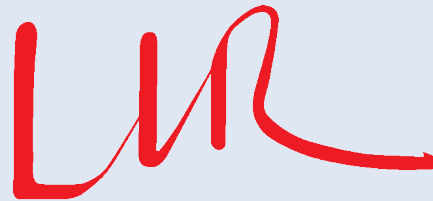
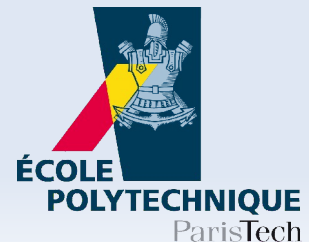


La calorimétrie

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



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



Bonjour...

- 20 ans de H1
 - ▶ Thèse : test des stack du calorimètre Fe-Ar liquide
 - ▶ SpaCal de H1
 - ▶ Luminomètre
- CALICE-ILD → ILC
 - ▶ Groupe du LLR
 - ◆ Construction & tests de prototypes de calorimètre super-granulaire optimisés pour le «Particle Flow»
 - ECAL : Si-W
 - SDHCAL : Fe-GRPC
 - ◆ Simulations → ILD
- Enseignement Travaux Expérimentaux & M1 à l'X

Plan

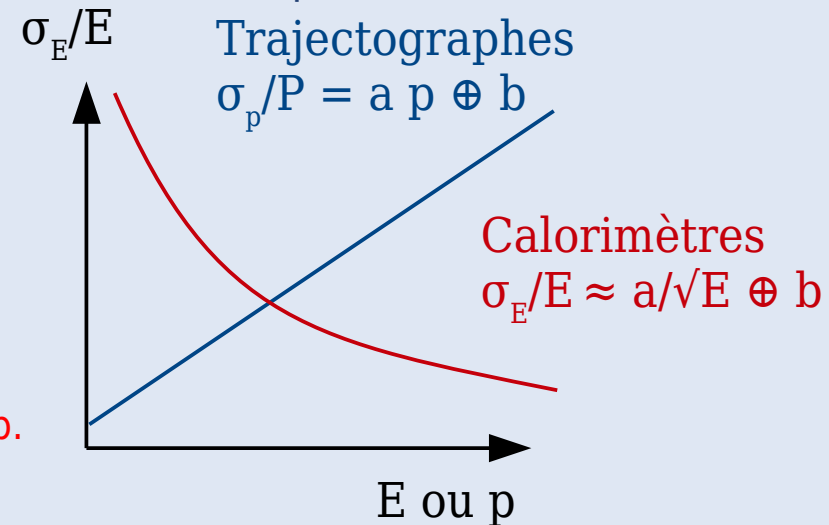
- Introduction
 - ▶ Les interactions des particules dans la matière
 - ◆ interactions hadronique, réponse en temps, ...
 - ◆ Les belles gerbes
 - ▶ Principe de la mesure en calorimétrie
 - ◆ calorimétrie électromagnétique & hadronique
 - ◆ mesure de la performance
 - Techniques de détection
 - ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
 - ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
 - ▶ Détecteurs Gazeux
 - ▶ Quelques exemples
 - Quelques considérations générales
 - ▶ Quelques effets «annexes»
 - ▶ Considérations «pour les ingénieurs»
 - ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout & le particle flow.
- 
- Jeudi**
- Vendredi**
- Lundi**

Introduction

La calorimétrie

Retour aux origines....

- 1903 : P. Curie & A. Laborde : vrai calorimètre. 1ère mesure : 1930 (e- du ^{207}Bi)
- Cristaux NaI + photo-multiplicateur :
 - ▶ spectroscopie γ pour le nucléaire.
 - ▶ Bon marché, stable, «pas mauvais» (\leftrightarrow batterie au Pb pour les voitures)
 - ▶ V présentation à Calor
- Système plus complexe apparus peu à peu \rightarrow CrystalBall (V reference + photo)
 - ▶ Photons en coïncidences dans les réactions N
 - ▶ Tomographie par émission de positrons
- En physique des particules
 - ▶ Chambres à bulles = tracker
 - ◆ analyse magnétique
 - ▶ Remplacement des ch. à bulle par des Ch à Fil Multi prop.
 - ▶ 1^{ers} grand calorimètres dans les années 70
- De + en + gros et plus complexes
 - ▶ LHC : CMS & Atlas



But de la calorimétrie

- Mesure de l'énergie de particules par arrêt (\perp philosophie trackers)
 - ▶ «Calorimètre \cong bloc de matière dense instrumenté»
 - Mesure des neutres :
 - ▶ Electromagnétique : γ 's
 - ▶ Hadronique : n, K_L^0
 - Mesurer l'énergie des électrons
 - Identifier les leptons : électrons, μ , τ 's
 - ▶ Muons \approx trace dans les détecteurs
 - ▶ $\tau \sim$ jets
 - Mesurer l'énergie des hadrons chargés.
 - Mesurer les jets \rightarrow «energy flow»
 - «Particle flow»
- $\gamma c\tau$ = parcours moyen
 - ▶ $\gamma = E/m$
 - $c\tau >$ taille de tracker
 - ▶ K_L^0
 - ▶ π^\pm :
 - ▶ $\mu, p, n \gg 100m$

Ordres de grandeur

- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 10^{-10} \text{ J}$
- $100 \text{ GeV} = 10^{-8} \text{ J}$
 - ▶ $\Delta T \text{ d}'1 \text{ g d'eau} = \text{qq nK}$
- But : Passage d'une particule (mip) dans 1 cm de mat $\sim \text{qq MeV}$
 - ▶ $\rightarrow \sim \text{domaine des bolomètres (à qq 0,1K)}$

Besoin d'une amplification
physique du signal d'ionisation

Principe de la calorimétrie en PHE

- 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)
- Puis mesure des traces chargées \leftarrow les seules laissant un signal !
- Hypothèse : Conservation de l'énergie : $E_{\text{total}} = (\text{ou } \propto) \sum \text{dépôts}$

- On doit fournir
 - ▶ De la matière pour interagir (radiateur)
 - ▶ un milieu sensible aux traces chargée (senseur)

Radiateurs & détecteurs

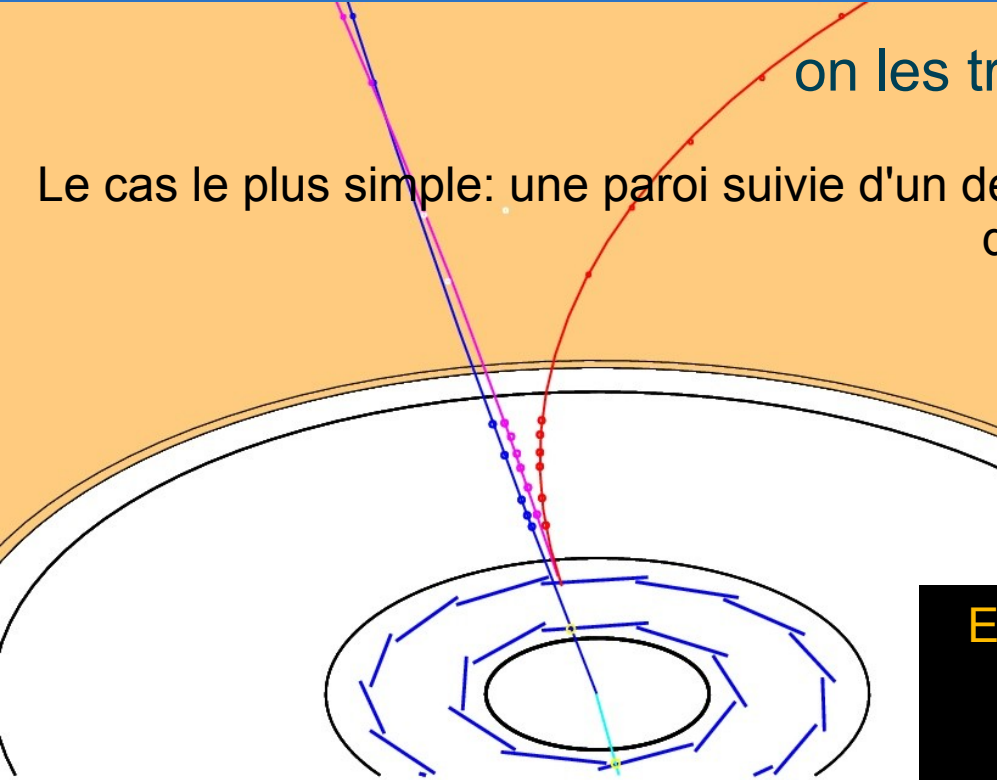


- identiques \rightarrow **Calorimètre homogène**
- entrelacés \rightarrow **Calorimètre à échantillonnage**

Les neutres

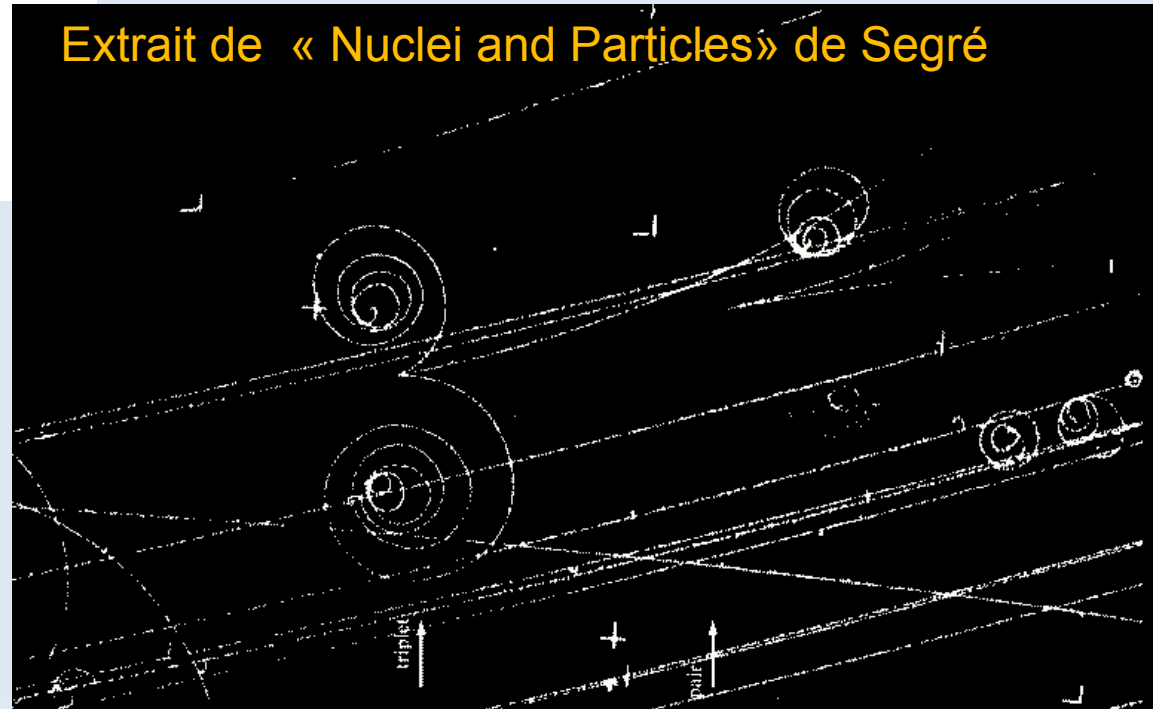
on les transforme en chargés

Le cas le plus simple: une paroi suivie d'un détecteur de chargés dans un champ magnétique



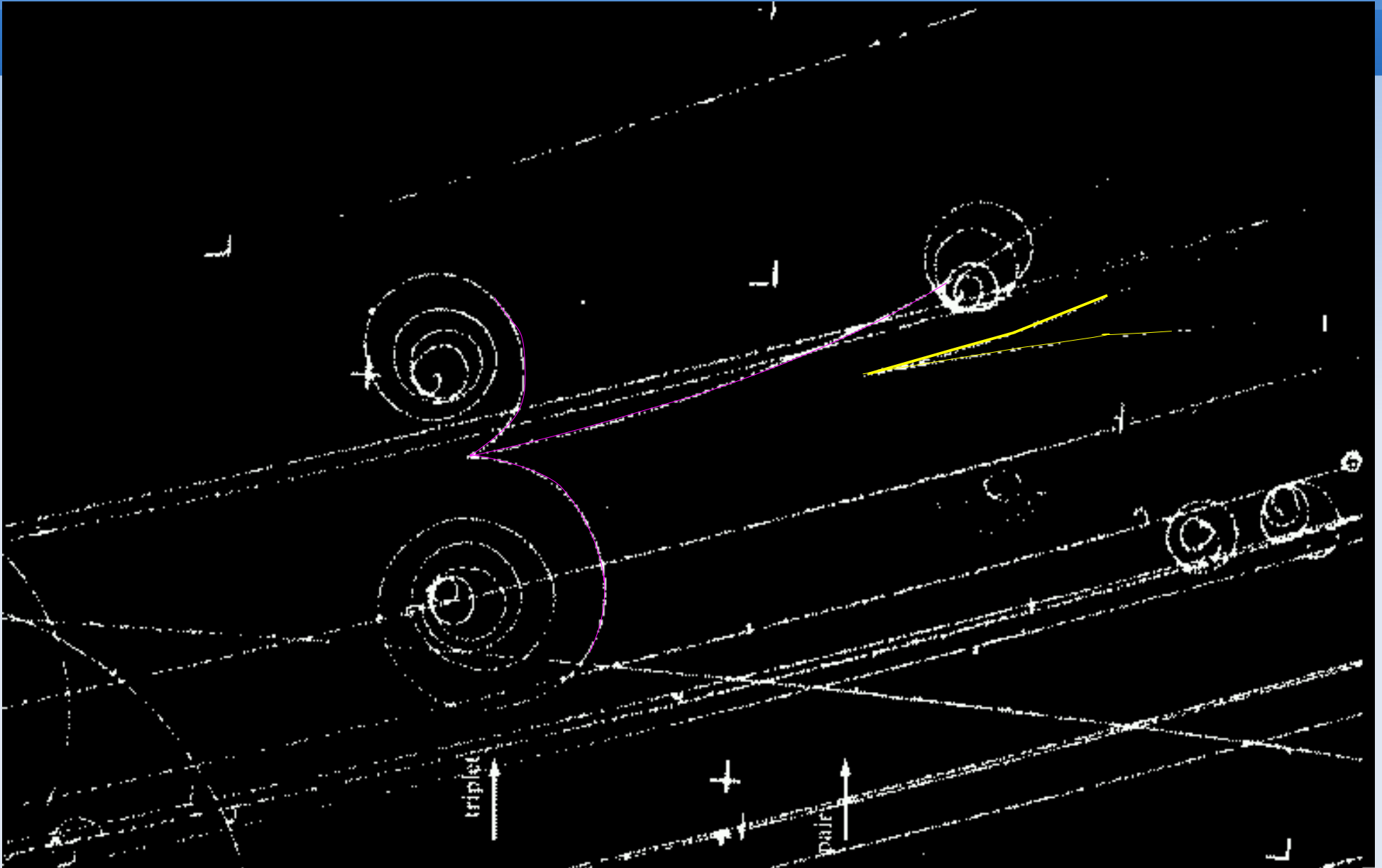
Images des conversion de photons dans CMS (ECFA...)

Extrait de « Nuclei and Particles » de Segré



Conversion d'un photon sur le détecteur de vertex. ALEPH

Réactions de chargés ?



Interaction d'un photon avec le champ nucléaire, paire, et avec le champ d'un électron, triplet

Les interactions dans un bloc de matière

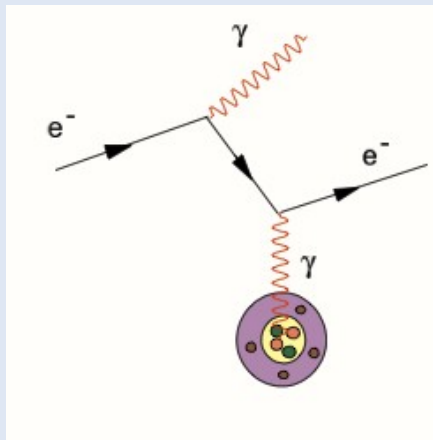
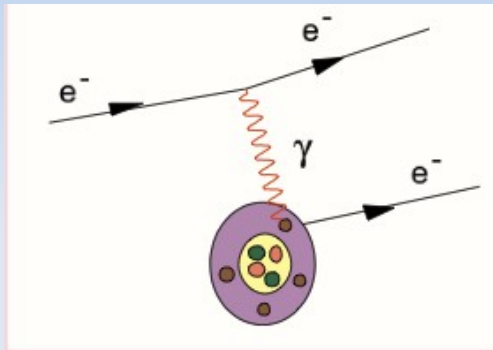
Glossaire

- 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
- Č = 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

