

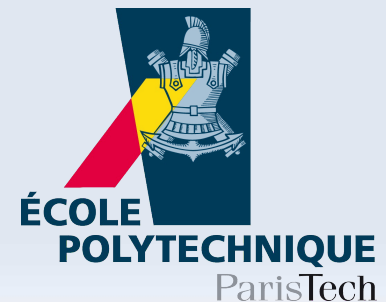
La calorimétrie

Partie I

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



École du détecteur à la mesure
Fréjus, mai 2013



Bonjour... Qui suis-je ?

- 20 ans de H1
 - ▶ Thèse : test des modules du calorimètre Fe-Ar liquide (+ la recherche de lepto-quarks)
 - ▶ Le calorimètre arrière «SpaCal» (+ des «petits x »)
 - ▶ 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 ; technique de reconstruction.
- Enseignement Travaux Expérimentaux & M1 à Polytechnique
 - ▶ NaI + PM...

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
- ▶ Effets annexes, et considérations «pour ingénieurs»

■ La pratique et le futur...

- ▶ Quelques ruses...
- ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout & le particle flow.

Mercredi

Jeudi

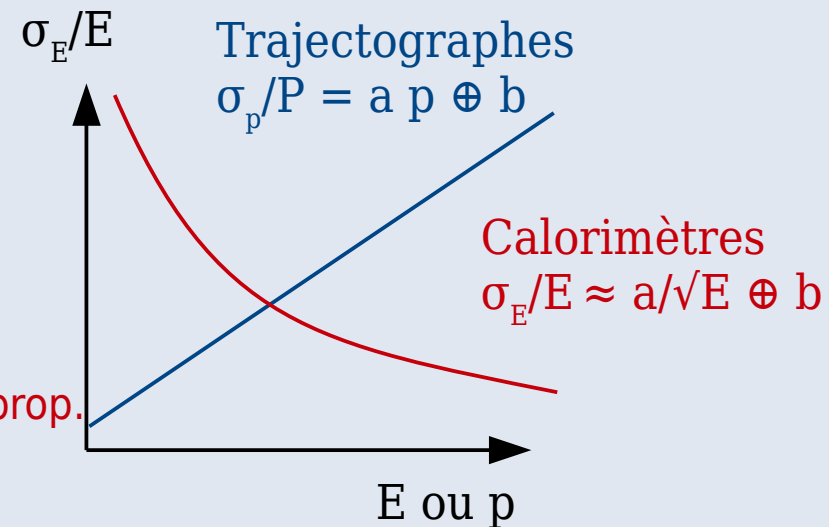
Vendredi

Introduction

La calorimétrie

Retour aux origines....

- 1903 : P. Curie & A. Laborde : vrai calorimètre. 1ère mesure : 1930 (e- du ^{207}Bi)
- 1949 : Cristaux NaI + photo-multiplicateur :
 - ▶ spectroscopie γ pour le nucléaire.
 - ▶ Bon marché, stable, «pas mauvais» (\leftrightarrow batterie au Pb pour les voitures)
- Système plus complexe apparus peu à peu
 - ▶ 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



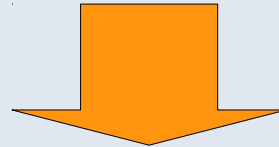
But de la calorimétrie

- Mesure de l'énergie de particules par arrêt (\perp philosophie trajectographes)
 - ▶ «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 le 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

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

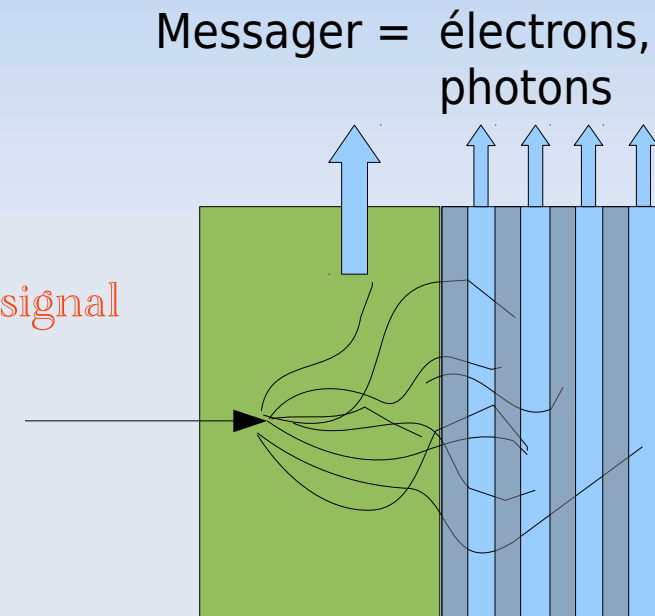
Besoin d'une amplification
physique du signal d'ionisation



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.
- Puis mesure des traces chargées \leftarrow les seules laissant un signal
- $E_{total} \propto \sum l_{traces} \propto$ Nombre de messagers
- 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**

Les interactions dans un bloc de matière

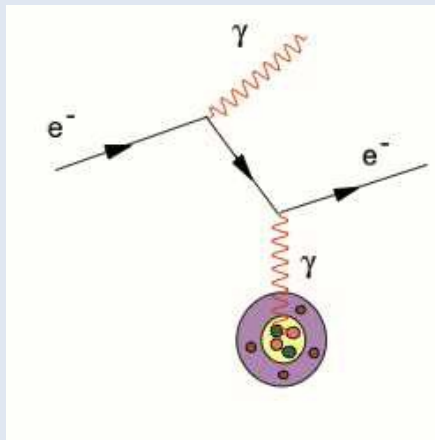
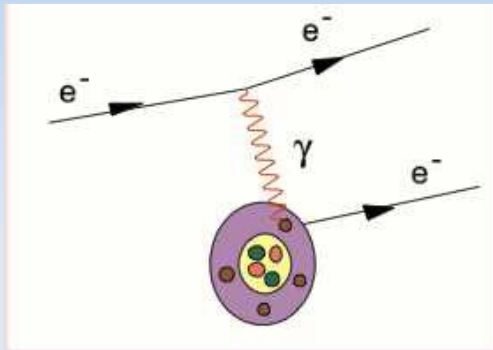
Glossaire

- 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

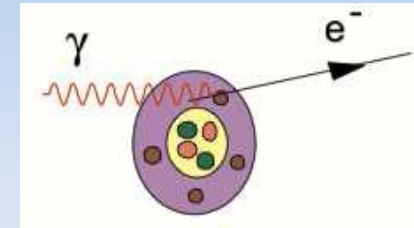
Ionisation



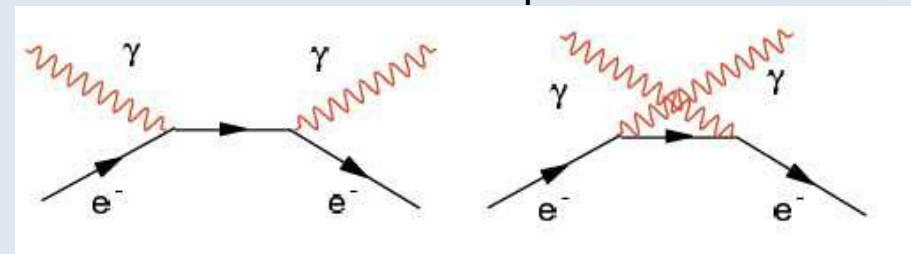
Rayonnement de freinage

Photons

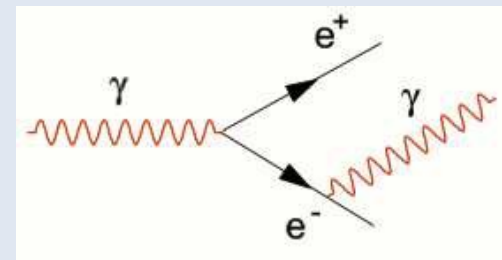
Effet photo électrique



Effet compton

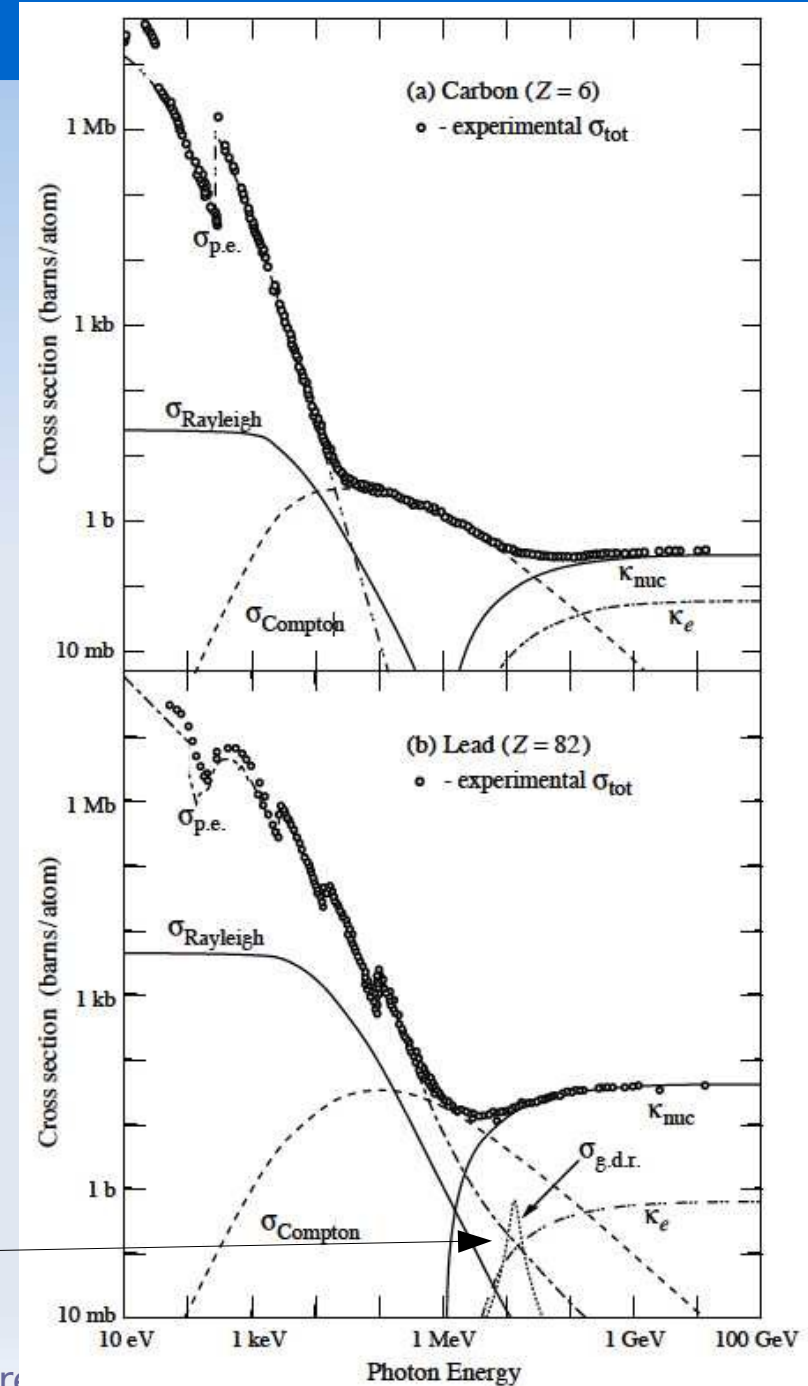


Création de paire



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

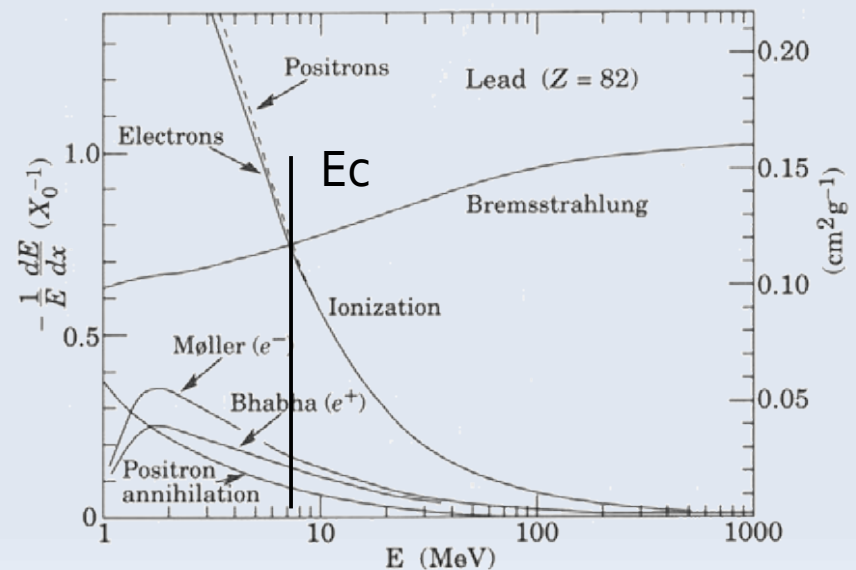
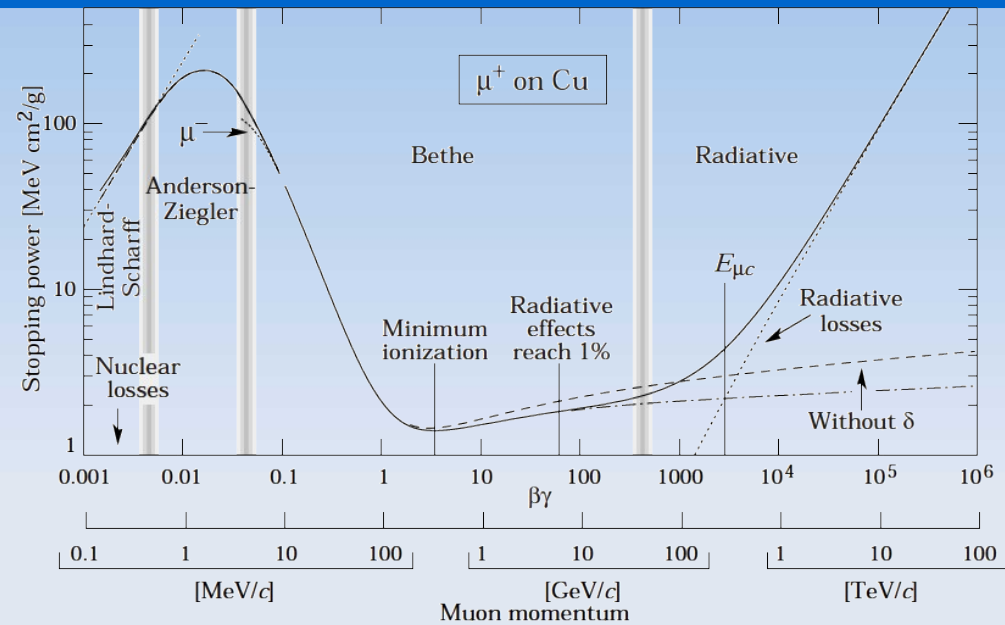
- ▶ Pertes graduelles par Ionisation
 - ◆ Par bremsstrahlung à haute énergie
- ▶ Pour les particules lourds (*tout sauf e±*)

