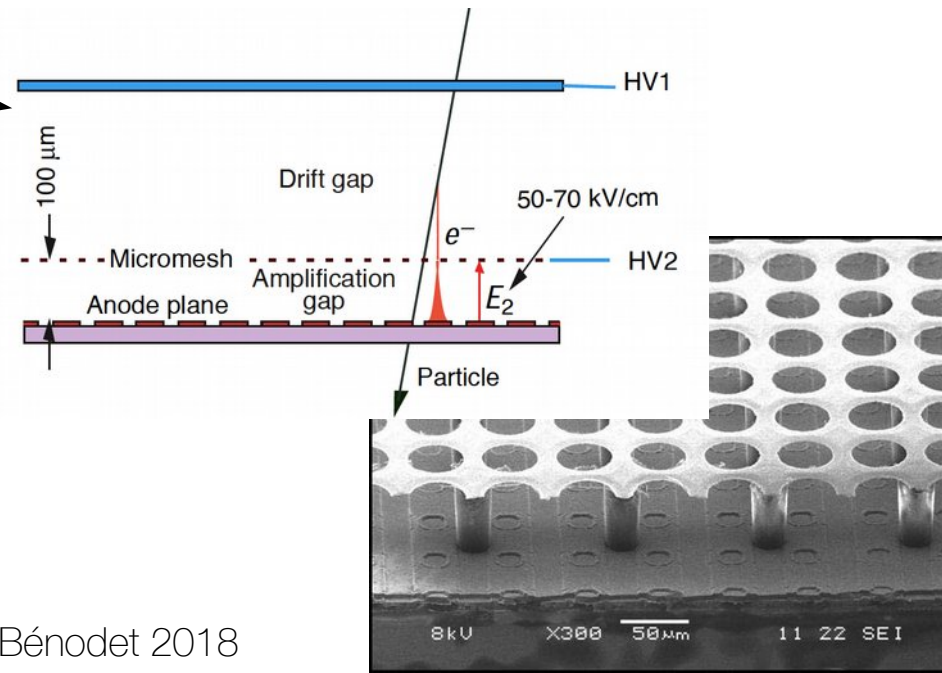
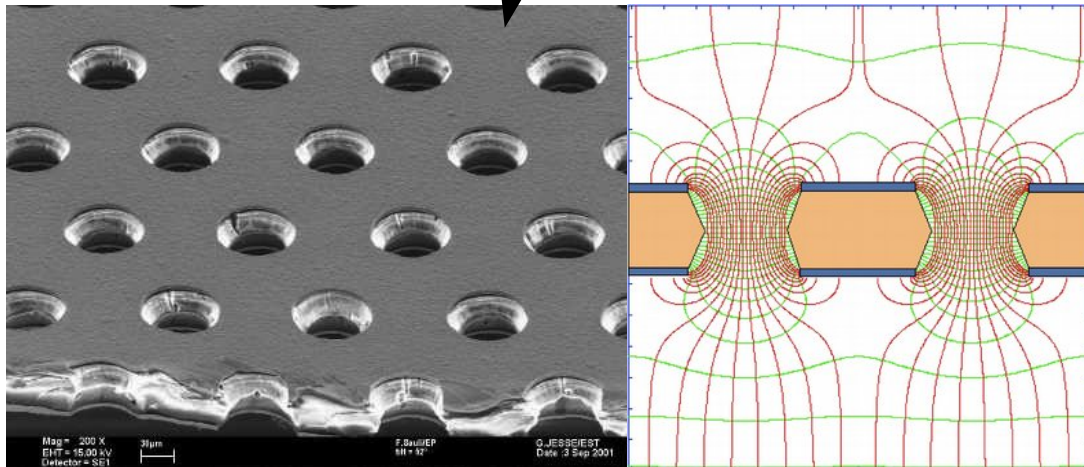
GRPC : (Glass) Resistive Plate Chamber

– Muons CMS



MicroMegas

GEMs



MonBeauCalo.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

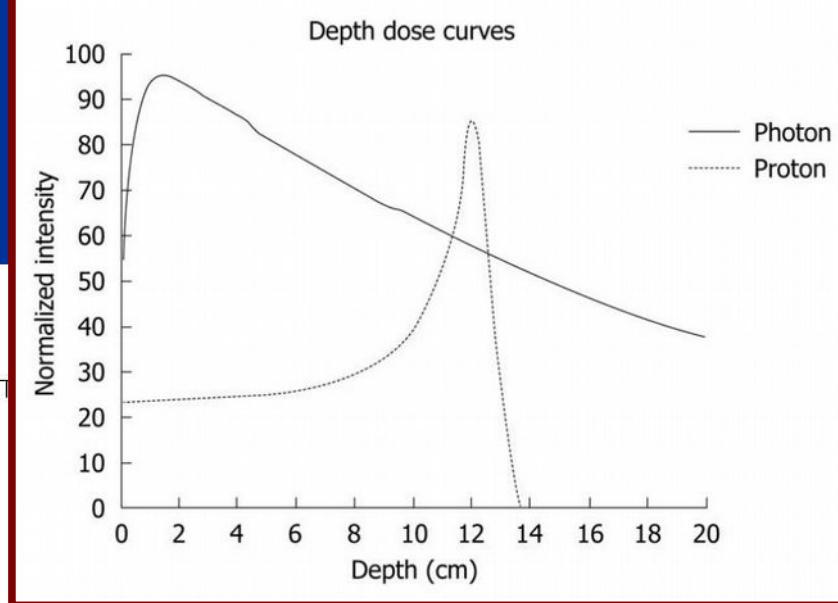
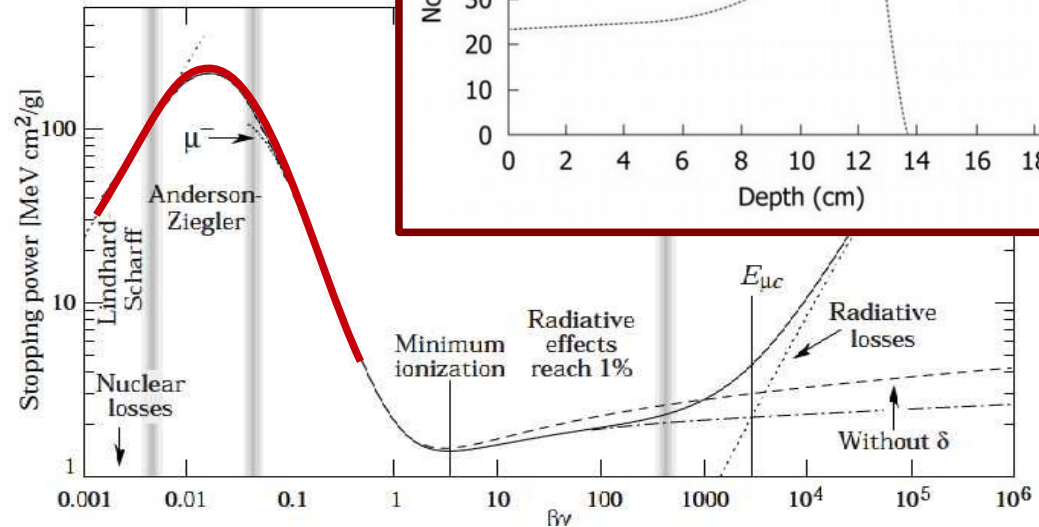
- Charge d'espace

- → 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
 - ⇒ 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

⇒ must be determined for each scintillator