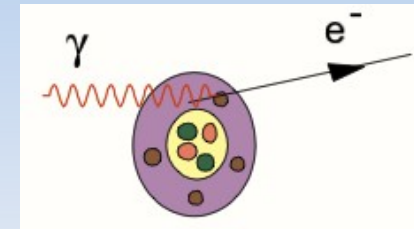
Ionisation



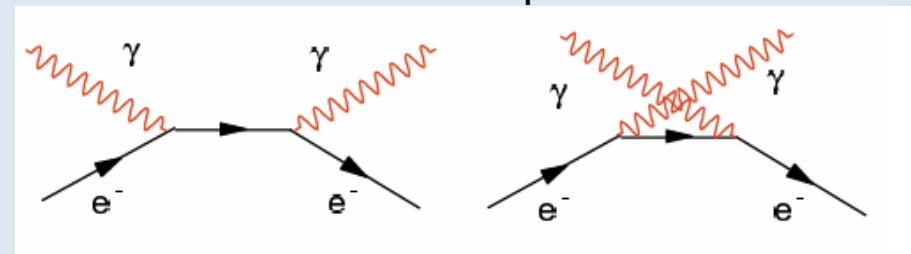
Rayonnement de freinage

Photons

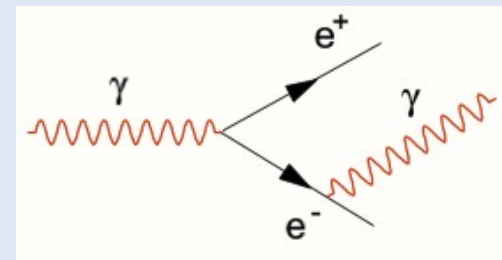
Effet photo électrique



Effet compton

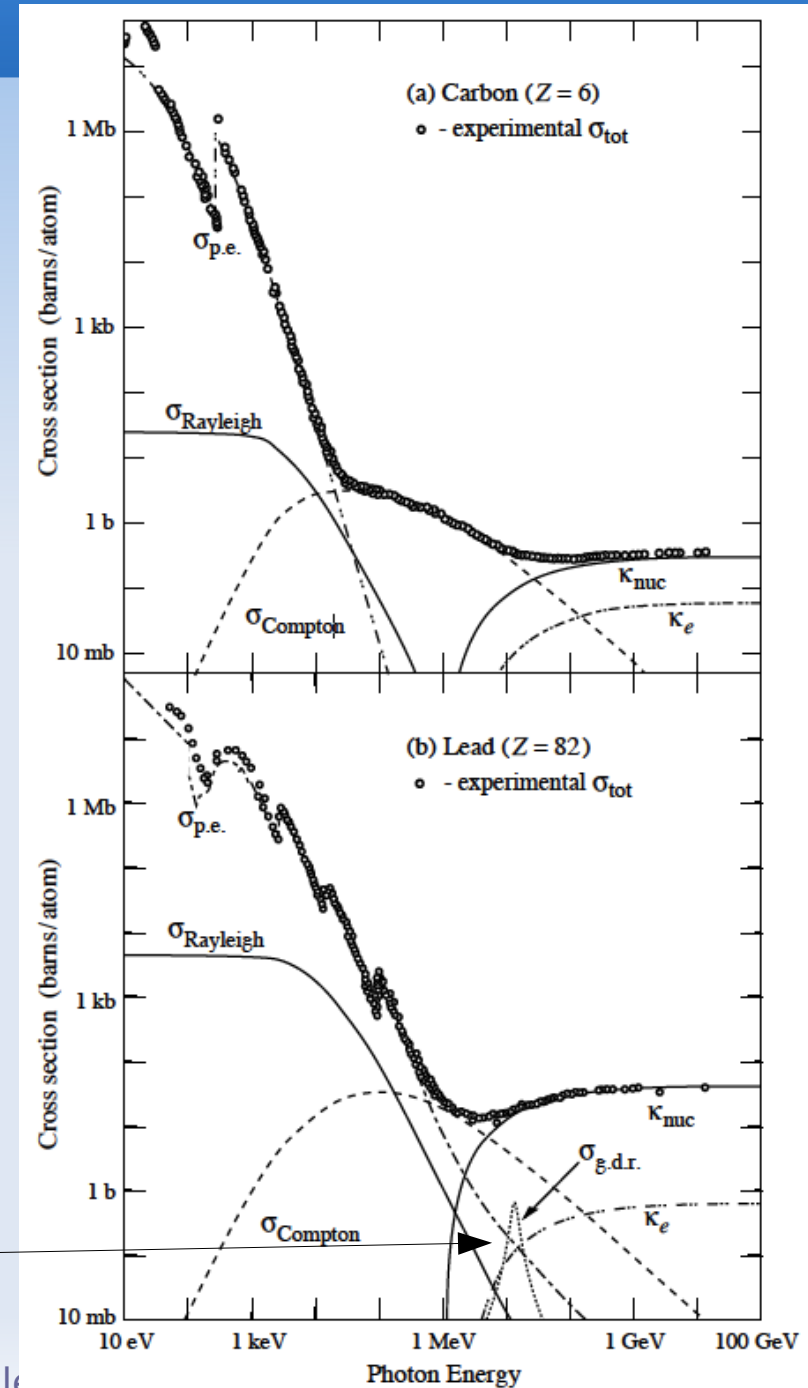


Création de paire



Les photons dans la matière

- «Tout ou rien»
 - ▶ Section efficace $\sigma(E)$
[Barn/atome, cm^2/g , cm^{-1}]
 - ◆ $\sim Z^5 / E^3$
 - ▶ Atténuation exponentielle dans la matière
- Effet photo-électrique
- Effet Compton
 - ▶ Et autres diffusions
 - ◆ Rayleigh ($\lambda >$ taille diff.)
 - ▶ $\sim Z$
- Création de Paires
 - ▶ $\sim Z^2$
- Effets photo-nucléaires...



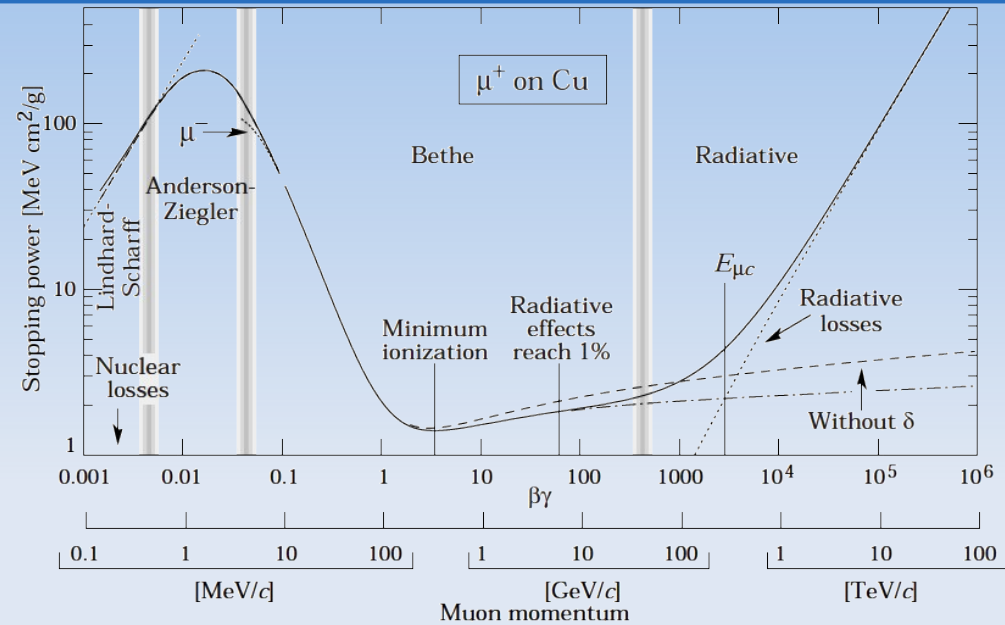
Interactions des particules chargées

■ Particules Chargées

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

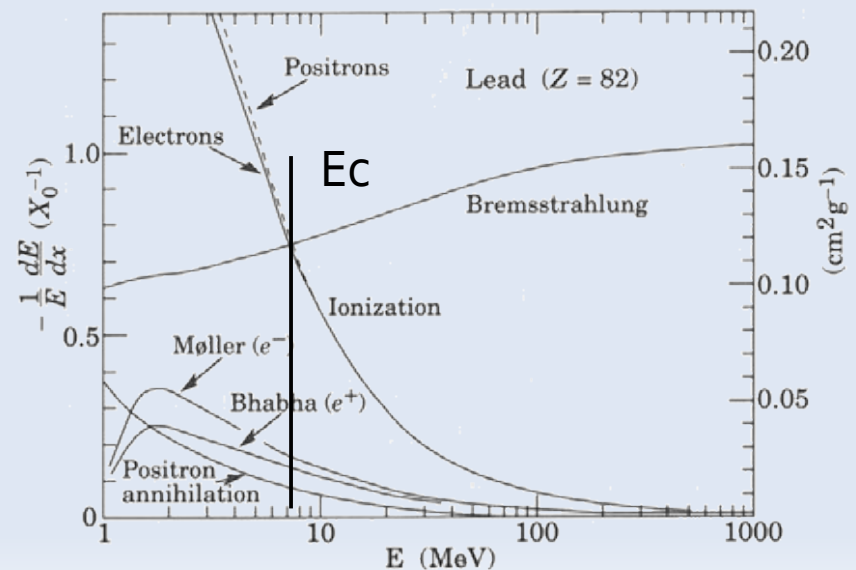
Équation de Bethe-Bloch qq %

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

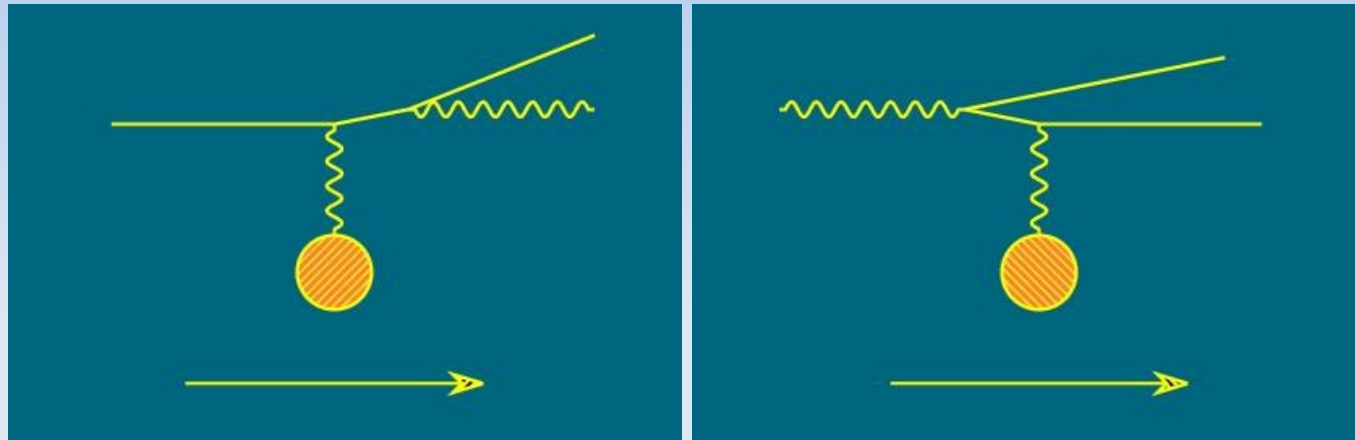


■ Électrons/Positrons

- ▶ Termes supplémentaires (Mott & Bhabha)
- ▶ Trajectoire non rectiligne
 - ◆ Diffusion multiple



Principaux processus électromagnétique



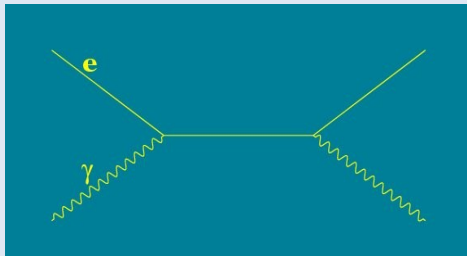
Bremsstrahlung

Création de paires

Mais aussi

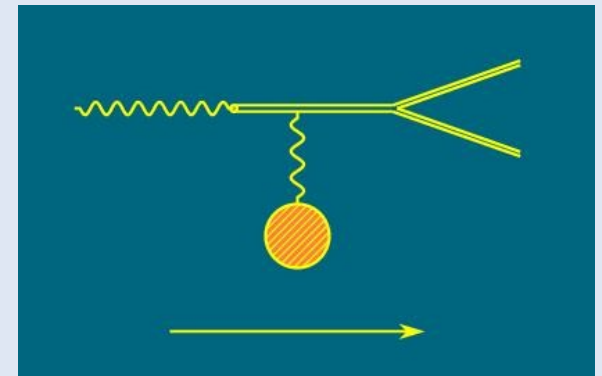
A basse énergie ($< 2 \text{ GeV}$)

Compton



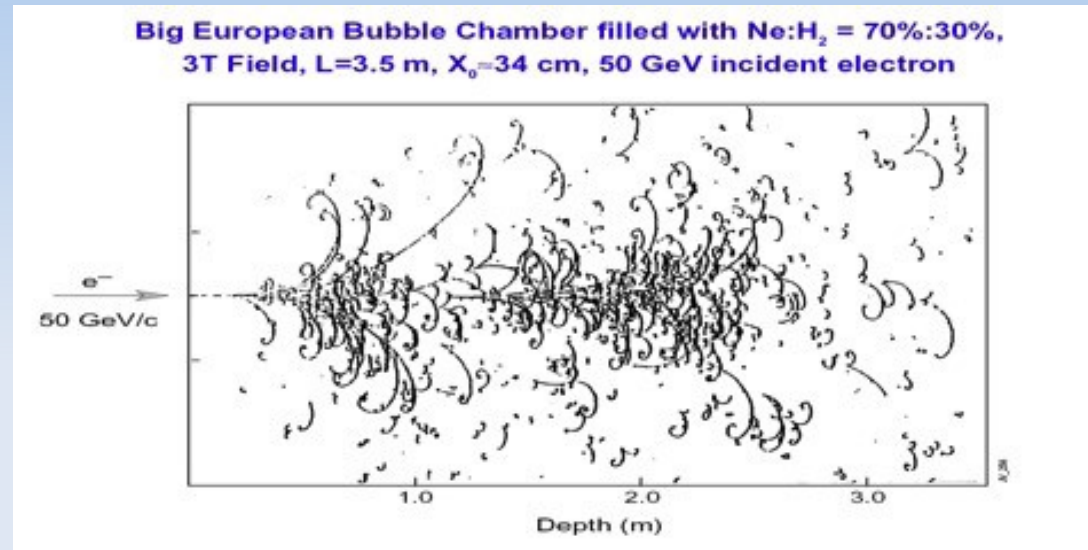
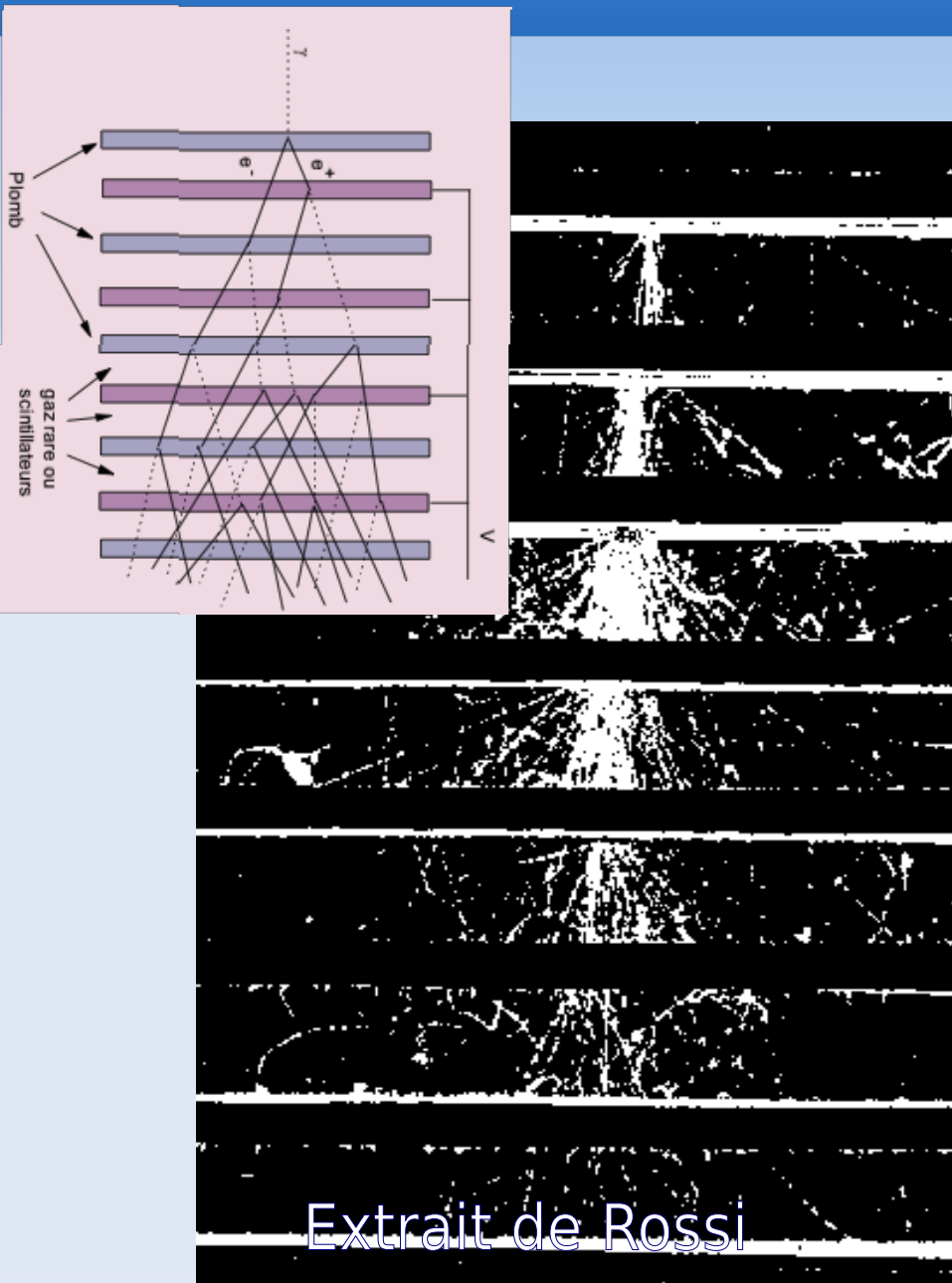
A haute énergie
au niveau de 10^{-4}