Équation de Bethe-Bloch qq %

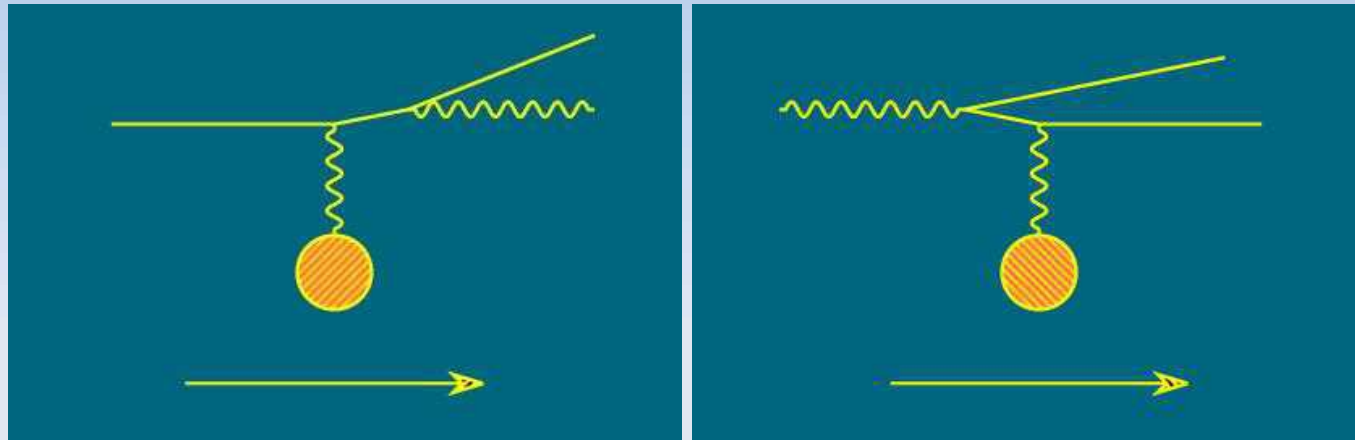
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

■ Électrons/Positrons

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



Principaux processus électromagnétique



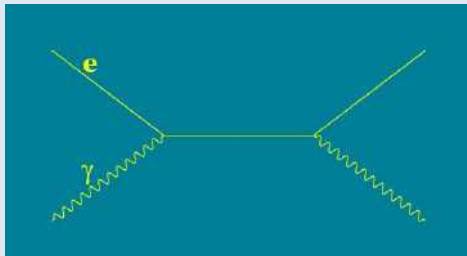
Bremsstrahlung

Création de paires

Mais aussi

A basse énergie ($< 2 \text{ GeV}$)

Compton

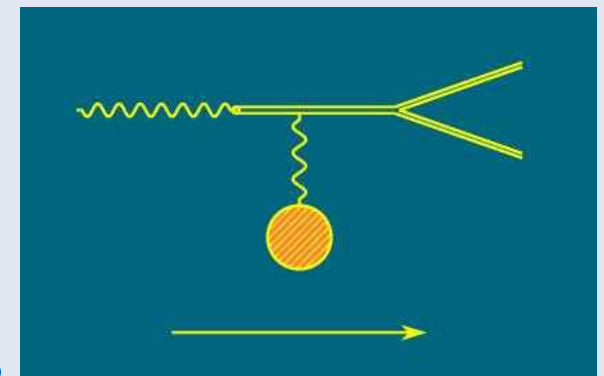


Effet photoélectrique

Vincent.Boudry@in2p3.fr

A haute énergie
au niveau de 10^{-4}

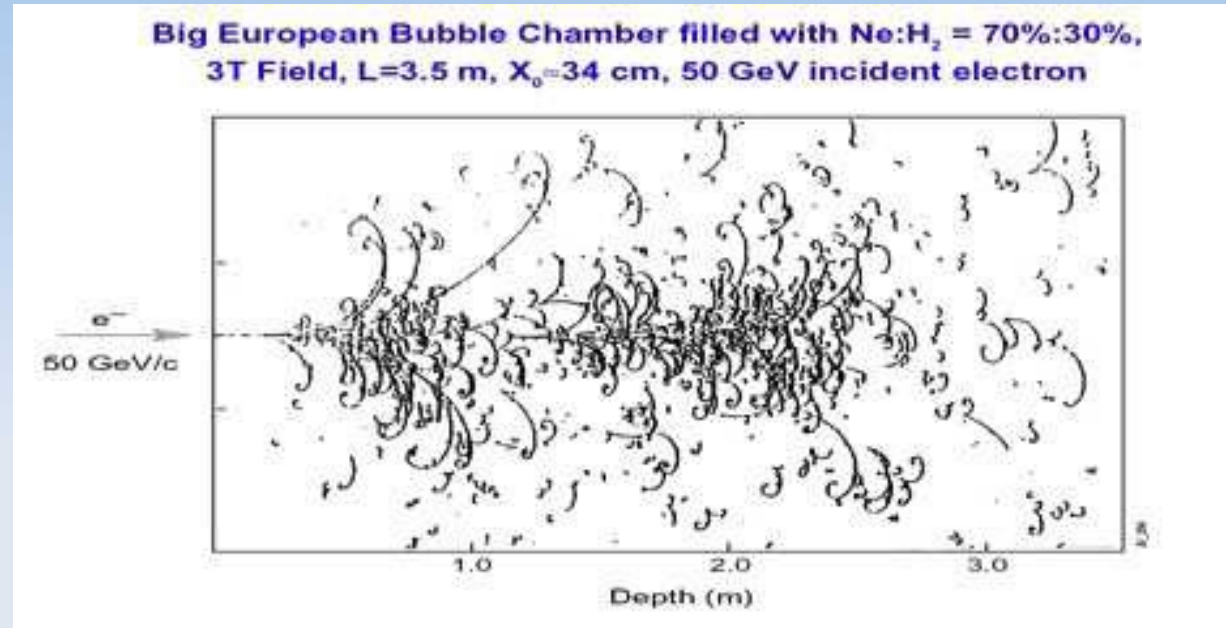
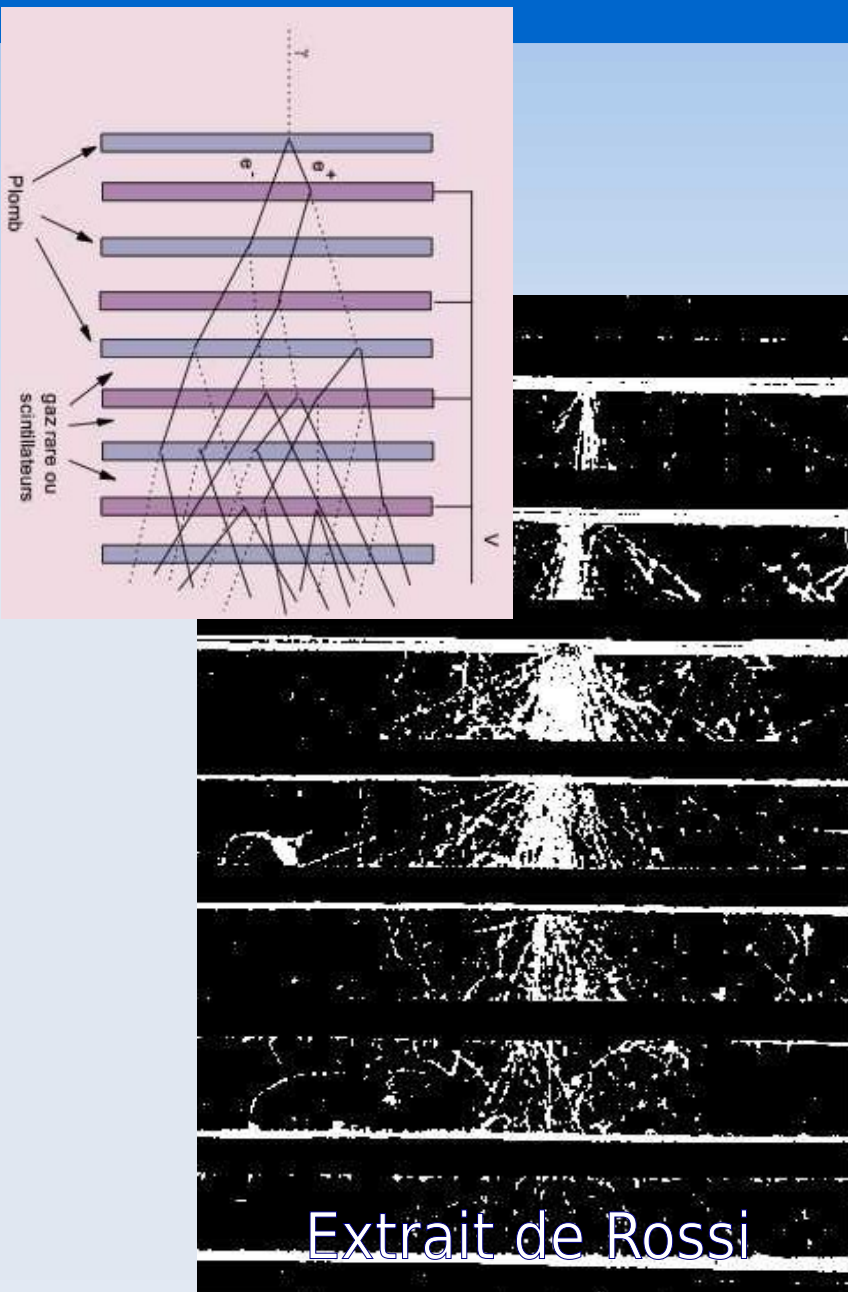
Création
de paires de muons
de paires de pions



La calorimétrie – Fréjus 2013

14/45

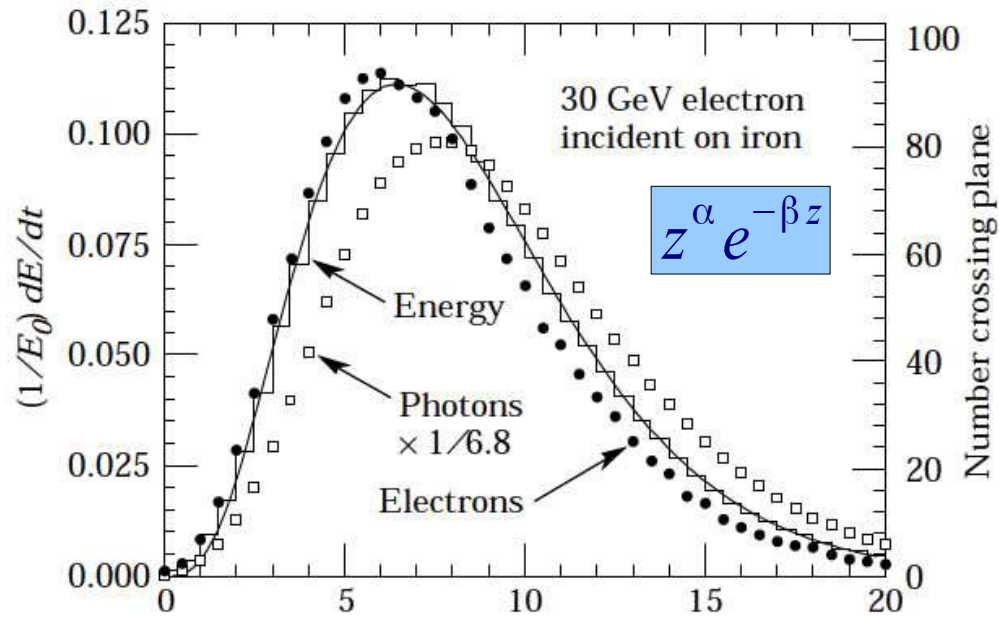
Gerbes électromagnétiques



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

Extrait de Rossi

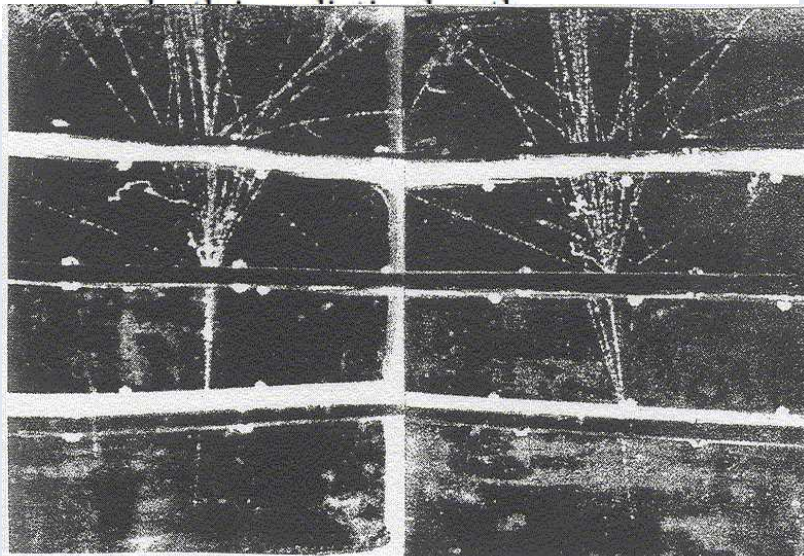
Profils longitudinal ; Longueur de radiation X_0



$1 X_0 =$

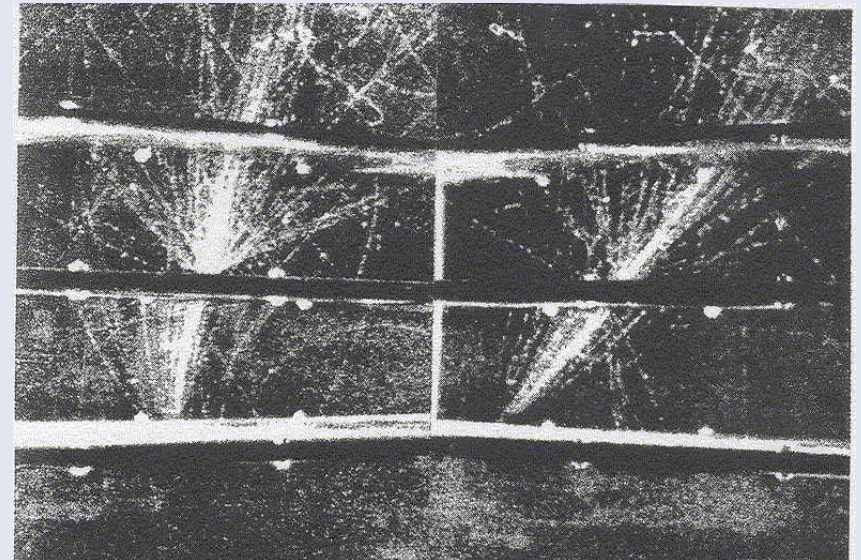
- épaisseur pour qu'un e^\pm perde les $2/3$ ($1-1/e$) de son énergie
- $7/9$ de la longueur moyenne de production d'une paire e^+e^-