Création
de paires de muons
de paires de pions



Effet photoélectrique

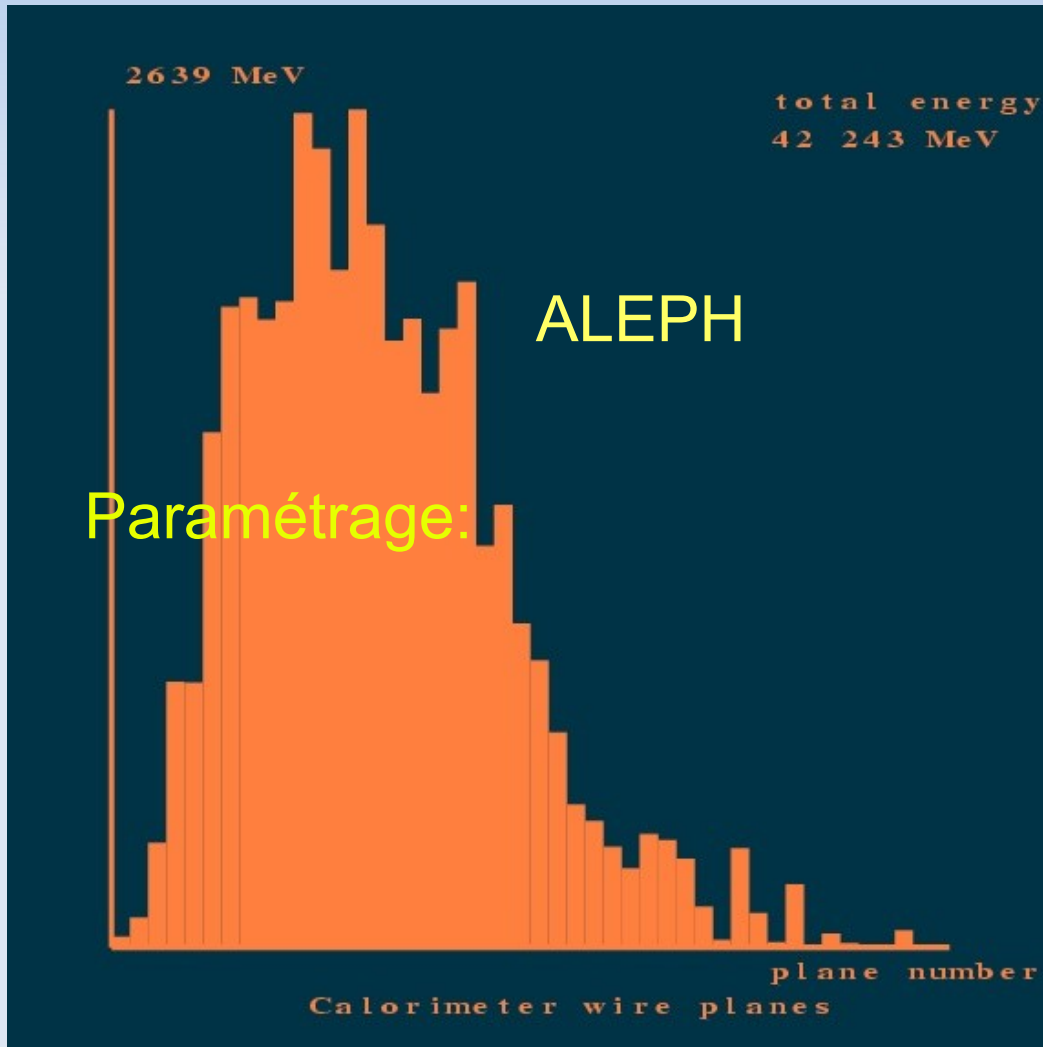
Gerbes électromagnétiques



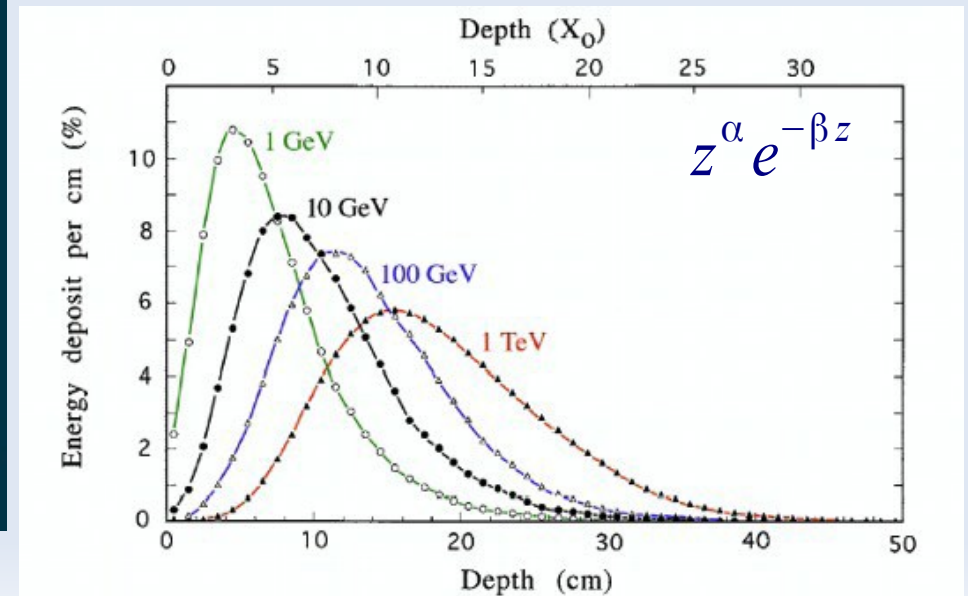
Electron gerbant sur des plaques de plomb dans une chambre de Wilson (1949)

Extrait de Rossi

Profils longitudinal



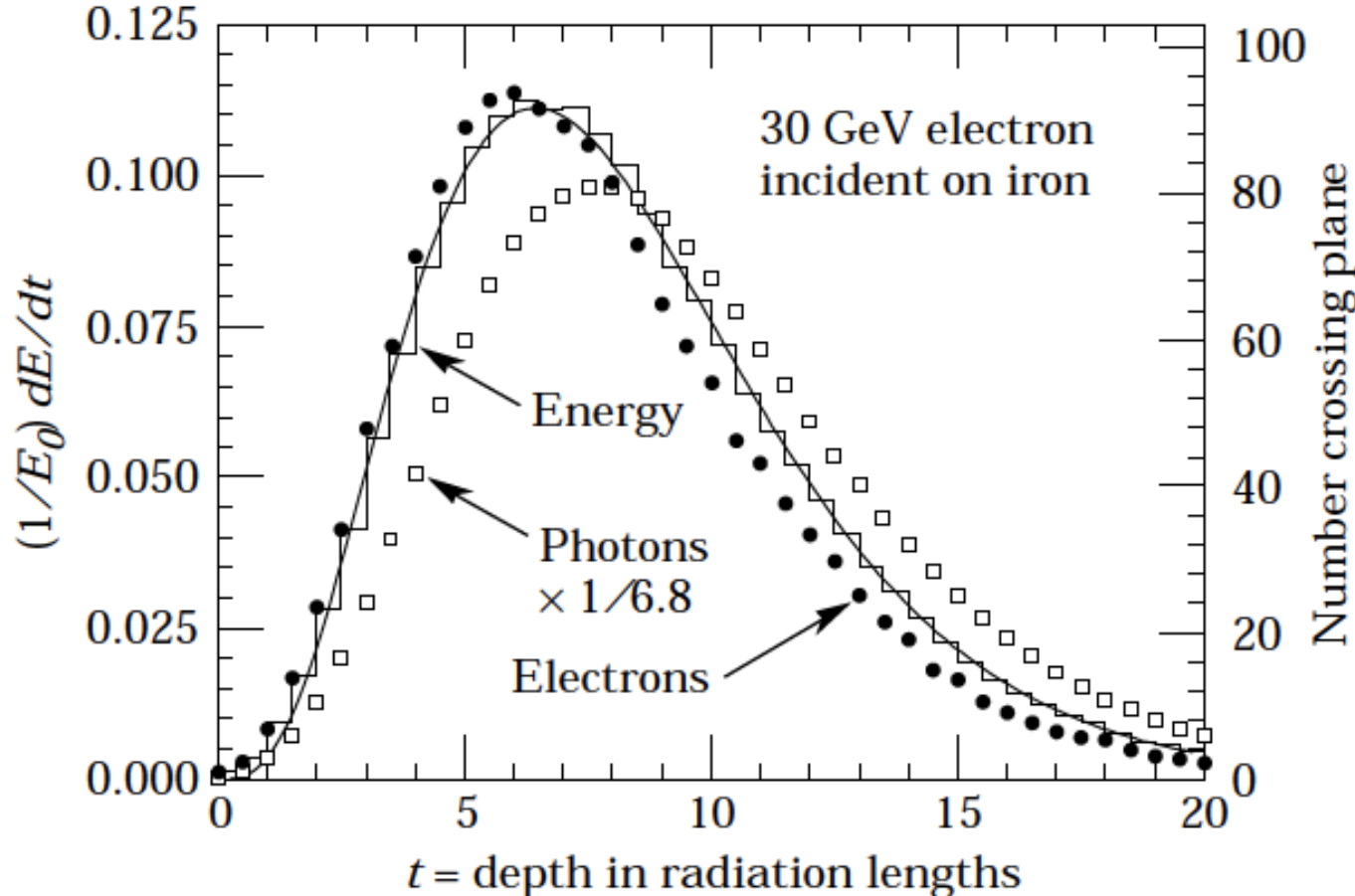
Profil en profondeur
de l'énergie déposée
par un électron de 45 GeV.



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^-



Caractérisation transverse de la gerbe : rayon de Molière

La structure transverse est indépendante de l'énergie

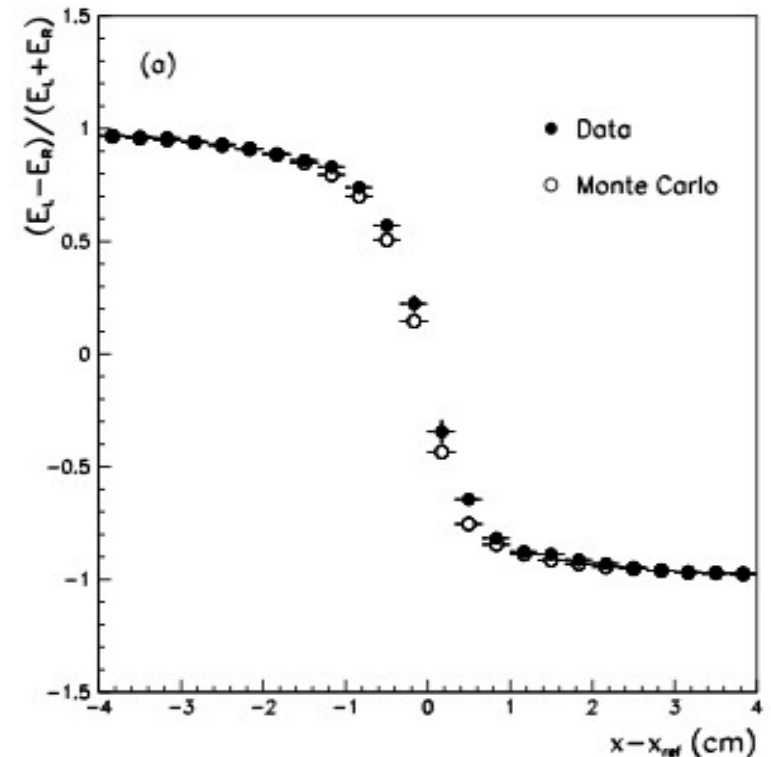
- 1 cœur compact
- 1 halo diffus (Comptons)

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

GEANT shower
(PbWO₄ crystal)



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

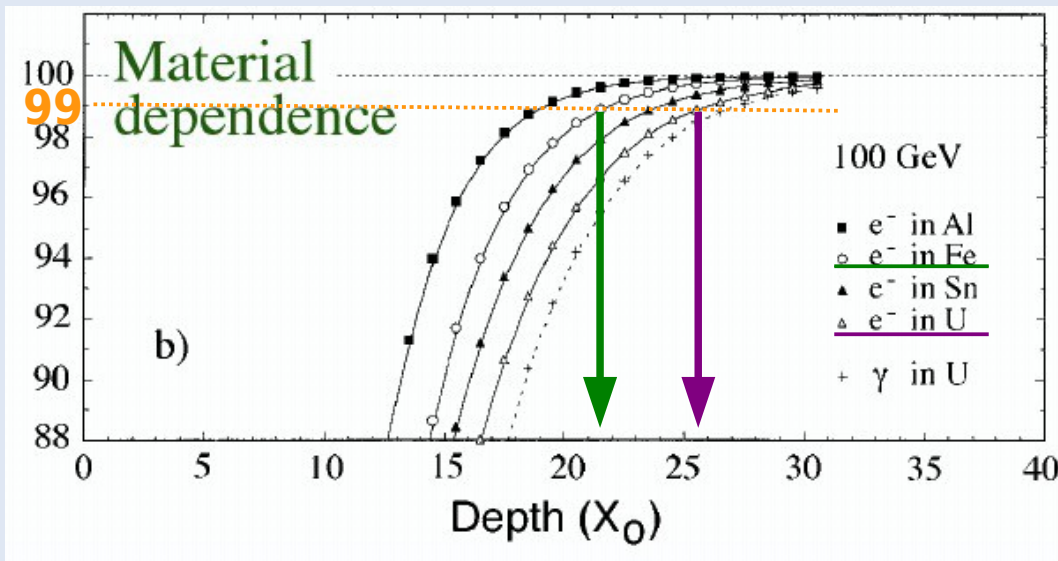
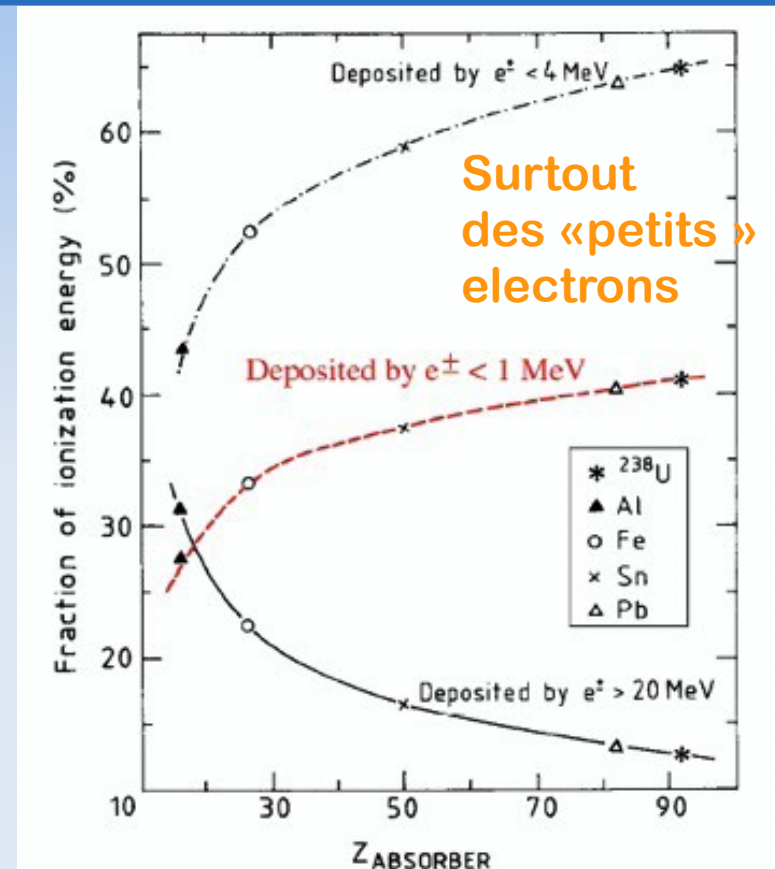
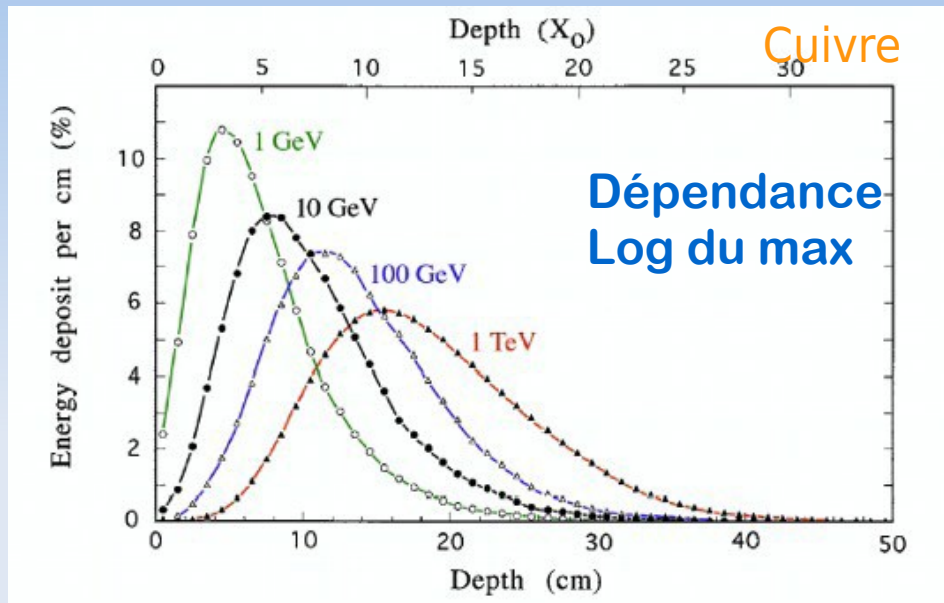


Rayon de Molière (R_M)

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



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

Quelques chiffres

$$R_M = X_0 E_s / E_c$$

- X0 pour qq matériaux

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

(sol. & liq.)

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

Materiau	Z	A	ρ / g cm ⁻³	X ₀ / cm	R _M / cm	Ec / 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		

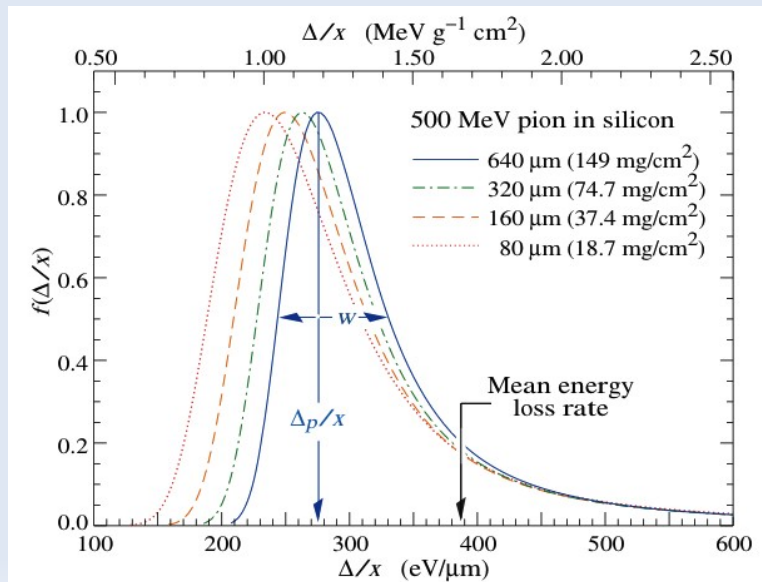
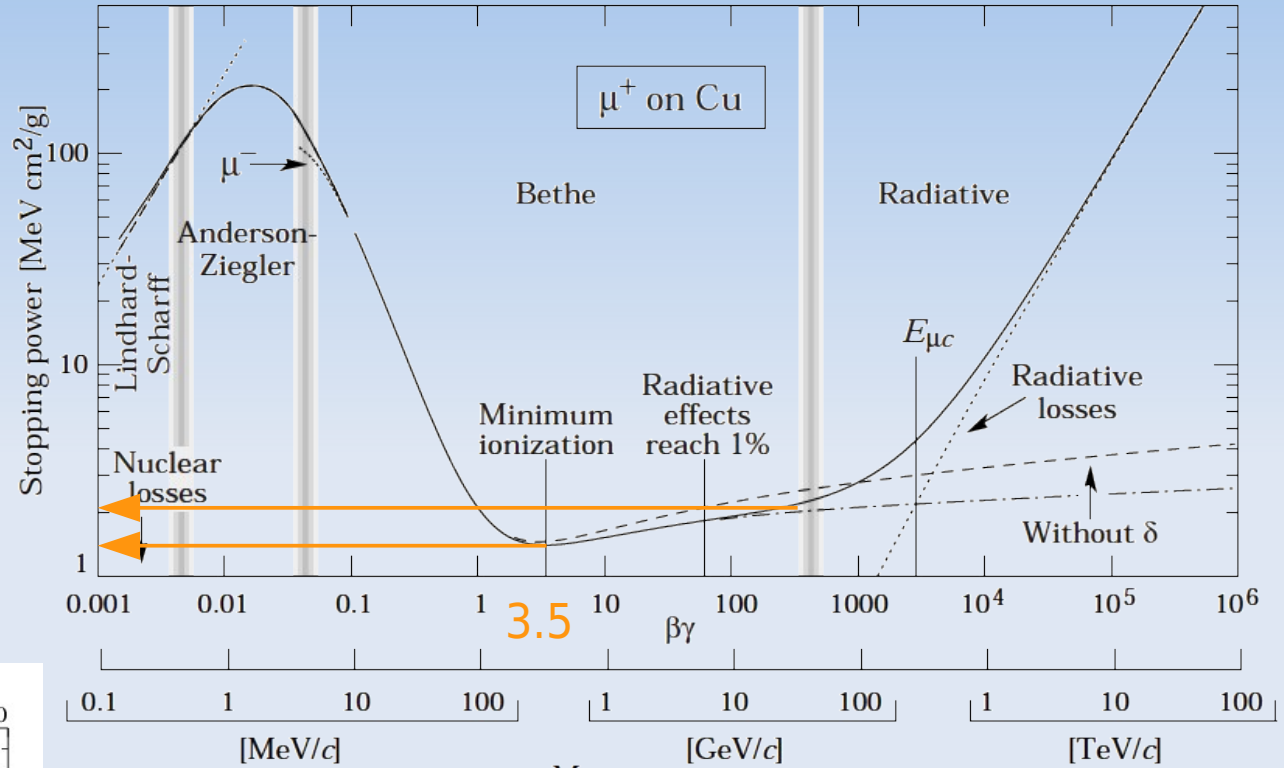
$$1/X_0 = \sum w_j / X_j$$

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

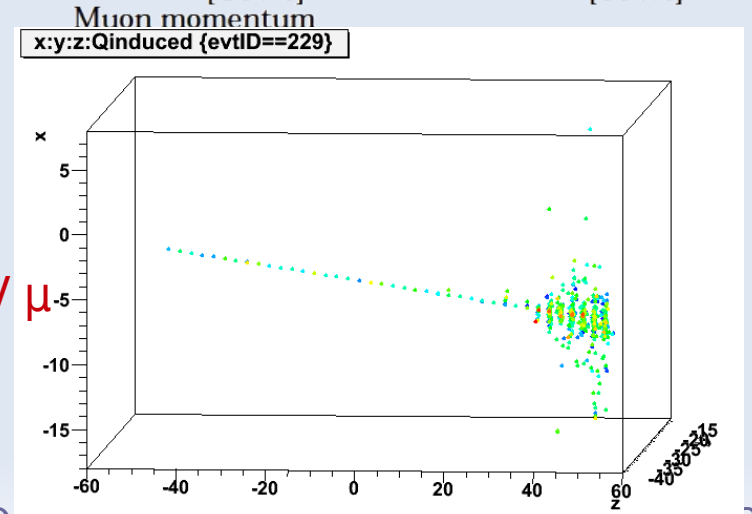
Les muons

- Comme dans les trackers

- ▶ dE/dX
- ▶ Landau



10 GeV μ



Les interactions hadroniques

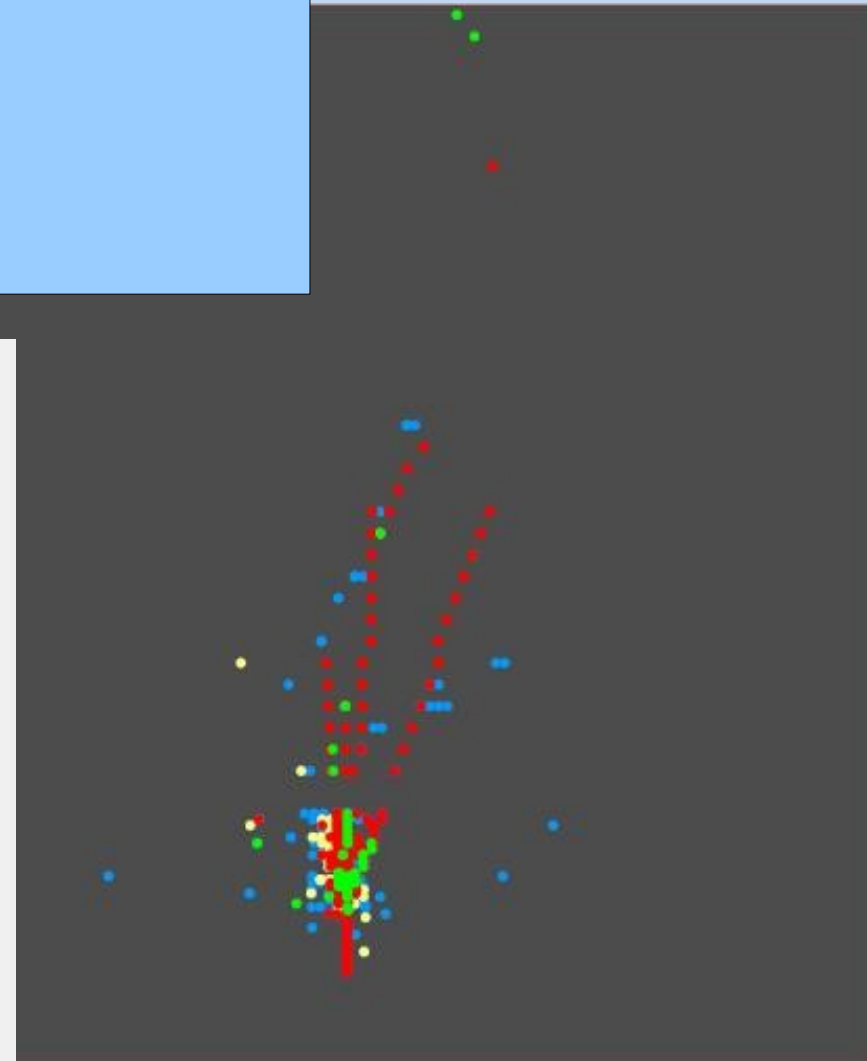
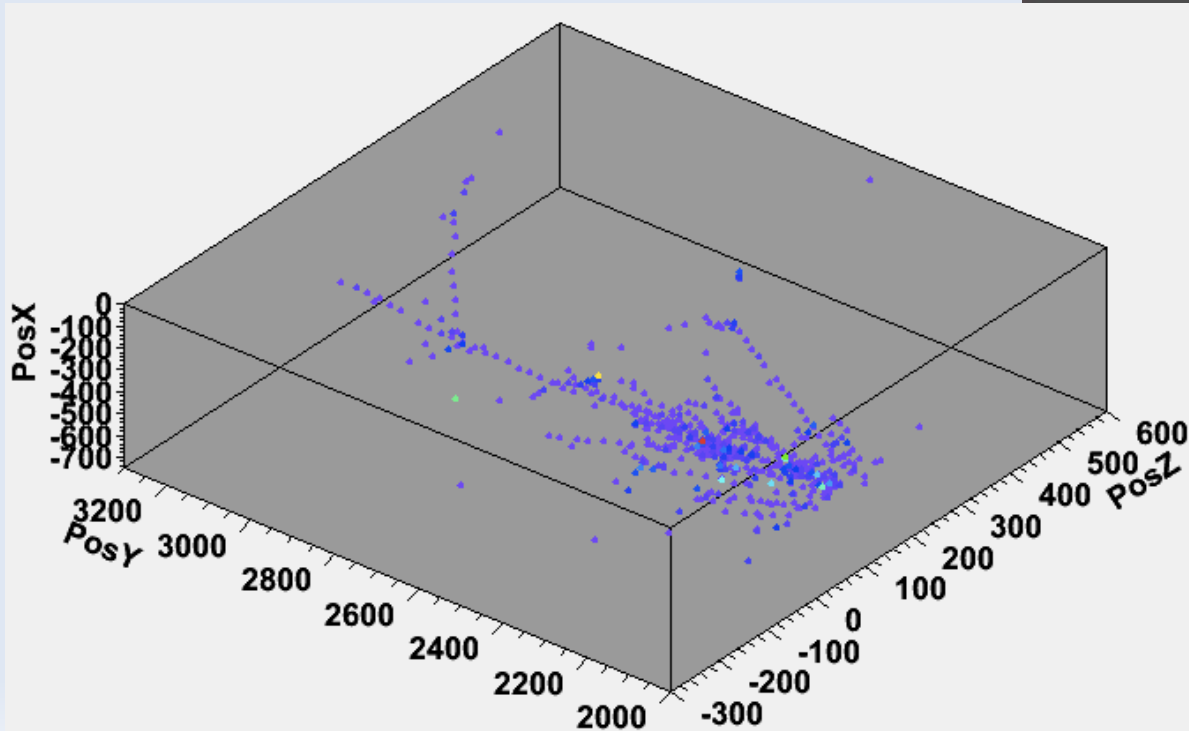
- matière hadronique (\equiv lourds \leftrightarrow leptons \equiv légers)
 - ▶ Hadrons : constitués de 3 quarks
 - ▶ Mésons : constitués de 1 quark-1 anti-quark
- Chargés / neutres \rightarrow interaction EM et faibles
- + interactions hadroniques
 - ▶ Collisions dures
 - ▶ Collision élastiques
 - ◆ échange de charge (ex : $K^0_L + p \rightarrow K^+ + n$)
 - ▶ Diffusion multiple

Interaction hadroniques

Processus beaucoup plus complexes

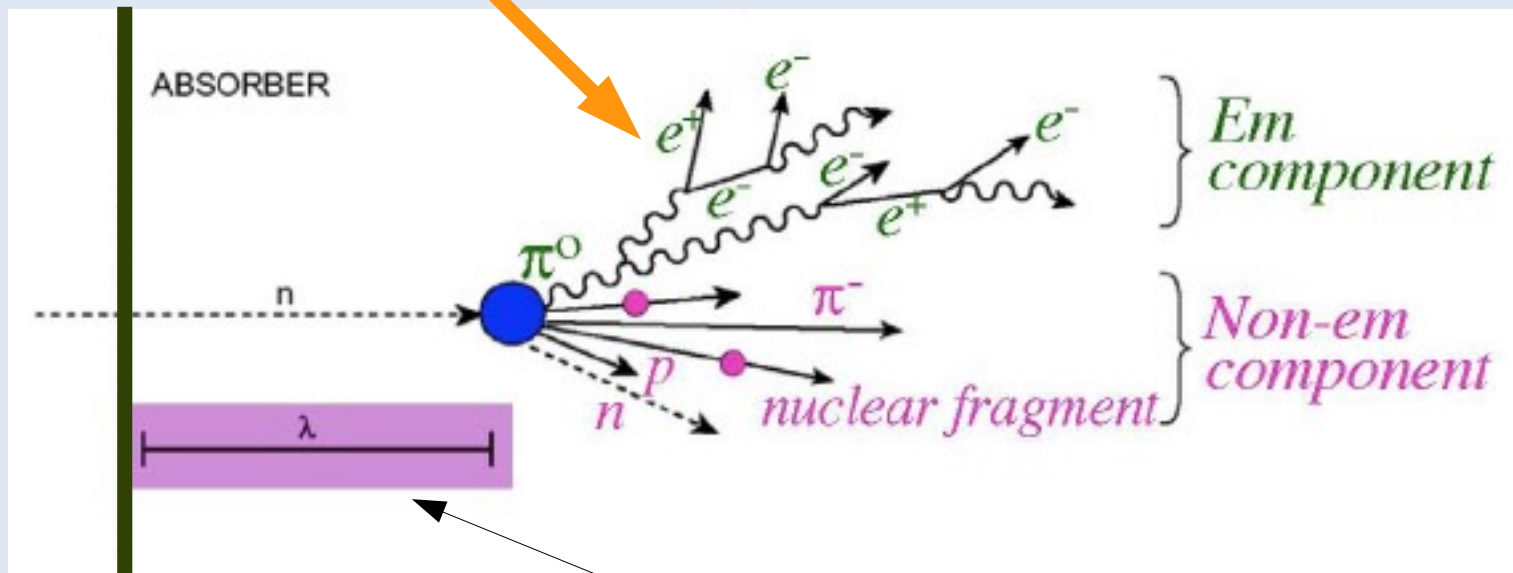
Source principale de fluctuation:
réponse différente

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



Les collisions hadroniques

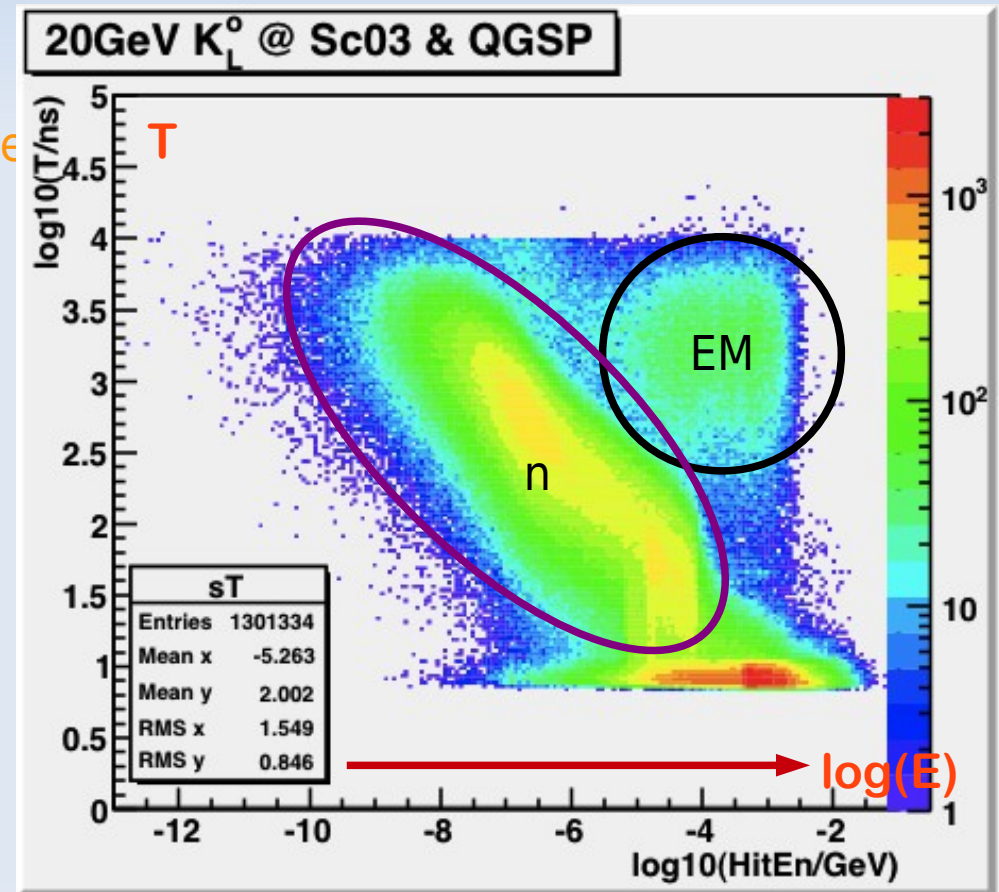
- Collisions dures
 - ▶ production de secondaires
 - ▶ populations
 - ◆ $\sim 30\% \pi^+$
 - ◆ $\sim 30\%$ de π^-
 - ◆ $30\% \pi^0 \rightarrow 2 \gamma$
- + fragments de noyaux
 - ▶ neutrons rapides
 - ▶ dés-excitations
 - ◆ n
 - ◆ γ
 - ◆ α



Longueur typique d'interaction

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
 - ▶



Bilan énergétique

- Résultats de simulations (par ex. FLUKA, GEANT4)
 - ▶ basé sur des mesures de σ_{eff} d'interaction