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

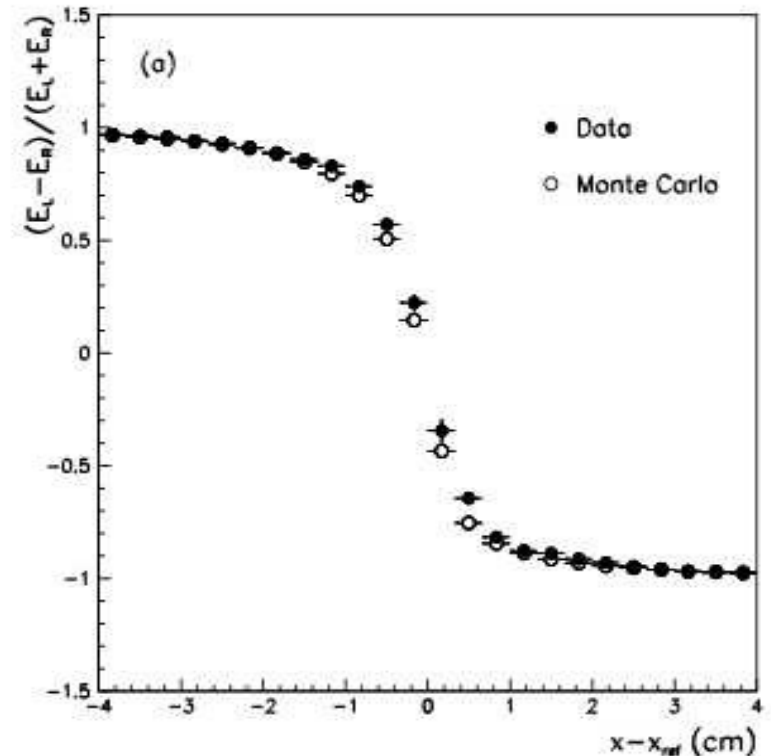
- 1 cœur compact
- 1 halo diffus (Comptons)

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

GEANT shower
(PbWO₄ crystal)



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

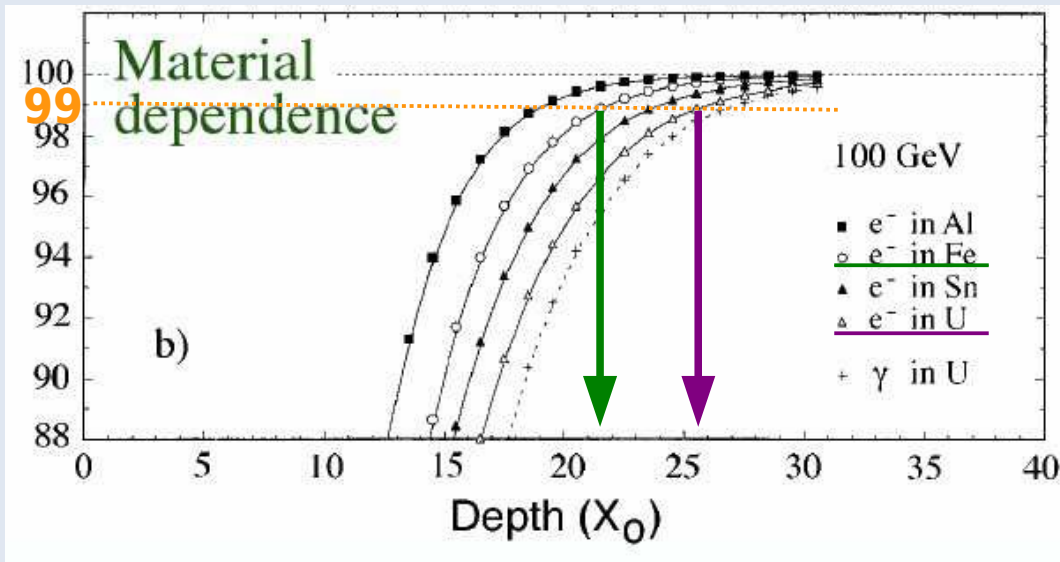
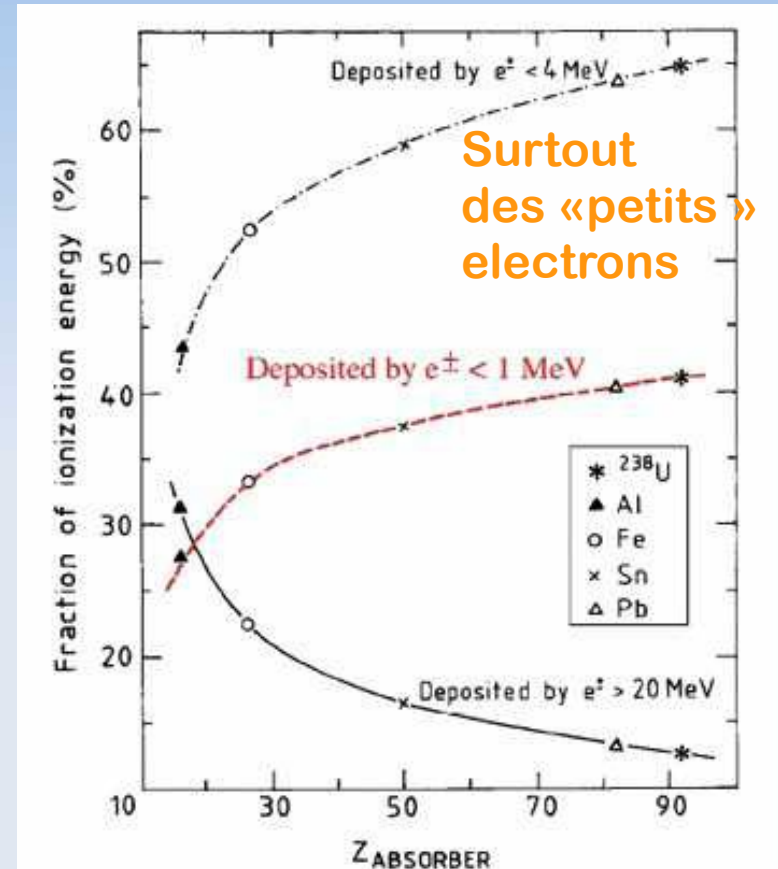
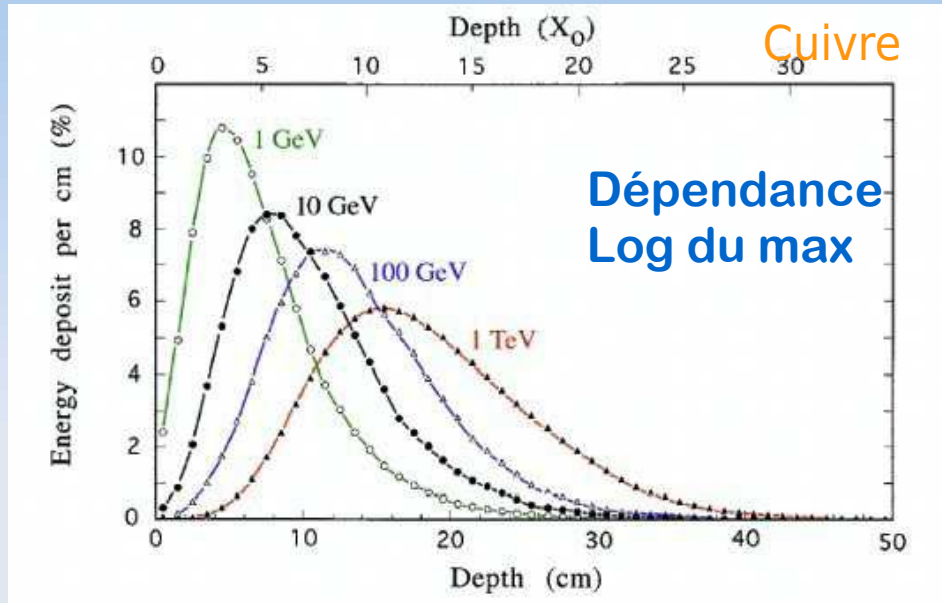


Rayon de Molière (R_M)

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



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

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		

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

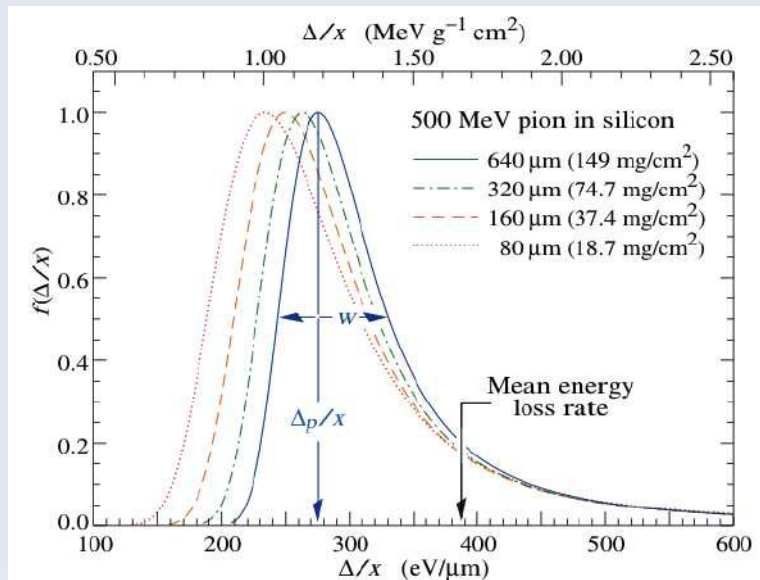
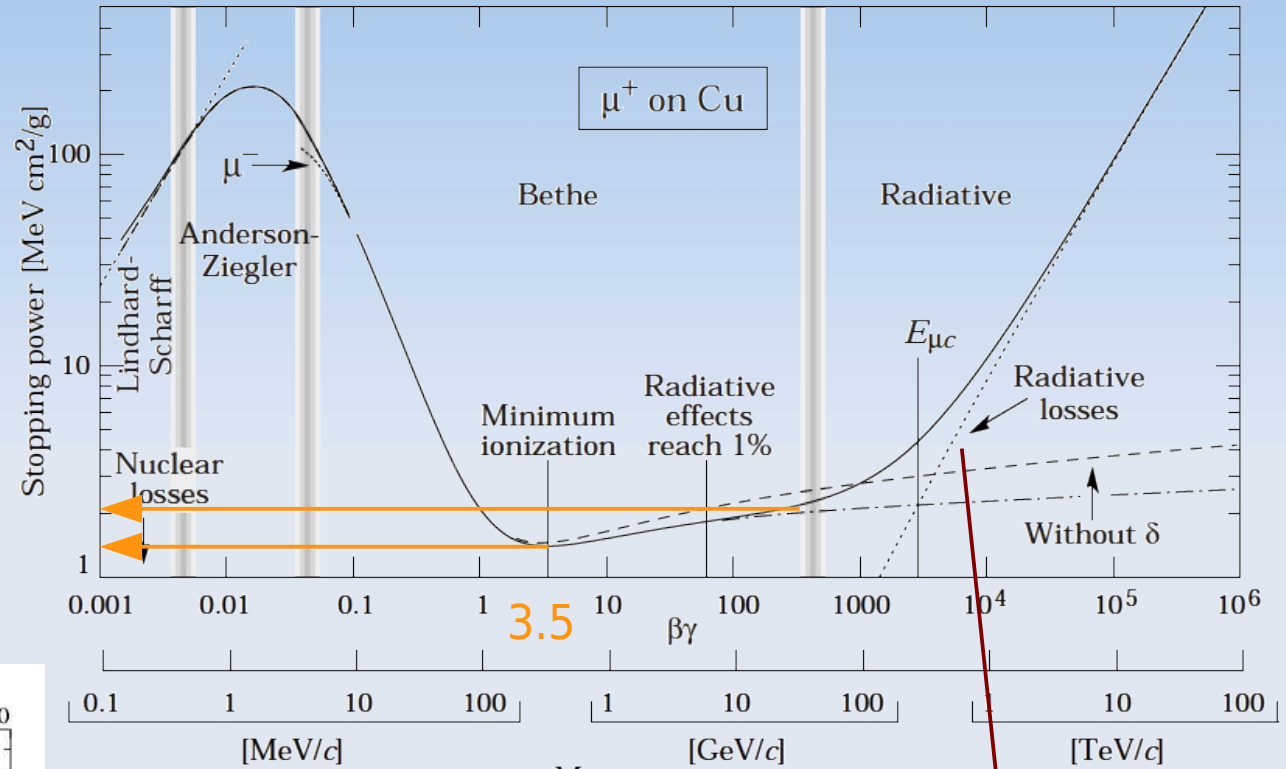
$$\frac{1}{R_M} = \frac{1}{E_s} \sum \frac{w_j E_{cj}}{X_j}$$