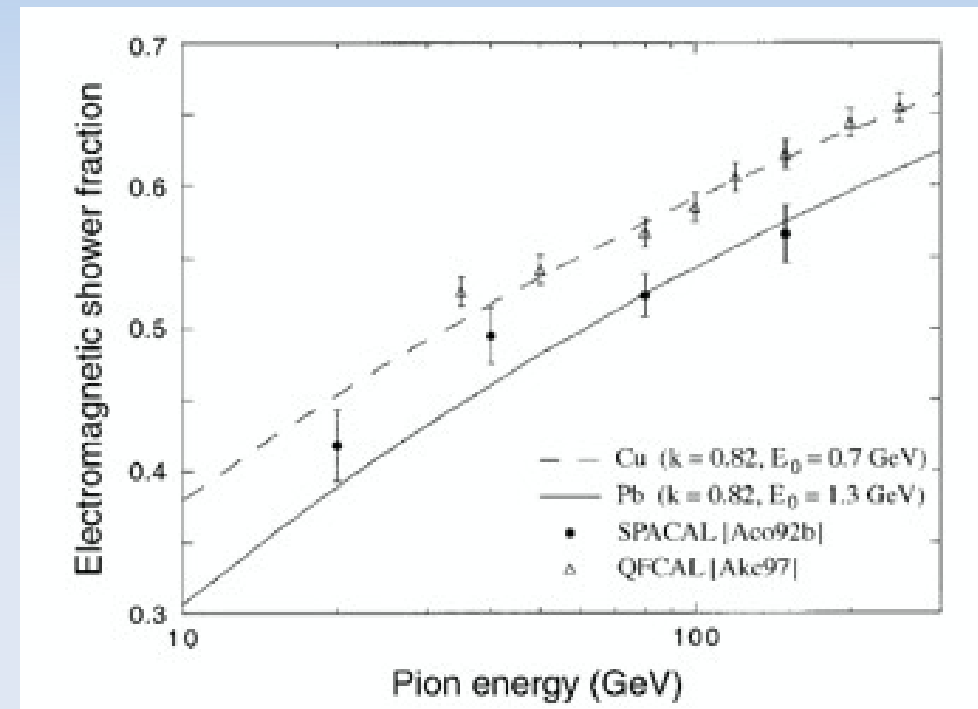
Particule	Nombre		Energie	
	Pb	Fe	Pb	Fe
Pions	1.2%	2.1%	19%	21%
Protons	3.5%	8%	37%	53%
Energie de liaison nucléaire			32%	16%
Recul			2%	5%
Neutrons d'évaporation	32%	5%	10%	5%
Neutrons de cascade	5.4%	5%		

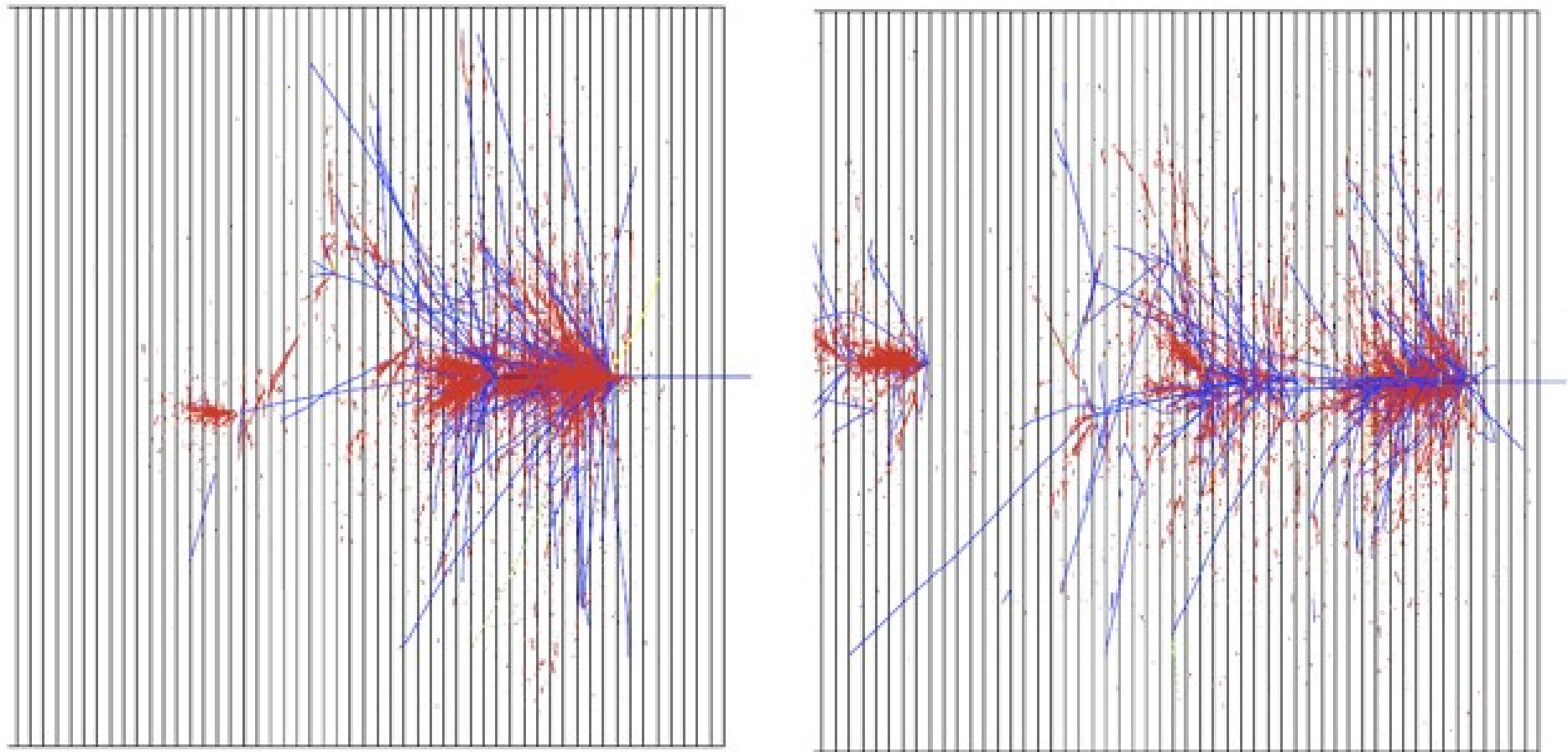
} Energie invisible

- Les effets nucléaires dépendent beaucoup du matériau (sic!)
- Les effets des neutrons difficiles :
 - ▶ σ pas toujours bien connues
 - ▶ Effets des senseurs (présence d'Hydrogène)

La fraction EM

- À chaque collision :
 - ▶ π produits en égales quantités : π^+ , π^- , π^0
 - ▶ $\pi^0 \rightarrow$ composante EM «locale»
- Fraction f_0 de π^0 dans chaque interaction
 - ▶ $F_0 = f_0 + (1-f_0)f_0 + (1-f_0)^2 f_0 + \dots$
 - ▶ $F_0 = 1 - (1 - f_0)^n$ pour n générations
 - ▶ $n \propto E$





red - e.m. component
blue - charged hadrons

La non-linéarité → facteur e/h

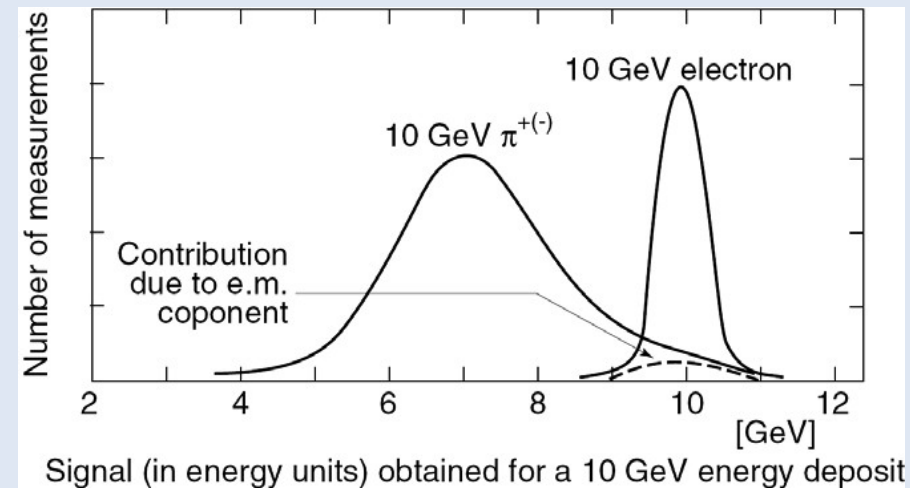
Calorimètres compensants

- 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 compensant
 - ▶ $\neq 1$ → calorimètre non-compensant

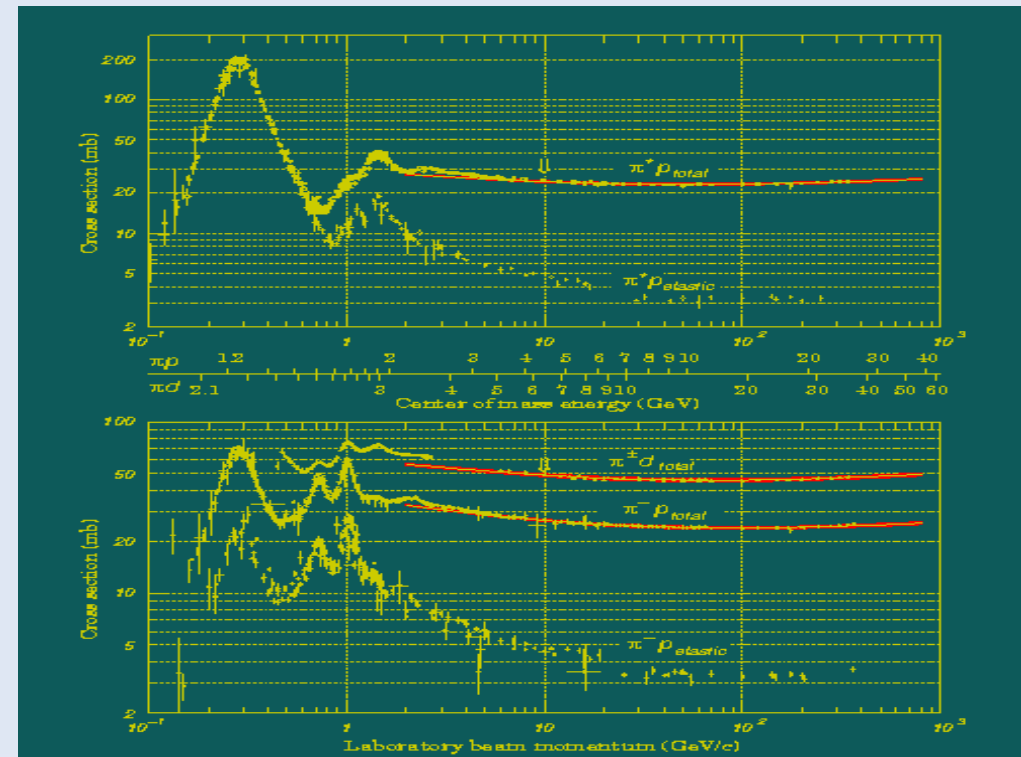
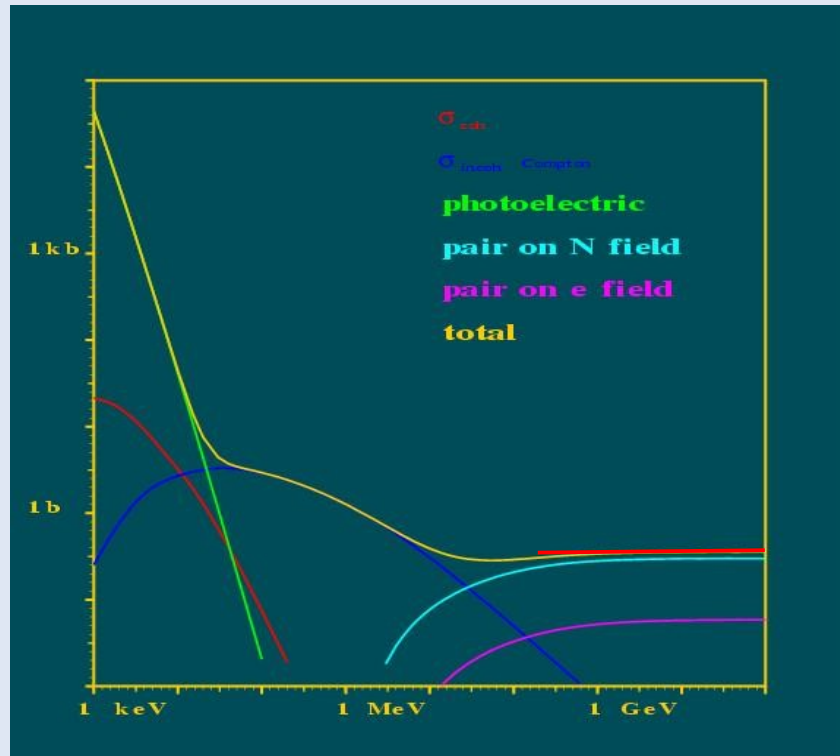


Notion de longueur de radiation X_0 , et de longueur d'interaction λ_{int} :

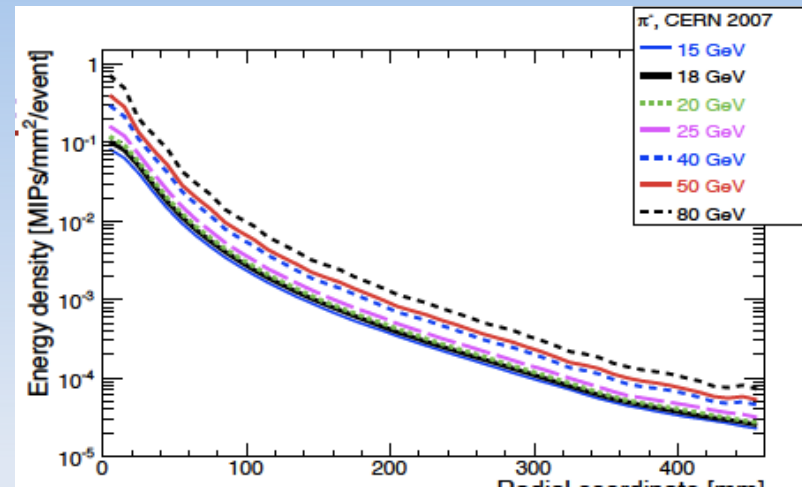
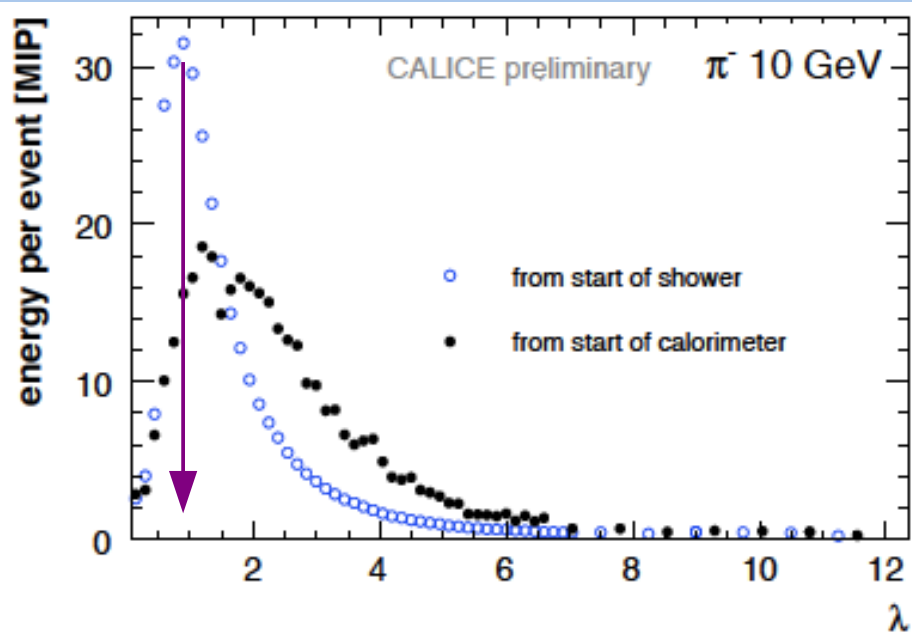
Dans un domaine d'énergie,
la probabilité d'interaction dans un intervalle dx donné
est essentiellement indépendante de l'énergie (loi exponentielle),
on peut donc définir la longueur caractéristique d'interaction