Les muons

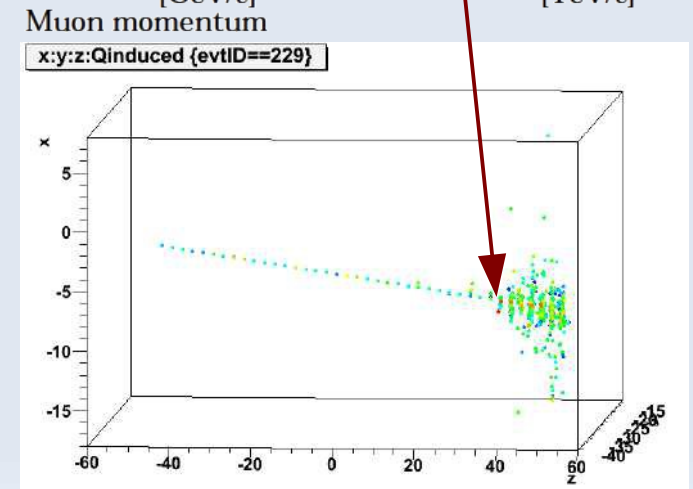
■ Comme dans les trackers

▶ dE/dX

▶ Landau



μ de 10 GeV



Les interactions hadroniques

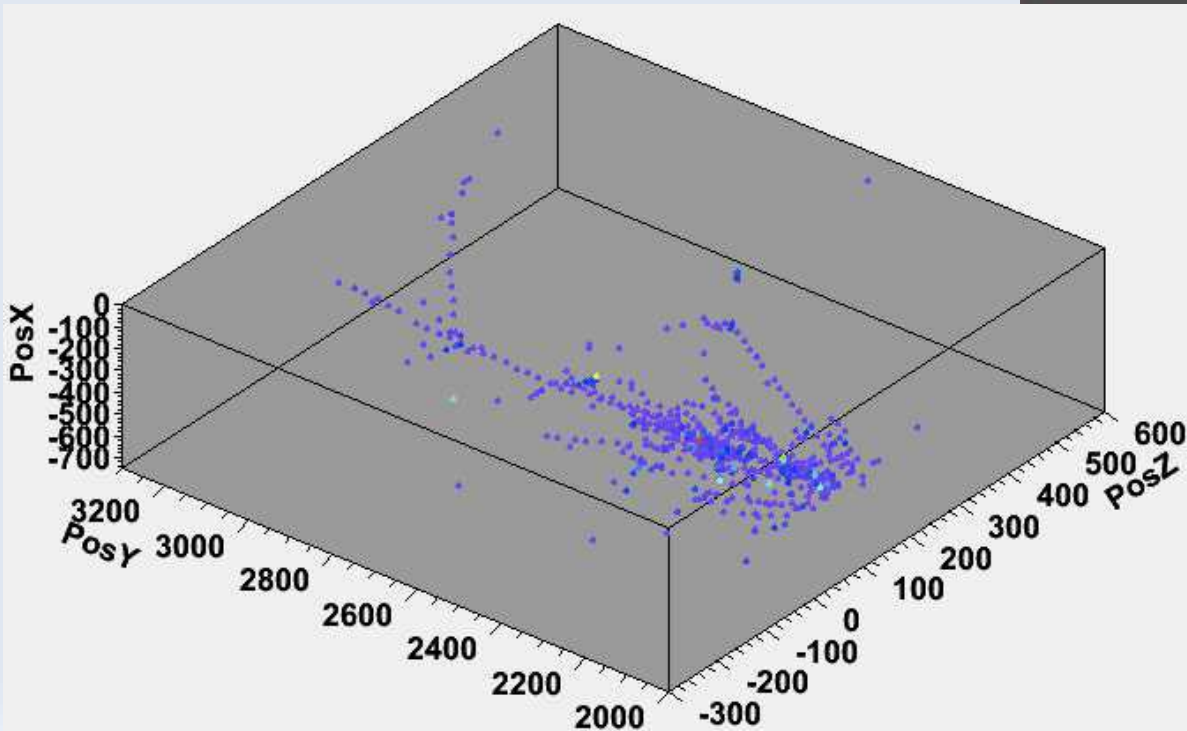
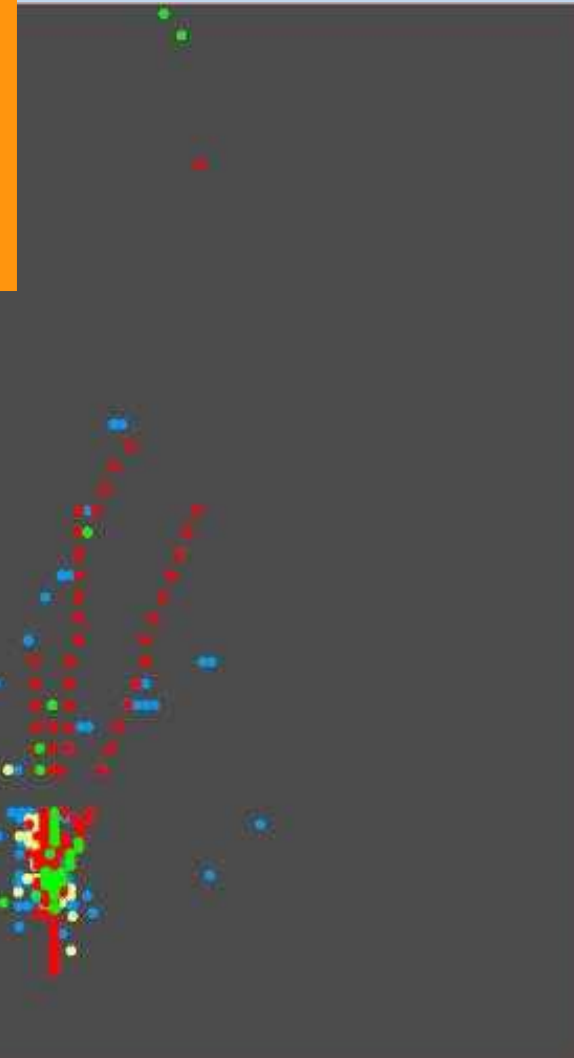
- Matière hadronique (\equiv lourds \leftrightarrow leptons \equiv légers)
 - ▶ Baryons : constitués de 3 quarks
 - ◆ p, n, Δ^{++}, \dots
 - ▶ Mésons : constitués de 1 quark-1 anti-quark
 - ◆ $\pi^{\pm,0}, K^{\pm}, K^0_{L,S}$
- Chargés / neutres \rightarrow interaction EM et faibles
- + interactions hadroniques
 - ▶ Collisions dures
 - ▶ Collision quasi-élastiques
 - ◆ échange de charge (ex : $K^0_L + p \rightarrow K^+ + n$)
 - ▶ Diffusion multiple
 - ▶ Désintégrations

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)

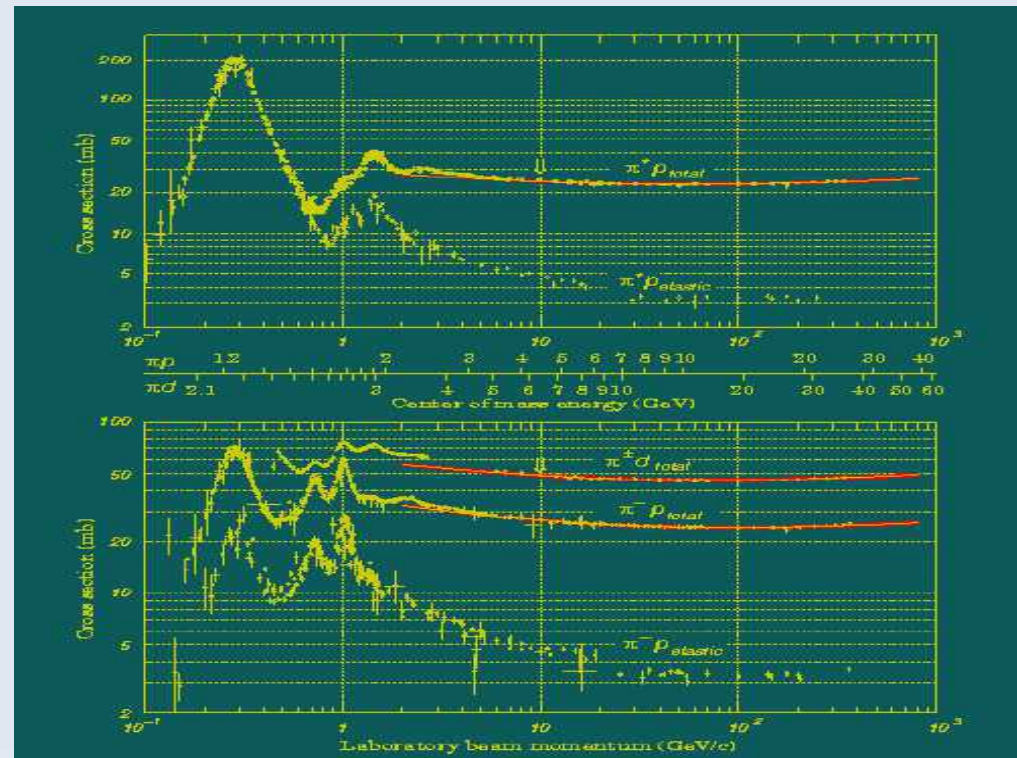
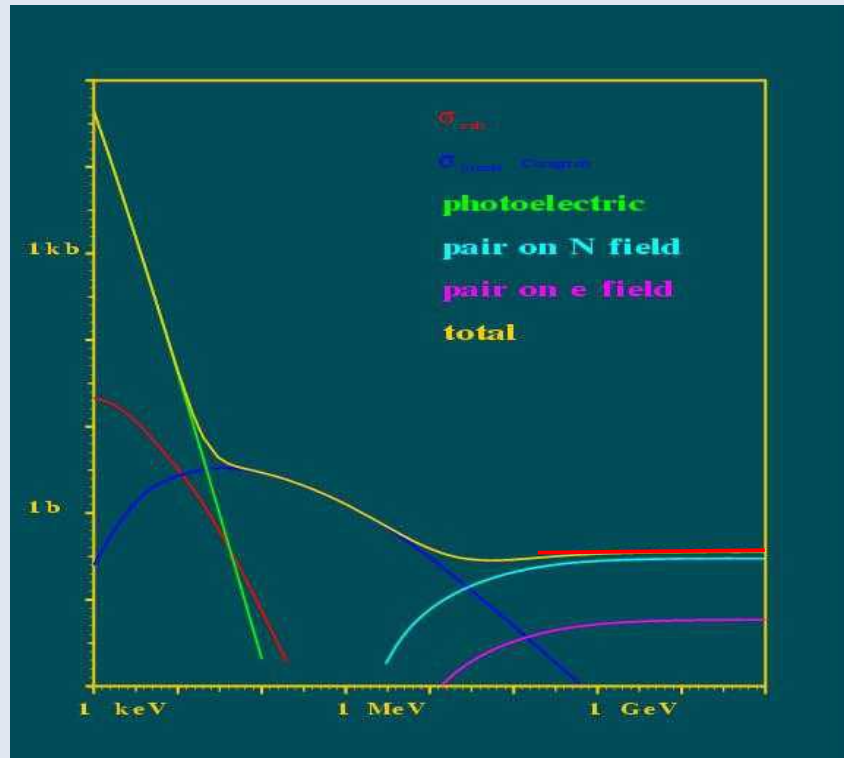


Longueur de radiation λ_0 , Longueur d'interaction λ_{int} :

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

π^+ p and π^- p cross sections



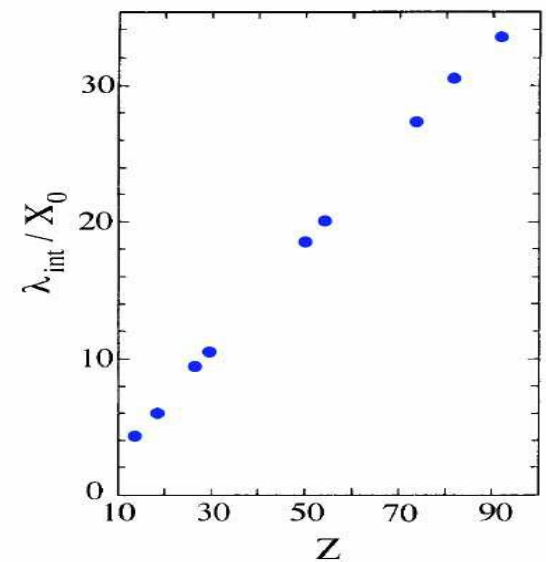
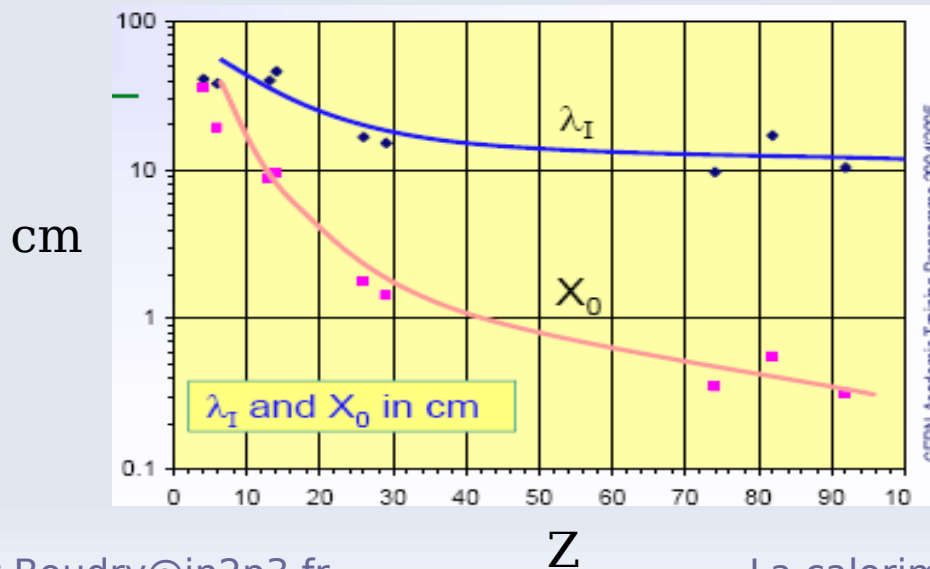
Quelques chiffres

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

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 X_0) $\sim 1 \lambda_{\text{int}}$

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>

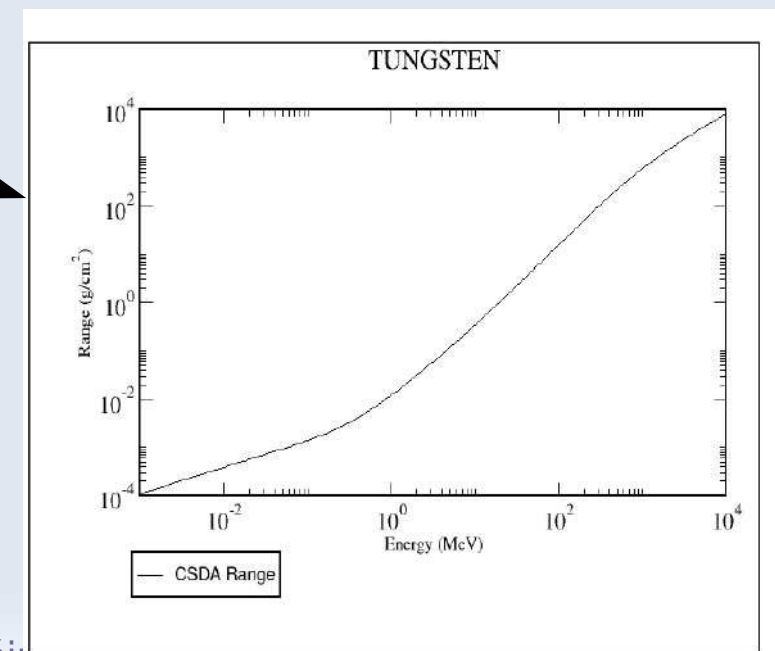
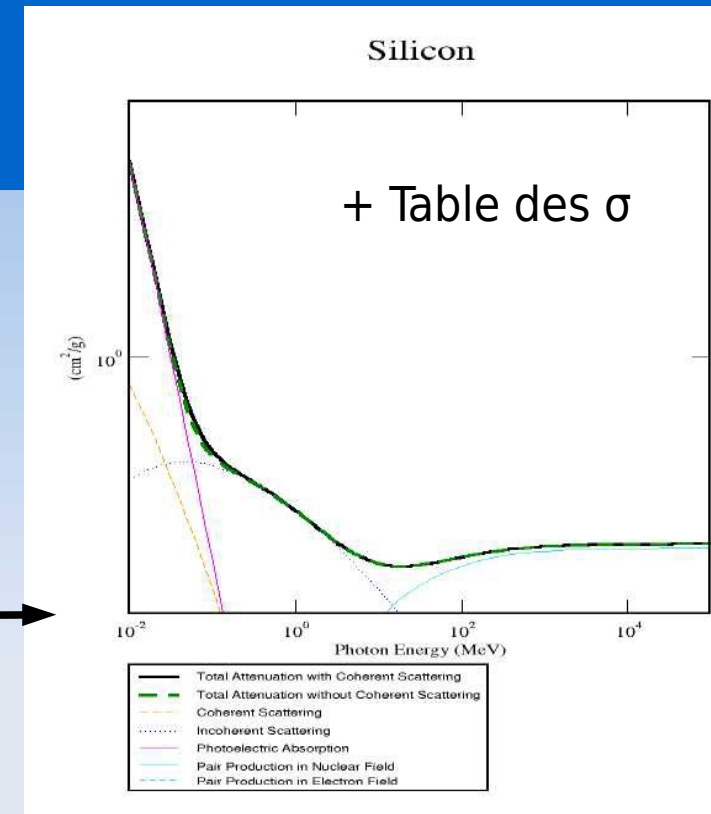
◆ X-COM : $\sigma_{\gamma}(E)$