Contribution to the cross section γ Carbon in barns/atom

π^+ p and π^- p cross sections

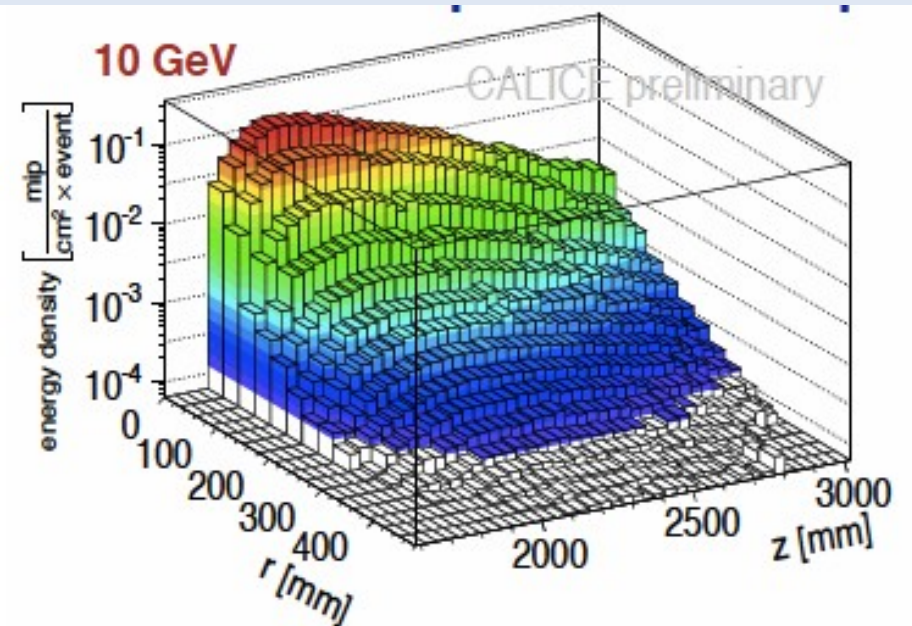


Profil des gerbes hadronique

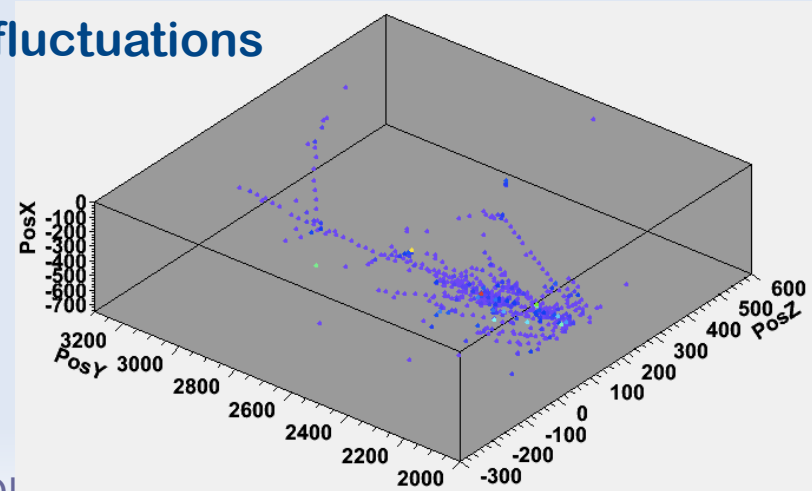


Gerbe Hadronique ~100 GeV à

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



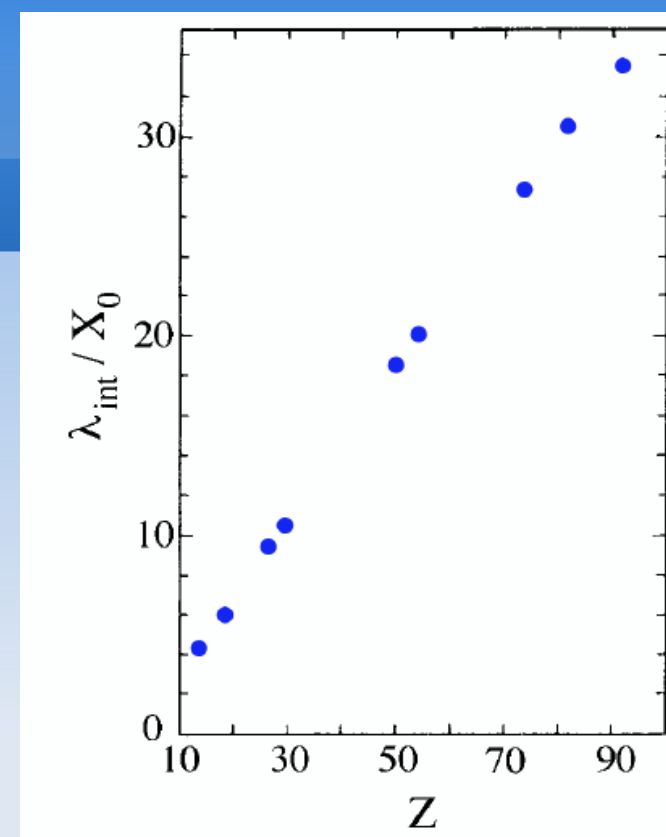
Larges fluctuations



Quelques chiffres

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

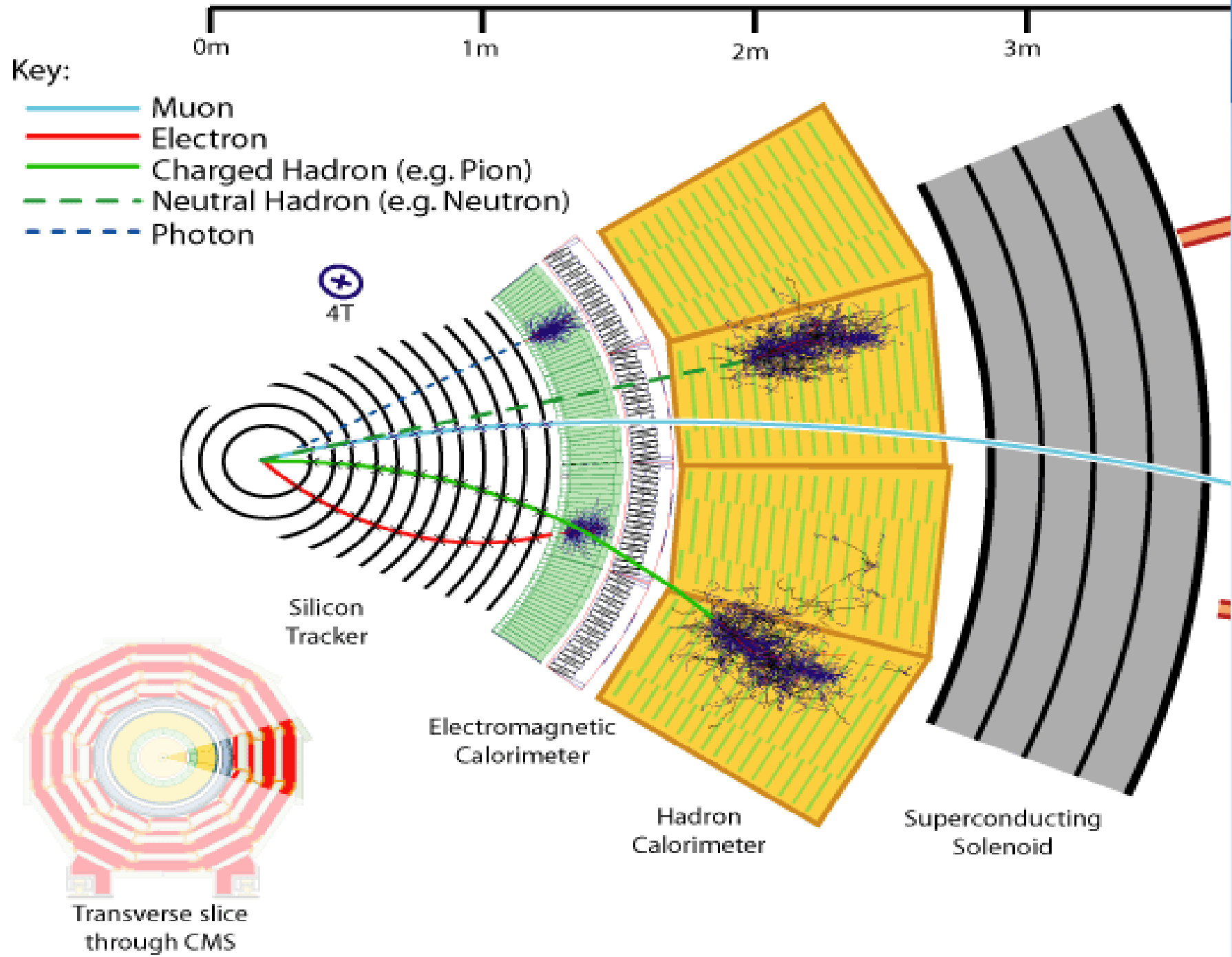
Matériau	Z	A	ρ {g cm ⁻³ }	X ₀ {cm}	λ_{int} {cm}	$\lambda_{\text{int}} / X_0$
Si	14	28	2,33	9,4	46,4	5
Argon liquide	18	40	1,4	14,0	85,5	6,1
Fer	26	56	7,9	1,8	16,7	9,5
Cuivre	29	64	8,9	1,4	15,4	11
Plomb	82	207	11,35	0,56	10,5	19
Uranium	92	238	18,9	0,32	11,1	35
Tungstène	74	184	19,3	0,32	9,9	31

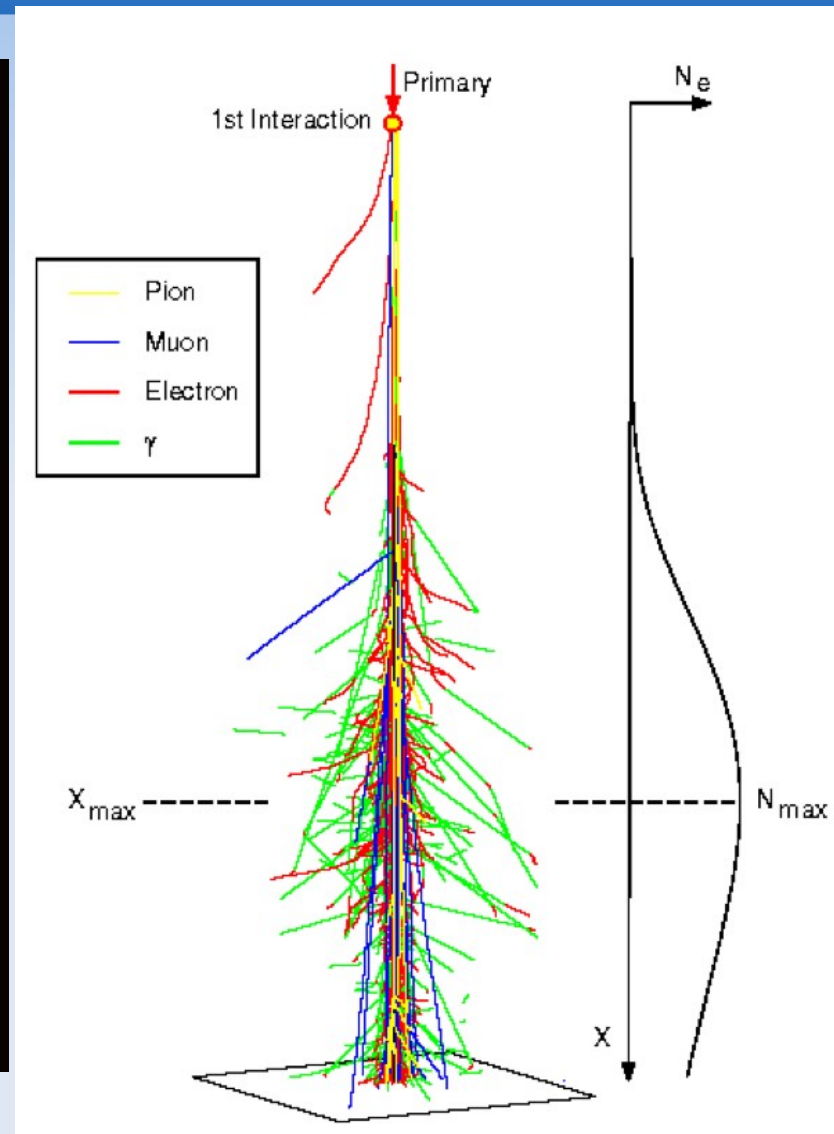
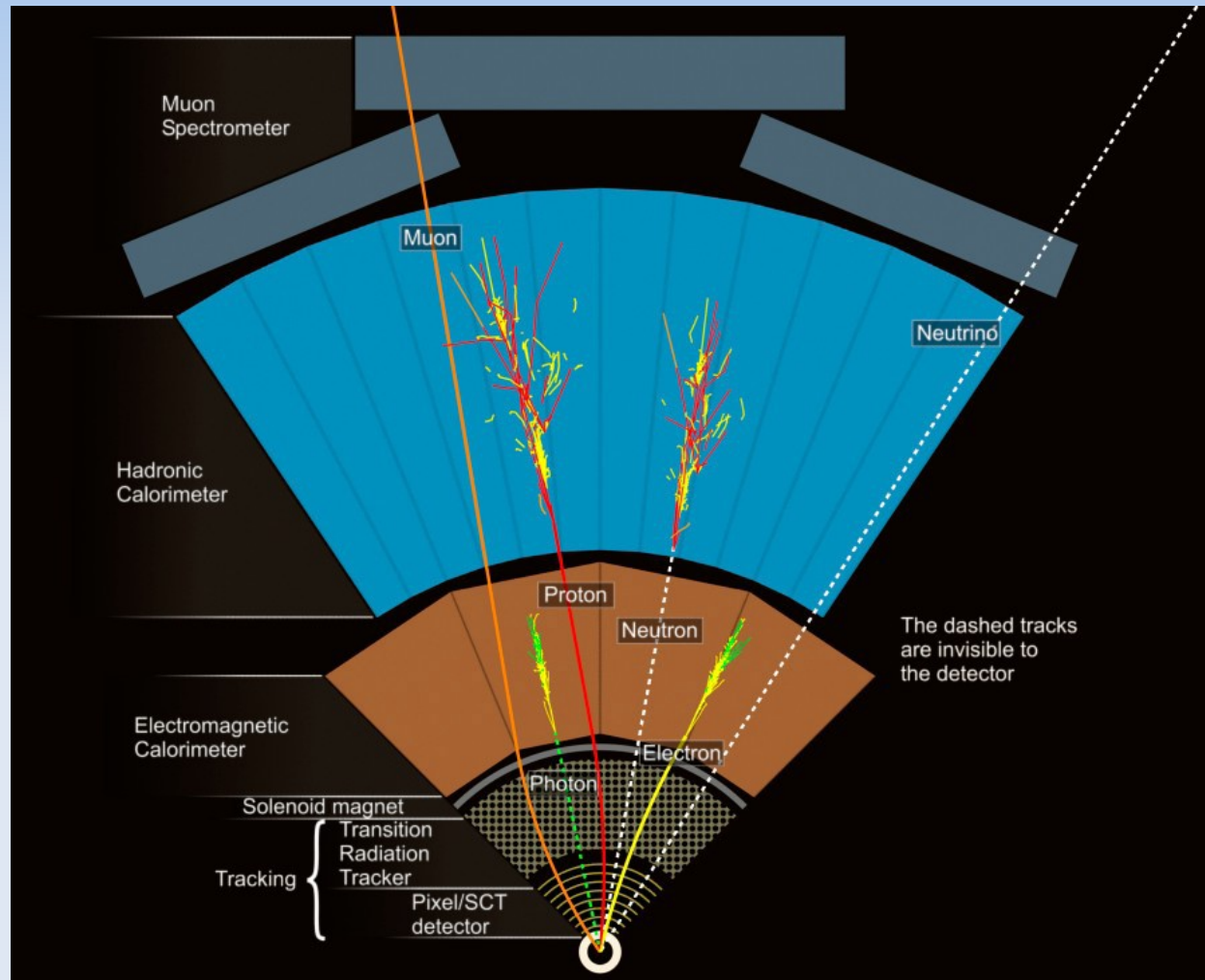


} **Petit λ_{int} &
Meilleure
distinction
e/h**

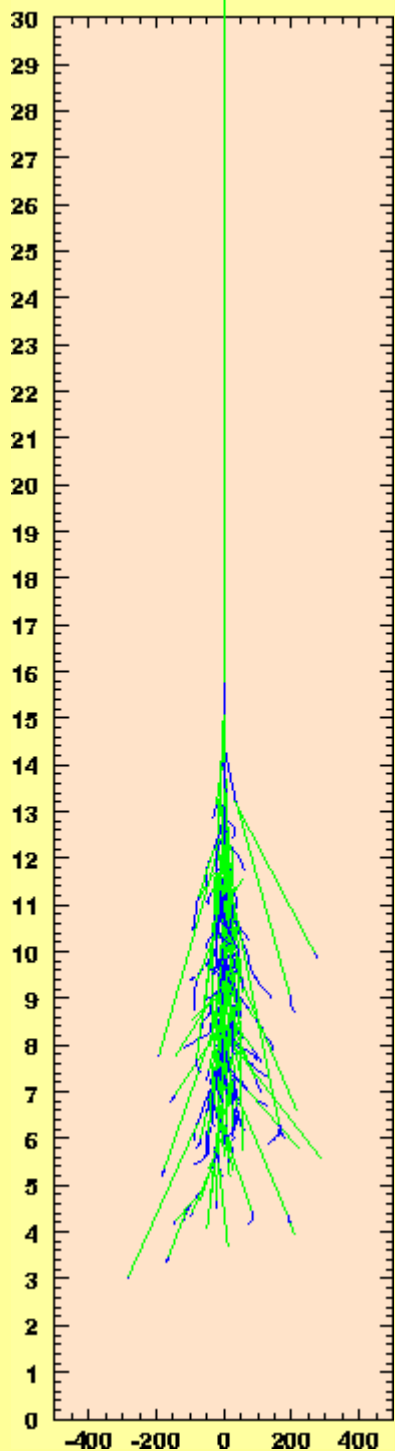
Forte dépendance vs la densités (!)
Large variation de λ_1 / X_0 avec Z