◆ Calculs de range

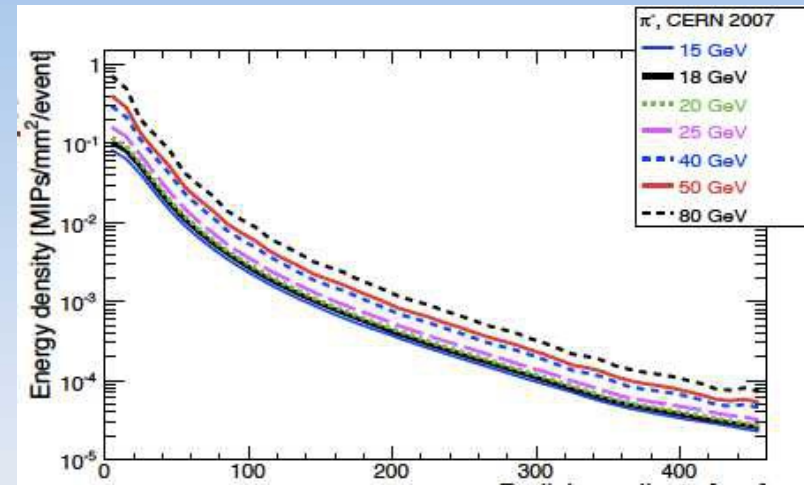
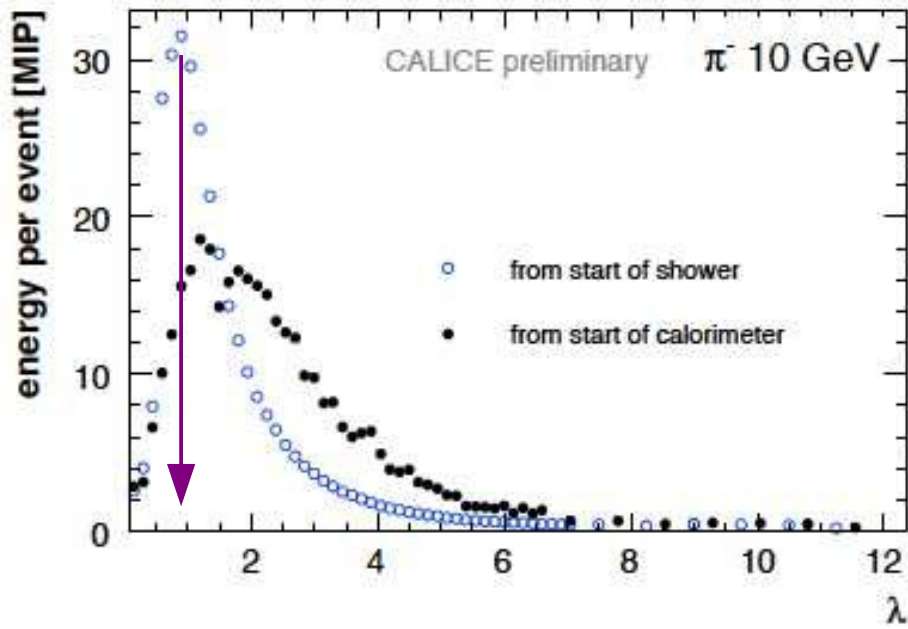
- estar : electrons
- pstar : protons
- astar : α

■ Nuclear properties

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

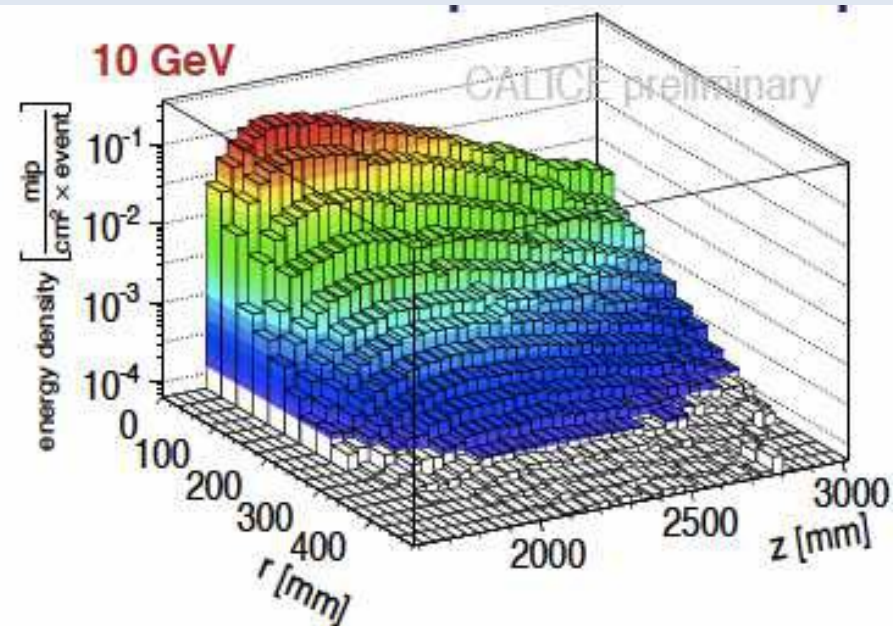


Profil des gerbes hadronique

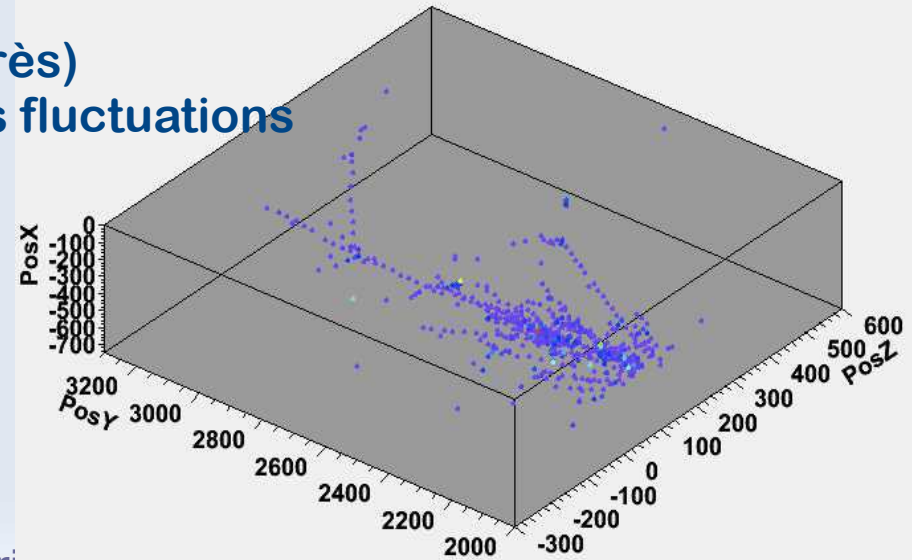


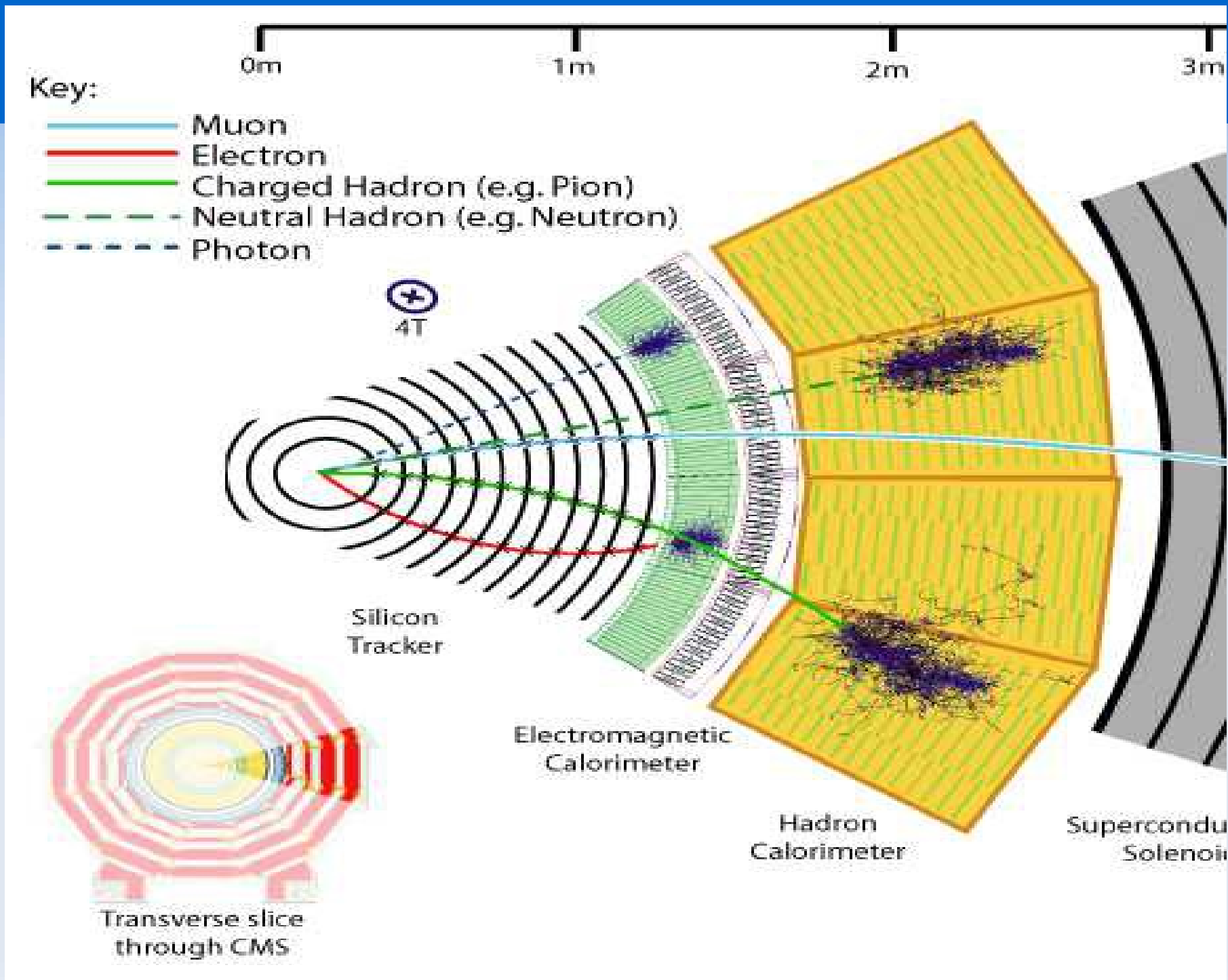
Gerbe Hadronique ~100 GeV à

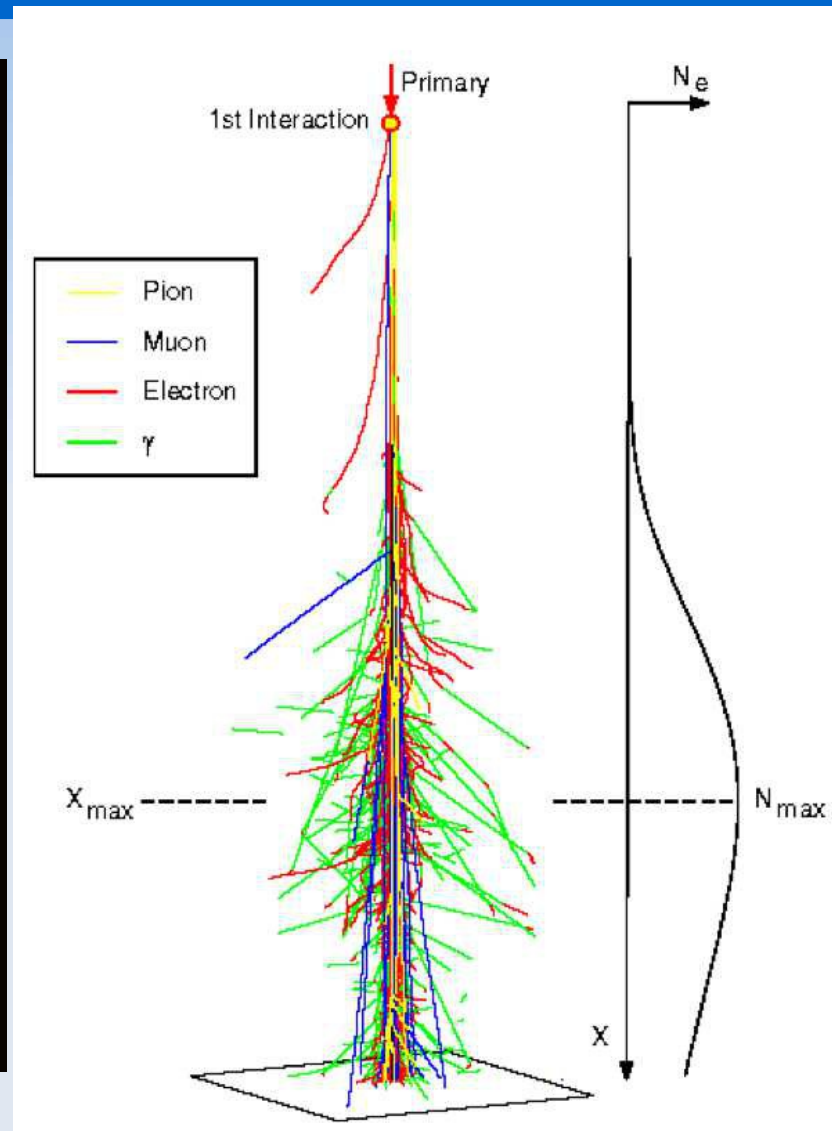
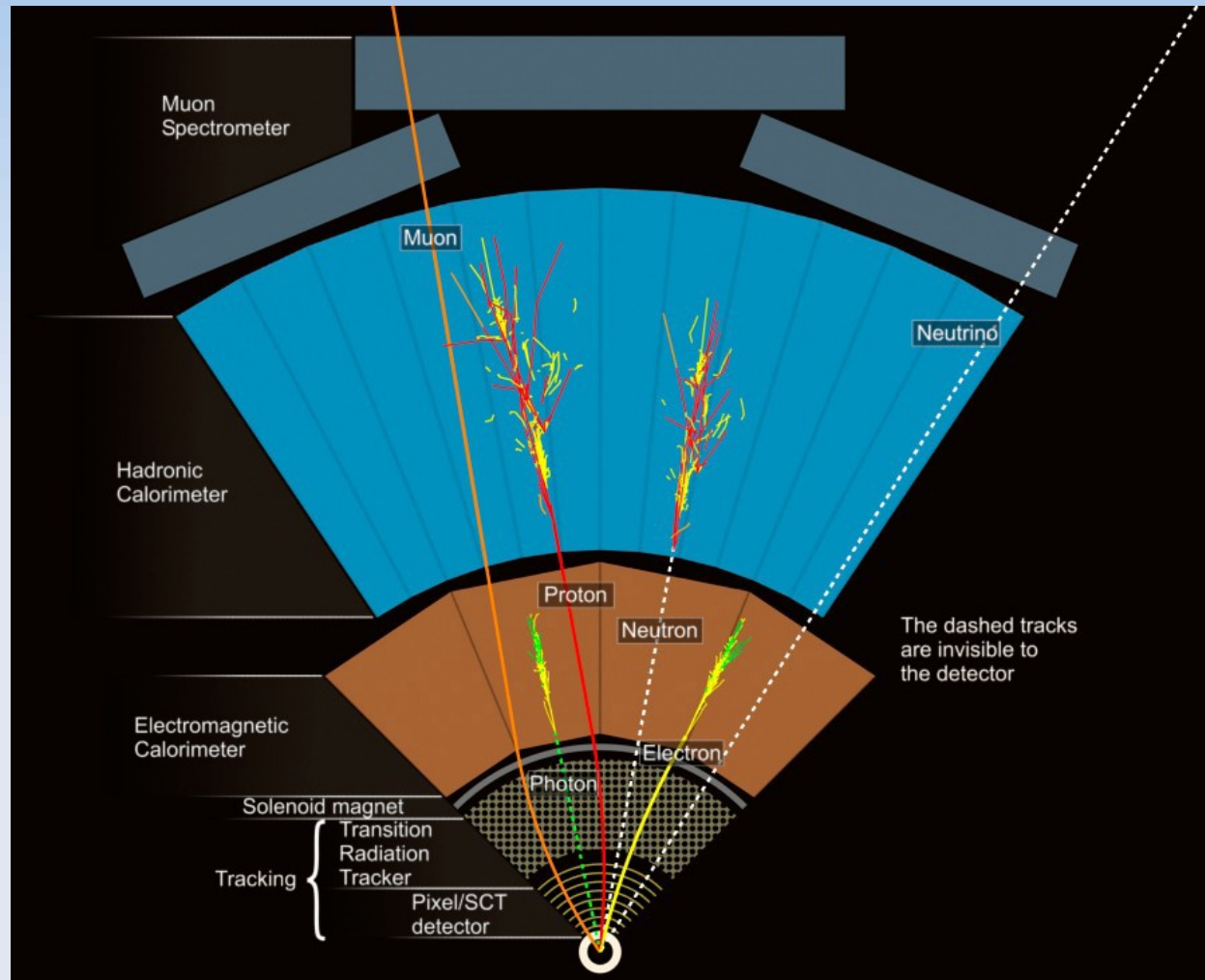
- longitudinalement : 95% dans $8 \lambda_{int}$
- latéralement : 95% dans $R \leq 1,5 \lambda_{int}$



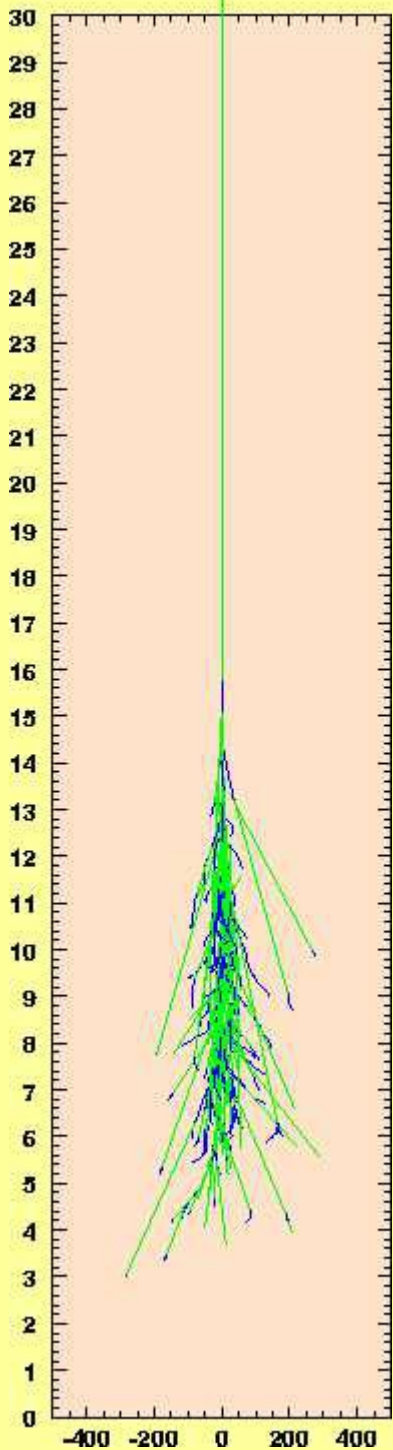
(très très)
Larges fluctuations



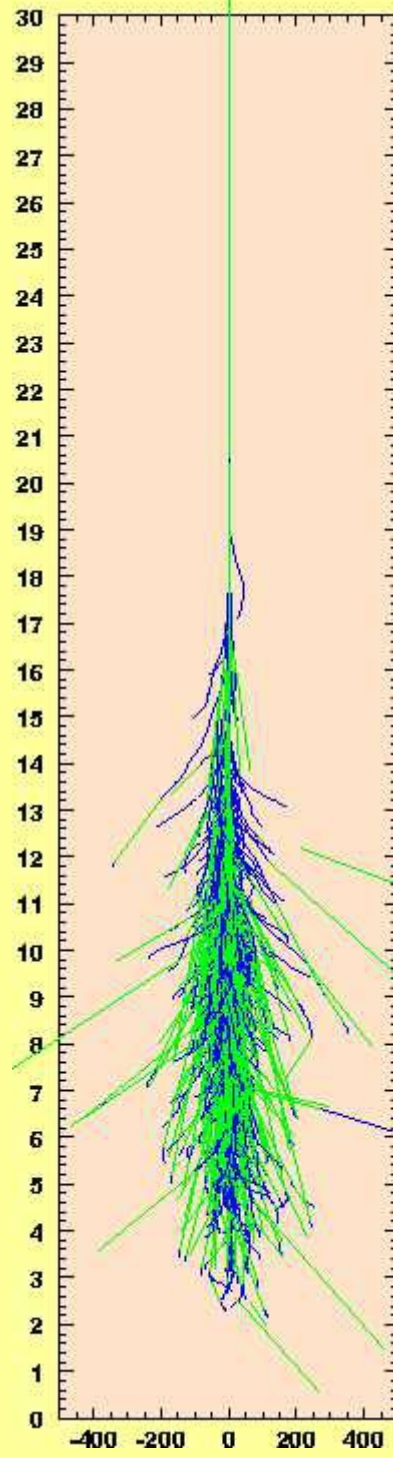




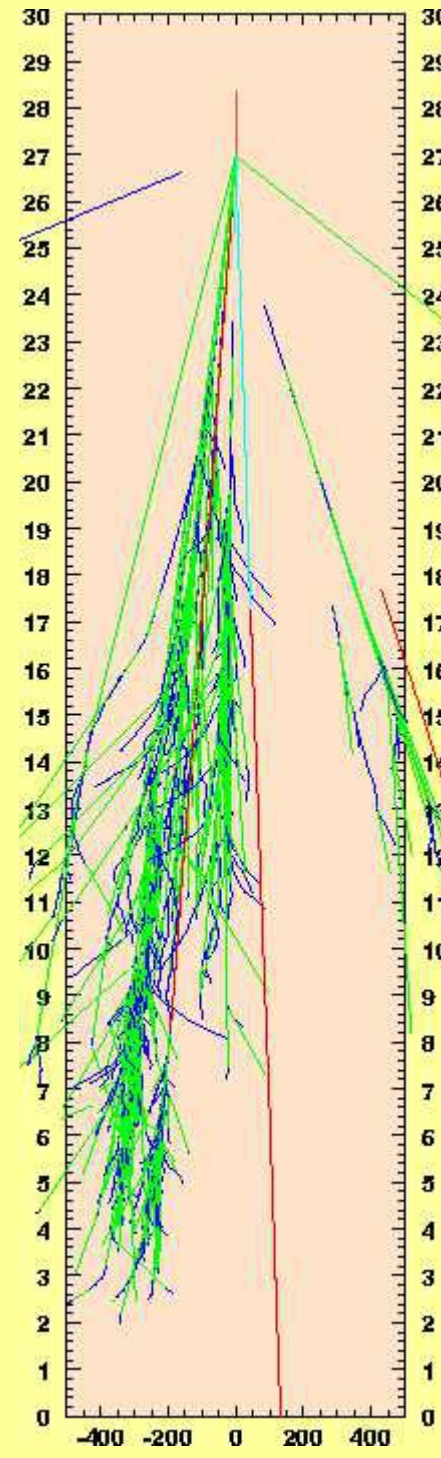
γ 50 GeV



γ 300 GeV



p 300 GeV



By courtesy of Mathieu de Naurois

Autopsie d'une gerbe hadronique

- Collisions dures

- ▶ production de secondaires

- ▶ populations

- ◆ $\sim 30\%$ π^+

- ◆ $\sim 30\%$ de π^-

- ◆ 30% π^0
→ 2γ

- + fragments de noyaux

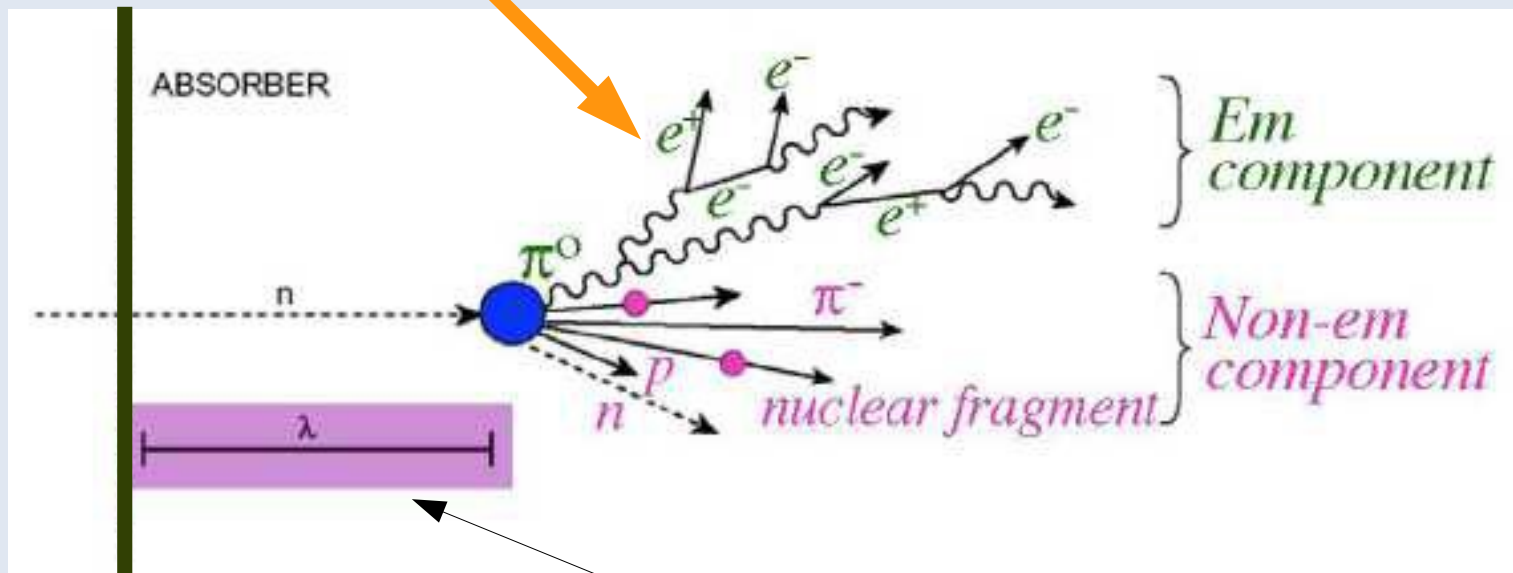
- ▶ neutrons rapides

- ▶ dés-excitations

- ◆ n

- ◆ γ

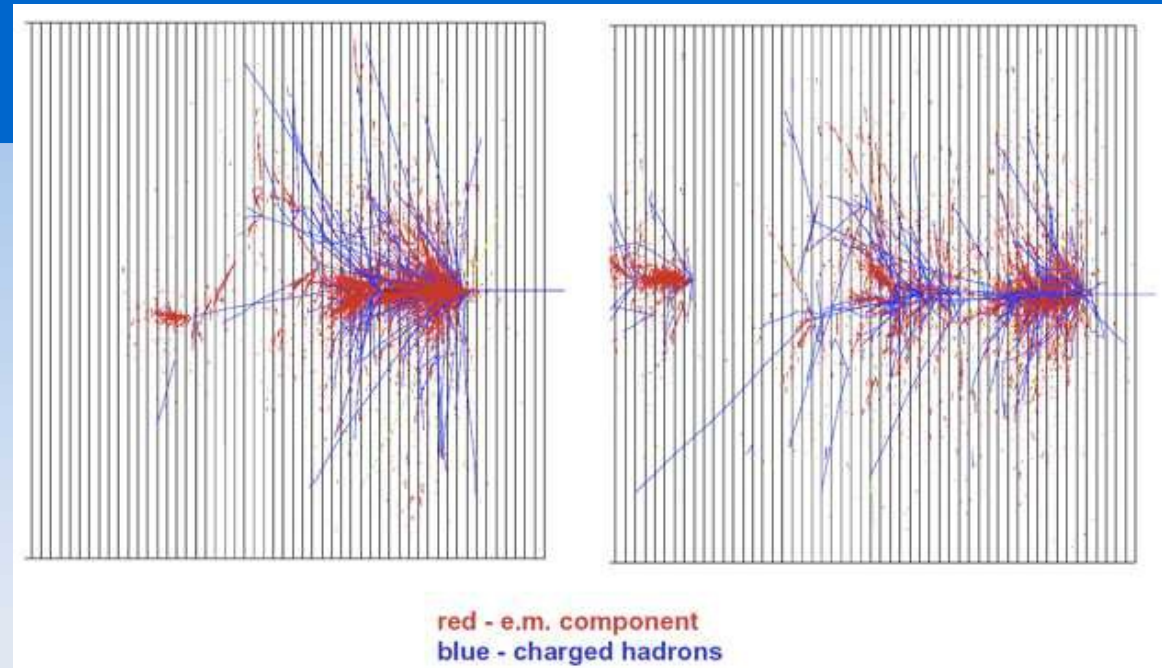
- ◆ α



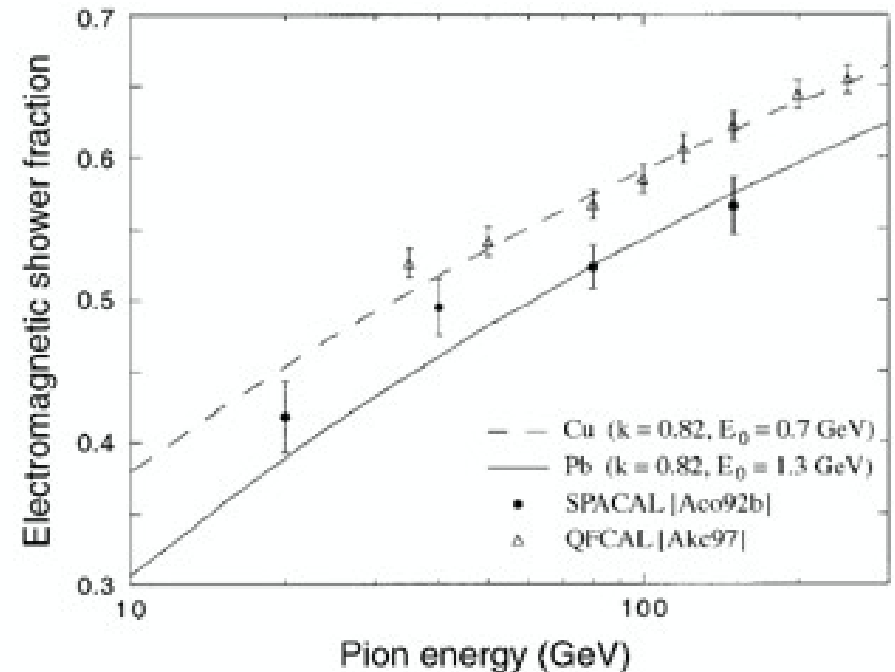
Longueur typique d'interaction

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 :