Calo EM (30 X₀) ~ 1 λ_{int}

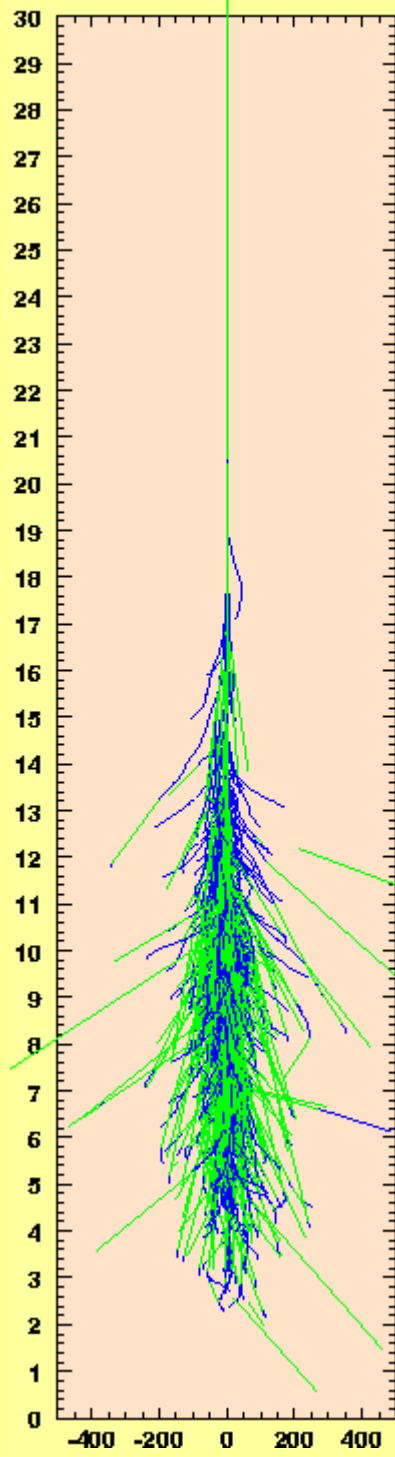




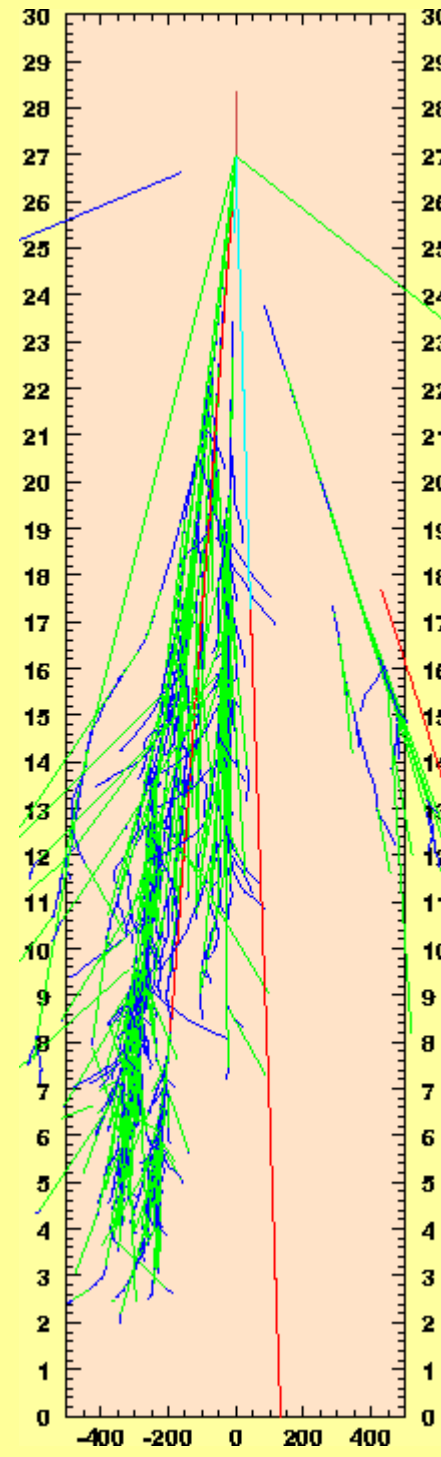
γ 50 GeV



γ 300 GeV



p 300 GeV



By courtesy of Mathieu de Naurois

Pratique

- Base de données

- ▶ **PDG : Particle Data Book**
<http://pdg.web.cern.ch/pdg/>

- ▶ **NIST** : <http://www.nist.gov/pml/data/index.cfm>

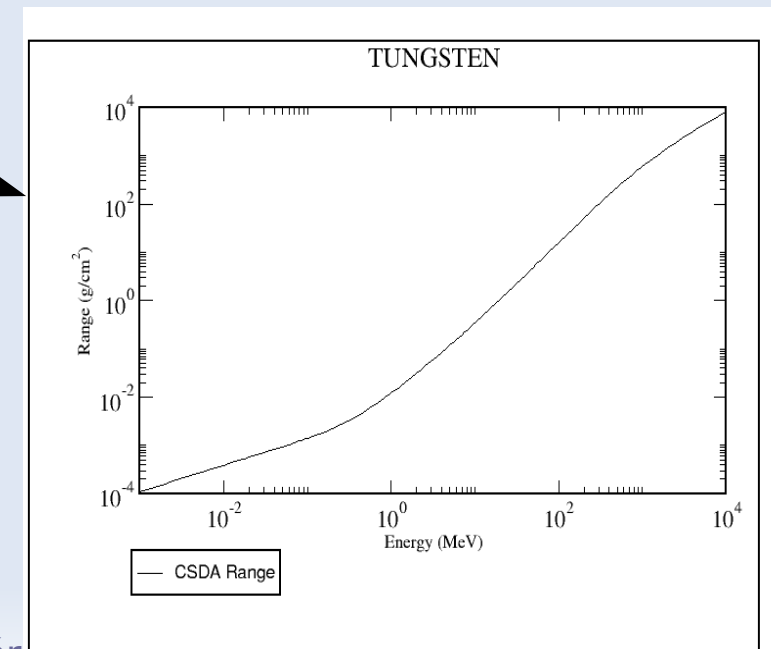
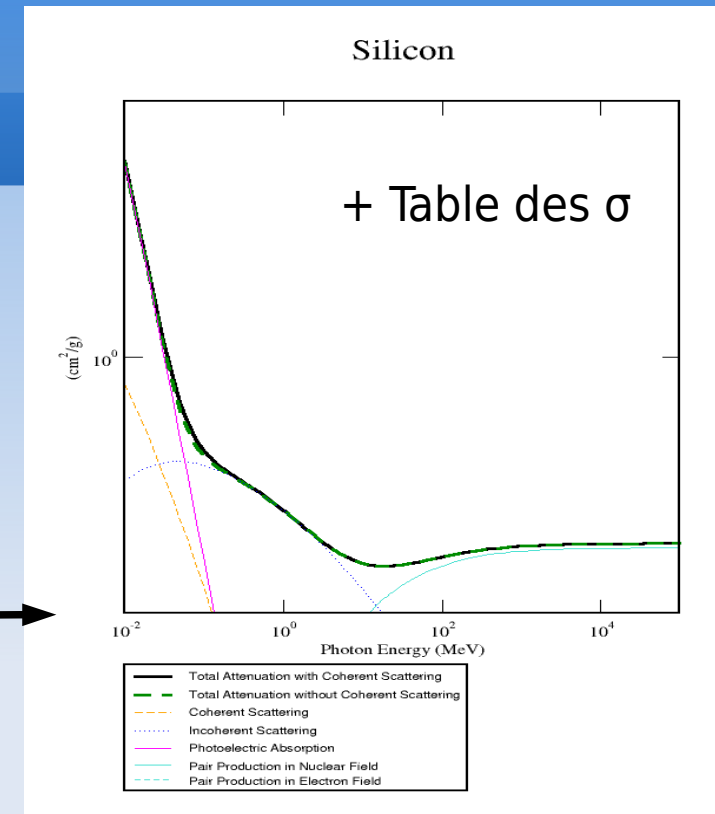
- ◆ **X-COM** : $\sigma_{\gamma}(E)$

- ◆ **Calculs de range**

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

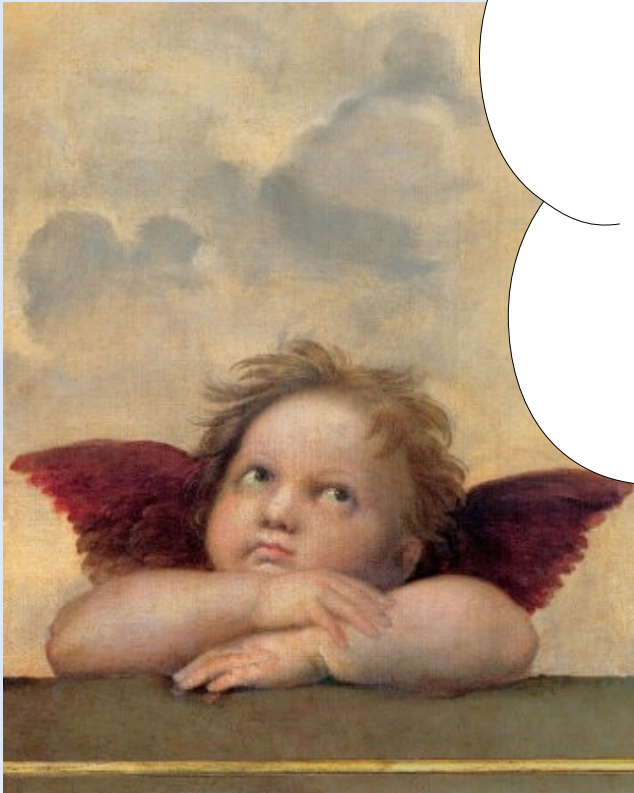
- Nuclear properties

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



L'élaboration d'un calorimètre

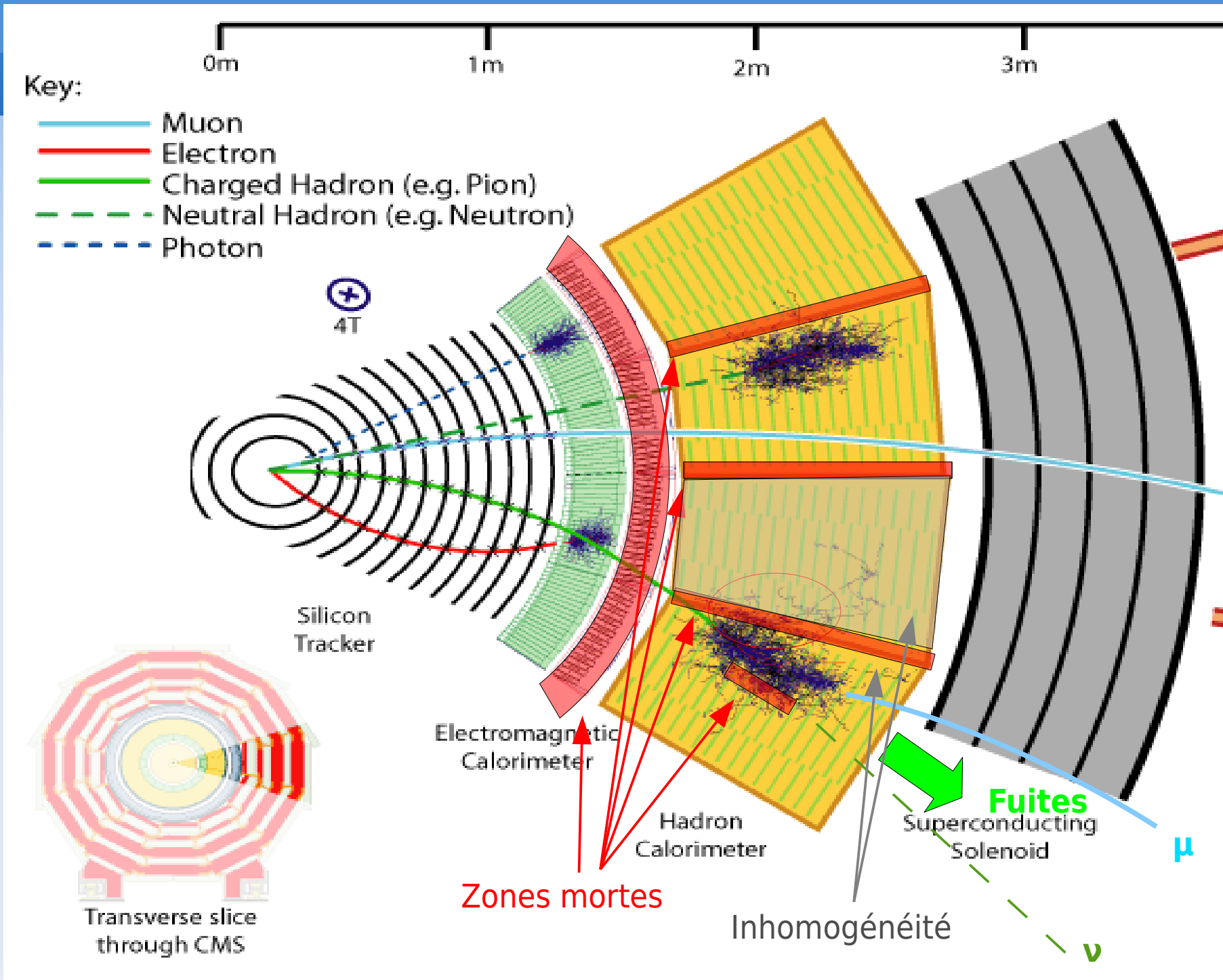
Le détecteur parfait



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

- Rapide
- Homogène
- Stable
- Identification
- Séparation

+ Bon marché...



Les détecteurs réel



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 , fragments)
produits

la Mesure c'est du Comptage

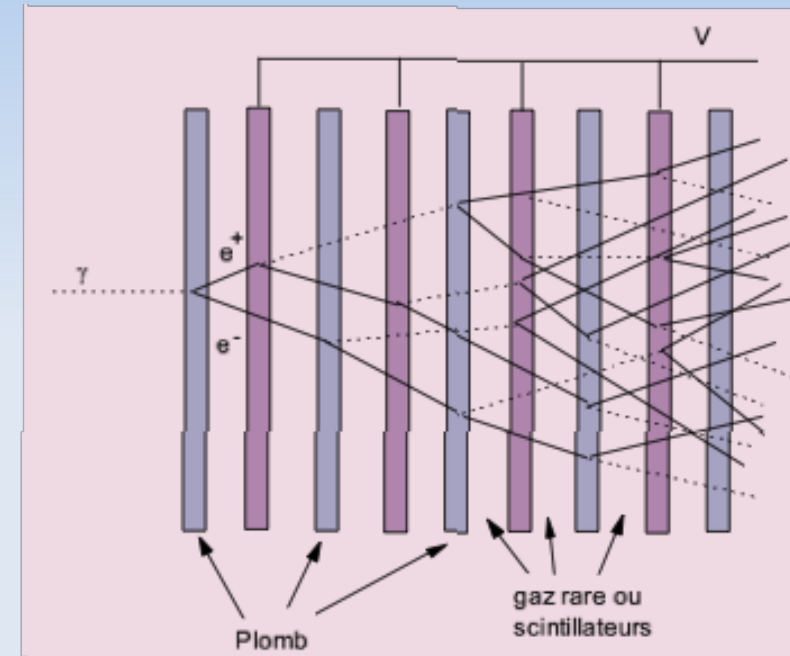
Processus stochastique: $\delta N = \alpha \sqrt{N}$

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}}$$

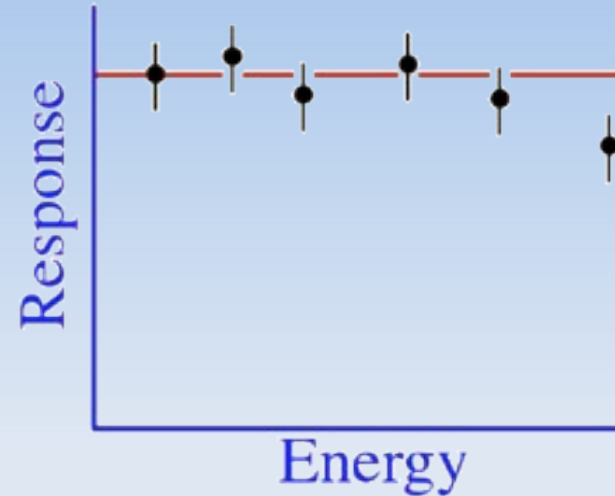
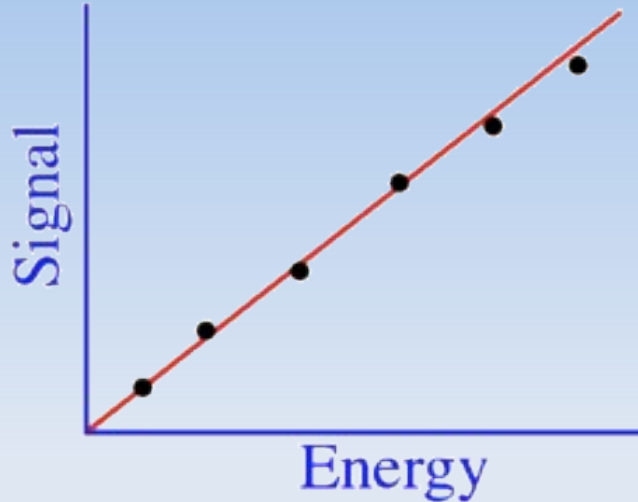
$$\frac{\delta E}{E} = \underbrace{\gamma}_{\downarrow} \oplus \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \frac{\beta}{E}$$

Termes:

- γ intercalibration (inhomogénéité)
- α stochastique
- β bruit

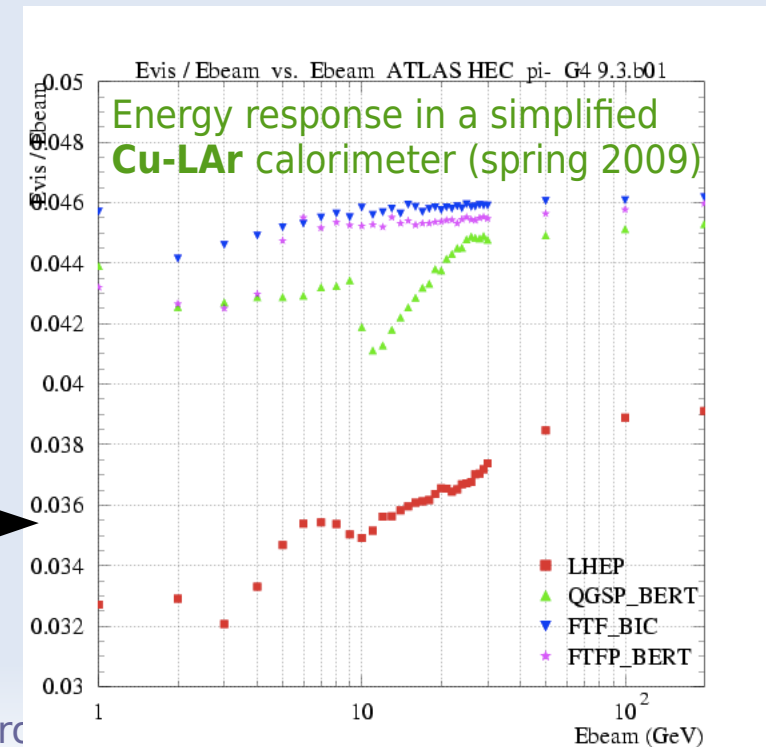


La linéarité

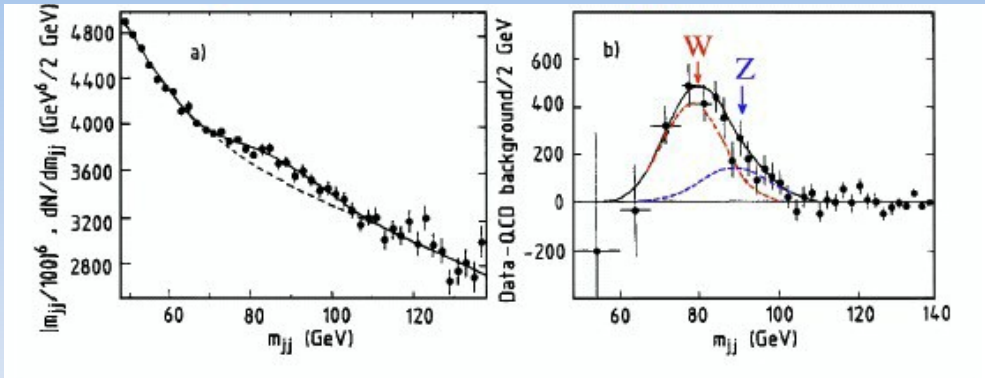


- En général OK pour EM
- Plus difficile pour l'Hadronique
 - ▶ facteur $e/h = f(f_{\pi^0}) = f(E)$
 - ▶ Leakage
 - ◆ Correction par les Monte-Carlo
 - Validités des modèles MC ?