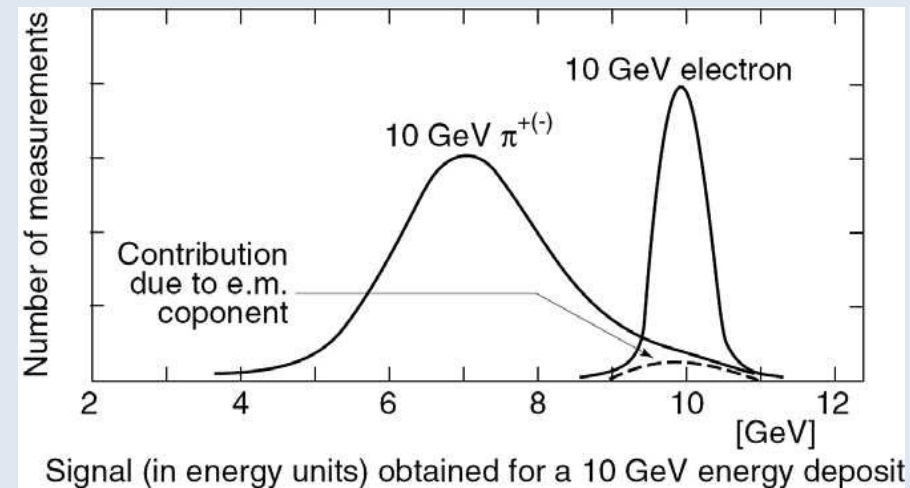
$$\begin{aligned} R_h &= \varepsilon_e E_e + \varepsilon_h E_h \\ &= (\varepsilon_e F_0 + \varepsilon_h (1-F_0)) E \end{aligned}$$

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



Bilan énergétique

- Résultats de simulations (par ex. FLUKA, GEANT4)

▶ basé sur des mesures de σ 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)

Composante neutronique secondaire

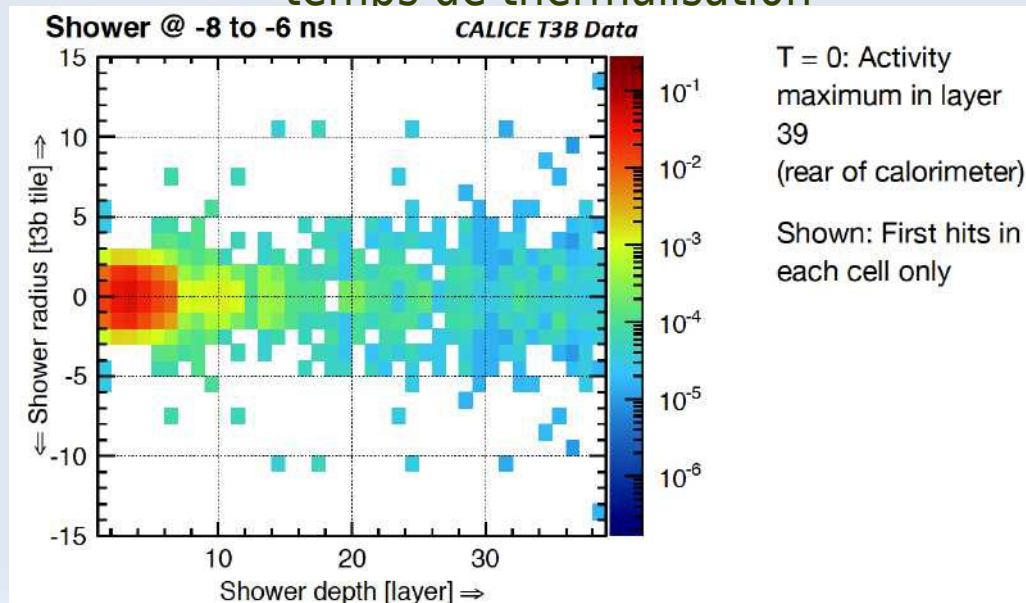
- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n
 - ◆ σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

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 ↗
à basse énergie

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

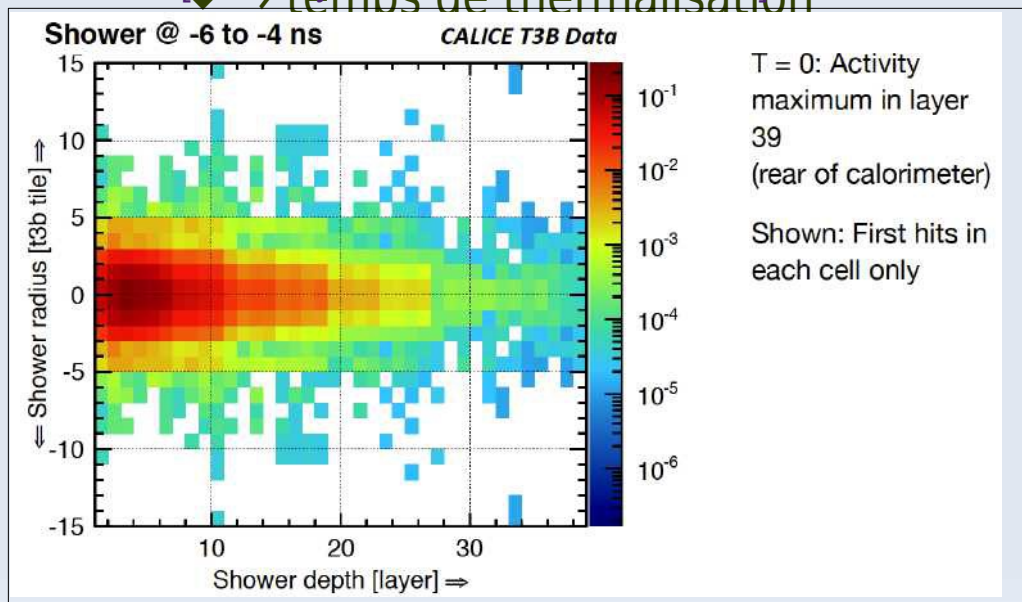


Composante neutronique secondaire

- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n

◆ σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

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

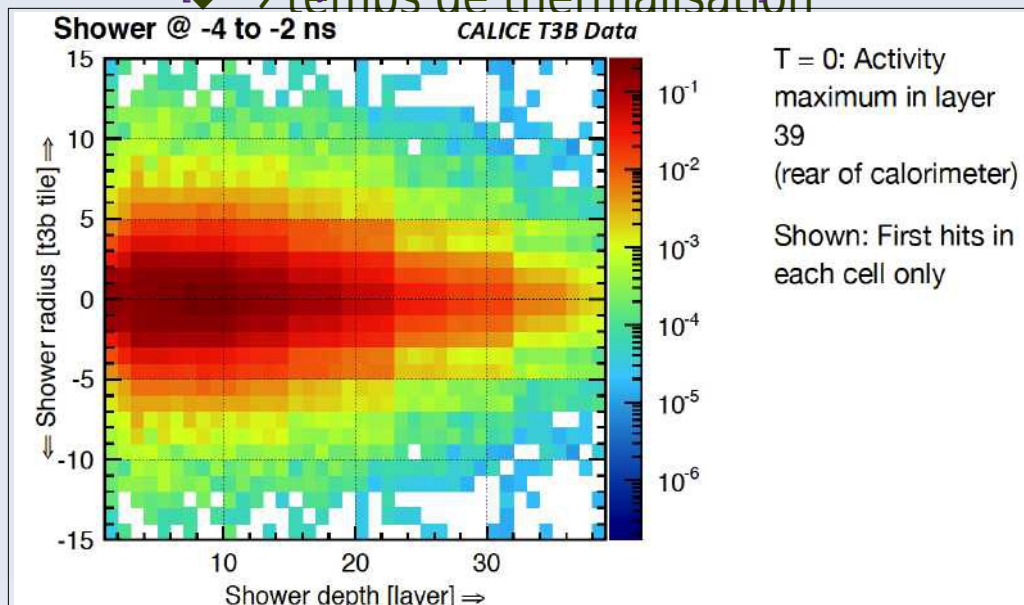


Composante neutronique secondaire

- 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

[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]
◆ \rightarrow temps de thermalisation



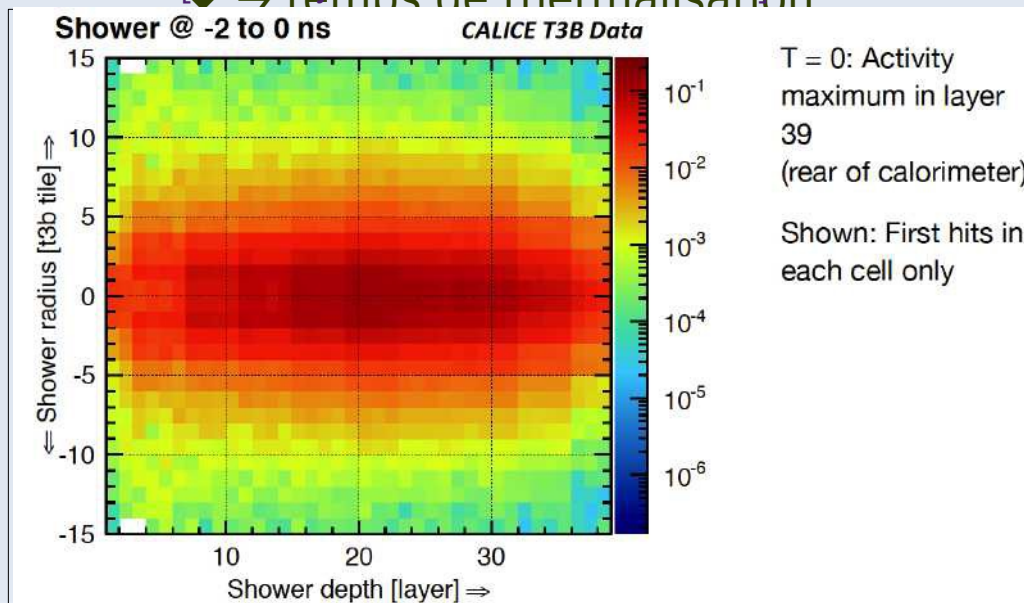
Composante neutronique secondaire

- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n

◆ σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

◆ → temps de thermalisation

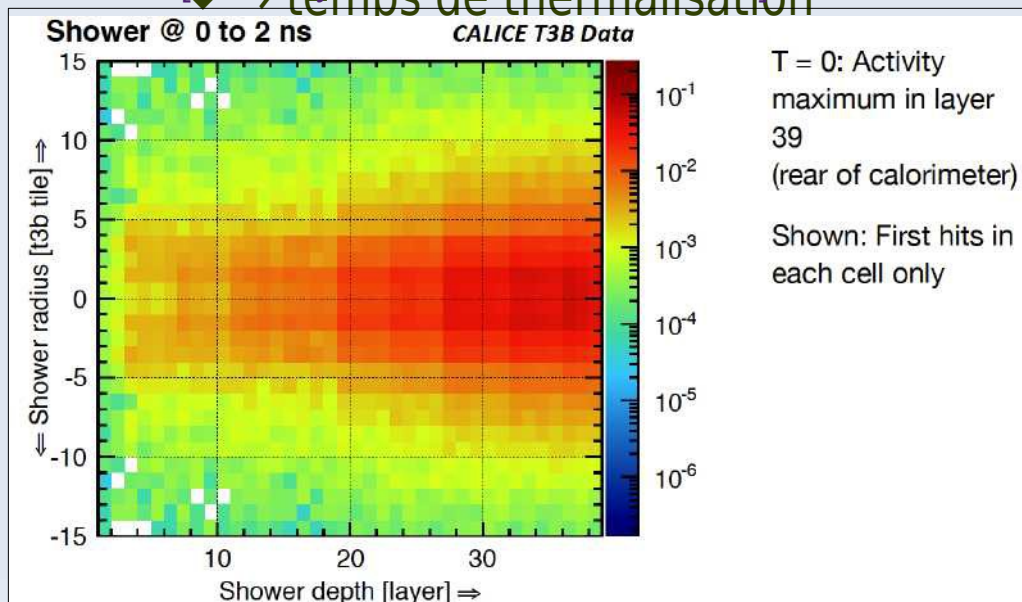


Composante neutronique secondaire

- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n

◆ σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

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

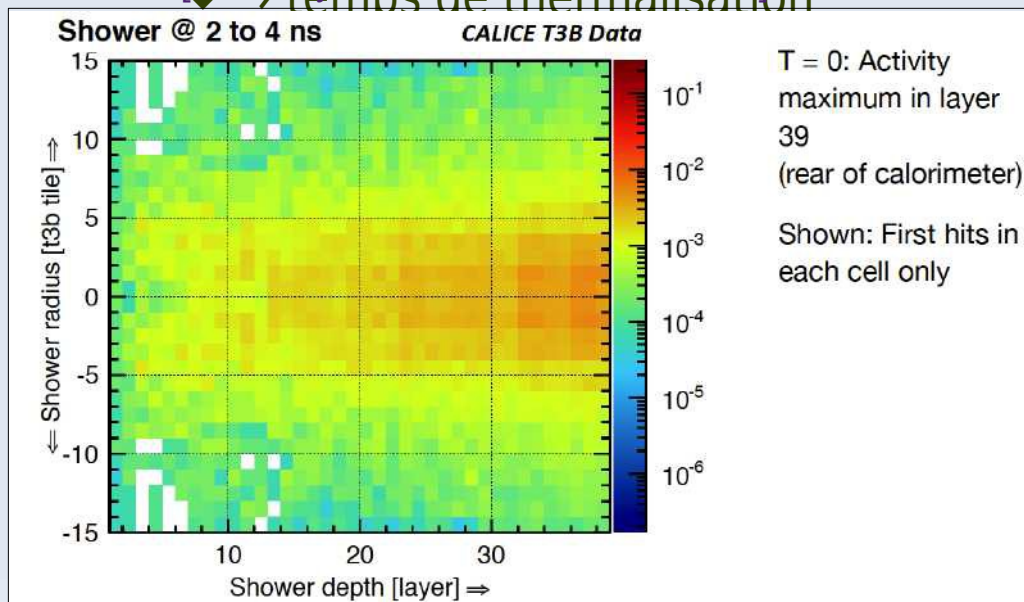


Composante neutronique secondaire

- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n
 - ◆ σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]

◆ → temps de thermalisation

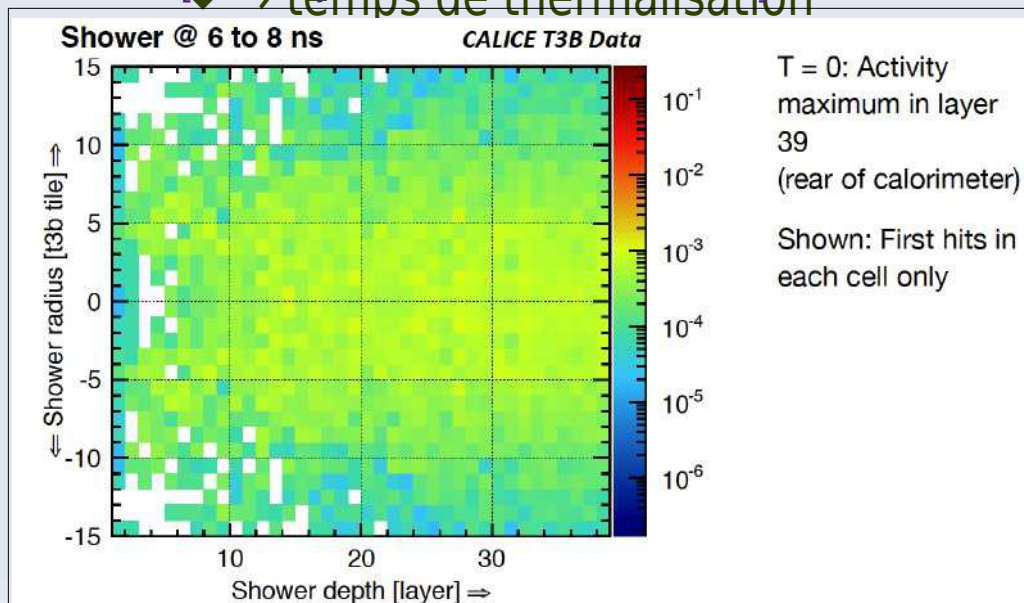


Composante neutronique secondaire

- 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

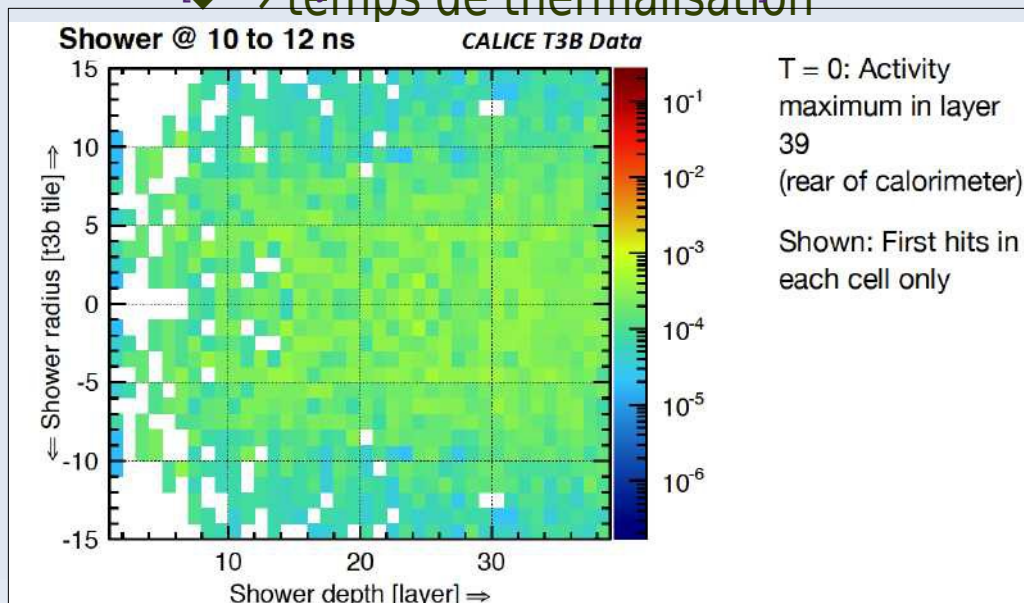
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]
◆ \rightarrow temps de thermalisation



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

[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]
◆ \rightarrow temps de thermalisation

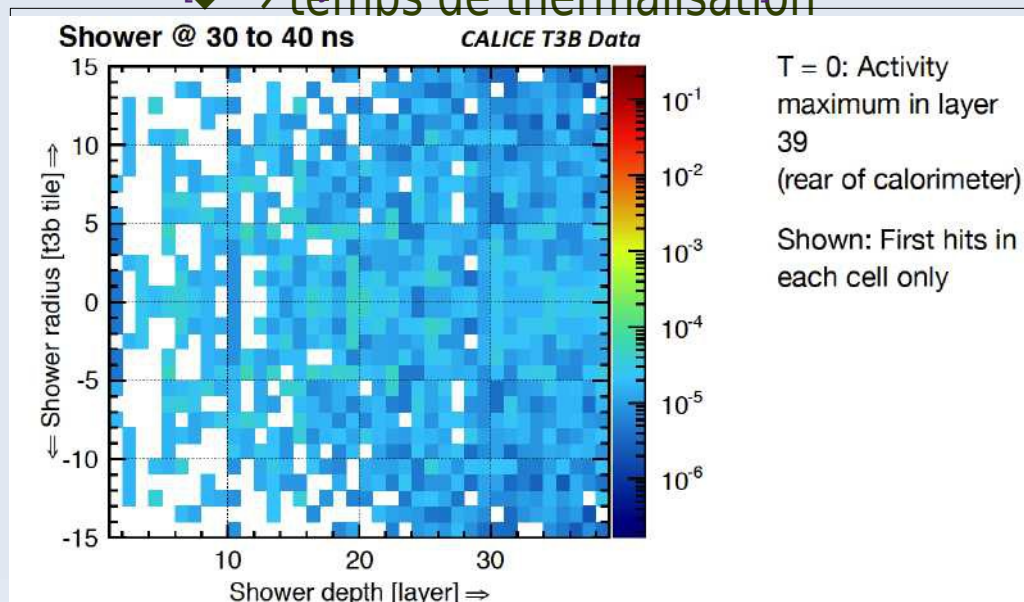


Composante neutronique secondaire

- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n

◆ σ_{eff} de capture ↗
à basse énergie

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

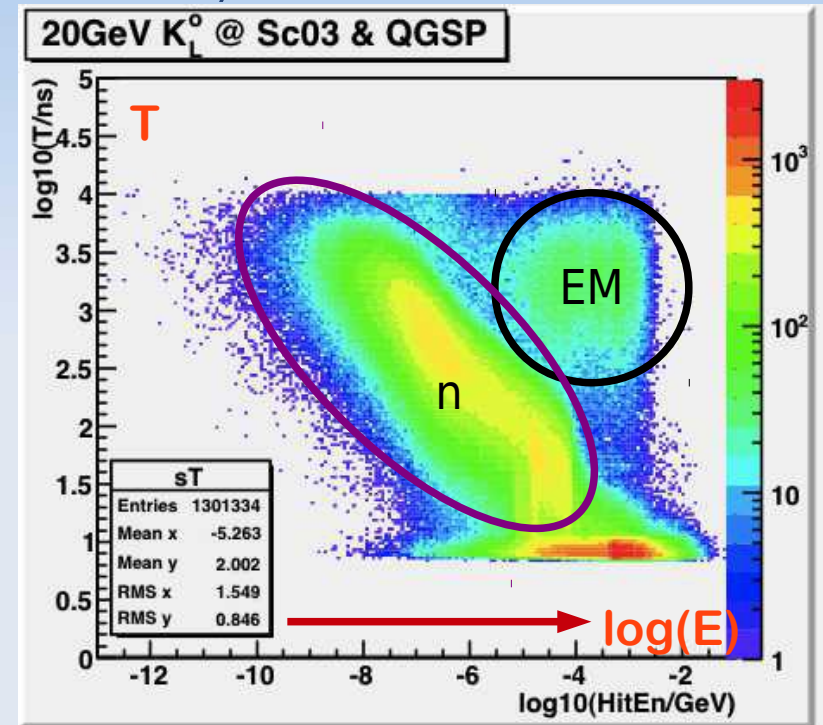
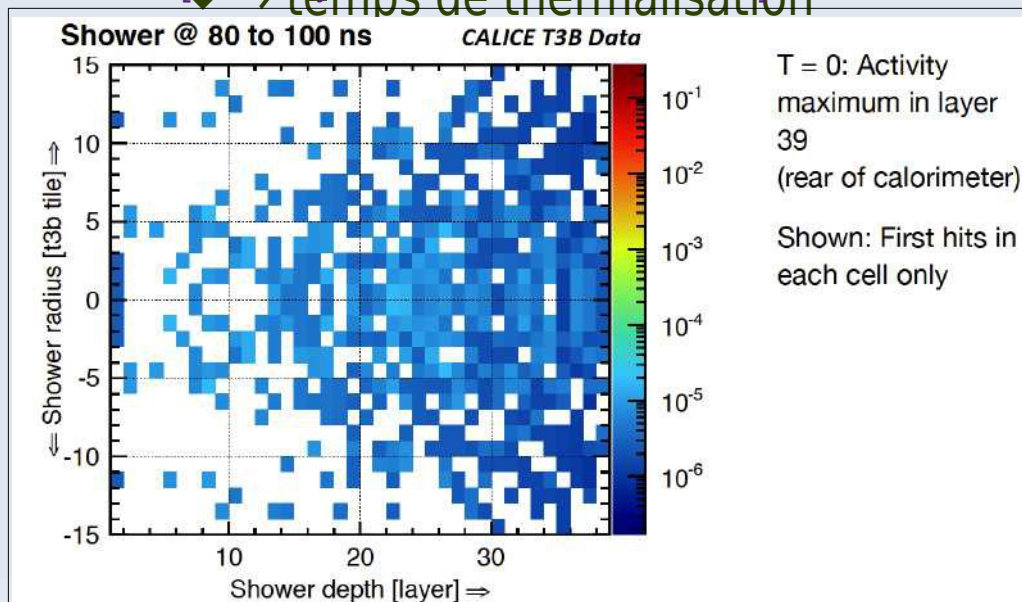


Composante neutronique secondaire

- 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

[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]
◆ \rightarrow temps de thermalisation

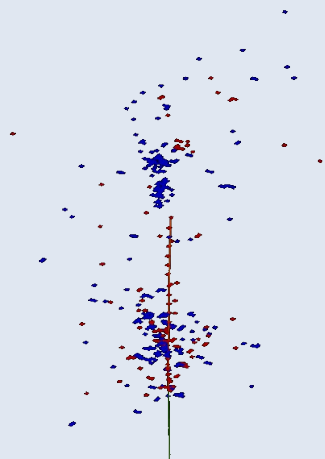


Composante neutronique secondaire

- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n

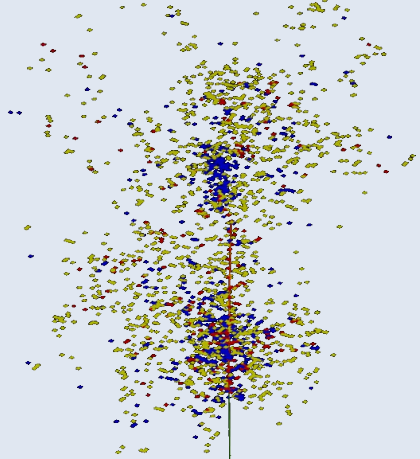
- ◆ σ_{eff} de capture \nearrow
à basse énergie
- ◆ \rightarrow temps de thermalisation

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1

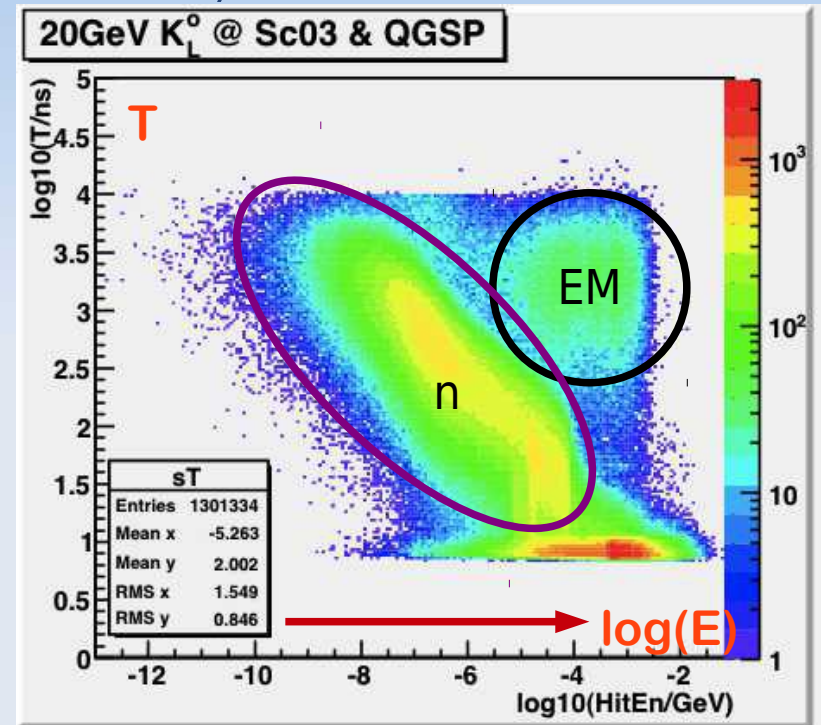


sans neutrons

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1



avec neutrons



[courtesy of M. Ruan, LLR]