~10%



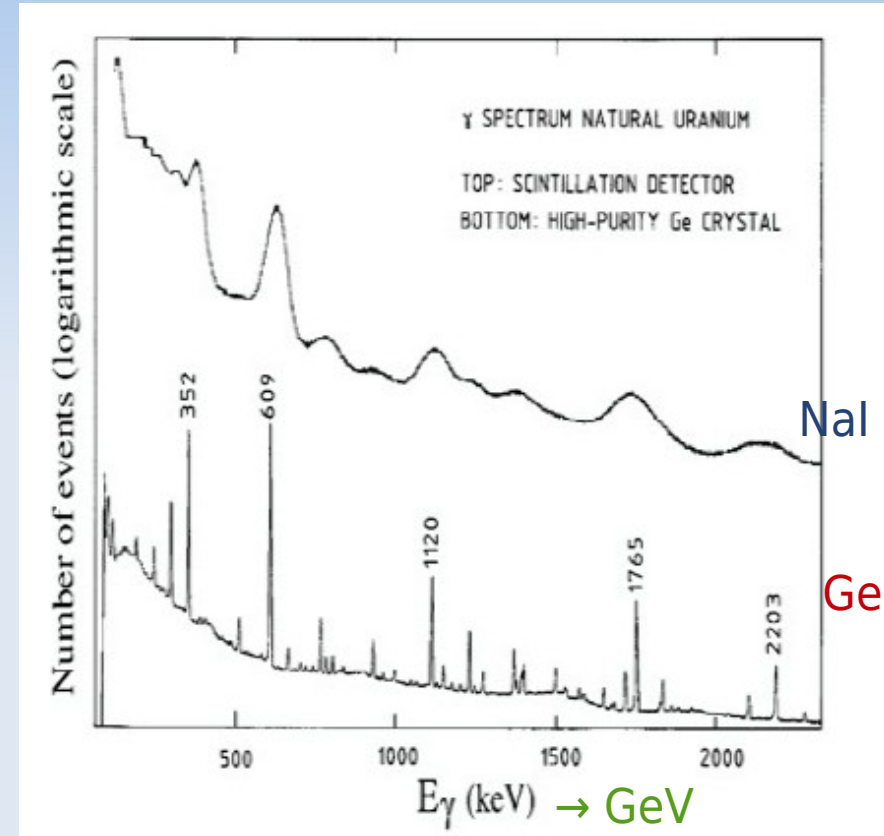
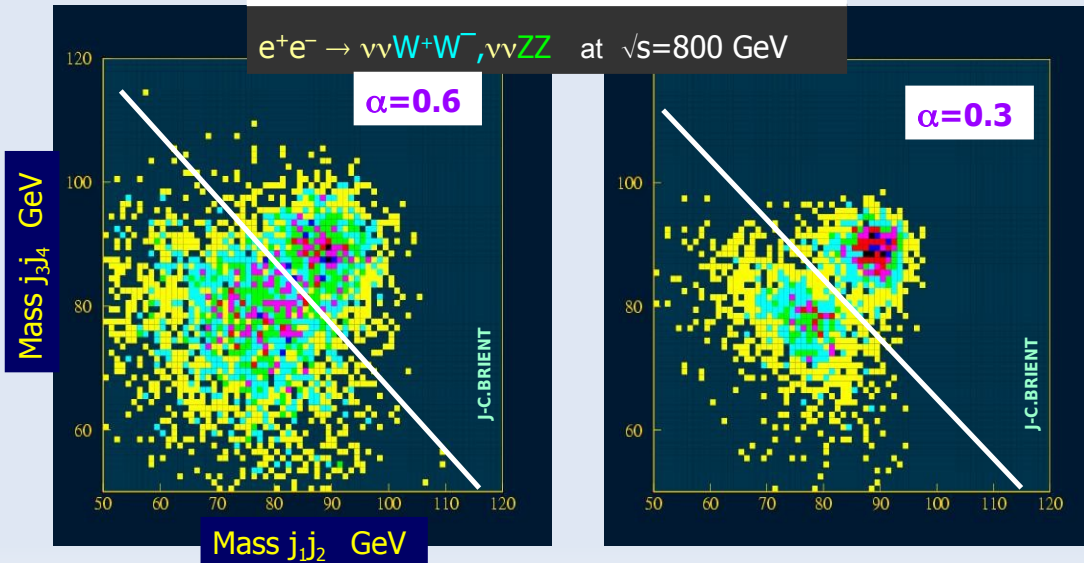
La résolution



Reconstruction de la masse des W & Z⁰
 dans UA2(années 80-90) ↗
 Pour l'ILC (année 2019?) ↘

WW versus ZZ separation

$e^+e^- \rightarrow \nu\nu W^+W^-, \nu\nu ZZ$ at $\sqrt{s}=800$ GeV

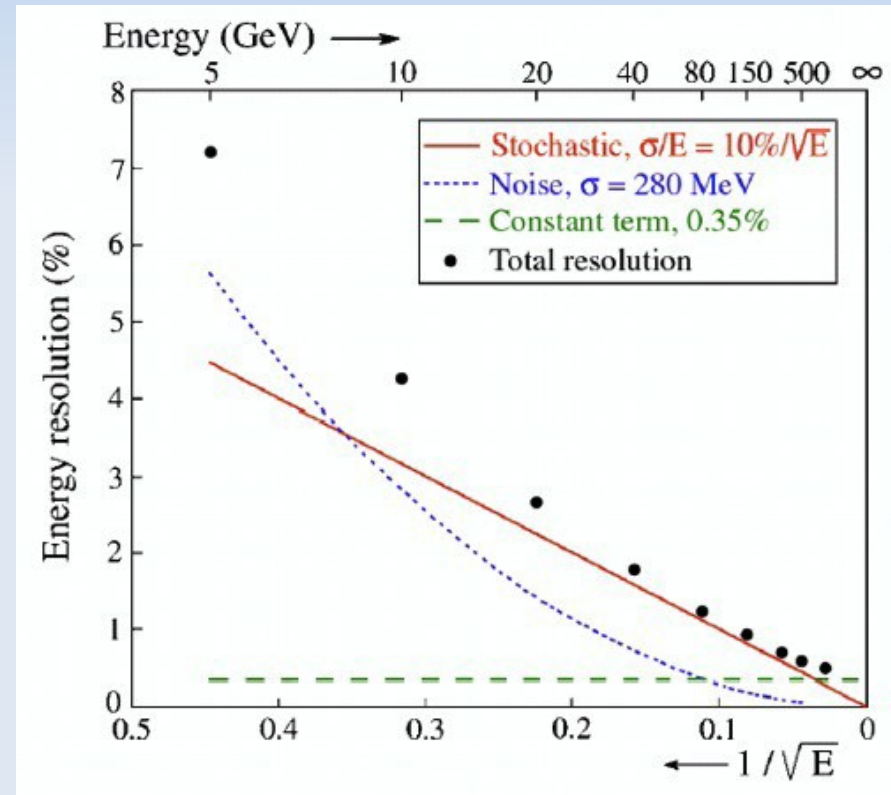
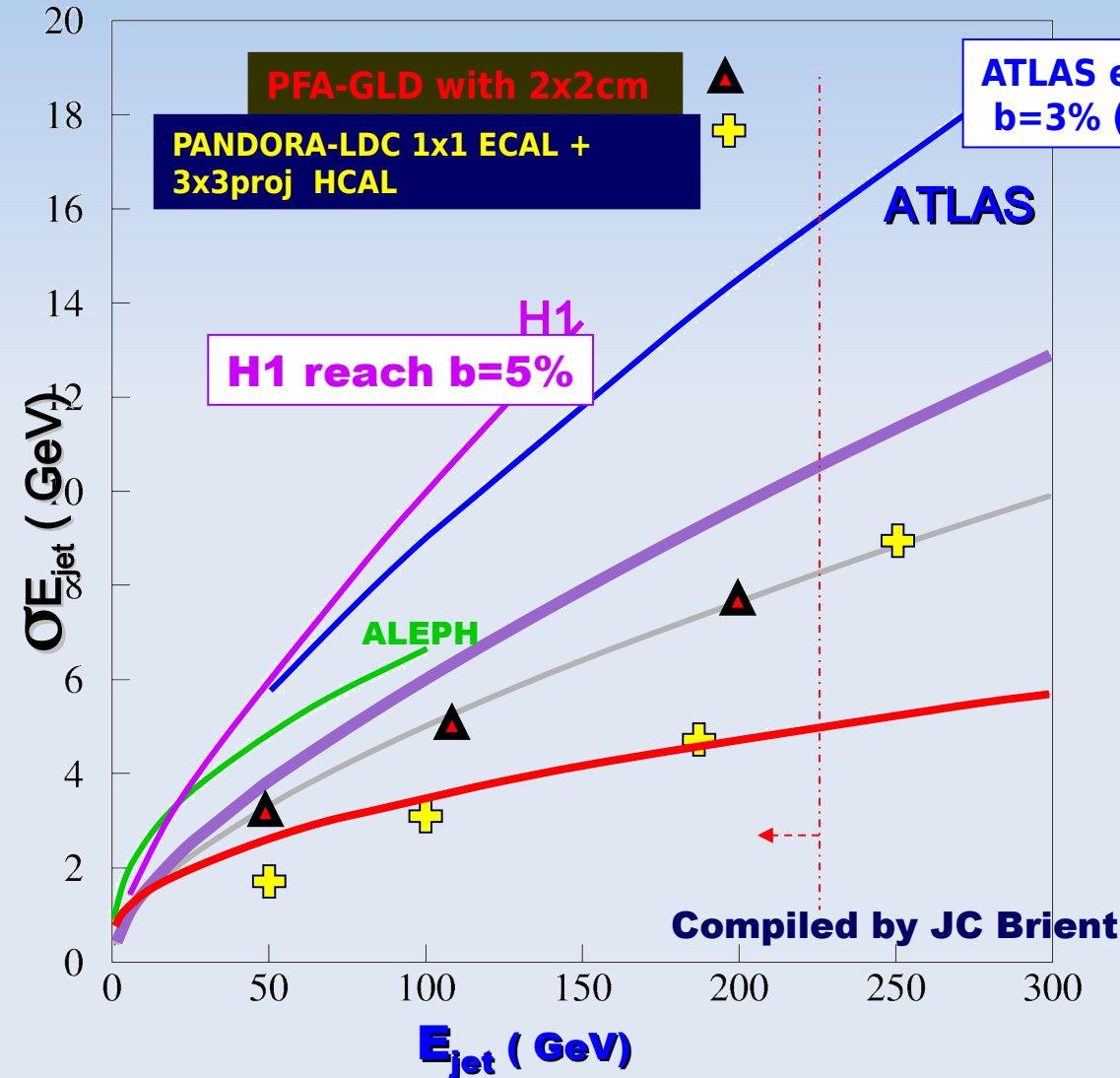


Spectre SUSY dans 5-20 ans ???

⇔ Gain de 40% sur la \mathcal{L}

Résolution : performance

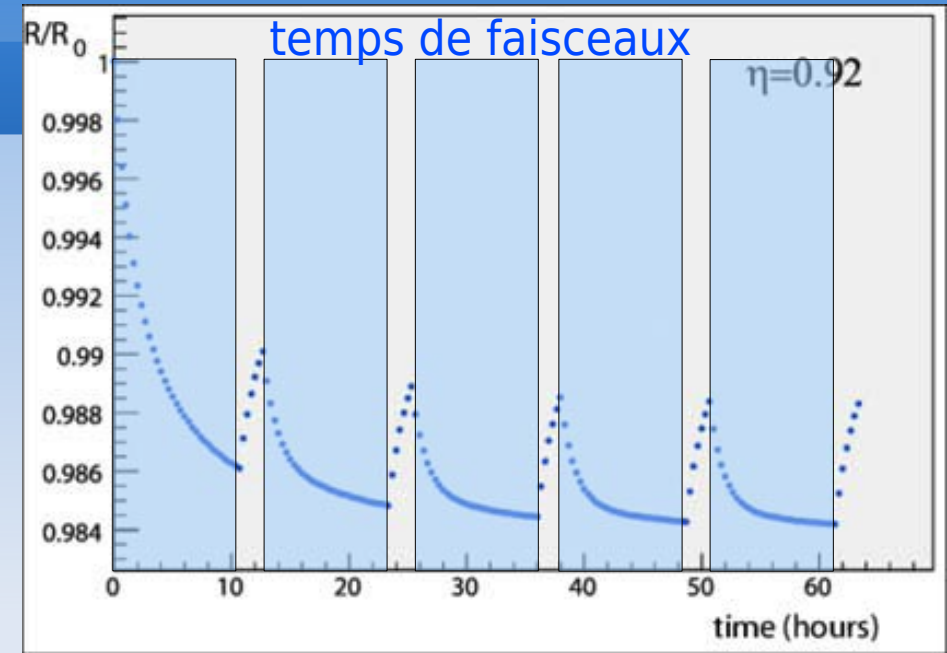
EM : $\sim 10\text{-}20\% / \sqrt{E}$ (GeV)
 Had : $\sim 50\% / \sqrt{E}$ (GeV)
 $\delta \sim 5\%$ (mauvais) —
 $< 1\%$ (bon)



Hautes énergies

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



Réponse des cristaux de PbWO₄ à la radiation

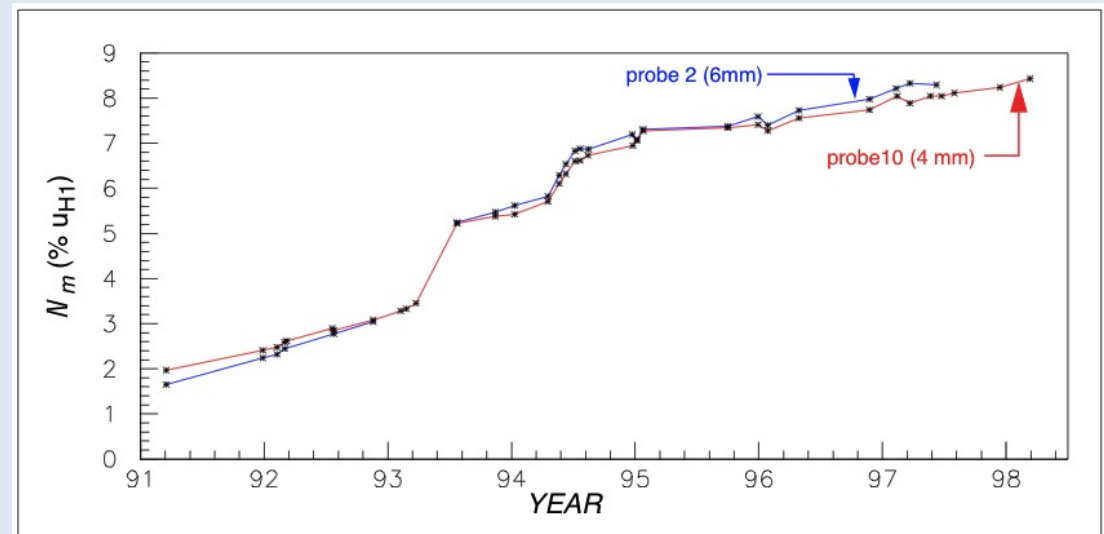


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

Mesures additionnelles d'importance

- Précision en temps
 - ▶ Sync des détecteurs
 - ◆ LHC : $\Delta t = 25 \text{ ns}$
 - ◆ HERA = 96 ns ; ILC $\sim 400 \text{ ns}$;
 - ◆ BaBar $\sim 2.5 \text{ ns}$; CLIC $\sim 2.5 \text{ ns}$ → limite du continu
 - ▶ Réjection du BdF
 - ▶ temps de vol (identification)
 - ▶ Composante neutronique
 - ▶ Physique «exotique»
- En position
 - ▶ Liens traces ↔ dépôts calorimétrique
 - ◆ ⚠ 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

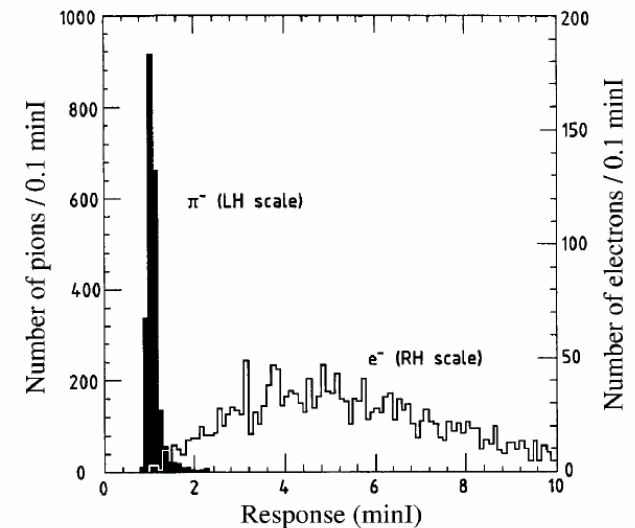


FIG. 7.35. Signal distributions for 75 GeV pions and electrons in a preshower detector used in beam tests of CDF calorimeters.

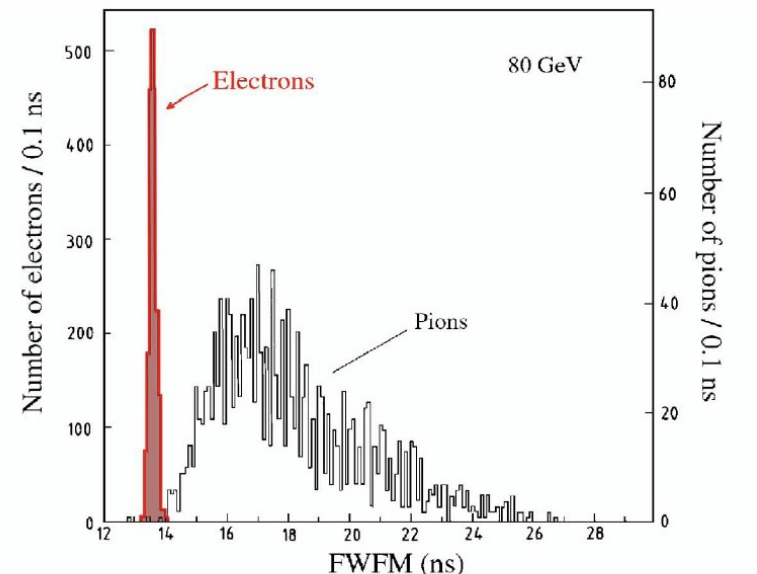


FIG. 7.33. The distribution of the full width at one-fifth maximum (FWFM) for 80 GeV electron and pion signals in SPACAL [Aco 91a].